

PAULO ELIAS CARNEIRO PEREIRA

**LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLOS DANOS NO
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL POR IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA USANDO KRIGAGEM
INDICADORA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

PAULO ELIAS CARNEIRO PEREIRA

**LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLOS DANOS NO MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL POR IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA USANDO KRIGAGEM INDICADORA**

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

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

Coorientador: Prof. Dr. José dos Reis V. de Moura Jr

UBERLÂNDIA - MG

2025

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

P436 Pereira, Paulo Elias Carneiro, 1990-
2025 Localização de múltiplos danos no monitoramento de integridade estrutural por Impedância Eletromecânica usando Krigagem Indicadora [recurso eletrônico] / Paulo Elias Carneiro Pereira. - 2025.

Orientador: Roberto Mendes Finzi Neto.
Coorientador: José dos Reis Vieira de Moura Júnior.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.711>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Finzi Neto, Roberto Mendes ,1974-, (Orient.). II. Moura Júnior, José dos Reis Vieira de ,1979-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanica.ufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 415, PPGEM				
Data:	04/12/2025	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:50
Matrícula:	12213EMC010				
Nome do Discente:	Paulo Elias Carneiro Pereira				
Título do Trabalho:	Localização de múltiplos danos no monitoramento de integridade estrutural por Impedância Eletromecânica usando Krigagem Indicadora				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de Sistemas Mecânicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Aplicação de Transdutores Piezelétricos em Sistemas Mecânicos para Monitoramento de Integridade Estrutural para Tanques de Armazenamento. CONVÊNIO: FEMEC.PETRO.0039.				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Júnior - UFU, Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - UFU, Prof. Dr. Antover Panazzolo Sarmento - UFCAT, Prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo - UFCAT e Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto - UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Roberto Mendes Finzi Neto, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

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

Aprovado.

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Mendes Finzi Neto**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/12/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antover Panazzolo Sarmento**, **Usuário Externo**, em 04/12/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/12/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Napoleão Rabelo**, **Usuário Externo**, em 04/12/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/12/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6829842** e o código CRC **F49F10DF**.

*À minha esposa, Roberta, e a toda a minha família, pela presença constante, paciência e apoio
incondicional ao longo do desenvolvimento deste trabalho.*

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pela força, orientação e por ter sempre me sustentado durante essa jornada. As experiências vividas neste processo certamente foram fundamentais para o crescimento pessoal e profissional.

À toda a minha família, em especial aos meus pais, Valdomiro e Maria Aparecida, e minha irmã, Daniela, pelo afeto e constante incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho. À minha esposa, Roberta, pelo amor, companheirismo e apoio que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Um agradecimento especial também à família de minha esposa, que me acolheu como a sua e ofereceu amor e incentivo nos momentos mais desafiadores. Aos meus tios João e Helena, e ao primo João Henrique pelo acolhimento e apoio durante a estadia em Uberlândia, MG, os quais foram igualmente fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto, pela valiosa supervisão, orientação e constante apoio dedicados à realização deste trabalho, bem como pelo companheirismo ao longo de todo o processo. Suas orientações precisas, ensinamentos compartilhados e exemplo profissional foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e científico, além de contribuírem significativamente para o meu crescimento pessoal.

Registro meu sincero agradecimento ao meu coorientador, Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior, pela amizade, apoio, orientação e ensinamentos compartilhados não apenas no âmbito deste trabalho, mas antes mesmo dos estágios iniciais dessa pesquisa. Seu incentivo, compreensão e orientação foram fundamentais, sobretudo nos momentos mais desafiadores, e certamente deixaram contribuições duradouras nos aspectos pessoal e profissional.

Gostaria de expressar minha gratidão à Profa. Simone Rodrigues C. Ruas, pelo apoio durante a realização dos experimentos, que foi fundamental para o bom andamento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela oportunidade de realizar esta pesquisa, pela reconhecida excelência

acadêmica que caracteriza o curso, e pelo ambiente de incentivo à produção científica e ao desenvolvimento profissional. Agradeço também a toda a equipe docente e administrativa, cujo suporte e dedicação contribuíram para o bom andamento deste trabalho.

Registro também meus sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Catalão (UFCAT) pelo afastamento concedido para a realização do doutorado na UFU, que foi fundamental para a conclusão desta pesquisa. Agradeço ainda à instituição pelo apoio institucional, incentivo à formação acadêmica e pela confiança depositada, que possibilitaram o desenvolvimento pleno deste trabalho.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho. Cada orientação, gesto de apoio e palavra de incentivo foi essencial ao longo desta trajetória.

PEREIRA, P. E. C., Localização de múltiplos danos no monitoramento de integridade estrutural por Impedância Eletromecânica usando Krigagem Indicadora. 2025. 202 f.
Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

A localização de danos em sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) constitui uma etapa crítica, pois fornece as informações essenciais para intervenções precisas no sistema monitorado. Embora diversas metodologias baseadas no método de Impedância Eletromecânica (IEM) tenham sido propostas, a identificação de múltiplos danos simultâneos permanece pouco explorada, sobretudo em estruturas de geometria complexa. Neste contexto, esta pesquisa propõe um *framework* fundamentado na Krigagem Indicadora (KI) para a localização de múltiplos danos a partir de informações obtidas pelo método IEM. Duas estruturas são investigadas: uma com geometria simples, e outra com geometria complexa, a última representando um cenário inédito de aplicação da abordagem. Três estratégias distintas de seleção do intervalo de frequência são avaliadas, e os resultados foram analisados de forma integrativa e comparativa com metodologias recentes. Os resultados evidenciam o potencial da KI como ferramenta promissora para a localização robusta de múltiplos danos, apontando direções relevantes para o avanço de soluções aplicáveis em contextos industriais.

Palavras-chave: Monitoramento de Integridade Estrutural. Impedância Eletromecânica. Krigagem Indicadora. Localização de dano. Estrutura aeronáutica.

PEREIRA, P. E. C., **Multiple damage localization in structural health monitoring by Electromechanical Impedance with Indicator Kriging.** 2025. 202 f. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

Damage localization in Structural Health Monitoring (SHM) systems is a critical step, as it provides the essential information necessary for accurate interventions in the monitored system. Despite the development of several Electromechanical Impedance (EMI)-based methodologies, the identification of multiple damages remains largely unexplored, particularly in geometrically complex structures. In this context, this research proposes an Indicator Kriging (IK)-rooted framework for multi-damage location based on information derived from the EMI method. In order to illustrate the proposed approach, the present study investigates two structures: one with a basic geometry and another with a complex geometry. The latter represents an unprecedented scenario for applying the approach. Three distinct strategies for frequency interval selection are evaluated, and the results are analyzed in an integrative and comparative manner with recent methodologies. The findings underscore the potential of IK as a promising tool for robust localization of multiple damages, thereby pointing to relevant directions for the advancement of solutions applicable in real-scale industrial contexts.

Keywords: Structural Health Monitoring. Electromechanical Impedance. Indicator Kriging. Damage localization. Aircraft structure.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Assinaturas de resistência nas condições intacta e com dano.	7
3.1	Exemplo de um semivariograma experimental.	21
3.2	Principais modelos teóricos utilizados nos ajustes de semivariogramas experimentais (a) e parâmetros que caracterizam um modelo teórico de semivariograma (b).	22
3.3	Fluxograma conceitual das etapas metodológicas envolvidas no estabelecimento dos modelos de probabilidade de danos por meio da KI.	24
3.4	Exemplo de um arquivo TXT com formatação no padrão Geo-EAS. Os números na cor verde à esquerda indicam a numeração das linhas.	32
4.1	Placa de alumínio: (a) desenho esquemático com o arranjo das pastilhas piezelétricas e (b) exemplar experimental com identificação das pastilhas e posições das porcas.	37
4.2	Equipamentos empregados na aquisição das assinaturas da placa de alumínio: (a) câmara térmica; (b–c) <i>notebook</i> e analisador de impedância SySHM; (d) placa de alumínio no interior da câmara térmica.	39
4.3	Fluxograma das etapas realizadas para a obtenção dos mapas de probabilidade de danos a partir dos dados coletados da placa de alumínio.	40
4.4	(a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica referentes ao experimento da placa de alumínio; (b) <i>boxplot</i> da frequência central desses intervalos.	43

4.5	(a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados em frequências elevadas – ponderação proporcional à frequência – na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica referentes ao experimento da placa de alumínio; (b) <i>boxplot</i> da frequência central desses intervalos.	44
4.6	Intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano em cada condição estrutural investigada referente ao experimento da placa de alumínio.	46
4.7	(a) <i>Boxplots</i> dos centros dos intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano nas condições estruturais investigadas, referentes à placa de alumínio e (b) <i>boxplots</i> das amplitudes dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem fundamentada na sensibilidade ao dano, em todas as condições estruturais analisadas.	47
4.8	Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos, referentes ao experimento da placa de alumínio.	50
4.9	Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos.	51
4.10	Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos priorizando altas frequências do espectro analisado, referentes ao experimento da placa de alumínio.	53
4.11	Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos priorizando altas frequências do espectro analisado.	54

4.12	Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na máxima sensibilidade ao dano, referentes ao experimento da placa de alumínio.	57
4.13	Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da máxima sensibilidade ao dano.	58
4.14	<i>Boxplots</i> dos valores de CCD das pastilhas piezelétricas obtidos em cada abordagem para seleção de intervalos de frequência, em cada condição de dano, no experimento da placa de alumínio.	61
4.15	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos.	64
4.16	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos em altas frequências.	66
4.17	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na sensibilidade ao dano.	67
4.18	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição de uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	73
4.19	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	74

4.20	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	76
4.21	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	78
4.22	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	80
4.23	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	82
4.24	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80. . . .	84
4.25	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	87
4.26	Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.	89

5.1	Painel aeronáutico de alumínio utilizado em uma das investigações experimentais. (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva; e (c) vista frontal.	92
5.2	Vista frontal com detalhe da porção central do painel aeronáutico com a identificação das pastilhas piezelétricas e as posições das porcas adicionadas.	93
5.3	Fluxograma das etapas empregadas para a obtenção dos modelos de probabilidade de danos no contexto do painel aeronáutico.	94
5.4	Distribuição estatística das temperaturas registradas para cada transdutor nos ensaios conduzidos no painel aeronáutico.	96
5.5	(a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica, referentes ao experimento do painel aeronáutico; (b) <i>boxplot</i> da frequência central desses intervalos.	97
5.6	(a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados em frequências elevadas – ponderação proporcional à frequência – na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica, referente ao experimento do painel aeronáutico; (b) <i>boxplot</i> da frequência central desses intervalos.	98
5.7	Intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano em cada condição estrutural investigada no painel aeronáutico.	100
5.8	(a) <i>Boxplots</i> dos centros dos intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano nas condições estruturais investigadas no painel aeronáutico, e (b) <i>boxplots</i> das amplitudes desses intervalos de frequência.	101
5.9	Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos, referentes ao experimento do painel aeronáutico.	102
5.10	Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na densidade de picos.	103

5.11	Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos com ênfase em altas frequências, referentes ao experimento do painel aeronáutico.	104
5.12	Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências.	105
5.13	Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano, referentes ao experimento do painel aeronáutico.	107
5.14	Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na sensibilidade ao dano.	108
5.15	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos.	111
5.16	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos em altas frequências.	112
5.17	Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na sensibilidade ao dano.	113
5.18	Vista frontal do painel aeronáutico com os marcadores utilizados para o escaneamento 3D (a), resultando em uma representação por meio de nuvem de pontos (b). Detalhe da região da janela com os marcadores (c), e correspondente reconstrução digital no modelo (d).	115

5.19 Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.	119
5.20 Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada no número de picos.	120
5.21 Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.	122
5.22 Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada no número de picos em altas frequências.	123
5.23 Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.	125
5.24 Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com duas porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.	126
5.25 Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.	127

5.26	Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.	128
5.27	Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com quatro porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.	129
5.28	Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com quatro porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.	130
6.1	Mediana das distâncias euclidianas para a placa de alumínio em todas as condições de dano: (a) com uma porca; (b) com duas porcas; e (c) com três porcas. .	133
A.1	Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os resultados se referem à placa de alumínio.	151
A.2	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas na placa de alumínio.	152
A.3	Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados se referem à placa de alumínio.	153
A.4	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas na placa de alumínio.	154
A.5	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com uma única porca.	155

A.6	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com uma única porca.	156
A.7	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com duas porcas.	157
A.8	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com duas porcas.	158
A.9	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com três porcas.	159
A.10	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com três porcas.	160
B.1	Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os resultados se referem ao painel aeronáutico.	162
B.2	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas no painel aeronáutico.	163
B.3	Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados se referem ao painel aeronáutico.	164
B.4	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas no painel aeronáutico.	165
B.5	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com uma única porca.	166

B.6	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com uma única porca.	167
B.7	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com duas porcas.	168
B.8	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com duas porcas.	169
B.9	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com três porcas.	170
B.10	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com três porcas.	171
B.11	Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com quatro porcas.	172
B.12	Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com quatro porcas.	173

LISTA DE TABELAS

2.1	Inventário das abordagens empregadas na localização de múltiplos danos e as respectivas estruturas investigadas.	15
4.1	Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na densidade de picos.	64
4.2	Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências.	66
4.3	Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na sensibilidade ao dano.	68
4.4	Parâmetros utilizados para a geração do modelo de células adotado para o experimento da placa de alumínio.	69
5.1	Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas no painel aeronáutico, considerando a seleção de intervalos baseada na sensibilidade ao dano.	113
5.2	Parâmetros da grade regular tridimensional gerada a partir do método <code>ImageData</code> do PyVista para armazenar informações da geometria do painel aeronáutico. . .	116
5.3	Parâmetros da grade regular adotada no <code>ik3d</code> para a obtenção dos modelos preditivos do painel aeronáutico.	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

nx Número de células ou blocos na direção X

ny Número de células ou blocos na direção Y

nz Número de células ou blocos na direção Z

vx Número de vértices na direção X

vy Número de vértices na direção Y

vz Número de vértices na direção Z

$xorig$ Origem do modelo na direção X

$xsiz$ Dimensão de uma célula ou bloco na direção X

$yorig$ Origem do modelo na direção Y

$ysiz$ Dimensão de uma célula ou bloco na direção Y

$zorig$ Origem do modelo na direção Z

$zsiz$ Dimensão de uma célula ou bloco na direção Z

1D-CNN *One-Dimensional Convolutional Neural Network* (Rede Neural Convolucional Unidimensional)

2D Bidimensional

3D Tridimensional

ANN *Artificial Neural Network* (Rede Neural Artificial)

ANSI *American National Standards Institute*

CCD *Correlation Coefficient Deviation* (Desvio do Coeficiente de Correlação)

DWT *Discrete Wavelet Transformation* (Transformada Wavelet Discreta)

ELM *Extreme Learning Machine* (Aprendizado Extremo)

Geo-EAS *Geostatistical Environmental Assessment Software*

IEM Impedância Eletromecânica

IQR *Interquartile Range* (Intervalo Interquartil)

KI Krigagem Indicadora

KO Krigagem Ordinária

KS Krigagem Simples

LMest Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannus Reis”

MAD *Median Absolute Deviation* (Desvio Absoluto da Mediana)

MAE *Mean Absolute Error* (Erro Absoluto Médio)

MAPD *Mean Absolute Percentage Deviation* (Desvio Percentual Absoluto Médio)

ML *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina)

MOPSO *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (Otimização por Nuvem de Partículas Multi-Objetivo)

PZT *lead zirconate titanate*

RMSD *Root Mean Square Deviation* (Raiz do Desvio Quadrático Médio)

RMSE *Root Mean Squared Error* (Raiz do Erro Quadrático Médio)

SGeMS *Stanford Geostatistical Modeling Software*

SGS *Sequential Gaussian Simulation* (Simulação Sequencial Gaussiana)

SHM *Structural Health Monitoring* (Monitoramento da Integridade Estrutural)

SVM *Support Vector Machine* (Máquina de Vetores de Suporte)

UFU Universidade Federal de Uberlândia

$\gamma(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{u})$ Semivariograma entre uma amostra no ponto \mathbf{x}_α e o valor a ser estimado no ponto \mathbf{u} do espaço

$\gamma(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta)$ Semivariograma entre duas amostras nos pontos \mathbf{x}_α e \mathbf{x}_β do espaço

$\gamma(h)$ Semivariograma ou semivariância

$\lambda_\alpha(\mathbf{u})$ Ponderador de uma amostra no ponto α em relação ao ponto \mathbf{u} a ser estimado

μ_{\max} Limite superior do intervalo de confiança para a média

σ_{\max} Limite superior do intervalo de confiança para o desvio padrão

\mathbf{u} Ponto não amostrado \mathbf{u} do espaço

h Distância (vetor)

a alcance variográfico

C Patamar

C_0 Efeito Pepita

c_i Ponderador proporcional à frequência aplicado ao i -ésimo segmento de uma assinatura

D Classe ou categoria

E Esperança Matemática

$f(D)$ Frequência absoluta de uma categoria D

I Variável Indicadora

I_c Probabilidade acima do limiar de corte

I_{KS}^* Variável Indicadora estimada pelo estimador de Krigagem Simples

LI Limite Inferior

LS Limite Superior

n Número total de observações

$N(h)$ Número de pares de amostras

NP_i Número de picos associado ao i -ésimo segmento de uma assinatura

$P(D)$ Proporção de uma categoria D

p_0 Média global de uma variável indicadora no contexto da Krigagem Simples

$P_M(p)$ Probabilidade Marginal de um limiar referente ao um percentil p

$Q1$ Primeiro Quartil

$Q3$ Terceiro Quartil

R Assinatura da parte real da Impedância

S_i Pontuação (*score*) aplicada ao i -ésimo segmento de uma assinatura

T_{PZT} Limiar de detecção de um PZT

$Z(\mathbf{x})$ Variável Z em um ponto \mathbf{x} do espaço

z_k Patamar de corte

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xviii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xx
I INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos e contribuições do trabalho	2
1.2 Organização da tese	3
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Fundamentos do método IEM	5
2.2 Avanços na Localização de Danos por IEM	7
2.2.1 Localização de um único dano	8
2.2.2 Localização de múltiplos danos	13
2.2.3 Síntese das abordagens desenvolvidas	14
III METODOLOGIA PROPOSTA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS	17
3.1 Fundamentos Teóricos da KI	17
3.1.1 Formulação de variáveis indicadoras	17
3.1.2 Modelagem da continuidade espacial por semivariogramas	19
3.1.3 Obtenção de estimativas por KI	22
3.2 Sequência Metodológica Baseada na KI	24
3.2.1 Pré-processamento dos dados	24
3.2.2 Seleção do Intervalo de Frequência	26
3.2.2.1 Abordagem baseada na densidade de picos	27

3.2.2.2	Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências	28
3.2.2.3	Abordagem baseada na sensibilidade ao dano	28
3.2.3	Detecção de danos	29
3.2.4	Localização de Danos por KI	31
3.2.4.1	Preparação dos dados	31
3.2.4.2	Análise exploratória e da continuidade espacial	32
3.2.4.3	Elaboração dos modelos preditivos	33
IV	INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL: APLICAÇÃO DA KI EM ESTRUTURA SIMPLES	36
4.1	Procedimento Experimental	36
4.2	Pré-Processamento dos Dados Coletados	40
4.3	Seleção do Intervalo de Frequência	42
4.3.1	Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos	42
4.3.2	Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências	43
4.3.3	Seleção dos intervalos baseada na sensibilidade ao dano	45
4.4	Detecção dos danos	48
4.4.1	Abordagem baseada na densidade de picos	49
4.4.2	Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências	52
4.4.3	Abordagem baseada na sensibilidade ao dano	56
4.4.4	Análise Integrada dos Resultados	60
4.5	Localização dos Danos por KI	62
4.5.1	Procedimentos para Preparação dos Dados	62
4.5.2	Análise Estrutural por meio de Semivariogramas	63
4.5.3	Desenvolvimento e Análise dos Modelos Preditivos	68
4.5.3.1	Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos . .	71
4.5.3.2	Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos em altas frequências	77
4.5.3.3	Resultados da abordagem da sensibilidade ao dano	83
V	INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL: APLICAÇÃO DA KI EM ESTRUTURA COMPLEXA	91

5.1	Procedimento Experimental	91
5.2	Pré-Processamento dos Dados Coletados	95
5.3	Seleção do intervalo de frequência	97
5.3.1	Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos	97
5.3.2	Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências	98
5.3.3	Seleção dos intervalos baseada na sensibilidade ao dano	99
5.4	Detecção dos danos	101
5.4.1	Abordagem baseada na densidade de picos	102
5.4.2	Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências	104
5.4.3	Abordagem baseada na sensibilidade ao dano	106
5.5	Localização dos Danos por KI	109
5.5.1	Procedimentos para Preparação dos Dados	109
5.5.2	Análise Estrutural por meio de Semivariogramas	109
5.5.3	Desenvolvimento e Análise dos Modelos Preditivos	114
5.5.3.1	Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos . .	119
5.5.3.2	Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos em altas frequências	121
5.5.3.3	Resultados obtidos pela abordagem da sensibilidade ao dano	124
VI	AVALIAÇÃO INTEGRATIVA DOS MODELOS	132
VII	CONCLUSÕES	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		138
A	INTERVALOS DE FREQUÊNCIA: PLACA DE ALUMÍNIO	150
B	INTERVALOS DE FREQUÊNCIA: PAINEL AERONÁUTICO	161

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os sistemas de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM) desempenham um papel fundamental na garantia da confiabilidade e segurança de estruturas de engenharia, por possibilitarem a avaliação em tempo real de seu estado. As informações provenientes desses sistemas viabilizam a detecção precoce de danos (*e.g.*, trincas e desgaste por corrosão) que possam comprometer a segurança e a integridade dessas estruturas, prevenindo, portanto, a ocorrência de incidentes catastróficos (DJEMANA; HRAIRI; AL JEROUDI, 2017; ANTUNES *et al.*, 2019; BARAL *et al.*, 2023).

Ademais, a implementação desses sistemas torna mais eficiente as estratégias de manutenção ao permitir a alocação inteligente e otimizada de recursos, contribuindo para a redução de custos operacionais e de manutenção (CAO; QI; TANG, 2018; ZHU *et al.*, 2021).

Dentre as técnicas empregadas no contexto de SHM, o método de impedância eletromecânica (IEM) tem-se mostrado altamente eficaz na detecção de danos em sistemas de engenharia (NGUYEN *et al.*, 2023; YU *et al.*, 2023; DU *et al.*, 2023a; DU *et al.*, 2023b; LIAO *et al.*, 2026). No método são empregadas pastilhas de cerâmica piezelétrica, principalmente aquelas constituídas de titanato zirconato de chumbo (lead zirconate titanate, PZT), fixadas ou no interior da estrutura, resultando em um monitoramento contínuo não invasivo, de baixo custo, e de fácil instalação (CHERRIER *et al.*, 2013; HE *et al.*, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2021; SIKDAR *et al.*, 2022; AI *et al.*, 2022; SINGH; PARIHAR; SHANKER, 2025).

Além disso, a operação em frequências elevadas, da ordem de centenas de kHz, permite o mapeamento de modos elevados de vibração (NAIDU; SOH, 2004; FAN; LI, 2020). Essa característica resulta em uma alta sensibilidade às alterações produzidas nos parâmetros dinâmicos da estrutura monitorada, permitindo, consequentemente, a detecção de danos incipientes (KIM; WANG, 2019; SOMAN *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2021; ANGELI *et al.*, 2024), o que permite a tomada de decisão em tempo hábil, e fundamentada em dados.

No contexto de SHM, a determinação da localização do dano de maneira efetiva é fundamental para a execução de manutenção local na estrutura, evitando a propagação do dano, e

consequentemente a falha estrutural (CAO; QI; TANG, 2018; DJEMANA; HRAIRI; AL JEROUDI, 2017; SIKDAR *et al.*, 2022; ZHU *et al.*, 2021). Apesar da capacidade comprovada de detectar danos incipientes, a localização de danos baseada em informações obtidas pelo método IEM ainda necessita de aprimoramento para aplicação em ambientes industriais. Esse aspecto adquire especial importância quando se trata da ocorrência de danos simultâneos, o que corresponde a uma condição geral de ocorrência em situações reais de operação.

Diferentes abordagens têm sido elaboradas com o propósito de localizar danos empregando o método IEM. Entretanto, o desenvolvimento de técnicas direcionadas para a localização de múltiplos danos ainda é incipiente (PEREIRA *et al.*, 2024a). Ademais, a totalidade das abordagens desenvolvidas para a localização de múltiplos danos simultâneos não contempla a aplicação em estruturas com geometrias complexas, ou seja, tridimensionais (3D).

1.1 Objetivos e contribuições do trabalho

Nesse sentido, o presente trabalho visa preencher essa lacuna de pesquisa, propondo-se um *framework* estruturado na Krigagem Indicadora (KI) para a localização de múltiplos danos a partir de informações obtidas do monitoramento pelo método IEM, contemplando também uma estrutura de geometria complexa, ainda não abordada na literatura atual no contexto da localização de múltiplos danos.

A abordagem geral fundamentada na KI foi proposta por Gonçalves *et al.* (2021), baseando-se na ocorrência de correlação espacial entre métricas de dano derivadas dos sinais de impedância em duas condições estruturais distintas. Esse comportamento pode ser explicado pela aparente redução da magnitude das métricas de dano à medida que a distância entre dano e sensor aumenta, conforme demonstrado por Soh *et al.* (2000), Zagari e Giurgiutiu (2001), Tseng e Naidu (2002), Tseng e Wang (2004) e Yang e Divsholi (2010).

Contudo, a aplicação da técnica de KI por Gonçalves *et al.* (2021) foi limitada a um único dano em uma placa de alumínio, o que restringe a sua aplicação em condições reais de monitoramento. Nesses cenários, os sistemas de engenharia estão constantemente sujeitos à ocorrência de falhas em múltiplos locais. Consequentemente, faz-se necessário o desenvolvimento de abordagens – não restritas apenas à KI – capazes de estimar, de maneira eficaz, os locais de ocorrência desses danos.

Portanto, diante da escassez de estudos que abordem a localização de múltiplos danos por meio da KI, bem como da ausência de metodologias voltadas à identificação de múltiplos danos

em estruturas de geometria complexa, propõe-se o estabelecimento de um *framework* baseado na KI para a localização simultânea de danos. Para tanto, a investigação é conduzida em duas estruturas: uma de geometria simples e outra de geometria complexa, esta última ainda não explorada na literatura vigente. Nesse contexto, o presente trabalho busca alcançar as seguintes contribuições:

- **Estabelecer mapas de probabilidade de ocorrência de dano por meio da KI** em diversas condições estruturais, a partir de informações obtidas pelo método IEM, resultando em modelos preditivos para condições gerais de dano;
- **Avaliar diferentes metodologias para a seleção do intervalo de frequência** adequado para o cômputo das métricas de dano dentro do *framework* da KI, analisando-se a coerência espacial dos valores de métrica de dano obtidas em cada abordagem, e a ocorrência de falsos positivos e falsos negativos decorrentes desses arranjos espaciais das métricas de dano nas estruturas investigadas;
- **Quantificar os desvios entre as posições reais e previstas para cada dano em cada condição estrutural**, de modo a viabilizar análises comparativas entre os resultados obtidos por meio da KI e aqueles reportados por outras metodologias;
- **Efetuar uma avaliação integrativa dos resultados obtidos**, com o propósito de identificar eventuais padrões e relações, possibilitando, portanto, a definição de direcionamentos para pesquisas futuras.

1.2 Organização da tese

Esta tese está estruturada da seguinte maneira: o Capítulo II aborda os principais conceitos associados ao método IEM, seguidos de uma revisão do estado da arte relacionada às abordagens desenvolvidas para a localização de danos a partir de informações obtidas pelo método, contemplando também as lacunas existentes, que o presente trabalho visa suplementar.

No Capítulo III são apresentados os fundamentos teóricos associados à KI, seguidos da descrição detalhada da metodologia geral proposta para a localização de múltiplos danos. As etapas do processo são expostas de forma sequencial, iniciando-se pelo pré-processamento dos dados e culminando na obtenção dos modelos preditivos.

O estudo de caso referente à estrutura de geometria simples é apresentado no Capítulo IV. Inicialmente, descrevem-se os procedimentos experimentais adotados nessa estrutura, seguidos do detalhamento da metodologia e das ferramentas empregadas no tratamento dos dados coletados, culminando na obtenção dos modelos preditivos por meio da KI. Por fim, é apresentada uma análise quantitativa dos resultados obtidos.

No Capítulo V é apresentado o segundo estudo de caso, aplicado a uma estrutura de geometria complexa, ou seja, com curvatura e elementos de reforço, com o propósito de avaliar a robustez da KI em cenários mais gerais de monitoramento estrutural. Inicialmente, são descritos os procedimentos experimentais e a metodologia empregada, seguidos da apresentação dos resultados obtidos.

No Capítulo VI é apresentada uma análise integrativa dos resultados obtidos nos dois experimentos. As principais observações extraídas de cada estudo são examinadas de forma comparativa, com o propósito de identificar possíveis padrões e relações entre os resultados. Além disso, uma análise quantitativa complementar é conduzida, confrontando os achados com outra abordagem atual para localização de múltiplos danos.

Por fim, no Capítulo VII estão descritas as conclusões das investigações realizadas, e apresentados os possíveis direcionamentos de pesquisas futuras, as quais podem fornecer *insights* críticos para o estabelecimento de um *framework* apropriado para aplicações industriais.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda os fundamentos do método IEM, seguido por uma revisão do estado da arte no que se refere à localização de danos a partir de informações obtidas do monitoramento estrutural pelo método IEM. Nesta etapa, são apresentadas as abordagens desenvolvidas para a localização de danos, contemplando tanto aquelas direcionadas para cenários com um único dano quanto para cenários com múltiplos danos, com ênfase para estas últimas.

2.1 Fundamentos do método IEM

O monitoramento pelo método IEM baseia-se no princípio de que quaisquer danos estruturais que afetem a impedância mecânica da estrutura monitorada podem ser identificados por meio de variações nos sinais elétricos gerados por transdutores piezelétricos – normalmente PZT – acoplados ou embutidos no material monitorado ([SUN *et al.*, 1995b; LIN; LU; HUNG, 2014; ZHU; WANG; QING, 2019; CHEN; HUO; SONG, 2020](#)).

A interação PZT-estrutura pode ser modelada por meio de um sistema massa-mola-amortecimento de um grau de liberdade, cuja formulação foi apresentada por [Liang, Sun e Rogers \(1997\)](#). Nesse sistema, a relação entre a impedância elétrica ($Z_E(\omega)$) resultante e a impedância mecânica da estrutura ($Z_s(\omega)$) em uma frequência ω é descrita pela Eq. 2.1. Nesse modelo matemático, τ é a constante geométrica do PZT; j , representa a unidade imaginária; ε_{33}^T se refere à constante dielétrica relacionada a uma dada tensão mecânica T ; d_{3X}^2 é a constante dielétrica; Z_p é a impedância mecânica do PZT, e; Y_{XX}^E se refere ao módulo de Young sob um campo elétrico constante E .

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega\tau} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_p(\omega)} d_{3X}^2 Y_{XX}^E \right)^{-1} \quad (2.1)$$

No contexto do monitoramento pelo método IEM, os transdutores PZT atuam simultaneamente como sensores (comportamento passivo) e atuadores (comportamento ativo), gerando

ondas ou vibrações mecânicas que interagem com a estrutura. Essa interação resulta em respostas elétricas registradas pelos próprios transdutores, as quais refletem o estado de integridade estrutural (YAN; WANG; CHEN, 2011; NA; LEE, 2013; OLIVEIRA; CHAVARETTE; LOPES, 2019; KAUR; SINGLA, 2022).

Nesse processo, através do efeito piezelétrico inverso, os transdutores piezelétricos produzem uma deformação local no material monitorado em função da aplicação de uma corrente alternada, normalmente com varredura de frequência acima de 30 kHz (SIKDAR *et al.*, 2022; de REZENDE *et al.*, 2023). A vibração mecânica originada pelo transdutor propaga-se localmente pela estrutura, sendo influenciada por propriedades mecânicas, como massa, amortecimento e rigidez (LIANG; SUN; ROGERS, 1997; NGUYEN *et al.*, 2023). Essa deformação local é então capturada pelo próprio transdutor devido ao efeito piezelétrico direto e convertida em um sinal elétrico dependente da frequência (MARTOWICZ; ROSIEK, 2013). O resultado é uma assinatura de impedância, ou admitância, composta por partes real e imaginária, que reflete o estado estrutural no momento da excitação, em consequência do acoplamento eletromecânico entre o transdutor e a estrutura.

Alterações nas curvas de impedância, ou admitância, indicam modificações no estado dinâmico da estrutura monitorada, podendo refletir a presença de danos (AI *et al.*, 2022; VENSON *et al.*, 2022; AI *et al.*, 2023). Nesse contexto, a Fig. 2.1 apresenta um exemplo comparativo de assinaturas de resistência, correspondente à parte real da impedância, obtidas em duas condições distintas: no estado intacto, caracterizado pela ausência de danos, e no estado danificado. Observa-se que, em comparação à curva de referência, também indicada como *baseline*, as respostas no estado danificado apresentam variações significativas no espectro de resistência, as quais podem ser associadas à ocorrência de modificações estruturais na vizinhança do transdutor.

Como ilustrado na Fig. 2.1, variações nas assinaturas de resistência refletem modificações estruturais em diferentes níveis de severidade. Essas alterações podem ser identificadas mesmo em escalas bastante reduzidas, em decorrência do mapeamento realizado em faixas de frequência elevadas, da ordem de dezenas a centenas de kHz. Essa característica faz com que as respostas obtidas por meio dos transdutores sejam pouco afetadas por condições globais da estrutura, aumentando, portanto, a precisão local da técnica (ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2009).

As variações nas assinaturas obtidas em duas condições estruturais distintas são quantificadas por meio de métricas de dano, fornecendo um parâmetro objetivo para a detecção de danos. Ademais, a utilização desses indicadores permite a quantificação de diferentes graus de seve-

ridade (de REZENDE *et al.*, 2023). Dentre as métricas comumente empregadas destacam-se: (1) Raiz do Desvio Quadrático Médio (*Root Mean Square Deviation*, RMSD); (2) Desvio do Coeficiente de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation*, CCD); e (3) Desvio Percentual Absoluto Médio (*Mean Absolute Percentage Deviation*, MAPD) (GIURGIUTIU; ROGERS, 1998; NAIDU, 2004; BHALLA; SOH, 2012; GIURGIUTIU, 2014; GONÇALVES; MOURA Jr.; PEREIRA, 2020).

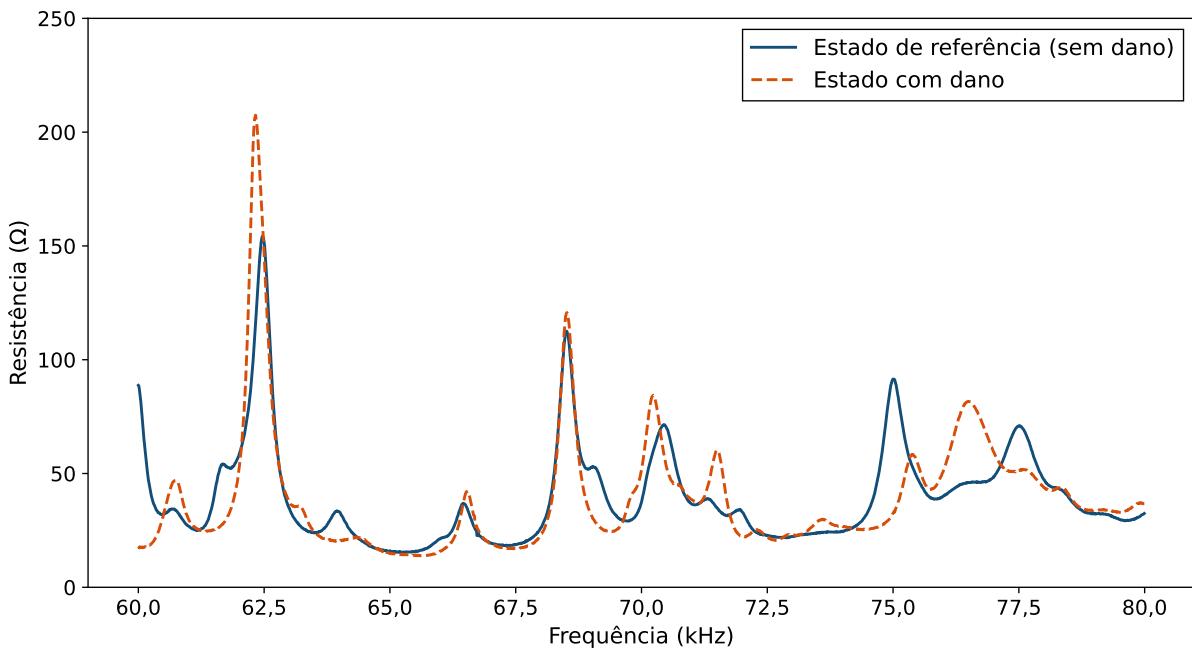


Figura 2.1: Assinaturas de resistência nas condições intacta e com dano.

Os valores calculados das métricas de dano são normalmente comparados a limiares estabelecidos para a condição de referência. Valores superiores a esse limiar indicam a presença de danos na vizinhança do transdutor (HE *et al.*, 2014; NOMELINI *et al.*, 2020). Contudo, apesar de tais métricas possibilitarem a identificação da ocorrência de alterações estruturais, a caracterização completa da integridade demanda também a determinação da localização das referidas alterações, imprescindível para a execução de intervenções locais na estrutura (WANG; CHEN; SONG, 2020; SINGH *et al.*, 2020; SINGH; MALINOWSKI, 2022).

2.2 Avanços na Localização de Danos por IEM

Nesta seção, são apresentadas as abordagens recentemente desenvolvidas para a localização de danos a partir de informações derivadas do monitoramento pelo método IEM. Para fins de brevidade, os estudos aqui discutidos abrangem o período de 2020 a 2025. Uma análise mais

abrangente sobre o tema pode ser consultada em [Pereira et al. \(2024a\)](#), na qual é conduzida uma investigação mais detalhada e extensiva das contribuições existentes na literatura.

Os tópicos a seguir estão organizados da seguinte forma: inicialmente, são apresentadas as abordagens empregadas para a localização de um único dano, seguidas daquelas voltadas à detecção e localização de múltiplos danos. Por fim, é realizada uma síntese das metodologias propostas para a localização de danos, com ênfase naquelas desenvolvidas para cenários com múltiplos danos. O maior detalhamento neste tema deve-se ao fato de que a ocorrência de múltiplos danos representa uma condição mais geral e realista no monitoramento de estruturas em operação. Assim, o desenvolvimento de novas técnicas capazes de identificar múltiplos danos constitui um passo essencial para a consolidação e ampliação da aplicação industrial do método IEM.

2.2.1 Localização de um único dano

Uma estratégia fundamentada em uma função de probabilidade foi proposta por [Castro, Baptista e Ciampa \(2020\)](#), na qual a probabilidade de dano em cada pixel do modelo de uma chapa plana foi obtida pela ponderação de uma métrica de dano pelo inverso da distância linear entre o transdutor e o pixel analisado. Considerando uma redução linear da probabilidade com a distância e um fator de correção associado à área de influência do transdutor, a metodologia alcançou previsões com distâncias de 2,23 mm a 32 mm em relação às posições reais dos danos, no melhor cenário avaliado, demonstrando compatibilidade entre as posições previstas e reais.

Em investigações voltadas à localização de danos em uma placa plana de material compósito, [Zhu et al. \(2021\)](#) propuseram uma abordagem também fundamentada em uma função de probabilidade ponderada, na qual pesos foram atribuídos aos valores de RMSD para estimar a probabilidade de ocorrência de dano no modelo. Os valores de RMSD foram obtidos a partir de componentes sensíveis à presença de danos, extraídos das assinaturas de impedância por meio de um novo modelo de acoplamento PZT-estrutura. Mediante a calibração do raio de sensibilidade das pastilhas e dos valores de RMSD derivados do modelo proposto, foram gerados mapas de probabilidade de dano – considerando um dano por vez – que apresentaram elevada correspondência com as posições reais dos danos, apresentando distâncias euclidianas de 9,92 mm e 5,85 mm ao utilizar a parte real das assinaturas..

Uma abordagem semelhante à proposta por [Zhu et al. \(2021\)](#) foi também implementada por [Singh, Fakih e Malinowski \(2023\)](#) para a localização de dano em uma placa impressa em 3D, na

qual foram fixadas três transdutores de diferentes tipos. Três métricas de dano foram utilizadas, cujas magnitudes foram projetadas para a mesma base, e então unificadas. O novo atributo foi empregado no algoritmo de probabilidade ponderada, usando um raio de máxima sensibilidade derivado de uma calibração obtida em ensaios de impacto. Os resultados obtidos demonstraram a ocorrência de desvios com valores compreendidos entre 4,48 mm e 75,5 mm.

Considerando que as métricas de dano estão linearmente relacionadas à distância entre o transdutor e o dano, [Jiang et al. \(2024\)](#) estabeleceram uma função de probabilidade ponderada, aplicando pesos mais elevados àqueles elementos danificados, para prever a localização de danos em um painel enrijecido. Ao contrário da metodologia proposta por [Zhu et al. \(2021\)](#), a qual requer a determinação prévia do raio de sensibilidade do transdutor, a abordagem estabelecida por [Jiang et al. \(2024\)](#) abrangeu a realização de iterações sob vários raios, considerando as particularidades na resposta de cada sensor (e.g., propriedades mecânicas e processo de colagem). A implementação dessa metodologia resultou em mapas de probabilidade de dano na estrutura investigada.

Uma função de probabilidade ponderada também foi proposta por [Ai, Zhang e Zhu \(2024b\)](#), baseando-se em uma distribuição Gaussiana, para estabelecer mapas de probabilidade de dano em uma lage de concreto. O estabelecimento dessa distribuição foi fundamentada em um modelo de regressão linear para interpretar a relação entre a distância do transdutor ao dano e a métrica de dano correspondente. Usando determinados sensores – selecionados por tentativa e erro – em uma malha mais abrangente, foi possível estimar com confiança a posição do dano.

Uma função de formato Gaussiano também foi utilizada por [Du et al. \(2022\)](#) para descrever a redução da métrica de dano com o aumento da distância entre a posição do dano e o transdutor. No estudo, foi demonstrado que a variação das métricas de dano com a distância é não-linear, o que justificou a utilização de uma função Gaussiana para descrever esse fenômeno. O modelo obtido foi introduzido em uma função de probabilidade ponderada, resultando em mapas de probabilidade de dano, cujas posições previstas dos descolamentos – um por vez – foram compatíveis com as atuais, demonstrando a eficácia da abordagem proposta. Entretanto, conforme estabelecido por [Du et al. \(2022\)](#), a obtenção das soluções requer o ajuste de parâmetros da função, dependentes da resposta do sistema.

Utilizando uma abordagem semelhante, mas baseada na utilização de indicadores de dano derivados da transformada *wavelet* discreta (*Discrete Wavelet Transformation*, DWT), [Ai, Zhang e Zhu \(2024a\)](#) estabeleceram mapas de probabilidade de dano em uma lage de concreto. Tais

mapas, neste caso, foram obtidos através de uma função de probabilidade ponderada com distribuição Gamma, cujo núcleo principal correspondeu a um modelo de regressão que define o comportamento da métrica de dano em relação à distância entre o transdutor e o dano.

Contudo, apesar dos resultados satisfatórios obtidos nessas abordagens ([AI; ZHANG; ZHU, 2024b](#); [AI; ZHANG; ZHU, 2024a](#)), duas limitações são críticas para o uso em condições reais de operação: (1) a necessidade de estabelecer um modelo de regressão prévio, o que demanda conhecer antecipadamente a resposta de cada pastilha ao dano; e (2) a utilização de tentativa e erro para a seleção do conjunto de transdutores empregados na função de probabilidade ponderada.

Investigações conduzidas por [Sikdar et al. \(2022\)](#) demonstraram que as magnitudes das assinaturas da parte real da Admitância (*i.e.*, Condutância) são influenciadas pela distância entre o transdutor e a região danificada. Com base nessa observação, os autores propuseram uma função de probabilidade fundamentada nas diferenças entre as assinaturas de Condutância obtidas em uma malha de transdutores piezelétricos colados a uma placa de material compósito. Os resultados revelaram uma elevada correspondência entre as posições estimadas e as reais, evidenciando a eficácia da metodologia proposta na detecção de danos simples.

A correlação entre a magnitude da métrica de dano e a distância relativa entre o transdutor e a região danificada – fundamento das funções de probabilidade ponderada – foi explorada por ([GONÇALVES; MOURA Jr.; PEREIRA, 2020](#)) por meio da aplicação da Krigagem Ordinária (KO), um método geoestatístico, para estimar a localização de um dano em uma placa plana. Posteriormente, utilizando uma abordagem baseada na KI, [Gonçalves et al. \(2021\)](#) desenvolveram modelos preditivos para a localização de danos sob condições experimentais análogas. Em ambas as metodologias, os modelos demonstraram capacidade de representar adequadamente as variações espaciais da métrica de dano na estrutura, sendo, portanto, alternativas eficazes em cenários com um único dano.

Outra abordagem fundamentada em métodos geoestatísticos foi proposta por [Pereira et al. \(2024b\)](#), na qual se empregou a Simulação Sequencial Gaussiana (*Sequential Gaussian Simulation*, SGS) para prever a posição de um único dano em uma estrutura de chapa plana. Os resultados evidenciaram elevada correspondência entre as posições reais e estimadas, com distâncias euclidianas máxima e mínima de 14,14 cm e 0,98 cm, respectivamente. Ademais, a aplicação da metodologia possibilitou o mapeamento das incertezas associadas aos valores estimados da métrica de dano, considerando diferentes configurações espaciais de sensores.

Investigando afrouxamento de parafusos pelo método IEM, [Qiu e Li \(2022\)](#) adotaram o amortecimento modal de modos de vibração sensíveis como indicador de dano, ao contrário da abordagem tradicional, baseada na utilização de métricas de dano estatísticas. O estudo demonstrou que a implementação dessa metodologia possibilitou a identificação de parafusos afrouxados – um por vez – em uma junta composta por barras retangulares.

Considerando as limitações do uso do RMSD para quantificar desvios nas assinaturas pós-dano em relação à condição de referência, [Singh e Malinowski \(2022\)](#) propuseram uma nova métrica de dano baseada na fusão das informações provenientes das partes reais da Impedância (Resistência) e da Admitância (Condutância), por meio de uma função de densidade de probabilidade Gaussiana. A integração das informações contidas nas assinaturas dessas duas grandezas resultou em um novo índice estatístico, cuja aplicação demonstrou sensibilidade superior à do RMSD, principalmente em cenários envolvendo diferentes graus de severidade.

[Ding et al. \(2020\)](#) empregaram o método IEM para localizar um dano em uma junta de concreto sujeita a diversos carregamentos. A localização do dano foi prevista através da análise de gráficos de barras dos valores de RMSD obtidos das pastilhas piezelétricas, associando-se o maior valor observado à região de provável ocorrência do dano.

Uma abordagem fundamentada na integração de informações provenientes de múltiplas bandas de frequência em um modelo de Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine*, SVM) foi proposta por [Wang et al. \(2022\)](#) para a localização de parafusos afrouxados — considerando um por vez — em juntas estruturais. O modelo foi treinado a partir de atributos extraídos de dois intervalos de frequência, contemplando a severidade do dano e as distâncias relativas entre os transdutores piezelétricos e os parafusos. A integração das diferentes faixas de frequência no SVM resultou em uma acurácia de 81,25 %, evidenciando o potencial da abordagem para aprimorar localização de danos em juntas aparafusadas.

Com o intuito de eliminar a necessidade de seleção manual de atributos associados à ocorrência de danos, [Nguyen et al. \(2023\)](#) implementaram uma rede neural convolucional unidimensional (*One-Dimensional Convolutional Neural Network*, 1D-CNN) para prever a localização de parafusos afrouxados em juntas estruturais. A integração do modelo com um sistema de limiar de detecção — concebido como um limite superior de controle — possibilitou a extração automática dos atributos relevantes das assinaturas de impedância, viabilizando a identificação precisa do parafuso afrouxado em cada cenário analisado. O modelo apresentou desempenho robusto, com raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error*, RMSE) da ordem de

0,081.

De forma complementar, [Huynh et al. \(2024\)](#) também propuseram uma rede 1D-CNN para a previsão da localização de dano em uma placa. O modelo estabelecido permitiu a seleção automática dos atributos mais relevantes, e resultou na previsão de métricas de dano em cada local da placa. Uma classificação baseada em detecção de valores anômalos (*outliers*), possibilitou a identificação da região danificada, ao comparar as métricas de dano previstas com o limite superior de controle correspondente, resultando em uma acurácia média de 98,0 %.

Uma rede neural artificial (*Artificial Neural Network*, ANN) foi implementada por [Meher e Rabius \(2024\)](#) com o objetivo de localizar danos em uma junta sobreposta de material compósito. Nesse estudo, o modelo de ANN foi treinado a partir de métricas de dano obtidas por meio do monitoramento via IEM, utilizando o conceito de IEM cruzado, com dados de entrada provenientes de um modelo em elementos finitos. As posições de dano previstas pela ANN apresentaram elevada concordância com as posições reais, evidenciando a capacidade do modelo em estimar, com precisão, a localização de um dano único na estrutura analisada.

A partir da utilização de parâmetros das condições intacta e pós-dano, juntamente com as informações das posições dos danos correspondentes, obtidos de um modelo de elementos finitos, [Sakhria et al. \(2025\)](#) estabeleceram um modelo baseado no conceito de aprendizado extremo (*Extreme Learning Machine*, ELM) para a localização de danos em um painel solar fotovoltaico. O modelo proposto foi constituído de apenas uma camada oculta, e demonstrou uma capacidade satisfatória para prever a ocorrência de dano, atingindo uma acurácia média de 85,0 %.

A localização de danos por meio do método IEM tem sido tratada como um problema de natureza indeterminada, em virtude da disponibilidade limitada de informações experimentais (*i.e.*, assinaturas de impedância) frente ao elevado número de parâmetros a serem estimados (*i.e.*, posição do dano). Nesse contexto, [Fan e Li \(2020\)](#) propuseram uma abordagem fundamentada em regularização esparsa para estimar a posição de danos em uma chapa plana. As variações de frequência dos picos de ressonância obtidas experimentalmente foram comparadas às condições previstas por um modelo de elementos finitos, empregando-se a regularização esparsa como estratégia de solução do problema indeterminado. Os resultados obtidos evidenciaram boa concordância entre a posição estimada e real do dano.

Uma abordagem baseada em implementação inversa foi proposta por [Soman, Singh e Malinowski \(2023\)](#) para a localização de danos em uma chapa plana. A metodologia consiste em

comparar as métricas de dano obtidas experimentalmente com aquelas geradas por um modelo analítico que representa diversos cenários relacionando as métricas de dano às posições relativas entre os transdutores e o dano. O cenário que apresenta o menor erro absoluto médio (*Mean Absolute Error*, MAE) é então identificado como representativo da posição prevista do dano. A aplicação dessa metodologia permitiu o estabelecimento de modelos preditivos com elevada correspondência em relação às posições reais, resultando em distâncias euclidianas máxima e mínima da ordem de 31,62 mm e 9,90 mm, respectivamente.

2.2.2 Localização de múltiplos danos

Baseando-se no fato de que danos incipientes tipicamente ocorrem em apenas um pequeno número de segmentos estruturais, [Zhang, Zhou e Tang \(2024\)](#) estabeleceram uma abordagem baseada na otimização multi-objetivos por nuvem de partículas (*Multi-Objective Particle Swarm Optimization*, MOPSO), integrando dois objetivos: (1) a minimização da diferença das assinaturas de admitância reais e previstas por um modelo de elementos finitos; e (2) a minimização da norma l_0 do vetor de métricas de dano. A procura pelas soluções foi guiada usando *Q-learning*, um método de aprendizagem por reforço, resultando em posições previstas para os danos compatíveis com as atuais, incluindo condições com dois danos estruturais, tornando possível, portanto, a localização de dois danos simultâneos.

Em investigações voltadas à localização de danos em uma armação de concreto armado, [Haq, Bhalla e Naqvi \(2020a\)](#) empregaram o método IEM com o objetivo de identificar regiões danificadas em uma estrutura submetida a múltiplos ciclos de carregamento. As estimativas das localizações dos danos foram obtidas por meio da análise de gráficos de barras dos valores de RMSD, associando-se os maiores valores observados às regiões de ocorrência de trincas na estrutura.

A representação dos valores de RMSD por meio de gráficos de barras também foi utilizada por [Haq, Bhalla e Naqvi \(2020b\)](#) no monitoramento de uma estrutura de concreto armado. Nesse estudo, os valores de RMSD foram calculados a partir das assinaturas de energia obtidas pela transformada *wavelet*, comparando as condições pós-dano em relação ao estado de referência. As regiões associadas aos maiores valores de RMSD foram identificadas como os prováveis locais de ocorrência de dano.

Outra abordagem semelhante foi empregada por [Alazzawi e Wang \(2021\)](#). Utilizando valores de RMSD derivados das assinaturas de tensão (domínio do tempo), [Alazzawi e Wang \(2021\)](#)

mapearam a localização de múltiplos danos em uma viga de aço. Os valores de RMSD obtidos, os quais representaram as mudanças na tensão medida nos transdutores antes e após os danos, foram dispostos em gráficos de barras para indicar os prováveis locais de ocorrência dos danos, baseados na magnitude desses valores.

Em investigações voltadas à localização de danos em juntas apafusadas, [Chen, Huo e Song \(2020\)](#) propuseram a utilização de uma ligação em série de transdutores piezelétricos com diferentes características, instalados em anéis metálicos, com cada transdutor associado a um parafuso específico. Essa configuração permitiu a obtenção de assinaturas de impedância com picos de ressonância distintos, cada um correspondente a um determinado parafuso. Dessa forma, por meio da mudança dos picos de ressonância, foi possível identificar os parafusos afrouxados.

O uso de ligações em série para monitoramento de juntas apafusadas também foi proposto por [Luo et al. \(2021\)](#). O estudo demonstrou que a ligação em série de transdutores piezelétricos pode viabilizar a identificação de múltiplos parafusos afrouxados. A metodologia proposta consiste no acoplamento dos transdutores a pastilhas magnéticas de diferentes espessuras, o que resulta em respostas distintas, caracterizadas por picos específicos para cada pastilha. Dessa forma, cada pico de ressonância presente nas assinaturas de impedância está associado a um transdutor particular, de modo que alterações em picos específicos permitem a identificação dos transdutores, e portanto, a localização dos danos.

[Singh, Soman e Malinowski \(2024\)](#) implementaram uma função de probabilidade ponderada aplicada a sub-redes de transdutores piezelétricos para localizar múltiplos danos. As sub-redes foram formadas a partir de um raio ótimo, determinado por testes preliminares, e compostas apenas por transdutores com métricas de dano acima do limiar de detecção. A metodologia apresentou boa concordância com as posições reais, com distâncias euclidianas máxima e mínima de 38 mm e 4,12 mm, respectivamente.

2.2.3 Síntese das abordagens desenvolvidas

Uma análise abrangente das metodologias recentemente desenvolvidas para a localização de danos revela que grande parte das mesmas se baseia em funções de probabilidade ponderada. O estabelecimento de modelos preditivos nessa classe de abordagens fundamenta-se, em geral, na distância entre o transdutor e regiões específicas da estrutura avaliadas quanto à presença ou ausência de dano. Em relação a este aspecto, as abordagens desenvolvidas ([ZHU et al.,](#)

2021; SINGH; SOMAN; MALINOWSKI, 2024) comumente consideram que a probabilidade de ocorrência de dano tende a decrescer de forma aproximadamente linear à medida que a distância euclidiana entre o transdutor sensível e a região analisada – normalmente representada por uma unidade elementar do modelo – aumenta.

Apesar da eficácia das abordagens baseadas em funções de probabilidade ponderada, esses métodos frequentemente requerem uma calibração prévia dos parâmetros associados à área de sensibilidade efetiva dos transdutores, o que implica a necessidade de investigações preliminares para a obtenção de resultados otimizados. Além disso, o ajuste desses parâmetros é fortemente influenciado pela faixa de frequência empregada no monitoramento, uma vez que diferentes intervalos resultam em variações significativas nas áreas de sensibilidade, conforme demonstrado por Wang *et al.* (2022).

A necessidade de uma avaliação prévia também se manifesta nas abordagens baseadas em ML, cujos modelos frequentemente demandam um processo de treinamento específico para cada estrutura monitorada. Essa característica pode representar um desafio à implementação de soluções baseadas em ML em condições reais de operação. Ademais, pode ser necessária a integração desses modelos com um sistema capaz de indicar de forma intuitiva a localização do dano previsto na estrutura monitorada, com o propósito de orientar mais facilmente as intervenções necessárias.

Em contextos envolvendo múltiplos danos, uma análise detalhada (Tab. 2.1) evidencia que: (1) uma parcela significativa das abordagens fundamenta-se na utilização de gráficos de barras para indicar os prováveis locais de ocorrência dos danos; e (2) a segunda categoria mais representativa de métodos baseia-se no desenvolvimento de ligações em série de transdutores para viabilizar a identificação precisa dos danos.

Tabela 2.1: Inventário das abordagens empregadas na localização de múltiplos danos e as respectivas estruturas investigadas.

Referência	Abordagem	Estrutura
Haq, Bhalla e Naqvi (2020a)	análise em gráficos de barras	armação de concreto
Haq, Bhalla e Naqvi (2020b)	análise em gráficos de barras	armação de concreto
Chen, Huo e Song (2020)	ligação de transdutores em série	junta aparafulada
Alazzawi e Wang (2021)	análise em gráficos de barras	viga
Luo <i>et al.</i> (2021)	ligação de transdutores em série	junta aparafulada
Zhang, Zhou e Tang (2024)	otimização por nuvem de partículas e regularização esparsa	chapa plana
Singh, Soman e Malinowski (2024)	função de probabilidade ponderada	chapa plana

No que se refere ao primeiro grupo, a utilização de gráficos de barras fornece apenas uma

indicação da pastilha piezelétrica mais próxima do dano, sem, contudo, permitir a identificação do local exato de ocorrência do dano de forma intuitiva – por exemplo, através de um modelo da estrutura – e com maior exatidão. Já o segundo grupo corresponde a soluções desenvolvidas para contextos específicos de monitoramento em juntas parafusadas, não demonstradas em outros tipos de estrutura.

Uma metodologia capaz de indicar as posições prováveis dos danos foi implementada por [Singh, Soman e Malinowski \(2024\)](#), fundamentada em uma função de probabilidade ponderada ajustada para esse contexto. O método foi avaliado em duas placas planas e, de maneira análoga às demais abordagens baseadas em funções de probabilidade ponderada, fundamenta-se na relação entre a distância do transdutor e o dano.

Esse comportamento baseia-se em evidências experimentais que demonstram que as métricas de dano (*e.g.*, RMSD, MAPD, CCD) tendem a apresentar valores mais elevados em transdutores localizados nas proximidades da região danificada, enquanto aqueles situados a maiores distâncias geralmente exibem valores inferiores dessas mesmas métricas ([CHERRIER et al., 2013; KRALOVEC; SCHAGERL; MAYR, 2018; ZHU et al., 2021; SOMAN; SINGH; MALINOWSKI, 2023](#)). Tal comportamento pode sugerir a existência de uma correlação espacial entre os valores das métricas de dano na rede de transdutores, a qual depende das distâncias relativas tanto entre os transdutores quanto entre estes e o(s) dano(s).

A correlação espacial existente entre os valores das métricas de dano obtidas por monitoramento via método IEM foi explorada por [Gonçalves, Moura Jr. e Pereira \(2020\)](#), [Gonçalves et al. \(2021\)](#) e [Pereira et al. \(2024b\)](#), que propuseram, respectivamente, a utilização de KO, KI e SGS no monitoramento de chapas planas. Contudo, tais metodologias foram aplicadas exclusivamente à localização de um único dano. Dessa forma, torna-se necessária a realização de estudos voltados à avaliação desses métodos em cenários envolvendo múltiplos danos, em especial da KI, dado que este método é capaz de fornecer modelos probabilísticos de ocorrência de categorias ou classes, os quais podem ser interpretados, neste contexto, como presença ou ausência de dano.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA PROPOSTA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a localização de múltiplos danos baseada na KI, no contexto do monitoramento estrutural pelo método IEM. Dada sua relevância no âmbito da abordagem proposta, os fundamentos relacionados à KI são apresentados inicialmente. A seguir são descritas as etapas estabelecidas dentro do *framework* proposto para localização de múltiplos danos.

3.1 Fundamentos Teóricos da KI

A metodologia empregada neste estudo é caracterizada pelo uso da KI, método geoestatístico originalmente desenvolvido para a solução de problemas relacionados à estimativa de recursos minerais nos campos da geologia e da mineração. Assim como os demais métodos geoestatísticos, a KI baseia-se na continuidade espacial, isto é, na tendência de que pontos próximos no espaço Euclidiano apresentem valores semelhantes, refletindo uma dependência ou correlação espacial que permite estimar valores nos locais não amostrados ([JURNEL; HUIJBREGTS, 1989; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989](#)).

Duas características favorecem o uso da KI sobre outros métodos de krigagem: (1) a não-linearidade do método, decorrente da operação sobre variáveis binárias (0 e 1), obtidas a partir de uma variável original; e (2) a sua natureza não-paramétrica, o que elimina, portanto, a necessidade de conhecimento prévio sobre a distribuição estatística da população analisada ([JURNEL; HUIJBREGTS, 1989; ROSSI; DEUTSCH, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2021](#)).

3.1.1 Formulação de variáveis indicadoras

A obtenção de variáveis binárias, denominadas indicadoras, pode ser conduzida de duas formas distintas, de acordo com o contexto e o propósito da estimativa. A primeira corresponde à

codificação em valores binários de acordo com a posição do valor da variável original em relação a um patamar (*threshold*) previamente estabelecido. Já a segunda se refere à codificação baseada na presença ou ausência de uma classe ou característica específica (SINCLAIR; BLACKWELL, 2002; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Em relação à primeira abordagem, a obtenção do valor de uma variável indicadora I em um ponto \mathbf{x} do espaço Euclidiano em relação a um patamar de corte z_k , é conduzida por meio da Eq. 3.1. Conforme a Eq. 3.1, é atribuído o valor **1** se o valor da variável aleatória original Z no ponto \mathbf{x} for menor ou igual o patamar de corte z_k , e o valor **0** caso contrário. Consequentemente, a variável original $Z(\mathbf{x})$ é convertida em uma variável binária que indica a probabilidade de Z ser igual ou inferior ao patamar de corte estabelecido no ponto \mathbf{x} (CHILÈS; DELFINER, 2012; ABZALOV, 2016).

$$I(\mathbf{x}, z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(\mathbf{x}) \leq z_k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.1)$$

Já a codificação em valores binários fundamentada na presença ou ausência de uma característica ou classe é obtida por intermédio da Eq. 3.2, segundo a qual uma variável indicadora I em um ponto \mathbf{x} , e referente a uma classe D , recebe o valor **1** se no ponto amostral \mathbf{x} ocorrer o domínio D , e **0**, caso contrário. Neste sentido, a variável indicadora obtida por meio da Eq. 3.2 sinaliza a probabilidade de ocorrência da classe D no sistema investigado.

$$I(\mathbf{x}, D) = \begin{cases} 1, & \text{se } \mathbf{x} \in D \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

As variáveis indicadoras, obtidas por meio das abordagens descritas, constituem uma informação essencial para a estimativa de seus valores em locais não amostrados por meio da KI. Essas informações amostrais desempenham papel crucial em duas etapas essenciais do processo de estimativa: (1) na quantificação da estrutura de dependência espacial, conduzida por meio de semivariogramas, os quais descrevem a continuidade espacial das variáveis indicadoras e fornecem os parâmetros necessários à resolução do sistema de krigagem; e (2) na própria solução do sistema de krigagem, que, de modo geral, consiste em uma combinação linear ponderada dos valores amostrais vizinhos, na qual os pesos atribuídos refletem a correlação espacial entre os pontos amostrais considerados, garantindo estimativas não tendenciosas e com o menor erro (diferença entre valores real e previsto correspondentes), obtido através da minimização da

variância do erro de estimativa.

As seções subsequentes apresentam, em um primeiro momento, os conceitos associados ao semivariograma, utilizado para a quantificação da estrutura de dependência espacial entre os pontos amostrais. Por fim, é descrito o sistema de krigagem adotado neste estudo para a obtenção das estimativas no contexto da KI.

3.1.2 Modelagem da continuidade espacial por semivariogramas

A modelagem da dependência espacial entre pontos amostrais, crucial para o estabelecimento de modelos preditivos por métodos de krigagem, é conduzida por meio do semivariograma ($\gamma(h)$), definido conceitualmente por meio da Eq. 3.3. Conforme estabelecido na Eq. 3.3, o semivariograma corresponde à metade da esperança matemática dos desvios quadráticos de uma variável Z em dois pontos do espaço, separados entre si por uma distância h , a qual é um vetor, dependente da orientação espacial dos pontos comparados (MATHERON, 1963; ARMSTRONG, 1998; SINCLAIR; BLACKWELL, 2002).

Consequentemente, o semivariograma indica o grau de similaridade entre os valores da variável Z nos pontos amostrais separados pelo vetor h , representados por $Z(\mathbf{x})$ e $Z(\mathbf{x} + h)$ na Eq. 3.3. Valores pequenos de $\gamma(h)$ sugerem uma elevada proximidade, em média, entre os valores comparados naquela classe de distância, enquanto valores elevados de $\gamma(h)$ indicam um alto grau de diferença entre os valores nos pontos separados pelo vetor h . Ademais, para uma mesma distância, os valores de semivariograma podem ser diferentes, indicando uma dependência em função da orientação espacial do vetor h .

$$\gamma(h) = \frac{E \{ [Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + h)]^2 \}}{2} \quad (3.3)$$

A quantificação de $\gamma(h)$ para diversas classes de distâncias em uma orientação específica constitui, portanto, uma assinatura da correlação espacial naquela direção, ao estabelecer o grau ou a tendência de diminuição da dependência espacial entre os valores da variável estudada à medida que a separação entre os pares de amostras aumenta. No âmbito da análise de dados amostrais, essa assinatura é representada pelo semivariograma experimental, obtido mediante a aplicação da Eq. 3.4 para múltiplas classes de distâncias, o que permite caracterizar de forma empírica a estrutura de variabilidade espacial.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + h)]^2 \quad (3.4)$$

Na Eq. 3.4, $N(h)$ representa o número total de pares de amostras separados por um vetor h , considerando uma tolerância em relação a essa distância. Essa tolerância é comumente limitada a 50 % do valor de h , permitindo a inclusão de pares de dados em cada classe de distância cuja separação não corresponde exatamente ao vetor h . Tal abordagem é particularmente relevante em esquemas de amostragem irregular, onde as distâncias entre os pontos frequentemente apresentam variações em relação aos valores de h definidos (OLEA, 2006).

Além da tolerância de passo, associada à distância entre pares de amostras, outros parâmetros fundamentais para o cálculo do semivariograma incluem a tolerância angular e a largura de banda (*bandwidth*).

A tolerância angular refere-se à variação angular permissível entre a direção do vetor que conecta dois pontos amostrais e a direção especificada pelo vetor h . Esse parâmetro possibilita a inclusão de pares de amostras que, embora não estejam rigorosamente alinhados na direção de h , apresentam uma proximidade angular suficiente para serem agrupados na mesma classe direcional (OLEA, 2006). A tolerância angular pode ser configurada em valores de até 90°, condição na qual o semivariograma se torna unidirecional, caracterizando-se pela ausência de restrições direcionais na formação dos pares de amostras utilizados para sua estimativa (ARMSTRONG, 1998).

Por sua vez, a largura de banda representa a tolerância lateral perpendicular à direção do vetor h . Esse parâmetro permite considerar pares de pontos que não estão exatamente na distância correspondente ao vetor h , mas que se encontram dentro de um intervalo lateral aceitável, geralmente definido entre 0,5 e 2 vezes o espaçamento relacionado ao vetor h .

