



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO  
INSTITUTO DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



**Daniel Resende Gonçalves**

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM INDICADORA EM  
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA NA  
LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM PLACAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

### 2. Nome completo do autor

Daniel Resende Gonçalves

### 3. Título do trabalho

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM INDICADORA EM MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA NA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM PLACAS

### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
  - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Jose Dos Reis Vieira De Moura Junior, Orientador**, em 02/08/2022, às 08:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DANIEL RESENDE GONCALVES, Discente**, em 04/08/2022, às 23:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?)

DANIEL RESENDE GONÇALVES

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM INDICADORA EM  
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA NA  
LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM PLACAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização do Instituto de Matemática e Tecnologia da Universidade Federal de Catalão, como requisito para obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização. Área de Concentração: Modelagem e Otimização.

Orientador:

José dos Reis Vieira de Moura Júnior

CATALÃO – GO

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Gonçalves, Daniel Resende  
Aplicação de Krigagem Indicadora em Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica na Localização de Danos em Placas / Daniel Resende Gonçalves. - 2022.

77, LXXVII f.

Orientador: Prof. Jose Dos Reis Vieira De Moura Júnior.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Instituto de Matemática e Tecnologia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2022.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Técnica – detecção de danos. 2. Monitoramento – integridade estrutural. 3. Krigagem Indicadora. 4. Impedância eletromecânica. 5. Python. I. Moura Júnior, Jose Dos Reis Vieira De, orient. II. Título.

CDU 519.6



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 17 da sessão de Defesa de Dissertação de Daniel Resende Gonçalves, que confere o título de **Mestre(a) em Modelagem e Otimização**, na área de concentração em **Modelagem e Otimização**.

Aos vinte e cinco dias do mês de julho de 2022, a partir das 19h00min, na sala web-conferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação, intitulada "*APLICAÇÃO DE KRIGAGEM INDICADORA EM MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA NA LOCALIZAÇÃO DE DANO ESTRUTURAL*" nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação *Stricto Sensu* em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses (BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho (UFG), outra no corpo do texto (UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo(a) **Orientador, Professor Doutor José dos Reis Vieira de Moura Júnior (PPGMO/IMTec/UFCAT), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Marcos Napoleão Rabelo (PPGMO/IMTec/UFCAT), membro titular interno; Professor Doutor William Júnio de Lima (UFU), membro titular externo.** A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato (X) Aprovado ( ) Reprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo **Professor Doutor José dos Reis Vieira de Moura Júnior**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e cinco dias do mês de julho de dois mil e vinte e dois.

Obs: "*Banca Examinadora de Qualificação/Defesa Pública de Dissertação/Tese realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo:*

*Art. 2o A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."*

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

**APLICAÇÃO DE KRIGAGEM INDICADORA EM MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA NA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM PLACAS**



Documento assinado eletronicamente por **Jose Dos Reis Vieira De Moura Junior, Professor do Magistério Superior**, em 05/08/2022, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Napoleão Rabelo, Professor do Magistério Superior**, em 05/08/2022, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **William Júnio de Lima, Usuário Externo**, em 16/10/2022, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

*Aos meus pais, João Carlos e Vânia Lúcia.*

# RESUMO

Algumas técnicas não destrutivas do Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM) aprimoraram suas análises nas últimas décadas. Dentre eles, a técnica SHM baseada em impedância eletromecânica (EMI-SHM) vem sendo testada em diversos campos e associada a diferentes metodologias estatísticas. Considerando a natureza da variação espacial dos dados de métricas de dano ao longo das estruturas, é proposto o uso do método de krigagem indicadora para prever a existência de três posições de danos - central, inferior esquerda e direita -, sendo tais posições conhecidas simuladas uma placa de alumínio. Mapas mostrando a probabilidade da métrica de dano cair em vários patamares de valor foram capazes de delinear as áreas afetadas pelo dano. Empregando o mapa de probabilidade com base em valores de métrica de dano extremo, foi possível prever a localização do dano. A anisotropia geométrica observada nos semivariogramas aparentemente indica direções preferenciais de propagação do dano. Esta abordagem mostra-se viável, pois usa apenas os dados da métrica de dano de entrada, e apresenta a capacidade de mapear áreas afetadas pelo dano e sua respectiva localização.

**Palavras-chaves:** Técnica de detecção de danos, Monitoramento da Integridade Estrutural, Krigagem Indicadora, Impedância Eletromecânica, Python.