O aplicação da Eq. 3.4 para múltiplas classes de distâncias, considerando os parâmetros de cálculo elencados, possibilita o estabelecimento do semivariograma experimental, o qual relaciona os valores de semivariância ($\gamma(h)$) às respectivas classes de distâncias (SINCLAIR; BLACKWELL, 2002). Um exemplo de semivariograma experimental é ilustrado na Fig. 3.1, na qual é possível observar que a função semivariograma apresenta um comportamento crescente à medida que a distância entre os pares de amostras aumenta. Este padrão representa a diminuição da correlação espacial conforme o espaçamento entre os pares de amostras aumenta (ARMSTRONG, 1998; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

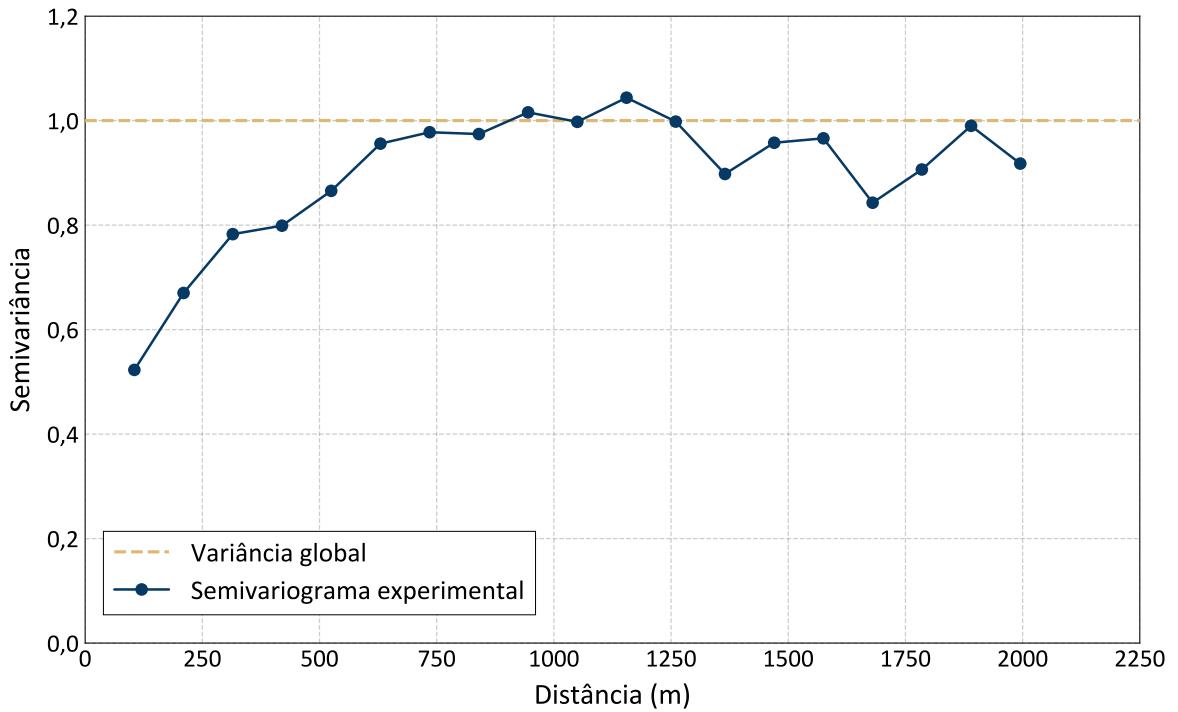


Figura 3.1: Exemplo de um semivariograma experimental.

O semivariograma experimental, por ser uma função discreta derivada de dados amostrais, conforme demonstrado na Fig. 3.1, não pode ser utilizado diretamente em estimativas realizadas por técnicas de krigagem. Essa limitação decorre, entre outros fatores, da necessidade de um modelo matemático contínuo que garanta a positividade definida da matriz de covariância (PYRCZ; DEUTSCH, 2014).

Neste contexto, o semivariograma experimental pode ser ajustado por meio de diversas funções matemáticas contínuas. Entre os modelos mais comumente empregados nesse processo destacam-se o modelo esférico, o modelo exponencial e o modelo Gaussiano. Cada um desses modelos (Fig. 3.2a) apresenta características específicas que os tornam adequados para diferentes padrões de continuidade espacial, permitindo uma representação teórica precisa do comportamento da variável em análise (JURNEL; HUIJBREGTS, 1989; ARMSTRONG, 1998; ABZALOV, 2016).

O semivariograma teórico, especialmente aqueles que apresentam um limite de crescimento, definido como o patamar, é caracterizado por três parâmetros fundamentais: o efeito pepita (C_0), o alcance (a) e o patamar (C). Esses parâmetros, ilustrados na Fig. 3.2b, desempenham um papel crucial na descrição da estrutura de continuidade espacial da variável analisada (KITANIDIS, 1997; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

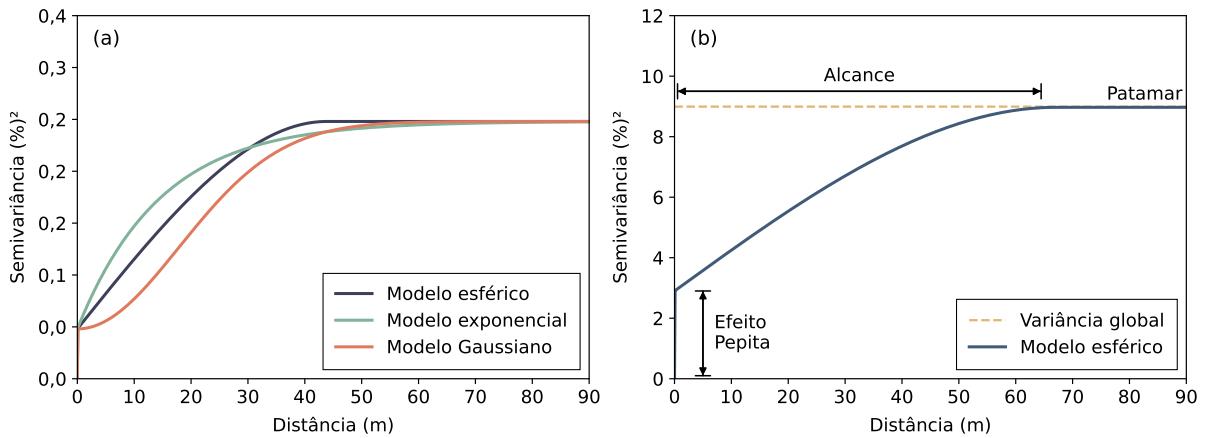


Figura 3.2: Principais modelos teóricos utilizados nos ajustes de semivariogramas experimentais (a) e parâmetros que caracterizam um modelo teórico de semivariograma (b).

O efeito pepita (C_0) se refere a uma descontinuidade na origem, e representa a variação não explicada em escalas muito pequenas, em distâncias menores que o espaçamento entre amostras, ou devido a erros de medição. O alcance (a) define a distância a partir da qual não há correlação espacial entre amostras. Já o patamar (C) indica a variância total alcançada quando a distância entre amostras corresponde ao alcance (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1989; ARMSTRONG, 1998). Esses elementos são fundamentais para a construção e solução de sistemas de krigagem, permitindo a obtenção de estimativas preditivas precisas e consistentes.

3.1.3 Obtenção de estimativas por KI

A estimativa de valores em locais não amostrados por meio da KI pode ser realizada a partir de dois estimadores fundamentais: a Krigagem Ordinária (KO) e a Krigagem Simples (KS). Nesse contexto, a KI consiste na aplicação de um método de krigagem (KO ou KS) sobre variáveis indicadoras, as quais são derivadas de uma variável original contínua ou categórica.

Neste estudo, é proposta a utilização da KS como estimador fundamental, a qual está definida na Eq. 3.5. De acordo com a Eq. 3.5, a estimativa de uma variável indicadora I_{KS}^* em um local não amostrado \mathbf{u} , representada por $I_{KS}^*(\mathbf{u})$, é obtida a partir de dois termos principais: (1) a combinação linear dos valores da variável indicadora nos pontos vizinhos amostrados, ponderados pelas suas respectivas influências, representadas pelos pesos $\lambda_\alpha(\mathbf{u})$, refletindo a correlação espacial dos dados em relação ao ponto \mathbf{u} ; e (2) a contribuição da tendência global da variável indicadora, representada pela média global p_0 , que corresponde à probabilidade *a priori* da variável indicadora I ser igual a 1, ajustada pelo valor residual obtido da soma dos ponderadores aplicados às amostras vizinhas (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; JOURNEL;

(HUIJBREGTS, 1989; DEUTSCH; JOURNEL, 1998).

$$I_{KS}^*(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha(\mathbf{u}) I_k(\mathbf{x}_\alpha) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha(\mathbf{u}) \right] * p_0 \quad (3.5)$$

O estimador da KS permite, portanto, integrar tanto a influência local dos valores vizinhos, mensurada quantitativamente pelos ponderadores $\lambda_\alpha(\mathbf{u})$, quanto a contribuição global dos dados amostrais conhecidos, representada pela média global p_0 da variável indicadora analisada (ISA-AKS; SRIVASTAVA, 1989; ROSSI; DEUTSCH, 2014). Essa abordagem possibilita a obtenção de uma estimativa robusta e consistente, ao equilibrar as variações locais com a tendência global das informações amostrais.

Os ponderadores associados a cada ponto \mathbf{u} a ser estimado são determinados pela solução do sistema de krigagem, formalizado em sua representação matricial geral pela Eq. 3.6. De acordo com a Eq. 3.6, o vetor dos pesos é obtido através do produto de duas matrizes: (1) a inversa da matriz dos valores de semivariograma (ou covariância) entre amostras ($\gamma(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_\beta)$) selecionadas na vizinhança de busca, e localizadas nos pontos \mathbf{x}_α e \mathbf{x}_β , respectivamente; e (2) o vetor dos valores de semivariograma entre as amostras selecionadas e o ponto \mathbf{u} a ser estimado, representado por $\gamma(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{u})$ (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1989; SINCLAIR; BLACKWELL, 2002; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

$$\begin{bmatrix} \lambda_1(\mathbf{u}) \\ \lambda_2(\mathbf{u}) \\ \vdots \\ \lambda_n(\mathbf{u}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_n) \\ \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_2) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}) \\ \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{u}) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

De acordo com a Eq. 3.6, tanto os elementos que expressam a correlação espacial entre as amostras vizinhas quanto aqueles que descrevem a correlação entre essas amostras e o ponto a ser estimado são incorporados ao sistema de krigagem para a obtenção das estimativas nos locais não amostrados. A estrutura desse sistema garante a obtenção de estimativas não enviesadas que honram integralmente os valores amostrados e apresentam a mínima variância do erro de estimativa. Nesse sentido, os ponderadores determinados pelo sistema de krigagem (Eq. 3.6) são ótimos no sentido estatístico, cuja determinação advém da minimização da variância do erro de estimativa, assegurando, portanto, que as estimativas apresentem o menor erro possível. Como resultado, obtém-se uma estimativa consistente, eficiente e robusta da variável em análise.

3.2 Sequência Metodológica Baseada na KI

O *framework* proposto para localização de múltiplos danos baseado na KI, a partir de informações coletadas pelo método IEM, é estruturado nas seguintes etapas sequenciais (Fig. 3.3): (1) pré-processamento dos dados coletados do monitoramento estrutural pelo método IEM; (2) seleção do intervalo de frequência das assinaturas de impedância; (3) detecção dos danos; e (4) realização das estimativas por KI, resultando nos modelos preditivos para localização de múltiplos danos.

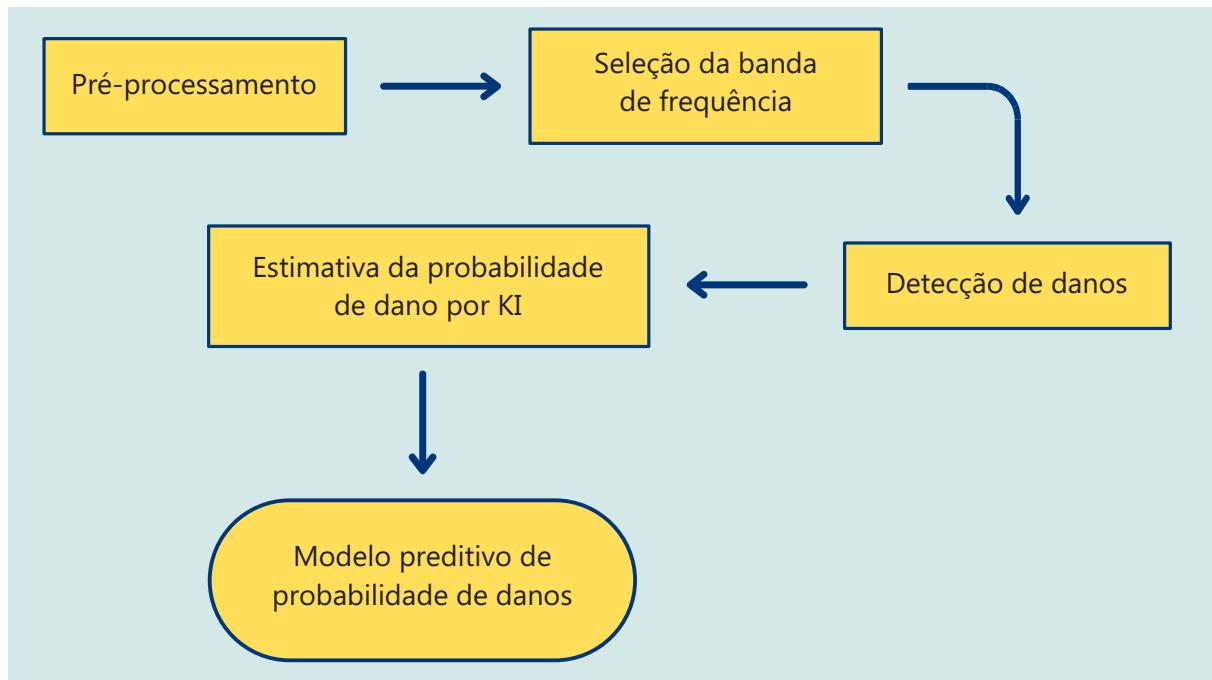


Figura 3.3: Fluxograma conceitual das etapas metodológicas envolvidas no estabelecimento dos modelos de probabilidade de danos por meio da KI.

As etapas mostradas na Fig 3.3 estão organizadas a seguir em forma de tópicos. Em cada um são detalhadas as abordagens e técnicas utilizadas, resultando no desenvolvimento de modelos preditivos derivados da KI para a localização de múltiplos danos.

3.2.1 Pré-processamento dos dados

A etapa inicial da metodologia proposta consiste no pré-processamento das assinaturas de impedância coletadas, com o propósito de compensar para efeitos de temperatura, se necessário, e identificar e eliminar assinaturas anômalas. Nesta etapa, assim como nas demais, sugere-se empregar as assinaturas da parte real da impedância. A opção pelo emprego desta magnitude deriva de sua comprovada maior sensibilidade à presença de danos estruturais, aliada à

sua menor sensibilidade às variações ambientais (CHERRIER *et al.*, 2013; NA; LEE, 2013; HAMZELOO; BARZEGAR; MOHSENZADEH, 2020; DJEMANA; HRAIRI; YATIM, 2022; MEHER; MISHRA; SUNNY, 2022). Portanto, nesta pesquisa, as assinaturas de impedância utilizadas correspondem à sua parte real.

No *framework* proposto neste trabalho, o conjunto de assinaturas brutas de impedância, é submetido inicialmente a uma suavização por meio do filtro de Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964), com o propósito de reduzir ruídos indesejados. Subsequentemente, é aplicada uma etapa de compensação para efeitos de temperatura, quando necessário. Este procedimento pode ser executado por meio de diferentes abordagens, tais como aquelas fundamentadas na mudança das frequências de ressonância (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2012; ZHANG *et al.*, 2019) e regressão polinomial (GIANESINI *et al.*, 2021).

O procedimento subsequente consiste na limpeza dos dados brutos coletados por meio da identificação e remoção de assinaturas de impedância anômalas. Essa etapa é executada para cada pastilha piezelétrica, e em cada condição estrutural individualmente.

Neste estudo, a identificação de assinaturas anômalas é baseada no cômputo do CCD em cada estado estrutural. A escolha por essa métrica de dano decorre de sua comprovada eficácia para a mensuração das diferenças entre assinaturas em dois estados distintos (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2012; SELVA *et al.*, 2013; HU; ZHU; WANG, 2014; NGUYEN *et al.*, 2023). Ademais, variações na magnitude da impedância não afetam o valor de CCD significativamente (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2012), o que torna essa métrica mais robusta quando comparada, por exemplo, ao RMSD. Contudo, estudos adicionais podem ser necessários para uma investigação mais detalhada.

O CCD é definido pela Eq. 3.7, a qual se fundamenta no cálculo do coeficiente de correlação entre as duas assinaturas analisadas, subtraído de 1, de modo que o resultado expressa o afastamento relativo em relação à correlação máxima possível entre essas assinaturas. No contexto da limpeza dos dados coletados, o parâmetro R na Eq. 3.7 se refere a uma assinatura individual do conjunto de assinaturas de impedância em uma condição estrutural específica; e R^0 corresponde à mediana das assinaturas de resistência na mesma condição. Portanto, a mediana das assinaturas é utilizada como referência para mapear o desvio de cada assinatura individual em relação à assinatura central do conjunto de dados.

$$CCD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})(R_i^0 - \bar{R}^0)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2\right) \left(\sum_{i=1}^N (R_i^0 - \bar{R}^0)^2\right)}} \quad (3.7)$$

O vetor de valores de CCD obtido para cada pastilha piezelétrica, em cada condição estrutural, é avaliado quanto à dispersão de seus elementos por meio do cálculo do intervalo interquartil (*Interquartile Range*, IQR), definido como a diferença entre o terceiro quartil ($Q3$) e o primeiro quartil ($Q1$). A partir do IQR, determinam-se os limites inferior (LI) e superior (LS) do intervalo, conforme apresentado nas Eq. 3.8 e Eq. 3.9, respectivamente. As assinaturas de impedância cujos valores de CCD se situam abaixo de LI ou acima de LS são consideradas anômalas em relação ao conjunto de dados e, portanto, são excluídas do banco de assinaturas.

$$LI = Q1 - 1,5 * IQR \quad (3.8)$$

$$LS = Q3 + 1,5 * IQR \quad (3.9)$$

O pré-processamento garante que as análises subsequentes sejam conduzidas com base em dados estáveis, representativos e isentos de anomalias que possam distorcer comprometer a confiabilidade dos resultados. Dessa forma, estabelece-se uma base metodológica sólida para a etapa seguinte, voltada à seleção do intervalo de frequência mais adequado à detecção e, consequentemente, à localização dos danos.

3.2.2 Seleção do Intervalo de Frequência

A seleção do intervalo de frequência representa uma etapa estratégica no *framework* de localização de danos, uma vez que os indicadores empregados na fase de detecção são diretamente fundamentados na banda de frequência escolhida. Essa escolha influencia de maneira decisiva a sensibilidade dos indicadores de dano e, consequentemente, a acurácia dos modelos preditivos utilizados para a localização dos danos.

Com o propósito de avaliar o efeito de diferentes metodologias na eficácia dos modelos preditivos derivados da KI, nesta pesquisa, são avaliadas três abordagens distintas para a seleção da banda de frequência: (1) identificação do intervalo com a maior densidade de picos; (2) escolha do intervalo com a maior densidade de picos, atribuindo prioridade a frequências

relativamente mais elevadas; e (3) seleção do intervalo mais sensível à presença de danos.

3.2.2.1 Abordagem baseada na densidade de picos

Essa abordagem fundamenta-se em princípios análogos aos da metodologia proposta por Bharathi Priya *et al.* (2014) e baseia-se na seleção da banda de frequência das assinaturas de impedância que apresenta a maior quantidade de picos. As assinaturas de impedância utilizadas nessa etapa correspondem à condição sem dano (estado intacto), por refletirem as propriedades intrínsecas da estrutura, notadamente suas características de massa e rigidez.

Na abordagem proposta, a detecção dos picos nas assinaturas é conduzida pelo estabelecimento inicial de uma linha de referência ao longo de todo o espectro medido. Subsequentemente, avalia-se a variabilidade interna de cada segmento, com um largura de banda pré-estabelecida, ao longo de toda a assinatura, e considerando-se a sobreposição entre pontos adjacentes. A quantificação da variabilidade intra-segmento é obtida por meio do Desvio Absoluto da Mediana (*Median Absolute Deviation*, MAD), o qual está definido na Eq. 3.10. Nesta formulação, R representa a parte real da impedância, enquanto o subscrito i se refere ao i -ésimo valor pertencente ao segmento analisado.

$$MAD = \text{mediana}(|R_i - \text{mediana}(R_i)|) \quad (3.10)$$

O cálculo do MAD ao longo dos diversos segmentos do espectro medido permite identificar a variação da distribuição dos valores de impedância em cada segmento, considerando suas características intrínsecas. Com base nessa informação, são determinados os pontos que correspondem a desvios anômalos dentro de cada segmento, por meio da soma da linha de referência inicialmente definida com um múltiplo do MAD, estabelecendo, assim, um limiar para a detecção de picos. Neste estudo, propõe-se a utilização do fator três para multiplicar o MAD, fundamentando-se na ampla aplicação desse valor na identificação de desvios em contextos de controle estatístico de processos (SEIM; ANDERSEN; SANDBERG, 2006; SALACIŃSKI; CHRZANOWSKI; CHMIELEWSKI, 2023; RAVICHANDRAN; PRANAVI; PARAMANATHAN, 2025; YANG; LI, 2025). A aplicação desse procedimento possibilita a identificação robusta de picos genuínos, mesmo na presença de variações locais no sinal.

Por fim, os picos identificados em cada segmento são contabilizados, permitindo a escolha do intervalo mais representativo em termos de concentração de picos.

3.2.2.2 Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências

Essa abordagem corresponde a uma adaptação da anterior, com ênfase na seleção de intervalos de frequências mais elevadas. A escolha por priorizar a seleção de intervalos em frequências mais altas é fundamentada na compreensão de que o aumento da frequência resulta em uma redução da área de excitação da pastilha piezoeletrica, possibilitando a detecção de danos posicionados nas proximidades imediatas do sensor (WANG *et al.*, 2022).

Ademais, investigações realizadas por Wang, Song e Zhu (2013), Singh, Fakih e Malinowski (2023), Sun *et al.* (2024) e Khayatazad, Loccufier e De Waele (2025) apontam para uma maior sensibilidade a danos estruturais em intervalos de frequência elevada. Análises conduzidas por Yang e Divsholi (2010) demonstraram que danos próximos às pastilhas piezelétricas influenciam predominantemente as frequências mais altas do espectro, enquanto danos localizados a uma distância maior do sensor afetam principalmente as frequências mais baixas.

Diante do exposto, neste estudo propõe-se a utilização dessa abordagem com o objetivo de detectar a presença de danos localizados na vizinhança imediata de cada pastilha piezelétrica, considerando simultaneamente a ocorrência de um número elevado de picos característicos da estrutura.

A priorização de frequências mais elevadas do espectro nesta abordagem é conduzida por meio da implementação de um ponderador linearmente proporcional à magnitude da frequência, aplicado sobre a quantidade de picos mapeada em cada segmento (Eq. 3.11). Neste processo, tanto a quantidade de picos e o ponderador são normalizados para valores entre 0 e 1 (intervalo [0, 1]).

$$S_i = NP_i * c_i \quad (3.11)$$

Na Eq. 3.11, NP_i representa o número de picos do i -ésimo segmento, enquanto o ponderador aplicado sobre esse parâmetro, no mesmo segmento, é denotado por c_i . A aplicação dessa metodologia possibilita, portanto, a seleção de intervalos com frequência mais elevada, considerando-se simultaneamente a quantidade de picos característicos da estrutura.

3.2.2.3 Abordagem baseada na sensibilidade ao dano

Essa abordagem apoia-se na seleção da banda de frequência que apresenta a maior resposta ao dano, isto é, aquela associada ao valor máximo de métrica de dano entre todas as combinações

viáveis de intervalos. Nesse contexto, estabelece-se uma largura mínima para o intervalo, enquanto a largura máxima corresponde à totalidade do espectro medido das assinaturas de impedância. A abordagem proposta se assemelha à empregada por [Singh e Malinowski \(2022\)](#) e [Singh, Fakih e Malinowski \(2023\)](#), onde os intervalos de frequência foram selecionados baseando-se no máximo valor do desvio padrão entre as assinaturas.

Essa metodologia é aplicada a cada pastilha piezelétrica, considerando individualmente cada condição de dano. Tal procedimento possibilita, portanto, o tratamento específico das respostas de cada transdutor, em conformidade com suas respectivas sensibilidades.

Neste estudo, é proposta a utilização do CCD (Eq. 3.7) como métrica para mensurar a dissimilaridade entre as assinaturas de impedância comparadas em dois estados estruturais distintos. Nesse contexto, os termos R e R^0 da Eq. 3.7 representam, respectivamente, a mediana das assinaturas de impedância associadas a um estado específico de dano e à mediana das assinaturas de impedância da condição pré-dano (*baseline*).

A partir dos valores de CCD, identifica-se a banda de frequência mais sensível ao dano, a qual corresponde àquela com o máximo valor de CCD. Essa definição permite, portanto, a identificação do intervalo de maior relevância para a detecção de alterações associadas à presença de dano(s), evidenciando a faixa de frequência mais sensível às modificações no sistema.

3.2.3 Detecção de danos

Esta etapa consiste no estabelecimento de parâmetros que indiquem a detecção ou não de danos pelas pastilhas piezelétricas afixadas na estrutura monitorada. Neste contexto, é definido um limiar de detecção para a métrica de dano – neste estudo, o CCD – acima do qual é caracterizada a presença de dano. Do contrário, valores de métrica de dano iguais ou inferiores ao limiar de detecção são interpretados como indicativos da ausência de danos na vizinhança da pastilha piezelétrica.

No *framework* proposto, adota-se a metodologia descrita por [Nomelini et al. \(2020\)](#), a qual é fundamentada nos princípios do controle estatístico de qualidade, para o estabelecimento do limiar de detecção. Abordagem análoga também foi empregada por [Huynh et al. \(2024\)](#), ao definir limites superiores de controle para classificar regiões como intacta e danificada.

Conforme a metodologia desenvolvida por [Nomelini et al. \(2020\)](#), o limiar de detecção de um transdutor piezelétrico (T_{PZT}), é obtido a partir da Eq. 3.12, na qual μ_{\max} e σ_{\max} correspondem, respectivamente, aos limites superiores do intervalo de confiança para a média e para o desvio

padrão dos valores de CCD atribuídos ao estado intacto (*baseline*), considerando um dado nível de significância.

$$T_{PZT} = \mu_{\max} + 3 * \sigma_{\max} \quad (3.12)$$

Portanto, em virtude da utilização de parâmetros estatísticos dos valores de CCD na condição intacta pela Eq. 3.12, os segmentos selecionados das assinaturas pré-processadas atribuídas a este estado são comparados ao segmento situado na mesma faixa de frequência da mediana do conjunto dessas assinaturas. Desta forma, os termos R e R^0 da Eq. 3.7 correspondem, respectivamente, à banda de frequência selecionada de uma dada assinatura de impedância na condição intacta (*baseline*), e ao mesmo segmento da mediana do conjunto de assinaturas nessa condição.

Neste contexto, cada segmento selecionado de assinatura pré-processada na condição inicial, é comparado com o segmento na mesma banda de frequência da mediana do conjunto dessas assinaturas. Consequentemente, é obtido para cada pastilha piezelétrica, uma mensuração da variabilidade resultante da própria medição nos segmentos selecionados. No contexto deste estudo, dada a avaliação de três abordagens distintas para seleção de intervalos de frequência, este procedimento é executado para cada abordagem individualmente.

A partir do limiar de detecção determinado pela Eq. 3.12, torna-se possível identificar a presença ou ausência de danos por meio da comparação entre o limiar obtido e a mediana dos valores de CCD correspondentes a um determinado estado estrutural. Estes valores se referem àqueles calculados em uma dada condição estrutural em relação ao estado sem dano. Portanto, no atual contexto, os termos R e R^0 da Eq. 3.7 correspondem, respectivamente, às medianas dos segmentos selecionados das assinaturas de impedância nas condições pós-dano e pré-dano.

Os valores de CCD obtidos que excedem os limiares de detecção estabelecidos para as respectivas pastilhas piezelétricas indicam a presença de danos nas regiões adjacentes a esses transdutores. Em contrapartida, as pastilhas cujos valores de CCD são iguais ou inferiores aos respectivos limiares de detecção sinalizam a ausência de alterações estruturais significativas em suas proximidades. Dessa forma, duas classes distintas podem ser definidas: uma associada à ausência de danos e outra relacionada à presença de danos, possibilitando a modelagem dessas categorias por meio da KI.

3.2.4 Localização de Danos por KI

Os valores da métrica de dano – neste caso, o CCD – e os respectivos limiares de detecção das pastilhas piezelétricas são a base para o estabelecimento de modelos preditivos por meio da KI. O desenvolvimento desses modelos é conduzido através das seguintes etapas sequenciais: (1) preparação dos dados; (2) análise exploratória e avaliação da continuidade espacial; e (3) obtenção das estimativas pela KI. Nas subseções seguintes, são descritos em detalhe os procedimentos correspondentes a cada uma dessas etapas.

3.2.4.1 Preparação dos dados

O primeiro procedimento necessário para a obtenção das estimativas por meio da KI consiste na etapa de preparação dos dados, a qual envolve o estabelecimento das variáveis indicadoras e a organização das informações em formato adequado para sua utilização em um ambiente computacional voltado à análise geoestatística.

As variáveis indicadoras, como demonstrado na Seção 3.1, podem ser obtidas por meio da Eq. 3.1 ou da Eq. 3.2, em função da abordagem adotada e de sua adequação a cada situação específica. Neste sentido, a variável original, que pode ser categórica (*e.g.*, classes de ausência ou presença de dano) ou contínua (*e.g.*, valores de CCD), é transformada segundo as regras definidas pelas Eq. 3.1 ou Eq. 3.2, resultando nas respectivas variáveis indicadoras.

As variáveis indicadoras obtidas são, então, incorporadas ao conjunto de dados das pastilhas piezelétricas. Além dessas variáveis, cada pastilha apresenta os seguintes atributos: coordenadas X, Y e Z no espaço euclidiano, valores de CCD e a classe estrutural (*i.e.*, presença ou ausência de danos), os quais são normalmente estruturados em um formato tabular.

Contudo, a grande maioria dos programas utilizados em análise geoestatística emprega o padrão Geo-EAS (*Geostatistical Environmental Assessment Software*). Esse tipo de arquivo apresenta um cabeçalho ordenado em linhas conforme a seguinte disposição (Fig. 3.4): (1) a primeira linha contém o título do arquivo; (2) a segunda linha especifica o número total de variáveis; e (3) da terceira linha até a linha correspondente à soma entre o número de variáveis e dois, são listados os nomes das variáveis, podendo incluir suas respectivas unidades de medida. Após o cabeçalho, os dados são dispostos em formato matricial, em que as linhas representam amostras ou observações, e as colunas correspondem às variáveis (ENGLUND; SPARKS, 1991; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

```

[01] Dados
[02] 11
[03] ID
[04] X
[05] Y
[06] DAM2
[07] Ind20
[08] Ind30
[09] Ind40
[10] Ind50
[11] Ind60
[12] Ind70
[13] Ind80
[14] 1 525.55 400.25 0.34200 0 0 0 0 0 0 0 0
[15] 2 375.55 400.25 0.23380 0 0 1 1 1 1 1 1
[16] 3 225.55 400.25 0.24610 0 0 0 0 0 0 1 1
...
[24] 11 225.55 100.25 0.2371 0 0 0 1 1 1 1 1
[25] 12 75.55 100.25 0.14120 1 1 1 1 1 1 1 1

```

Figura 3.4: Exemplo de um arquivo TXT com formatação no padrão Geo-EAS. Os números na cor verde à esquerda indicam a numeração das linhas.

Consequentemente, pode ser necessária a adequação da estrutura de organização dos dados de um formato tabular para o padrão Geo-EAS. Os dados organizados nessa estrutura são adequados para as análises geoestatísticas em diversos ambientes computacionais, garantindo compatibilidade e correta interpretação desses dados.

3.2.4.2 Análise exploratória e da continuidade espacial

Essa etapa consiste no mapeamento da continuidade espacial das variáveis indicadoras por meio de semivariogramas, os quais são obtidos por meio da Eq. 3.4, aplicada para uma série de classes de distâncias. Semivariogramas experimentais são calculados para uma ampla variedade de direções com o propósito de identificar as direções preferenciais, ou seja, aquelas relacionadas à maior e menor continuidade espacial.

Entretanto, em casos de impossibilidade de estabelecimento da continuidade espacial por meio de semivariogramas direcionais, é computado o semivariograma unidirecional, no qual a tolerância angular mencionada na Seção 3.1.2 é igual a 90° .

A partir dos semivariogramas experimentais, procede-se com o ajuste dos mesmos por funções teóricas, as quais incluem os modelos apresentados na Seção 3.1.2, para a sua utilização na solução do sistema de krigagem. Esse ajuste é normalmente conduzido de forma iterativa,

empregada neste estudo. Entretanto, outras metodologias podem ser empregadas visando a automação desse processo, tais como aquelas baseadas em mínimos quadrados (CRESSIE, 1985; DESASSIS; RENARD, 2013), algoritmos genéticos (JIAO; LEI, 2011; ROCHA *et al.*, 2021), *Simulated Annealing* (SOLTANI-MOHAMMADI; SAFA, 2016) e otimização não-linear multi-objetivos (LI *et al.*, 2018). A partir dos parâmetros obtidos dos ajustes variográficos, é possível proceder com a realização das estimativas por KI.

3.2.4.3 Elaboração dos modelos preditivos

Esta etapa consiste na obtenção dos modelos estimados por meio da KI. De modo geral, as informações essenciais para a realização das estimativas incluem: (1) os dados amostrais – no padrão Geo-EAS – das variáveis indicadoras associadas a cada pastilha piezelétrica, contemplando suas respectivas coordenadas X, Y e Z; (2) as probabilidades marginais correspondentes aos patamares de corte, no caso de variáveis indicadoras derivadas de variáveis contínuas, ou as proporções das classes presentes, quando se trata de variáveis originais categóricas; (3) os parâmetros referentes aos ajustes teóricos dos semivariogramas indicadores; (4) o formato e as dimensões da vizinhança de busca empregada na seleção dos pontos amostrais vizinhos durante o processo de estimativa; (5) os parâmetros de estimativa, tais como os números mínimo e máximo de amostras consideradas no interior do volume de busca; e (6) o modelo de grade regular (*regular grid*), bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), utilizado para o armazenamento dos valores estimados pela KI.

No que se refere a variáveis originais contínuas, tais como valores de CCD, são estabelecidos diversos patamares de corte, os quais estão vinculados a percentis da distribuição estatística da variável original. Para cada um é então obtida uma variável indicadora de acordo com a Eq. 3.1. Neste contexto, as probabilidades marginais correspondentes aos patamares de corte estabelecidos são calculadas por meio da Eq. 3.13. Conforme a Eq. 3.13, a probabilidade marginal de um limiar $P_M(p)$ referente a um percentil p da distribuição estatística da variável original é obtida pela razão entre o número de valores da variável original menores ou iguais ao respectivo limiar de corte e o número total de valores da variável original (n). Portanto, a probabilidade marginal representa a proporção acumulada de valores até o respectivo percentil, refletindo a distribuição espacial dos dados em análise.

$$P_M(p) = \frac{\sum_{i=1}^n I(Z_i \leq \text{percentil}(Z, p))}{n} \quad (3.13)$$

Na Eq. 3.13, a expressão $I(Z_i \leq \text{percentil}(Z, p))$ representa uma função que retorna 1 se um i -ésimo valor de uma variável Z original é igual ou inferior a um percentil p , e 0 caso contrário. Essa função é utilizada para contabilizar o número de valores de Z que são menores ou iguais a um limiar de corte correspondente a um percentil específico, permitindo, assim, a avaliação da proporção acumulada de valores dentro da distribuição estatística analisada.

Já no contexto de variáveis originais categóricas, tais como classes de presença e ausência de dano, requer-se a determinação das proporções das classes existentes. A proporção dessas categorias é obtida por meio da relação entre a frequência absoluta da categoria correspondente ($f(D_i)$) e o número total de observações (n), conforme demonstrado na Eq. 3.14.

$$P(D) = \frac{f(D)}{n} \quad (3.14)$$

Outra informação essencial para a realização das estimativas por meio da KI, conforme mencionado na Seção 3.1.2, refere-se aos dados do ajuste teórico dos semivariogramas. Tais parâmetros englobam: o efeito pepita, os tipos de modelos teóricos empregados no ajuste (incluindo, quando aplicável, o uso combinado de múltiplos modelos), as contribuições individuais de cada estrutura elementar ao semivariograma total, os respectivos alcances, bem como as orientações espaciais associadas a cada semivariograma.

Além de serem empregados no próprio processo de estimativa pela KI, os parâmetros obtidos a partir dos ajustes dos semivariogramas também subsidiam a definição das dimensões dos volumes de busca, os quais, em geral, assumem formato elíptico (2D) ou elipsoidal (3D). Nesse contexto, as orientações dos semi-eixos principais desses volumes são ajustadas de acordo com as orientações espaciais dos semivariogramas, enquanto as magnitudes correspondem aos respectivos alcances nas mesmas direções. Assim, estabelece-se uma vizinhança de busca coerente com a continuidade espacial da variável analisada, garantindo que apenas amostras espacialmente correlacionadas com o ponto a ser estimado – localizado no centro da elipse (2D) ou do elipsoide (3D) – sejam passíveis de serem consideradas no processo de estimativa.

O controle da quantidade de amostras efetivamente utilizadas nas estimativas dentro dos volumes de busca é realizado por meio do ajuste dos limites mínimo e máximo de amostras consideradas. Essa configuração permite um controle mais refinado do processo de estimativa, possibilitando, por exemplo, priorizar a utilização das amostras mais próximas ao ponto a ser estimado, mediante a restrição do número máximo de amostras incluídas no cálculo.

Os valores estimados pela KI – assim como por demais métodos de krigagem – devem ser

armazenados em um modelo de grade regular. Esse modelo é uma representação do sistema cujo comportamento espacial está sendo previsto, e são constituídos de células (2D) ou blocos (3D). As dimensões desses componentes unitários depende, entre outros fatores, do espaçamento amostral e da resolução necessária para fins de aplicações específicas desses modelos (PYRCZ; DEUTSCH, 2014). A partir das dimensões definidas para as células ou blocos, determinam-se os demais parâmetros do modelo, tais como a origem – geralmente posicionada na borda inferior esquerda – e o número de componentes unitários em cada direção.

Com base nos elementos previamente definidos, procede-se à realização das estimativas por KI utilizando um estimador fundamental – neste caso, a KS – e adotando-se uma estratégia de estimativa que pode se fundamentar em dois enfoques distintos: o da krigagem total (*full kriging*), na qual todos os semivariogramas são empregados, ou o da KI da mediana (*median indicator kriging*), em que apenas o patamar de corte correspondente, em geral, à mediana da variável original e seus respectivos semivariogramas são utilizados como referência para as estimativas (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Os modelos preditivos obtidos por meio da KI contêm, em cada célula ou bloco, valores estimados compreendidos entre 0 e 1, os quais expressam probabilidades associadas à ocorrência das classes consideradas ou, alternativamente, à probabilidade de que os valores da variável original sejam iguais ou inferiores aos patamares de corte estabelecidos. Contudo, pode ser necessário realizar um pós-processamento do modelo preditivo bruto, o qual pode incluir: (1) a conversão de probabilidades abaixo do patamar de corte em probabilidades acima do limiar de corte; (2) o tratamento de valores ausentes, resultantes da inexistência de estimativas em determinadas células ou blocos, o que envolve a sua identificação e a sua conversão para um identificador adequado; e (3) a exclusão de células ou blocos considerados desnecessários em contextos específicos.

CAPÍTULO IV

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL: APLICAÇÃO DA KI EM ESTRUTURA SIMPLES

Com o objetivo de investigar a capacidade da KI em prever a localização de múltiplos danos a partir de informações obtidas pelo método IEM, foi inicialmente realizada uma análise em uma estrutura de geometria simples, capaz de ser adequadamente representada por um modelo 2D. Para tal estudo, foi selecionada uma chapa plana de alumínio, devido ao fato de representar a configuração estrutural mais elementar e adequada à análise por métodos geoestatísticos. Apesar de possuir espessura, a placa pode ser representada como uma estrutura 2D, o que a torna ideal para uma investigação inicial, uma vez que métodos geoestatísticos são frequentemente empregadas na construção de modelos 2D – como, por exemplo, mapeamentos de contaminação em solos – ou 3D, como ocorre na modelagem geológica.

Dante do exposto, as seções subsequentes descrevem os procedimentos experimentais adotados para o monitoramento da placa de alumínio por meio do método IEM, seguidos pelo detalhamento da metodologia empregada na obtenção dos modelos preditivos por KI, dentro do escopo do *framework* geral apresentado na Seção 3.2. Em cada etapa, são apresentados os resultados correspondentes, culminando na construção dos modelos de probabilidade de ocorrência de danos, os quais representam os resultados finais deste estudo de caso.

4.1 Procedimento Experimental

A placa de alumínio empregada neste estudo (Fig. 4.1b) apresenta dimensões de 601,1 mm de comprimento, 500,5 mm de largura e 2,1 mm de espessura. Com o objetivo de cobrir uniformemente toda a superfície da placa, foi planejado um arranjo regular de 12 pastilhas piezelétricas, conforme ilustrado na Fig. 4.1a, adotando-se um espaçamento de 150,0 mm entre os transdutores.

O formato das pastilhas piezelétricas utilizadas foi circular, com 10 mm de diâmetro e 1

mm de espessura, e com eletrodos dispostos no mesmo lado da pastilha (*wrap around*). Essas pastilhas foram selecionadas com o objetivo de restringir a extensão espacial da área mapeada pelo transdutor, de modo a privilegiar a detecção de alterações estruturais espacialmente mais localizadas, além de atender a critérios práticos de disponibilidade dos transdutores. A Fig. 4.1b mostra a placa de alumínio utilizada com a identificação de cada pastilha piezelétrica.

Dada a natureza exploratória do estudo, não foi realizada uma análise sistemática envolvendo transdutores de diferentes tipos e dimensões. Apesar de investigações anteriores ([PALOMINO, 2012](#)) apontarem para a inexistência de influência do formato do transdutor nas medições e na detecção do dano, sugere-se que tal investigação seja realizada em trabalhos futuros dedicados à localização de danos por meio da KI, uma vez que informações derivadas de tal pesquisa podem fornecer subsídios relevantes para o projeto e a implementação de sistemas de monitoramento aplicáveis em condições reais de operação.

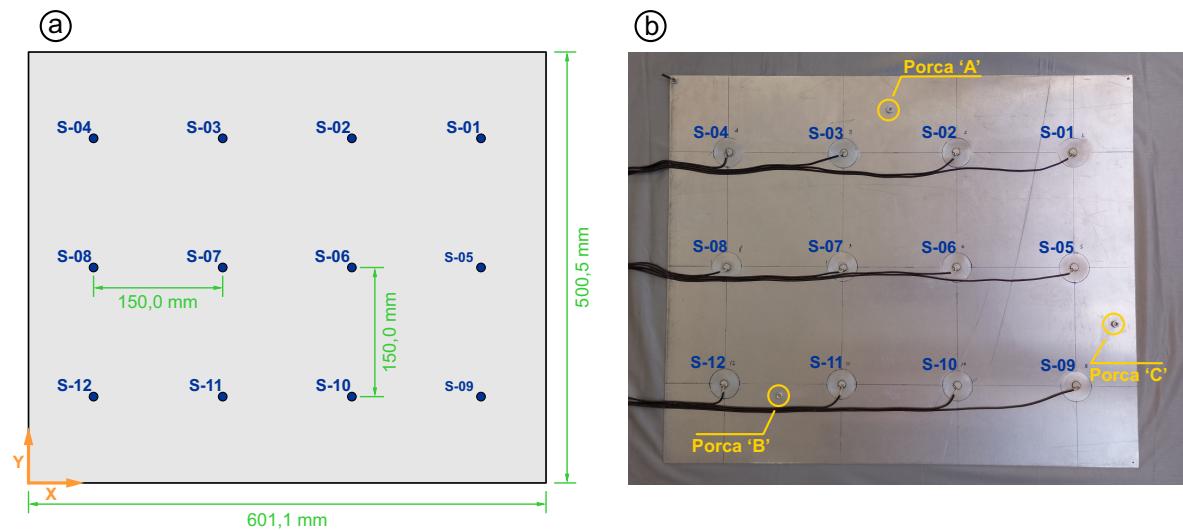


Figura 4.1: Placa de alumínio: (a) desenho esquemático com o arranjo das pastilhas piezelétricas e (b) exemplar experimental com identificação das pastilhas e posições das porcas.

A fixação das pastilhas foi realizada após uma limpeza rigorosa da superfície da placa nos locais de instalação, utilizando adesivo epóxi Araldite® Hobby, produzido pela Tekbond®. No decorrer do procedimento de colagem, dois ímãs de NdFeB foram aplicados em cada transdutor, um posicionado sobre a pastilha e o outro sobre a superfície oposta da placa. Dessa forma, foi possível assegurar uma camada mínima de adesivo entre o transdutor e a placa. Os ímãs utilizados neste estudo foram de formato cilíndrico, com 8 mm de diâmetro, 8 mm de espessura e grau magnético N35, correspondendo a uma densidade de campo magnético de 0,43 T. Para assegurar a cura completa da resina epóxi, os ímãs permaneceram sobre cada transdutor por um período mínimo de 24 horas. Após decorrido este prazo, procedeu-se com a soldagem dos

cabos elétricos aos transdutores para viabilizar a coleta das assinaturas de impedância.

As aquisições dessas assinaturas foram realizadas em ambiente de temperatura controlada, utilizando uma câmara térmica ESPEC®, modelo EPL-4H (Fig. 4.2a), dentro da qual a placa de alumínio ficou suspensa por meio de arames conectados em duas bordas. Durante o experimento, a câmara térmica foi configurada para operar a 25 °C. Devido à estabilidade térmica proporcionada pela câmara, não foi necessária a utilização de sensores adicionais para monitoramento da temperatura.

As coletas das assinaturas de impedância foram conduzidas no Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannus Reis” (LMest), e utilizando o analisador de impedância SySHM (Fig. 4.2c), desenvolvido pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) ([FINZI NETO et al., 2011](#); [MARTINS et al., 2012](#); [PALOMINO; STEFFEN Jr.; FINZI NETO, 2014](#); [MARUO et al., 2015](#)). Para cada condição estrutural – incluindo os estados pré-dano e pós-dano – foram coletadas 40 assinaturas de impedância. A especificação desse valor foi determinada com o propósito de garantir uma amostra estatisticamente representativa, evitando o aumento desnecessário do custo computacional ou do tempo de aquisição dos dados. Em geral, tamanhos amostrais superiores a 30 são suficientes para a determinação de parâmetros estatísticos com confiabilidade, mesmo quando a distribuição subjacente dos dados não é conhecida *a priori* ([ROSS, 2014](#)).

As medições foram efetuadas no intervalo de 150,0 kHz a 210,0 kHz, com resolução de um ponto a cada 10 Hz, definida com o objetivo de assegurar uma representação precisa das assinaturas de impedância e permitir a detecção de alterações sutis nas curvas de resposta sob diferentes condições estruturais. Ademais, cada ponto do espectro medido foi obtido a partir da média de 1024 medições individuais. Esse procedimento foi adotado para minimizar a variabilidade intrínseca das coletas e assegurar maior confiabilidade aos dados analisados.

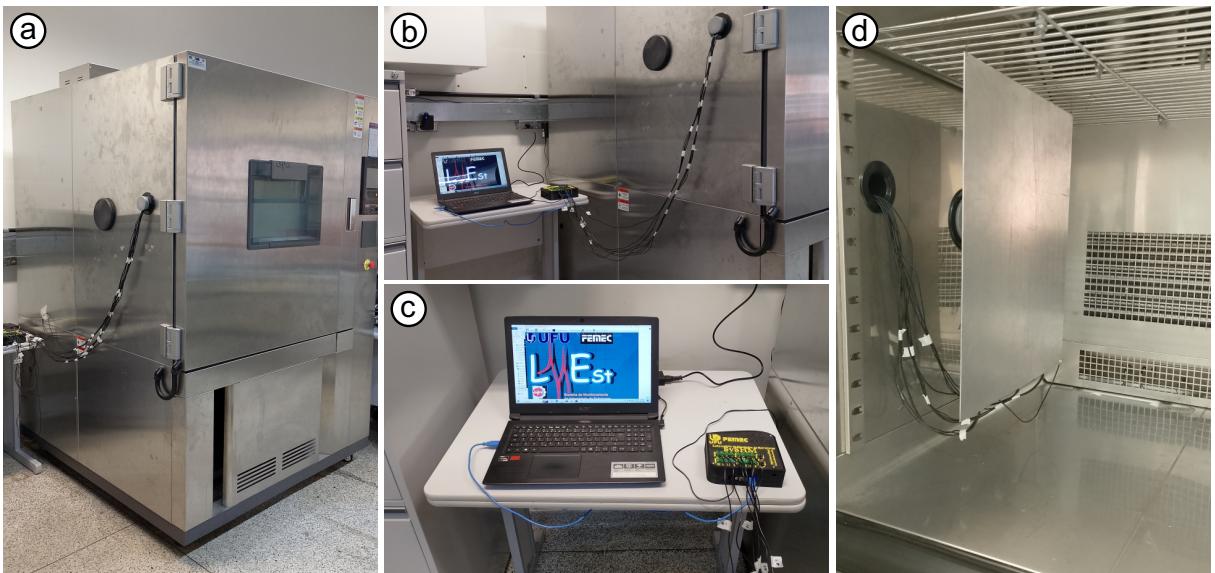


Figura 4.2: Equipamentos empregados na aquisição das assinaturas da placa de alumínio: (a) câmara térmica; (b–c) *notebook* e analisador de impedância SySHM; (d) placa de alumínio no interior da câmara térmica.

Com o propósito de avaliar a eficácia da KI na estimativa da localização de múltiplos danos estruturais, foram definidos três cenários de dano, iniciando-se com a ocorrência de um único dano e acrescentando-se progressivamente novos danos até o total de três. Essas condições estão identificadas neste trabalho como “Dano A”, “Danos A e B”, e “Danos A, B e C”. Em todas as configurações, a ocorrência de danos foi simulada por meio da adição de massa, utilizando porcas sextavadas M4 de aço (DIN 934), com distância entre faces de aproximadamente 7,0 mm, altura nominal de 3,2 mm, e cada uma com massa aproximada de 0,86 g. As porcas foram fixadas nos locais mostrados na Fig. 4.1b utilizando adesivo 793, fabricado pela Tekbond®.

A utilização de porcas (*i.e.*, adição de massa) para a simulação da presença de danos foi adotada por constituir uma abordagem amplamente reconhecida como eficaz no monitoramento por IEM (CAO; QI; TANG, 2018; ANTUNES *et al.*, 2019; CAMPOS *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2021; SOMAN; SINGH; MALINOWSKI, 2023), uma vez que induz modificações nas propriedades locais da estrutura sem a necessidade de provocar alterações permanentes no espécime.

A configuração de posicionamento das porcas na placa de alumínio (Fig. 4.1b) foi cuidadosamente elaborada para permitir uma análise detalhada do comportamento espacial das métricas de dano obtidas das assinaturas coletadas, com ênfase na relação entre a magnitude dessas métricas e a posição relativa dos danos simulados aos transdutores piezelétricos. Essas informações são essenciais para avaliar a eficácia da técnica de KI na previsão da localização de

danos.

As assinaturas de resistência, correspondente à parte real da impedância, foram utilizadas nas análises subsequentes (Fig. 4.3). A escolha pela utilização dessa grandeza decorre de sua comprovada maior sensibilidade à presença de danos estruturais, aliada a uma menor suscetibilidade às variações ambientais (CHERRIER *et al.*, 2013; NA; LEE, 2013; HAMZELLOO; BARZEGAR; MOHSENZADEH, 2020; DJEMANA; HRAIRI; YATIM, 2022; MEHER; MISHRA; SUNNY, 2022).

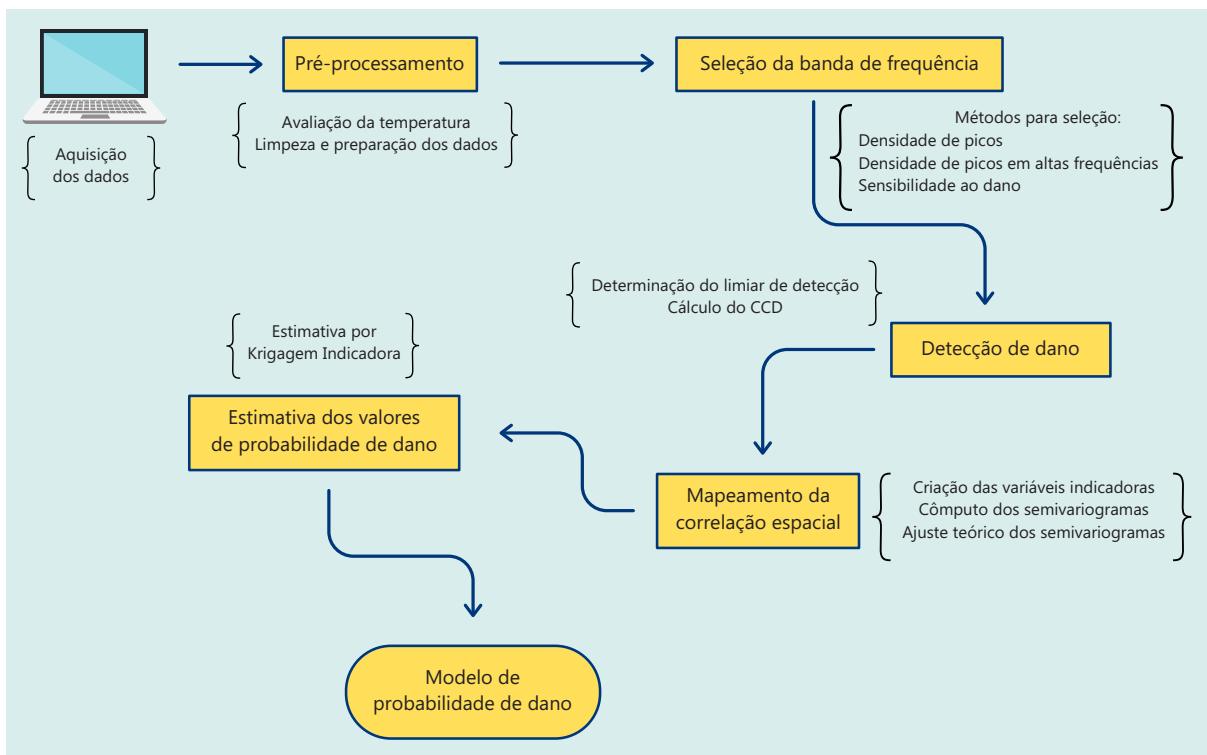


Figura 4.3: Fluxograma das etapas realizadas para a obtenção dos mapas de probabilidade de danos a partir dos dados coletados da placa de alumínio.

Conforme demonstrado na Fig. 4.3, a metodologia empregada para a obtenção dos mapas de probabilidade de dano no contexto da placa de alumínio envolveu cinco etapas gerais: Pré-processamento das assinaturas brutas; seleção da banda de frequência, baseada em três abordagens distintas; detecção de dano(s); mapeamento da correlação espacial das variáveis indicadoras por meio de semivariogramas, e; realização das estimativas por KI.

4.2 Pré-Processamento dos Dados Coletados

As assinaturas coletadas foram inicialmente submetidas a uma etapa de pré-processamento, com o propósito de preparar os dados, assegurando sua consistência e confiabilidade para as

etapas subsequentes. A importação e o processamento inicial desses dados foram realizados com a utilização de *scripts* desenvolvidos em Python, versão 3.8.17.

O pré-processamento foi implementado com base nos seguintes recursos e módulos da linguagem Python: (1) Numpy, versão 1.24.4 ([HARRIS et al., 2020](#)), empregado para manipulação eficiente de matrizes e *arrays* numéricos; (2) Pandas, versão 1.5.3 ([The pandas development team, 2023](#)), para organização e manipulação de dados tabulares; (3) OS, um módulo padrão do Python, utilizado para gerenciar e selecionar os caminhos dos arquivos no sistema de diretórios; (4) Glob, também um módulo padrão do Python, aplicado para a manipulação de múltiplos arquivos com padrões de nomenclatura específicos, neste caso, arquivos com extensão “.SySHM”, e; (5) Scipy, versão 1.10.1 ([VIRTANEN et al., 2020](#)), uma biblioteca que fornece algoritmos e funções para tratamento de sinais, análise estatística e outras aplicações científicas.

Essa etapa compreendeu os procedimentos descritos na Seção [3.2.1](#), a saber: (1) suavização das assinaturas por meio do filtro de Savitzky–Golay ([SAVITZKY; GOLAY, 1964](#)) e (2) identificação e remoção de assinaturas anômalas. Considerando que o experimento foi conduzido em câmara térmica sob condições de temperatura estáveis, não se fez necessária a aplicação de técnicas para compensação de temperatura.

A extração das assinaturas de impedância – com arquivos com extensão “.SySHM” – para o pré-processamento, foi executada utilizando a biblioteca Pandas, com o auxílio do módulo Glob, o que permitiu a seleção automatizada e eficiente dos dados relevantes. As assinaturas extraídas foram estruturadas em matrizes, nas quais as linhas representavam as observações, e as colunas, os atributos, ou seja, os pontos no domínio da frequência.

A aplicação do filtro de Savitzky-Golay foi executada por meio do método `savgol_filter` da biblioteca SciPy, usando uma janela de tamanho seis e polinômios de ordem quatro. Essa configuração assegurou uma interpolação adequada, preservando as características essenciais dos sinais e garantindo a integridade das informações para análises subsequentes.

A identificação das assinaturas anômalas foi realizada conforme os procedimentos descritos na Seção [3.2.1](#), por meio da determinação dos limites de controle inferior (Eq. [3.8](#)) e superior (Eq. [3.9](#)). As assinaturas de impedância cujos valores de CCD situaram-se fora desse intervalo foram removidas.

Após a etapa de limpeza dos dados, crucial para garantir uma análise efetivamente baseada em assinaturas consistentes, procedeu-se com a seleção do intervalo de frequência para a determinação das métricas de dano, fundamentais para a detecção e localização dos danos.

4.3 Seleção do Intervalo de Frequência

As seções subsequentes descrevem detalhadamente os procedimentos adotados, as ferramentas empregadas na seleção dos intervalos de frequência e os resultados obtidos para cada abordagem investigada.

4.3.1 Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos

A seleção dos intervalos nessa abordagem foi realizada em conformidade com os procedimentos descritos na Seção 3.2.2.1. Neste estudo, foram empregados segmentos com largura de 10 kHz (1.000 pontos), e a obtenção da linha de referência suavizada foi efetuada por meio de um filtro de mediana móvel, implementado com o método `median_filter` da biblioteca SciPy ([VIRTANEN et al., 2020](#)). Nesse processo, foi empregada uma janela de 1.000 pontos, correspondendo à largura dos segmentos investigados. Essa configuração permitiu estabelecer uma linha de base robusta, capaz de refletir às variações locais do sinal, a qual serviu de referência para a identificação dos picos em cada segmento.

O limiar de detecção dos picos em cada ponto do espectro medido foi determinado pela soma entre a linha de referência e três vezes o MAD (Eq. 3.10) calculado para o respectivo segmento, conforme a metodologia descrita na Seção 3.2.2.1. A identificação dos picos em cada segmento foi então realizada por meio da função `find_peaks` da biblioteca SciPy ([VIRTANEN et al., 2020](#)), utilizando o limiar de detecção previamente definido e impondo uma distância mínima de 10 pontos entre picos consecutivos. Os intervalos selecionados corresponderam àqueles que apresentaram o maior número de picos detectados.

A aplicação da abordagem de seleção de intervalos baseada no número de picos resultou na identificação das bandas de frequência apresentadas na Fig. A.1, localizada no Apêndice A.

A integração dos os intervalos selecionados por essa abordagem (Fig. 4.4) mostra que 58,3 % das pastilhas piezelétricas apresentaram uma maior quantidade de picos no intervalo de 160,0 a 190,0 kHz, o que representa uma largura de banda de 30 kHz. Três transdutores piezelétricos (S-07, S-09 e S-12) apresentaram o intervalo predominantemente abaixo de 160 kHz, enquanto apenas um sensor resultou em intervalo de frequência majoritariamente acima de 200 kHz.

A análise da distribuição dos centros dos intervalos selecionados (Fig. 4.4b) evidencia que a distribuição ocorre de forma moderadamente dispersa, com desvio padrão de 15,6 kHz em torno da média de aproximadamente 174,0 kHz, representada por um marcador em vermelho

na Fig. 4.4b. A proximidade entre a média e a mediana ($173,6$ kHz) sugere uma distribuição relativamente simétrica, em que 50 % dos valores estão situados entre $163,1$ kHz e $182,3$ kHz, de tal maneira que 50 % dos dados estão concentrados em um intervalo de $19,2$ kHz.

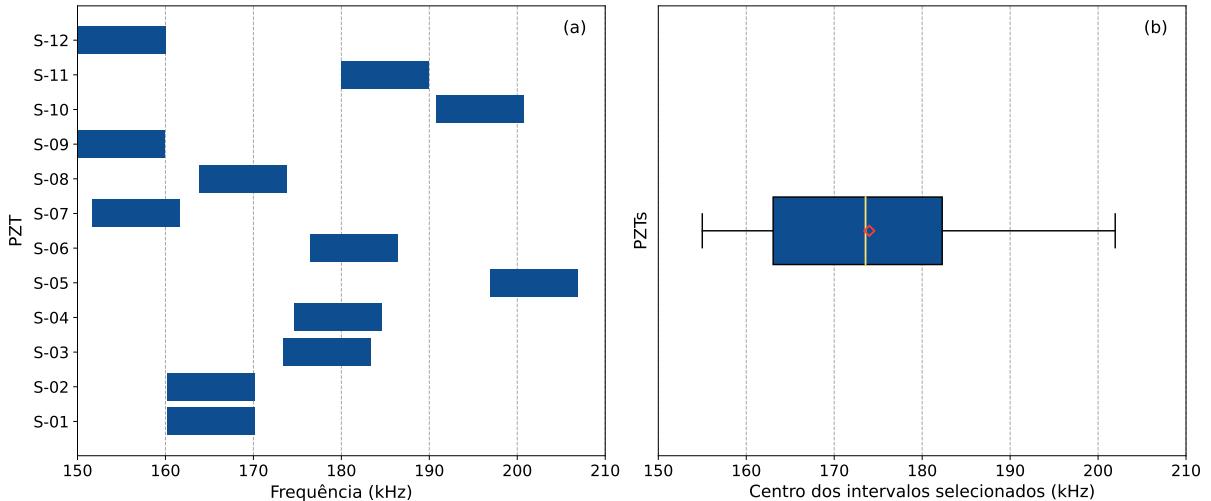


Figura 4.4: (a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica referentes ao experimento da placa de alumínio; (b) *boxplot* da frequência central desses intervalos.

Essas características evidenciam uma cerca homogeneidade entre as respostas dos sensores em diferentes regiões da placa. Valores relativamente diferentes (*e.g.*, mínimo de $155,0$ kHz e máximo de $201,9$ kHz) podem estar relacionadas a variações locais das propriedades mecânicas, condições de contorno, ou condições de acoplamento das pastilhas na estrutura.

Diante do exposto, infere-se que o intervalo de $160,0$ a $190,0$ kHz contém grande parte das informações estruturais do sistema em $58,3\%$ dos transdutores piezelétricos. Ademais, a ausência de valores atípicos (*outliers*) indica uma uniformidade no comportamento do sistema, com resposta estável. Essa homogeneidade é indicativa de boa qualidade de acoplamento sensor-placa e de ausência de variações locais abruptas nas propriedades mecânicas da estrutura monitorada.

4.3.2 Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências

A determinação da banda de frequência por meio dessa abordagem seguiu a metodologia descrita na Seção 3.2.2.2. Assim como no caso anterior, foi adotada uma largura-padrão de 10 kHz (1.000 pontos). O estabelecimento da linha de referência nas assinaturas de impedância foi realizado por meio do método `median_filter`, enquanto a detecção dos picos foi conduzida

com a função `find_peaks`, ambos pertencentes à biblioteca SciPy ([VIRTANEN et al., 2020](#)).

A inclusão de um ponderador proporcional à frequência, visando priorizar a seleção de intervalos com frequências relativamente mais elevadas, resultou na seleção dos intervalos exibidos na Fig. A.3 do Apêndice A. As assinaturas de impedância desses intervalos, em todas as condições de dano investigadas, estão mostradas na Fig. A.4.

Através de uma análise abrangente e integrada de todas as bandas selecionadas por meio dessa abordagem (Fig. 4.5a) foi constatada a predominância de intervalos majoritariamente acima de 180 kHz. Nessas condições, 83,3 % dos sensores apresentaram bandas de frequência selecionadas acima deste valor.

Conforme demonstrado na Fig. 4.5a, apenas o intervalo selecionado para o sensor S-03 (173,3 kHz a 183,3 kHz) foi substancialmente abaixo de 180 kHz. Esse comportamento indica que o número de picos detectados nesse intervalo é significativamente maior do que o observado nos demais intervalos. Dessa forma, a aplicação do ponderador não promoveu alterações substanciais na pontuação (*score*) total deste sensor para a seleção de intervalos com maior frequência.

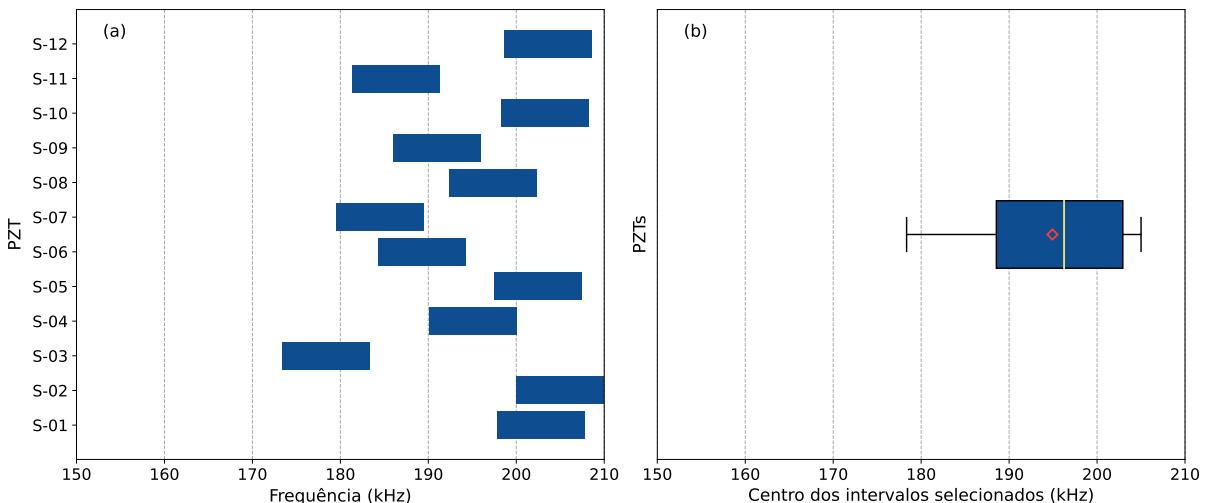


Figura 4.5: (a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados em frequências elevadas – ponderação proporcional à frequência – na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica referentes ao experimento da placa de alumínio; (b) *boxplot* da frequência central desses intervalos.

A distribuição estatística das frequências centrais desses intervalos (Fig. 4.5b) evidencia que há relativamente pouca variação das frequências centrais em torno da média (194,9 kHz), constatado também pelo desvio padrão obtido, de 8,9 kHz, o qual é 42,9 % inferior ao desvio padrão obtido na abordagem de seleção de intervalo de frequência que considera unicamente a

quantidade de picos nas assinaturas de resistência.

A ocorrência de uma mediana (196,2 kHz) ligeiramente superior à média (194,9 kHz) indica uma distribuição moderadamente assimétrica à esquerda, sugerindo a presença de alguns poucos valores mais baixos distribuídos de forma dispersa. Essa assimetria é corroborada pela Fig. 4.5a, na qual é observada a ocorrência de apenas um número reduzido de sensores com intervalos predominantemente abaixo de 190 kHz, enquanto a maioria concentra-se em faixas de frequência mais elevadas.

Ainda, a análise dos quartis da distribuição indica que 50 % das frequências centrais estão situadas entre 188,5 kHz e 202,9 kHz, abrangendo uma largura de banda de apenas 14,4 kHz. Esse estreito intervalo evidencia uma concentração significativa dos valores centrais dos intervalos de frequência em uma faixa limitada e situada próxima ao limite superior da banda analisada.

Esse comportamento pode ser atribuído à influência do critério de ponderação adotado, que favoreceu, na maioria dos sensores, a seleção de bandas com frequências efetivamente mais elevadas, situadas próximas do limite superior do intervalo mapeado. Dessa forma, apenas uma parcela reduzida dos sensores foi minimamente afetada pela implementação do ponderamento pela frequência. Tal comportamento pode ser observado, sobretudo, para o sensor S-03, cuja frequência central do intervalo foi inferior a 180 kHz.

4.3.3 Seleção dos intervalos baseada na sensibilidade ao dano

A seleção do intervalo de frequência com maior sensibilidade ao dano em cada condição estrutural foi realizada a partir do mapeamento dos valores de CCD em todas as combinações viáveis de bandas de frequência. Nesse processo, definiu-se uma largura mínima de 10 kHz, enquanto a largura máxima correspondeu à extensão total do espectro medido.

A geração de todas as combinações possíveis de intervalos foi conduzida por meio da construção de uma grade bidimensional, implementada com o método `meshgrid` da biblioteca NumPy ([HARRIS et al., 2020](#)). Essa abordagem possibilitou a sistematização do espaço de soluções, garantindo a consideração de todas as combinações possíveis de limites inferior e superior para os intervalos de frequência. O intervalo associado ao maior valor de CCD foi, então, selecionado.

A implementação dessa metodologia resultou na seleção dos intervalos de frequência exibidos na Fig. A.6 (Dano A), na Fig. A.8 (Danos A e B), e na Fig. A.10 (Danos A, B e C). Os

mapas de contorno destacando os valores máximos de CCD desses intervalos estão mostrados na Fig. A.5, na Fig. A.7, e na Fig. A.9, respectivamente.

Uma representação integrada dos intervalos obtidos em cada condição de dano é exibida na Fig. 4.6. Os resultados apresentados na Fig. 4.6 indicam, para a condição com um único dano, uma tendência à formação de dois agrupamentos predominantes entre os sensores: um primeiro grupo, com intervalos de frequência selecionados majoritariamente abaixo de 180 kHz (como observado nos sensores S-03, S-07, S-08, S-09 e S-10), e um segundo grupo, com intervalos localizados acima desse limiar (caso dos sensores S-02, S-04, S-05, S-06, e S-12).

Embora nem todos os sensores se enquadrem rigidamente nessa divisão – a exemplo dos sensores S-01 e S-11, que exibem frequências próximas de 180 kHz – o padrão geral sugere uma distribuição não aleatória dos intervalos selecionados em relação à localização dos danos.

Adicionalmente, observa-se que sensores que, presumivelmente, se encontram mais afastados da posição do dano – como os sensores S-08, S-09, S-10 e S-11 – apresentam, com maior frequência, intervalos situados na faixa inferior do espectro analisado.

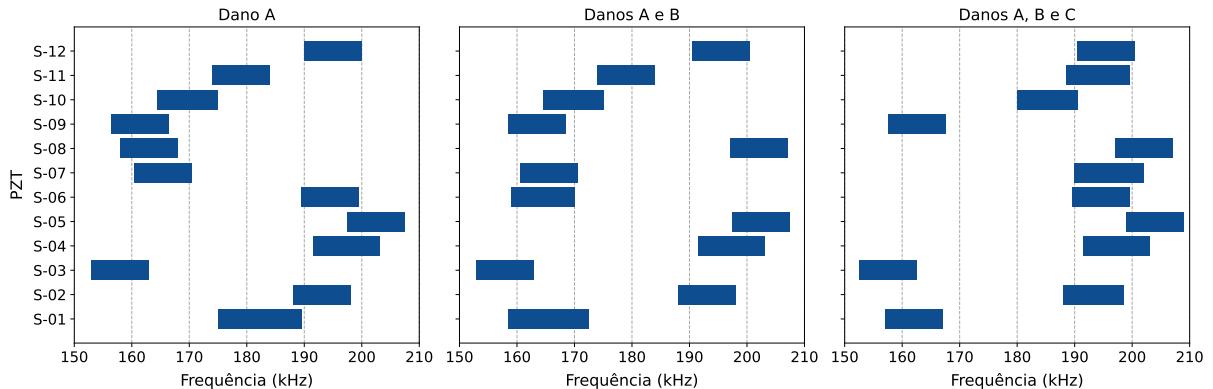


Figura 4.6: Intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano em cada condição estrutural investigada referente ao experimento da placa de alumínio.

Na condição com dois danos estruturais, ilustrada no gráfico central da Fig. 4.6, observa-se uma distribuição mais heterogênea dos intervalos selecionados em comparação à condição com um único dano. A maior heterogeneidade observada é evidenciada pelo aumento da variabilidade das frequências centrais dos intervalos selecionados, cujo desvio padrão (17,1 kHz) é 6,2 % superior ao desvio padrão dos centros dos intervalos na condição com único dano (16,1 kHz).

A maior variabilidade das frequências centrais no cenário com dois danos também é evidenciada na Fig. 4.7a, na qual é possível observar um intervalo interquartil mais amplo na condição com dois danos (30,7 kHz) em comparação com a condição com um dano (29,8 kHz).

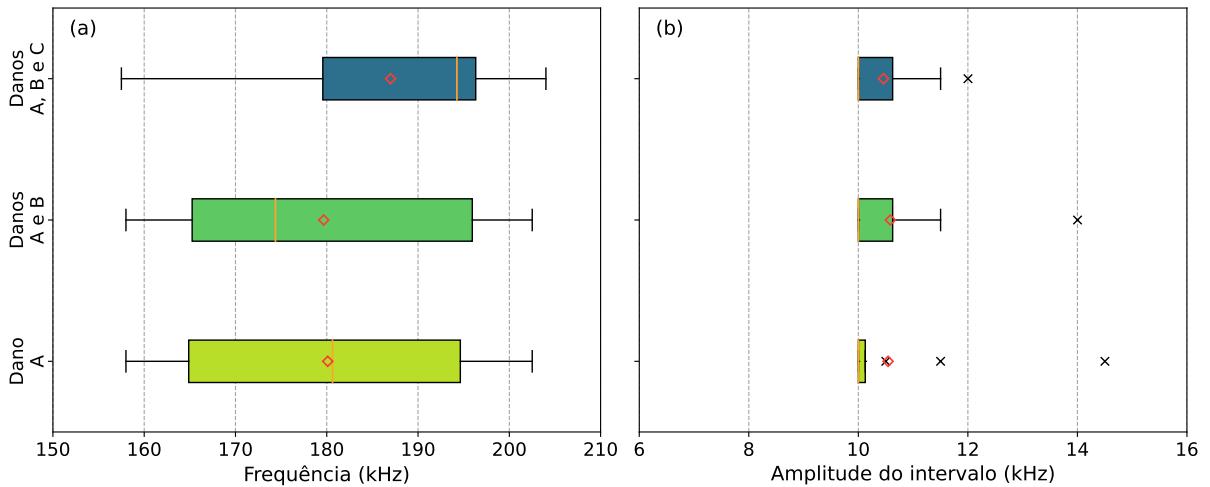


Figura 4.7: (a) Boxplots dos centros dos intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano nas condições estruturais investigadas, referentes à placa de alumínio e (b) boxplots das amplitudes dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem fundamentada na sensibilidade ao dano, em todas as condições estruturais analisadas.

Conforme demonstrado na Fig. 4.6, alguns transdutores, como os sensores S-01 e S-06, tiveram suas faixas de frequência mais sensíveis alteradas para frequências inferiores do espectro analisado, enquanto outros sensores (*e.g.*, o sensor S-08), tiveram seus intervalos migrados para faixas superiores do espectro. Em contrapartida, nos demais sensores, a alteração das suas respectivas faixas de frequência não foi significativa.

Essa redistribuição espectral sugere que o acréscimo de um segundo dano na placa provoca modificações não lineares na resposta eletromecânica da estrutura, afetando de forma diferenciada os sensores conforme sua posição relativa às posições dos danos. Ainda, a ausência de um agrupamento espectral claramente dominante reflete a complexidade crescente do sistema.

A introdução de uma terceira porca de aço na placa, aparentemente provocou um deslocamento mais pronunciado dos intervalos mais sensíveis à presença de danos às faixas superiores do espectro analisado, conforme indicado na Fig. 4.6. Essas alterações ocorreram nos sensores S-06, S-07, S-10 e S-11. Em contrapartida, dos sensores S-01, S-03 e S-09 tiveram seus intervalos de frequência mais sensíveis mantidos na porção inferior do espectro.

Essa prevalência de intervalos com maior sensibilidade ao dano próximos do limite superior do espectro investigado é também evidenciada na Fig. 4.7a, na qual é possível identificar uma distribuição estatística com forte assimetria à esquerda no cenário com três danos estruturais.

O deslocamento de intervalos de frequência para regiões superiores do espectro analisado indica que a presença de múltiplos danos, e possivelmente a prevalência de menores distâncias entre sensores e danos, resulta no deslocamento dos intervalos de maior sensibilidade ao dano

para regiões de maior frequência.

Esse comportamento pode estar relacionado ao observado por Yang e Divsholi (2010), em que danos posicionados próximos das pastilhas piezelétricas tendem a influenciar predominantemente frequências elevadas do espectro, enquanto danos posicionados distantes dos sensores tendem a afetar mais fortemente faixas de menor frequência. Adicionalmente, o padrão aparente observado parece convergir com as observações de Wang, Song e Zhu (2013), Singh, Fakih e Malinowski (2023) e Sun *et al.* (2024), os quais sugerem que intervalos de maior frequência tendem a exibir maior sensibilidade à presença de danos estruturais.

O mapeamento da amplitude dos intervalos selecionados a partir da abordagem baseada na sensibilidade ao dano (Fig. 4.7b) indica que a largura dos intervalos foi predominantemente inferior a 11,0 kHz – com uma média de 10,5 kHz – em todas as condições de dano avaliadas. Apenas 16,7 %, 25,0 % e 25,0 % dos intervalos nas condições com um, dois e três danos, respectivamente, apresentaram larguras de banda superiores a 11,0 kHz. Ademais, a máxima largura de banda observada foi de 14,5 kHz, atribuída à condição com um único dano. Diante do exposto, infere-se que a ocorrência de maior sensibilidade à presença de danos se manifesta predominantemente em intervalos de frequência mais estreitos, em torno de 10,5 kHz de largura.

Além disso, a análise da dispersão da amplitude dos intervalos selecionados indica uma redução progressiva do desvio padrão das larguras de banda à medida que o número de danos na estrutura aumenta. Neste contexto, o cenário com um único dano resultou em um desvio padrão de 1,3 kHz, enquanto as condições com dois e três danos resultaram em desvios padrões de 1,2 kHz e de 0,7 kHz, respectivamente.

4.4 Detecção dos danos

Os intervalos selecionados por meio das três metodologias analisadas neste estudo foram empregados na etapa de detecção de danos. Nessa etapa, a definição dos limiares de detecção baseou-se na Eq. 3.12, conforme descrito na Seção 3.2.3. A obtenção dos limites superiores do intervalo de confiança para a média e para a variância – e, consequentemente, para o desvio padrão – foi realizada de duas maneiras distintas, em função do formato da distribuição estatística dos valores de CCD.

Nesse contexto, os valores de CCD correspondentes à condição sem dano foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro–Wilk, implementado por meio da função `shapiro` da biblioteca SciPy ([VIRTANEN *et al.*, 2020](#)). A análise foi conduzida adotando-se um nível de

significância de 5,0 %. Para distribuições que atenderam ao pressuposto de normalidade, os limites superiores para a média e a variância foram determinados com base nas distribuições t de Student e qui-quadrado, respectivamente. Por outro lado, nos casos em que os dados não apresentaram distribuição normal, empregou-se o método *bootstrap* para a estimativa dos limites superiores.

A implementação do método *bootstrap* baseou-se na geração de 2.000 amostras de média e desvio padrão, obtidas por amostragem com reposição, considerando-se 80,0 % dos dados originais em cada iteração. Para ambas as métricas estatísticas, os limites superiores foram determinados a partir do percentil 97,5 da distribuição empírica resultante, o que equivale a um intervalo de confiança bilateral de 95,0 %.

A determinação dos limiares de detecção possibilitou, então, a comparação com a mediana dos valores de CCD correspondentes a cada pastilha piezelétrica, em cada condição de dano, em relação ao estado intacto. As seções subsequentes apresentam os resultados obtidos para cada abordagem empregada na seleção das bandas de frequência, seguidos de uma análise abrangente dos valores de CCD resultantes das três metodologias investigadas.

4.4.1 Abordagem baseada na densidade de picos

O cálculo dos valores de CCD a partir dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem fundamentada na densidade de picos resultou nos valores apresentados na Fig. 4.8. Conforme demonstrado na Fig. 4.8, todos os valores de CCD excederam os respectivos limiares de detecção, representados pelas linhas contínuas em vermelho. Isso, portanto, evidencia que todas os transdutores capturaram a presença das porcas de aço fixadas na placa.

Ademais, de acordo com o observado na Fig. 4.8, houve um aumento geral dos valores de CCD de todas as pastilhas piezelétricas à medida que novos danos foram introduzidos na estrutura. Tal comportamento está em concordância com as expectativas, tendo em vista a alteração das condições de massa e rigidez locais na estrutura decorrente da adição das porcas de aço.

Conforme demonstrado na Fig. 4.8, no cenário com um único dano, caracterizado pela porca de aço posicionada entre os sensores S-02 e S-03, os maiores valores de CCD foram atribuídos aos sensores S-02 e S-05. O primeiro está localizado na vizinhança da porca de aço, enquanto o segundo está posicionado a uma distância relativamente maior, conforme pode ser observado na Fig. 4.9a.

O comportamento obtido no sensor S-02 converge com os resultados apresentados por Chaudhry *et al.* (1995), Sun *et al.* (1995a), Zhu *et al.* (2021) e Angeli *et al.* (2024), em que as métricas de dano de sensores localizados próximos do dano tendem a ser superiores às atribuídas a sensores posicionados a distâncias relativamente maiores do dano. Todavia, os valores de CCD obtidos nos sensores S-03 e S-05 representam uma divergência em relação ao comportamento esperado. Conforme demonstrado na Fig. 4.9a, o sensor S-03, apesar de estar posicionado mais próximo da porca em comparação com os demais transdutores, apresentou uma métrica de dano 14,1 % inferior à exibida pelo sensor S-05, o qual está posicionado mais distante do dano.

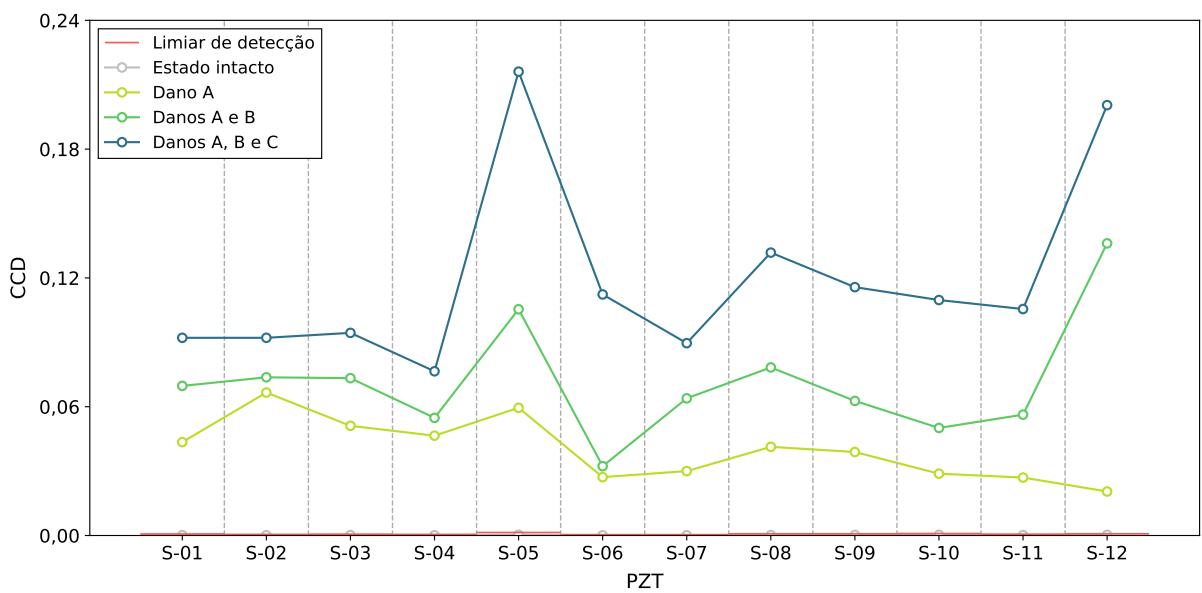


Figura 4.8: Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos, referentes ao experimento da placa de alumínio.

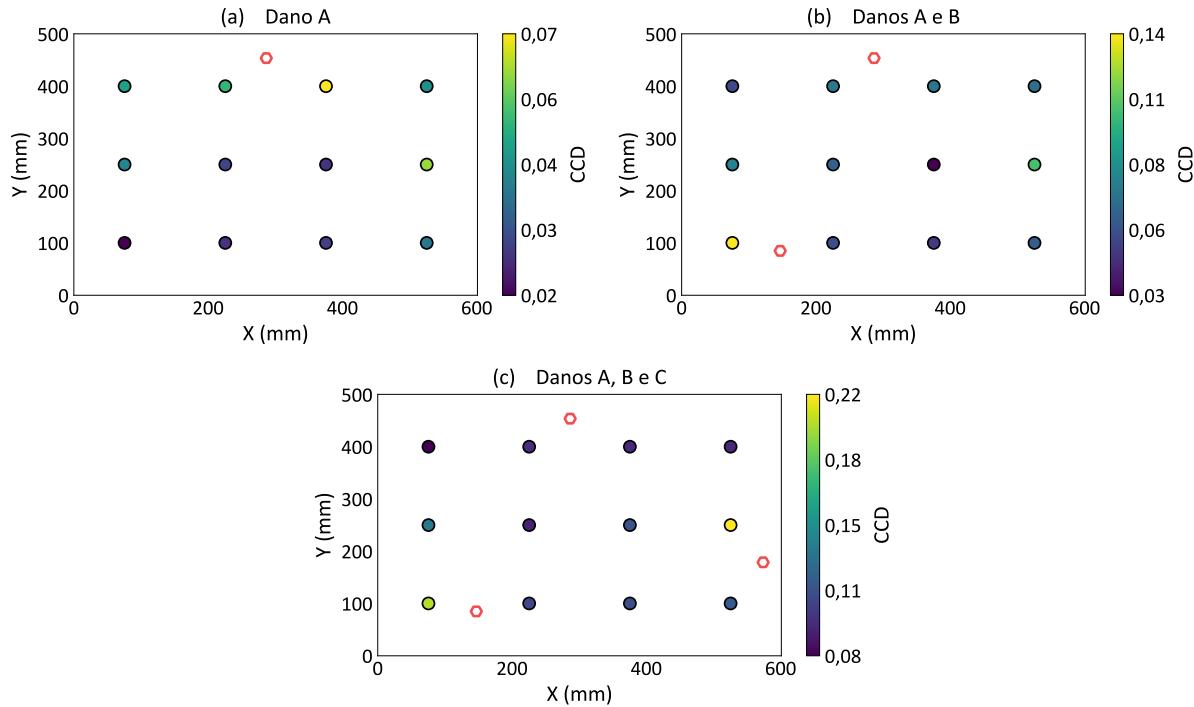


Figura 4.9: Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos.

Nesse sentido, o desvio do comportamento espacial esperado das métricas de dano em função da distância relativa entre transdutores e dano pode diminuir a eficácia dos modelos preditivos para localização de danos.

Já os demais sensores, na condição de um único dano, apresentaram métricas de dano inferiores àquelas atribuídas aos sensores mais próximos do dano, o que está em conformidade com o comportamento previsto, conforme já investigado em pesquisas anteriores ([GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005](#); [TINOCO *et al.*, 2016](#); [KRALOVEC; SCHAGERL; MAYR, 2018](#)).

Na condição com dois danos, conforme demonstrado na Fig. 4.8, o sensor S-12, posicionado nas proximidades da porca “B” (Fig. 4.9b), apresentou o maior valor de CCD (0,1361), o qual foi, em média, 125,6 % superior às métricas de dano atribuídas aos demais sensores. Já o sensor S-11, também posicionado próximo da segunda porca adicionada (Fig. 4.9b), apresentou um CCD menor que outros, atribuídos a transdutores localizados a distâncias relativamente maiores de ambos os danos (*e.g.*, sensores S-07, S-08 e S-09).

Embora as porcas fixadas na placa serem do mesmo tipo, com massas e dimensões muito parecidas, as respostas dos sensores S-02 e S-03, posicionados nas proximidades da porca “A”, e do sensor S-12, localizado próximo da porca “B”, foram muito diferentes. Neste contexto, o

CCD atribuído ao sensor S-12 foi 84,7 % e 85,7 % superior aos CCDs dos sensores S-02 e S-03, respectivamente.

Similarmente ao observado na condição estrutural anterior, o sensor S-05 apresentou o segundo maior valor de CCD. Apesar de estar situado a uma distância maior de ambos os danos em relação aos sensores S-02, S-03 e S-11, exibiu um valor de CCD, em média, 58,0 % superior às métricas de dano desses sensores.

Na condição com três danos, conforme demonstrado na Fig. 4.8, o sensor S-05 exibiu o maior valor de CCD entre todos os sensores (0,2161). Este transdutor está situado nas proximidades da porca “C”, juntamente com o sensor S-09 (Fig. 4.9c). Entretanto, o sensor S-09, apresentou um valor de CCD 12,2 % menor que o atribuído ao sensor S-08, o qual está situado a uma distância maior dos danos, conforme mostrado na Fig. 4.9c.

A distribuição dos valores de CCD (Fig. 4.8) mostra que o sensor S-11 apresentou a segunda maior métrica de dano, estando posicionado na vizinhança da porca “B” (Fig. 4.9c). Entretanto, o sensor S-11, também situado próximo da porca “B”, exibiu um valor de CCD 3,8 % inferior ao CCD do sensor S-10, localizado a uma distância maior dos danos.

Já as métricas de dano dos sensores S-02 e S-03, posicionados na vizinhança da porca “A”, foram inferiores a métricas de sensores localizados a distâncias maiores dos danos (*e.g.*, sensores S-06, S-08 e S-10). Ademais, conforme demonstra a Fig. 4.9c, os valores de CCD dos sensores S-02 e S-03 foram, em média, 36,1 % e 34,5 % inferiores, respectivamente, aos valores das métricas de dano dos demais sensores posicionados nas proximidades das porcas correspondentes.

Nesse sentido, observa-se que apesar das porcas fixadas na placa serem do mesmo tipo, e consequentemente, possuírem propriedades semelhantes, a magnitude dos valores de CCD dos transdutores posicionados próximos a cada uma apresentaram magnitudes diferentes, o que pode comprometer a habilidade dos modelos preditivos para localizar os danos presentes.

4.4.2 Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências

Os resultados das métricas de dano obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos em altas frequências do espectro (Fig. 4.10) mostram que todos os valores de CCD excederem os limiares de detecção correspondentes. Portanto, os resultados demonstram que todos os transdutores capturaram a presença das porcas fixadas na placa de alumínio.

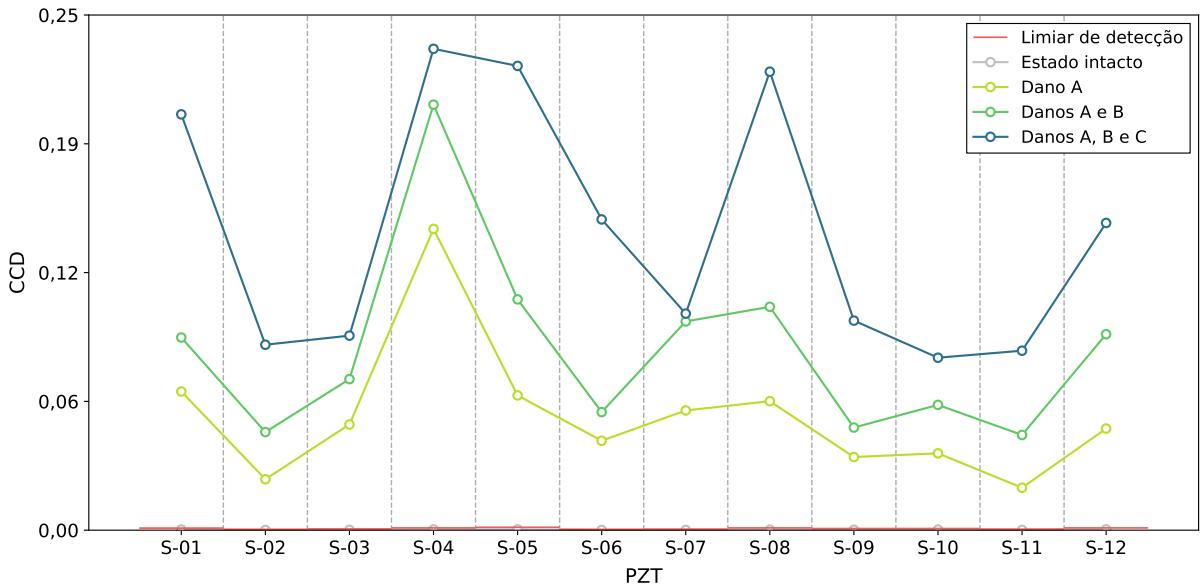


Figura 4.10: Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos priorizando altas frequências do espectro analisado, referentes ao experimento da placa de alumínio.

Ademais, a Fig. 4.10 indica um aumento consistente das métricas de dano à medida que novas porcas de aço são introduzidas no sistema, refletindo um comportamento geral previsto, decorrente da progressiva alteração das propriedades locais da estrutura pela fixação das porcas de aço.

De acordo com os resultados apresentados na Fig. 4.10, na condição de um único dano, o maior valor de CCD foi atribuído ao sensor S-04. Este transdutor apresentou um valor de CCD, em média, 259,1 % superior às métricas de dano dos demais transdutores sob esta condição de dano. Entretanto, de acordo com a Fig. 4.11a, este sensor está posicionado relativamente distante da porca “A”, situada nas proximidades dos sensores S-02 e S-03. Essas pastilhas piezelétricas, por sua vez, exibiram valores de CCD inferiores a grande parte dos valores de CCD dos demais sensores.

Nessa condição estrutural, conforme indicado na Fig. 4.10a, foi obtido no sensor S-02, um valor de métrica de dano de 0,0247, o qual é em média, 46,4 % inferior às métricas de dano dos sensores posicionados a distâncias maiores da porca “A”. Ademais, o CCD atribuído ao sensor S-02 foi inferior a 90,9 % dos valores de CCD das demais pastilhas piezelétricas.

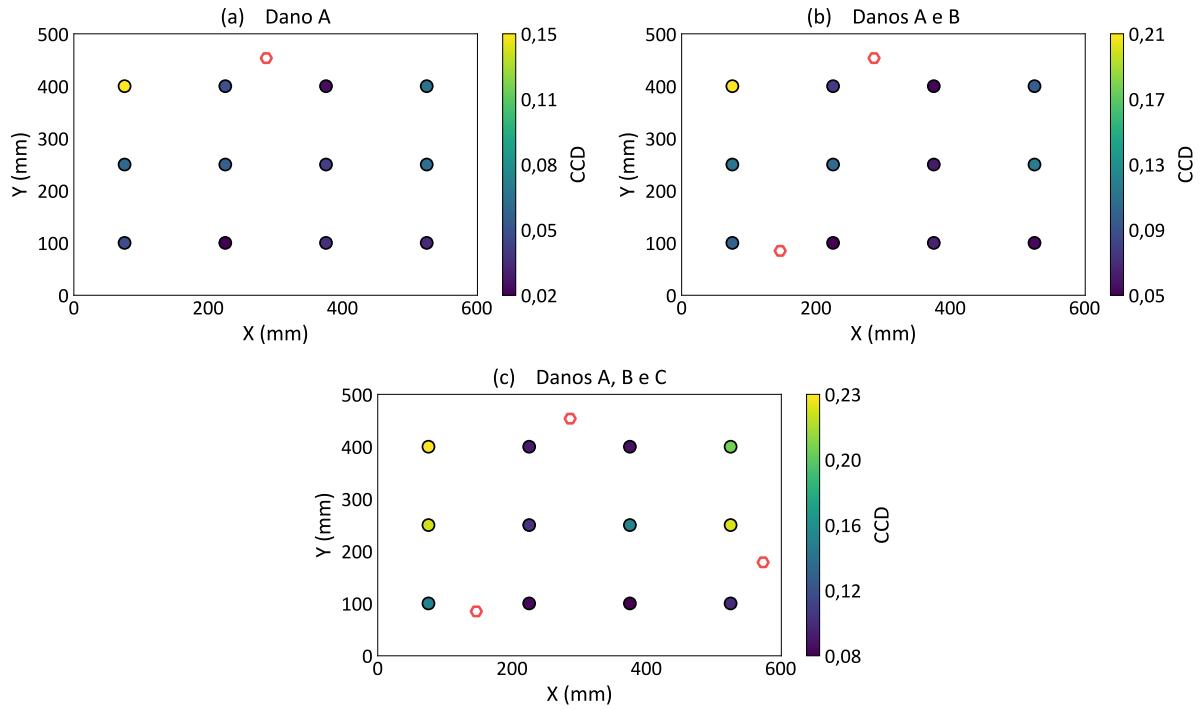


Figura 4.11: Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos priorizando altas frequências do espectro analisado.

Um comportamento análogo foi observado para o sensor S-03, cujo valor de CCD foi inferior ao valor do CCD de 45,5 % das pastilhas piezelétricas. No entanto, este sensor exibiu uma métrica de dano (CCD), em média, 11,3 % superior às métricas de dano atribuídas às pastilhas piezelétricas posicionadas relativamente mais distantes na porca “A”. As diferenças foram mais pronunciadas em relação aos sensores S-11 e S-09, em que o valor do CCD do sensor S-03 foi 149,0 % e 44,5 % superior aos respectivos valores de métrica de dano desses sensores.

Essas particularidades evidenciam um comportamento atípico da distribuição espacial das métricas de dano (CCD) na estrutura. Conforme demonstrado por Chaudhry *et al.* (1995), Sun *et al.* (1995a), Zhu *et al.* (2021) e Angeli *et al.* (2024), pastilhas piezelétricas situadas nas proximidades do dano tendem a exibir métricas de dano superiores em comparação com aquelas pastilhas localizadas em áreas mais distantes.

Já os sensores localizados em regiões mais distantes da porca “A” (*i.e.*, sensores S-09, S-10, S-11 e S-12), conforme evidenciado na Fig. 4.10 e na Fig. 4.11a, exibiram métricas de dano predominantemente inferiores aos valores de CCD atribuídos aos sensores S-02 e S-03, o que

converge com a distribuição espacial esperada dos valores de CCD na estrutura.

Na condição com dois danos, conforme observado na Fig. 4.10, o sensor S-04 exibiu, assim como na condição de dano anterior, o maior valor de CCD entre as pastilhas piezelétricas. Tal valor foi, em média, 199,4 % superior aos valores de CCD das demais pastilhas.

Os sensores S-02 e S-03, situados na proximidade imediata da porca “A” (Fig. 4.11b), apresentaram valores de CCD, em média, 38,0 % inferior e 0,4 % superior, respectivamente, aos valores de CCD das demais pastilhas piezelétricas. Esse comportamento atípico contribui para a diminuição da capacidade de modelos preditivos em localizar os danos de forma efetiva.

Ainda, o fato do CCD do sensor S-04 ser, em média, 257,8 % superior aos valores de CCD dos sensores S-02 e S-03 pode introduzir desvios no modelo preditivo de localização de danos. Isso decorre da maior distância relativa desse sensor em relação à porca “A”, combinado ao fato dos valores de CCD dos sensores S-02 e S-03, posicionados na proximidade imediata da porca “A”, serem inferiores ao CCD do sensor S-04.

Os sensores S-11 e S-12, posicionados próximos da porca “B”, apresentaram métricas de dano inferiores às métricas de dano de outras pastilhas situadas mais distantes de ambos os danos. Especificamente, o CCD do sensor S-11, de 0,0462, foi inferior ao CCD de todas as demais pastilhas piezelétricas. Destas, 72,7 % correspondem a sensores relativamente mais distantes de ambos os danos.

Já o CCD do sensor S-12, de 0,0951, foi inferior a 36,4 % dos valores de métrica de dano das demais pastilha piezelétricas. Apesar do CCD do sensor S-12 ser 105,8 % superior ao CCD do sensor S-11, também posicionado na proximidade imediata da porca “B”, essa métrica de dano ainda é inferior às métricas de dano dos sensores S-04, S-05, S-07 e S-08 em 53,9 %, 15,1 %, 6,1 % e 12,3 %, respectivamente, os quais estão posicionados a distâncias maiores de ambos os dados, conforme demonstrado na Fig. 4.11b.

A adição da porca “C” entre os sensores S-05 e S-09 provocou um aumento de 101,2 % e 104,2 %, respectivamente, nos valores de CCD desses sensores, em relação ao caso anterior. Entretanto, observa-se uma diferença na magnitude dos valores de CCD dessas pastilhas piezelétricas. Ainda, o CCD do sensor S-08 aumentou em 105,3 % em relação ao caso anterior, embora esse transdutor esteja posicionado relativamente distante das três porcas, especialmente da porca “C”.

Conforme demonstrado na Fig. 4.10, o CCD do sensor S-01 aumentou em 115,8 % em comparação com o cenário com dois danos. Este comportamento decorre a introdução da porca

“C” no sistema, o que afetou localmente as propriedades da placa de alumínio. Entretanto, o CCD desse sensor na condição com três danos foi 124,2 % e 113,8 % superior aos valores de CCD dos sensores S-02 e S-03, os quais estão posicionados na proximidade imediata da porca “A” (Fig. 4.11c). Um comportamento semelhante, e mais pronunciado, foi observado no sensor S-04, o qual exibiu um valor de CCD 159,6 % e 147,5 % superior ao CCD dos sensores S-02 e S-03, respectivamente.

Ademais, observa-se na Fig. 4.11c, diferenças de magnitude entre os valores de CCD dos sensores posicionados nas proximidades as três porcas. Em conjunto com os comportamentos atípicos descritos anteriormente, esse fator pode resultar em uma redução da capacidade de modelos preditivos em localizar de efetiva os danos na placa.

4.4.3 Abordagem baseada na sensibilidade ao dano

Os resultados dos valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem fundamentada no máximo valor da métrica de dano estão apresentados na Fig. 4.12, na qual é possível observar que todas as métricas de dano excederam os máximos limiares de corte correspondentes, indicando que todas as pastilhas piezelétricas identificaram a presença das porcas de aço na placa. Adicionalmente, observa-se um aumento generalizado dos valores de CCD em todas as pastilhas piezelétricas, à medida que porcas adicionais foram introduzidas na estrutura.

De acordo com os resultados apresentados na Fig. 4.12, na condição com um único dano, os maiores valores de CCD foram atribuídos aos sensores S-03 e S-04, seguidos pelo sensor S-02. Dentre esses, os sensores S-02 e S-03 estão posicionados na vizinhança imediata da porca “A”, enquanto o sensor S-04 encontra-se relativamente mais afastado na posição do dano, conforme demonstra a Fig. 4.13a.

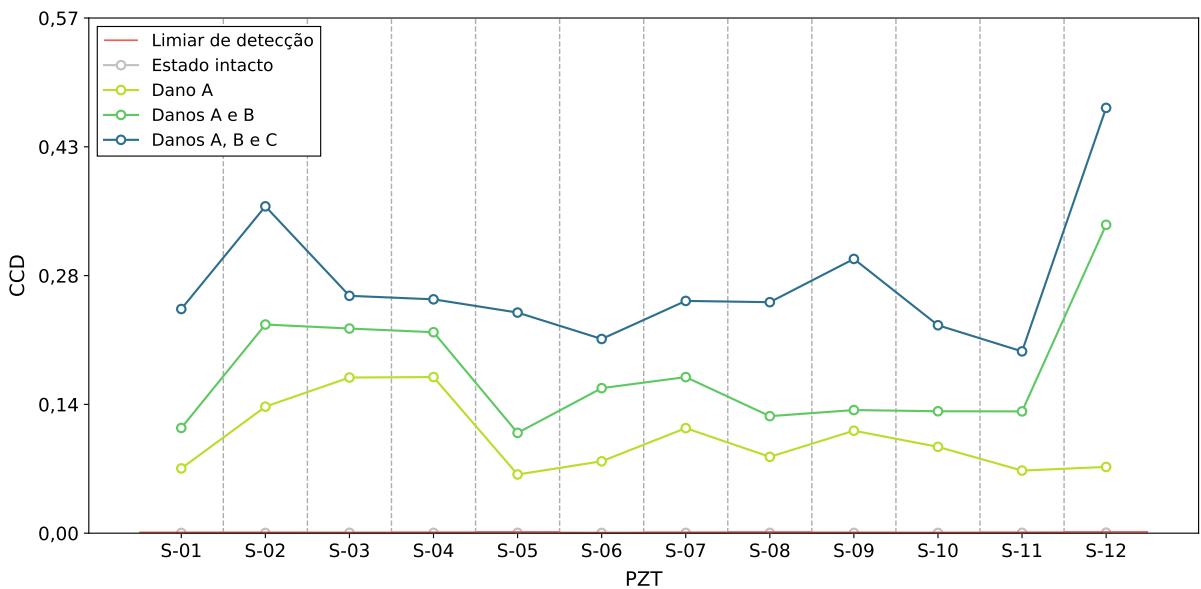


Figura 4.12: Gráfico de linhas dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois e três danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na máxima sensibilidade ao dano, referentes ao experimento da placa de alumínio.

Adicionalmente, observa-se uma diferença significativa entre os valores de CCD dos sensores S-02 e S-03, ambos localizados próximos do dano. Especificamente, o CCD do sensor S-03 foi 23,0 % superior ao do sensor S-02, indicando uma sensibilidade diferenciada à presença do dano entre esses sensores, mesmo posicionados em regiões adjacentes e aproximadamente equidistantes da porca “A”.

Conforme demonstrado na Fig. 4.12, o sensor S-04 apresentou o maior valor absoluto de CCD (0,1727). No entanto, está localizado em uma região mais distante do dano em comparação com os sensores S-02 e S-03. Esse comportamento pode comprometer a precisão espacial do modelo preditivo, dificultando a correta identificação da localização da porca “A”.

Por outro lado, os demais sensores, com exceção do sensor S-04, apresentaram valores de CCD substancialmente inferiores aos observados nos sensores S-02 e S-03. Este comportamento está em consonância com os resultados obtidos por Chaudhry *et al.* (1995), Sun *et al.* (1995a) e Zhu *et al.* (2021), os quais indicam que sensores mais distantes do dano tendem a apresentar métricas de dano menores em comparação com aqueles situados mais próximos do dano.

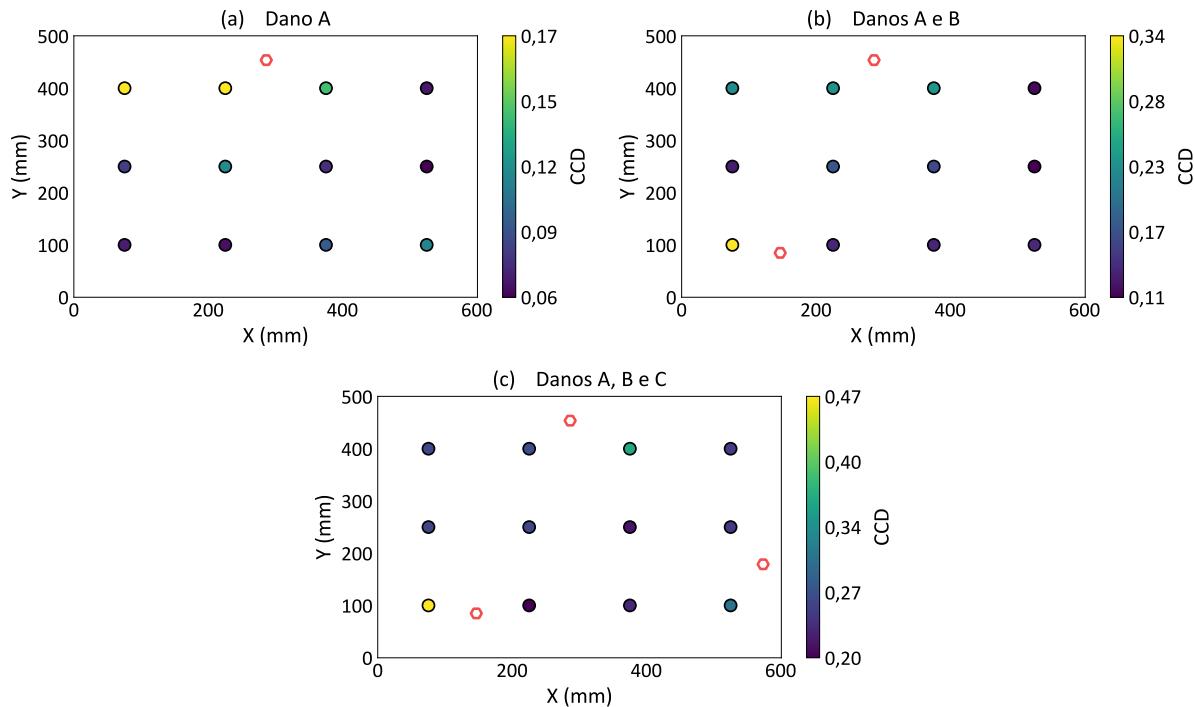


Figura 4.13: Arranjo espacial das pastilhas piezelétricas (círculos preenchidos) na placa de alumínio com as posições das porcas de aço (hexágonos em vermelho) nas seguintes condições estruturais analisadas: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A legenda representa os valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados pela abordagem da máxima sensibilidade ao dano.

A adição da porca “B” entre os sensores S-11 e S-12 provocou um aumento generalizado dos valores de CCD de todos os transdutores, conforme demonstrado na Fig. 4.12b.

Na vizinhança da porca “A”, os valores de CCD dos sensores S-02 e S-03 foram aproximadamente da mesma ordem de magnitude, e entre os maiores valores de CCD obtidos na condição com dois danos, com exceção do CCD exibido pelo sensor S-12, o qual foi 125,7 % superior, em média, aos valores de CCD das demais pastilhas.

O fato dos valores de CCD dos sensores S-02 e S-03 configurarem entre os maiores valores obtidos nesta condição – com exceção do sensor S-12 – favorece a localização da porca “A”, situada entre estes dois sensores (Fig. 4.13b). Entretanto, o sensor S-04, situado relativamente mais distante da porca “A”, exibiu um CCD de mesma ordem de magnitude, apenas 3,7 % e 1,8 % inferior ao CCD dos sensores S-02 e S-03, respectivamente.

Conforme observado na Fig. 4.12, o sensor S-12, localizado próximo da porca “B”, exibiu o maior valor de CCD, de 0,3412, entre todas as pastilhas. Embora as porcas sejam do mesmo tipo, o CCD obtido para este sensor foi 47,8 % e 50,7 % superior ao CCD dos sensores S-02 e S-03, os quais estão posicionados nas proximidades da porca “A”. Ademais, o CCD do sensor

S-12 foi 153,3 % superior ao CCD do sensor S-11, o qual está aproximadamente equidistante da porca “B”, conforme demonstrado na Fig. 4.13b.

As diferenças de magnitude entre os valores de CCD dos sensores localizados nas proximidades de cada porca, bem como as diferenças entre os valores de CCD de sensores posicionados aproximadamente equidistantes a um mesmo dano (por exemplo, sensores S-11 e S-12), revelam diferenças de sensibilidade das pastilhas em função da distância relativa ao dano. Esta particularidade pode provocar uma diminuição da capacidade de modelos preditivos em localizar de maneira eficaz os danos presentes na estrutura.

Em contrapartida, observa-se na Fig. 4.13b que os sensores posicionados mais distantes de ambas as porcas, exceto o sensor S-04, apresentaram valores de CCD menores em comparação com aqueles obtidos nos sensores localizados nas adjacências das porcas fixadas na placa. Tal padrão está alinhado com as observações de Chaudhry *et al.* (1995), Sun *et al.* (1995a) e Zhu *et al.* (2021), que indicam uma redução do valor da métrica de dano à medida que a distância relativa entre o transdutor e o dano aumenta.

Na terceira condição de dano, as pastilhas piezelétricas mais afetadas pela adição da porca “C” foram os sensores S-05 e S-09, cujos valores de CCD aumentaram em 119,9 % e 122,8 %, respectivamente, em relação à condição de dano anterior. O aumento em questão é atribuído à presença da porca “C”, a qual foi fixada na borda direita da placa, próxima a esses sensores, conforme demonstrado na Fig. 4.13c.

De acordo com a Fig. 4.13c, observa-se que nas proximidades de cada porca adicionada, pelo menos um sensor exibiu um valor de métrica de dano que destoa dos demais. A manifestação do comportamento em questão pode ser observada nos sensores S-02, S-09 e S-12.

O sensor S-02, localizado próximo à porca “A” (Fig. 4.13c), apresentou um valor de CCD de 0,3616, o qual foi o segundo maior valor de CCD obtido neste cenário. Por sua vez, o sensor S-09, localizado próximo da porca “C”, resultou em um CCD de 0,3034, o qual é configurado como o terceiro maior valor de CCD nesta condição. Já o sensor S-12 correspondeu ao maior valor de CCD entre todas as pastilhas piezelétricas, e situado próximo da porca “B”.

Os resultados obtidos nestes sensores podem contribuir para a efetiva localização dos danos por meio dos modelos preditivos derivados da KI. Entretanto, a baixa sensibilidade obtida pelos sensores S-02 (Fig. 4.13a), S-11 (Fig. 4.13b), e S-05 e S-09 (Fig. 4.13c), como observado na Fig. 4.12 e na Fig. 4.13, que se encontram em posição próxima às porcas adicionadas, pode resultar em desvios do modelo em relação à localização real dos danos correspondentes.

Em contrapartida, a presença de valores relativamente baixos de CCD exibidos por pastilhas piezelétricas mais afastadas das porcas adicionadas, pode diminuir, ou até mesmo extinguir, a incidência de falsos positivos no modelo.

4.4.4 Análise Integrada dos Resultados

Uma análise comparativa entre as distribuições estatísticas dos valores de CCD obtidos em cada abordagem de seleção de intervalos de frequência (Fig. 4.14) mostra que as abordagens baseadas na densidade de picos nas assinaturas de resistência, sem ou com a priorização de frequências elevadas, resultam em distribuições estatísticas aproximadamente similares.

Entretanto, observa-se que a abordagem fundamentada apenas na quantidade de picos exibiu, sistematicamente, as médias e as medianas mais baixas em todas as condições de dano, com um intervalo interquartil menor. Esses resultados sugerem que essa abordagem apresenta uma sensibilidade reduzida à transição de danos simples para múltiplos danos.

Já a abordagem baseada na quantidade de danos com priorização de frequências elevadas, apresenta um comportamento intermediário, com distribuições estatísticas que exibem médias e medianas maiores que as obtidas na abordagem anterior, mas que são consistentemente menores que as médias e medianas obtidas na abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

Além disso, os resultados obtidos indicam um aumento sistemático da dispersão dos valores de CCD, à medida que a complexidade do sistema aumenta, em função da ocorrência de danos adicionais. Esse aumento da variância é ainda mais acentuado em circunstâncias mais complexas e na ausência de valores atípicos (*outliers*).

O aumento da dispersão dos valores de CCD na presença de uma quantidade maior de danos pode ser atribuído, nesta abordagem de seleção de intervalos de frequência, à ação combinada de dois fatores ou mecanismos: (1) a ocorrência de maior sensibilidade ao dano em intervalos de frequência mais elevadas, como observado por Wang, Song e Zhu (2013), Singh, Fakih e Malinowski (2023) e Sun *et al.* (2024); e (2) obtenção de valores elevados de métricas de dano por pastilhas piezelétricas situadas próximas dos danos, os quais tendem, nestas condições, a influenciar predominantemente faixas de frequência elevadas do espectro, enquanto danos situados mais distantes, tendem a afetar principalmente intervalos de frequência mais baixas, conforme demonstrado por Yang e Divsholi (2010).

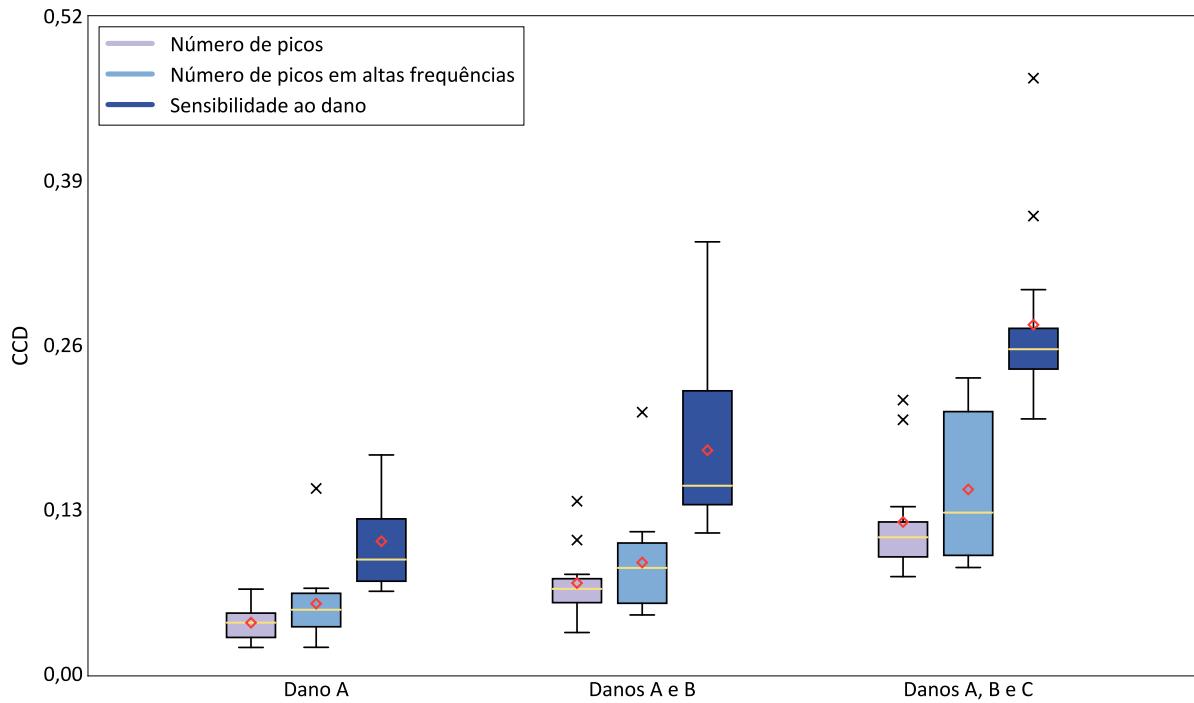


Figura 4.14: *Boxplots* dos valores de CCD das pastilhas piezelétricas obtidos em cada abordagem para seleção de intervalos de freqüência, em cada condição de dano, no experimento da placa de alumínio.

Já a abordagem baseada na sensibilidade ao dano, *i.e.*, no máximo valor de métrica de dano, conforme demonstrado na Fig. 4.14, é caracterizada por apresentar medianas e médias sistematicamente superiores às demais abordagens. Essa característica representa um resultado esperado, uma vez que foi selecionado o intervalo de freqüência que fornecesse o maior valor de métrica de dano.

O comportamento analisado, conforme observado na Fig. 4.14, é mais acentuado nas condições de múltiplos danos, em que a mediana foi, em média, 100,0 % e 119,9 % superior às medianas das demais abordagens nas condições com duas e três porcas, respectivamente. Já na condição com um dano a mediana foi superior, em média, em 101,7 %.

Ademais, observa-se que as distribuições estatísticas da abordagem baseada na sensibilidade ao dano apresentaram uma assimetria à direita mais pronunciada em comparação com as demais abordagens nas respectivas condições de dano. Adiciona-se a este fato, a presença de valores atípicos (*outliers*), principalmente nas condições com múltiplos danos. Essas características indicam a predominância de valores relativamente baixos de CCD, possivelmente relacionados a pastilhas piezelétricas distantes do(s) dano(s), e a presença de alguns poucos valores elevados, potencialmente atribuídos às pastilhas piezelétricas situadas mais próximas do(s) dano(s).

A manifestação desse comportamento é evidenciada na Fig. 4.13, na qual é observada uma predominância de poucos valores mais elevados de CCD nas pastilhas piezelétricas mais próximas dos danos. Consequentemente, tal abordagem resultou em uma distribuição estatística e espacial de valores de métrica de dano potencialmente mais promissora para a efetiva localização de múltiplos danos.

4.5 Localização dos Danos por KI

Os resultados obtidos na etapa anterior evidenciaram que, para todas as pastilhas piezelétricas e em todas as metodologias empregadas na seleção dos intervalos de frequência, os valores de CCD excederam os respectivos limiares de detecção. Portanto, todas as pastilhas detectaram a presença dos porcas de aço na placa. Consequentemente, as variáveis indicadoras foram obtidas a partir da seleção de patamares de corte, e aplicando-se a Eq. 3.1 para a codificação binária em cada variável.

4.5.1 Procedimentos para Preparação dos Dados

Portanto, as variáveis indicadoras foram obtidas a partir da seleção de patamares de corte, e aplicando-se a Eq. 3.1 para a codificação binária em cada variável. Considerando a ausência de estudos prévios que definissem os patamares de corte mais adequados para cada condição estrutural, sobretudo em cenários envolvendo múltiplos danos, realizou-se uma investigação abrangente. Nesse contexto, foram adotados como patamares de corte (*thresholds*) os valores de CCD correspondentes aos percentis 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 das suas respectivas distribuições.

Essa configuração, contemplando uma ampla faixa da distribuição dos valores de CCD, viabilizou uma análise abrangente do desempenho dos modelos preditivos em diferentes cenários. Adicionalmente, ela favoreceu a identificação de padrões potenciais nos dados, proporcionando uma compreensão mais profunda do comportamento dos modelos preditivos nas distintas condições estruturais avaliadas.

As variáveis indicadoras obtidas foram organizadas em uma estrutura tabular contendo também os valores de CCD e as coordenadas X e Y das pastilhas piezelétricas. Essa estrutura foi armazenada em um objeto `DataFrame` da biblioteca Pandas ([The pandas development team, 2023](#)). A conversão dos dados em formato tabular do Pandas (`DataFrame`) para o padrão Geo-EAS (extensão `.txt`) foi realizada por meio da função `Dataframe2GSLIB`,

disponibilizada pela biblioteca Geostatspy, versão 0.0.25 ([PYRCZ et al., 2022](#)), proporcionando compatibilidade com *softwares* e pacotes Python para análise geoestatística.

4.5.2 Análise Estrutural por meio de Semivariogramas

Os arquivos estruturados sob o padrão Geo-EAS foram empregados para o cálculo dos semivariogramas experimentais, seguido dos respectivos ajustes por funções teóricas. Neste estudo, optou-se pelo cálculo de semivariogramas unidireccionais, devido à limitada disponibilidade de pastilhas piezelétricas para a análise em múltiplas direções. Ademais, a variabilidade espacial dos valores de CCD na estrutura analisada é consideravelmente menos complexa do que aquela comumente observada em depósitos minerais, o que permite a aplicação de semivariogramas unidireccionais sem comprometimento da resolução da correlação espacial.

Os semivariogramas experimentais foram calculados utilizando a função `gamv` da biblioteca Geoestatspy, versão 0.0.25 ([PYRCZ et al., 2022](#)), para a linguagem Python. Os parâmetros adotados, de forma consistente em todos os cenários, foram os seguintes: (1) o espaçamento (*lag*) inicial foi determinado pelo intervalo entre as pastilhas piezoelétricas; (2) a tolerância de passo foi fixada em 40 % do valor do passo (*lag*) inicial; (3) a largura de banda foi estabelecida como metade do passo (*lag*) inicial; (4) a direção (azimute) de referência foi definida como 90°; e (5) a tolerância angular foi fixada em 90°, visando a obtenção de semivariogramas unidireccionais.

Diante da dificuldade em obter semivariogramas estáveis para todos os patamares de corte, considerando que limiares situados nos extremos da distribuição da variável original tendem a apresentar comportamento instável ([SINCLAIR; BLACKWELL, 2002](#)), foram priorizados aqueles associados ao limiar de corte correspondente ao percentil 50. Em situações excepcionais, semivariogramas referentes a outros percentis foram empregados como referência.

A partir dos semivariogramas experimentais, procedeu-se ao ajuste utilizando modelos teóricos. Para tal, foram empregados os métodos `make_variogram` e `vmodel`, ambos da biblioteca Geostatspy, versão 0.0.25 ([PYRCZ et al., 2022](#)), com o objetivo de, respectivamente, definir os parâmetros dos modelos teóricos e calcular os valores do semivariograma em função das distâncias. O ajuste foi feito de forma iterativa, ajustando manualmente os parâmetros do modelo teórico de acordo com a proximidade deste com o semivariograma experimental. As informações obtidas dos ajustes teóricos foram, então, armazenadas para o uso na KI, visando a obtenção dos modelos preditivos.

Os semivariogramas das variáveis indicadoras, abrangendo tanto os semivariogramas experimentais quanto os ajustes teóricos correspondentes, empregados na implementação da KI para a abordagem de seleção de intervalos de frequência baseada na densidade de picos, estão demonstrados na Fig. 4.15, para cada condição de dano investigada. Os parâmetros dos ajustes teóricos correspondentes encontram-se na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na densidade de picos.

Cenário	Percentil	Efeito Pepita	Estrutura		
			Modelo	Alcance (mm)	Contribuição
Dano A	40	0,04	esférico	380,0	0,2252
Danos A e B	50	0,08	esférico	260,0	0,1927
Danos A, B e C	70	0,08	esférico	205,0	0,1624

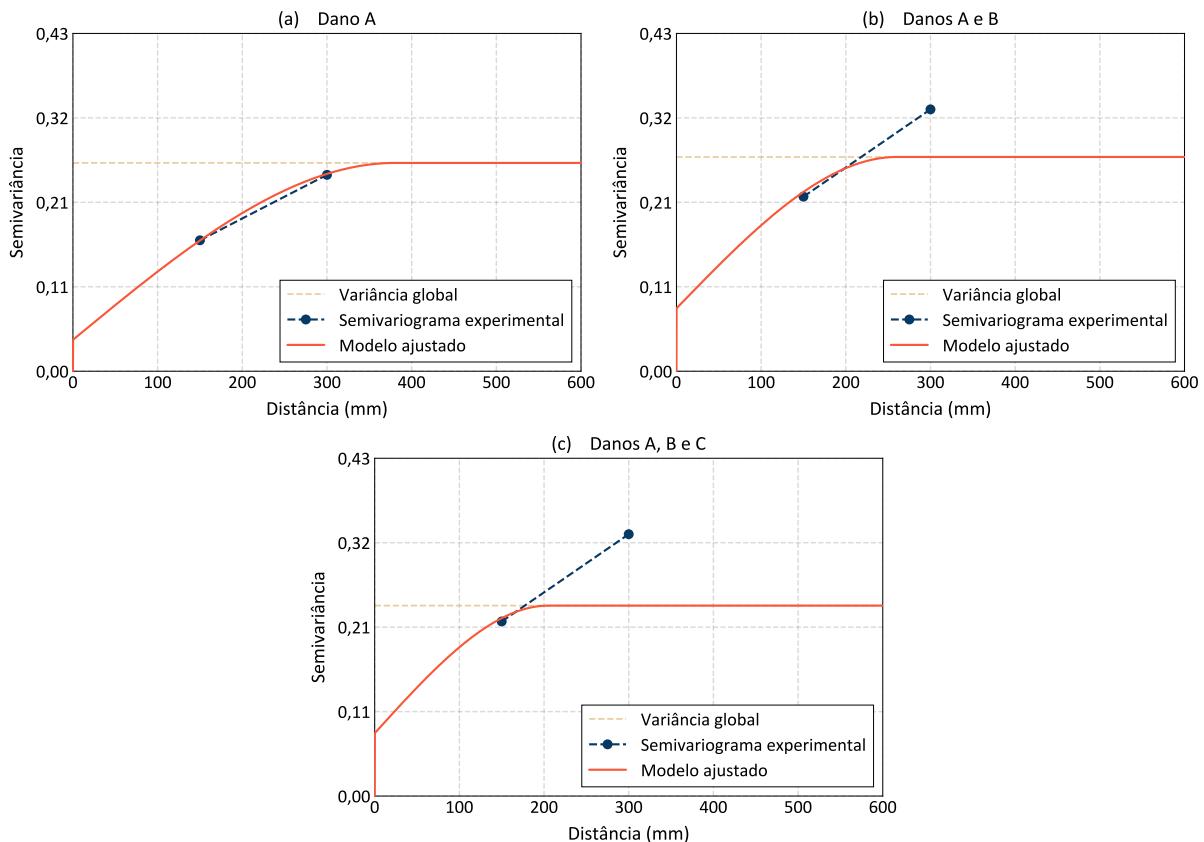


Figura 4.15: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos.

Conforme ilustrado na Fig. 4.15, os semivariogramas experimentais resultaram em um

número relativamente reduzido de pontos abaixo da variância *a priori*, a qual representa a variabilidade esperada da variável indicadora sob análise.

Tal comportamento é previsível e consistente com a limitada densidade espacial da malha de sensores empregada no experimento. Neste contexto, a escassez de pontos de medição – no máximo 4 sensores em uma direção – implica em um número limitado de separações espaciais (h) possíveis – no máximo 3 classes de distâncias.

Os ajustes teóricos obtidos exibiram boa compatibilidade com os pontos do semivariograma experimental, principalmente na condição com um único dano, conforme demonstrado na Fig. 4.15a. Ademais, todos os ajustes foram obtidos utilizando-se o modelo esférico (Tab. 4.1), o qual representa uma função que indica uma perda de continuidade aproximadamente linear em função do aumento da distância que separa os pares de sensores (SINCLAIR; BLACKWELL, 2002; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Ademais, conforme apresentado na Tab. 4.1, observa-se uma redução progressiva do alcance variográfico à medida que novas porcas foram incorporadas ao sistema. Em termos geostatísticos, o alcance define o limite além do qual as observações deixam de apresentar correlação espacial. Neste contexto, a diminuição do alcance indica uma perda de continuidade espacial, refletindo um aumento da variabilidade entre as métricas de dano em distâncias mais elevadas. Assim, sua redução sugere que a introdução de novas porcas alterou a distribuição espacial das respostas dos sensores, intensificando variações locais e reduzindo a extensão da dependência espacial das métricas de dano.

Os semivariogramas experimentais e os ajustes teóricos correspondentes relacionados à abordagem de seleção de intervalos baseada na densidade de picos em frequências elevadas (Fig. 4.16) apresentam um comportamento similar ao observado nos resultados da abordagem anterior. De forma análoga à abordagem anterior, verifica-se um número limitado de pontos experimentais abaixo da linha da variância global (*a priori*). A escassez de pontos observada pode ser atribuída à baixa densidade espacial da instrumentação, que restringe a diversidade de classes de distâncias e, por conseguinte, a resolução do semivariograma.

Conforme demonstrado na Fig. 4.16, os ajustes teóricos obtidos apresentaram boa compatibilidade com os pontos experimentais, principalmente na condição com duas porcas (Fig. 4.16b), onde os pontos do semivariograma experimental encontram-se mais alinhados com a função teórica.

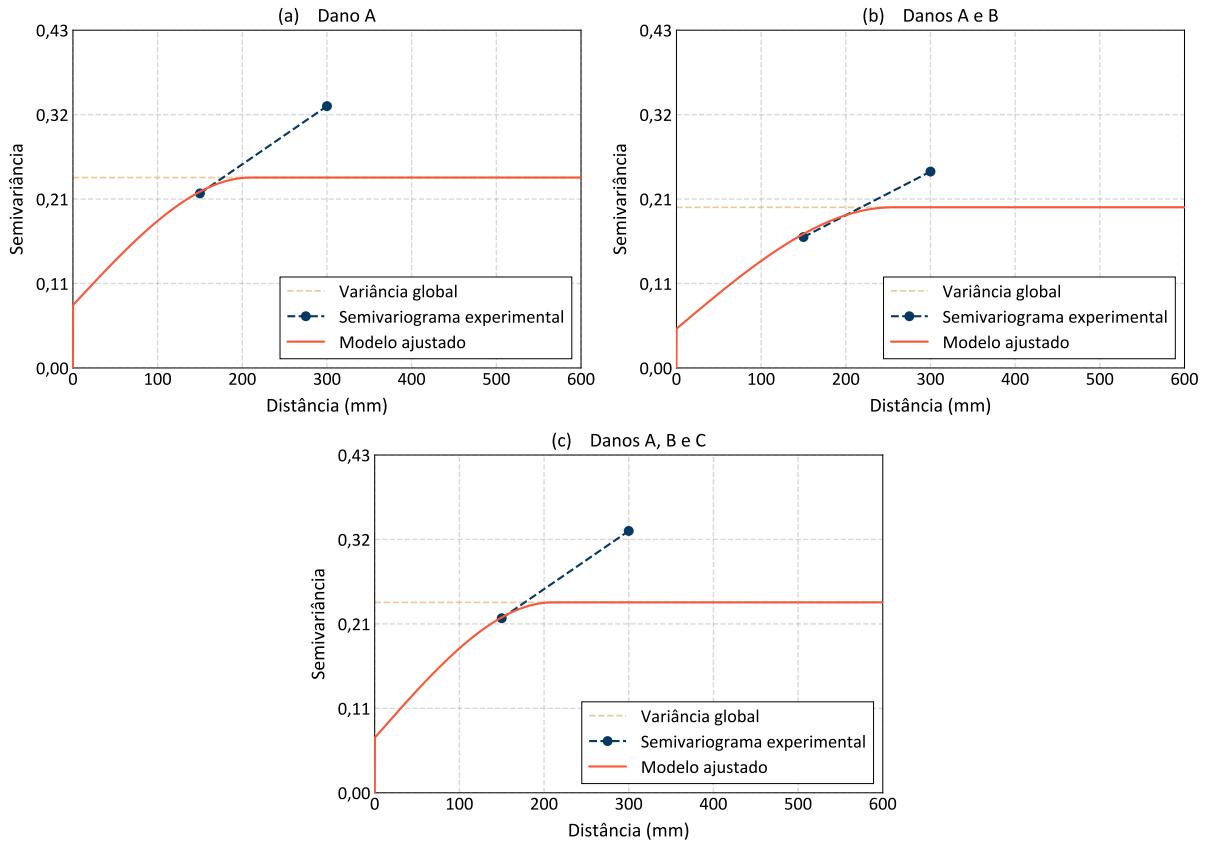


Figura 4.16: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B, e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos em altas frequências.

Todos os ajustes foram realizados utilizando o modelo esférico, conforme detalhado na Tab. 4.2, o qual é particularmente apropriado para representar uma redução aproximadamente constante da continuidade espacial, e descreve fenômenos com continuidade espacial moderada, ou seja, não tão suaves ou regulares ([SINCLAIR; BLACKWELL, 2002](#); [ROSSI; DEUTSCH, 2014](#)).

Tabela 4.2: Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências.

Cenário	Percentil	Efeito Pepita	Estrutura		
			Modelo	Alcance (mm)	Contribuição
Dano A	70	0,08	esférico	210,0	0,1624
Danos A e B	80	0,05	esférico	255,0	0,1545
Danos A, B e C	70	0,07	esférico	210,0	0,1724

Diferentemente do observado na abordagem anterior, nesta configuração específica não se

verifica uma tendência clara de redução do alcance variográfico com o acréscimo de danos. Conforme apresentado na Tab. 4.2, os valores de alcance obtidos foram de 210 mm para as condições “Dano A” e “Danos A, B e C”, e de 255 mm para a condição intermediária “Danos A e B”. Tal comportamento sugere que nessa abordagem, a presença simultânea de dois danos pode ter provocado a ocorrência de uma distribuição espacial específica das métricas de dano, capaz de estender ligeiramente a continuidade espacial detectada.

Em relação à abordagem de seleção de intervalos de frequência baseada na sensibilidade ao dano, os semivariogramas obtidos (Fig. 4.17) revelam o mesmo padrão geral observado nos casos anteriores. A escassez de pontos no semivariograma experimental ocorre em virtude da limitada densidade espacial da malha de sensores utilizada. Dessa forma, esse resultado representa uma expectativa condizente com as condições experimentais adotadas.