# ABSTRACT

Some non-destructive Structural Health Monitoring (SHM) techniques have improved their analysis in recent decades. Among them, the electromechanical impedance-based SHM technique (EMI-SHM) has been tested in several fields and associated with different statistical methodologies. Considering the nature of the spatial variation of the damage metrics data along the structures, it is proposed to use the indicator kriging method to predict the existence of three damage positions - central, lower left and right -, such known positions being simulated a aluminum plate. Maps showing the probability of the damage metric dropping at various value levels were able to delineate the areas affected by the damage. Employing the probability map based on extreme damage metric values, it was possible to predict the damage location. The geometric anisotropy observed in these semivariograms apparently indicates preferred directions of damage propagation. This approach proves to be viable, as it uses only input damage metric data, and has the ability to map areas affected by damage and their respective location.

**Keywords:** Damage detection technique, Structural Health Monitoring, Indicator Kriging , Electromechanical Impedance, Python.

---

# LISTA DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Relações dos eixos de coordenadas do efeito piezoelétrico e do processo de polarização. Dipolos elétricos nos domínios: a) cerâmica ferroelétrica não-polarizada, b) durante a polarização e c) após a polarização (cerâmica piezoelétrica) . . . . .           | 18 |
| Figura 2.2 – Fabricado pela empresa Metrolog, sensor de PVDF da série LDT1-028K. . .   | 19 |
| Figura 2.3 – Exemplos de pastilhas piezocerâmicas. . . . .   | 20 |
| Figura 2.4 – Exemplo de MFC . . . . .  | 20 |
| Figura 2.5 – Transdutor PZT fixado em uma estrutura e sua representação como um modelo eletromecânico do tipo massa-mola. . . . .  | 22 |
| Figura 2.6 – Exemplificação por representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica. . . . .  | 23 |
| Figura 2.7 – Exemplo de um semivariograma experimental com variância amostral. . .   | 26 |
| Figura 2.8 – Representação dos modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano para ajuste de semivariogramas. . . . .   | 26 |
| Figura 2.9 – Modelo de semivariograma esférico com seus parâmetros. A linha tracejada vermelha horizontal se refere à variância da amostra. . . . .  | 27 |
| Figura 3.1 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no centro e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado. . . . .                 | 33 |
| Figura 3.2 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no lado inferior esquerdo e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado. . . . . | 34 |
| Figura 3.3 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no canto direito e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado. . . . .          | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.4 – Ilustração dos valores de métricas de dano com o dano (quadrado vermelho) nos cenários 1 (linha 1), 2 (linha 2) e 3 (linha 3) com diferentes malhas regulares para cada cenário. . . . .                                       | 36 |
| Figura 4.1 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto). . . . .  | 38 |
| Figura 4.2 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11cm x 11,11cm) com valor médio apresentado pela linha tracejada em vermelho. . . . .  | 38 |
| Figura 4.3 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto). . . . .  | 39 |
| Figura 4.4 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho). . . . .   | 39 |
| Figura 4.5 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) com representação do valor médio pela linha tracejada em vermelho. . . . .   | 40 |
| Figura 4.6 – Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .                 | 41 |
| Figura 4.7 – Malha de configuração 11,11cm x 11,11cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .             | 43 |
| Figura 4.8 – Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .           | 44 |
| Figura 4.9 – Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .             | 45 |
| Figura 4.10 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano. . . . . | 47 |
| Figura 4.11 – Valores médios das variáveis indicadoras relacionadas aos seus respectivos limiares no modelo e dados numéricos (de entrada). A, B, C e D representam os respectivos cenários estudados: 10x10, 8x8, 6x6 e 5x5. . . . .       | 48 |
| Figura 4.12 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto). . . . .   | 49 |
| Figura 4.13 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11 cm x 11,11 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto). . . . .   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.14 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 50 |
| Figura 4.15 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 51 |
| Figura 4.16 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 51 |
| Figura 4.17 –Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .                | 52 |
| Figura 4.18 –Malha de configuração 11,11cm x 11,11 cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .             | 53 |
| Figura 4.19 –Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .            | 54 |
| Figura 4.20 –Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .              | 55 |
| Figura 4.21 –Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano. . . . . | 57 |
| Figura 4.22 –Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano. . . . . | 58 |
| Figura 4.23 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 59 |
| Figura 4.24 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11 cm x 11,11 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 59 |
| Figura 4.25 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 60 |
| Figura 4.26 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.27 –Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e <i>outliers</i> (círculos em preto). . . . .   | 61 |
| Figura 4.28 –Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .               | 62 |
| Figura 4.29 –Malha de configuração 11,11cm x 11,11cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .             | 63 |
| Figura 4.30 –Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .           | 64 |
| Figura 4.31 –Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade. . . . .             | 65 |
| Figura 4.32 –Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente.As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano. . . . . | 67 |
| Figura 4.33 –Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente.As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano. . . . . | 68 |