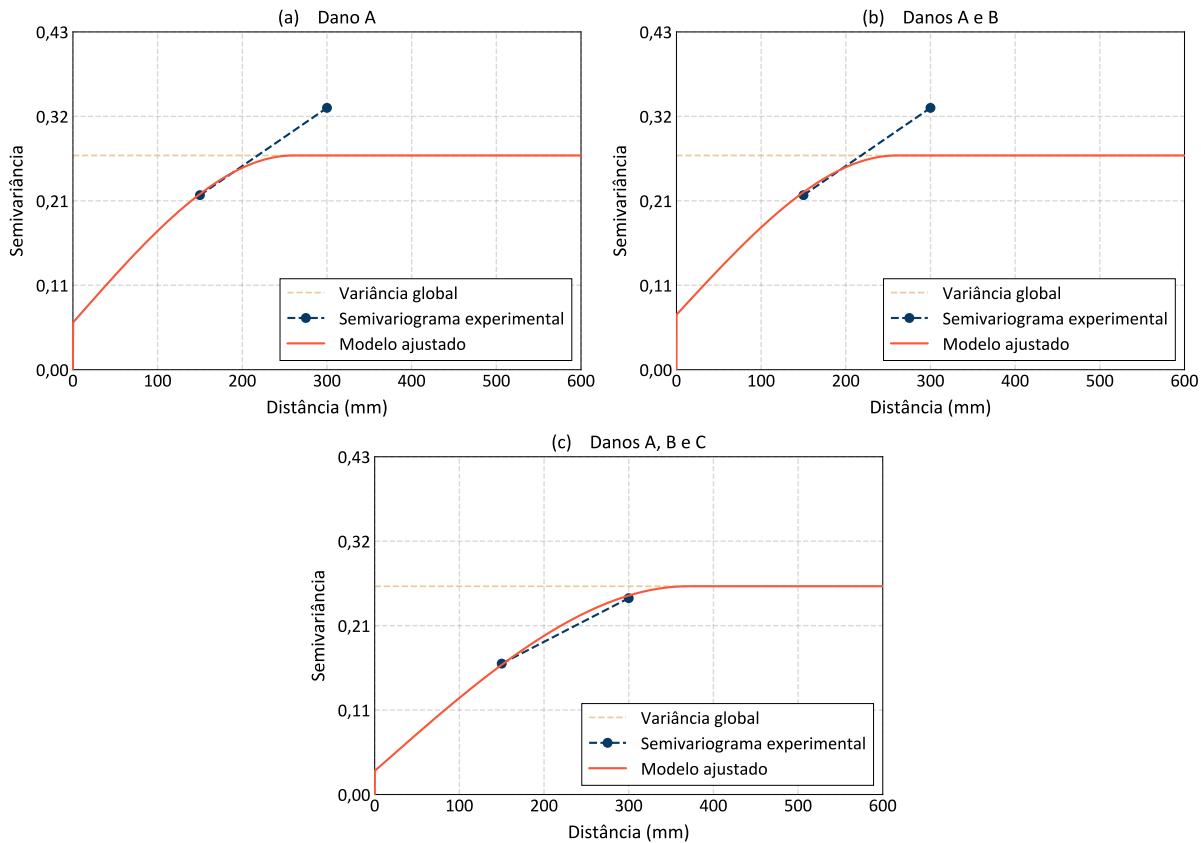


Figura 4.17: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para as seguintes condições de dano investigadas na placa de alumínio: (a) Dano A; (b) Danos A e B; e; (c) Danos A, B e C. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na sensibilidade ao dano.

Assim como nos casos anteriores, os ajustes foram executados empregando o modelo esférico (Tab. 4.3), o qual se mostrou adequado para reproduzir adequadamente o formato geral

dos semivariogramas experimentais. Isso é constatado pela boa aderência observada entre os modelos teóricos utilizados e os pontos experimentais correspondentes, apresentados na Fig. 4.17.

Tabela 4.3: Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas na placa de alumínio, considerando a seleção de intervalos baseada na sensibilidade ao dano.

Cenário	Percentil	Efeito Pepita	Estrutura		
			Modelo	Alcance (mm)	Contribuição
Dano A	50	0,06	esférico	260,0	0,2127
Danos A e B	50	0,07	esférico	260,0	0,2027
Danos A, B e C	60	0,03	esférico	370,0	0,2352

Entretanto, os alcances variográficos obtidos (Tab. 4.3) revelam uma tendência oposta àquela observada nas abordagens previamente analisadas, em especial na metodologia fundamentada na densidade de picos. Contrariamente à expectativa de perda de continuidade espacial com o acréscimo de danos, os resultados atuais apontam para um aumento progressivo do alcance variográfico à medida que novas porcas foram incorporadas à estrutura.

Tal comportamento indica uma intensificação da continuidade espacial entre as métricas de dano, o que sugere que a sensibilidade dos sensores, nesta abordagem, passou a capturar padrões mais amplamente correlacionados no espaço à medida que houve um aumento da complexidade do sistema.

Esse aumento geral da continuidade espacial foi também influenciado pela redução do efeito pepita observada na condição com três danos, quando comparado às demais condições. O efeito pepita representa a componente da variabilidade associada a escalas inferiores ao espaçamento entre os sensores e está frequentemente relacionado a ruídos, flutuações locais abruptas ou incertezas de medição. Sua diminuição na configuração com três porcas sugere uma maior homogeneidade local das métricas de dano ou uma melhor definição dos padrões espaciais capturados, o que pode ter favorecido o ajuste de modelos variográficos com maior alcance e menor dispersão em curtas distâncias.

4.5.3 Desenvolvimento e Análise dos Modelos Preditivos

Os parâmetros derivados dos ajustes dos semivariogramas experimentais por modelos teóricos constituem a base para a solução do sistema de KS (Eq. 3.6), adotado neste estudo como estimador fundamental da KI. Adicionalmente, a partir dos ajustes variográficos, foram deter-

minadas as dimensões da vizinhança de busca, originalmente prevista em formato elíptico, mas, neste caso, assumindo forma circular, com semi-eixos iguais aos alcances dos semivariogramas. Ressalte-se que a utilização de semivariogramas unidirecionais resultou em alcances uniformes em todas as direções, justificando a conversão da vizinhança de busca para a configuração circular, adequada ao padrão de correlação espacial observado.

Pela definição da vizinhança de busca, apenas as pastilhas piezelétricas localizadas no interior dessa região foram consideradas passíveis de contribuir para a estimativa de cada ponto. Para cada vizinhança, centrada no ponto a ser estimado, foram utilizadas informações de um mínimo de uma e um máximo de quatro pastilhas piezelétricas. Esse limite superior foi estabelecido com o propósito de evitar a inclusão de dados provenientes de transdutores situados, embora dentro da vizinhança de busca, em posições excessivamente distantes, cuja correlação espacial com o ponto em questão seria baixa.

Ademais, em virtude da inviabilidade de obtenção dos semivariogramas indicadores de todos os limiares de corte, conforme demonstrado na Seção 4.5.2, as estimativas por KI foram executadas utilizando a abordagem da KI da mediana (*median indicator kriging*). Dessa forma, os semivariogramas obtidos em cada abordagem de seleção de bandas de frequência foram utilizados como referência para obtenção das estimativas correspondentes.

O modelo adotado para o armazenamento dos resultados das estimativas foi essencialmente 2D, estruturado em células, cujos parâmetros estão apresentados na Tab. 4.4. A opção por essa representação fundamenta-se na simplicidade geométrica da estrutura monitorada, cujo formato plano da chapa permite uma caracterização adequada por meio de um modelo 2D.

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados para a geração do modelo de células adotado para o experimento da placa de alumínio.

Parâmetro	Valor
$xsiz$ (mm)	3,5
$ysiz$ (mm)	3,5
$zsiz$ (mm)	0,0
nx	172
ny	143
nz	1
$xorig$ (mm)	1,75
$yorig$ (mm)	1,75
$zorig$ (mm)	0,00

A definição do modelo foi realizada considerando os seguintes parâmetros mostrados na Tab. 4.4: (1) dimensões das células nas direções X, Y e Z, especificadas por $xsiz$, $ysiz$ e $zsiz$, respectivamente; (2) número de células nas direções X, Y e Z, indicados pelas variáveis nx , ny e nz ; e (3) posição de origem do modelo em cada eixo, designada pelas variáveis $xorig$, $yorig$ e $zorig$. Na Tab. 4.4 estão listados os valores adotados para cada parâmetro.

Conforme demonstrado na Tab. 4.4, observa-se que as dimensões no eixo Z, embora fossem consideradas durante a elaboração da estrutura geral do modelo, seus valores foram estabelecidos de tal modo que as dimensões das células na direção Z fossem nulas. Desta maneira, o modelo resultante é essencialmente 2D.

As dimensões das células foram determinadas com base em dois critérios fundamentais. O primeiro estabeleceu que as dimensões das células em cada eixo no plano X-Y deveriam ser inferiores ao alcance dos semivariogramas nas diferentes condições de dano avaliadas, assegurando que o modelo refletisse adequadamente o comportamento espacial das variáveis analisadas. O segundo critério buscou alinhar o modelo às dimensões reais da estrutura examinada. Para maximizar a fidelidade do modelo às características físicas das estruturas, as dimensões das células foram selecionadas de modo a minimizar o resíduo da divisão entre a dimensão total da estrutura e a dimensão das células nas direções X e Y, simultaneamente, resultando em valores residuais tão próximos de zero quanto possível.

Com base nas dimensões previamente definidas para as células, os demais parâmetros do modelo foram determinados de maneira sistemática. O número de células em cada eixo foi calculado dividindo-se a dimensão total da estrutura na respectiva direção pela dimensão da célula ao longo do mesmo eixo, assegurando uma discretização consistente com as características físicas da estrutura analisada. A origem do modelo foi posicionada de forma a corresponder à metade da dimensão da célula em cada eixo, garantindo que o limite inferior da malha (*grid*) coincidisse com as coordenadas (0, 0). Essa configuração é compatível com a convenção adotada pela maioria dos *softwares* de geoestatística, onde a origem do modelo é usualmente definida no centro da célula inicial, posicionada na borda inferior esquerda da grade regular (*grid*).

As estimativas KI foram obtidas empregando-se o módulo `ik3d` da *Geostatistical Software Library* (GSLIB), uma biblioteca desenvolvida para a análise geoestatística de dados espaciais (DEUTSCH; JOURNEL, 1998). A execução do `ik3d` foi implementada de forma integrada ao ambiente Python por meio da biblioteca pygeostat, versão 1.1.1 (DEUTSCH *et al.*, 2021). Essa integração proporcionou uma maior flexibilidade e automatização no processamento dos dados.

Os modelos obtidos, contendo valores de probabilidade variando entre 0 e 1, foram submetidos a uma etapa de pós-processamento que envolveu: (1) o tratamento de valores ausentes; e (2) a determinação das probabilidades dos valores de CCD excederem os respectivos limiares de corte.

No que se refere ao primeiro aspecto, os modelos obtidos por krigagem podem eventualmente apresentar valores ausentes, decorrentes da insuficiência de amostras para a realização das estimativas em determinadas células (DEUTSCH; JOURNEL, 1998). Nesses casos, é habitual a atribuição do valor “-9.9999” a tais células. Para possibilitar um tratamento adequado no ambiente Python, esses valores foram convertidos para o objeto “nan”, que representa de forma padrão valores ausentes nesse ambiente de programação.

A aplicação da segunda etapa foi necessária em função de que os resultados brutos obtidos pelo `ik3d`, neste contexto, representam a probabilidade dos valores de CCD serem iguais ou inferiores aos respectivos limiares de corte (*thresholds*). Esses resultados decorrem diretamente do procedimento utilizado para a definição das variáveis indicadoras demonstrado pela Eq. 3.1.

Assim, considerando o procedimento adotado para estabelecer as variáveis indicadoras disposto na Eq. 3.1, as probabilidades dos valores de CCD excederem os respectivos limiares de corte em cada modelo, foram obtidas através da Eq. 4.1, na qual $I_c(\mathbf{u}, z_k)$ representa a probabilidade do valor do CCD em um ponto \mathbf{u} ser superior a um limiar de corte z_k , e $I(\mathbf{u}, z_k)$ corresponde à probabilidade obtida pelo modelo de KI no ponto \mathbf{u} para o mesmo limiar de corte.

$$I_c(\mathbf{u}, z_k) = 1 - I(\mathbf{u}, z_k) \quad (4.1)$$

Portanto, conforme demonstrado pela Eq. 4.1, os valores brutos estimados pela KI foram subtraídos de 1, correspondente ao valor máximo de probabilidade. Este procedimento resultou, consequentemente, em valores indicando as probabilidades dos valores de CCD excederem os respectivos limiares de corte em cada modelo. Os mapas de probabilidade obtidos estão mostrados nas seções seguintes, organizados em função da abordagem utilizada para a seleção das bandas de frequência.

4.5.3.1 Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos

Os mapas de probabilidade de dano para a condição de uma única porca, obtidos a partir dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada no número de picos (Fig. 4.18) mostram uma extensa área de alta probabilidade de dano em patamares de corte mais baixos

(e.g., percentis 20 a 30). Essas regiões incluem a localização real da porca “A”, mas também abarcam falsos positivos. À medida que o patamar de corte aumenta, essas regiões diminuem progressivamente. No limiar de corte atribuído ao percentil 80 (Fig. 4.18g), surgem duas regiões: uma zona de alta probabilidade de dano abrangendo precisamente o local de fixação da porca “A”, e outra correspondendo a um falso positivo.

A existência de diversas regiões de falsos positivos em limiares de corte menores, principalmente aqueles relacionados aos percentis de 20 a 40, é atribuída à incorporação de valores relativamente baixos de métrica de dano. Conforme observado nas Figs. 4.18a, 4.18b e 4.18c, mesmo incluindo a posição real da porca “A”, os mapas de probabilidade nesses limiares de corte não fornecem resultados precisos em relação à posição real do dano, decorrente da ocorrência de falsos positivos.

No percentil 80 (Fig. 4.18g), a ocorrência de um falso positivo é atribuída à presença de um valor de CCD relativamente elevado no sensor S-05, o qual está posicionado relativamente distante da porca “A”, conforme demonstrado na Fig. 4.9.

A execução de uma análise fundamentada no cálculo da distância Euclidiana entre os centros de massa das áreas com probabilidade superior a 60 % – determinados pelo método `label` da biblioteca Scipy – e a posição real da porca “A” em cada modelo, demonstrou que o modelo preditivo derivado do percentil 80 forneceu o resultado mais favorável.

Nesse cenário, a distância Euclidiana entre o centroide da região prevista para ocorrência de dano mais próxima, e a posição real da porca “A” foi de 28,2 mm, a qual corresponde a 18,8 % do espaçamento entre os sensores (aproximadamente 150,0 mm). Esse resultado evidencia a eficácia do *framework* proposto para a localização de danos, apesar da existência de uma zona de falso positivo próxima ao sensor S-05. Tal zona, contudo, foi consequência da falha na etapa de detecção, a qual foi propagada no modelo preditivo.

Na condição com duas porcas (Fig. 4.19), também sob a abordagem de seleção de intervalos de frequência baseada no número de picos, uma extensa área de alta probabilidade é observada em limiares de corte mais baixos (e.g., percentis de 20 a 40), conforme demonstrado nas Figs. 4.19a, 4.19b e 4.19c.

Esse domínio de alta probabilidade inclui a posição real das duas porcas no percentil 20 (Fig. 4.19a), enquanto nos percentis de 30 (Fig. 4.19b) a 40 (Fig. 4.19c), apenas a porca “A” é totalmente abrangida. Nesses percentis há também presença de falsos positivos em extensas regiões da placa, atribuídos à captura de valores relativamente baixos de CCD.

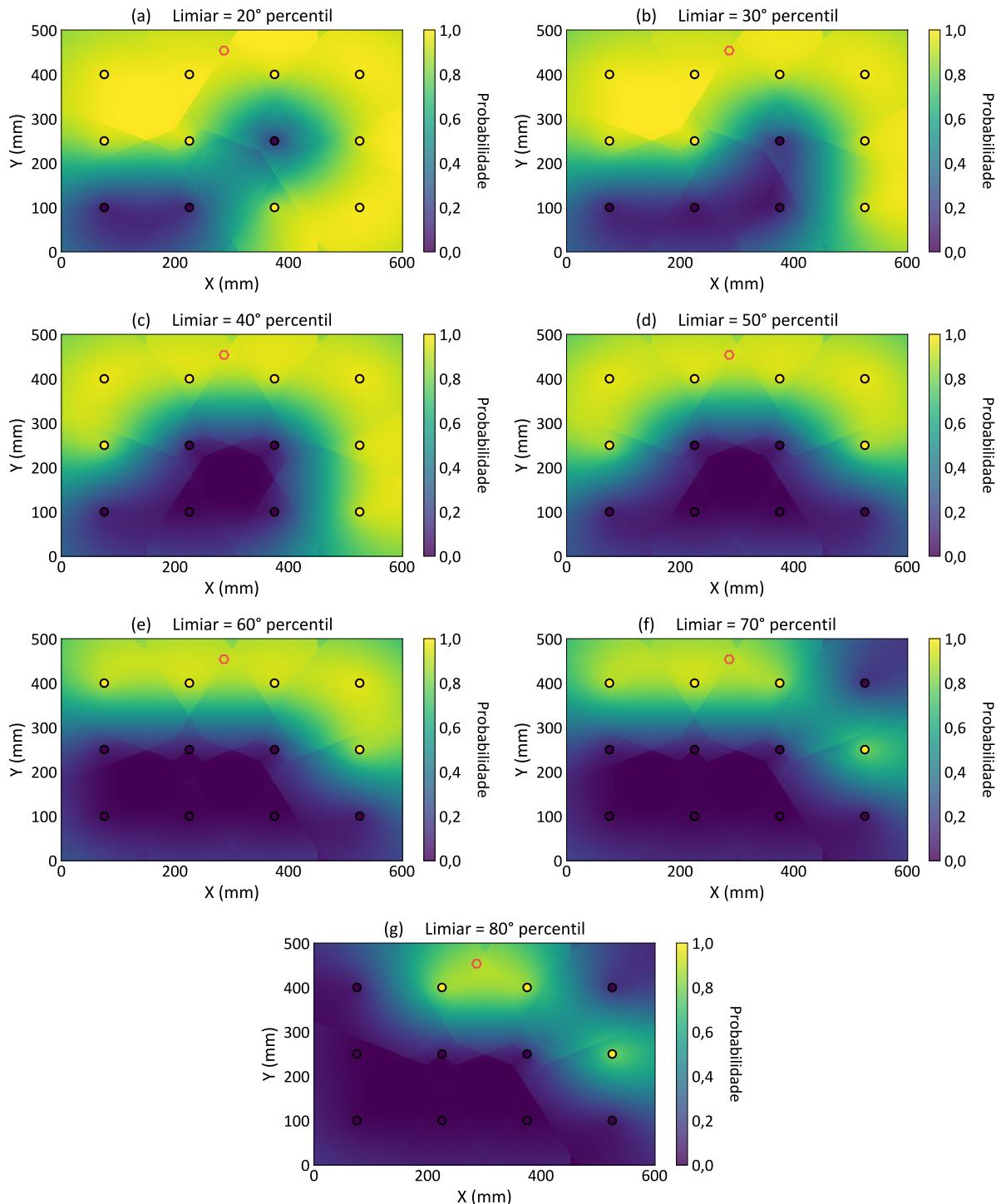


Figura 4.18: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição de uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

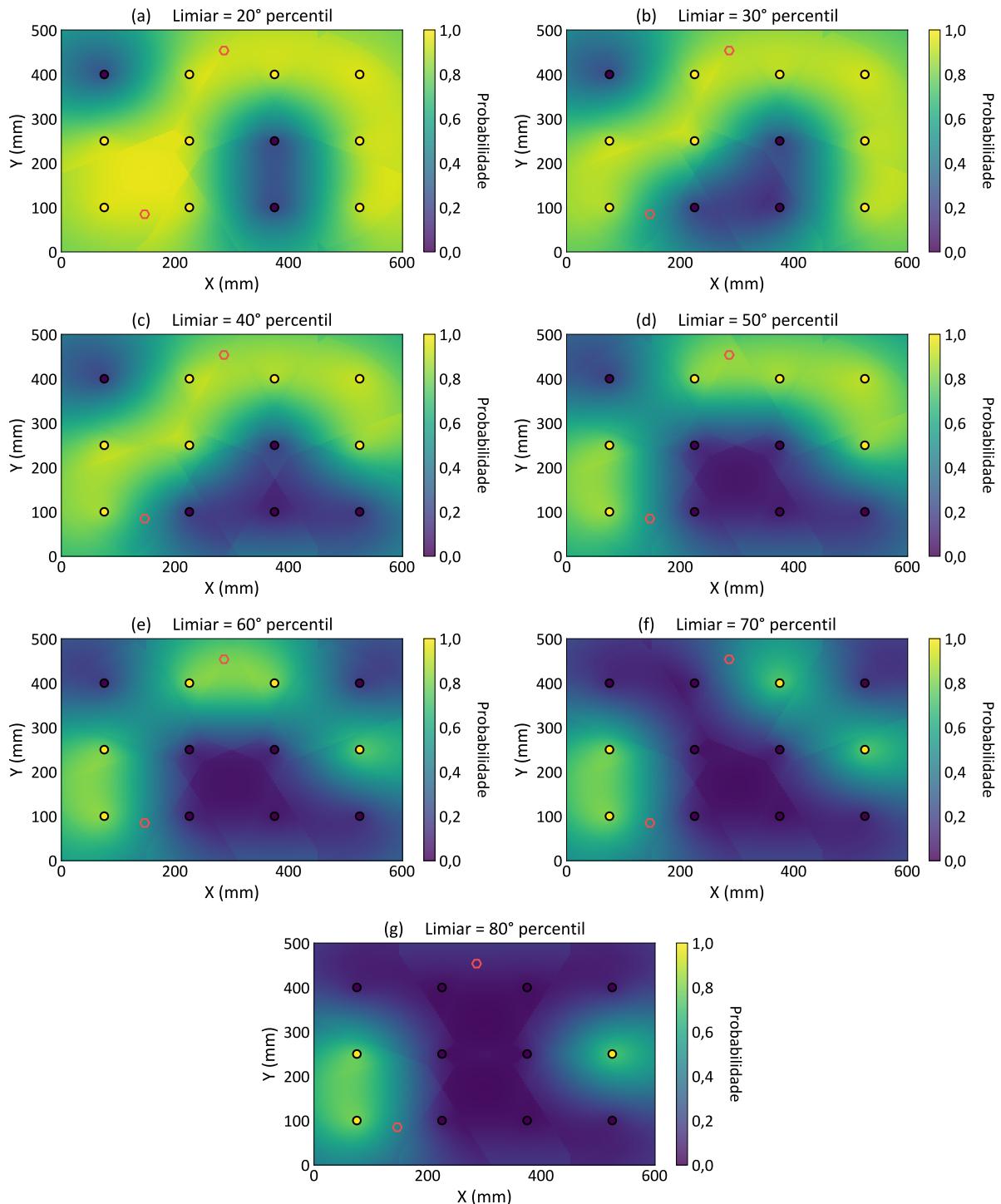


Figura 4.19: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

O aumento do valor do limiar de corte provoca uma contração dessa região, resultando na ocorrência de pelo menos dois domínios de alta probabilidade a partir do 50° percentil (Fig. 4.19d). Um dos domínios contém a porca “A” na faixa do 50° ao 60° percentil, enquanto o outro

fornecce apenas uma aproximação da porca “B” nessa faixa. Um aumento adicional do limiar de corte ocasiona uma nova redução espacial das áreas de alta probabilidade de dano. No percentil 70 (Fig. 4.19f), a posição de ambas as porcas é apenas aproximada e, no percentil 80 (Fig. 4.19g), foi identificado um falso negativo, uma vez que a porca “A” já não foi identificada.

Os desvios observados entre o modelo e a posição real das porcas fixadas na placa, particularmente nas faixas mais elevadas de limiares de corte (*e.g.*, percentis de 70 a 80), são atribuídos aos seguintes fatores, identificados na Fig. 4.8 e na Fig. 4.9: (1) existência de valores elevados de CCD nos sensores S-05 e S-08, os quais estão localizados relativamente distantes de ambos os danos; (2) ocorrência de valores baixos de CCD no sensor S-11, o qual está posicionado na vizinhança imediata da porca “B”; e (3) presença de valores baixos de métrica de dano nos sensores S-02 e S-03, situados próximos da porca “A”.

Com o objetivo de identificar o modelo mais adequado para essa condição, foi calculada a média das distâncias euclidianas entre os centroides das regiões de dano previstas e as posições das porcas correspondentes. Os resultados obtidos indicaram que o percentil 60 foi o que produziu o melhor resultado. Neste cenário, o centroide previsto para a porca “A” foi 31,4 mm distante de sua posição real, correspondendo a 20,9 % do espaçamento entre os sensores. Já a porca “B” apresentou uma distância de 120,9 mm do centroide mais próximo.

Conforme demonstrado na Figura 4.19e, o mapa de probabilidades obtido para o percentil 60 indica que uma região de alta probabilidade abrangeu completamente a porca “A”. Consequentemente, essa porca foi localizada com um alto grau de precisão, em que a posição prevista foi apenas 31,4 mm distante da posição real dessa porca.

Entretanto, no tocante à porca “B”, a falha de alguns sensores na detecção dessa porca, especificamente os sensores S-08 e S-11, resultou em uma região de alta probabilidade que não abrangeu completamente a porca “B”, como demonstrado na Fig. 4.19e. Diante do exposto, infere-se que o comportamento em questão tenha ocasionado um desvio mais acentuado em relação à posição real da porca, com uma distância de 120,9 mm, o que corresponde a 80,6 % do espaçamento entre os sensores.

Os resultados obtidos a partir da abordagem baseada na densidade de picos na configuração com três porcas (Fig. 4.20) indicam que todas foram detectadas na faixa de limiares entre os percentis 20 (Fig. 4.20a) e 30 (Fig. 4.20b), sendo que duas delas foram totalmente abrangidas pela região central de alta probabilidade. Nesses limiares, entretanto, também foram identificadas regiões de falsos positivos, atribuídas à captura de valores relativamente baixos de CCD.

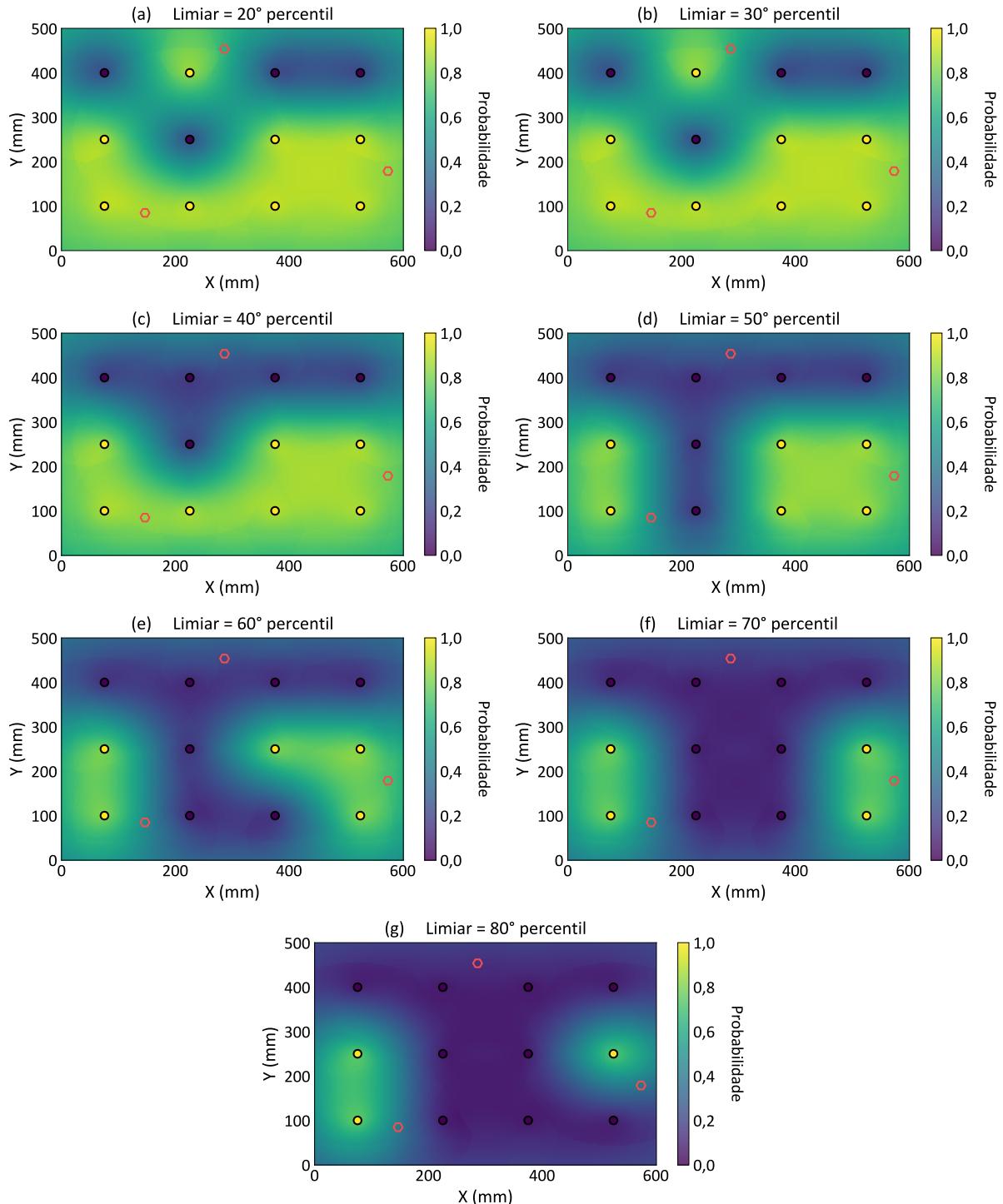


Figura 4.20: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

À medida que o limiar de detecção aumenta, observa-se uma contração progressiva do domínio de alta probabilidade. A porca “A” deixa de ser detectada em limiares iguais ou superiores ao percentil 40 (Fig. 4.20c). Em contrapartida, as demais porcas apresentam

comportamentos distintos: (1) no percentil 40, as porcas “B” e “C” encontram-se totalmente contidas no domínio previsto de dano; (2) entre os percentis 50 (Fig. 4.20d) e 70 (Fig. 4.20f), apenas a porca “C” permanece corretamente abrangida pela região de alta probabilidade de dano; e (3) nos limiares mais elevados, as posições das porcas “B” e “C” são apenas aproximadas pelo modelo.

As distâncias euclidianas calculadas para todos os percentis evidenciaram que os limiares de 20 e 30 produziram os menores desvios para as três porcas simultaneamente. Nesse intervalo, o centroide previsto para a porca “A” apresentou um desvio de 65,9 mm em relação à sua posição real. Para a porca “B”, a distância registrada entre as posições prevista e real foi de 174,8 mm, enquanto para a porca “C” esse valor alcançou 262,3 mm.

Os desvios observados para as porcas “B” e “C” foram atribuídos à formação de um único domínio extenso de alta probabilidade nesses limiares, o que resultou no deslocamento do centroide para uma posição mais distante. Com o aumento do limiar, esse domínio passa a sofrer uma contração e subsequente divisão, restringindo-se progressivamente a regiões próximas às porcas. No percentil 70 (Fig. 4.20f), a porca “C” encontra-se completamente contida em um domínio de alta probabilidade concentrado nos sensores situados em sua vizinhança imediata, resultando em um desvio de apenas 40,7 mm em relação à sua posição real.

4.5.3.2 Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos em altas frequências

Os mapas de probabilidade de dano obtidos na condição com uma única porca, e para a abordagem de seleção de intervalos baseada da densidade de picos em frequências elevadas (Fig. 4.21), revelam a ocorrência de uma ampla região de alta probabilidade nos limiares de corte mais baixos (percentis 20 a 30), atribuída à presença de valores relativamente baixos de CCD. Nesses limiares de corte, essa região não contém a posição atual da porca “A”, de tal forma que as regiões de alta probabilidade de dano configuraram falsos positivos.

Com o aumento do limiar, conforme demonstrado na Fig. 4.21, observa-se a subdivisão dessa região em dois domínios distintos a partir do 40° percentil (Fig. 4.21c). Concomitantemente, esses domínios apresentam contração sucessiva, tornando-se progressivamente mais restritos aos locais de ocorrência dos valores mais elevados da métrica de dano.

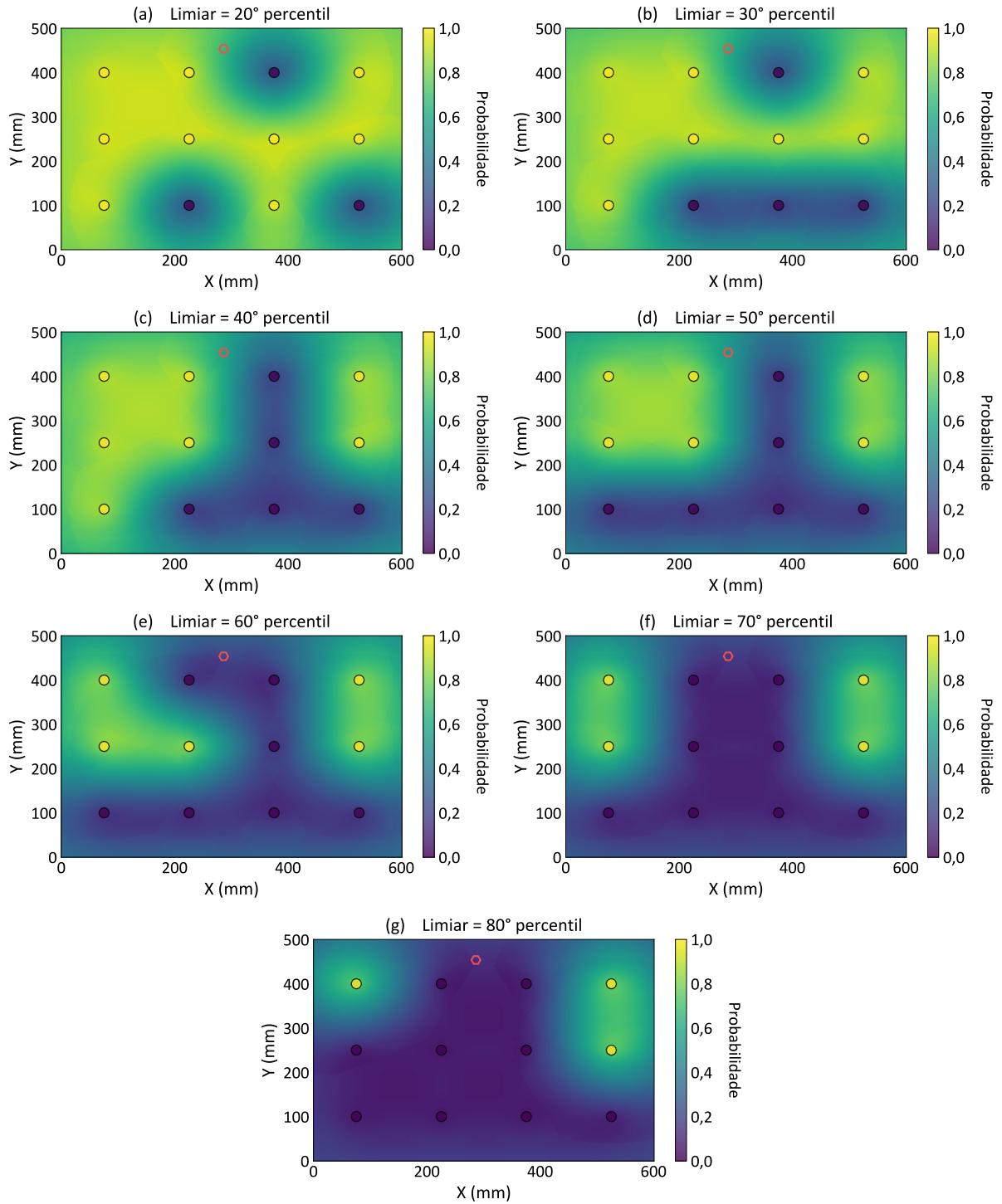


Figura 4.21: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

Contudo, em nenhum dos mapas de probabilidade nesta condição, as regiões de alta probabilidade de dano contemplaram a localização da porca “A”, conforme demonstrado na Fig. 4.21. Esse desvio é atribuído à ocorrência de valores elevados de CCD em pastilhas piezelé-

tricas localizadas relativamente distantes do dano, notadamente os sensores S-01, S-04 – que resultou no maior valor de CCD nesta condição – e S-05. Simultaneamente, sensores situados na vizinhança imediata da porca “A” apresentaram valores de CCD comparativamente menores que esses sensores, conforme demonstrado na Fig. 4.10 e na Fig. 4.11.

Nessa configuração, a análise das distâncias euclidianas evidenciou que o modelo mais representativo correspondeu ao percentil 30 (Fig. 4.21b), no qual foi registrada uma distância média de 160,9 mm entre o centroide previsto e a posição real da porca. Tal resultado reforça a existência de um desvio substancial em relação à configuração real do dano, cuja causa é atribuída à distribuição inadequada dos valores de CCD ao longo da placa. Essa inconsistência é particularmente evidenciada no mapa de probabilidades referente ao percentil 80 (Fig. 4.21g), no qual os sensores vizinhos à porca “A” não contribuíram para a formação de um domínio de alta probabilidade, comprometendo, assim, a acurácia da localização do dano.

Nos mapas de probabilidade para a condição com duas porcas (Fig. 4.22), resultados semelhantes foram observados. No percentil 20 (Fig. 4.22a), houve a ocorrência de uma extensa área de alta probabilidade, contudo sem incluir a posição atual de ambas as porcas, fornecendo apenas uma aproximação grosseira da posição das mesmas. Ademais, extensas áreas de falsos positivos foram identificadas neste limiar, as quais são atribuídas à captura de valores de CCD relativamente baixos.

O aumento do limiar resultou no aparecimento de duas regiões principais de alta probabilidade, que, apesar de mais localizadas, ainda não englobaram as posições reais dos danos. Ademais, a partir do 70° percentil (Fig. 4.22f), nenhuma porca foi identificada nos mapas de probabilidade, resultando, portanto, na ocorrência de falsos negativos.

Tais desvios são atribuídos à distribuição espacial inadequada das métricas de dano. Nessa condição, valores elevados de CCD concentraram-se em pastilhas piezelétricas posicionadas distantes das porcas, particularmente os sensores S-04, S-05, S-07 e S-08. Em contrapartida, sensores localizados na proximidade imediata das porcas, em particular os sensores S-02 e S-03, localizados próximos à porca “A”, e os sensores S-11 e S-12, situados próximos da porca “B”, apresentaram valores de CCD relativamente menores que os sensores mais distantes, de acordo com o demonstrado na Fig. 4.10 e na Fig. 4.11.

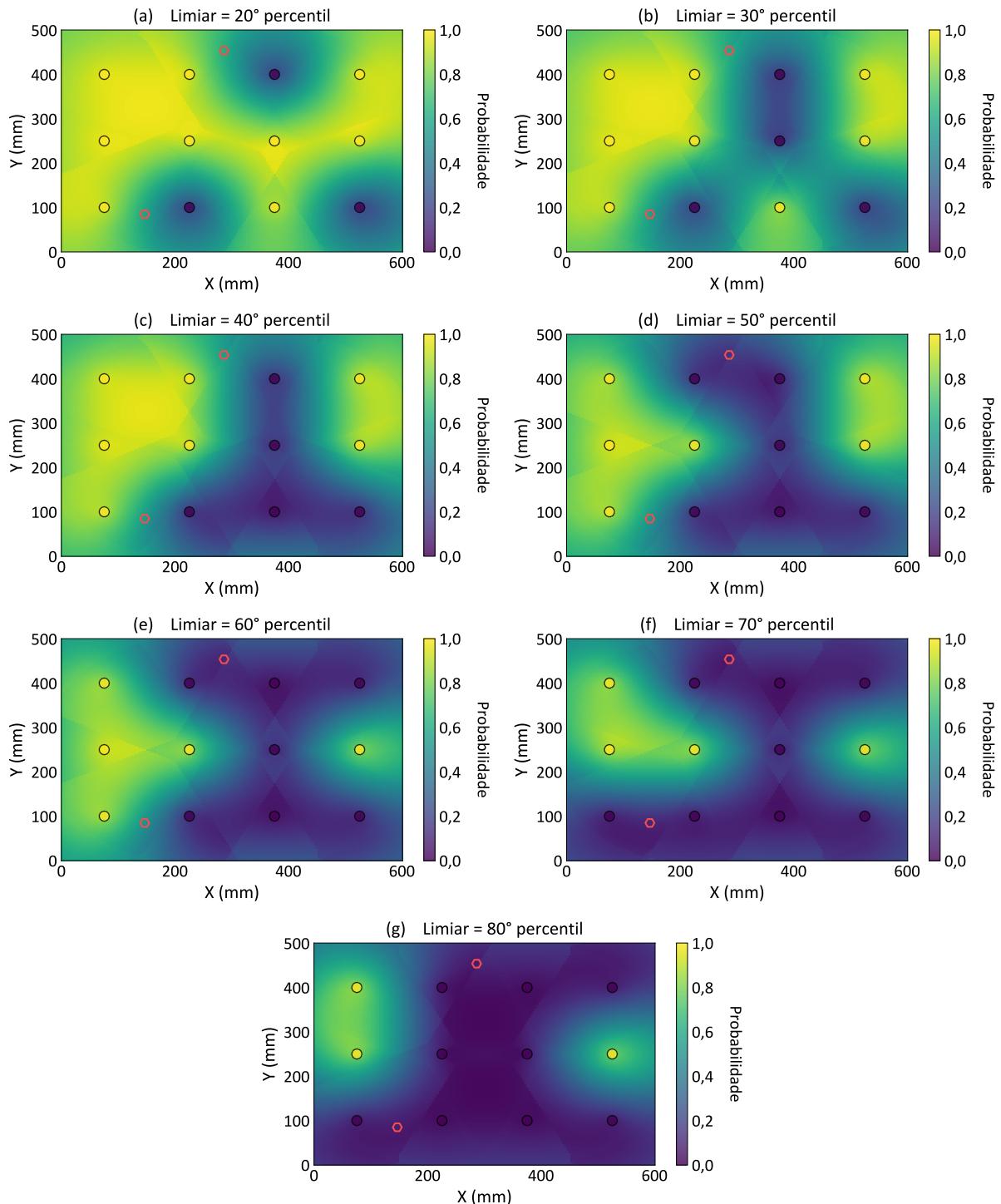


Figura 4.22: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

Uma análise detalhada das distâncias euclidianas em cada modelo indicou que o modelo preditivo derivado do limiar correspondente ao percentil 20 (Fig. 4.22a) apresentou os menores desvios para ambas as porcas. Nesse cenário, o centroide previsto para uma das porcas esteve a 177,6 mm de distância de sua posição real, enquanto para a outra porca o desvio registrado foi de 225,8 mm.

Apesar da discrepância entre as posições previstas e as posições reais das porcas nessa abordagem, os mapas de probabilidade apresentados na Fig. 4.22 demonstram que as previsões obtidas pela KI seguem com consistência os valores da variável indicadora atribuídos às pastilhas piezelétricas (círculos coloridos). Assim, uma atribuição adequada dos valores indicadores – caracterizada pela ocorrência de métricas de dano elevadas nas regiões próximas ao dano e valores reduzidos em locais mais afastados – teria o potencial de produzir estimativas mais acuradas para ambas as localizações de dano.

Na condição com três porcas (Fig. 4.23), os modelos preditivos revelaram um desempenho igualmente limitado. Nos limiares de corte associados ao intervalo delimitado pelos percentis 20 (Fig. 4.23a) e 40 (Fig. 4.23c), observou-se uma única região ampla de alta probabilidade. Essa região abrangeu integralmente apenas a porca “C” nos limiares referentes aos percentis 20 (Fig. 4.23a) e 30 (Fig. 4.23b), enquanto no percentil 40 (Fig. 4.23c), a posição da porca “C” foi estimada apenas de forma grosseira. Já a posição da porca “B” foi estimada de forma grosseira no intervalo delimitado pelos percentis 20 e 40, enquanto a posição da porca “A” não foi prevista a partir do limiar correspondente ao 30º percentil.

O aumento do limiar de corte resultou no surgimento de dois domínios de alta probabilidade, acompanhados de uma redução gradativa dos mesmos, em virtude do aumento desse limiar. No 50º percentil (Fig. 4.23d), as posições das porcas “B” e “C” foram apenas estimadas de forma grosseira, e nos percentis superiores, apenas a porca “C” foi identificada de modo aproximado, enquanto os demais danos não foram identificados, resultando na ocorrência de falsos negativos.

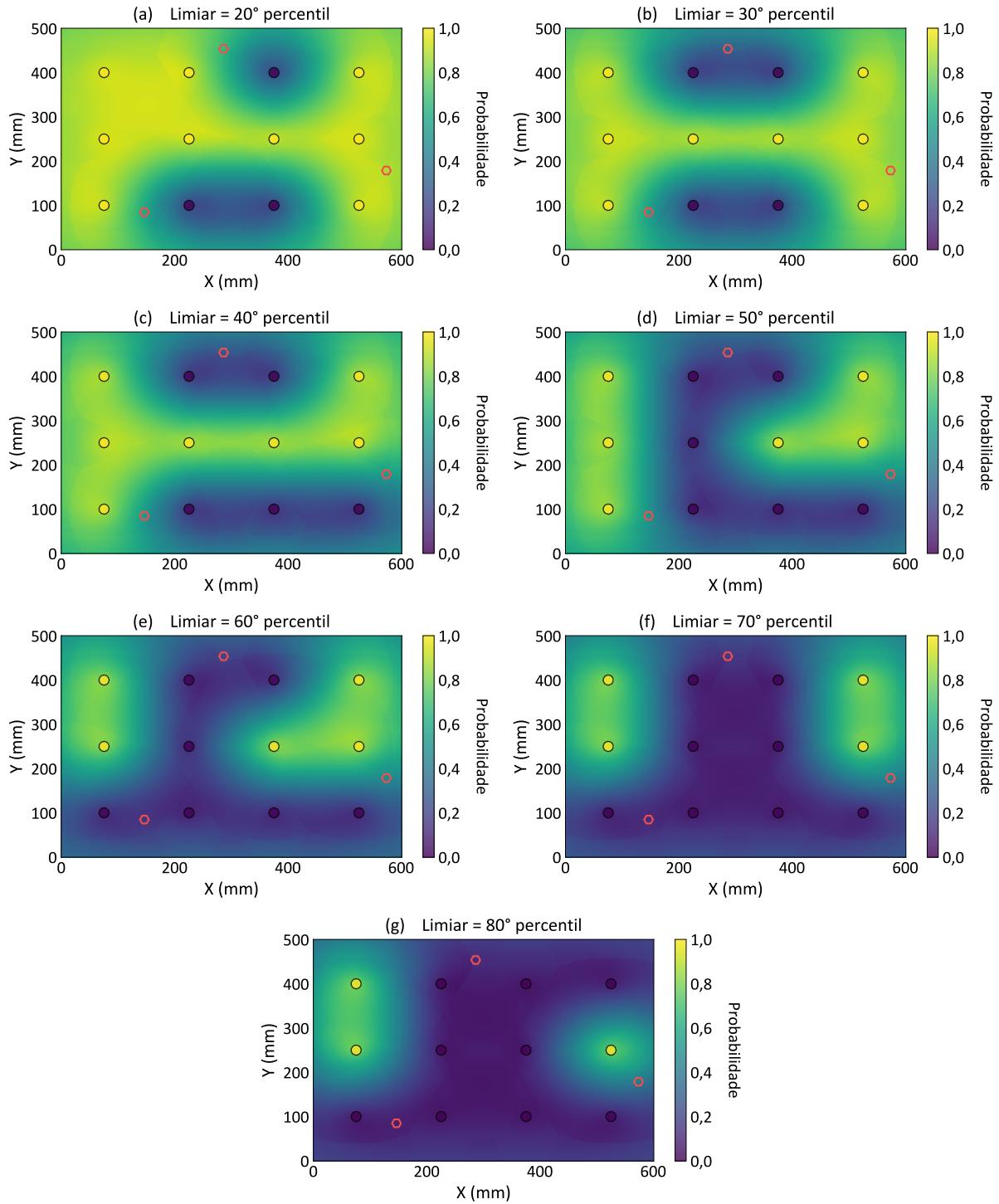


Figura 4.23: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

A avaliação das distâncias euclidianas entre os centroides previstos e as posições reais das porcas indicou que o limiar correspondente ao 50° percentil (Fig. 4.23d) apresentou o menor desvio global quando consideradas simultaneamente as três porcas. Nesse cenário, o centroide

previsto para a porca “A” apresentou um afastamento de 256,6 mm em relação à sua posição real; para a porca “B”, a distância registrada foi de 186,1 mm; e, por fim, a posição prevista da porca “C” apresentou um desvio de 146,1 mm em relação à sua localização atual.

Os desvios observados nos modelos preditivos da Fig. 4.23 se devem à distribuição espacial inadequada dos valores de CCD na placa. Valores elevados de CCD ocorreram em pastilhas piezelétricas localizadas distantes dos danos, especificamente nos sensores S-01, S-04, S-06 e S-08, cujos valores de CCD foram contabilizados entre os mais elevados nessa condição. Além disso, apenas o sensor S-05, posicionado próximo à porca “C”, exibiu um valor de métrica de dano comparável aos valores mais elevados, embora esses tenham sido atribuídos a pastilhas piezelétricas relativamente mais distantes dos danos (*e.g.*, sensores S-04 e S-08), conforme demonstrado na Fig. 4.10 e na Fig. 4.11. Já os valores de CCD relacionados às pastilhas piezelétricas situadas próximas das porcas adicionadas foram menores que aqueles exibidos por sensores mais distantes.

Essa configuração espacial dos valores de CCD – com métricas elevadas associadas a sensores afastados e valores reduzidos atribuídos a sensores próximos dos danos – comprometeu, portanto, a capacidade do modelo derivado da KI em delimitar com precisão as regiões danificadas, embora a aderência entre o modelo e os dados amostrais tenha sido preservada em todos os cenários.

4.5.3.3 Resultados da abordagem da sensibilidade ao dano

Os mapas de probabilidade obtidos por meio da KI sob a condição com uma única porca, e utilizando as variáveis relacionadas à abordagem de seleção de intervalos de frequência baseada na sensibilidade ao dano, sugerem que os modelos foram capazes de delinear a posição atual da porca “A”, conforme demonstrado na Fig. 4.24.

De acordo com a Fig. 4.24, nos limiares de corte mais baixos (*e.g.*, percentis 20 a 30), observa-se a ocorrência de uma ampla região de alta probabilidade, que contém a posição atual da porca “A”, mas também abrange extensas áreas de falsos positivos, decorrente da captura de valores de CCD mais baixos.

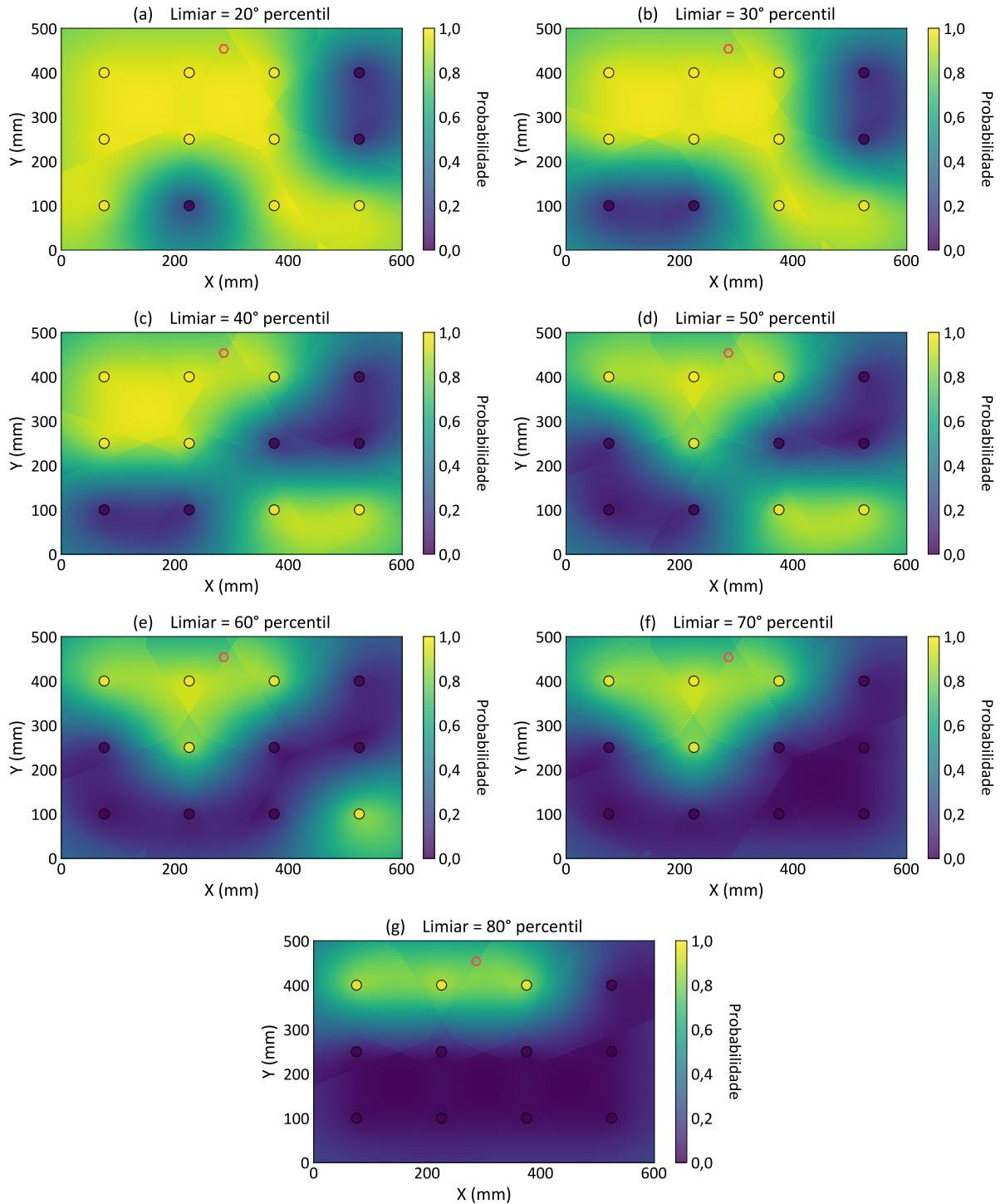


Figura 4.24: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com uma única porca. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

O aumento do limiar de corte ocasionou uma contração gradativa dessa área. Entre os limiares estabelecidos pelos percentis 40 (Fig. 4.24c) e 60 (Fig. 4.24e), dois domínios de alta probabilidade de dano podem ser observados. Um deles corresponde a um falso positivo,

enquanto o outro contém a posição atual da porca “A”. Já nos percentis 70 (Fig. 4.24f) e 80 (Fig. 4.24g), houve a ocorrência de apenas uma área de alta probabilidade, sucessivamente mais restrita à posição da porca “A”, de tal forma que no 80° percentil (Fig. 4.24g) a região de alta probabilidade de dano abrangeu completamente a posição atual da porca “A”, com uma redução da quantidade de falsos positivos.

Nesse sentido, os resultados apresentados na Fig. 4.24 demonstram que os domínios de alta probabilidade conservaram a posição atual da porca “A” de maneira consistente em todos os limiares de corte avaliados, o que reforça a robustez do modelo obtido nessa abordagem.

Ademais, o delineamento integral da posição atual da porca “A” no percentil 80 (Fig. 4.24g), atribuído aos valores mais elevados de CCD, mostram um alinhamento mais adequado entre as métricas de dano obtidas e a distância das pastilhas piezelétricas ao dano, conforme observado na Fig. 4.12 e na Fig. 4.13, onde é possível identificar que os maiores valores de CCD foram atribuídos aos sensores S-02, S-03 – posicionados na vizinhança imediata da porca “A” – e S-04. Consequentemente, o domínio de alta probabilidade identificado no percentil 80 (Fig. 4.24g) contemplou a localização da porca “A”, e resultou em uma área de alta probabilidade restrita, focalizada apenas nas pastilhas piezelétricas mais próximas ao dano.

Considerando que os modelos preditivos acompanharam o comportamento espacial da variável investigada, conforme observado na Fig. 4.24, é possível inferir que a obtenção de uma métrica de dano substancialmente menor no sensor S-04, por este estar situado mais distante da porca “A”, poderia resultar em uma área de alta probabilidade ainda mais restrita à posição atual do dano.

As distâncias euclidianas calculadas para essa abordagem indicaram que o modelo correspondente ao limiar de corte do 80° percentil (Fig. 4.24g) apresentou o menor desvio, registrando uma distância de 76,7 mm entre o centroide previsto e a posição real da porca. Nesse cenário, o modelo demonstrou um grau razoável de confiabilidade em sua capacidade de localizar o dano, sem a ocorrência de domínios de falsos positivos afastados da posição real da porca, favorecendo, portanto, uma estimativa mais precisa da localização do dano.

Por outro lado, em limiares inferiores ao 80° percentil, foram obtidas distâncias euclidianas relativamente maiores, atribuídas à formação de extensas áreas de alta probabilidade. Esse comportamento ocasionou deslocamentos dos centroides para regiões mais afastadas da posição real da porca. Ainda no 80° percentil, um valor elevado de CCD foi observado no sensor S-04, localizado relativamente distante da porca “A”, o que resultou em um leve deslocamento

da posição prevista do dano. Apesar disso, o desvio registrado – de 76,7 mm em relação à posição real da porca – não comprometeu a capacidade do modelo em estimar de forma eficaz a localização do dano.

Na configuração com duas porcas (Fig. 4.25), os mapas de probabilidade obtidos, provenientes da abordagem baseada na sensibilidade ao dano, também apresentaram desempenho satisfatório.

No 20° percentil (Fig. 4.25a), uma extensa região de alta probabilidade foi identificada, a qual abrangeu os locais de fixação de ambas as porcas. No entanto, foi também constatada a ocorrência de falsos positivos. O aparecimento de falsos positivos em limiares de corte baixos é atribuído à captura de valores de CCD relativamente baixos, resultando em domínios de alta probabilidade de dano que se estendem sobre uma grande porção da placa.

Com o aumento do limiar de corte, observou-se um desmembramento dessa região em dois domínios principais. Esses domínios foram submetidos a uma contração gradativa, em consequência do aumento do limiar de corte, de tal forma que as regiões de alta probabilidade se mantiveram sistemática e progressivamente restritas aos valores mais altos de CCD, conforme demonstrado na Fig. 4.25.

No mapa de probabilidade associado ao 80° percentil (Fig. 4.25g), um desses domínios abrangeu totalmente a localização da porca “A”, enquanto o segundo não abrangeu totalmente o local de fixação da porca “B”. Portanto, o modelo foi capaz de delinear com confiança o local da porca “A”, enquanto resultou em um domínio de alta probabilidade deslocado em relação ao local atual da porca “B”.

Na avaliação das distâncias euclidianas entre os centroides previstos e as posições reais das porcas, constatou-se que o modelo associado ao 80° percentil (Fig. 4.25g) apresentou o melhor desempenho simultâneo para ambas as porcas. Nesse cenário, a posição da porca “A” foi prevista com um desvio de apenas 37,9 mm em relação à sua posição real, enquanto a porca “B” apresentou um desvio de 82,2 mm em relação ao centroide previsto. Ressalta-se, contudo, que modelos de krigagem igualmente confiáveis também podem ser obtidos nos limiares compreendidos entre os percentis 60 (Fig. 4.25e) e 70 (Fig. 4.25f), ainda que com a presença de algumas regiões de falsos positivos.

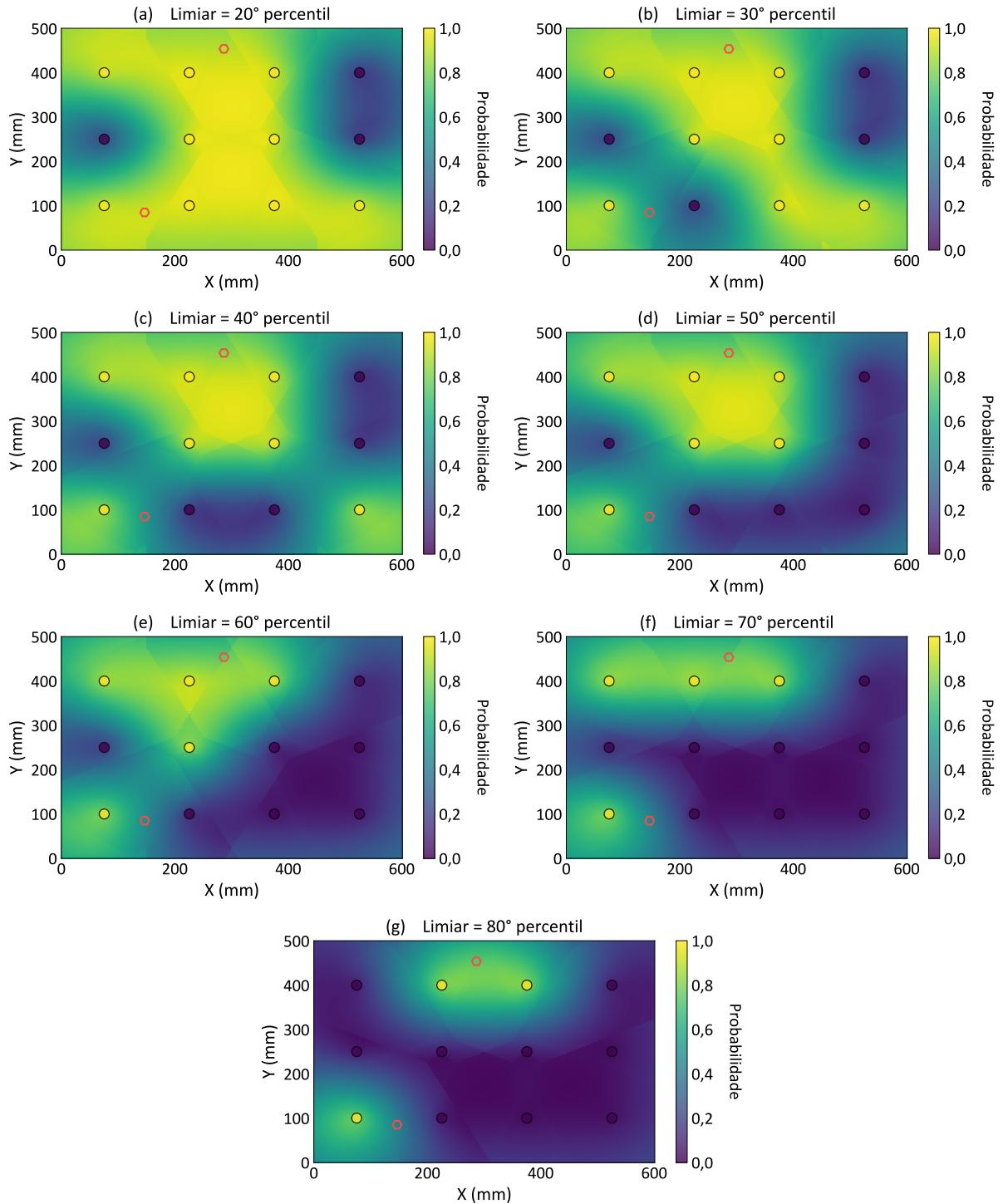


Figura 4.25: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

Esses resultados evidenciam a eficácia dos modelos baseados na KI para a estimativa das posições de dano, alcançando desvios mínimos de até 37,9 mm, desde que os sensores localizados na vizinhança imediata das porcas consigam detectar de forma efetiva o dano. Além disso, esse

desvio corresponde a apenas 25,3 % do espaçamento adotado entre os sensores, o que atesta a elevada precisão do modelo em relação à malha de instrumentação utilizada.

A identificação do local atual da porca “A” no modelo preditivo decorre da ocorrência de valores elevados de CCD nas pastilhas piezelétricas confinadas da vizinhança imediata da porca “A” (*i.e.*, sensores S-02 e S-03), ao mesmo tempo em que valores de CCD comparativamente menores são observados em pastilhas piezelétricas mais distantes, conforme apresentado na Fig. 4.12 e na Fig. 4.13.

Em relação à porca “B”, o desvio observado no modelo é atribuído à aparente menor sensibilidade do sensor S-11. Apesar de estar situado nas imediações da porca “B”, esse sensor não apresentou um valor de CCD comparável com o exibido pelo sensor S-12, conforme pode ser observado na Fig. 4.12 e na Fig. 4.13. Assim, a diferença de magnitude desses valores aparentemente resultou em uma região de alta probabilidade deslocada da posição atual da porca “B”.

Na condição com três porcas (Fig. 4.26) uma ampla área de alta probabilidade de dano foi manifestada no limiar referente ao 20° percentil (Fig. 4.26a). Essa área abrange completamente a localização atual das porcas “A” e “C”, e parcialmente o local da porca “B”. Extensas áreas de falsos positivos também foram identificadas nesse limiar.

Nos percentis subsequentes, conforme demonstrado na Fig. 4.26, essa área inicial foi desmembrada em no mínimo dois domínios, os quais tiveram sua extensão reduzida gradativamente, de acordo com o aumento do limiar de corte.

Um desses domínios abrangeu totalmente a porca “A” entre os limiares de corte delimitados pelos percentis 30 (Fig. 4.26b) e 70 (Fig. 4.26f), demonstrando uma alta consistência do modelo no que tange à localização dessa porca. Já as demais porcas não foram totalmente abrangidas pelas áreas de alta probabilidade a partir do limiar referente ao 30° percentil (Fig. 4.26b).

Nos percentis mais elevados (*e.g.*, 70° e 80° percentis), as áreas de probabilidade apresentaram-se restritas e concentradas nas proximidades dos valores mais elevados de CCD. No 70° percentil (Fig. 4.26f), o local da porca “A” foi inteiramente abrangido pelo domínio de alta probabilidade. Por sua vez, os locais das demais porcas não foram totalmente abrangidos. Já no percentil 80 (Fig. 4.26g), todas as três porcas tiveram suas localizações parcialmente abrangidas pelos domínios de alta probabilidade de dano.

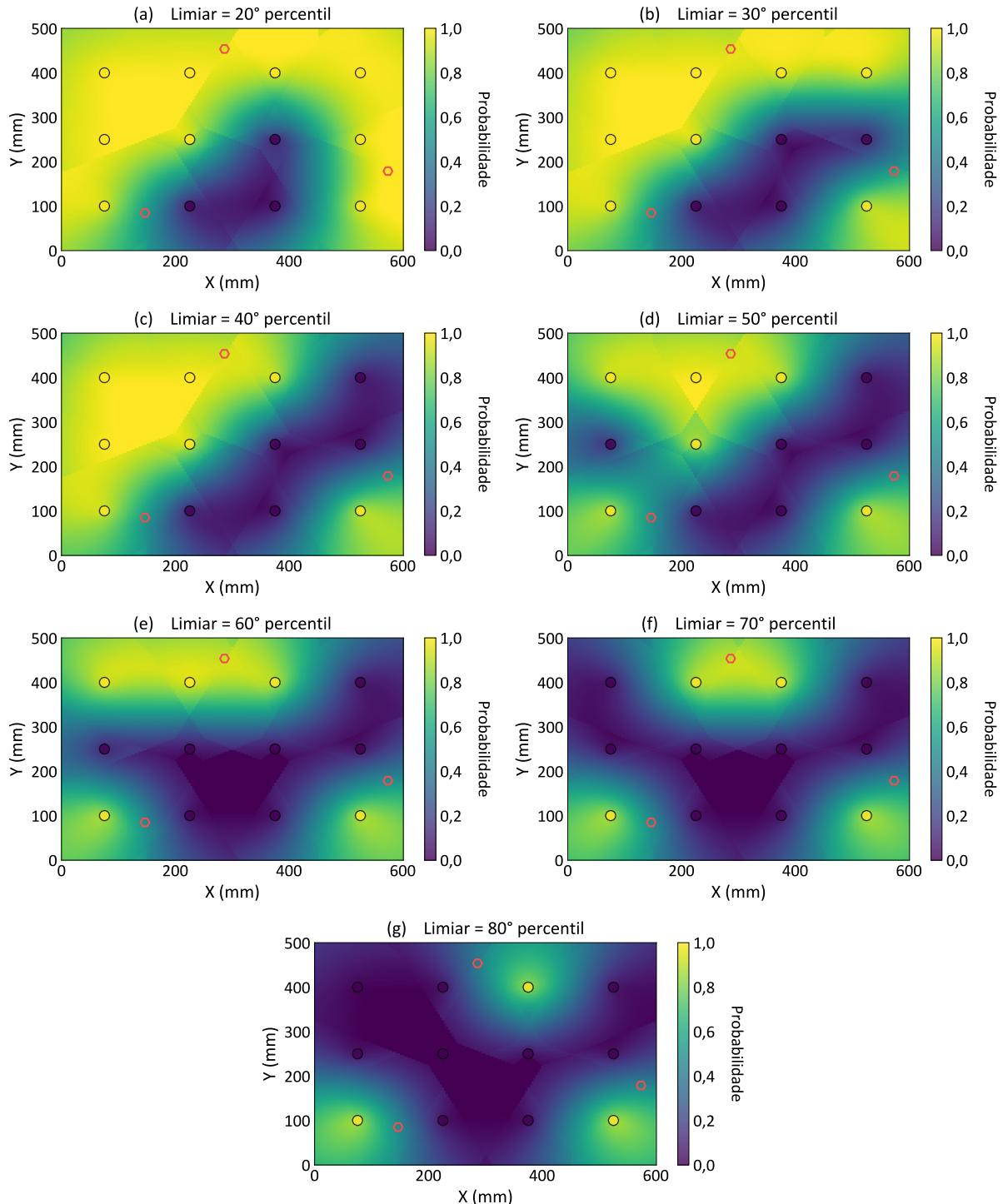


Figura 4.26: Mapas de probabilidade de dano na placa de alumínio para a condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano. Os limiares são referentes aos seguintes percentis: (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 60, (f) 70, (g) 80.

A análise das distâncias euclidianas ao longo dos percentis demonstrou que o 70° percentil (Fig. 4.26f) apresentou o resultado mais adequado de forma simultânea para as três porcas. Nesse limiar, o centroide previsto para a porca “A” esteve a 25,2 mm de sua posição real. Em

comparação, a porca “B” apresentou um desvio de 96,5 mm entre a posição prevista e a posição real, enquanto a porca “C” registrou um desvio de 112,4 mm.

O menor desvio, atribuído à porca “A”, decorre da adequada detecção dessa porca pelas pastilhas piezelétricas posicionadas em sua vizinhança imediata, o que resultou em uma região de alta probabilidade que abrangeu integralmente a sua posição real. Em contrapartida, as porcas “B” e “C” não tiveram suas localizações contempladas pelas áreas de alta probabilidade devido à falha dos sensores S-11 e S-05 em detectar, respectivamente, essas porcas. Como consequência, os centroides correspondentes foram posicionados a distâncias maiores em relação às posições reais dessas porcas.

Os mapas de probabilidade (Fig. 4.26) evidenciam uma razoável correspondência entre os modelos preditivos e as posições reais das porcas nos limiares de corte associados aos percentis 60 (Fig. 4.26e) e 80 (Fig. 4.26g). Nesses limiares, todas as três porcas tiveram suas posições ao menos estimadas de forma aproximada, fenômeno que não foi observado nos modelos obtidos a partir das demais abordagens. Ademais, os desvios observados são consequência da distribuição inconsistente de valores de CCD na placa, em função da falha na detecção das porcas por alguns sensores.

Nesse sentido, a obtenção de valores de CCD efetivamente compatíveis com a distância da(s) pastilha(s) piezelétrica(s) ao dano pode aumentar substancialmente a capacidade dos modelos preditivos derivados da KI em estimar com confiança a localização de múltiplos danos. Essa hipótese é corroborada pela comprovada capacidade do modelo de se adaptar à variação espacial da variável investigada, conforme demonstrado na Fig. 4.26, que demonstra que as probabilidades estimadas são compatíveis com os valores amostrais em todos os limiares de corte analisados.

CAPÍTULO V

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL: APLICAÇÃO DA KI EM ESTRUTURA COMPLEXA

Os resultados obtidos no experimento com a placa de alumínio evidenciaram que a KI foi capaz de capturar de forma adequada os padrões de variação espacial dos valores de CCD na estrutura. Entretanto, torna-se necessária uma análise adicional da aplicabilidade e da eficácia do método na localização de múltiplos danos em estruturas de geometria mais complexa, com presença de curvatura e/ou outras características que demandem a sua representação por meio de um modelo 3D.

Com esse propósito, foi conduzido um experimento em um painel aeronáutico de alumínio. Essa estrutura foi selecionada por apresentar curvatura e por conter longarinas de reforço (*stringers*), características que possibilitam a avaliação do método em uma configuração 3D. Além disso, a aplicação da KI nesse tipo de estrutura permite demonstrar seu potencial de utilização em cenários práticos e mais representativos de condições reais de engenharia.

5.1 Procedimento Experimental

O painel aeronáutico utilizado está ilustrado na Fig. 5.1, na qual é possível observar a curvatura da estrutura, as longarinas de reforço e a presença de uma janela aproximadamente no centro do painel.

As pastilhas piezelétricas, em um total de 12, foram estrategicamente posicionadas ao redor da janela e ao longo de determinados *stringers*, seguindo a configuração adotada por [Martins et al. \(2012\)](#), [Palomino, Steffen Jr. e Finzi Neto \(2014\)](#) e [Maruo et al. \(2015\)](#). Tal arranjo foi escolhido por proporcionar um monitoramento mais detalhado das regiões estruturalmente críticas, especialmente aquelas suscetíveis à formação e propagação de trincas.

Uma avaliação abrangente de todos os transdutores foi realizada com o objetivo de verificar o adequado funcionamento de cada dispositivo. Nessa etapa, foi constatado que um dos sensores

instalados no *stringer* superior do painel apresentou falhas operacionais. Em decorrência disso, foram efetivamente utilizados 11 transdutores, os quais estão identificados na Fig. 5.2.



Figura 5.1: Painel aeronáutico de alumínio utilizado em uma das investigações experimentais. (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva; e (c) vista frontal.

As coletas das assinaturas de impedância foram conduzidas no LMest, utilizando o analisador de impedância SySHM, desenvolvido na UFU ([FINZI NETO et al., 2011](#); [MARTINS et al., 2012](#); [PALOMINO; STEFFEN Jr.; FINZI NETO, 2014](#); [MARUO et al., 2015](#)). Para cada condição estrutural – incluindo os estados pré-dano e pós-dano – foram coletadas 40 assinaturas de impedância. As medições foram efetuadas no intervalo de 50,0 kHz a 200,0 kHz, o qual foi adotado por possibilitar uma análise em um espectro mais abrangente. As coletas foram executadas com a mesma resolução espectral adotada no experimento anterior.

Durante a aquisição das assinaturas de impedância em todas as condições estruturais, o painel aeronáutico foi mantido em uma sala climatizada, com o sistema de ar-condicionado ajustado para uma temperatura de 20 °C. Apesar da estabilidade térmica proporcionada pelo climatizador, a temperatura ambiente foi continuamente monitorada por meio de um sensor modelo AD590K, fabricado pela Analog Devices®.

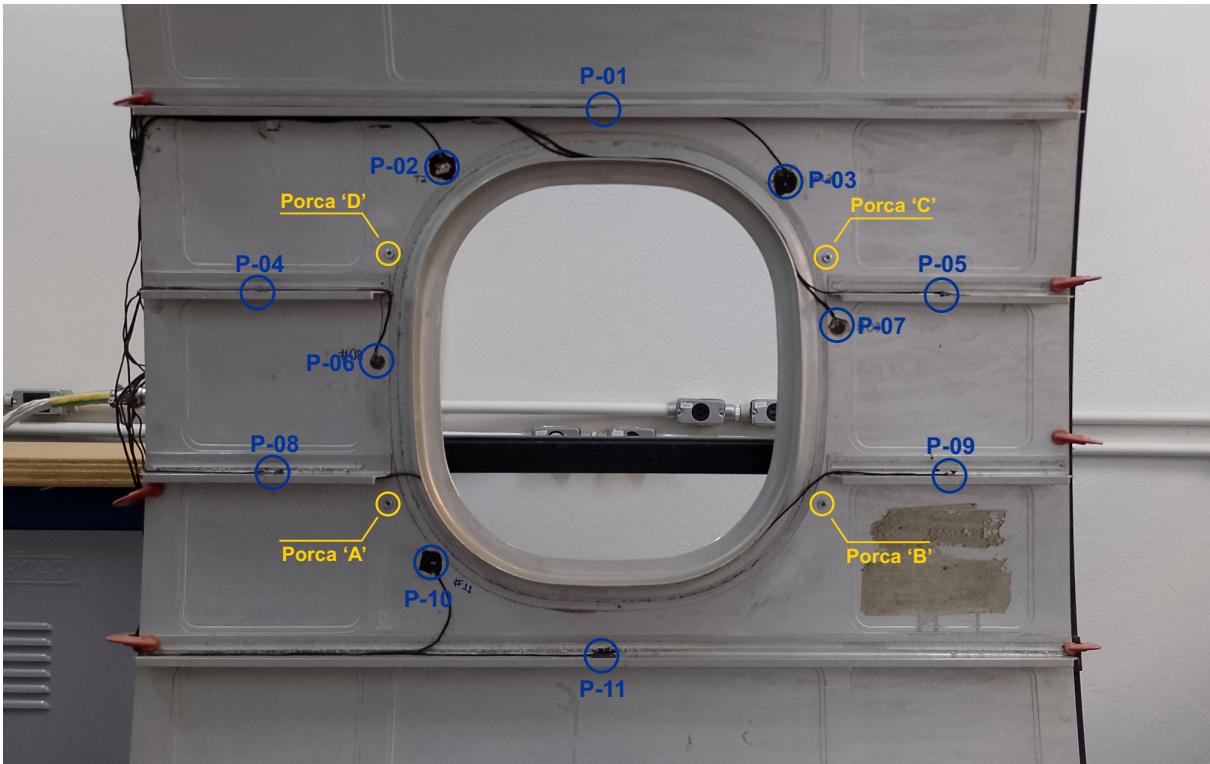


Figura 5.2: Vista frontal com detalhe da porção central do painel aeronáutico com a identificação das pastilhas piezelétricas e as posições das porcas adicionadas.

No painel aeronáutico, foram consideradas quatro condições sucessivas de dano, iniciando-se com a presença de um único dano e evoluindo até um total de quatro. Em todas as configurações, os danos foram simulados por meio da fixação de porcas sextavadas M4 de aço (DIN 934) semelhantes àquelas empregadas no experimento da placa de alumínio. Cada uma das porcas foi fixada no painel usando adesivo 793, fabricado pela Tekbond®. A adoção de porcas como representação de danos deve-se à inviabilidade de realizar intervenções que pudessem ocasionar falhas permanentes na estrutura, tais como cortes ou perfurações. Ademais, a estratégia de simulação por adição de massa tem se mostrado adequada em experimentos baseados no método IEM (CAO; QI; TANG, 2018; ANTUNES *et al.*, 2019; CAMPOS *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2021; SOMAN; SINGH; MALINOWSKI, 2023).

As porcas foram posicionadas em regiões com maior probabilidade de ocorrência de trincas em condições reais de operação, tais como as bordas da janela e as proximidades dos *stringers*. A fixação iniciou-se na borda inferior esquerda da janela, na face frontal do painel aeronáutico. As demais porcas foram instaladas sequencialmente próximas aos cantos da janela, seguindo o sentido anti-horário. A Fig. 5.2 apresenta a disposição espacial das porcas, identificadas de “A” a “D”. A adoção desse arranjo, concentrado em pontos críticos de falha e com essa quantidade

de danos simulados, permite avaliar de forma mais abrangente o potencial da KI localização de múltiplos danos em estruturas de geometria complexa.

A partir das assinaturas coletadas em cada condição estrutural, foram extraídas, assim como no experimento anterior, as assinaturas de resistência – correspondentes à parte real da impedância – por apresentarem comprovada maior sensibilidade à presença de danos estruturais e menor suscetibilidade a variações ambientais ([CHERRIER et al., 2013](#); [NA; LEE, 2013](#); [HAMZELOO; BARZEGAR; MOHSENZADEH, 2020](#); [DJEMANA; HRAIRI; YATIM, 2022](#); [MEHER; MISHRA; SUNNY, 2022](#)).

As etapas metodológicas adotadas para a obtenção dos modelos tridimensionais de probabilidade de dano do painel aeronáutico estão apresentadas na Fig. 5.3. Conforme ilustrado na Fig. 5.3, além dos procedimentos gerais empregados no estudo da placa de alumínio, tornou-se necessária a construção de um modelo 3D da estrutura a partir do escaneamento de sua superfície, seguido da reconstrução da correspondente nuvem de pontos. Por fim, foi estabelecida uma malha regular capaz de representar adequadamente a estrutura monitorada.

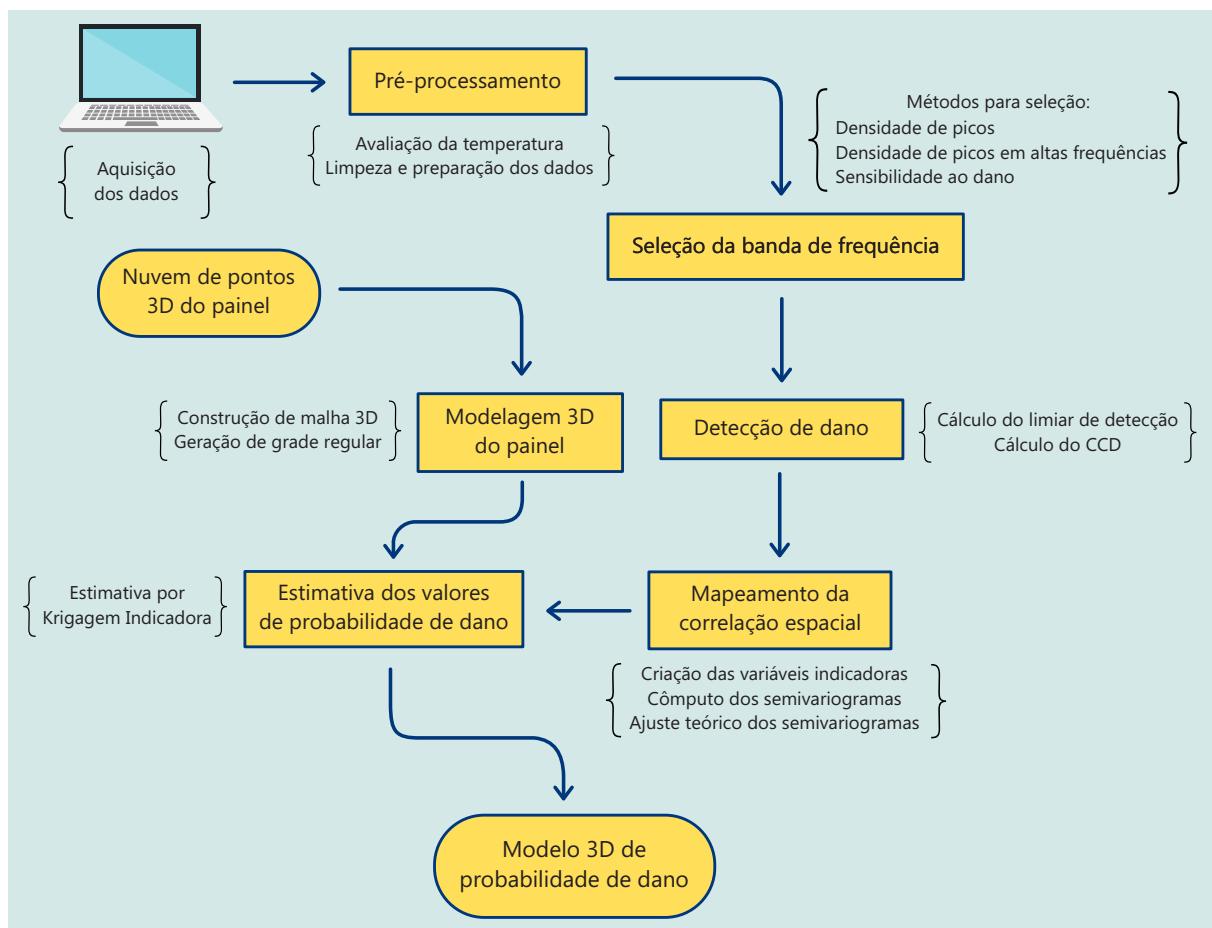


Figura 5.3: Fluxograma das etapas empregadas para a obtenção dos modelos de probabilidade de danos no contexto do painel aeronáutico.

A realização dessas etapas adicionais justificou-se pela maior complexidade geométrica da estrutura monitorada. Através desse procedimento é possível obter um modelo representativo das características geométricas do painel.

5.2 Pré-Processamento dos Dados Coletados

As assinaturas de impedância obtidas em cada condição estrutural foram inicialmente submetidas a uma etapa de pré-processamento, com o objetivo de assegurar a consistência dos dados utilizados nas análises subsequentes. Essa etapa envolveu os procedimentos descritos na Seção 3.2.1, conduzidos de forma análoga àquela empregada para o experimento com a placa de alumínio.

Apesar da coleta dos dados não ocorrer em uma câmara térmica, e sim em uma sala climatizada não foi necessária a implementação de uma etapa preliminar de compensação para os efeitos de temperatura, uma vez que a análise da variação da temperatura nos dados coletados (Fig. 5.4) demonstrou que 67,7 % das assinaturas foram coletadas no intervalo de 20,0 °C a 21,0 °C.

Consequentemente, uma vez não ter sido observada variação significativa da temperatura, não se fez necessária a aplicação de procedimentos de compensação para efeitos de temperatura aos dados obtidos do painel aeronáutico. Dessa forma, o pré-processamento das assinaturas adquiridas para o painel seguiu as mesmas etapas e procedimentos previamente adotados para a placa de alumínio

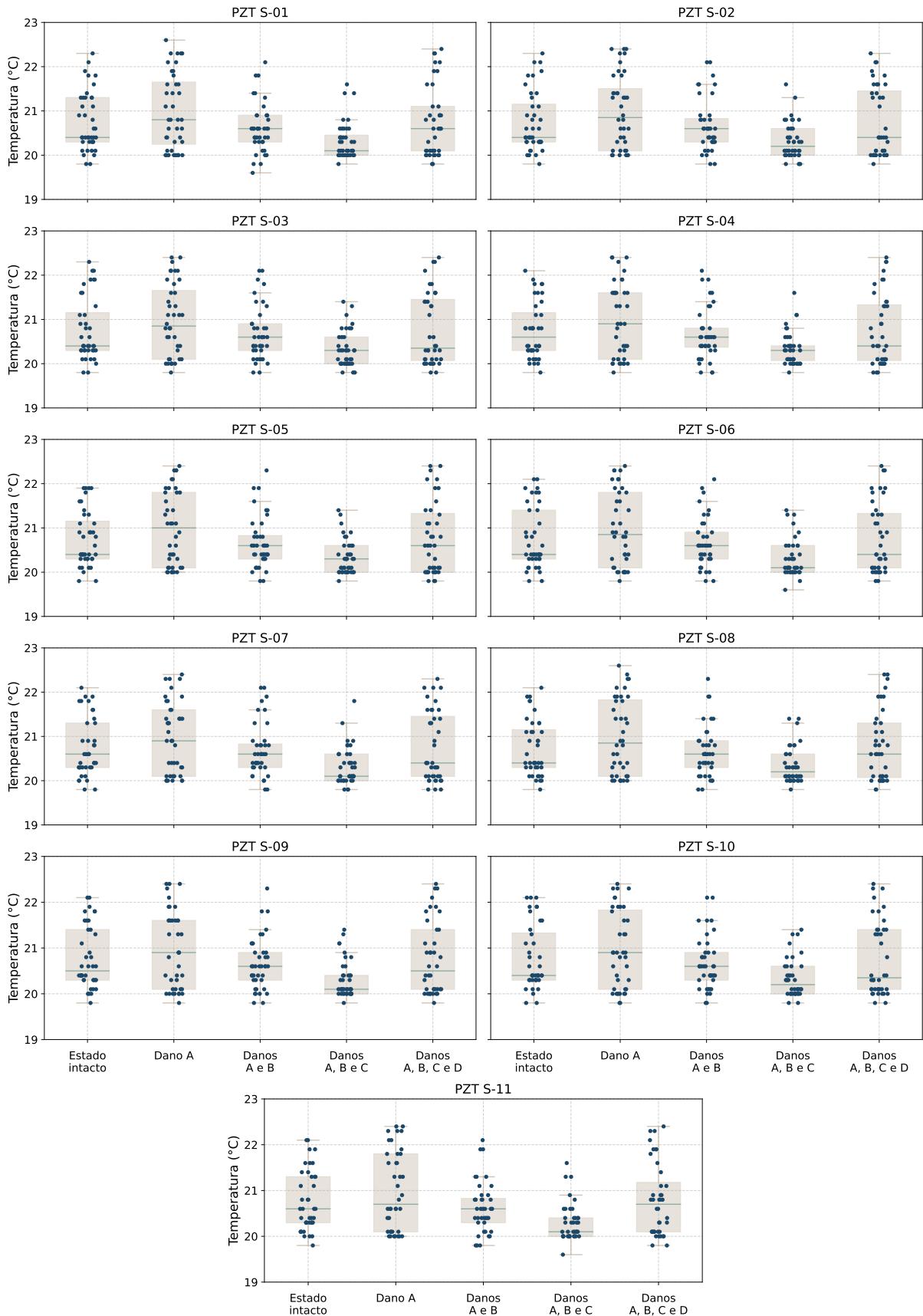


Figura 5.4: Distribuição estatística das temperaturas registradas para cada transdutor nos ensaios conduzidos no painel aeronáutico.

5.3 Seleção do intervalo de frequência

A etapa de seleção dos intervalos de frequência, considerando as três abordagens adotadas, foi realizada de forma análoga àquela implementada no experimento com a placa de alumínio. Procedimentos e ferramentas equivalentes foram empregados em cada metodologia. Nesse sentido, nas seções seguintes são apresentados os resultados obtidos em cada abordagem.

5.3.1 Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos

A implementação da abordagem da densidade de picos resultou na seleção dos intervalos de frequência evidenciados na Fig. B.1 do Apêndice B. As assinaturas de resistência desses intervalos, em todas as condições de dano investigadas no painel aeronáutico, estão ilustradas na Fig. B.2, também constante no Apêndice B.

Uma análise abrangente de todos os intervalos selecionados (Fig. 5.5) evidencia a provável ocorrência de dois grupos principais: um compreendendo a faixa de 50 kHz a 80 kHz, correspondendo a 36,4 % das pastilhas piezelétricas; e outro representando o intervalo de 120 kHz a 160 kHz, o que corresponde a 45,4 % dos sensores. Os demais sensores apresentaram intervalos significativamente discrepantes em relação aos demais, conforme demonstrado na Fig. 5.5.

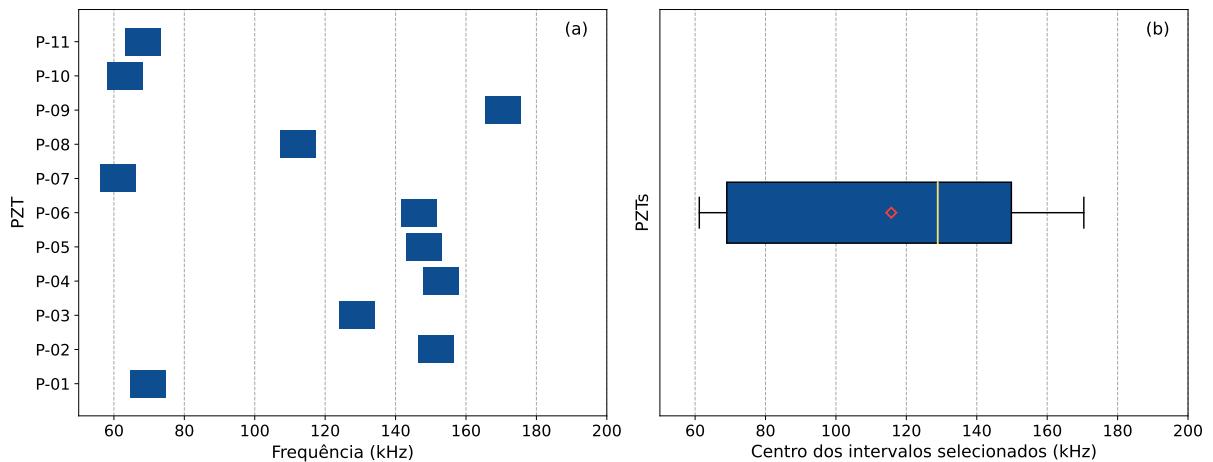


Figura 5.5: (a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica, referentes ao experimento do painel aeronáutico; (b) *boxplot* da frequência central desses intervalos.

A análise da frequência central dos intervalos selecionados (Fig. 5.5b) indica uma ampla variação dos intervalos de frequência, com um desvio padrão de 42,4 kHz, correspondente a 28,3 % da largura de banda investigada, e uma amplitude de 109,2 kHz. Ademais, o *boxplot*

obtido (Fig. 5.5b) aponta para uma distribuição com uma assimetria à esquerda (negativa), com uma prevalência de intervalos de frequência mais altos.

5.3.2 Seleção dos intervalos baseada na densidade de picos em altas frequências

A inclusão de um ponderador proporcional à frequência, de acordo com a metodologia descrita na seção 3.2.2.2, permitiu a seleção de intervalos de frequência mais elevados, conforme demonstrado na Fig. B.3, constante no Apêndice B. As assinaturas de resistência em todas as condições de dano estão detalhadas na Fig. B.4.

Com base nos intervalos selecionados a partir da abordagem centrada na quantidade de picos com ênfase em altas frequências (Fig. 5.6), observa-se uma predominância de intervalos na porção superior da banda analisada. Neste caso, 45,4 % dos intervalos ficaram na faixa compreendida entre 140 kHz e 160 kHz, enquanto apenas 9,1 % foi predominantemente inferior a 100 kHz. Esse resultado está alinhado com o esperado, considerando o ponderamento proporcional à frequência.

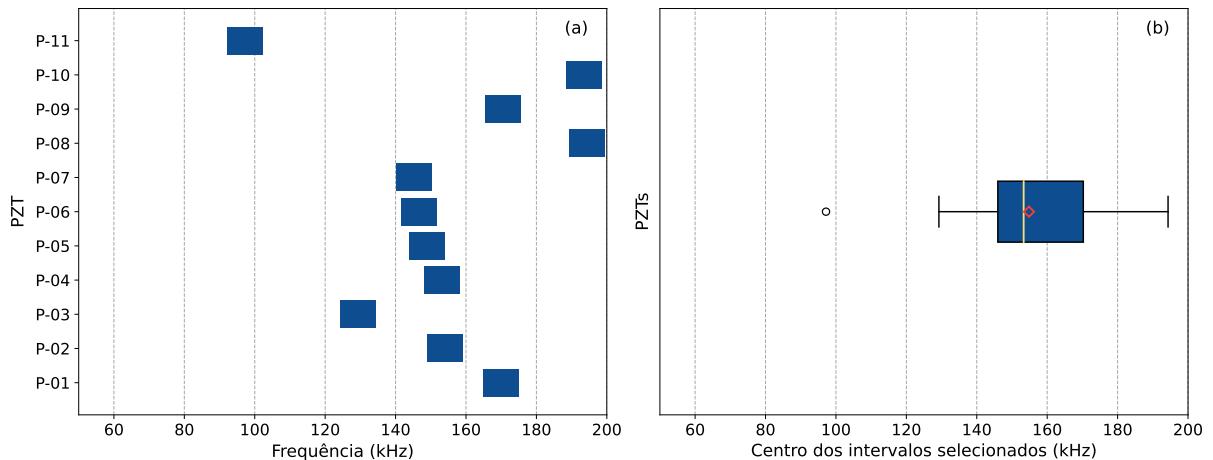


Figura 5.6: (a) Intervalo de 10 kHz com a maior densidade de picos identificados em frequências elevadas – ponderação proporcional à frequência – na assinatura de resistência da condição intacta de cada pastilha piezelétrica, referente ao experimento do painel aeronáutico; (b) *boxplot* da frequência central desses intervalos.

A análise estatística dos centros dos intervalos selecionados (Fig. 5.6b) indica uma dispersão mais concentrada em torno da média, com um desvio padrão de 27,8 kHz. Este valor apresenta uma redução de 34,4% em relação ao desvio padrão de 42,4 kHz observado no caso anterior. Ademais, conforme observado na Fig. 5.6b, a distribuição estatística apresenta uma leve assimetria à direita, com frequências centrais predominantemente em torno de 150 kHz. Por fim, por meio do *boxplot* da Fig. 5.6b, é possível identificar um valor atípico, atribuído ao sensor

P-11, cuja frequência central foi de 97,2 kHz.

5.3.3 Seleção dos intervalos baseada na sensibilidade ao dano

Em relação à abordagem baseada na sensibilidade ao dano, o mapeamento dos valores de CCD em todas as combinações viáveis de intervalos de frequência, resultou nos mapas de contorno apresentados nas Figs. [B.5](#) (Dano A), [B.7](#) (Danos A e B), [B.9](#) (Danos A, B e C), e [B.11](#) (Danos A, B, C e D), nas quais está indicado o valor máximo de CCD obtido para cada pastilha piezelétrica, e em cada condição estrutural. As assinaturas de resistência atribuídas a esses intervalos estão descritas nas Figs. [B.6](#), [B.8](#), [B.10](#), e [B.12](#), respectivamente.

Uma análise ampla dos intervalos selecionados por meio da abordagem baseada na sensibilidade ao dano (Fig. [5.7](#)) aponta para uma aparente ausência de padrão que correlacione a magnitude da frequência e a distância das pastilhas piezelétricas aos danos. Conforme demonstrado na Fig. [5.7](#), os intervalos selecionados apresentam ter uma disposição aleatória, principalmente aqueles referentes à condição com quatro porcas, na qual uma parcela significativa das pastilhas estava localizada próxima das porcas adicionadas.

No entanto, observa-se que as larguras dos intervalos com maior sensibilidade ao dano conservaram-se em torno de 10 kHz em todas as condições de dano. Nesse contexto, as larguras médias das bandas selecionadas foram de 10,3 kHz, 11,0 kHz, 10,1 kHz e 10,3 kHz para as condições com uma, duas, três e quatro porcas, respectivamente. A maior largura observada foi de 15,5 kHz, atribuída ao sensor P-01 na condição com duas porcas.

O mapeamento das distribuições estatísticas dos intervalos centrais (Fig. [5.8a](#)) indica uma tendência de redução média de 3,8 % da mediana das frequências centrais da condição com um dano à condição com três danos. Já o cenário com quatro danos apresentou um aumento da mediana de 2,8 % em comparação à condição anterior. Ademais, um comportamento geral semelhante também foi observado para a média.

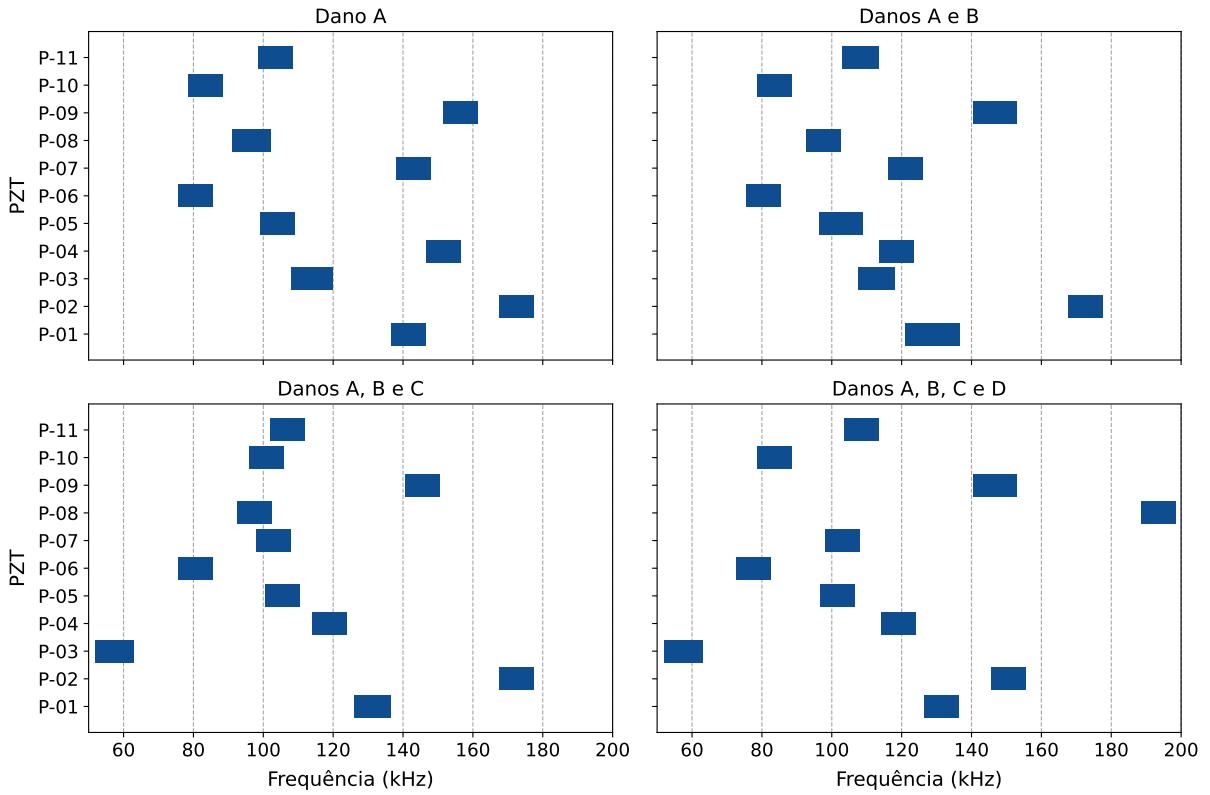


Figura 5.7: Intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano em cada condição estrutural investigada no painel aeronáutico.

Além disso, os formatos das distribuições estatísticas apontam para distribuições com assimetria à direita (positiva), com prevalência de frequências centrais mais baixas, conforme demonstrado na Fig. 5.8a.

Em relação à dispersão das frequências centrais, foi observada uma redução de 15,0 % no desvio padrão da condição com dois danos em relação à configuração com um dano. Já o cenário com três danos apresentou um desvio padrão das frequências centrais 15,4 % superior à condição anterior, o que pode ser explicado pela presença de valores atípicos observados na Fig. 5.8a. Por fim, no cenário com quatro porcas houve um aumento de 23,9 % no desvio padrão das frequências centrais em relação ao intervalo com três porcas.

A análise da amplitude dos intervalos (Fig. 5.8b) evidencia que grande parte dos intervalos selecionados possuíram uma largura de banda em torno de 10 kHz. No máximo três valores atípicos (*outliers*) foram observados em cada cenário. Ademais, apenas a condição com dois danos apresentou uma distância interquartílica visível, demonstrando, portanto, a ocorrência de larguras de banda superiores a 10 kHz com maior frequência.

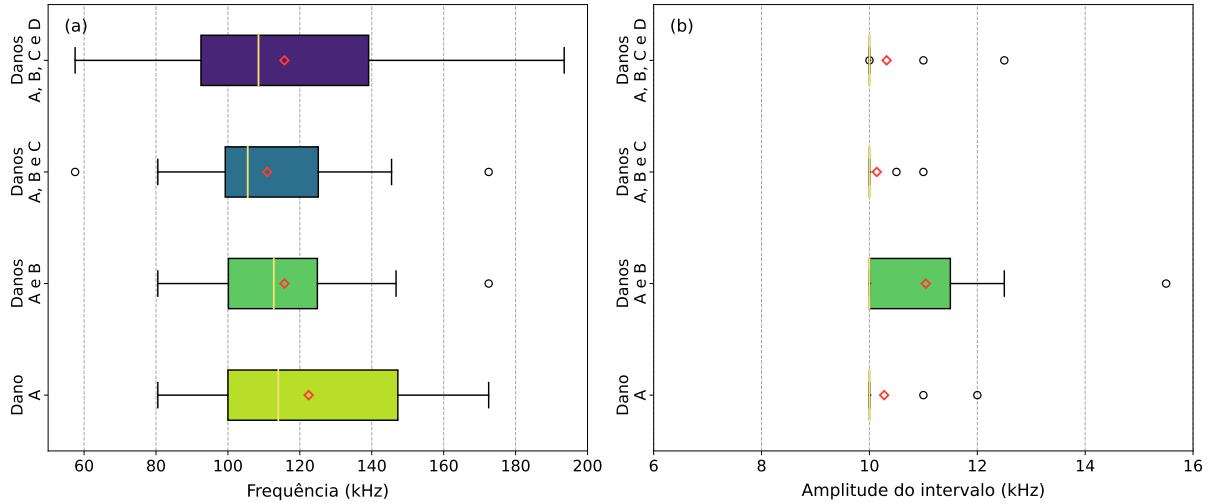


Figura 5.8: (a) *Boxplots* dos centros dos intervalos de frequência das assinaturas de resistência com a máxima sensibilidade ao dano nas condições estruturais investigadas no painel aeronáutico, e (b) *boxplots* das amplitudes desses intervalos de frequência.

De acordo com os resultados obtidos, não foi identificado, portanto, um padrão claramente estabelecido dos intervalos com a máxima sensibilidade ao dano em função do aumento da complexidade do sistema ocasionada pela presença de danos adicionais.

5.4 Detecção dos danos

Esta etapa consistiu na determinação dos limiares de detecção para cada pastilha piezelétrica, considerando as abordagens avaliadas para seleção dos intervalos de frequência, os quais foram comparados os valores de CCD calculados para cada estado com dano em relação à condição intacta.

Neste processo, foi adotada a mesma metodologia utilizada para a detecção de danos no experimento anterior. Entretanto, o procedimento atual distinguiu-se pela geração de 4.000 valores de média e desvio padrão no método *bootstrap*, empregado em situações de não-normalidade da distribuição dos valores de CCD no estado intacto. Tal incremento visou fornecer maior robustez e confiabilidade na estimativa dos limiares de detecção, considerando as condições específicas do experimento atual. Nas seções seguintes, são apresentados os resultados obtidos nesta etapa para o painel aeronáutico, em cada abordagem para seleção das bandas de frequência.

5.4.1 Abordagem baseada na densidade de picos

Os resultados obtidos das métricas de dano (CCD) calculadas a partir dos intervalos selecionados por meio da abordagem de densidade de picos (Fig. 5.9) indicam que a condição com um único dano, apenas o sensor P-09 exibiu um valor de CCD superior ao limiar de detecção correspondente. Esta pastilha piezelétrica estava localizada a 546,7 mm da porca “A”. Já os sensores P-08 e P-10, situados na vizinhança imediata da porca “A” (Fig. 5.10a), com distâncias de 114,4 mm e 73,1 mm, respectivamente, apresentaram valores de CCD inferiores aos respectivos limiares de detecção. Portanto, nesta condição, a porca “A” não foi detectada pelos sensores em suas proximidades.

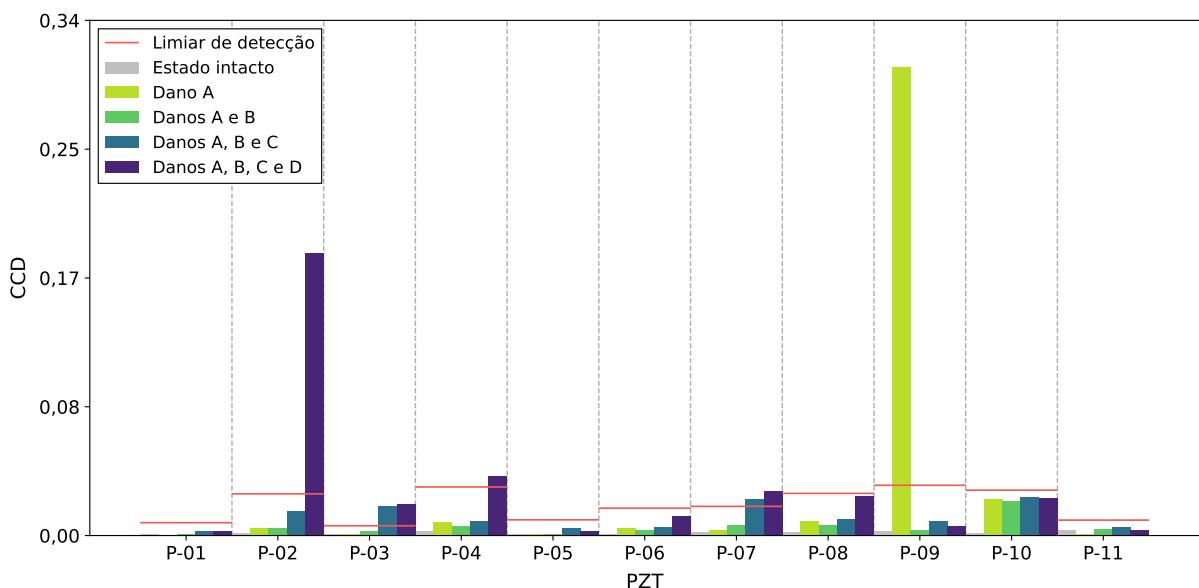


Figura 5.9: Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos, referentes ao experimento do painel aeronáutico.

Na condição com duas porcas, conforme demonstrado na Fig. 5.9, todas as pastilhas piezelétricas apresentaram valores de CCD inferiores aos limiares de detecção correspondentes. Nesta condição, a porca “B” foi posicionada mais próxima ao sensor P-09 (Fig. 5.10b). Entretanto, o CCD exibido por essa pastilha piezelétrica foi inferior ao limiar de detecção correspondente. Consequentemente, nessa condição de dano não foi possível detectar a presença de nenhuma porca na estrutura.

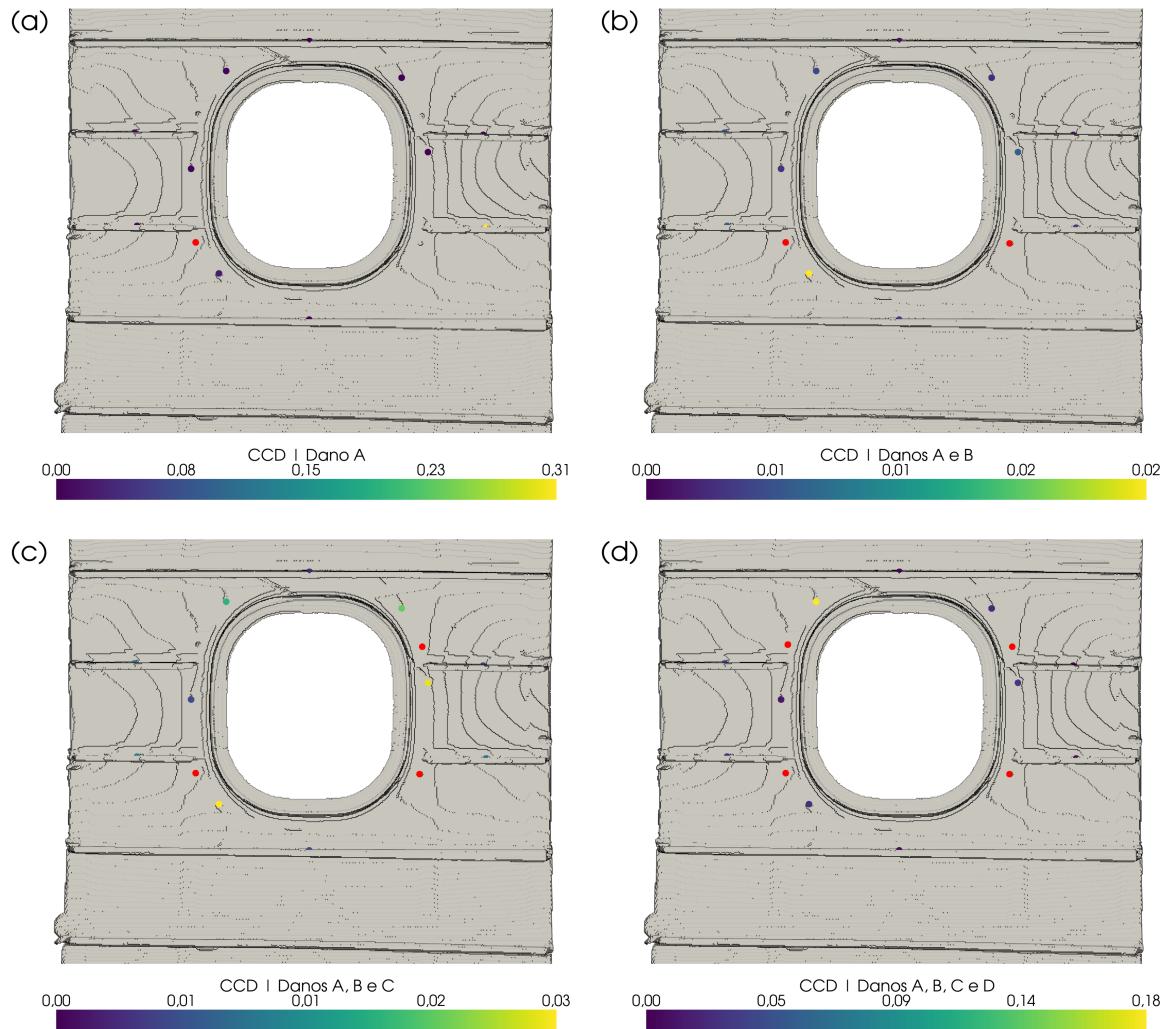


Figura 5.10: Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na densidade de picos.

Com a adição da porca “C”, posicionada a aproximadamente 82,0 mm do sensor P-03 e 68,8 mm do sensor P-07, (Fig. 5.10c) foi possível detectar dessa perturbação local no sistema por esses sensores, conforme demonstrado na Fig. 5.9. Por meio da Fig. 5.9, é também possível constatar que as demais pastilhas piezelétricas não detectaram a presença das outras porcas anteriormente fixadas no painel.

Já na condição com quatro danos, sensores localizados nas proximidades das porcas “C” (sensores P-03 e P-07) e “D” (sensores P-02 e P-04), os quais estão mostrados na Fig. 5.10d, apresentaram valores de CCD superiores aos respectivos limiares de detecção, conforme demonstrado na Fig. 5.9. Entretanto, embora o sensor P-06 estivesse localizado mais próximo da porca “D” (104,1 mm) em comparação com o sensor P-04 (124,0 mm), o mesmo não foi

capaz de detectar a presença dessa porca. Ademais, nessa condição de dano, as demais pastilhas piezelétricas não detectaram a presença das demais porcas.

5.4.2 Abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências

Os valores de CCD obtidos para a partir dos intervalos selecionados pela abordagem baseada da densidade de picos em frequências elevadas (Fig. 5.11) apresentaram um comportamento similar ao observado nos resultados da abordagem anterior.

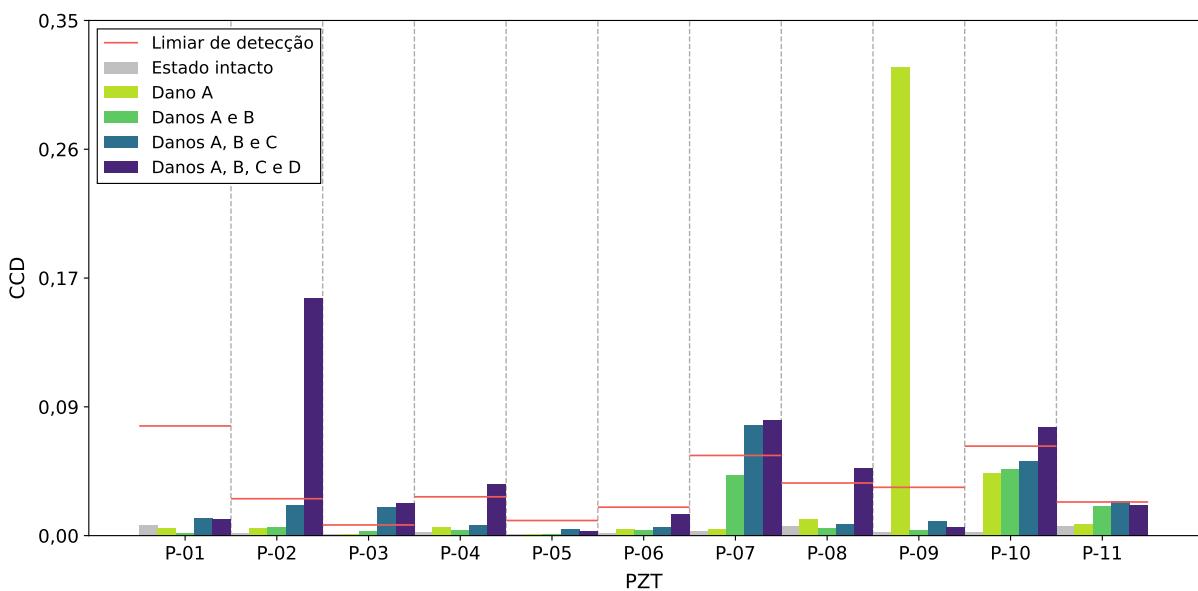


Figura 5.11: Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na quantidade de picos com ênfase em altas frequências, referentes ao experimento do painel aeronáutico.

Dentre as pastilhas piezelétricas, apenas o sensor P-09, posicionado a aproximadamente 546,7 mm da porca “A” (Fig. 5.12a) apresentou uma métrica de dano superior ao limiar de detecção correspondente. Em contraposição, as pastilhas piezelétricas situadas mais próximas da porca “A” (*i.e.*, sensores P-08 e P-10) não foram capazes de detectar a porca em suas proximidades.

Na condição com dois danos, assim como na abordagem anterior, nenhuma das pastilhas piezelétricas exibiram um valor de CCD superior aos respectivos limiares de corte. Portanto, nesta configuração os valores de CCD obtidos não permitiram a detecção das porcas fixadas na estrutura. Embora os maiores valores de CCD estivessem sido atribuídos principalmente aos sensores mais próximos das porcas, conforme demonstrado na Fig. 5.12b, as métricas de dano

obtidas não possibilitaram a detecção das mesmas.

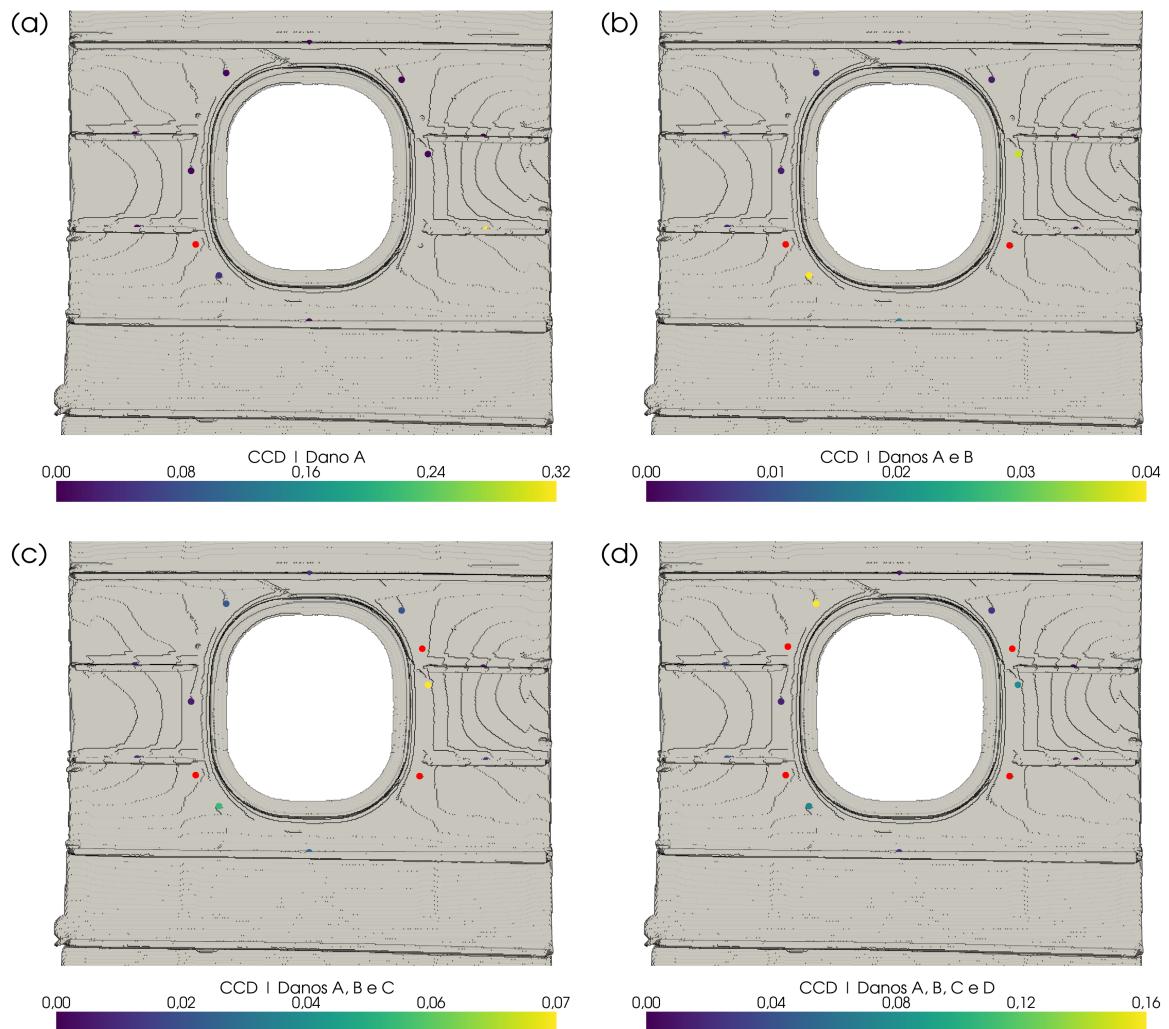


Figura 5.12: Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências.

Já na condição com três danos, de acordo com o demonstrado na Fig. 5.11, três pastilhas piezelétricas exibiram valores de CCD superiores aos respectivos limiares de corte: sensores P-03, P-07 e P-11. Os dois primeiros estavam localizados nas proximidades da porca “C” (Fig. 5.12c), a distâncias de 82,0 mm e 68,8 mm, respectivamente. Nesse sentido, foram capazes de detectar as mudanças estruturais locais decorrentes da fixação da porca “C”.

Já o sensor P-11, embora tenha apresentado uma métrica de dano superior ao limiar de detecção correspondente, é caracterizado por estar mais distante das porcas em comparação com outros sensores (*e.g.*, sensores P-08, P-09 e P-10), os quais exibiram métricas de dano

inferiores aos seus limiares de detecção.

Estes desvios observados podem eventualmente introduzir vieses de localização nos modelos preditivos, resultando em regiões de falsos positivos – neste caso, devido ao sensor P-11 – e regiões de falsos negativos, devido à ausência de pastilhas piezelétricas com valores de CCD superiores aos seus limiares de detecção nas vizinhanças das porcas “B” e “C”, conforme demonstrado pela Fig. 5.11 e 5.12c.

Na condição com quatro danos, pastilhas piezelétricas próximas às porcas “A” (sensores P-08 e P-10), “C” (sensores P-03 e P-07) e “D” (sensores P-02 e P-04) apresentaram métricas de dano superiores aos limiares de detecção correspondentes, conforme demonstrado na Fig. 5.11. Dessa maneira, essas pastilhas piezelétricas foram capazes de detectar adequadamente as alterações estruturais locais decorrentes da fixação dessas três porcas no painel aeronáutico.

Entretanto, o sensor P-09, localizado na proximidade da porca “B” (Fig. 5.12d) – a 128,3 mm dessa porca – apresentou um valor de CCD inferior ao limiar de detecção correspondente, conforme mostrado na Fig. 5.11. Dessa maneira, a pastilha em questão não conseguiu detectar a presença da porca “B” em sua proximidade. Esse comportamento, consequentemente, pode introduzir erros no modelo de previsão, na medida em que produz um falso negativo, advindo da falha do sensor P-09 na detecção da referida porca.

5.4.3 Abordagem baseada na sensibilidade ao dano

Em relação aos resultados dos valores de CCD obtidos dos intervalos selecionados por meio da abordagem baseada na sensibilidade ao dano (Fig. 5.13), é possível observar a detecção bem-sucedida da porca “A” pelos sensores P-06 e P-10, os quais estavam situados relativamente próximos da porca “A”, conforme demonstrado na Fig. 5.14a.

Entretanto, o sensor P-08, situado a uma distância menor da porca “A” em comparação com o sensor P-06, exibiu um valor de CCD inferior ao seu limiar de detecção. Consequentemente, houve uma falha do sensor em detectar a porca “A”, que se encontrava em sua proximidade.

Ademais, nessa condição, assim como observado nas demais abordagens, o sensor P-09 apresentou um valor de CCD que excedeu seu respectivo limite de detecção, embora estivesse situado mais distante da porca “A”, em comparação com os demais sensores que identificaram a presença dessa porca.

Esse comportamento, por conseguinte, pode ocasionar o aparecimento de uma zona de falso positivo no modelo preditivo, uma vez que a técnica de KI se baseia nas informações amostrais

para a interpolação dos valores nos locais não amostrados.

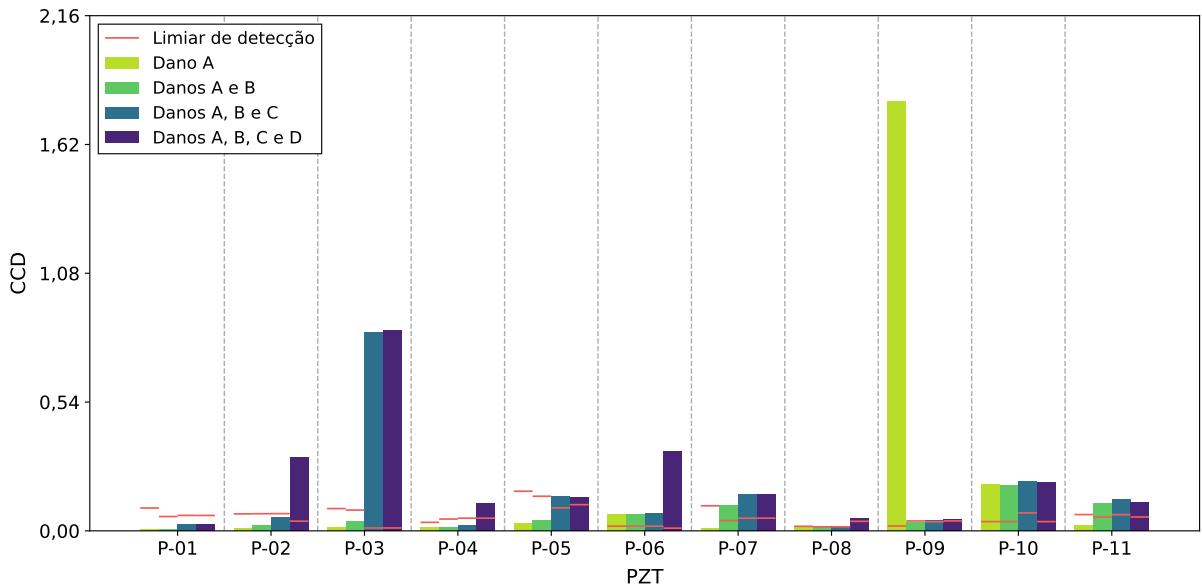


Figura 5.13: Gráfico de barras dos valores de CCD para cada condição estrutural (um, dois, três e quatro danos) obtidos dos intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano, referentes ao experimento do painel aeronáutico.

Na condição com dois danos, diferentemente no obtido nas abordagens anteriores, cinco pastilhas piezelétricas apresentaram valores de CCD que excederam os respectivos limiares de detecção (Fig. 5.13): sensores P-06, P-07, P-08, P-10 e P-11. Desses, os sensores P-06, P-08, P-10 e P-11 estavam localizados mais próximos da porca “A” (Fig. 5.14b), com uma distância máxima de aproximadamente 258,8 mm, atribuída ao sensor P-11. Já o sensor P-07 estava a uma distância aproximada de 172,7 mm da porca “B”.

Entretanto, o sensor P-09, situado a aproximadamente 128,3 mm da porca “B” apresentou um valor de CCD inferior ao seu respectivo limiar de detecção. Dessa maneira, embora a pastilha piezelétrica em questão fosse a mais próxima da porca “B”, não foi capaz de detectar sua presença. Tal falha, consequentemente, pode ser resultar em desvios no modelo quanto à localização da porca, dada a incapacidade desse sensor em detectar esse dano.

Na configuração com três danos, conforme demonstrado na Fig. 5.13, apenas os sensores P-01, P-02 e P-04 apresentaram valores de CCD inferiores aos respectivos limiares de detecção. As pastilhas piezelétricas em questão encontravam-se posicionadas em uma área próxima à borda superior esquerda da janela do painel aeronáutico (Fig. 5.14c), distantes das porcas adicionadas. Nesse sentido, os valores de CCD exibidos pelas pastilhas piezelétricas comparativamente mais próximas às porcas adicionadas, permitiram detectá-las, fornecendo subsídios para a obtenção

de uma estimativa mais robusta de suas localizações.

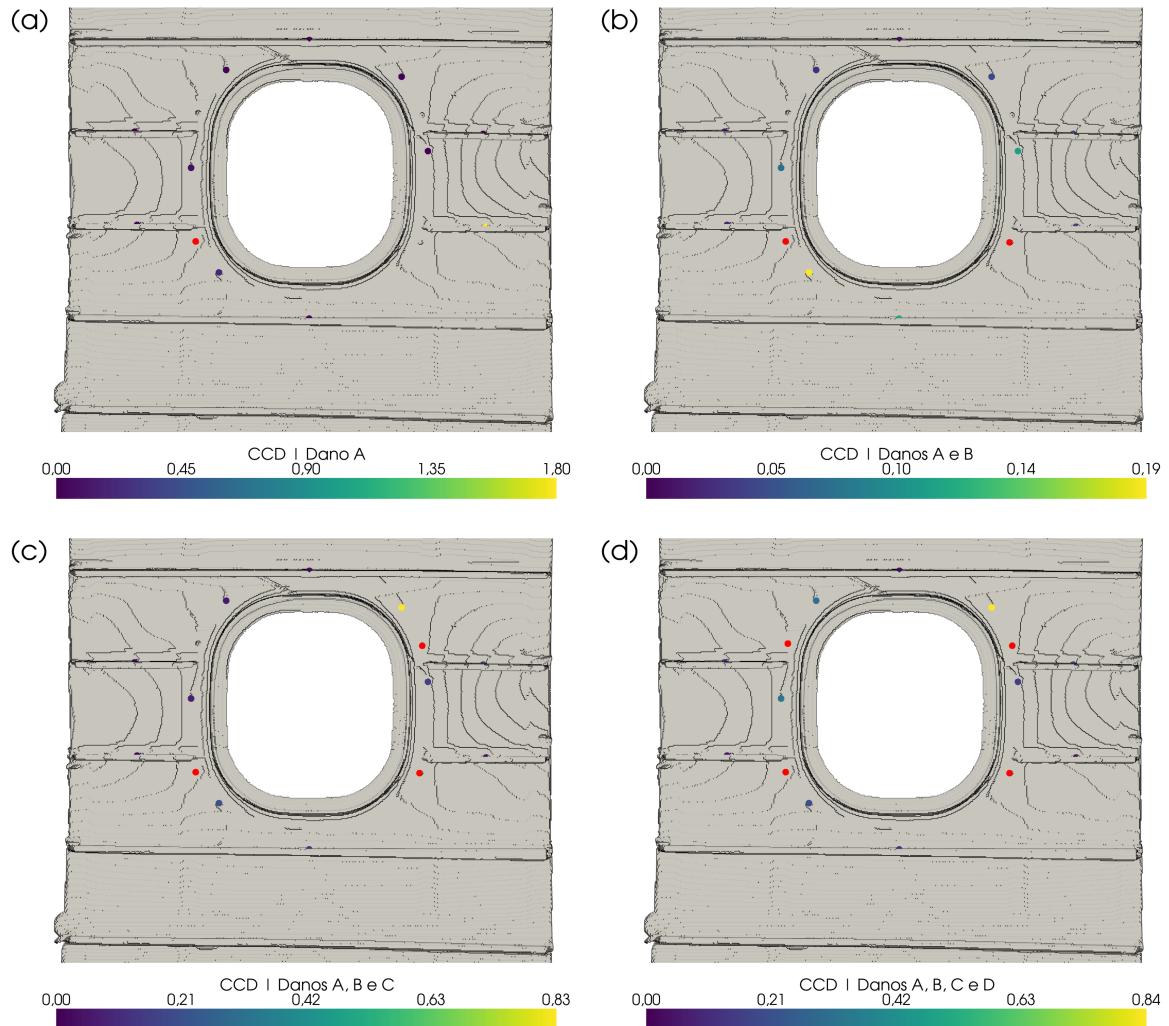


Figura 5.14: Representação do painel aeronáutico mostrando os valores de CCD obtidos em cada condição estrutural: (a) um; (b) dois; (c) três; e (d) quatro danos. Os valores de CCD correspondem àqueles derivados da abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

Já na configuração com quatro danos, apenas o sensor P-01 apresentou um valor de CCD inferior ao seu respectivo limiar de detecção (Fig. 5.13). Conforme demonstrado na Fig. 5.14d, esse sensor estava relativamente distante das porcas adicionadas, o que corresponde, portanto, a um resultado esperado. Dessa maneira, todas as quatro porcas adicionadas puderam ser detectadas pelas demais pastilhas piezelétricas vizinhas. Contudo, uma exceção é aplicada ao sensor P-11, que, embora estivesse relativamente distante dos danos, apresentou um valor de CCD que excedeu o seu respectivo limiar de detecção.

5.5 Localização dos Danos por KI

Conforme os resultados obtidos na etapa anterior, verificou-se que algumas pastilhas piezelétricas foram capazes de detectar os danos presentes no painel, enquanto outras não apresentaram resposta significativa. Assim, duas classes distintas puderam ser definidas: uma associada à ausência de dano e outra à sua presença. Nas seções subsequentes, são descritos os procedimentos adotados para a elaboração dos modelos preditivos por KI.

5.5.1 Procedimentos para Preparação dos Dados

Esta etapa envolveu os mesmos procedimentos empregados no experimento conduzido na placa de alumínio. Entretanto, a abordagem adotada para a definição das variáveis indicadoras apresentou distinções relevantes. Enquanto, no caso da placa de alumínio, essas variáveis foram obtidas a partir de limiares de corte (Eq. 3.1), no presente estudo foi empregada a abordagem baseada em categorias (Eq. 3.2). A adoção desta última decorre da identificação de duas classes na etapa anterior: uma associada à ausência de dano e outra à sua presença.

Nesse contexto, foi definida uma variável categórica para representar as duas classes identificadas, considerando a posição dos valores de CCD em relação aos respectivos limiares de detecção. Essa variável foi codificada como “1” para as observações associadas a transdutores piezelétricos cujos valores de CCD foram iguais ou inferiores aos limiares correspondentes. Por outro lado, atribuiu-se o valor “2” às observações cujos valores de CCD excederam os respectivos limiares de detecção.

A partir dessa codificação, foram derivadas duas variáveis indicadoras, conforme a Eq. 3.2, cada uma associada a uma classe distinta. As variáveis indicadoras obtidas foram, então, empregadas para o mapeamento da continuidade espacial de cada categoria, por meio da modelagem dos semivariogramas.

5.5.2 Análise Estrutural por meio de Semivariogramas

Os semivariogramas experimentais foram obtidos nesta etapa com base nos mesmos princípios e parâmetros empregados no experimento da placa de alumínio, realizando-se os ajustes necessários no passo inicial (*lag*), definido como a média do espaçamento entre os transdutores. Tal ajuste mostrou-se necessário em razão das diferenças geométricas entre as malhas de sensores. Ademais, o arranjo dos transdutores no painel aeronáutico apresenta configuração irregular,

em contraste com a malha regular adotada no experimento conduzido na placa de alumínio.

Diferentemente do executado na placa de alumínio, a análise da continuidade espacial das variáveis indicadoras para o experimento do painel aeronáutico foi conduzida no *Stanford Geostatistical Modeling Software* (SGeMS). A opção pelo uso do SGeMS para o cálculo e a modelagem teórica dos semivariogramas indicadores neste experimento decorre da existência de ferramentas avançadas neste *software* para a visualização, análise e modelagem de dados tridimensionais (REMY, 2005; REMY; BOUCHER; WU, 2009).

Desenvolvido em ANSI C++, o SGeMS foi projetado para operar em diversas plataformas e sistemas operacionais, sendo dependente exclusivamente de bibliotecas amplamente disponíveis. Além disso, o SGeMS oferece flexibilidade para a integração de bibliotecas adicionais, o que amplia suas capacidades e facilita a adaptação a diferentes necessidades analíticas (REMY, 2005; REMY; BOUCHER; WU, 2009).

Em virtude da existência de apenas duas classes, os semivariogramas foram calculados para uma única delas. Nesses casos, como as classes são complementares em termos de codificação binária, ambas compartilham a mesma estrutura de continuidade espacial, sendo, portanto, suficiente o cálculo e o ajuste dos semivariogramas de apenas uma das variáveis indicadoras.

Os semivariogramas experimentais obtidos a partir dos intervalos selecionados pela abordagem baseada na densidade de picos (Fig. 5.15) demonstram uma ausência de continuidade espacial nas seguintes condições de dano: uma, duas e quatro porcas. Esse fato é corroborado pela ausência de uma tendência geral de aumento do semivariograma à medida que a distância entre os pares de pastilhas piezelétricas aumenta, como pode ser observado nos semivariogramas experimentais da Fig. 5.15.

Em contraposição, o semivariograma experimental referente à condição com três porcas (Fig. 5.15) demonstrou uma tendência geral de crescimento, estabilizando-se na variância global (*a priori*) da variável indicadora. Isso permitiu a execução do ajuste por meio de uma função teórica, neste caso, o modelo esférico, cujos parâmetros foram os seguintes: Efeito Pepita de 0,01; contribuição de 0,1536; e alcance de 380 mm.