---

# LISTA DE TABELAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Funções <i>geostatspy.geostats</i> . . . . .   | 30 |
| Tabela 2.2 – Funções <i>geostatspy.GSLIB</i> . . . . .  | 30 |
| Tabela 4.1 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09 cm x 9,09 cm. . . . .    | 42 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 8x8. . . . .                  | 42 |
| Tabela 4.3 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm. . . . .  | 44 |
| Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm. . . . .    | 45 |
| Tabela 4.5 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09 cm x 9,09 cm. . . . .    | 52 |
| Tabela 4.6 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 11,11cm x 11,11cm. . . . .    | 54 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm. . . . .  | 55 |
| Tabela 4.8 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm. . . . .    | 56 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09cm x 9,09cm. . . . .      | 62 |
| Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 11,11cm x 11,11cm. . . . .   | 64 |
| Tabela 4.11 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm. . . . . | 65 |
| Tabela 4.12 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm. . . . .   | 66 |

---

# SUMÁRIO

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .   | 15 |
| 1.1 | <b>Estrutura da Dissertação</b> . . . . .   | 16 |
| 2   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .  | 17 |
| 2.1 | <b>Materiais Piezoelétricos - PZT</b> . . . . .   | 17 |
| 2.2 | <b>Monitoramento da Integridade Estrutural baseado em Impedância Eletromecânica</b> . . . . . | 21 |
| 2.3 | <b>Parte geoestatística do estudo</b> . . . . .   | 24 |
| 2.4 | <b>Algoritmos e Códigos</b> . . . . .   | 29 |
| 3   | <b><i>MATERIAIS E MÉTODOS</i></b> . . . . .   | 33 |
| 4   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .  | 37 |
| 4.1 | <b>Cenário 1 - Dano Central</b> . . . . .   | 37 |
| 4.2 | <b>Cenário 2 - Dano Inferior Esquerdo</b> . . . . .   | 49 |
| 4.3 | <b>Cenário 3 - Dano Canto Direito</b> . . . . .   | 58 |
| 5   | <b>CONCLUSÃO</b> . . . . .  | 69 |
|     | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .  | 71 |

## Capítulo 1

---

# INTRODUÇÃO

---

Operações sob severas condições mecânicas, aliadas a fatores ambientais (exemplo: temperatura e umidade) possuem elevada probabilidade de ocorrência de falhas em estruturas e/ou equipamentos. Tais falhas são ocasionadas por avarias, que necessitam ser monitoradas e analisadas com o objetivo de se obter um diagnóstico das mesmas (BOLLER, 2009), o que é alcançado pela utilização de técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM).

Dentre às técnicas de SHM, a baseada em impedância eletromecânica (EMI-SHM) é de maior interesse devido ao seu baixo custo em relação às demais e ao seu caráter não destrutivo. Esta abordagem tem sido aplicada em várias situações e finalidades, como objetos ou estruturas feitas de aço (AI *et al.*, 2014), dutos (ANTUNES *et al.*, 2019; MARTOWICZ *et al.*, 2016), materiais compostos (NA; LEE, 2013b; ZHU; WANG; QING, 2019), estruturas de aeronaves (MARUO *et al.*, 2015; SELVA *et al.*, 2013; BOUKABACHE *et al.*, 2012) e pastas de cimento endurecido ou estruturas de concreto (ZHANG *et al.*, 2020; SU *et al.*, 2019; AND *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2019; YANG; DIVSHOLI, 2010; YANG; DIVSHOLI; SOH, 2010).

A detecção de danos por meio de EMI-SHM envolve a quantificação da gravidade e da localização dos mesmos, as quais são informações fundamentais para a tomada de decisões em programas de manutenção. Algumas abordagens têm sido desenvolvidas para a previsão/estimativa da localização do dano, dentre as quais, pode-se citar a aplicação de uma rede neural artificial (SELVA *et al.*, 2013; NA; LEE, 2013a); o uso de uma metodologia de extração de impedância mecânica de acoplamento diretamente associada a uma função ponderada de probabilidade (ZHU *et al.*, 2021); medições de desacoplamento de transdutores piezoelétricos (TINOCO *et al.*, 2016), o qual é baseado em extratos apenas das contribuições elétricas da estrutura; uso do método de krigagem indicadora para prever a existência de um dano conhecido (GONÇALVES *et al.*, 2021); interpolação de métricas de dano usando ponderação de distância inversa (CHERRIER *et al.*, 2013); triangulação baseada no mapeamento da correlação entre as assinaturas de impedância e sua distância ao dano (KRALO-

VEC; SCHAGERL; MAYR, 2018); e interpolação baseada no método de krigagem ordinária (GONÇALVES; MOURA Jr.; PEREIRA, 2020).