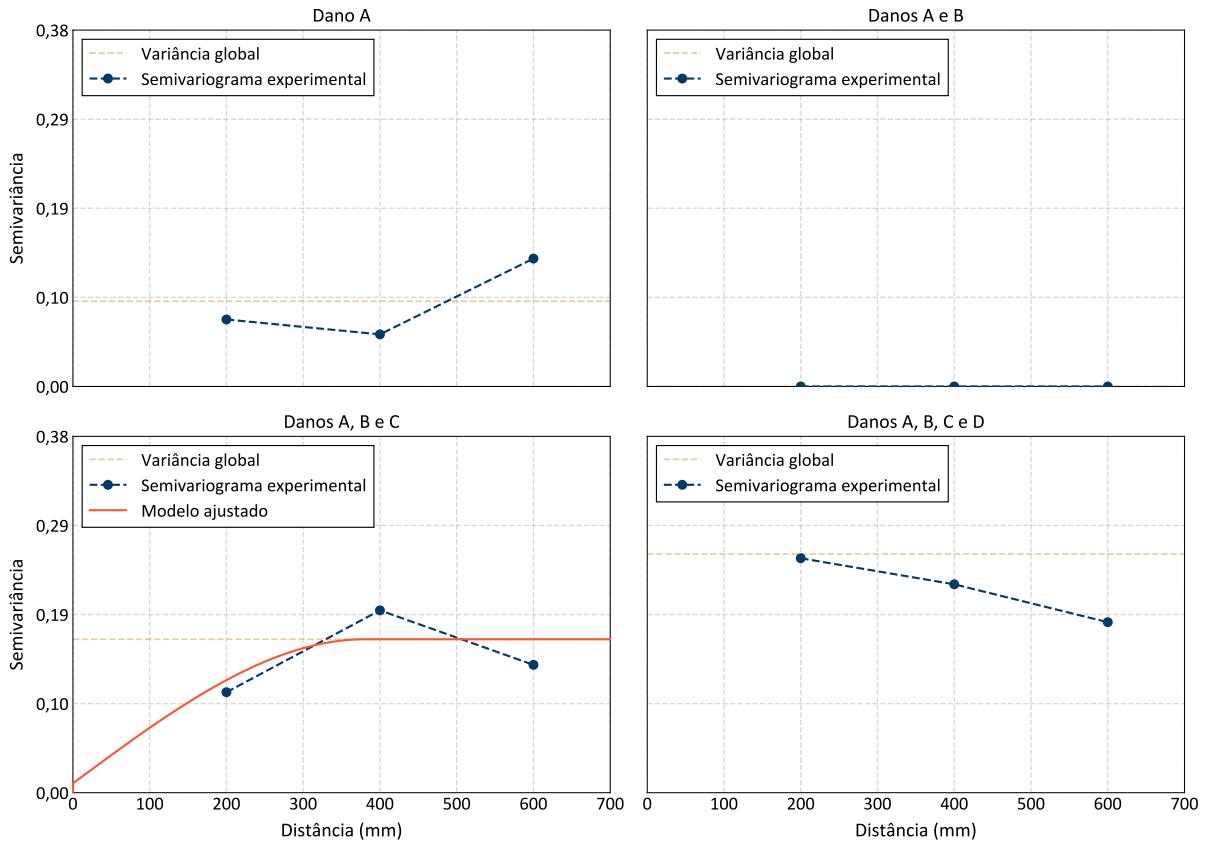


Figura 5.15: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos.

A análise dos semivariogramas demonstrou, conforme ilustrado na Fig. 5.15, um aumento da semivariância – ou semivariograma – à medida que novas porcas foram fixadas na estrutura. Tal aumento foi mais pronunciado a partir da adição da terceira porca. Esse comportamento corresponde a um aumento geral da variância da variável indicadora correspondente, à medida que novas pastilhas piezelétricas detectaram a presença de porcas adicionais.

Ademais, conforme demonstrado na Fig. 5.15, os semivariogramas experimentais consistiram em três pontos, cada um referente a uma classe de distância entre pastilhas piezelétricas. A ocorrência de apenas três pontos nos semivariogramas experimentais é consequência do efeito combinado dos seguintes fatores: baixa densidade da malha de sensores utilizada; e o emprego de uma malha irregular, o que dificulta a formação de pares de pastilhas piezelétricas para o estabelecimento dos semivariogramas experimentais.

Em relação à abordagem baseada na densidade de picos com ênfase em altas frequências, os semivariogramas das variáveis indicadoras (Fig. 5.16) apresentaram um comportamento similar ao obtido na abordagem anterior. Neste caso, o semivariograma experimental associado

à condição com três danos foi o único a apresentar comportamento que evidenciou perda de continuidade espacial em função do aumento da distância entre pares de pastilhas piezelétricas. Os demais evidenciaram uma ausência de continuidade espacial da variável indicadora correspondente.

Conforme demonstrado na Fig. 5.16, foi também identificado um aumento da variância global (*a priori*) das variáveis indicadoras em virtude do aumento da quantidade de porcas na estrutura, de forma similar ao identificado na abordagem anterior. Ademais, assim como no caso anterior, os semivariogramas experimentais consistiram em três pontos, correspondentes aos pares de amostras obtidos nas respectivas classes de distâncias.

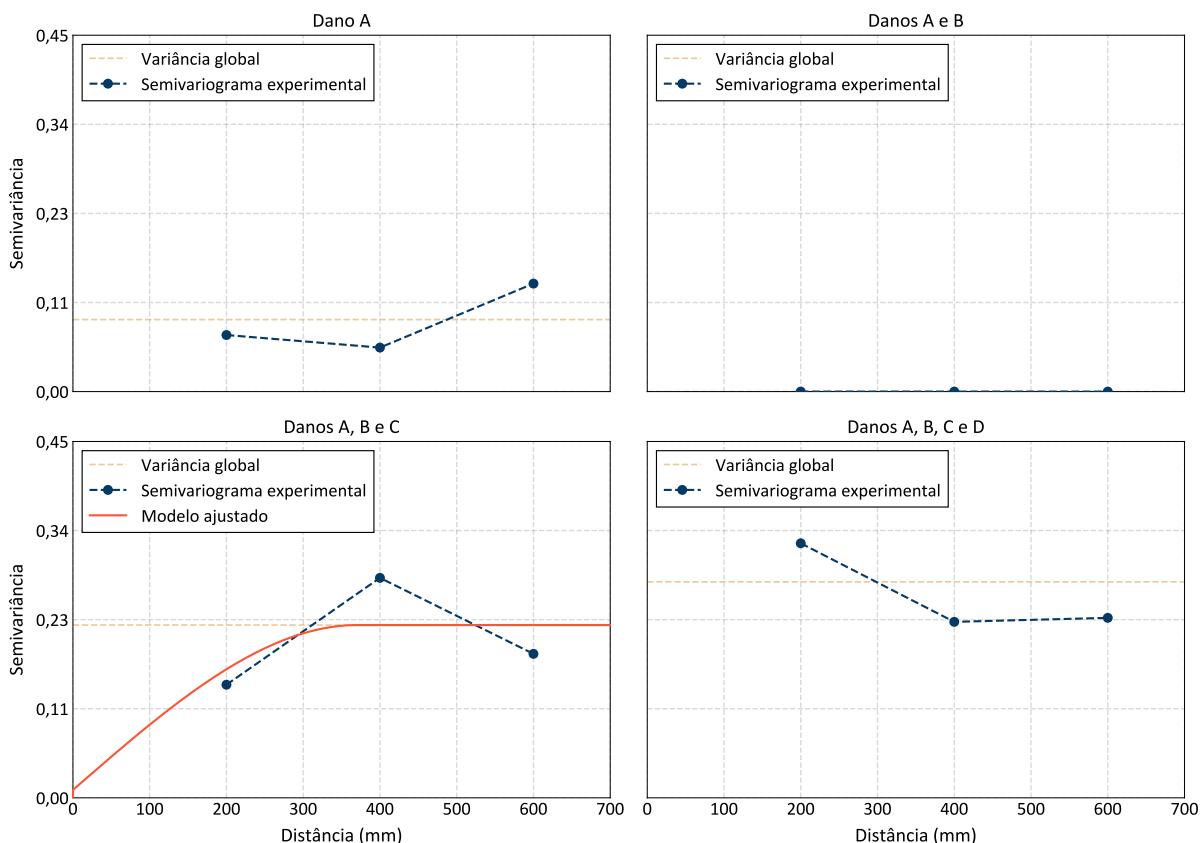


Figura 5.16: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na densidade de picos em altas frequências.

Em relação à abordagem baseada na sensibilidade ao dano, os semivariogramas obtidos (Fig. 5.17) mostram que, em contraste com as abordagens anteriores, apenas na condição com um único dano não foi possível identificar existência de continuidade espacial da variável indicadora correspondente.

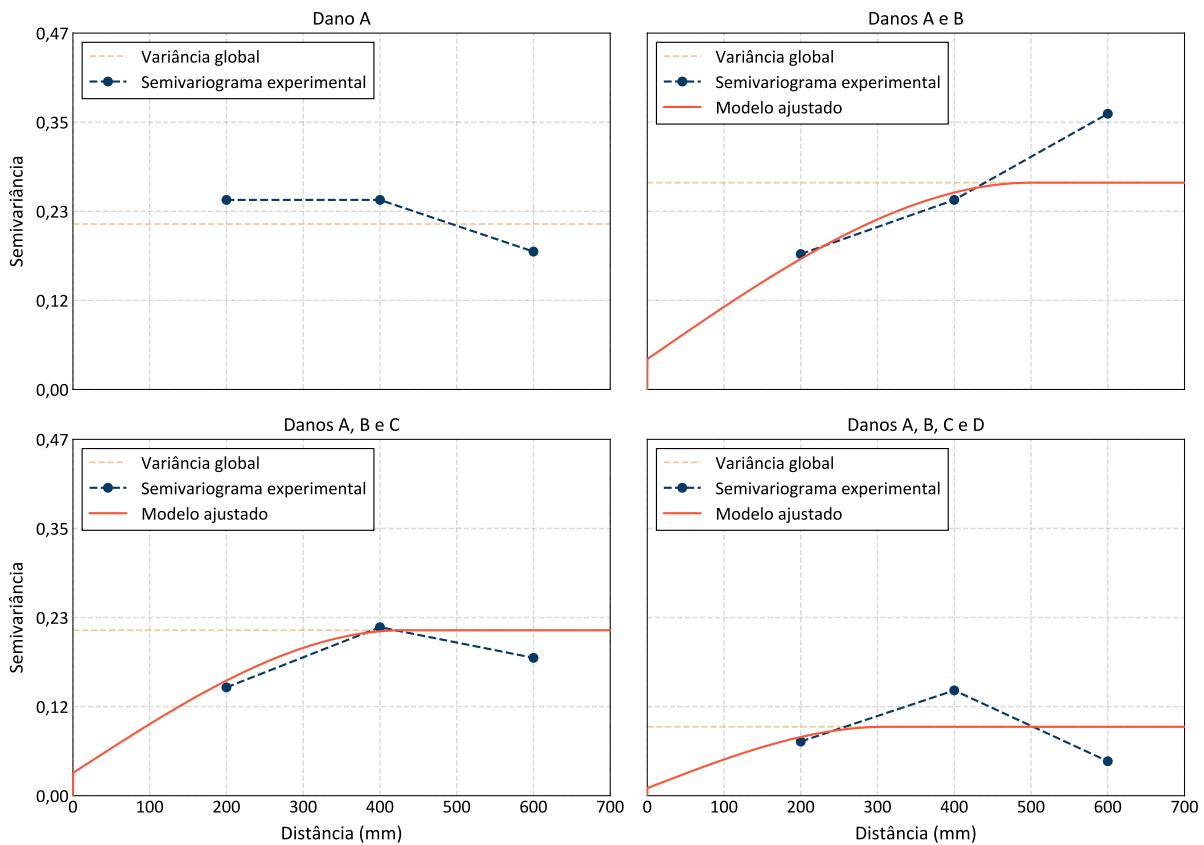


Figura 5.17: Semivariogramas experimentais e respectivos ajustes teóricos obtidos para cada condição de dano investigada no painel aeronáutico. A abordagem de seleção de intervalos se refere àquela baseada na sensibilidade ao dano.

Nesse contexto, os ajustes dos semivariogramas experimentais foram executados utilizando-se o modelo esférico, cujos parâmetros dos ajustes estão descritos na Tab. 5.1. Conforme demonstrado na Fig. 5.17, os ajustes teóricos obtidos reproduziram adequadamente o comportamento geral dos semivariogramas experimentais, principalmente no cenário com dois danos.

De acordo com o apresentado na Tab. 5.1, houve uma redução gradativa do Efeito Pepita à medida que porcas adicionais foram introduzidas. A maior redução se deu no cenário com quatro danos. Neste caso, a redução foi de 66,7 % em relação à condição de dano anterior.

Tabela 5.1: Parâmetros dos ajustes variográficos para todas as condições de dano investigadas no painel aeronáutico, considerando a seleção de intervalos baseada na sensibilidade ao dano.

Cenário	Efeito Pepita	Estrutura		
		Modelo	Alcance (mm)	Contribuição
Danos A e B	0,04	esférico	500,0	0,2327
Danos A, B e C	0,03	esférico	430,0	0,1882
Danos A, B, C e D	0,01	esférico	310,0	0,0809

Esse comportamento reflete uma redução da variabilidade em pequena escala – inferior ao espaçamento entre pastilhas piezelétricas – na condição com quatro danos, e é consequência da detecção das porcas por 90,9 % das pastilhas piezelétricas, conforme demonstrado na Fig. 5.13. Consequentemente, as variáveis indicadoras resultantes exibiram com comportamento muito homogêneo, com pequena variância. Conforme demonstrado na Fig. 5.17, a variância global observada na condição com quatro danos é 58,3 % inferior à variância global do cenário com três danos, o que corrobora a hipótese inicial.

5.5.3 Desenvolvimento e Análise dos Modelos Preditivos

A execução da KI foi fundamentada nos parâmetros dos ajustes variográficos obtidos na etapa anterior. O volume de busca utilizado foi de formato esférico, em função da utilização de semivariogramas unidirecionais, o que resultou, portanto, em alcances iguais nas três direções (eixos, X, Y e Z). No interior de cada volume de busca foram selecionadas no mínimo uma e no máximo quatro amostras para a estimativa dos pontos não amostrados.

As estimativas foram obtidas por meio da abordagem de KI total (*full indicator kriging*) implementada no módulo *ik3d*. A adoção dessa abordagem justifica-se pelo fato de o procedimento envolver a estimação das probabilidades de ocorrência de duas classes, cujos semivariogramas foram integralmente caracterizados. Ademais, considerando tratar-se de uma abordagem baseada em categorias, as proporções das classes empregadas no processo de estimativa foram determinadas a partir da Eq. 3.14.

Em razão das particularidades geométricas do painel aeronáutico – caracterizado por uma superfície curva e pela presença de reforçadores (*stringers*) e de uma janela – fez-se necessária a aplicação de procedimentos específicos para a construção de uma representação 3D adequada dessa estrutura.

Nesse contexto, a criação do modelo 3D do painel aeronáutico exigiu, em primeira instância, a especificação de seu modelo geométrico. Esta etapa foi necessária para a adequada representação das particularidades geométricas da estrutura no modelo de blocos.

O modelo geométrico do painel aeronáutico foi obtido através de escaneamento, executado por meio de um *scanner* modelo CR-Scan Ferret Pro, fabricado pela Creality®. Este dispositivo de escaneamento possui uma acurácia espacial de até 0,1 mm, e uma resolução pontual de 0,16 mm (CREALITY, 2024), o que permitiu capturar de forma eficaz os detalhes geométricos do painel aeronáutico.

Com o propósito de aumentar a exatidão e o correto alinhamento da nuvem de pontos, foram afixados na estrutura marcadores de referência circulares com 6 mm de diâmetro e não reflexivos. A Fig. 5.18 exibe o painel aeronáutico com os marcadores de referência utilizados para o escaneamento 3D, e a nuvem de pontos reconstruída. Através desta, é possível observar os detalhes da estrutura capturados pelo dispositivo de escaneamento 3D.

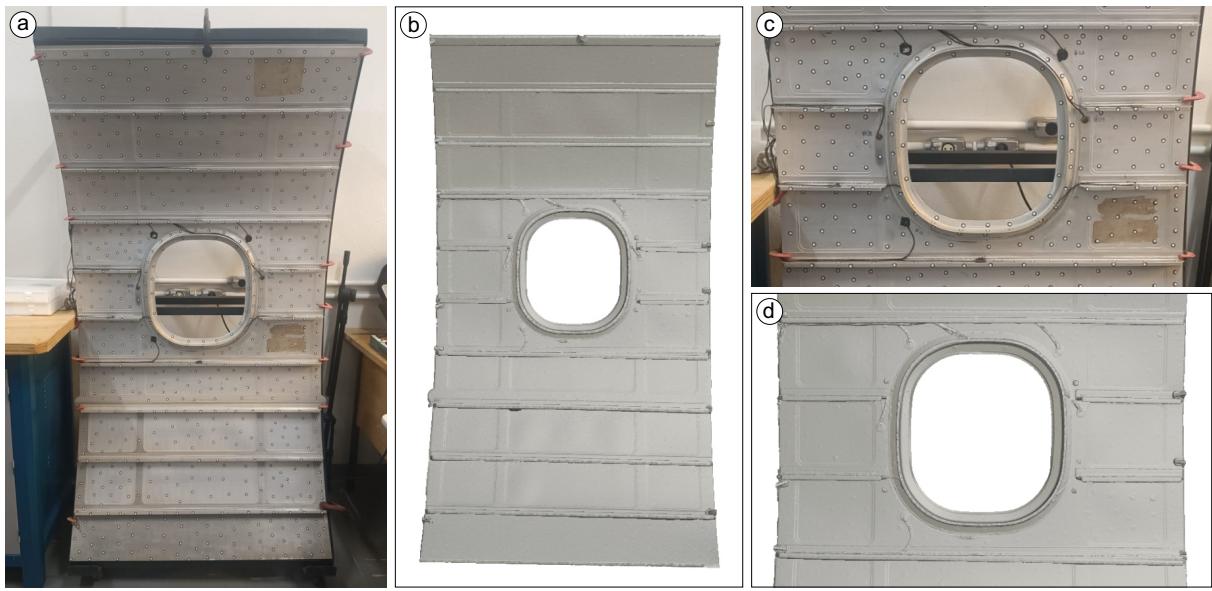


Figura 5.18: Vista frontal do painel aeronáutico com os marcadores utilizados para o escaneamento 3D (a), resultando em uma representação por meio de nuvem de pontos (b). Detalhe da região da janela com os marcadores (c), e correspondente reconstrução digital no modelo (d).

A nuvem de pontos obtida a partir do escaneamento da superfície interna do painel aeronáutico foi submetida a uma etapa de pré-processamento. A execução inicial foi realizada no *software Meshlab®*, e a subsequente, em uma rotina implementada usando a linguagem Python.

No *Meshlab®*, os procedimentos consistiram, primeiramente, em rotacionar a nuvem de pontos, de modo que o eixo longitudinal do modelo do painel estivesse alinhado com o eixo Z, e a superfície do painel estivesse perpendicular ao eixo Y. Em seguida, os pontos que não pertenciam ao painel foram removidos.

O modelo obtido foi usado na segunda fase do pré-processamento, a qual consistiu na translação da nuvem de pontos, de tal modo que a sua extremidade inferior coincidisse com a origem do sistema de coordenadas cartesianas (0, 0, 0). Este procedimento foi realizado empregando o método `translate` do pacote PyVista ([SULLIVAN; KASZYNSKI, 2019](#)), cujo vetor de translação correspondeu aos valores negativos das coordenadas referentes à borda inferior esquerda da nuvem de pontos.

A utilização do pacote PyVista ([SULLIVAN; KASZYNSKI, 2019](#)) neste e em outros estágios

do processamento dos modelos foi necessária em função de que este pacote inclui recursos especializados para manipulação de nuvens de pontos, malhas trianguladas e grades regulares, proporcionando uma abordagem eficiente e precisa para a análise e a visualização de formas geométricas complexas ([MAGLIANO; NADDEO; NADDEO, 2024](#); [SLEIMAN *et al.*, 2024](#)).

A nuvem de pontos pré-processada foi empregada para a criação do modelo de blocos (grade regular), observando-se a geometria do painel aeronáutico. Esse procedimento consistiu em estabelecer inicialmente uma malha regular com dimensões adequadas à representação espacial da estrutura.

Os atributos da grade regular – neste caso armazenada como um objeto `ImageData` do PyVista – foram determinados utilizando os seguintes critérios: (1) as dimensões dos blocos nos eixos X, Y e Z foram fixados em 2 mm, valor escolhido por proporcionar uma representação adequada das características geométricas do painel, ao mesmo tempo em que favorece a eficiência computacional; (2) o número de vértices em cada direção foi determinado pela razão entre a amplitude espacial (diferença entre os limites superior e inferior das coordenadas) e a dimensão dos blocos na respectiva direção, acrescida de uma unidade; e (3) a origem do modelo foi definida pelos limites inferiores das coordenadas de cada eixo, neste caso (0, 0, 0). A Tab. 5.2 mostra os parâmetros da malha regular criada por meio do PyVista. Os termos vx , vy e vz constantes na Tab. 5.2 se referem ao número de nós nas direções X, Y e Z, respectivamente.

Tabela 5.2: Parâmetros da grade regular tridimensional gerada a partir do método `ImageData` do PyVista para armazenar informações da geometria do painel aeronáutico.

Parâmetro	Valor
$xsiz$ (mm)	2,0
$ysiz$ (mm)	2,0
$zsiz$ (mm)	2,0
vx	467
vy	146
vz	817
$xorig$ (mm)	0,00
$yorig$ (mm)	0,00
$zorig$ (mm)	0,00

A associação da geometria do painel aeronáutico ao modelo de blocos foi efetuada pela inclusão de um atributo denominado `mask` às informações das células da grade regular. Esse atributo teve como finalidade indicar se um determinado bloco do modelo pertencia ou não à

geometria real do painel. Para isso, foi atribuído o valor 1 para blocos que contivessem pelo menos um ponto da nuvem de pontos em seu interior. Em contrapartida, o valor -1 foi atribuído para os blocos que não apresentaram pontos em seu interior.

Este processo foi implementado utilizando o método `cKDTree`, da biblioteca Scipy ([VIR-TANEN et al., 2020](#)). A busca por pontos próximos, no interior de cada bloco, foi efetuada utilizando-se o método `query_ball_point`, no qual o ponto de origem da busca foi definido como o centro geométrico do bloco, e o raio de busca foi estabelecido como a metade da diagonal do bloco. Desse modo, foi possível identificar de maneira consistente todos os blocos do modelo pertencentes ao painel aeronáutico.

O modelo regular obtido a partir do PyVista serviu como base para a identificação dos blocos pertencentes ao painel aeronáutico, por meio do identificador implementado nesse modelo. Entretanto, devido às diferenças no tratamento das coordenadas espaciais entre o PyVista e o `ik3d`, tornou-se necessário ajustar os parâmetros do modelo no `ik3d`, de modo a assegurar a compatibilidade entre as duas representações.

Neste sentido, as seguintes adequações foram implementadas: (1) o número de blocos nas direções X, Y e Z, dados por nx , ny e nz na Tab. 5.3, foi determinado como sendo o número de vértices nas respectivas direções, dados por vx , vy e vz , e descritos na Tab. 5.2, subtraído de uma unidade; e (2) a origem do modelo do `ik3d`, dada por $xorig$, $yorig$ e $zorig$ na Tab. 5.3, correspondeu à metade das dimensões dos blocos nas respectivas direções.

Tabela 5.3: Parâmetros da grade regular adotada no `ik3d` para a obtenção dos modelos preditivos do painel aeronáutico.

Parâmetro	Valor
$xsiz$ (mm)	2,0
$ysiz$ (mm)	2,0
$zsiz$ (mm)	2,0
nx	466
ny	145
nz	816
$xorig$ (mm)	1,00
$yorig$ (mm)	1,00
$zorig$ (mm)	1,00

Essas adaptações foram necessárias em virtude do fato de que no pacote PyVista, a construção de modelos regulares (objetos `ImageData` ou `StructuredGrid`) é essencialmente funda-

mentada nas coordenadas dos nós (vértices) dos blocos (SULLIVAN; KASZYNSKI, 2019), e não nas coordenadas dos centros dos blocos, como ocorre nos métodos GSLIB/pygeostat (DEUTSCH; JOURNEL, 1998). Portanto, a origem utilizada no modelo de blocos do `ik3d` (Tab. 5.3) correspondeu ao centro do primeiro bloco, posicionado no canto inferior esquerdo do modelo, de maneira que o nó do primeiro bloco estivesse posicionado na coordenada (0, 0, 0), conforme estabelecido no modelo-base do PyVista (Tab. 5.2). Ademais, em razão dessas diferenças inerentes às duas plataformas (`ik3d` e PyVista), o número de blocos do modelo do `ik3d` (Tab. 5.3) foi obtido pela subtração de uma unidade do número de nós adotado no modelo-base, obtido por meio do PyVista.

A implementação da configuração apresentada na Tab. 5.3 para a obtenção dos modelos preditivos do painel aeronáutico assegurou, portanto, a total compatibilidade entre o modelo de blocos adotado no `ik3d` e aquele previamente construído por meio do PyVista. Dessa forma, as coordenadas dos centros dos blocos foram iguais em ambos os modelos, o que possibilitou o mapeamento de correspondências entre os blocos.

Os modelos estimados por meio do `ik3d` foram submetidos a uma etapa de pós-processamento, a qual consistiu em: (1) inclusão das coordenadas X, Y e Z ao banco de dados das estimativas; (2) substituição de eventuais valores iguais a “-9.9999” por “nan”, com o propósito de representar adequadamente os valores ausentes na linguagem Python; e (3) remoção dos blocos não pertencentes ao painel aeronáutico.

As coordenadas X, Y e Z do centro de cada bloco do modelo foram obtidas através do módulo `addcoord` do GSLIB, o qual foi integrado ao ambiente Python pelo pacote `pygeostat`, versão 1.1.1 (DEUTSCH *et al.*, 2021). As informações inseridas no `addcoord` corresponderam aos parâmetros da grade regular utilizados no `ik3d`, os quais estão descritos na Tab. 5.3.

A segunda etapa, referente à substituição de eventuais valores iguais a -9.9999 por “nan”, obedeceu aos mesmos procedimentos implementados para o experimento da placa de alumínio.

A eliminação dos blocos não pertencentes ao painel aeronáutico consistiu, inicialmente, na extração das coordenadas dos centros dos blocos no modelo-base obtido por meio do PyVista. A obtenção de tais coordenadas foi realizada por meio da utilização do método `cell_centers().points` do mesmo pacote. O objeto resultante continha as coordenadas dos centros dos blocos e o atributo `mask`, que indicava se um bloco pertencia à geometria do painel, com valor igual a 1, ou não, indicado pelo valor -1.

As informações referentes ao atributo `mask` foram incluídas no modelo estimado por KI,

utilizando-se o método `merge` da biblioteca Pandas ([The pandas development team, 2023](#)). As coordenadas X, Y e Z foram empregadas como referência para a unificação dos dados. Por fim, os blocos não pertencentes ao painel aeronáutico, ou seja, com o atributo *mask* igual a -1, foram removidos do modelo estimado por KI, resultando, portanto, no modelo preditivo final do painel aeronáutico.

O modelo preditivo final estabelecido, englobando exclusivamente os blocos pertencentes ao painel aeronáutico, considerava duas variáveis indicadoras. A primeira variável indicadora se referia à probabilidade de ausência de dano, enquanto a segunda variável indicadora indicava a probabilidade de presença de dano, conforme determinado no processo de criação dessas variáveis (Eq. [3.2](#)). Considerando a interpretação da segunda variável indicadora, a qual se refere à probabilidade de ocorrência de danos, esta foi utilizada para o mapeamento dos danos no modelo. Os modelos de probabilidade de danos obtidos estão apresentados nas seções seguintes.

5.5.3.1 Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos

Em virtude da inviabilidade de ajuste variográfico para os cenários com uma, duas e quatro porcas nesta abordagem, a obtenção das estimativas por KI foi possível apenas para a condição com três danos (Fig. [5.19](#)).

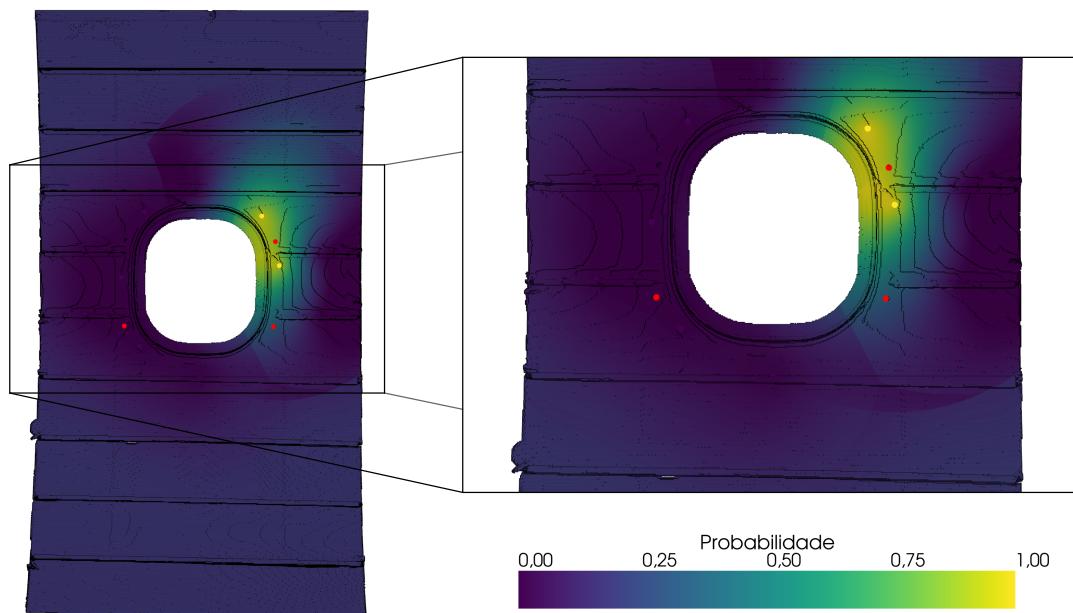


Figura 5.19: Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.

Conforme demonstrado no modelo probabilístico ilustrado na Fig. 5.19, houve a geração de apenas um domínio de alta probabilidade de dano, localizado nas proximidades da porca “C”. Esse domínio engloba completamente essa porca, indicando, portanto, a ocorrência de um dano na região contígua à porca “C”.

O cálculo das distâncias Euclidianas entre as posições atuais das porcas e o centroide da região delimitada pelos valores de probabilidade iguais ou superiores a 60,0 %, 70,0 %, 80,0 % e 90,0 % (Fig. 5.20), mostrou que as menores distâncias em todos os limiares foram atribuídas à porca “C”, cuja posição prevista foi distante, em média, 30,1 mm da sua posição atual, o que é equivalente a 9,3 % do espaçamento entre os sensores. Para essa porca, a menor distância registrada foi de 27,1 mm, correspondente ao limiar de probabilidade igual a 60,0 %, enquanto o maior valor, de 33,9 mm, foi atribuído ao limiar de probabilidade igual a 90,0 %.

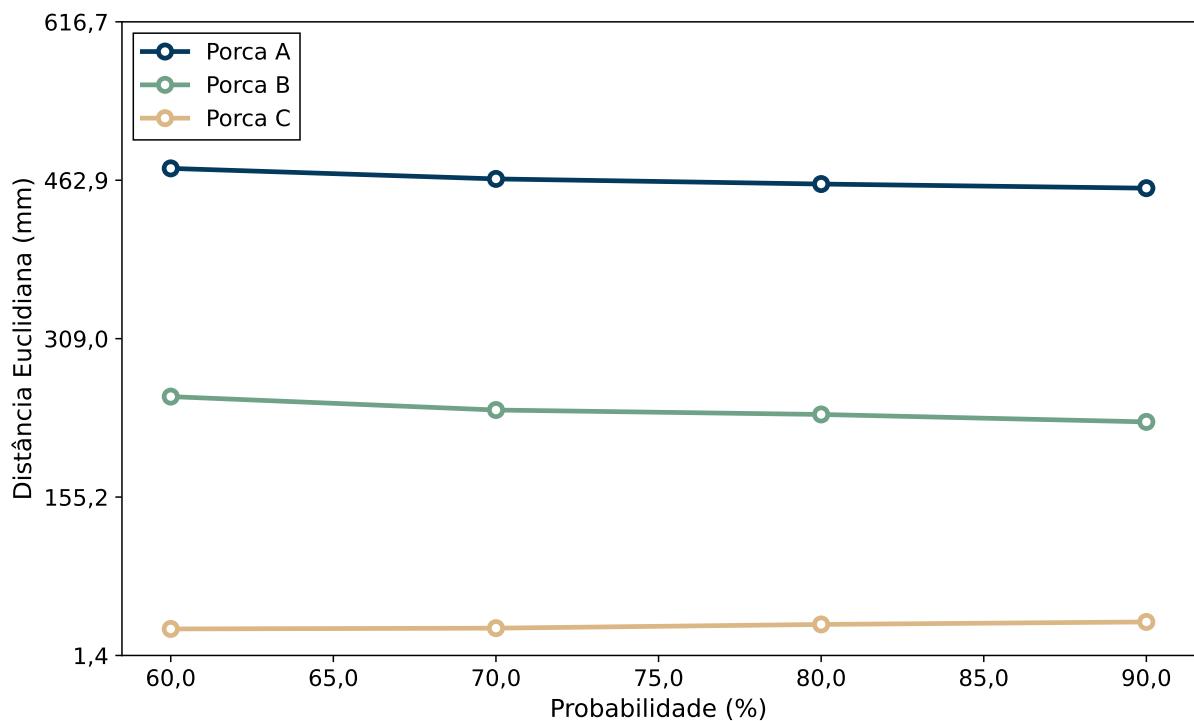


Figura 5.20: Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada no número de picos.

O comportamento observado para a porca “C” demonstra a existência de uma baixa variabilidade das distâncias euclidianas em função do limiar de probabilidade para essa porca. Considerando-se uma amplitude dos limiares de probabilidade de 30,0 %, foi obtido um desvio padrão de apenas 3,2 mm para as distâncias euclidianas obtidas.

Em relação à porca “B”, foi obtida uma distância Euclidiana média de 239,0 mm nos limiares de probabilidade analisados, com um desvio padrão de 10,3 mm. A maior distância registrada foi de 252,6 mm, associada ao limiar de probabilidade igual a 60,0 %, enquanto o menor valor registrado foi de 228,2 mm, relacionado ao limiar igual a 90,0 %.

Já a posição atual da porca “A” foi distante, em média, em 463,2 mm do centroide previsto para essa porca, com um desvio padrão de 8,3 mm. De modo similar ao observado na “B”, foi constatada uma redução progressiva da distância Euclidiana em função do aumento do limiar de probabilidade, conforme demonstrado na Fig. 5.20. O maior valor de distância, de 474,4 mm, foi atribuído ao limiar de 60,0 %, enquanto o menor valor, de 455,2 mm, foi relacionado ao limiar de 90,0 %.

Esses valores são compatíveis com o observado no mapa de probabilidade da Fig. 5.19, em que é possível observar a existência de uma única região de alta probabilidade de dano. Essa região abrange integralmente a porca “C”, estando situada relativamente próxima da porca “B”, porém distante da porca “A”.

A habilidade do modelo preditivo em localizar adequadamente a porca “C” é decorrente da correta detecção dessa porca por parte das pastilhas piezelétricas localizadas em sua vizinhança (*i.e.*, sensores P-03 e P-07), que apresentaram valores de CCD superiores aos respectivos limiares de detecção, conforme demonstrado na Fig. 5.9. Consequentemente, na Fig. 5.19, esses sensores são representados por círculos amarelos, indicando uma probabilidade de 100 % de ocorrência de dano.

Já as demais pastilhas piezelétricas apresentaram valores de CCD inferiores aos limiares de detecção correspondentes (Fig. 5.9), sendo representadas, portanto, por círculos roxos na Fig. 5.19. Consequentemente, as localizações das porcas “A” e “B” não puderam ser previstas em razão da falha dos demais sensores em detectar adequadamente as porcas em suas proximidades.

5.5.3.2 Resultados obtidos pela abordagem da densidade de picos em altas frequências

O modelo preditivo desenvolvido para a condição com três danos – dada a ausência de continuidade espacial nas demais configurações espaciais – sob a abordagem baseada na densidade de picos em altas frequências (Fig. 5.21), apresentou uma região de alta probabilidade abrangendo a posição da porca “C”, localizada no canto superior direito da janela do painel aeronáutico.

Uma avaliação das distâncias euclidianas entre as posições atuais das porcas e os centroides mais proximamente localizados, definidos por vários limiares de probabilidade, foi conduzida

(Fig. 5.22). Conforme demonstrado na Fig. 5.22, a porca “C” apresentou, de forma consistente, os menores valores de distância, com uma média de 30,6 mm, e um desvio padrão relativamente baixo, de apenas 3,6 mm. O maior valor de distância, de 35,3 mm, foi obtido no limiar de probabilidade igual a 90,0 %, enquanto que o menor valor, de 27,9 mm, foi registrado no limiar igual a 60,0 %. Diante do exposto, observa-se que para essa porca os centroides previstos mostraram-se estáveis para diferentes limiares de probabilidade.

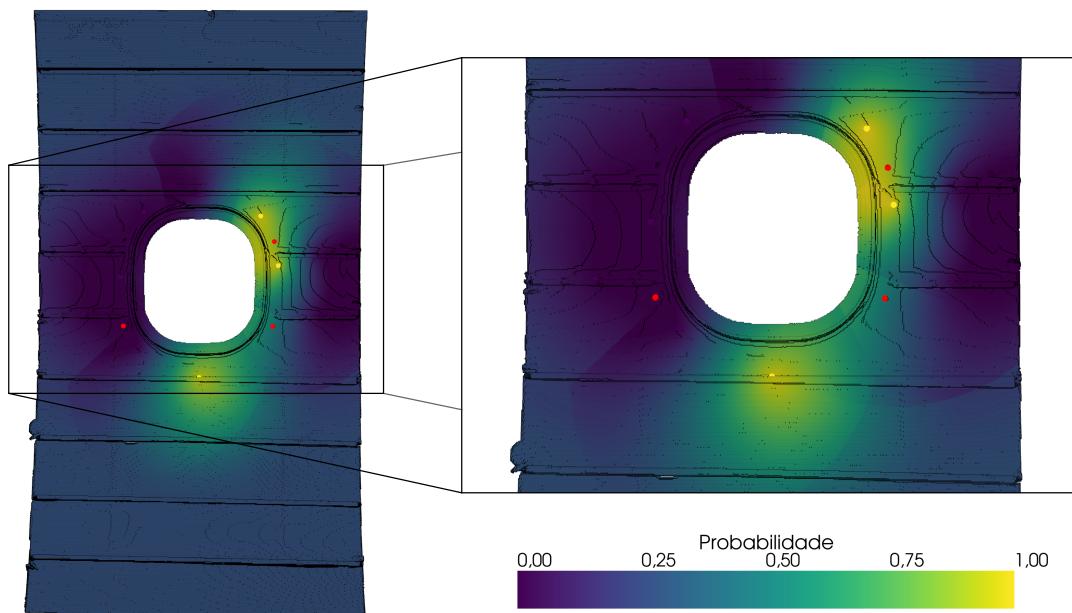


Figura 5.21: Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.

No que se refere à porca “B”, o menor valor de distância, de 56,6 mm, foi registrado para o limiar de probabilidade igual a 60,0 %. Entretanto, a partir do limiar de probabilidade igual a 70,0 %, foi observado um aumento substancial, com uma distância de 233,8 mm, correspondente a um acréscimo de 313,2 %. Nos demais limiares de probabilidade, as distâncias euclidianas permaneceram relativamente estáveis, com uma amplitude de 31,3 mm.

A variação das distâncias euclidianas observada nessa porca pode ser atribuída ao seguinte mecanismo: em limiares de probabilidade mais baixos, em torno de 60,0 %, foi formada uma única região de dano prevista, que abrangeu as porcas “B” e “C”, cujo centroide foi localizado relativamente próximo dessas porcas. À medida que o limiar de probabilidade aumentou, houve uma subdivisão dessa região em duas; uma localizada próxima do sensor P-11, na porção inferior da janela, e outra no canto superior direito da janela, englobando a porca “C”. Como ambas

as regiões não englobaram a porca “B”, houve um desvio dos centroides previstos em relação à posição atual dessa porca, resultando, consequentemente, em um aumento das distâncias euclidianas atribuídas à porca “B”. Já as distâncias atribuídas à porca “C” permaneceram estáveis, conforme demonstrado na Figura 5.22, em virtude da abrangência total dessa porca em uma das regiões.

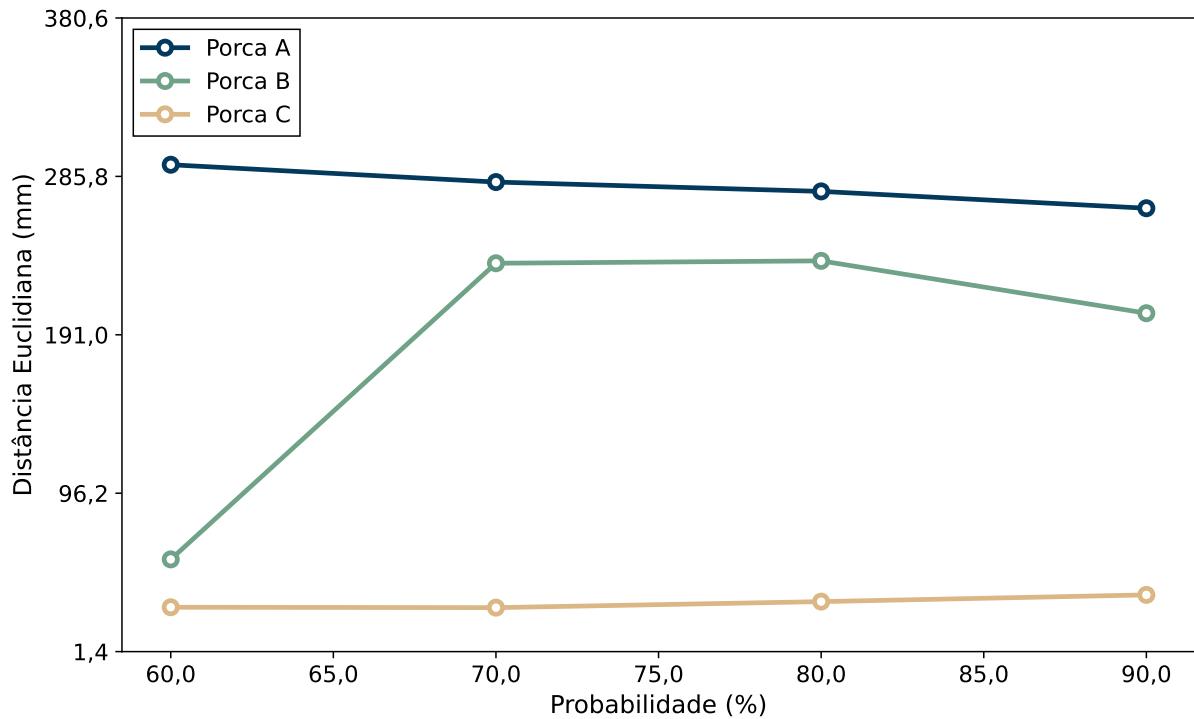


Figura 5.22: Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada no número de picos em altas frequências.

Já as distâncias registradas para a porca “A”, apresentaram uma média de 279,7 mm. O maior valor, de 292,8 mm, foi registrado em limiares de probabilidade mais baixos (*i.e.*, 60,0 %), enquanto o menor valor, de 266,7 mm, foi obtido em limiares de probabilidade mais elevados (*i.e.*, 90,0 %). Portanto, os resultados obtidos demonstram uma redução consistente das distâncias em função do aumento do limiar de probabilidade, como indicado também na Fig. 5.22. Tal redução é decorrente de rearranjos dos centroides, os quais aparentemente tenderam a se aproximar da posição real da porca em limiares de probabilidade mais elevados.

A ocorrência de uma alta probabilidade de dano na vizinhança da porca “C”, e consequentemente de distâncias euclidianas menores, decorre do fato dos sensores P-03 e P-07, situados nas proximidades dessa porca e representados como círculos amarelos na Fig. 5.21, terem apresen-

tado valores de CCD superiores aos respectivos limiares de detecção, conforme demonstrado na Fig. 5.11.

Já as demais porcas não tiveram suas localizações previstas com alto grau de confiança, em virtude da ausência de regiões da alta probabilidade de dano que as abrangesse. A existência desses falsos negativos é atribuída à falha de pastilhas piezelétricas nas proximidades dessas porcas em detectá-las. Adicionalmente, conforme ilustrado na Fig. 5.21, foi identificado um falso positivo na borda inferior da janela, decorrente da detecção de uma eventual alteração estrutural pelo sensor P-11, resultando, consequentemente, no aparecimento de uma zona de alta probabilidade de dano que não abrangesse nenhuma das porcas adicionadas.

5.5.3.3 Resultados obtidos pela abordagem da sensibilidade ao dano

O modelo probabilístico referente à condição com duas porcas, e associado à abordagem baseada na sensibilidade ao dano, está ilustrado na Fig. 5.23. Conforme demonstrado na Fig. 5.23, foi identificada uma zona principal de alta probabilidade de dano, localizada na borda inferior esquerda da janela do painel. A região em questão abrange integralmente o local de fixação da porca “A”, contudo se estende até a borda inferior da janela do painel, indicando, portanto, a presença de danos em uma área extensa, mas não abrangendo a porca “B”.

A ocorrência de uma extensa região de alta probabilidade de dano, abrangendo não apenas a porção inferior esquerda da janela – local aproximado na porca “A” – mas também a porção inferior da janela (Fig. 5.23), aparentemente provocou um desvio nas distâncias euclidianas registradas para a porca “A” em limiares de probabilidade mais baixos (*e.g.*, 60,0 %), conforme demonstrado na Fig. 5.24.

No limiar de probabilidade igual a 60,0 % foi identificada uma distância Euclidiana de aproximadamente 139,6 mm entre a posição atual da porca “A” e a sua localização prevista. O valor em questão apresentou uma redução progressiva à medida que o limiar de probabilidade aumentou, resultando em uma distância aproximada de 73,6 mm no limiar de probabilidade igual a 90,0 %, o que equivale a 22,7 % do espaçamento médio entre os sensores. A tendência observada indica que o aumento do limiar de probabilidade resultou em uma redução da região de dano prevista, restringindo-a aos sensores mais próximos da porca “A” (*i.e.*, sensores P-06, P-08 e P-10). Nesse contexto, os valores estimados pela KI apresentaram maior estabilidade, e aproximando-se de 1,0 (100,0 %). Consequentemente, a região prevista de dano tornou-se mais concentrada em torno da posição atual da porca “A”.

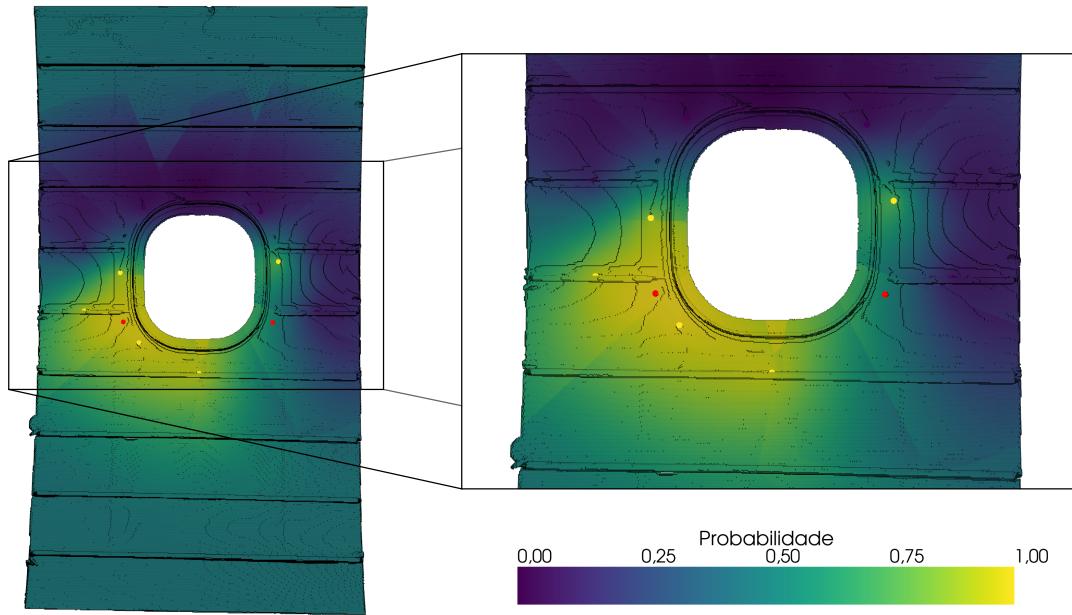


Figura 5.23: Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com duas porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.

A ampla extensão dessa região de dano previsto, atingindo a borda inferior da janela do painel, é atribuída ao fato do sensor P-11, fixado na longarina (*stringer*) abaixo da janela, ter apresentado um valor de CCD superior ao seu respectivo limiar de detecção (Fig. 5.13), apesar de estar mais distante da porca “A” em comparação com os sensores P-06 (139,0 mm), P-08 (114,4 mm) e P-10 (73,1 mm). Esse comportamento, consequentemente, reduziu a precisão da área prevista de ocorrência do dano em relação à sua posição real, comprometendo, em parte, a qualidade do modelo preditivo.

Em relação à porca “B”, de acordo com o mostrado na Fig. 5.23, não foi identificada uma zona de alta probabilidade de dano que abrangesse essa porca. Nessa condição, conforme demonstrado na Fig. 5.24, foi constatada uma variação significativa nas distâncias euclidianas entre a posição atual da porca “B” e a sua posição prevista no intervalo de limiares de probabilidade delimitado por 60,0 % e 90,0 %. No limiar igual a 60,0 %, foi obtida uma distância aproximada de 148,6 mm, enquanto no limiar de 70,0 % foi registrada uma distância de 63,3 mm, que corresponde ao menor valor de distância obtido para essa porca. Com o aumento do limiar de probabilidade, houve um acréscimo das distâncias, atingindo 370,1 mm e 363,6 mm nos limiares de probabilidade iguais a 80,0 % e 90,0 %, respectivamente.

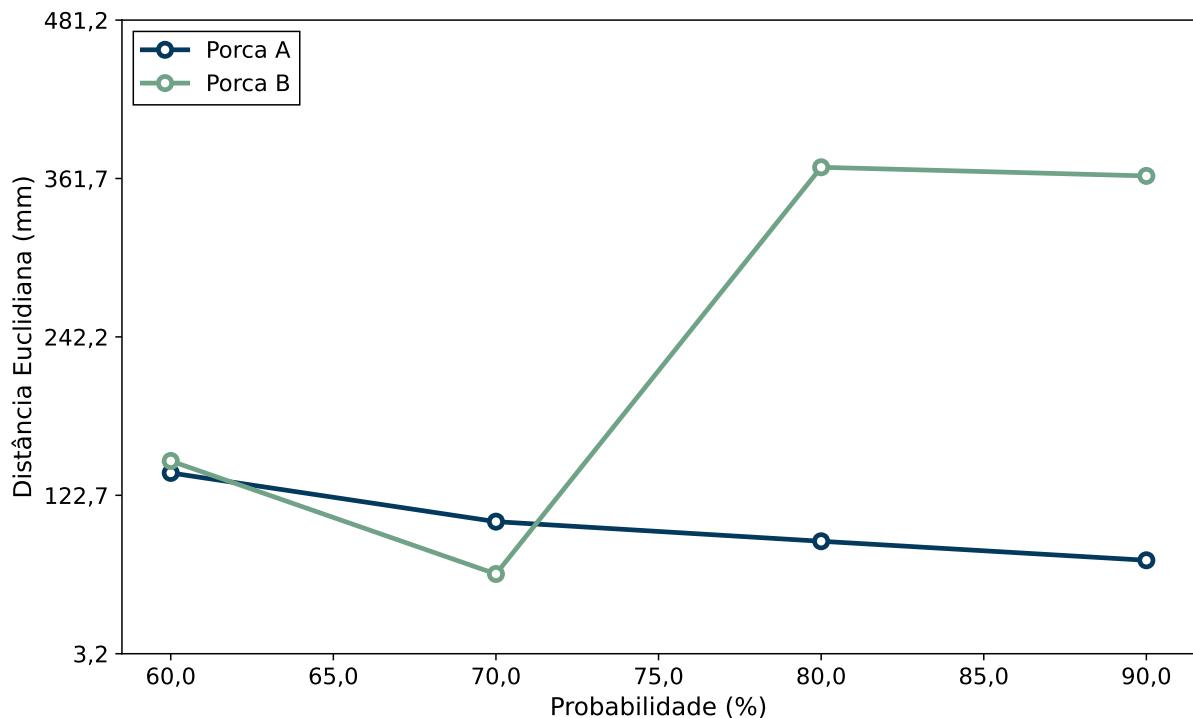


Figura 5.24: Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com duas porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

Ainda, a análise estatística dos valores obtidos indica uma distância média de 236,4 mm, correspondente a 73,0 % do espaçamento médio entre os sensores. Ainda, o desvio padrão observado foi de 154,6 mm, o que é consequência da elevada amplitude das distâncias obtidas no intervalo de probabilidades analisado.

Os resultados obtidos para a porca “B” nessa condição de dano são decorrentes de dois fatores: (1) a ausência de pastilhas piezelétricas adicionais na vizinhança da porca “B”, ao contrário do existente para a porca “A”; e (2) a falha do sensor P-09, localizado em uma longarina próxima à porca “B” – a 128,3 mm da mesma – em detectar as alterações estruturais advindas de sua fixação na estrutura.

O mapa de probabilidade de dano para a configuração com três porcas sob a abordagem baseada na sensibilidade ao dano (Fig. 5.25) mostra a ocorrência de uma extensa área de alta probabilidade de dano. Os maiores valores de probabilidade dessa região abrangem inteiramente as porcas “A” e “C”, enquanto no local da porca “B” ocorrem valores de probabilidade ligeiramente menores, em comparação com as demais regiões próximas às outras porcas.

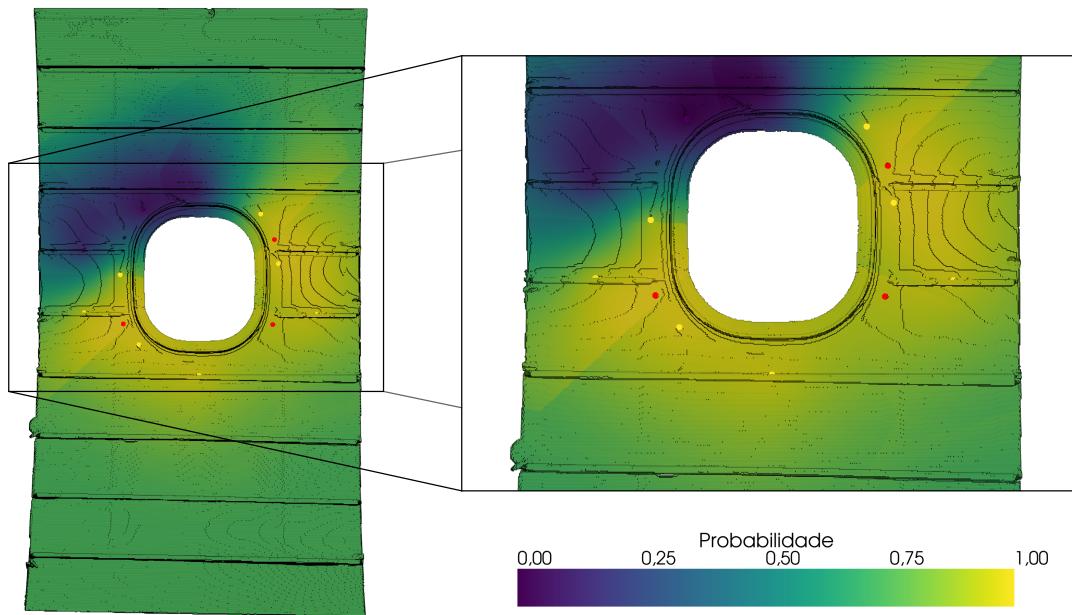


Figura 5.25: Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com três porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.

Ademais, conforme demonstrado na Fig. 5.25, foi observada uma ocorrência de uma zona de alta probabilidade na borda inferior da janela do painel, correspondente a um falso positivo, dada a inexistência de danos em sua adjacência. Esse resultado decorre da captura de possíveis alterações estruturais pelo sensor P-11, que exibiu um valor de CCD superior ao seu limiar de detecção (Fig. 5.13).

A predominância de valores elevados de probabilidade nas proximidades das porcas “A” e “C” é atribuída à presença de pastilhas piezelétricas próximas a essas porcas, cujos valores de CCD foram superiores aos respectivos limiares de corte. Dessa maneira, os sensores identificaram as mudanças estruturais em suas proximidades imediatas, resultantes da instalação das respectivas porcas.

Contudo, a investigação das distâncias euclidianas nos limiares de probabilidade delimitados pelo intervalo de 60,0 % a 90,0 % demonstrou que os maiores valores de distância foram obtidos para as porcas “A” e “C” (Fig. 5.26). As distâncias médias mensuradas foram de 240,7 mm e 263,9 mm, respectivamente. Ademais, foram observados desvios padrão de 40,1 mm e 83,1 mm, para as porcas “A” e “C”, respectivamente. Dessa forma, os maiores valores de média e desvio padrão das distâncias euclidianas foram atribuídos à porca “C”.

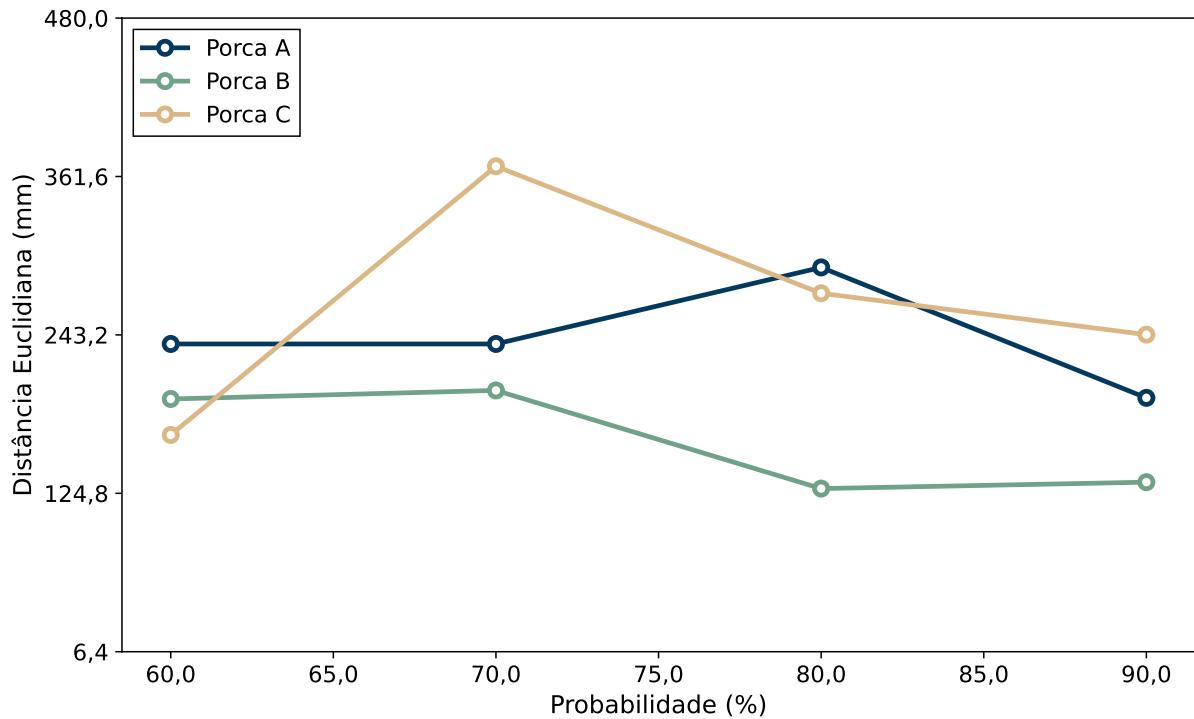


Figura 5.26: Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com três porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

A ocorrência dos desvios observados para a porca “C” podem ser decorrentes da ação simultânea dos seguintes fatores: (1) detecção do dano pelo sensor P-05, o qual está relativamente mais distante da porca “C” em comparação com os sensores P-03 e P-07; (2) detecção da porca “B” – e eventualmente da porca “C” – pelo sensor P-09, também localizado relativamente distante da porca “C”. A detecção dessas porcas por esses sensores pode ter produzido, consequentemente, uma região de alta probabilidade com centroide deslocado, resultando nos valores mais elevados de distâncias registrados para a porca “C”.

Em relação à porca “A”, o mecanismo que eventualmente provocou a ocorrência de valores elevados de distância, parece ser decorrente do fato de que sensor P-11 detectou as alterações estruturais advindas da fixação das porcas “A” e/ou “B”. Esse sensor, no entanto, encontrava-se posicionado na porção central da longarina (*stringer*) abaixo da janela, e, portanto, localizado relativamente distante da porca “A”. Consequentemente, supõe-se que o centroide da região de alta probabilidade que abrangeu totalmente a porca “A” tenha sofrido um deslocamento para uma posição mais distante, resultando nos valores elevados de distância registrados para a porca “A”.

Já a porca “B”, apresentou os menores valores de distância no intervalo de probabilidade analisado (Fig. 5.26), com uma média de 164,6 mm, correspondente a 50,8 % do espaçamento médio entre os sensores; e um desvio padrão de 39,3 mm, o que sugere uma maior estabilidade das distâncias registradas para essa porca, em comparação com as demais.

Em relação ao cenário com quatro danos, o modelo preditivo (Fig. 5.27) mostra a ocorrência de uma vasta área de elevada probabilidade de dano em boa parte do painel aeronáutico, com exceção da borda superior da janela. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada proporção de pastilhas piezelétricas que apresentaram valores de CCD superiores aos seus respectivos limiares de corte, totalizando 90,9 % dos sensores.

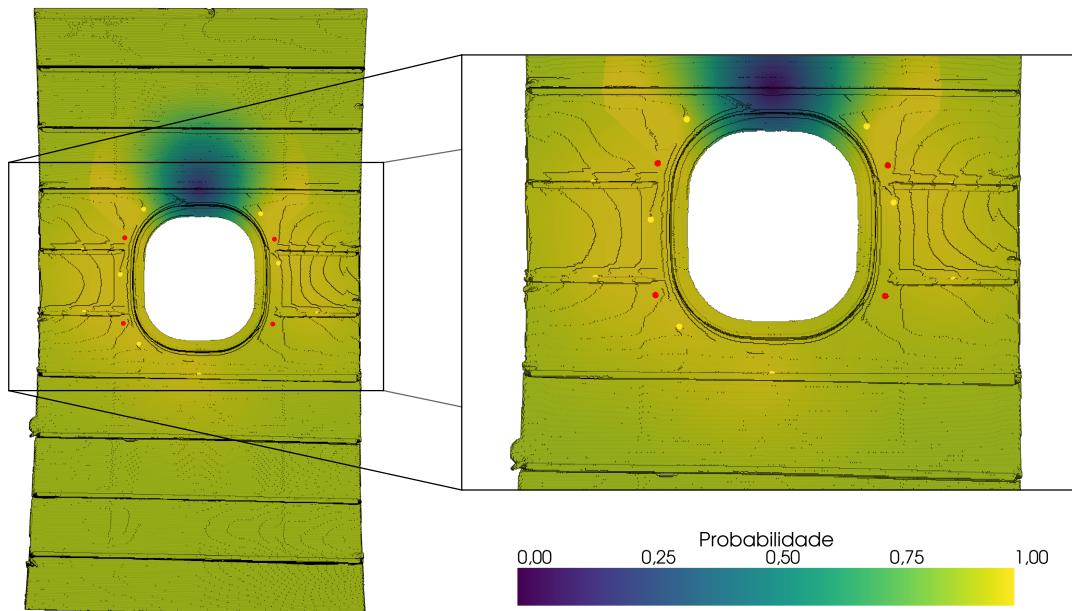


Figura 5.27: Representação do painel aeronáutico pode meio de um modelo de grade regular mostrando as probabilidades ocorrência de dano na condição com quatro porcas. Os resultados se referem aos intervalos de frequência selecionados pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os círculos em vermelho correspondem às posições das porcas.

Neste contexto, como a KI lida com variáveis categóricas binárias, o valor estimado em cada local depende diretamente da proporção das classes (sem dano, ou com dano). Além disso, o estimador-base adotado neste estudo – a krigagem simples – utiliza a média global da variável indicadora como valor *a priori*, o que reforçou a tendência de estimativas elevadas quando a maioria das observações corresponderam à classe associada à presença de dano. Consequentemente, o modelo preditivo resultante apresentou uma ampla região com alta probabilidade estimada de dano, refletindo a predominância da classe "com dano" no conjunto de dados, e limitando a capacidade do modelo de discriminar com precisão regiões pontuais onde o dano

realmente se encontrava.

A ocorrência de desvios significativos em relação às posições atuais das porcas é demonstrada pelas distâncias euclidianas identificadas para limiares de probabilidade delimitados pelo intervalo de 60,0 % a 90,0 % (Fig. 5.28). Os menores valores de distância encontrados foram, em média, 220,4 mm e 228,2 mm, atribuídos às porcas “B” e “A”, respectivamente. Já a porca “D” apresentou uma distância de média de 318,0 mm da sua localização prevista (centroide), e a porca “C”, uma distância média de 325,1 mm.

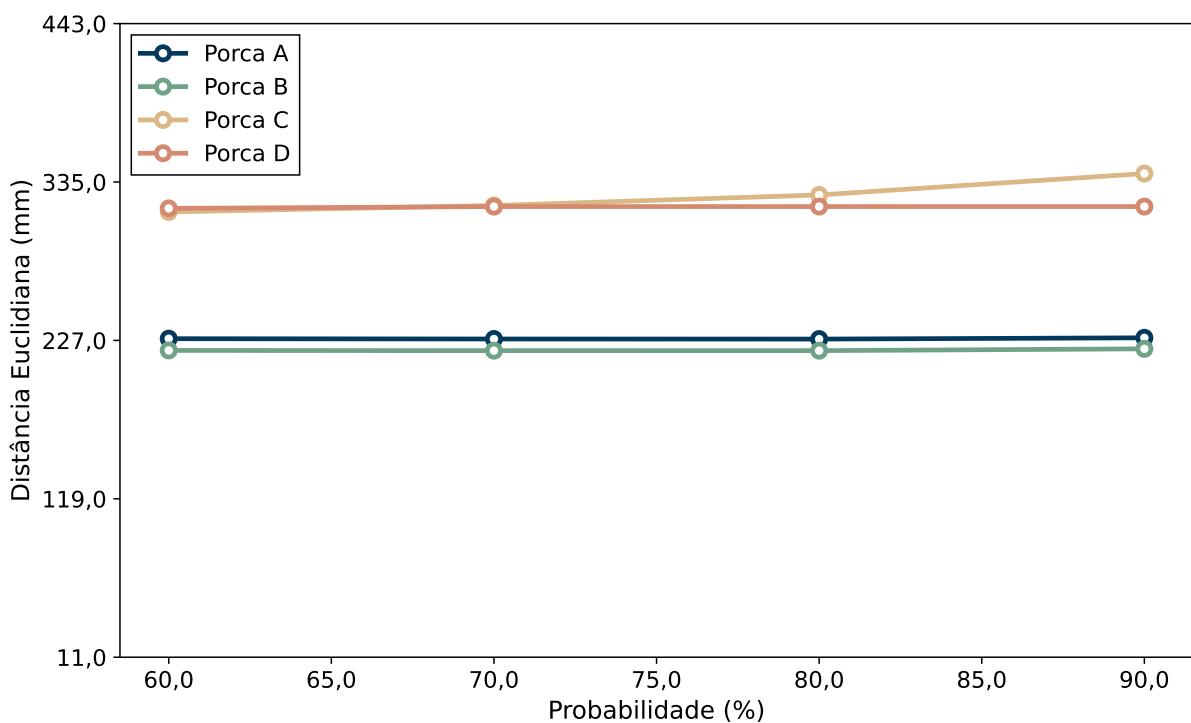


Figura 5.28: Distância Euclidiana de cada porca afixada no painel aeronáutico à sua posição prevista, em função do limiar de probabilidade. Os resultados se referem à configuração com quatro porcas, com os intervalos de frequência selecionados pela abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

Ademais, de acordo com a Fig. 5.28, os valores de distância permaneceram estáveis em diferentes limiares de probabilidade. Nesse contexto, o maior desvio padrão, de 11,5 mm, foi exibido pela porca “C”. Em contraposição, as demais porcas apresentaram desvios padrão das distâncias de 0,4 mm (Porca A), 0,6 mm (Porca B), e 0,6 mm (Porca D).

A estabilidade observada para os valores de distância euclidiana em diferentes limiares de probabilidade pode ser atribuída à ocorrência de uma ampla região de alta probabilidade de dano, em decorrência do fato de que 90,9 % das pastilhas detectaram as modificações estruturais produzidas pela fixação das porcas. Conforme demonstrado na Figura 5.27, a região em

questão é composta majoritariamente por valores elevados de probabilidade (*e.g.*, 90,0 %) e aparentemente apresenta baixa variabilidade espacial. Isso resulta, consequentemente, em áreas previstas de dano similares em diferentes limiares de probabilidade.

Conforme demonstrado pelos resultados obtidos, o modelo em questão não apresentou capacidade satisfatória para localizar adequadamente as quatro porcas adicionadas, potencialmente em função da falta de resolução espacial. Nesse contexto, a incorporação de um número maior de pastilhas piezelétricas distribuídas em outros setores do painel aeronáutico – preferencialmente organizadas em uma malha regular – e que apresentassem valores de CCD inferiores aos respectivos limiares de detecção poderia contribuir significativamente para o aumento da resolução espacial do modelo preditivo.