A partir dos resultados derivados dos artigos supracitados observa-se que há uma correlação entre o sinal de impedância enviado pelo transdutor piezolétrico e a distância entre eles e o dano. Tais resultados mostram que o valor da métrica de dano (indicador utilizado para quantificar a severidade do dano) muda gradualmente na superfície da estrutura monitorada de um valor elevado próximo ao dano para valores mais baixos, progressivamente, à medida que a distância a partir do dano aumenta, o que sugere a existência de continuidade espacial entre valores de métrica de dano. A partir desta característica, e considerando que métodos geoestatísticos são passíveis de serem aplicados para variáveis caracterizadas por possuírem correlação espacial, neste trabalho é utilizada a krigagem indicadora, uma técnica geoestatística, para a estimativa da localização de diferentes danos estruturais conhecidos em uma placa de alumínio (100 cm x 100 cm), a partir de dados numéricos de métrica de dano similares a valores reais.

## 1.1 Estrutura da Dissertação

O trabalho foi dividido em capítulos de forma a tornar mais claro os assuntos a serem abordados nesta dissertação. No Capítulo 1, foi apresentada uma visão geral sobre o que será feito no trabalho, a base de dados e os métodos que serão apresentados/utilizados. O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica para o monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, abordando os materiais piezoelétricos e contextualizando tal metodologia. Ainda, neste mesmo capítulo será abordada a parte geoestatística utilizada no trabalho e os algoritmos e códigos em python usados, dando ênfase na funcionalidade da biblioteca utilizada. No Capítulo 3 é mostrado os materiais e métodos do trabalho, apresentando as bases de dados e o método de Krigagem Indicadora aplicados à elas. O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos através da análise estatística, da análise variográfica e da estimativa feita por Krigagem Indicadora. Por fim, o Capítulo 5 apresenta-se a conclusão do trabalho a partir dos resultados apresentados.

## Capítulo 2

---

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Neste capítulo serão apresentados conceitos teóricos relacionados aos seguintes itens: materiais piezoelétricos (seu funcionamento e suas vantagens); monitoramento de integridade estrutural a partir de impedância eletromecânica; princípios da geoestatística, a qual é fundamentada na Teoria das Variáveis Regionalizadas; semivariograma, sendo esta a ferramenta utilizada na geoestatística para a quantificação da continuidade espacial de variáveis regionalizadas; e métodos de krigagem, particularmente a krigagem ordinária e a krigagem indicadora. Além destes conceitos, será apresentado também uma biblioteca baseada em Python, a qual foi utilizada para a obtenção dos resultados deste estudo.

## 2.1 Materiais Piezoelétricos - PZT

Componentes piezoelétricos tem sido empregados eficientemente em diversas áreas, tais como engenharia aeronáutica, civil e mecânica (MOURA Jr., 2008; SAFAEI; SODANO; ANTON, 2019). Os PZTs vem sendo demasiadamente utilizados devido ao seu baixo custo de fabricação e pelo fato de serem produzidos sob diversos tamanhos e diferentes formas, possibilitando assim sua utilização em inúmeras aplicações e em lugares de difícil acesso (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Como exemplo de "estruturas inteligentes", os PZTs, pela alteração de sua capacidade física, detêm a capacidade de transformar uma forma de energia em outra (PARK; INMAN, 2001). Logo, um dos principais tipos de materiais utilizados como estruturas inteligentes são as cerâmicas piezoelétricas (convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa) (BANKS; SMITH; WANG, 1996; MOURA Jr., 2008). Por conseguinte, a utilização de cerâmicas piezoelétricas em sistemas de monitoramento tem como objetivo a construção de equipamentos adaptativos, capazes de relacionarem em único fluxo processual distintas grandezas físicas (OLIVEIRA, 2013).

Dessa forma, as propriedades piezoelétricas podem ser estabelecidas através de três

eixos de direção, dois em direções isotrópicas (onde as propriedades são semelhantes em todas as direções analisadas) e o terceiro está associado à direção de polarização (dependente do efeito piezoelétrico) conforme mostrado na Figura 2.1 (TEBALDI; COELHO; JUNIOR, 2006).

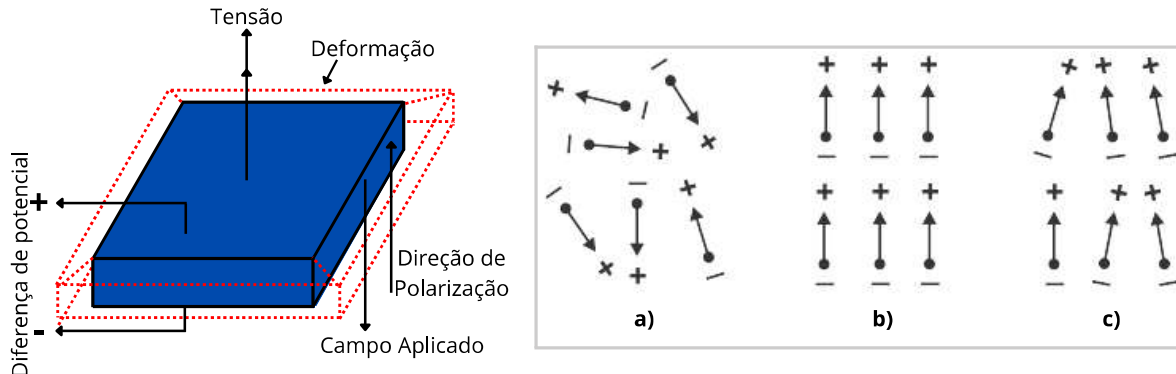


Figura 2.1 – Relações dos eixos de coordenadas do efeito piezoelétrico e do processo de polarização. Dipolos elétricos nos domínios: a) cerâmica ferroelétrica não-polarizada, b) durante a polarização e c) após a polarização (cerâmica piezoelétrica)

Fonte: Adaptado de BENTO (2018).

Os sensores e atuadores piezoelétricos são feitos pela polarização dos dipolos de um material piezoelétrico, ao passo que este material é submetido a altas temperaturas (geralmente superiores a temperatura de Curie, temperatura esta em que o material perde espontaneamente sua polarização inicial, proporcionando desta forma sua posterior repolarização induzida, de maneira a viabilizar suas propriedades dielétricas) e altos campos elétricos (TEBALDI; COELHO; JUNIOR, 2006; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010). Em vista disso, é observado na literatura que compósitos normalmente ortotrópicos são, de forma adequada, selecionados devido às suas estruturas cerâmicas, reticuladas poliméricas ou cristalinas que lhes possibilitam alinhar parcialmente seus dipolos elétricos, tendo como resultado uma polarização macroscópica que lhes permite um acoplamento eletromecânico mais eficiente (MOURA Jr., 2008; BENTO, 2018; BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Através deste acoplamento o material irá se deformar mecanicamente quando empregado um campo elétrico (efeito inverso ou atuador). Semelhantemente, quando aplicada uma deformação mecânica, o mesmo deverá produzir polarizações dielétricas (efeito direto ou sensor) (MOURA Jr., 2008). Assim, as aplicações em torno da piezoelectricidade são restritas as leis lineares formuladas por Voigt (usualmente), em que os efeitos inverso e direto são descritos de acordo com as Equações 2.1 e 2.2, respectivamente (FRANCO, 2009; PALOMINO, 2008).

$$e_{ji} = s_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{mij}^T E_m \quad (2.1)$$

$$D_m = \epsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl} \quad (2.2)$$

onde  $\epsilon$  e  $d$  são o tensor dielétrico (m/V) do material e o tensor de tensão piezoelétrica (F/m);  $E$  e  $D$  representam o vetor campo elétrico (N/m<sup>2</sup>) sofridos pela pastilha PZT e o vetor deslocamento (C/m<sup>2</sup>). A deformação mecânica do material é relacionada com a tensão  $\sigma$  através do tensor longitudinal  $s$  aplicado (m<sup>2</sup>/N). Os caracteres  $i, j, m$  e  $k$  decorrem da notação indicial, a qual se distingue pelo direcionamento de cada componente do efeito piezoelétrico.

Destaca-se ainda que um dispositivo quando é empregado com a função de atuador utiliza o efeito inverso e quando empregado na função de sensor utiliza o efeito direto. Por conseguinte, constata-se as possibilidades de emprego para tais materiais em aplicações de detecção e controle de falhas. Ainda, como importante destaque, o material perde suas propriedades piezoelétricas se houverem mudanças grandes de temperatura e o limite da temperatura de Curie for ultrapassado (BANKS; SMITH; WANG, 1996; GIURGIUTIU, 2014).

Dentre os principais tipos de materiais piezoelétricos presentes na literatura pode-se destacar os piezopolímeros (conhecidos como fluorido de polivinilideno – PVDFs), as pastilhas piezocerâmicas (compostas por titanato-zirconato de chumbo) e os compósitos de macro fibras (MFCs – do inglês *Macro Fiber Composites*).

Os polímeros de PVDF (do inglês *Polyvinylidene Fluoride*) tem como características possuírem uma maior maleabilidade se comparados as estruturas de engenharia comuns e também quando comparadas a pastilhas piezocerâmicas. Desta forma, ainda que estes materiais possuam a capacidade de serem confeccionados com geometrias mais atrativas do que as das pastilhas PZTs (obtendo espessuras de cerca de 40 a 120µm), o seu uso como atuadores torna-se ineficiente (FRANCO, 2009). A Figura 2.2 apresenta um exemplo de sensor PVDF da série LDT1-028K.