Essa configuração pode promover a redução da proporção de sensores classificados na categoria “com dano”, proporcionando, por conseguinte, uma representação mais equilibrada entre as classes da variável indicadora. Dessa forma, o modelo derivado da KI seria capaz de discriminar com maior precisão as regiões efetivamente afetadas, minimizando a superestimação da área danificada e aprimorando a acurácia na localização dos danos.

CAPÍTULO VI

AVALIAÇÃO INTEGRATIVA DOS MODELOS

A análise dos resultados de ambos os experimentos indica que os modelos de probabilidade derivados da KI apresentaram uma capacidade geral satisfatória para a localização de danos. Ademais, conforme observado nos resultados obtidos, a aderência dos modelos aos dados amostrados foi preservada, como indicado pela correspondência entre os valores previstos e os valores nos sensores (esferas ou círculos coloridos nas figuras).

A análise comparativa entre as diferentes abordagens para a seleção de intervalos de frequência demonstrou que a metodologia baseada na sensibilidade ao dano apresentou desempenho superior. Essa abordagem se destacou por produzir mapas probabilísticos consistentemente mais compatíveis com a localização real das porcas, mesmo em condições com múltiplos danos. Em contraposição, as demais abordagens frequentemente resultaram em regiões de falsos negativos, decorrentes do arranjo inadequado dos valores de CCD nas estruturas, em que sensores próximos aos danos apresentaram valores de CCD geralmente inferiores aos obtidos nos sensores mais distantes, resultando, portanto, nos desvios observados nos modelos preditivos.

Ademais, a análise da mediana das distâncias euclidianas nas três abordagens aplicadas para a seleção do intervalo de frequência na placa de alumínio (Fig. 6.1) indica que a distâncias exibidas pela metodologia baseada na sensibilidade ao dano foram geralmente menores que aquela obtidas nas demais abordagens, principalmente em condições com múltiplos danos. Conforme demonstrado na Fig. 6.1, somente na configuração com uma única porca, as distâncias exibidas pela abordagem baseada no número de picos foram inferiores àquelas obtidas na abordagem baseada na sensibilidade ao dano.

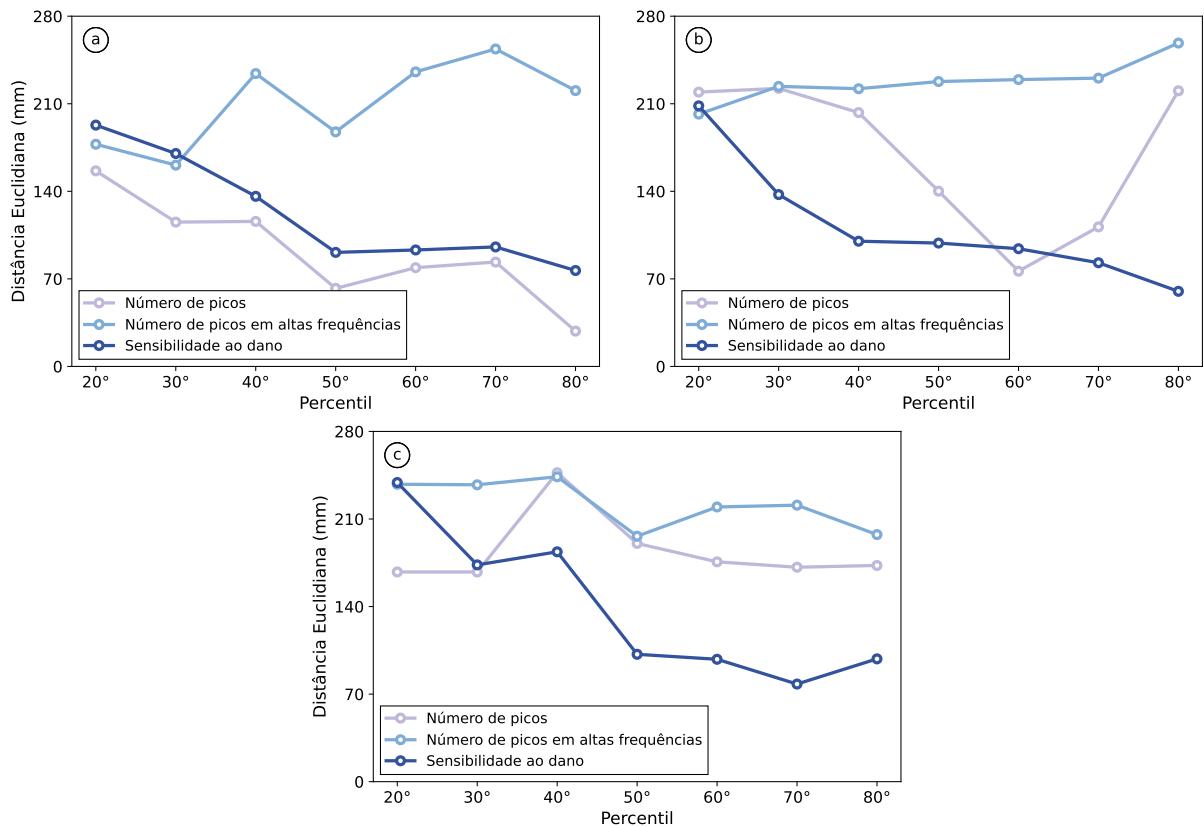


Figura 6.1: Mediana das distâncias euclidianas para a placa de alumínio em todas as condições de dano: (a) com uma porca; (b) com duas porcas; e (c) com três porcas.

Conforme demonstrado na Fig. 6.1, os resultados obtidos a partir da abordagem baseada na sensibilidade ao dano também indicam uma redução consistente das distâncias euclidianas à medida que o patamar de corte aumenta. Tal comportamento não é observado nos resultados obtidos por meio das demais abordagens. Em contraste, observa-se uma tendência de aumento geral das distâncias euclidianas nas demais abordagens, sobretudo na metodologia baseada no número de picos em altas frequências.

A redução progressiva das distâncias euclidianas com o aumento do limiar de corte – observada nos resultados obtidos da metodologia baseada na sensibilidade ao dano – pode ser consequência de dois comportamentos fundamentais e eventualmente interconectados: (1) a contração progressiva dos domínios de alta probabilidade com o aumento do limiar de corte; e (2) o condicionamento destes domínios à vizinhança imediata das porcas. Ambos podem direcionar a localização efetiva de danos em altos limiares de corte (*e.g.*, percentis 70 a 80), os quais tendem a capturar somente os valores mais elevados de métrica de dano, os quais estariam limitados aos sensores localizados proximamente aos danos.

Constata-se que o último fenômeno não se manifesta nas demais abordagens. Essa observa-

ção pode ser comprovada, por exemplo, nos mapas de probabilidade das Figs. 4.21, 4.22 e 4.23, nos quais os domínios de alta probabilidade ocorreram deslocados na posição real das porcas, resultando, consequentemente, nos elevados valores de distâncias euclidianas observados na Fig. 6.1.

Ademais, conforme demonstrado na Fig. 6.1, a metodologia baseada no número de picos em altas frequências apresentou o pior rendimento entre as abordagens investigadas. Isso é evidenciado pelo fato de que essa abordagem exibiu os maiores valores de distâncias euclidianas, os quais permaneceram consistentemente elevados em todos os limiares de corte. Esse comportamento ocorreu em decorrência da distribuição inadequada de valores de CCD na estrutura, com valores elevados distantes das porcas, e valores mais baixos atribuídos a pastilhas piezelétricas mais próximas das porcas.

A obtenção de arranjos espaciais de valores de CCD mais compatíveis com a distribuição espacial dos danos nas estruturas, ou seja, com valores de CCD mais elevados nas proximidades das porcas, e valores mais baixos atribuídos a sensores mais distantes dos danos, observados especialmente na abordagem baseada na sensibilidade ao dano, pode ser atribuída à personalização das faixas de frequência por sensor, maximizando a resposta individual ao dano.

Essas observações indicam, portanto, que o desempenho do método empregado para a detecção dos danos constitui um fator crítico para a obtenção de modelos derivados da KI que forneçam subsídios para a localização precisa dos danos presentes na estrutura. Entre as abordagens investigadas, a metodologia baseada na sensibilidade ao dano parece ser a mais adequada para a localização de danos por meio da KI. Entretanto, desvios ainda são observados nos modelos resultantes.

Nessa perspectiva, a metodologia proposta pode ser aprimorada por meio da aquisição de dados de alta frequência do espectro, e selecionando-se o intervalo mais sensível para cada sensor individualmente, conforme a sua resposta específica às alterações estruturais. Tal estratégia fundamenta-se em três evidências principais: (1) a predominância da influência de componentes de alta frequência para danos localizados mais próximos aos sensores, enquanto danos mais distantes tendem a afetar mais significativamente os componentes de baixa frequência, conforme demonstrado por Yang e Divsholi (2010); (2) a redução progressiva da área de sensoriamento de pastilhas piezelétricas à medida que a frequência de excitação aumenta, favorecendo a detecção de danos em escala local (NA; LEE, 2012a; NA; LEE, 2012b; WANG *et al.*, 2022); e (3) a maior sensibilidade a danos estruturais observada em intervalos de frequência mais elevadas,

conforme relatado por [Wang, Song e Zhu \(2013\)](#), [Singh, Fakih e Malinowski \(2023\)](#) e [Sun et al. \(2024\)](#).

Outro aspecto importante que favorece a utilização da abordagem baseada na sensibilidade ao dano é o fato de que essa metodologia resultou, de forma consistente, em métricas de dano com distribuição espacial mais adequada para uso na KI. Esse aspecto foi particularmente evidente no experimento do painel aeronáutico, no qual somente por meio dessa abordagem, foi possível identificar a presença de correlação espacial das variáveis indicadoras em três das condições de dano avaliadas. Nas demais abordagens, tal continuidade espacial foi observada em apenas uma condição de dano, o que impediu a obtenção de modelos preditivos nas demais.

A impossibilidade de se obter modelos preditivos por meio da KI representa uma limitação de sua aplicação e é consequência de condições nas quais há homogeneidade excessiva dos dados obtidos dos sensores e/ou ocorrência de um arranjo espacial específico. Essas condições podem dificultar a detecção de padrões espaciais necessários para a modelagem de semivariogramas, inviabilizando, portanto, a geração de modelos por meio da KI.

Essa limitação pode ser abordada por meio de uma investigação aprofundada do comportamento dos parâmetros do modelo de semivariograma, principalmente o alcance, sob espaçamento variável entre pastilhas piezelétricas em diferentes cenários de dano. Tal análise poderia revelar padrões previamente despercebidos no alcance do semivariograma em função do espaçamento entre os sensores, fornecendo, assim, *insights* críticos para informar a geração de previsões baseadas em KI e, consequentemente, permitindo a automação do processo de localização de danos dentro do *framework* de KI.

Uma análise comparativa dos resultados obtidos pela KI com outra abordagem atual para localização de múltiplos danos ([SINGH; SOMAN; MALINOWSKI, 2024](#)) demonstra que ambos os *frameworks* são comparáveis em termos de exatidão na previsão dos danos.

No contexto do experimento da placa de alumínio, as distâncias registradas na condição com dois danos no 80º percentil corresponderam, no máximo, a 54,8 % do espaçamento entre os sensores. No painel aeronáutico, na condição com dois danos, foi possível obter centroides previstos com distâncias equivalentes a apenas 22,7 % do espaçamento entre os sensores. Em situação análoga, os desvios auferidos por [Singh, Soman e Malinowski \(2024\)](#) alcançaram 70,0 % do espaçamento entre os sensores.

Já no cenário com três danos, os resultados obtidos por [Singh, Soman e Malinowski \(2024\)](#) apontam para desvios equivalentes a 50,7 % do espaçamento entre os sensores. No experimento

da placa de alumínio, o modelo derivado da KI na abordagem baseada na sensibilidade ao dano, no 70º percentil, resultou em um desvio correspondente a 74,9 % do espaçamento entre os sensores. Contudo, é importante notar que a distância correlacionada com o último desvio é atribuída à incapacidade dos sensores próximos de detectar adequadamente a presença da porca, resultando, portanto, em um deslocamento do centroide previsto para uma posição mais distante da porca.

No experimento do painel aeronáutico, em uma condição análoga, a maior distância registrada correspondeu a 143,0 % do espaçamento médio entre os sensores. Entretanto, em tal condição, observou-se um deslocamento do centroide previsto, de modo que este não abrangeu a porca correspondente, em virtude da disposição inadequada dos valores de CCD na estrutura. Em contraposição, em condições de detecção adequada do dano, foi possível obter desvios tão menores quanto correspondentes a 9,3 % do espaçamento médio entre os sensores.

Adicionalmente, os resultados obtidos evidenciam que a disposição espacial das pastilhas piezelétricas, especialmente no que diz respeito às suas distâncias relativas em relação às porcas adicionadas, exerceu influência significativa sobre a confiabilidade dos modelos preditivos. Esse efeito foi particularmente notável no experimento conduzido com o painel aeronáutico, no qual a ausência de sensores piezelétricos nas proximidades da porca “B” comprometeu a acurácia na sua localização nos modelos probabilísticos obtidos. Além disso, a ausência de pastilhas piezelétricas em outras regiões do painel aeronáutico, distantes da janela, provocou a ocorrência de altos valores de probabilidade de dano distantes das posições atuais das porcas, decorrente dos próprios procedimentos de cálculo dos valores estimados pela KI, ao considerar as proporções das classes presentes, ou seja, ausência ou presença de dano.

Consequentemente, o aumento da disponibilidade de dados de sensores – seja por meio de um número mais significativo de sensores, como também indicado por [Shanker et al. \(2011\)](#), ou por meio de estratégias de implantação espacial otimizadas, como proposto por [Capellari, Chatzi e Mariani \(2018\)](#), [Hou et al. \(2019\)](#) e [Ghasemzadeh e Kefal \(2022\)](#) – tem o potencial de melhorar substancialmente a capacidade preditiva do método.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

O estudo realizado contemplou a localização de múltiplos danos em duas estruturas: uma placa de alumínio e um painel aeronáutico, onde a última representou a aplicação da técnica em uma estrutura complexa. Os resultados obtidos mostraram que os modelos derivados da KI capturaram adequadamente os padrões de correlação espacial dos valores de CCD exibidos pelos sensores.

Entretanto, conforme demonstrado no estudo, a confiabilidade dos modelos probabilísticos obtidos por meio da KI é fortemente condicionada à eficácia da metodologia aplicada na detecção de danos. Inconsistências na distribuição espacial dos valores de CCD na estrutura, tais como a ocorrência de valores elevados de CCD em pastilhas piezelétricas situadas distantes dos danos, ou de valores baixos de CCD atribuídos a pastilhas piezelétricas nas proximidades dos danos, propagam-se no modelo probabilístico, comprometendo a qualidade do modelo.

Em condições adequadas de detecção de dano, os resultados demonstraram compatibilidade com, e em certos cenários superaram, outras abordagens atuais para localização de múltiplos danos. No experimento com a placa de alumínio, foi possível obter desvios tão mínimos quanto correspondentes a 16,7 % do espaçamento entre sensores. No experimento do painel aeronáutico, apesar da disposição irregular da malha de sensores adotada, foi possível obter desvios correspondentes a apenas 9,3 % do espaçamento médio entre os sensores. Portanto, esses resultados demonstram a robustez do *framework* proposto.

A análise dos modelos preditivos obtidos de três metodologias distintas para a seleção de intervalos de frequência demonstrou que aquela baseada na sensibilidade ao dano apresentou um desempenho superior. Portanto, os resultados indicam que essa abordagem pode ser a mais adequada no contexto do *framework* proposto. Entretanto, pesquisas futuras são necessárias com o intuito refinar a abordagem de seleção de intervalos de frequência – e, consequentemente, de detecção de danos – proposta, o que pode aumentar substancialmente a confiabilidade dos modelos obtidos por KI.

Adicionalmente, o estudo indicou que o espaçamento relativo entre as pastilhas piezelétricas

e o arranjo espacial das mesmas na estrutura também têm impacto significativo na confiabilidade dos modelos probabilísticos. Recomenda-se, portanto, que investigações futuras contemplem a avaliação de arranjos alternativos de sensores, como a aplicação de malhas de sensores mais densas ou de malhas regulares, especialmente em estruturas de geometria complexa.

Neste estudo, a investigação experimental, em razão de seu caráter exploratório, não incluiu uma análise sistemática dos efeitos associados ao emprego de transdutores de diferentes tipos e dimensões sobre os modelos preditivos obtidos por meio da KI. Apesar de trabalhos anteriores indicarem a ausência de efeitos do formato do transdutor na detecção de danos, faz-se necessário o desenvolvimento de investigações complementares no contexto da localização de danos por KI que abordem esse aspecto. Tais estudos podem fornecer subsídios para a consolidação de um sistema de monitoramento aplicável a condições reais de operação.

De forma complementar, o presente trabalho também não contemplou a avaliação do custo computacional associado à metodologia proposta, por se tratar de um aspecto que extrapola o escopo deste estudo de natureza inicial. Assim, torna-se necessária a realização de investigações futuras voltadas à quantificação do custo computacional, uma vez que esse fator constitui um requisito fundamental para o desenvolvimento e a implementação de sistemas autônomos de monitoramento estrutural.

Uma limitação do *framework* proposto, identificada no experimento do painel aeronáutico, refere-se à ausência de correlação espacial para o estabelecimento dos modelos dos semivariogramas, necessários para a obtenção dos modelos por meio da KI. Dessa forma, pesquisas futuras são necessárias para investigar eventuais padrões de comportamento dos parâmetros dos semivariogramas, especialmente o alcance, em função do espaçamento entre pastilhas piezelétricas, em diversos cenários de danos.

Por fim, a superação das limitações identificadas e a implementação dos direcionamentos propostos – notadamente o refinamento da detecção de danos, a otimização dos arranjos de sensores e a investigação aprofundada dos semivariogramas – são imperativas para a consolidação de um *framework* de localização de danos baseado em KI. Tal avanço não apenas elevará substancialmente a confiabilidade e a precisão dos modelos preditivos, mas também pavimentará o caminho para a sua aplicação em larga escala em ambientes industriais complexos, catalisando o desenvolvimento de soluções robustas e orientadas a dados para o monitoramento da integridade estrutural em cenários reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABZALOV, M. **Applied Mining Geology**. 1. ed. Cham: Springer, 2016. DOI [10.1007/978-3-319-39264-6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6).

AI, D.; DU, L.; LI, H.; ZHU, H. Corrosion damage identification for reinforced concrete beam using embedded piezoelectric transducer: Numerical simulation. **Measurement**, v. 192, p. 110925, 2022. DOI [10.1016/j.measurement.2022.110925](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110925).

AI, D.; MO, F.; CHENG, J.; DU, L. Deep learning of electromechanical impedance for concrete structural damage identification using 1-D convolutional neural networks. **Construction and Building Materials**, v. 385, p. 131423, 2023. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2023.131423](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131423).

AI, D.; MO, F.; HAN, Y.; WEN, J. Automated identification of compressive stress and damage in concrete specimen using convolutional neural network learned electromechanical admittance. **Engineering Structures**, v. 259, p. 114176, 2022. DOI [10.1016/j.engstruct.2022.114176](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114176).

AI, D.; ZHANG, D.; ZHU, H. A damage localization approach for concrete structure using discrete wavelet transform of electromechanical admittance of bonded PZT transducers. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 218, p. 111531, 2024. DOI [10.1016/j.ymssp.2024.111531](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111531).

AI, D.; ZHANG, D.; ZHU, H. Damage localization on reinforced concrete slab structure using electromechanical impedance technique and probability-weighted imaging algorithm. **Construction and Building Materials**, v. 424, p. 135824, 2024. ISSN 0950-0618. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2024.135824](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135824).

ALAZZAWI, O.; WANG, D. Deep convolution neural network for damage identifications based on time-domain PZT impedance technique. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 35, p. 1809–1819, 2021. DOI [10.1007/s12206-021-0401-y](https://doi.org/10.1007/s12206-021-0401-y).

ANGELI, G. M.; NAOUM, M. C.; PAPADOPOULOS, N. A.; KOSMIDOU, P.-M. K.; SAPIDIS, G. M.; KARAYANNIS, C. G.; CHALIORIS, C. E. Advanced Structural Technologies Implementation in Designing and Constructing RC Elements with C-FRP Bars, Protected Through SHM Assessment. **Fibers**, v. 12, n. 12, p. 108, 2024. DOI [10.3390/fib12120108](https://doi.org/10.3390/fib12120108).

ANTUNES, R. A.; CORTEZ, N. E.; GIANESINI, B. M.; VIEIRA FILHO, J. Modeling, simulation, experimentation, and compensation of temperature effect in impedance-based shm systems applied to steel pipes. **Sensors**, v. 19, n. 12, p. 2802, 2019. DOI [10.3390/s19122802](https://doi.org/10.3390/s19122802).

ARMSTRONG, M. **Basic Linear Geostatistics**. 1. ed. Heidelberg: Springer, 1998. DOI [10.1007/978-3-642-58727-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58727-6).

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 2, p. 173–186, 2012. DOI [10.1177/1475921711414234](https://doi.org/10.1177/1475921711414234).

BARAL, S.; NEGI, P.; ADHIKARI, S.; BHALLA, S. Temperature Compensation for Reusable Piezo Configuration for Condition Monitoring of Metallic Structures: EMI Approach. **Sensors**, v. 23, n. 3, p. 1587, 2023. DOI [10.3390/s23031587](https://doi.org/10.3390/s23031587).

BHALLA, S.; SOH, C.-K. Electro-Mechanical Impedance Technique. In: SOH, C.-K.; YANG, Y.; BHALLA, S. (Ed.). **Advanced Topics in Science and Technology in China**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, (Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics). cap. 2, p. 17–51.

BHARATHI PRIYA, C.; LIKHITH REDDY, A.; RAMA RAO, G. V.; GOPALAKRISHNAN, N.; MOHAN RAO, A. R. Low frequency and boundary condition effects on impedance based damage identification. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 2, p. 9–13, 2014. DOI [10.1016/j.csndt.2014.05.001](https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.05.001).

CAMPOS, F. d. S.; CASTRO, B. A. d.; BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. a.; ULSON, J. A. C.; ANDREOLI, A. L. Feature extraction approach insensitive to temperature variations for impedance-based structural health monitoring. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 4, p. 536–543, 2019. DOI [10.1049/iet-smt.2018.5226](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5226).

CAO, P.; QI, S.; TANG, J. Structural damage identification using piezoelectric impedance measurement with sparse inverse analysis. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 27, n. 3, p. 035020, mar. 2018. DOI [10.1088/1361-665X/aaacba](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaacba).

CAPELLARI, G.; CHATZI, E.; MARIANI, S. Cost–Benefit Optimization of Structural Health Monitoring Sensor Networks. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2174, 2018. DOI [10.3390/s18072174](https://doi.org/10.3390/s18072174).

CASTRO, B. A. de; BAPTISTA, F. G. aes; CIAMPA, F. New imaging algorithm for material damage localisation based on impedance measurements under noise influence. **Measurement**, v. 163, p. 107953, 2020. DOI [10.1016/j.measurement.2020.107953](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107953).

CHAUDHRY, Z. A.; JOSEPH, T.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. In: CHOPRA, I. (Ed.). **Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems**. [S.l.]: SPIE, 1995. v. 2443, p. 268–276. DOI [10.1117/12.208264](https://doi.org/10.1117/12.208264).

CHEN, D.; HUO, L.; SONG, G. EMI based multi-bolt looseness detection using series/parallel multi-sensing technique. **Smart Structures and Systems**, v. 25, n. 4, p. 423–432, 2020. DOI [10.12989/sss.2020.25.4.423](https://doi.org/10.12989/sss.2020.25.4.423).

CHERRIER, O.; SELVA, P.; POMMIER-BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. Damage localization map using electromechanical impedance spectrums and inverse distance weighting interpolation: Experimental validation on thin composite structures. **Structural Health Monitoring**, v. 12, n. 4, p. 311–324, 2013. DOI [10.1177/1475921713493343](https://doi.org/10.1177/1475921713493343).

CHILÈS, J.-P.; DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. DOI [10.1002/9781118136188](https://doi.org/10.1002/9781118136188).

CREALITY. **CR-Scan Ferret Pro 3D Scanner Quick Start Guide**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.creality.com/download/cr-scan-ferret-3d-scanner>>.

CRESSIE, N. Fitting variogram models by weighted least squares. **Mathematical Geology**, v. 17, p. 563–586, jul. 1985. DOI [10.1007/BF01032109](https://doi.org/10.1007/BF01032109).

de REZENDE, S. W. F.; BARELLA, B. P.; MOURA Jr., J. R. V. de; TSURUTA, K. M.; CAVALINI Jr., A. A.; STEFFEN Jr., V. ISHM for fault condition detection in rotating machines with deep learning models. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, p. 212, 2023. DOI [10.1007/s40430-023-04129-6](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04129-6).

- DESASSIS, N.; RENARD, D. Automatic Variogram Modeling by Iterative Least Squares: Univariate and Multivariate Cases. **Mathematical Geosciences**, v. 45, p. 453–470, 2013. DOI [10.1007/s11004-012-9434-1](https://doi.org/10.1007/s11004-012-9434-1).
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB**: Geostatistical Software Library and User's Guide. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1998.
- DEUTSCH, J.; DEUTSCH, M.; MARTIN, R.; BLACK, W.; ACORN, T.; BARNETT, R.; HADAVAND, M. **Pygeostat**. PyPI, 2021. Python package. Disponível em: <<https://pypi.org/project/pygeostat/1.1.1/>>.
- DING, J.; KANG, J.; ZHU, J.; CHEN, X. Damage Detection of Epoxied Joint Model in Precast Concrete Segmental Bridges Using PZT Technology. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 33, n. 3, p. 04020012, 2020. DOI [10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001123).
- DJEMANA, M.; HRAIRI, M.; AL JEROUDI, Y. Using Electromechanical Impedance and Extreme Learning Machine to Detect and Locate Damage in Structures. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, p. 39, 2017. DOI [10.1007/s10921-017-0417-5](https://doi.org/10.1007/s10921-017-0417-5).
- DJEMANA, M.; HRAIRI, M.; YATIM, N. H. M. Improving Electromechanical Impedance Damage Detection Under Varying Temperature. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 92, n. 1, p. 123–133, 2022. DOI [10.37934/arfnts.92.1.123133](https://doi.org/10.37934/arfnts.92.1.123133).
- DU, F.; WANG, G.; WENG, J.; FAN, H.; XU, C. High-Precision Probabilistic Imaging for Interface Debonding Monitoring Based on Electromechanical Impedance. **AIAA Journal**, v. 60, n. 7, p. 3950–3960, 2022. DOI [10.2514/1.J061577](https://doi.org/10.2514/1.J061577).
- DU, F.; WU, S.; WENG, J.; ZHANG, X.; XU, C.; SU, Z. A few-shot electromechanical impedance monitoring method based on a modified prototype network. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 32, n. 6, p. 064007, mai. 2023. DOI [10.1088/1361-665X/accf52](https://doi.org/10.1088/1361-665X/accf52).
- DU, F.; WU, S.; XU, C.; YANG, Z.; SU, Z. Electromechanical Impedance Temperature Compensation and Bolt Loosening Monitoring Based on Modified Unet and Multitask Learning. **IEEE Sensors Journal**, v. 23, n. 5, p. 4556–4567, 2023. DOI [10.1109/JSEN.2021.3132943](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3132943).
- ENGLUND, E.; SPARKS, A. **GEO-EAS 1.2.1 - GEOSTATISTICAL ENVIRONMENTAL ASSESSMENT SOFTWARE USER'S GUIDE**. [S.I.], 1991.
- FAN, X.; LI, J. Damage Identification in Plate Structures Using Sparse Regularization Based Electromechanical Impedance Technique. **Sensors**, v. 20, n. 24, p. 7069, 2020. DOI [10.3390/s20247069](https://doi.org/10.3390/s20247069).
- FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A low-cost electromechanical impedance-based shm architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 4, p. 391–402, 2011. DOI [10.1177/1475921710379518](https://doi.org/10.1177/1475921710379518).
- FREITAS, F. A.; JAFELICE, R. M.; da SILVA, J. W.; RABELO, D. d. S.; NOMELINI, Q. S. S.; MOURA JR., J. d. R. V. de; GALLO, C. A.; da CUNHA, M. J.; RAMOS, J. E. A new data normalization approach applied to the electromechanical impedance method using adaptive neuro-fuzzy inference system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, p. 475, 2021. DOI [10.1007/s40430-021-03186-z](https://doi.org/10.1007/s40430-021-03186-z).

GHASEMZADEH, M.; KEFAL, A. Sensor placement optimization for shape sensing of plates and shells using genetic algorithm and inverse finite element method. **Sensors**, v. 22, n. 23, p. 9252, 2022. DOI [10.3390/s22239252](https://doi.org/10.3390/s22239252).

GIANESINI, B. M.; CORTEZ, N. E.; ANTUNES, R. A.; VIEIRA FILHO, J. Method for removing temperature effect in impedance-based structural health monitoring systems using polynomial regression. **Structural Health Monitoring**, v. 20, n. 1, p. 202–218, 2021. DOI [10.1177/1475921720917126](https://doi.org/10.1177/1475921720917126).

GIURGIUTIU, V. **Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors**. 2. ed. Waltham: Elsevier, 2014. DOI [10.1016/C2013-0-00155-7](https://doi.org/10.1016/C2013-0-00155-7).

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Recent advancements in the electromechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE. In: REGELBRUGGE, M. E. (Ed.). **Smart Structures and Materials 1998: Smart Structures and Integrated Systems**. [S.l.]: SPIE, 1998. v. 3329, p. 536–547. DOI [10.1117/12.316923](https://doi.org/10.1117/12.316923).

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. DOI [10.1177/1475921705049752](https://doi.org/10.1177/1475921705049752).

GONÇALVES, D. R.; MOURA Jr., J. d. R. V. de; PEREIRA, P. E. C. MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA UTILIZANDO O MÉTODO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA. **HOLOS**, v. 2, p. 1–16, abr. 2020. DOI [10.15628/holos.2020.9480](https://doi.org/10.15628/holos.2020.9480).

GONÇALVES, D. R.; MOURA JR., J. d. R. V. de; PEREIRA, P. E. C.; MENDES, M. V. A.; DINIZ-PINTO, H. S. Indicator kriging for damage position prediction by the use of electromechanical impedance-based structural health monitoring. **Comptes Rendus. Mécanique**, Académie des sciences, Paris, v. 349, n. 2, p. 225–240, 2021. DOI [10.5802/crmeca.81](https://doi.org/10.5802/crmeca.81).

HAMZELOO, S. R.; BARZEGAR, M.; MOHSENZADEH, M. Damage Detection of L-Shaped Beam Structure with a Crack by Electromechanical Impedance Response: Analytical Approach and Experimental Validation. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 39, p. 47, 2020. DOI [10.1007/s10921-020-00692-3](https://doi.org/10.1007/s10921-020-00692-3).

HAQ, M.; BHALLA, S.; NAQVI, T. Fatigue damage and residual fatigue life assessment in reinforced concrete frames using PZT-impedance transducers. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103771, 2020. DOI [10.1016/j.cemconcomp.2020.103771](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103771).

HAQ, M.; BHALLA, S.; NAQVI, T. Fatigue damage monitoring of reinforced concrete frames using wavelet transform energy of PZT-based admittance signals. **Measurement**, v. 164, p. 108033, 2020. DOI [10.1016/j.measurement.2020.108033](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108033).

HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; van der WALT, S. J.; GOMMERS, R.; VIRTANEN, P.; COURNAPEAU, D.; WIESER, E. *et al.* Array programming with numpy. **Nature**, v. 585, p. 357–362, 2020. DOI <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

HE, C.; YANG, S.; LIU, Z.; WU, B. Damage Localization and Quantification of Truss Structure Based on Electromechanical Impedance Technique and Neural Network. **Shock and Vibration**, v. 2014, n. 1, p. 727404, 2014. DOI [10.1155/2014/727404](https://doi.org/10.1155/2014/727404).

HOU, R.; XIA, Y.; XIA, Q.; ZHOU, X. Genetic algorithm based optimal sensor placement for 11-regularized damage detection. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 26, n. 1, p. e2274, 2019. DOI [10.1002/stc.2274](https://doi.org/10.1002/stc.2274).

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. DOI [10.3390/s141019897](https://doi.org/10.3390/s141019897).

HUYNH, T.-C.; HOANG, N.-D.; PHAM, Q.-Q.; TRUONG, G. T.; NGUYEN, T.-T. Electromechanical admittance-based automatic damage assessment in plate structures via one-dimensional CNN-based deep learning models. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 18, p. 1730–1751, nov. 2024. DOI [10.1007/s11709-024-1125-8](https://doi.org/10.1007/s11709-024-1125-8).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JIANG, X.; ZHOU, W.; CHEN, X.; ZHANG, X.; XIE, J.; TANG, T.; ZHANG, Y.; YANG, Z. An Electromechanical Impedance-Based Imaging Algorithm for Damage Identification of Chemical Milling Stiffened Panel. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 2024, n. 1, p. 4554472, 2024. DOI [10.1155/2024/4554472](https://doi.org/10.1155/2024/4554472).

JIAO, L.-y.; LEI, H.-z. The application of improved genetic algorithm in fitting the spatial variogram. In: **Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology**. [S.l.: s.n.], 2011. v. 2, p. 1031–1036. DOI [10.1109/ICCSNT.2011.6182137](https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2011.6182137).

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. 4. ed. Londres: Academic Press Limited, 1989.

KAUR, H.; SINGLA, S. Non-Destructive testing to detect multiple cracks in reinforced concrete beam using electromechanical impedance technique. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1193–1199, 2022. DOI [10.1016/j.matpr.2022.04.175](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.175).

KHAYATAZAD, M.; LOCCUFIER, M.; DE WAELE, W. Electromechanical impedance-based measurements for damage detection and characterization in medium-thick plates. **Measurement**, v. 248, p. 116841, 2025. DOI [10.1016/j.measurement.2025.116841](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116841).

KIM, J.; WANG, K.-W. Electromechanical impedance-based damage identification enhancement using bistable and adaptive piezoelectric circuitry. **Structural Health Monitoring**, v. 18, n. 4, p. 1268–1281, 2019. DOI [10.1177/1475921718794202](https://doi.org/10.1177/1475921718794202).

KITANIDIS, P. K. **Introduction to Geostatistics**: Applications in hydrogeology. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. DOI [10.1017/CBO9780511626166](https://doi.org/10.1017/CBO9780511626166).

KRALOVEC, C.; SCHAGERL, M.; MAYR, M. Localization of damages by model-based evaluation of electro-mechanical impedance measurements. In: THE BRITISH INSTITUTE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING (BINDT). **9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018)**. NDT.net, 2018. (e-Journal of Nondestructive Testing, 11), p. 1–12. Disponível em: <<https://www.ndt.net/?id=23338>>.

LI, Z.; ZHANG, X.; CLARKE, K. C.; LIU, G.; ZHU, R. An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates. **Computers & Geosciences**, v. 120, p. 48–59, 2018. DOI [10.1016/j.cageo.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.011).

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, 1997. DOI [10.1177/1045389X9700800406](https://doi.org/10.1177/1045389X9700800406).

LIAO, X.; YAN, Q.; QIAO, M.; XIONG, Z.; LI, B.; ZHANG, C. Deep learning-assisted damage diagnosis of tunnel lining segments using GAN-augmented electromechanical impedance data. **NDT & E International**, v. 157, p. 103518, 2026. DOI [10.1016/j.ndteint.2025.103518](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2025.103518).

LIN, T.-H.; LU, Y.-C.; HUNG, S.-L. Locating Damage Using Integrated Global-Local Approach with Wireless Sensing System and Single-Chip Impedance Measurement Device. **The Scientific World Journal**, v. 2014, n. 1, p. 729027, 2014. DOI [10.1155/2014/729027](https://doi.org/10.1155/2014/729027).

LUO, Z.; DENG, H.; LI, L.; LUO, M. A simple PZT transducer design for electromechanical impedance (EMI)-based multi-sensing interrogation. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 11, p. 235–249, 2021. DOI [10.1007/s13349-020-00449-6](https://doi.org/10.1007/s13349-020-00449-6).

MAGLIANO, A.; NADDEO, F.; NADDEO, A. A user-friendly system for identifying the optimal insertion direction and to choose the best pedicle screws for patient-specific spine surgery. **Heliyon**, v. 10, n. 4, p. e26334, 2024. DOI [10.1016/j.heliyon.2024.e26334](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26334).

MARTINS, L. G. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V.; PALOMINO, L. V.; RADE, D. A. Architecture of a remote impedance-based structural health monitoring system for aircraft applications. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. spe, p. 393–400, 2012. DOI [10.1590/S1678-58782012000500008](https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000500008).

MARTOWICZ, A.; ROSIEK, M. Electromechanical impedance method. In: STEPINSKI, T.; UHL, T.; STASZEWSKI, W. (Ed.). **Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. cap. 6, p. 141–176.

MARUO, I. I. C.; GIACHERO, G. d. F.; STEFFEN JUNIOR, V.; FINZI NETO, R. M. Electromechanical impedance - based structural health monitoring instrumentation system applied to aircraft structures and employing a multiplexed sensor array. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, n. 3, p. 294–306, 2015. DOI [10.5028/jatm.v7i3.447](https://doi.org/10.5028/jatm.v7i3.447).

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 12 1963. DOI [10.2113/gsecongeo.58.8.1246](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246).

MEHER, U.; MISHRA, S. K.; SUNNY, M. R. Impedance-based looseness detection of bolted joints using artificial neural network: An experimental study. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 29, n. 10, p. e3049, 2022. DOI [10.1002/stc.3049](https://doi.org/10.1002/stc.3049).

MEHER, U.; RABIUS, S. M. Localization and quantification of delamination/disbond inside a composite lap-joint using novel cross and drive point mechanical impedance based feature. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 220, p. 111661, 2024. DOI [10.1016/j.ymssp.2024.111661](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111661).

NA, S.; LEE, H. K. Resonant frequency range utilized electro-mechanical impedance method for damage detection performance enhancement on composite structures. **Composite Structures**, v. 94, n. 8, p. 2383–2389, 2012. DOI [10.1016/j.compstruct.2012.02.022](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.02.022).

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**, IOP Publishing, v. 21, n. 8, p. 085024, jul. 2012. DOI [10.1088/0964-1726/21/8/085024](https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/8/085024).

NA, S.; LEE, H. K. Neural network approach for damaged area location prediction of a composite plate using electromechanical impedance technique. **Composites Science and Technology**, v. 88, p. 62–68, 2013. DOI [10.1016/j.compscitech.2013.08.019](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.019).

NAIDU, A. S. K. **Structural damage identification with admittance signatures of smart PZT transducers**. Tese (Doutorado) — Nanyang Technological University, Singapura, 2004. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10356/12045>>.

NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Identifying Damage Location with Admittance Signatures of Smart Piezo-Transducers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 15, n. 8, p. 627–642, 2004. DOI [10.1177/1045389X04043269](https://doi.org/10.1177/1045389X04043269).

NGUYEN, T.-T.; TA, Q.-B.; HO, D.-D.; KIM, J.-T.; HUYNH, T.-C. A method for automated bolt-loosening monitoring and assessment using impedance technique and deep learning. **Developments in the Built Environment**, v. 14, p. 100122, 2023. DOI [10.1016/j.dibe.2023.100122](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100122).

NOMELINI, Q. S. S.; da SILVA, J. W.; GALLO, C. A.; FINZI NETO, R. M.; TSURUTA, K. M.; MOURA JR., J. d. R. V. de. Non-parametric Inference Applied to Damage Detection in the Electromechanical Impedance-based Health Monitoring. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 7, n. 9, p. 73–79, set. 2020. DOI [10.22161/ijaers.79.9](https://doi.org/10.22161/ijaers.79.9).

OLEA, R. A. A six-step practical approach to semivariogram modeling. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 20, p. 307–318, jul. 2006. DOI [10.1007/s00477-005-0026-1](https://doi.org/10.1007/s00477-005-0026-1).

OLIVEIRA, D. C.; CHAVARETTE, F. R.; LOPES, M. L. M. Damage diagnosis in an isotropic structure using an artificial immune system algorithm. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, p. 485, 2019. DOI [10.1007/s40430-019-1971-9](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1971-9).

PALOMINO, L. V. **Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, jul. 2012.

PALOMINO, L. V.; STEFFEN Jr., V.; FINZI NETO, R. M. Probabilistic neural network and fuzzy cluster analysis methods applied to impedance-based shm for damage classification. **Shock and Vibration**, v. 2014, n. 1, p. 401942, 2014. DOI [10.1155/2014/401942](https://doi.org/10.1155/2014/401942).

PEREIRA, P. E. C.; de REZENDE, S. W. F.; FERNANDES, H. C.; MOURA JR., J. d. R. V. de; FINZI NETO, R. M. On damage location techniques and future prospects for industrial applications utilizing the electromechanical impedance method: a systematic review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 46, p. 311, 2024. DOI [10.1007/s40430-024-04916-9](https://doi.org/10.1007/s40430-024-04916-9).

PEREIRA, P. E. C.; de REZENDE, S. W. F.; MOURA JR., J. d. R. V. de; FINZI NETO, R. M. SGS method applied to damage location and uncertainty modeling for sensor grid in the ISHM. **Comptes Rendus. Mécanique**, Académie des sciences, Paris, v. 352, p. 19–37, 2024. DOI [10.5802/crmeca.239](https://doi.org/10.5802/crmeca.239).

- PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. **Geostatistical Reservoir Modeling**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2014. DOI [10.1093/oso/9780195138061.001.0001](https://doi.org/10.1093/oso/9780195138061.001.0001).
- PYRCZ, M. J.; KUPENKO, A.; LIU, W.; GIGLIOTTI, A. E. **GeostatsPy: Open-source Spatial Data Analytics and Geostatistics Python Package**. PyPI, 2022. Python package. Disponível em: <<https://pypi.org/project/geostatspy/0.0.25/>>.
- QIU, H.; LI, F. Bolt looseness monitoring based on damping measurement by using a quantitative electro-mechanical impedance method. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 31, n. 9, p. 095022, set. 2022. DOI [10.1088/1361-665X/ac80e1](https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac80e1).
- RAVICHANDRAN, J.; PRANAVI, K.; PARAMANATHAN, P. Construction of six sigma-based control chart for interval-valued data. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, Taylor & Francis, v. 54, n. 6, p. 2175–2192, 2025. DOI [10.1080/03610918.2024.2313675](https://doi.org/10.1080/03610918.2024.2313675).
- REMY, N. S-GeMS: The Stanford Geostatistical Modeling Software: A tool for new algorithms development. In: LEUANGTHONG, O.; DEUTSCH, C. V. (Ed.). **Geostatistics Banff 2004**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 865–871. DOI [10.1007/978-1-4020-3610-1_89](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_89).
- REMY, N.; BOUCHER, A.; WU, J. **Applied Geostatistics with SGeMS**: A User's Guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. DOI [10.1017/CBO9781139150019](https://doi.org/10.1017/CBO9781139150019).
- ROCHA, S. S.; PITOMBO, C. S.; COSTA, L. H. M. aes; MARQUES, S. de F. Applying optimization algorithms for spatial estimation of travel demand variables. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 10, p. 100369, 2021. DOI [10.1016/j.trip.2021.100369](https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100369).
- ROSS, S. M. Distributions of sampling statistics. In: ROSS, S. M. (Ed.). **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. 5 ed.. ed. Boston: Academic Press, 2014. p. 207–233. DOI [10.1016/B978-0-12-394811-3.50006-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394811-3.50006-X).
- ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2014. DOI [10.1007/978-1-4020-5717-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5).
- SAKHRIA, B.; HAMAIDI, B.; DJEMANA, M.; BENHASSINE, N. Harnessing neural networks for precise damage localization in photovoltaic solar via impedance-based structural health monitoring. **Electrical Engineering**, v. 107, p. 3229–3245, 2025. DOI [10.1007/s00202-024-02700-5](https://doi.org/10.1007/s00202-024-02700-5).
- SAŁACIŃSKI, T.; CHRZANOWSKI, J.; CHMIELEWSKI, T. Statistical Process Control Using Control Charts with Variable Parameters. **Processes**, v. 11, n. 9, p. 2744, 2023. DOI [10.3390/pr11092744](https://doi.org/10.3390/pr11092744).
- SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. **Analytical Chemistry**, ACS Publications, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. DOI [10.1021/ac60214a047](https://doi.org/10.1021/ac60214a047).
- SEIM, A.; ANDERSEN, B.; SANDBERG, W. S. Statistical Process Control as a Tool for Monitoring Nonoperative Time. **Anesthesiology**, v. 105, n. 2, p. 370–380, 2006. DOI [10.1097/00000542-200608000-00021](https://doi.org/10.1097/00000542-200608000-00021).
- SELVA, P.; CHERRIER, O.; BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. **Engineering Structures**, v. 56, p. 794–804, 2013. DOI [10.1016/j.engstruct.2013.05.025](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.025).

SHANKER, R.; BHALLA, S.; GUPTA, A.; KUMAR, M. P. Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, n. 16, p. 1841–1856, 2011. DOI [10.1177/1045389X11414219](https://doi.org/10.1177/1045389X11414219).

SIKDAR, S.; SINGH, S. K.; MALINOWSKI, P.; OSTACHOWICZ, W. Electromechanical impedance based debond localisation in a composite sandwich structure. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 33, n. 12, p. 1487–1496, 2022. DOI [10.1177/1045389X211057225](https://doi.org/10.1177/1045389X211057225).

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. DOI [10.1017/CBO9780511545993](https://doi.org/10.1017/CBO9780511545993).

SINGH, A.; PARIHAR, H. S.; SHANKER, R. Evaluation of threshold level of change in impedance signature for incipient, moderate and severe damages in structural system. **Procedia Structural Integrity**, v. 70, p. 580–587, 2025. DOI [10.1016/j.prostr.2025.07.093](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.07.093).

SINGH, S. K.; FAKIH, M. A.; MALINOWSKI, P. H. Damage detection and localization based on different types of actuators using the electromechanical impedance method in 3D-printed material. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 32, n. 11, p. 115004, set. 2023. DOI [10.1088/1361-665X/acfa7e](https://doi.org/10.1088/1361-665X/acfa7e).

SINGH, S. K.; MALINOWSKI, P. H. An innovative data-driven probabilistic approach for damage detection in Electromechanical Impedance Technique. **Composite Structures**, v. 295, p. 115808, 2022. DOI [10.1016/j.compstruct.2022.115808](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115808).

SINGH, S. K.; SOMAN, R.; WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P. A Variable Data Fusion Approach for Electromechanical Impedance-Based Damage Detection. **Sensors**, v. 20, n. 15, p. 4204, 2020. DOI [10.3390/s20154204](https://doi.org/10.3390/s20154204).

SINGH, S. K.; SOMAN, R. N.; MALINOWSKI, P. H. A novel multi-damage localization method for polymers and composites based on electromechanical impedance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 216, p. 111508, 2024. DOI [10.1016/j.ymssp.2024.111508](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111508).

SLEIMAN, H. C.; MOREIRA, M. H.; TENGATTINI, A.; DAL PONT, S. From tomographic imaging to numerical simulations: an open-source workflow for true morphology mesoscale FE meshes. **RILEM Technical Letters**, v. 8, p. 158–164, 2024. DOI [10.21809/rilemtechlett.2023.184](https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.184).

SOH, C. K.; TSENG, K. K.-H.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 9, n. 4, p. 533, ago. 2000. DOI [10.1088/0964-1726/9/4/317](https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/4/317).

SOLTANI-MOHAMMADI, S.; SAFA, M. A simulated annealing based optimization algorithm for automatic variogram model fitting. **Archives of Mining Sciences**, v. 61, n. 3, 2016. DOI [10.1515/amsc-2016-0045](https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0045).

SOMAN, R.; SINGH, S. K.; MALINOWSKI, P. Damage localization using electromechanical impedance technique based on inverse implementation. **Structural Health Monitoring**, v. 22, n. 5, p. 3373–3384, 2023. DOI [10.1177/14759217231152412](https://doi.org/10.1177/14759217231152412).

SOMAN, R.; SINGH, S. K.; WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P. Development of robust metric based on cumulative electrical power for electromechanical impedance based structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 29, n. 11, p. 115047, out. 2020. DOI [10.1088/1361-665X/abbc78](https://doi.org/10.1088/1361-665X/abbc78).

SULLIVAN, C. B.; KASZYNSKI, A. A. Pyvista: 3d plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the visualization toolkit (vtk). **Journal of Open Source Software**, The Open Journal, v. 4, n. 37, p. 1450, 2019. DOI [10.21105/joss.01450](https://doi.org/10.21105/joss.01450).

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, n. 1, p. 134–139, 1995. DOI [10.1177/1045389X9500600117](https://doi.org/10.1177/1045389X9500600117).

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z. A.; ROGERS, C. A.; MAJMUNDAR, M.; LIANG, C. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. In: CHOPRA, I. (Ed.). **Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems**. [S.l.]: SPIE, 1995. v. 2443, p. 236–247. DOI [10.1117/12.208261](https://doi.org/10.1117/12.208261).

SUN, R.; LU, Y.; LIU, G.; DI, J.; ZHANG, Z.; QIN, F. Damage identification of steel-ECC composite deck incorporating piezoelectric impedance methodology and hierarchical clustering analysis. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 24, p. 187, 2024. DOI [10.1007/s43452-024-00999-2](https://doi.org/10.1007/s43452-024-00999-2).

The pandas development team. **pandas-dev/pandas: Pandas**. [S.l.]: Zenodo, 2023. DOI [10.5281/zenodo.7549438](https://doi.org/10.5281/zenodo.7549438).

TINOCO, H. A.; ROBLEDO-CALLEJAS, L.; MARULANDA, D. J.; SERPA, A. L. Damage detection in plates using the electromechanical impedance technique based on decoupled measurements of piezoelectric transducers. **Journal of Sound and Vibration**, v. 384, p. 146–162, 2016. DOI [10.1016/j.jsv.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.011).

TSENG, K. K.; WANG, L. Smart piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 13, n. 5, p. 1017, jul. 2004. DOI [10.1088/0964-1726/13/5/006](https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/006).

TSENG, K. K.-H.; NAIDU, A. S. K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 11, n. 3, p. 317, mai. 2002. DOI [10.1088/0964-1726/11/3/301](https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/3/301).

VENSON, G. G.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; CAVALINI Jr., A. A.; STEFFEN Jr., V. The use of Hurst exponent in impedance-based structural health monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, p. 536, 2022. DOI [10.1007/s40430-022-03838-8](https://doi.org/10.1007/s40430-022-03838-8).

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; BUROVSKI, E.; PETERSON, P. *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, p. 261–272, 2020. DOI [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2).

WANG, D.; SONG, H.; ZHU, H. Numerical and experimental studies on damage detection of a concrete beam based on PZT admittances and correlation coefficient. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 564–574, 2013. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2013.08.074](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.074).

WANG, F.; CHEN, Z.; SONG, G. Monitoring of multi-bolt connection looseness using entropy-based active sensing and genetic algorithm-based least square support vector machine. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 136, p. 106507, 2020. DOI [10.1016/j.ymssp.2019.106507](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106507).

WANG, L.; YUAN, B.; XU, Z.; SUN, Q. Synchronous detection of bolts looseness position and degree based on fusing electro-mechanical impedance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 174, p. 109068, 2022. DOI [10.1016/j.ymssp.2022.109068](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109068).

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

YAN, W.; WANG, J.; CHEN, W. Q. Delamination assessment of a laminated composite beam using distributed piezoelectric sensor/actuator. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 20, n. 7, p. 075011, jun. 2011. DOI [10.1088/0964-1726/20/7/075011](https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/7/075011).

YANG, H.-J.; LI, C.-I. Nonparametric control limits incorporating exceedance probability criterion for statistical process monitoring with commonly employed small to moderate sample sizes. **Quality Engineering**, Taylor & Francis, v. 37, n. 1, p. 145–161, 2025. DOI [10.1080/08982112.2024.2363828](https://doi.org/10.1080/08982112.2024.2363828).

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. DOI [10.3390/s101211644](https://doi.org/10.3390/s101211644).

YU, H.; GUO, C.; LI, N.; LU, S. Research on bolt looseness monitoring based on electromechanical impedance transmissibility technology. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 32, n. 9, p. 095009, jul. 2023. DOI [10.1088/1361-665X/ace813](https://doi.org/10.1088/1361-665X/ace813).

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 12, n. 10, p. 709–718, 2001. DOI [10.1177/104538901320560355](https://doi.org/10.1177/104538901320560355).

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electromechanical Impedance Modeling. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of Structural Health Monitoring**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2009. cap. 3, p. 1–19. DOI [10.1002/9780470061626.shm003](https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm003).

ZHANG, J.; ZHANG, C.; XIAO, J.; JIANG, J. A PZT-Based Electromechanical Impedance Method for Monitoring the Soil Freeze–Thaw Process. **Sensors**, v. 19, n. 5, p. 1107, 2019. DOI [10.3390/s19051107](https://doi.org/10.3390/s19051107).

ZHANG, Y.; ZHOU, K.; TANG, J. Piezoelectric impedance-based high-accuracy damage identification using sparsity conscious multi-objective optimization inverse analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 209, p. 111093, 2024. DOI [10.1016/j.ymssp.2023.111093](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111093).

ZHU, J.; QING, X.; LIU, X.; WANG, Y. Electromechanical impedance-based damage localization with novel signatures extraction methodology and modified probability-weighted algorithm. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 146, p. 107001, 2021. DOI [10.1016/j.ymssp.2020.107001](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107001).

ZHU, J.; WANG, Y.; QING, X. A real-time electromechanical impedance-based active monitoring for composite patch bonded repair structure. **Composite Structures**, v. 212, p. 513–523, 2019. DOI [10.1016/j.compstruct.2019.01.035](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.035).

APÊNDICE A

INTERVALOS DE FREQUÊNCIA: PLACA DE ALUMÍNIO

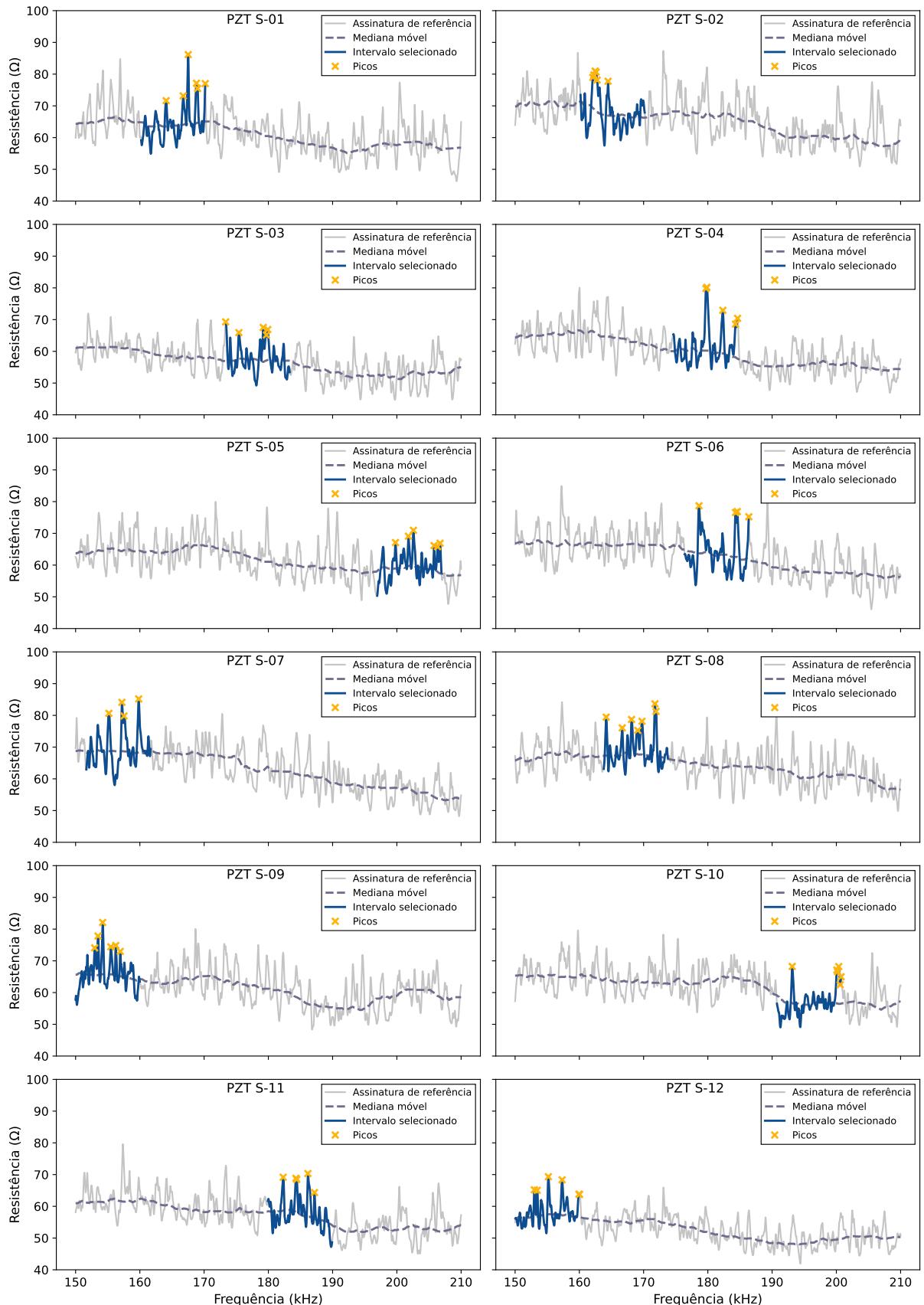


Figura A.1: Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os resultados se referem à placa de alumínio.

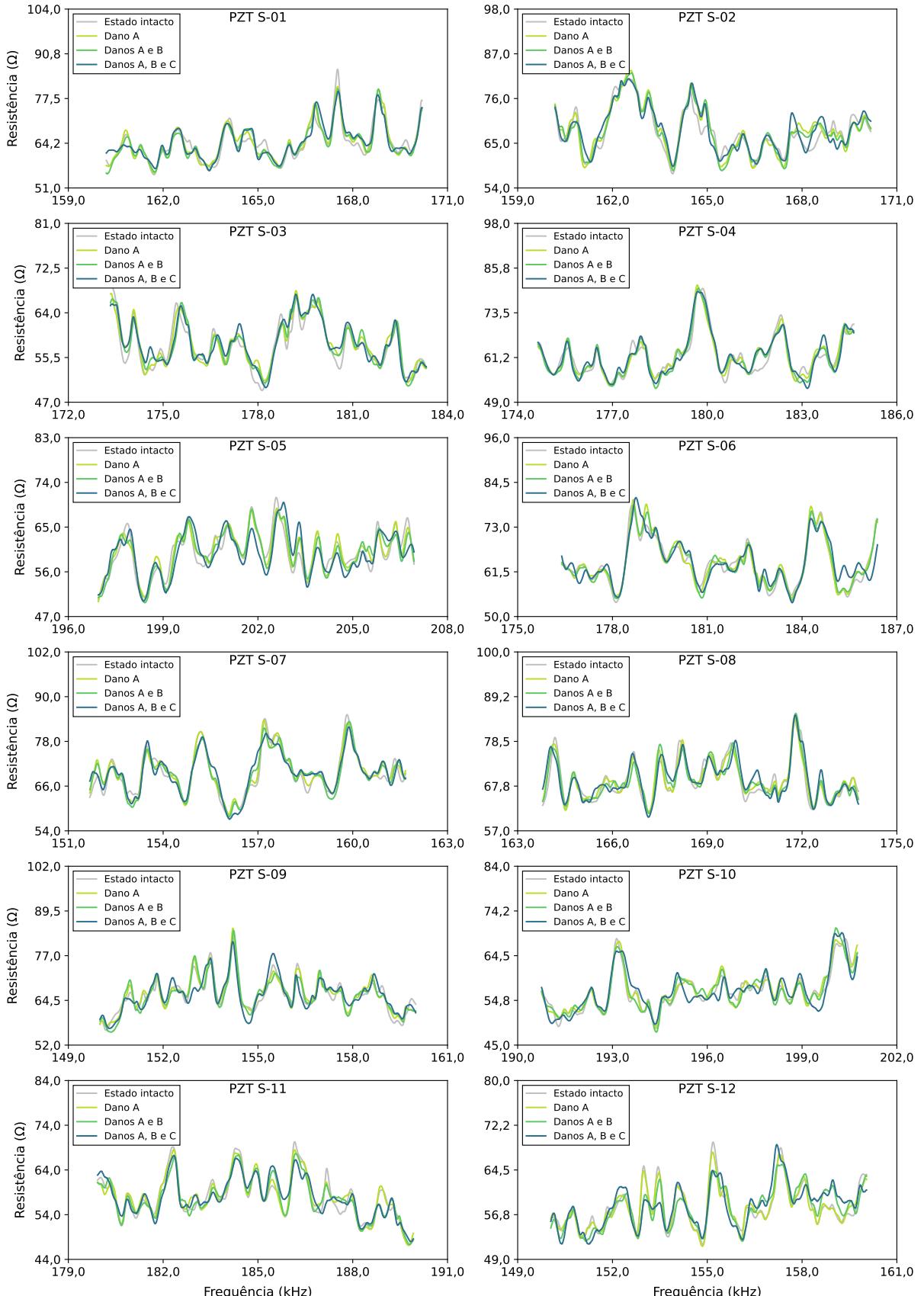


Figura A.2: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas na placa de alumínio.

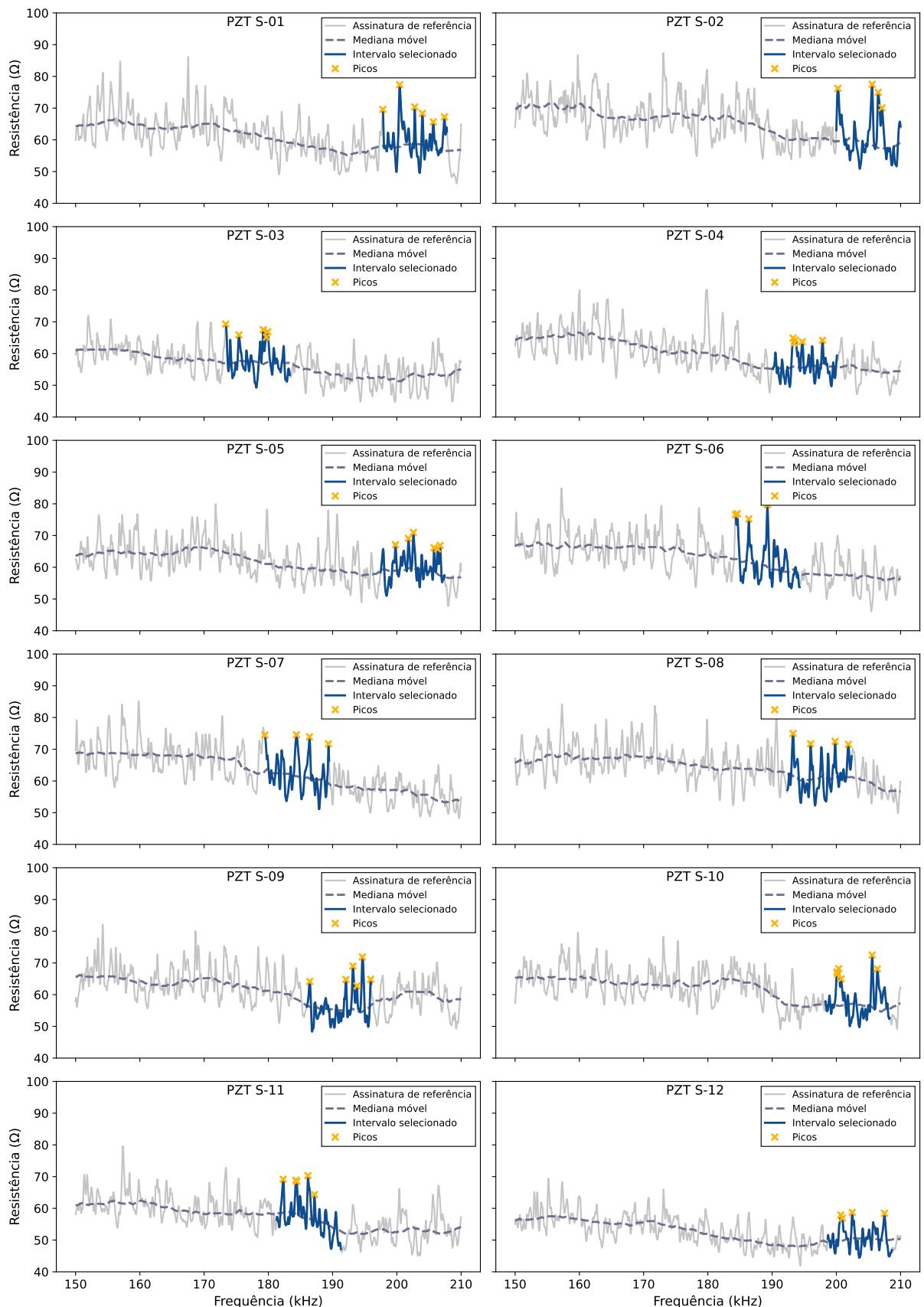


Figura A.3: Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados se referem à placa de alumínio.

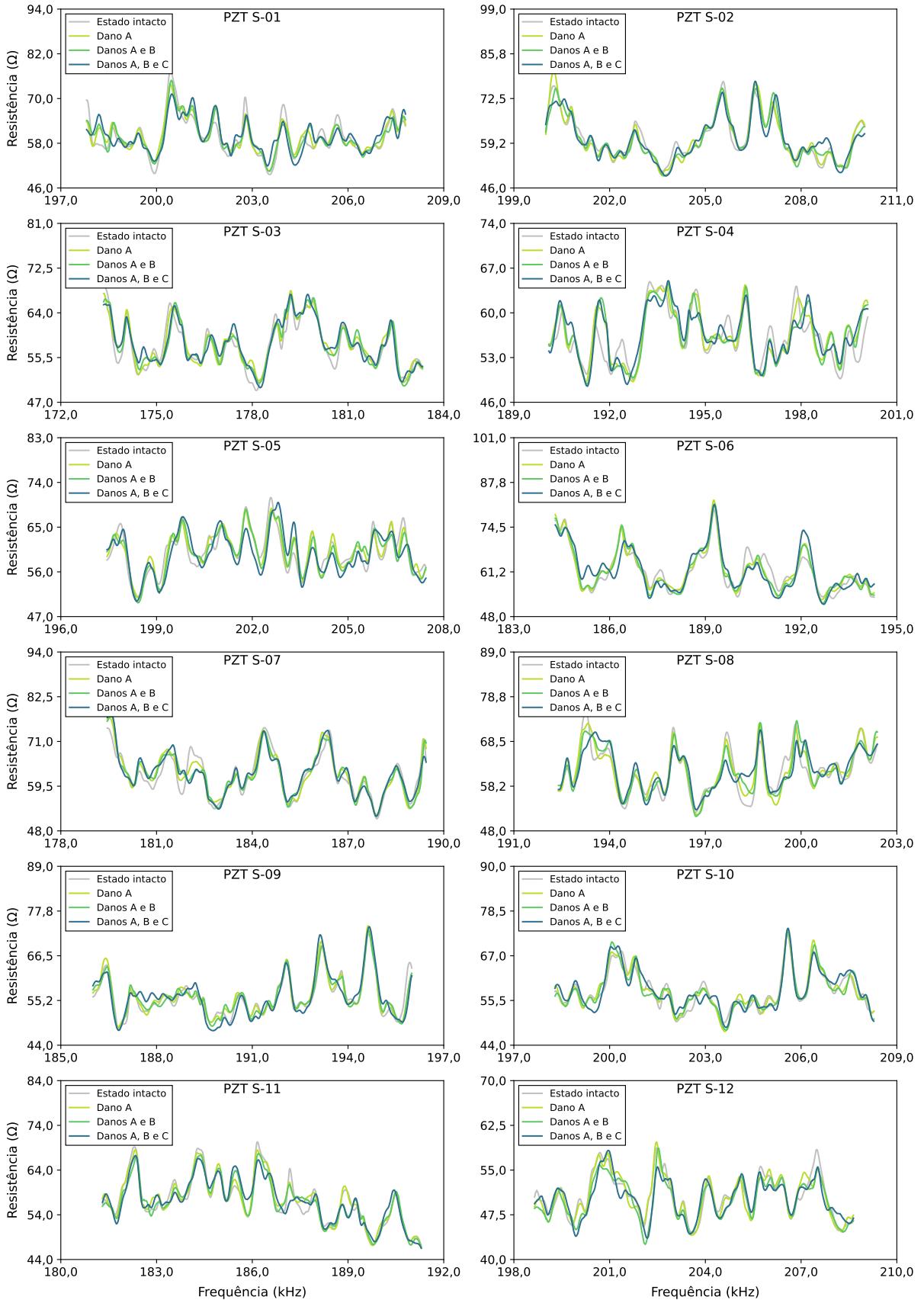


Figura A.4: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos em altas freqüências. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas na placa de alumínio.