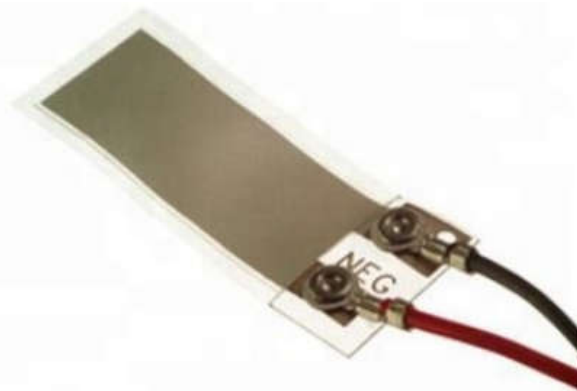


Figura 2.2 – Fabricado pela empresa Metrolog, sensor de PVDF da série LDT1-028K.

Fonte: Retirado de METROLOG (2020)

Já as pastilhas PZTs (material cerâmico), possuem uma rigidez geralmente superior à

da estrutura na qual são acopladas, ocasionando uma conversão eletromecânica de grande eficácia. Desta maneira, tais materiais tem mostrado grande aplicabilidade em métodos de monitoramento, servindo então como atuadores auto-sensíveis (MOURA Jr., 2008). A Figura 2.3 apresenta alguns modelos de pastilhas piezoelétricas (MONTANEZ, 2019).



Figura 2.3 – Exemplos de pastilhas piezocerâmicas.

Fonte: Retirado de MONTANEZ (2019)

Por ultimo, o MFC é um material que se constitui de fibras piezoelétricas retangulares intercaladas entre camadas de adesivo e um filme de eletrodo de poliimida (NASA, 2007). Como principais características pode-se citar que estes possuem um processo de fabricação repetível e simples, são resistentes a danos e são flexíveis. Logo, são capazes de se acomodar em superfícies complexas e/ou curvaturas de estruturas/componentes estruturais, sendo mais flexível do que o PZT (PALOMINO, 2008; PARK *et al.*, 2003). A Figura 2.4 exhibe um exemplo de MFC.

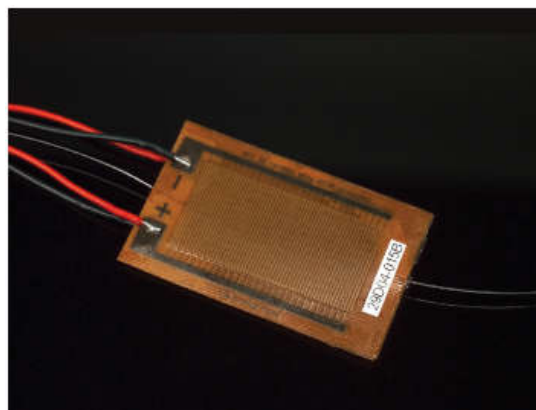


Figura 2.4 – Exemplo de MFC

Fonte: Retirado de NASA (2020)

## 2.2 Monitoramento da Integridade Estrutural baseado em Impedância Eletromecânica

Existem diversas técnicas para o monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais, com o propósito de aumentar a vida útil, melhorar o desempenho de estruturas/equipamentos e reduzir custos (PARK *et al.*, 2003). Entre as técnicas de SHM tem-se a EMI-SHM, a qual é embasada no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de transdutores piezoelétricos à estrutura ou equipamentos que serão monitorados, conservando-se definida a função de impedância, que depende das características elétricas do transdutor e das características físicas e/ou mecânicas da estrutura a ser monitorada (LIN; GIURGIU-TIU, 2006; PARK *et al.*, 2003).

Na técnica EMI - SHM, os transdutores PZT são normalmente excitados por uma forma de onda senoidal com uma amplitude de aproximadamente 1V RMS (tensão efetiva) e uma faixa de frequência de 10 a 250 kHz (RAJU, 1997), ou mesmo tão alta quanto 1.000 kHz, a depender da estrutura e do tipo de aplicação (GIURGIUTIU; REYNOLDS; ROGERS, 1999). A banda de frequência mais baixa cobre uma área de detecção maior, enquanto a banda de frequência mais alta pode determinar a localização do dano (SUN *et al.*, 1995). Entre as vantagens da resposta de alta frequência é que, nessas, o comprimento de onda do sinal aplicado à estrutura é curto o suficiente para detectar até mesmo pequenas rachaduras iniciais. Tais rachaduras podem se expandir e causar falhas graves a depender da estrutura (PARK *et al.*, 2003).

Modelos eletromecânicos foram formulados com o objetivo de descrever a relação entre a estrutura e o transdutor piezoelétrico. Liang, Sun e Rogers (1994) definem a admitância elétrica (inverso da impedância) pela Equação 2.3:

$$Y(\omega) = \frac{I}{v} = i \cdot \omega \cdot a \cdot \left( \epsilon_{33}^{-T} (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \cdot \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (2.3)$$

visto que  $Y(\omega)$  representa a admitância elétrica do sistema;  $v$  é a voltagem de entrada no atuador PZT e  $I$  é a corrente de saída do PZT;  $Y_{xx}^E$  é o módulo complexo de Young do adesivo PZT em um campo de tensão elétrica nulo;  $d_{3x}^2$  é a constante de acoplamento piezoelétrica numa direção  $x$  arbitrária e deformação nula;  $\epsilon_{33}^{-T}$  é a constante dielétrica do PZT com tensão zero;  $\delta$  é o fator de perda dielétrica tangencial à pastilha PZT;  $Z$  é a impedância complexa da estrutura e  $Z_a$  é a impedância complexa do PZT, onde  $\omega$  é a frequência angular e  $a$  é a constante geométrica do adesivo PZT.

As propriedades mecânicas do PZT continuam constantes ao longo do tempo. Assim, através da Equação 2.3, a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada à impedância mecânica da estrutura (MOURA Jr., 2008; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010). Por conseguinte, variações na impedância elétrica constatada é considerada uma variação na im-

pedância mecânica da estrutura e, provavelmente, uma possível presença de falha ou dano na estrutura. Ainda, é observado que, a admitância elétrica é basicamente capacitiva, em que a parte imaginária é o termo dominante. Tal parte é mais suscetível a sofrer influências de fatores ambientais (exemplo: variação da temperatura) do que a parte real. Logo, nas aplicações, a parte real do sinal é usualmente utilizada (PALOMINO, 2008).

Um modelo para descrever a relação entre o PZT e a estrutura pode ser representado por um sistema simples equivalente ao tipo massa-mola com um grau de liberdade. Quando transdutor PZT, situado em uma estrutura, for excitado por uma voltagem de entrada  $v$  em uma determinada faixa de frequência, é apresentado um modelo eletromecânico análogo ao tipo massa-mola (Figura 2.5), em que  $v$  é a voltagem de entrada no atuador PZT,  $I$  é a corrente de saída do PZT,  $M$  é a massa,  $C$  é o coeficiente de amortecimento e  $K$  é a constante da mola ((LIANG; SUN; ROGERS, 1994)).

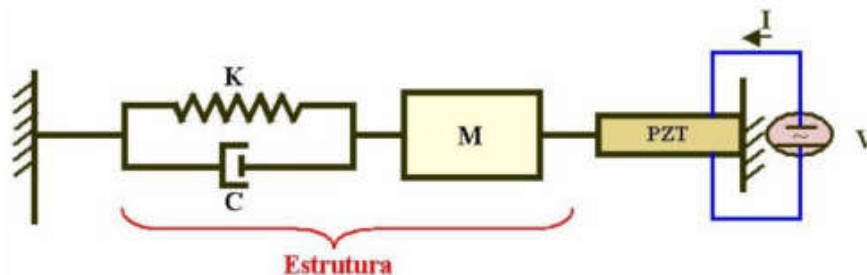


Figura 2.5 – Transdutor PZT fixado em uma estrutura e sua representação como um modelo eletromecânico do tipo massa-mola.

Fonte: Retirado de Moura Jr. (2008)

No trabalho apresentado por Liang, Sun e Rogers (1994), no modelo de um grau de liberdade o PZT é excitado em alta frequência e apresenta como retorno a curva de impedância da estrutura estudada. Mudanças na impedância mecânica da estrutura devido a uma falha levam a uma modificação do sinal (impedância elétrica) emitido pelos PZT acoplados e/ou embutidos na à estrutura, cujo sinal é medido dentro de uma faixa de frequência. Mudanças nas condições estruturais são então identificadas através da comparação entre as assinaturas de impedância antes e depois de uma ocorrência de falha (MARUO *et al.*, 2015; BHALLA; SOH, 2012; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010; ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2009; PEAIRS; TARAZAGA; INMAN, 2007; PEAIRS; INMAN; PARK, 2007).

No trabalho desenvolvido por Almeida e Baptista (2014), é apresentado um estudo experimental da técnica EMI - SHM, onde são apontados os resultados da comparação entre os sinais de impedância, constatando-se a presença do dano/falha estrutural (Figura 2.6). No estudo é apresentado o sinal *Healthy*, ou seja, o sinal baseline (estrutura íntegra) e o

sinail com dano observado na estrutura (*Damaged*). Os sinais são representados pelo sinal de impedancia eletromecanica (eixo y) em uma determinada faixa de frequencia (eixo x).