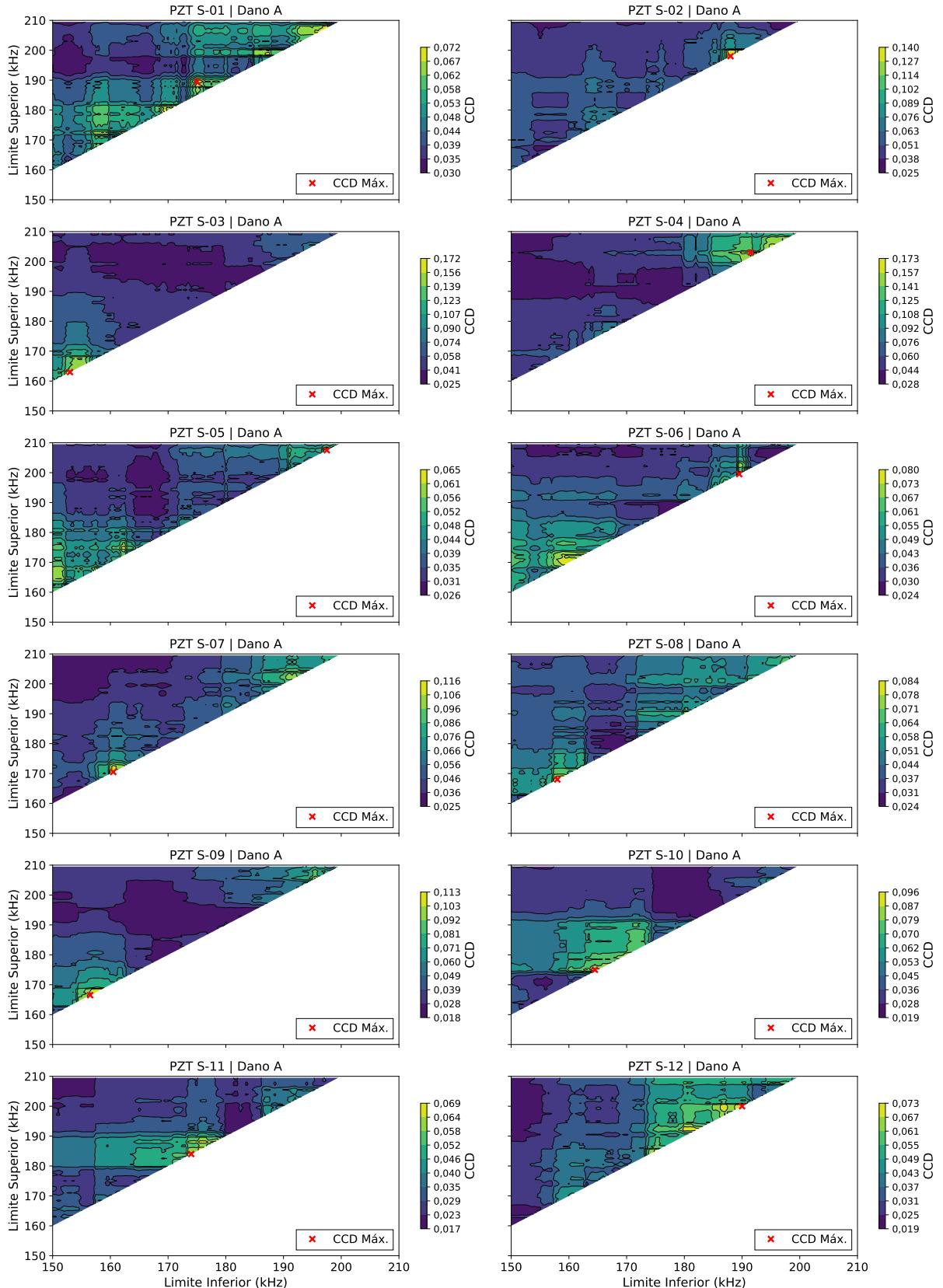


Figura A.5: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com uma única porca.

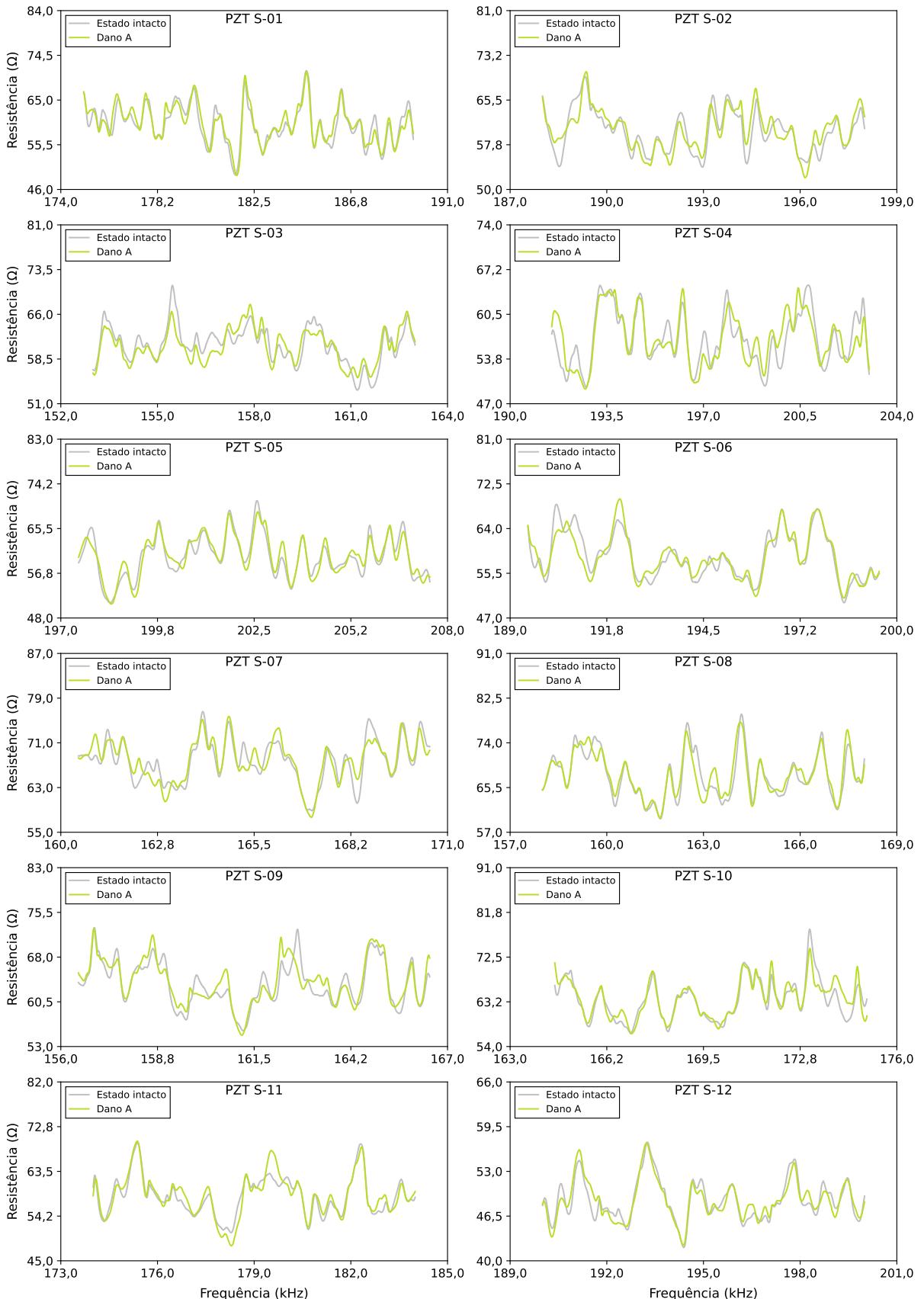


Figura A.6: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com uma única porca.

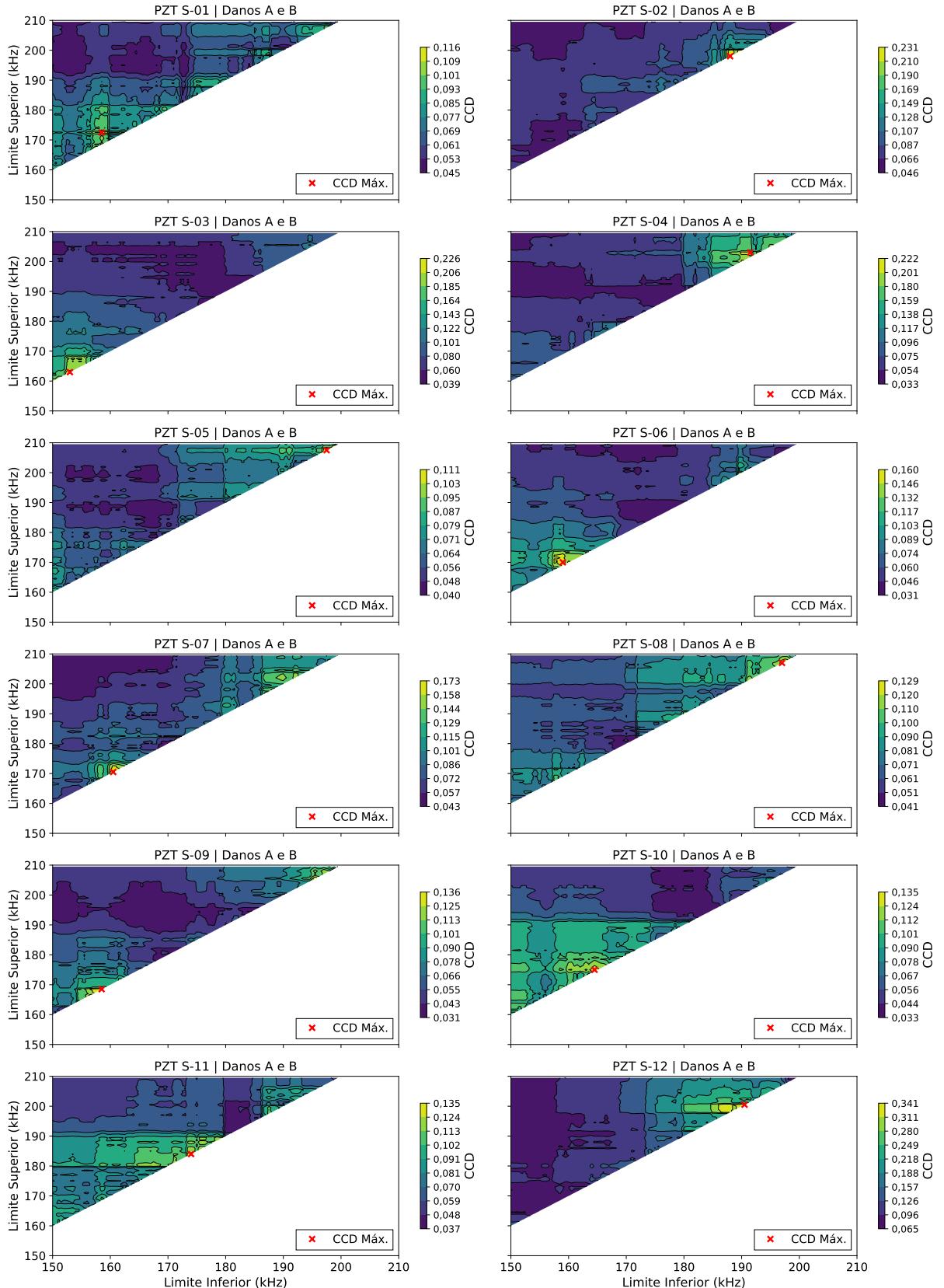


Figura A.7: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com duas porcas.

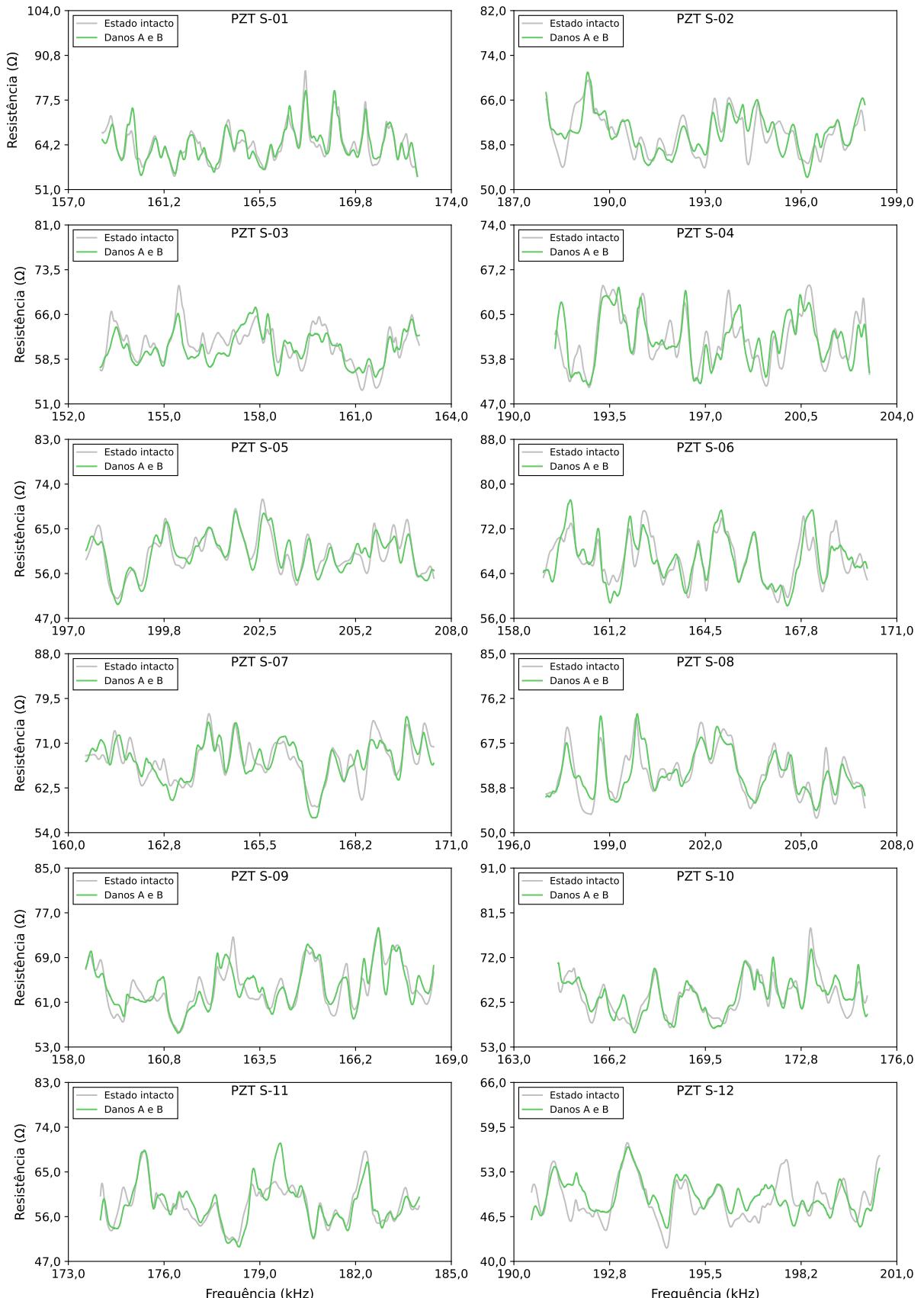


Figura A.8: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com duas porcas.

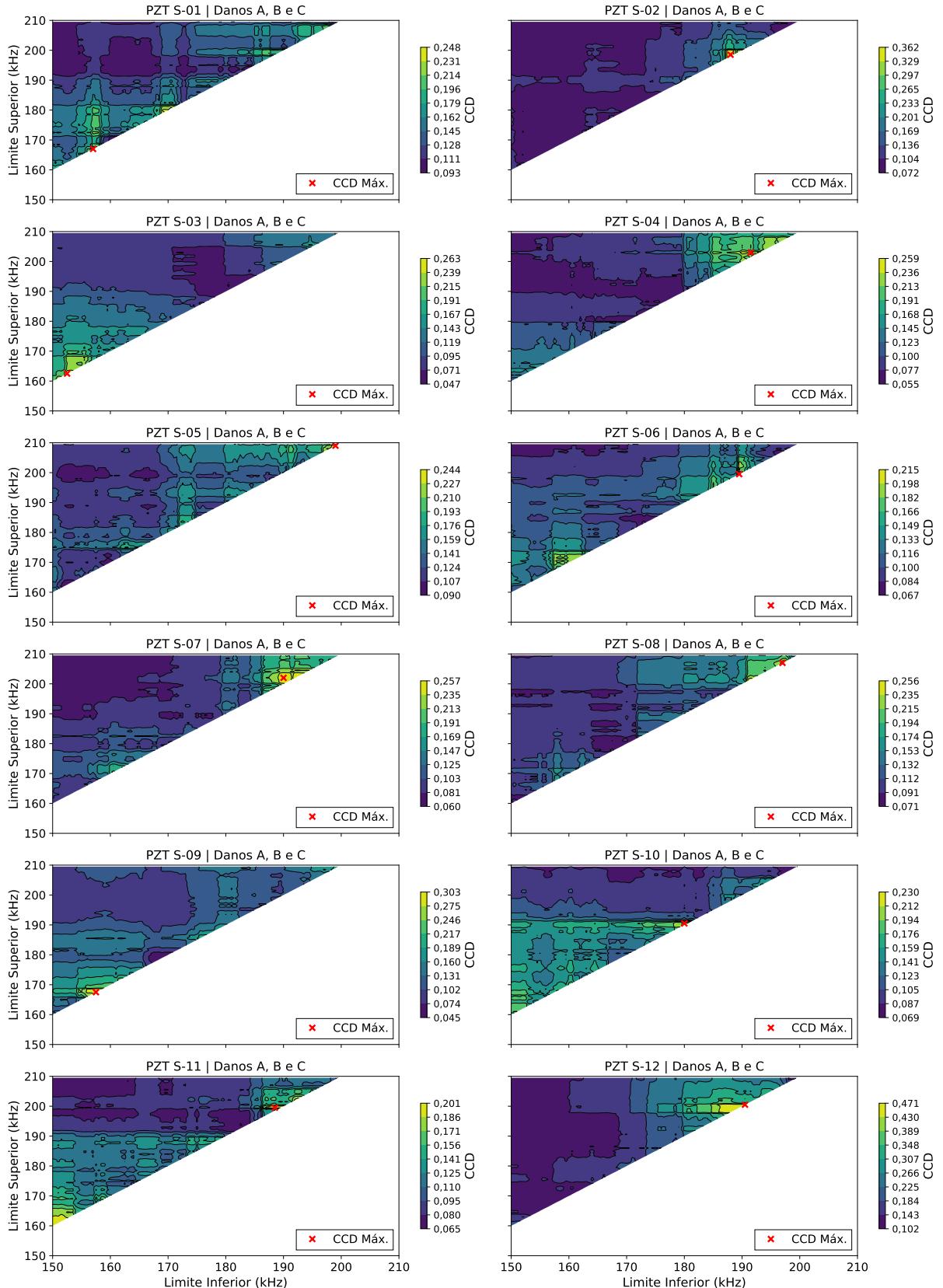


Figura A.9: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem à placa de alumínio com três porcas.

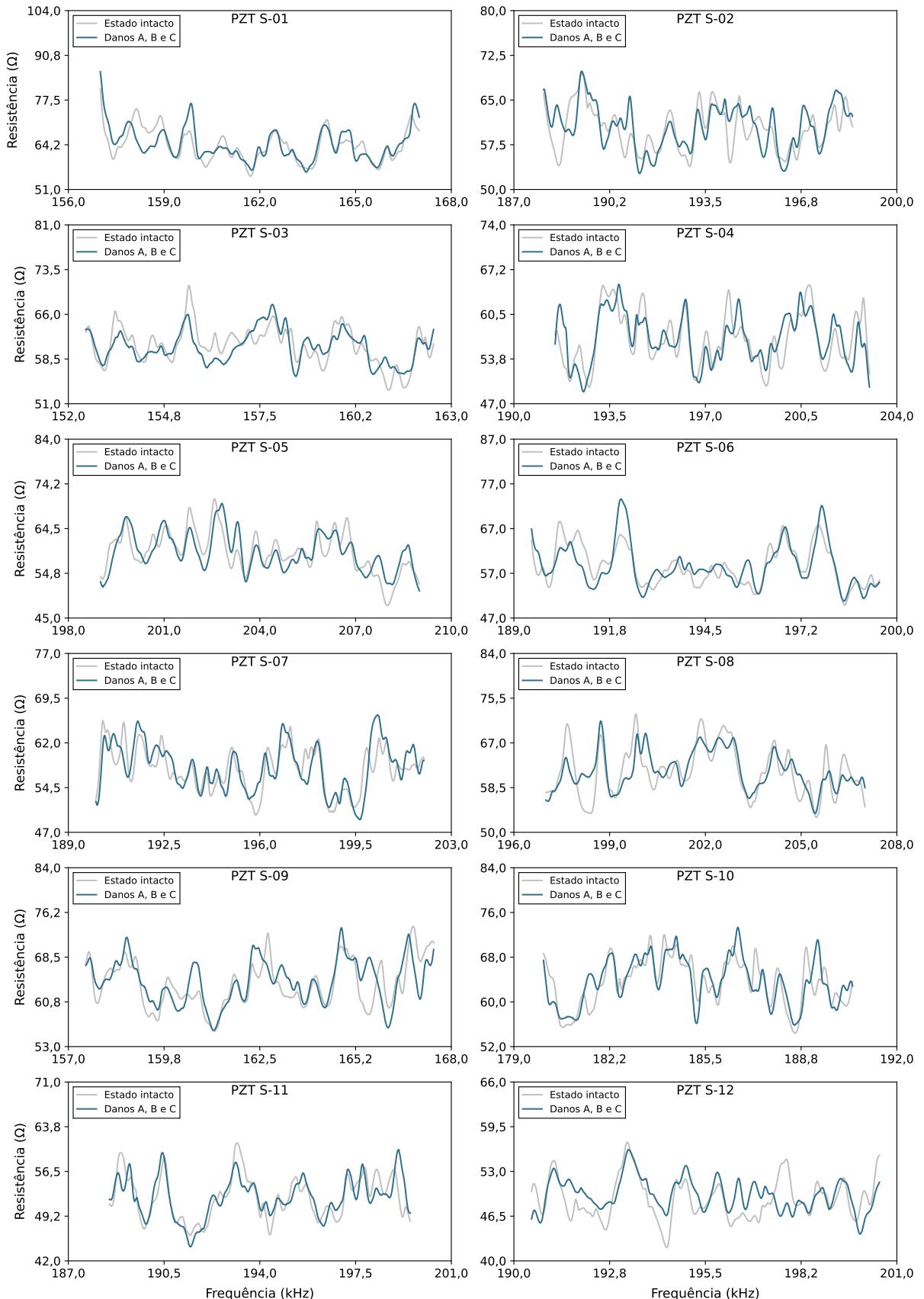


Figura A.10: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem à placa de alumínio com três porcas.

APÊNDICE B

INTERVALOS DE FREQUÊNCIA: PAINEL AERONÁUTICO

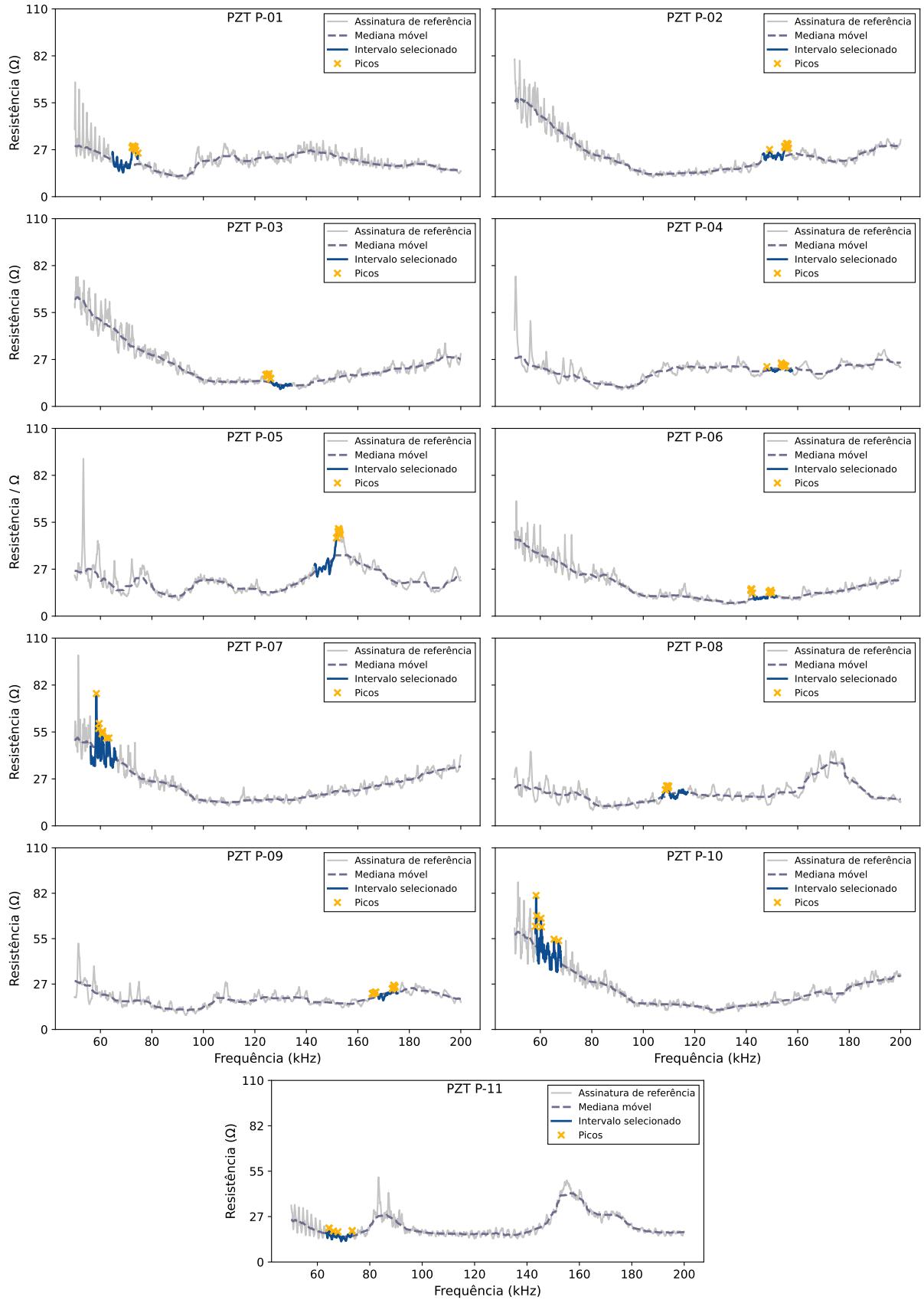


Figura B.1: Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos. Os resultados se referem ao painel aeronáutico.

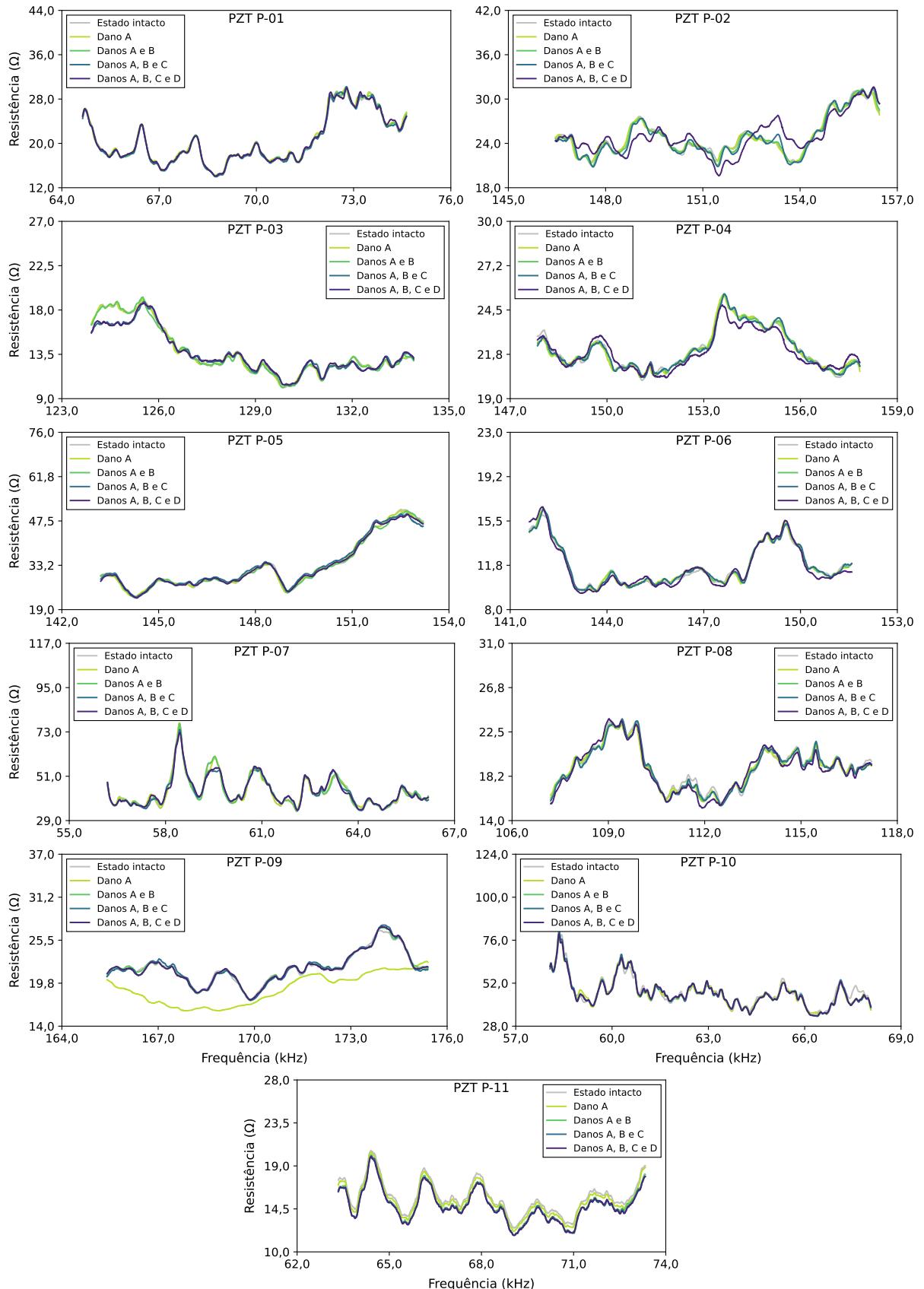


Figura B.2: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas no painel aeronáutico.

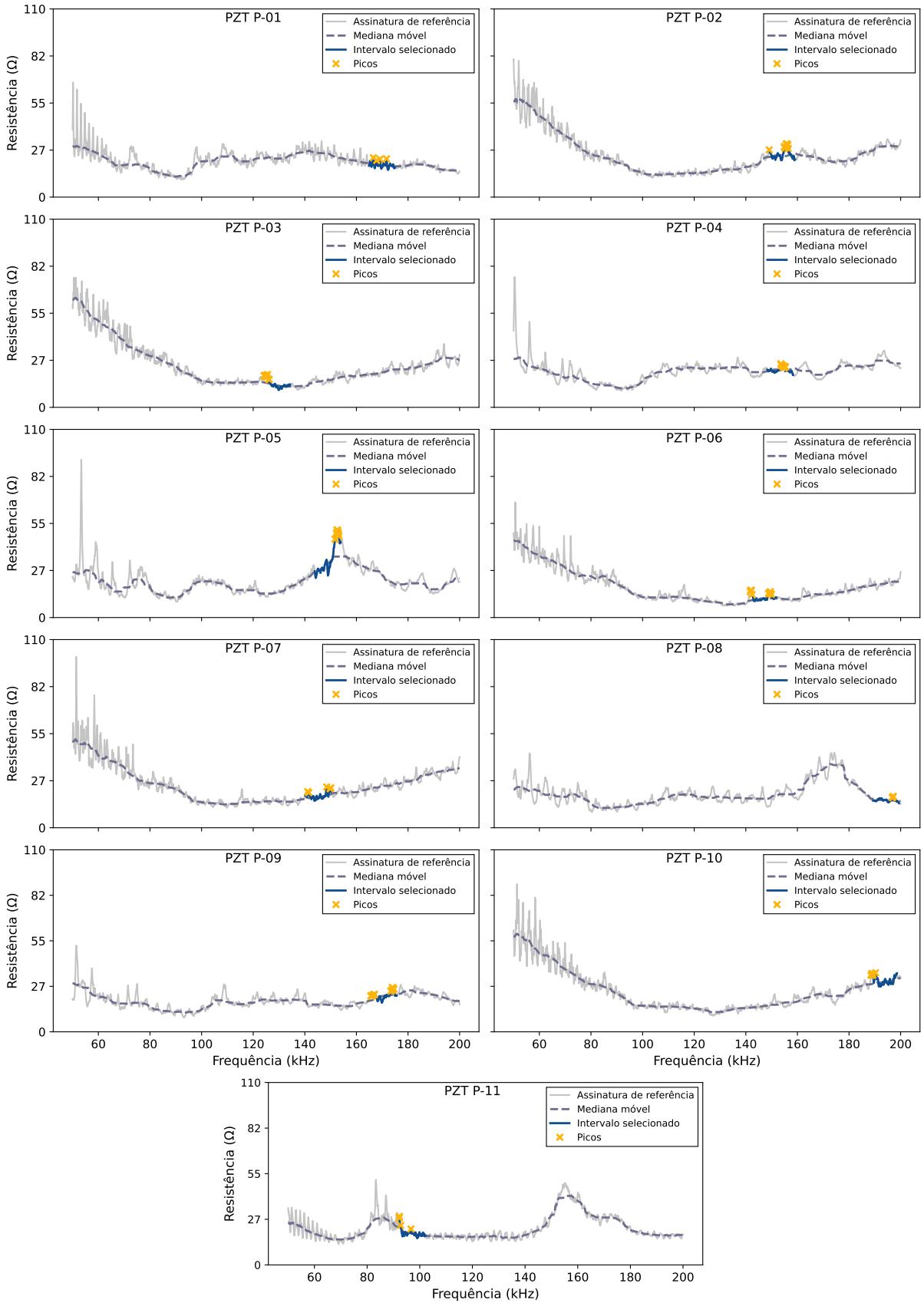


Figura B.3: Medianas das assinaturas de resistência do estado intacto com os intervalos selecionados pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados se referem ao painel aeronáutico.

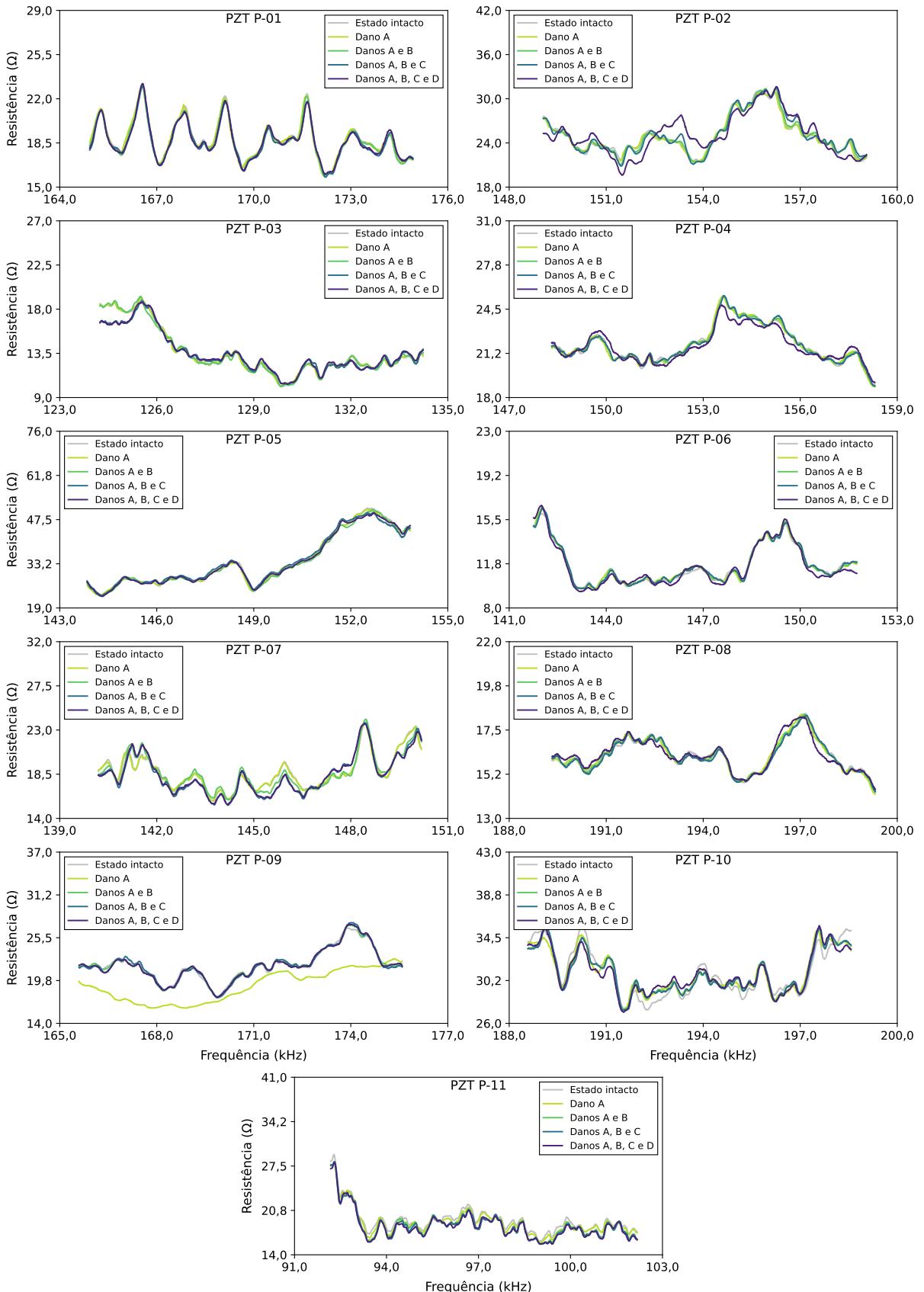


Figura B.4: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da densidade de picos em altas frequências. Os resultados apresentados contemplam todas as condições estruturais investigadas no painel aeronáutico.

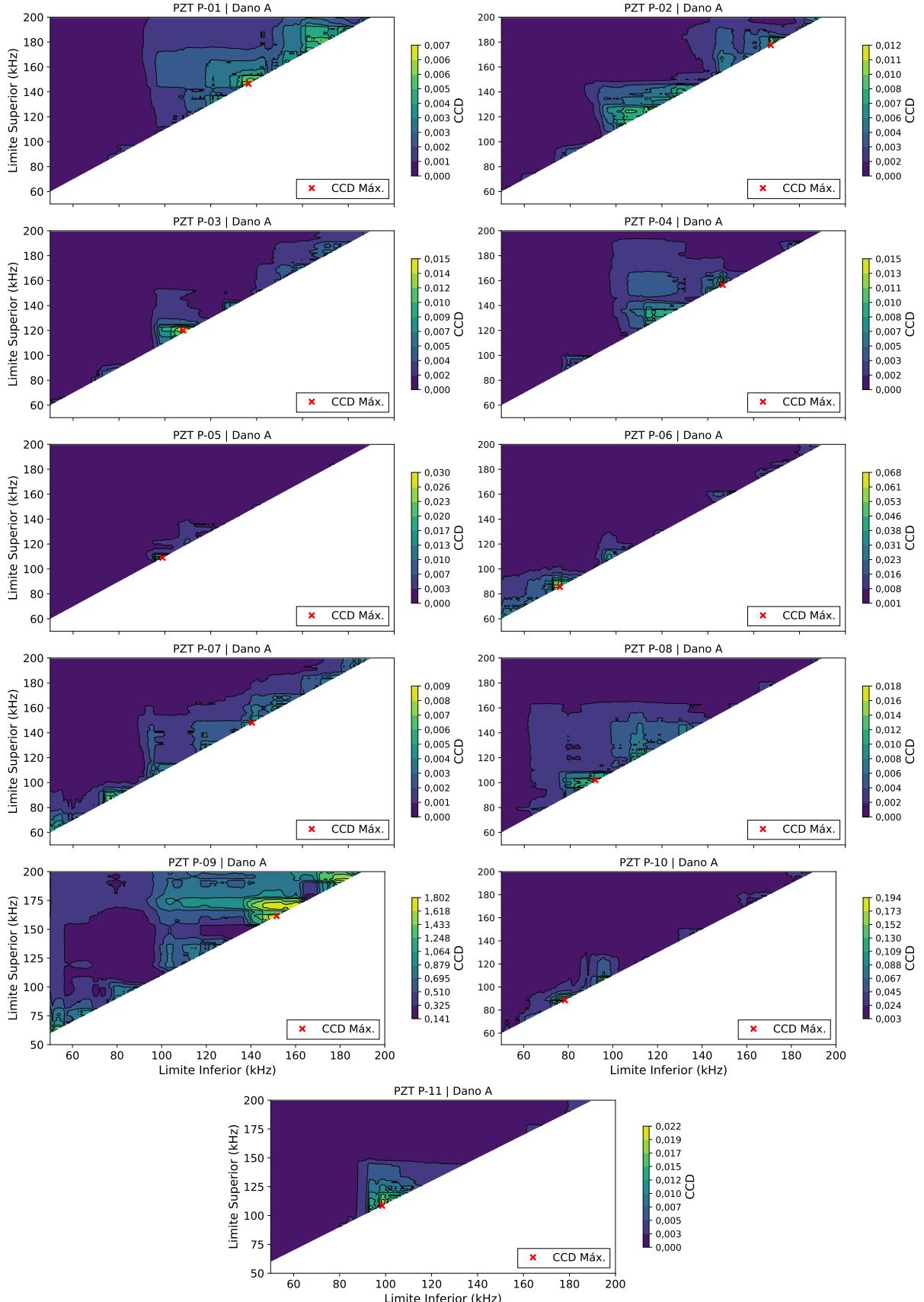


Figura B.5: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com uma única porca.

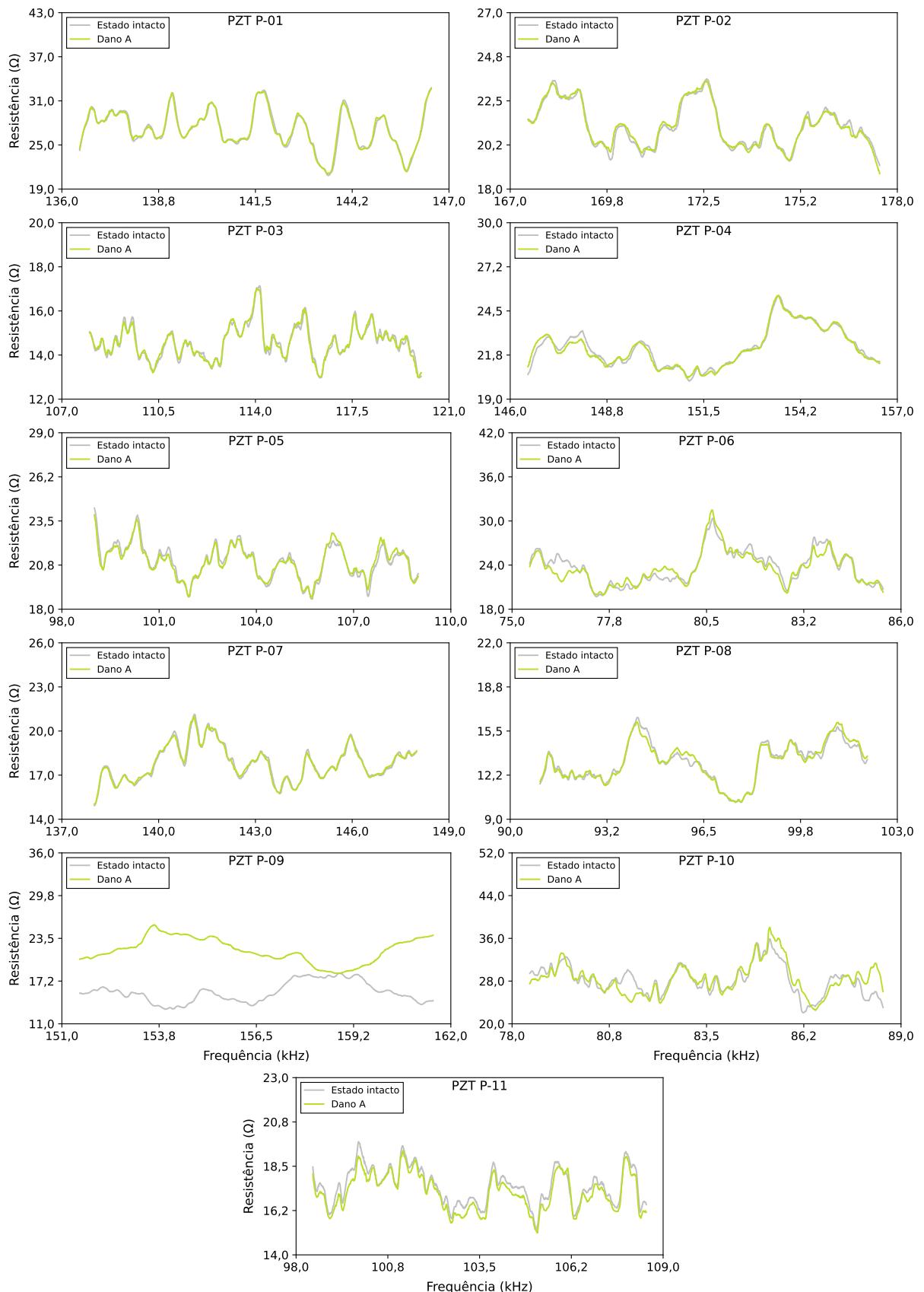


Figura B.6: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com uma única porca.

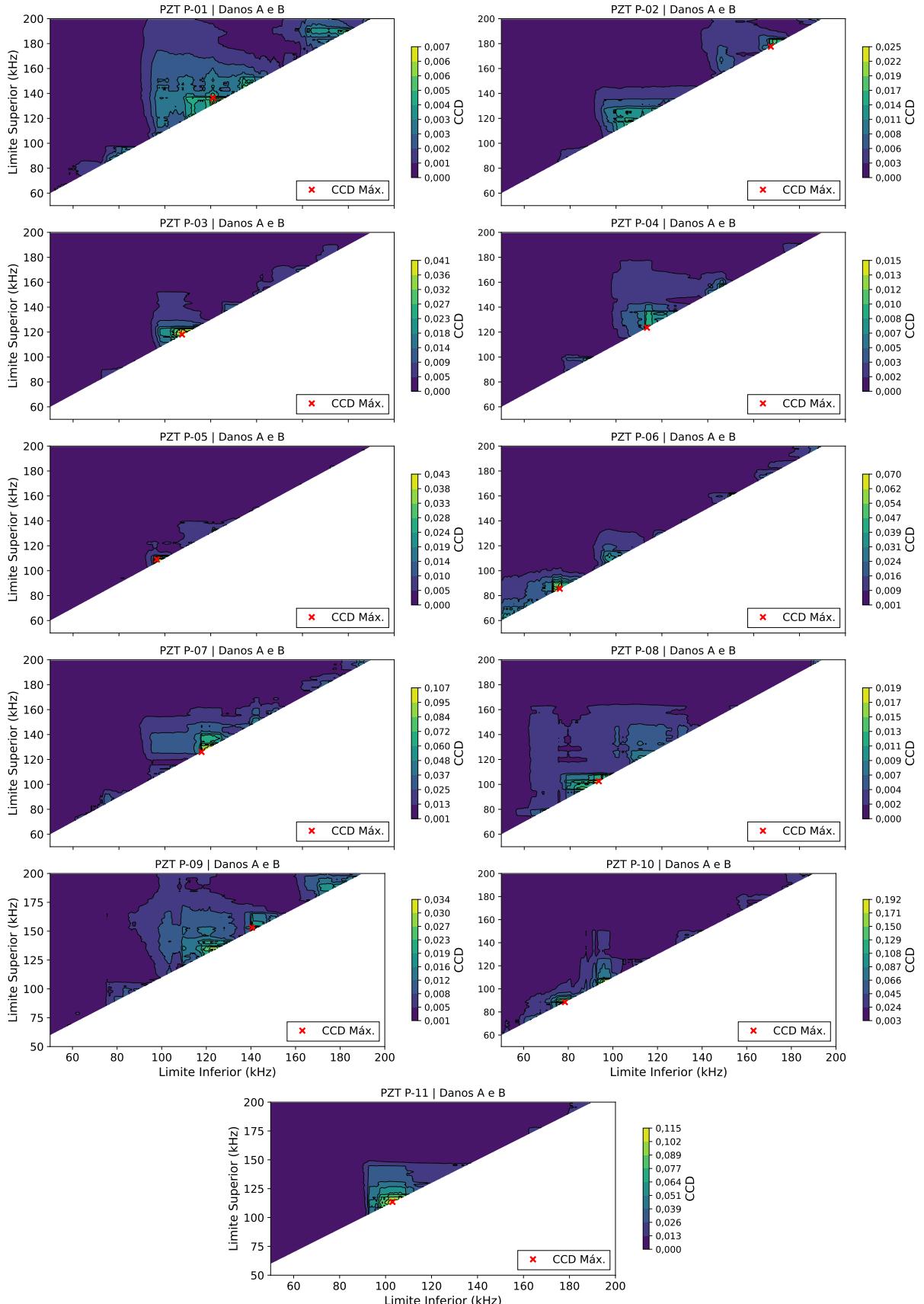


Figura B.7: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com duas porcas.

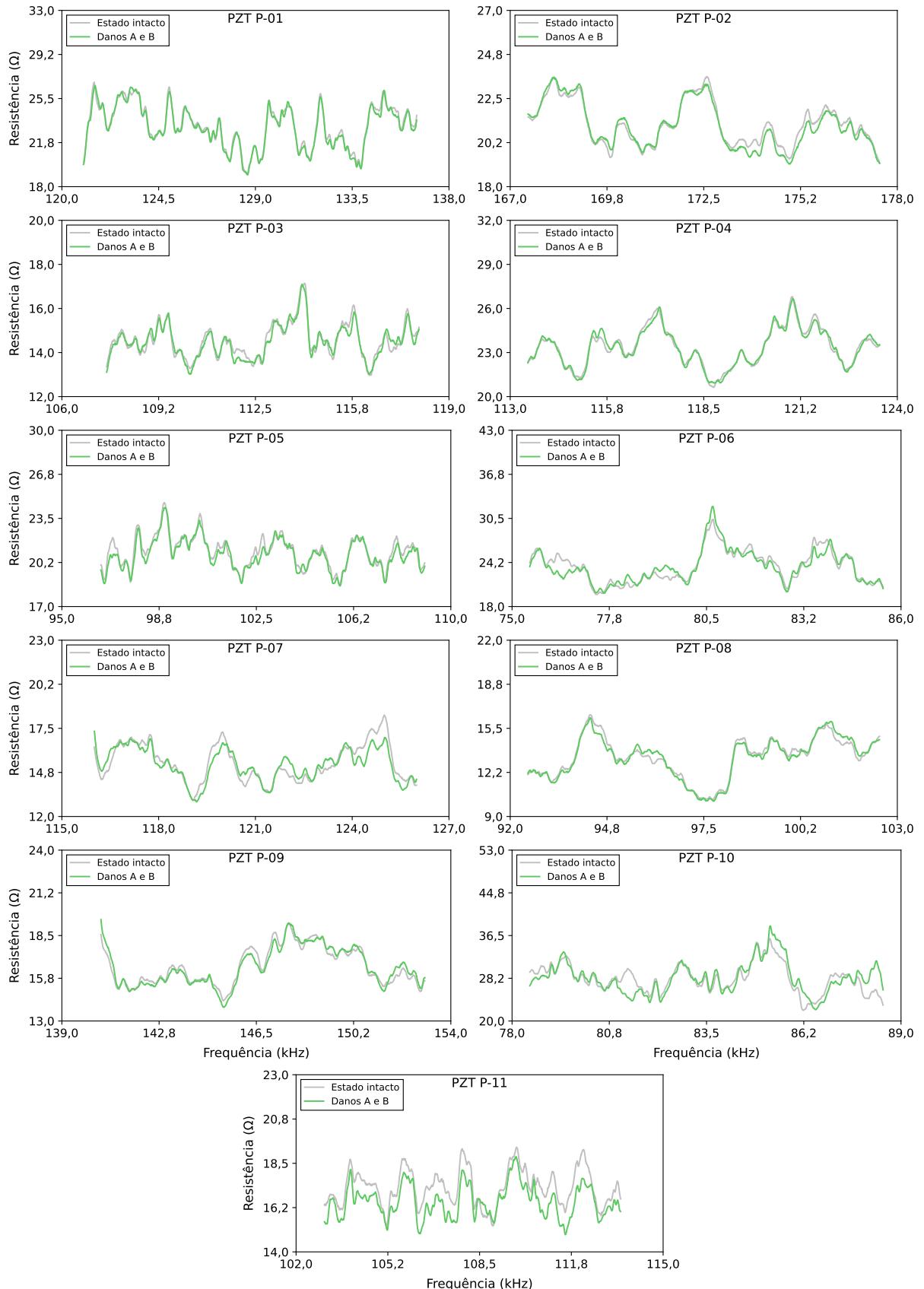


Figura B.8: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com duas porcas.

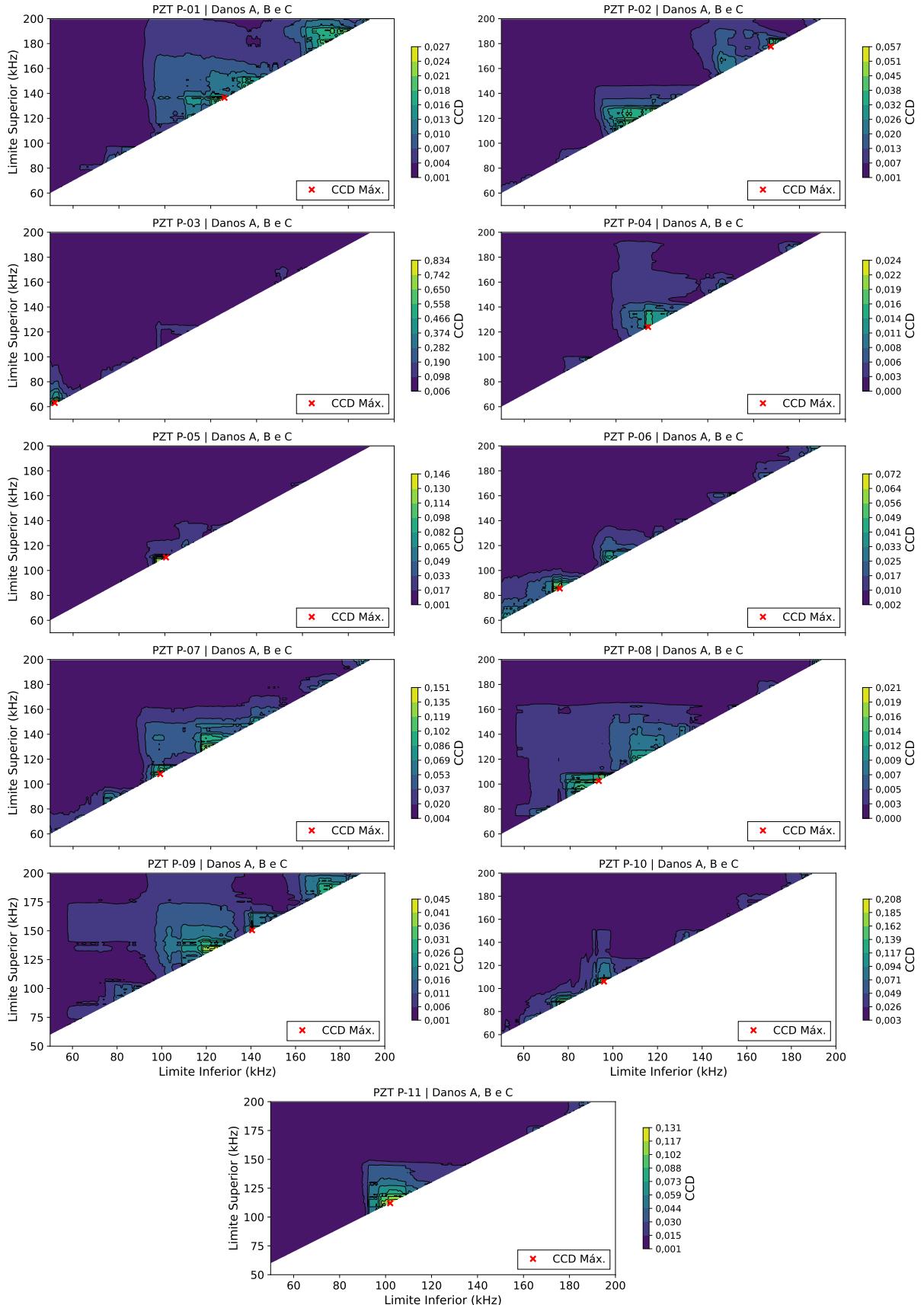


Figura B.9: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com três porcas.

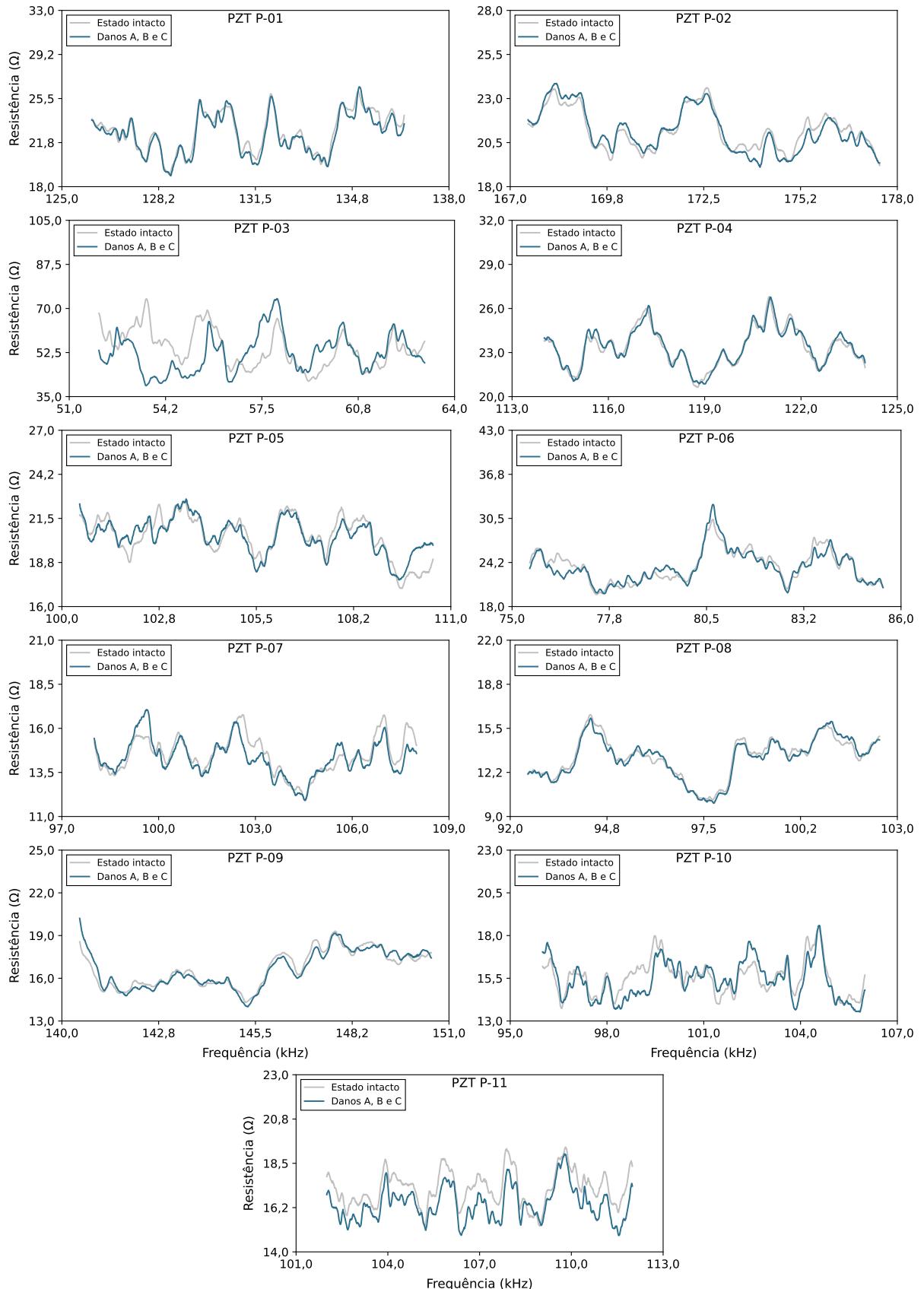


Figura B.10: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com três porcas.

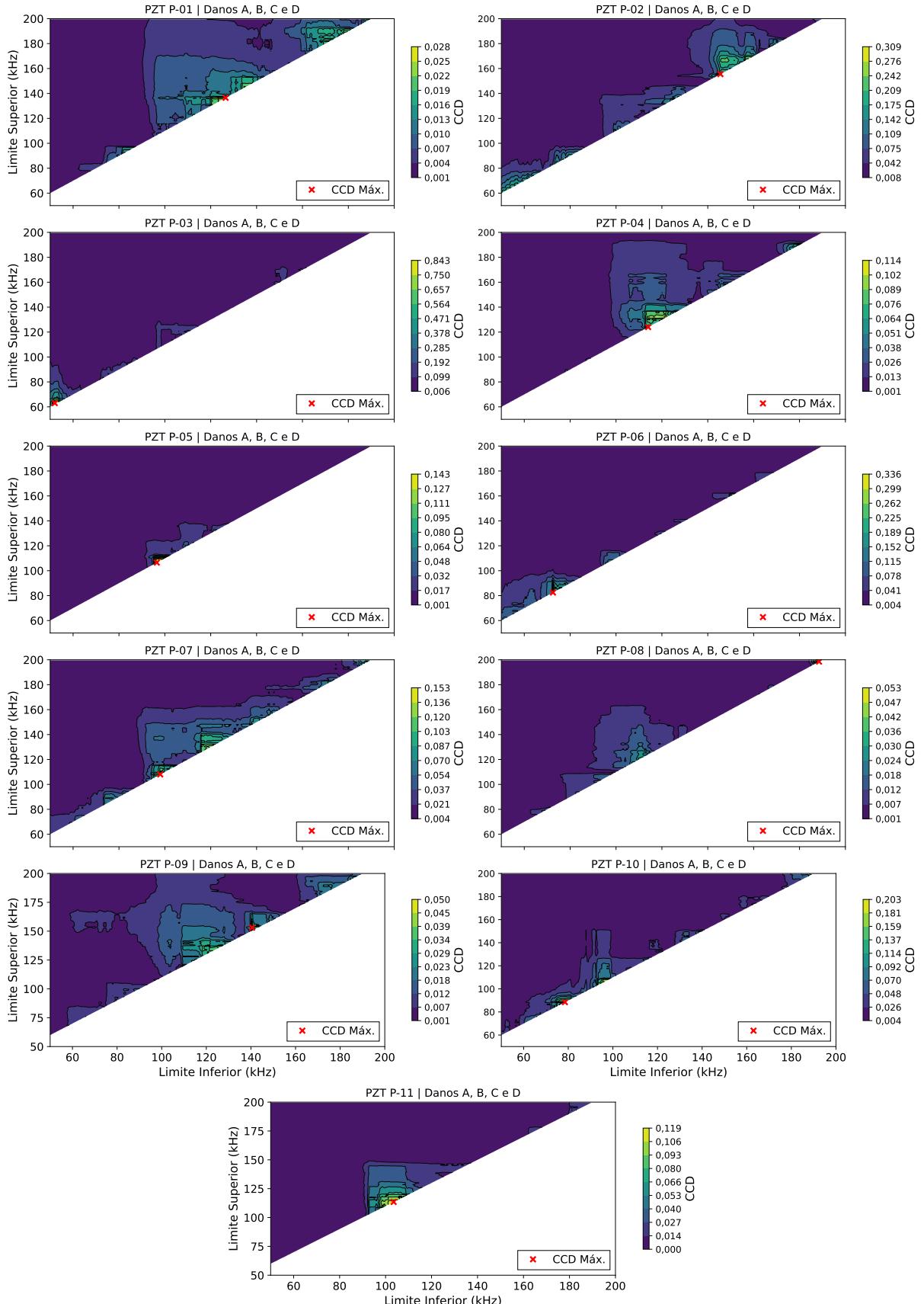


Figura B.11: Mapas de contorno dos valores de CCD obtidos em intervalos de frequência com largura mínima de 10 kHz, com destaque para o valor máximo identificado. Os resultados se referem ao painel aeronáutico com quatro porcas.

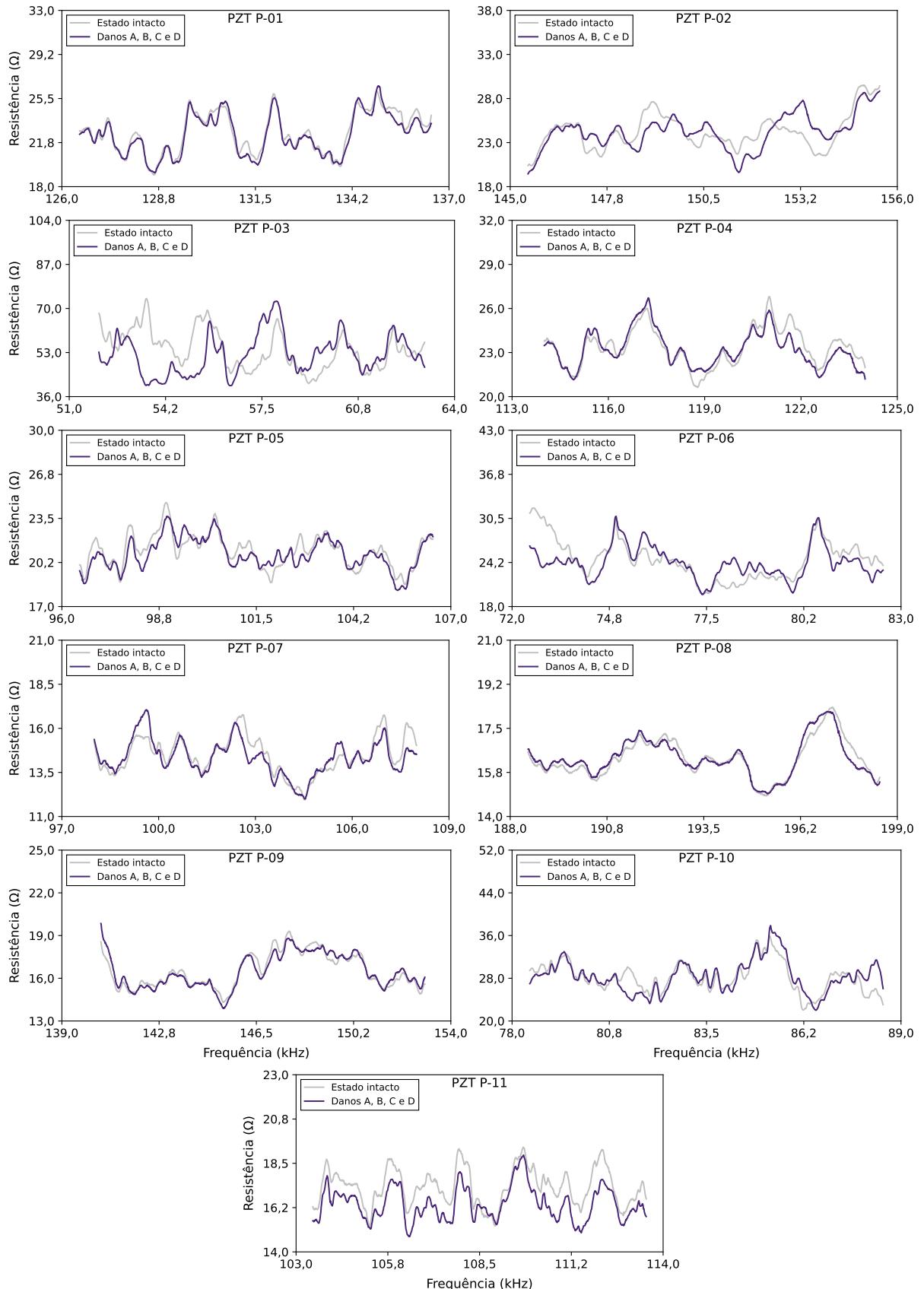


Figura B.12: Medianas das assinaturas de resistência nas bandas de frequência selecionadas pela abordagem da sensibilidade ao dano. Os resultados apresentados se referem ao painel aeronáutico com quatro porcas.