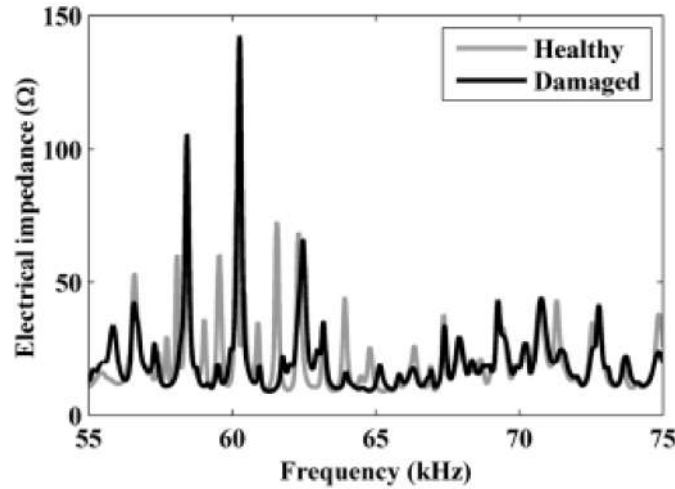


Figura 2.6 – Exemplificação por representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica.

Fonte: Retirado de Almeida e Baptista (2014)

A mensuração da diferença entre os sinais de impedância elétrica antes e após a ocorrência de alterações no estado da estrutura é feita mediante alguns índices/indicadores, dentre os quais tem-se o Desvio Médio Quadrático (*Root Mean Square Deviation-RMSD*) (Equação 2.4) e o Desvio de Coeficiente de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation-CCD*) (Equação 2.5).

O RMSD (Equação 2.4) mede a similaridade de impedância atribuídos a uma mesma frequência, e respaldados na norma euclidiana (GIURGIUTIU, 2014; GIURGIUTIU; ROGERS, 1998). Este indicador é baseado então na comparação entre os valores de impedância antes do dano, ou seja, no estado intacto ( $Z_E^0(k)$ ), cujo sinal é também chamado de baseline, e aqueles obtidos em algum momento do futuro ( $Z_E(k)$ ), todos medidos em vários  $k$  pontos no domínio da frequência, cujo intervalo varia de  $\omega_I$  (frequência inicial) a  $\omega_F$  (frequência final) .

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_E(k) - Z_E^0(k)]^2}{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_E^0(k)]^2}} \quad (2.4)$$

Diferentemente do RMSD, o qual mensura a distância/diferença média entre as curvas de impedância, o CCD (Equação 2.5) analisa as curvas de impedância de forma global, baseando-se no coeficiente de correlação (MARQUI *et al.*, 2008).

$$CCD = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(Re(Z_{base,i}) - Re(Z_{base}^-))(Re(Z_{FIS,i}) - Re(Z_{FIS}^-))}{S_{FIS} S_{base}} \right), \quad (2.5)$$

onde  $n$  é o número de valores do domínio da frequência,  $Re(Z_{base,i})$  é a parte real do sinal de impedância na condição intacta,  $Re(Z_{base}^-)$  a média da parte real do sinal de impedância no estado intacto,  $Re(Z_{FIS,i})$  é a parte real do sinal de impedância do PZT após o dano,  $Re(Z_{FIS}^-)$  é a média da parte real do sinal de impedância do PZT após o dano,  $S_{FIS}$  o desvio padrão da parte real do sinal de impedância do PZT que representa o dano e  $S_{base}$  o desvio padrão da parte real do sinal de impedância do PZT que representa o sinal na condição intacta.

Usar um analisador de impedância, como o HP4194A, é a maneira mais simples de determinar a impedância eletromecânica de estruturas inteligentes (estruturas contendo transdutores PZTs). Porém, o custo do equipamento é de aproximadamente US\$ 40.000 e pesa aproximadamente 30 quilos. Existem outras opções com funções limitadas que custam menos de US\$ 2.000. No entanto, eles ainda são volumosos (pesando vários quilos). Como consequência, os pesquisadores têm buscado formas alternativas de realizar essa tarefa (MARUO *et al.*, 2015).

## 2.3 Parte geoestatística do estudo

A interpolação é uma técnica que consiste em definir, a partir de um grupo discretos de dados, uma função ou um conjunto de funções analíticas que possam auxiliar na determinação de qualquer valor no domínio de definição. É uma técnica usada para a aferição do valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos já amostrados (conhecidos) na mesma área ou região.

A interpolação se baseia em um conceito de que os valores do atributo estudado tendem a ser mais semelhantes entre si quando estão mais próximos espacialmente, e mais diferentes entre si quando estão dispostos em locais distantes uns dos outros. (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Existem diferentes técnicas disponíveis de interpolação. Dentre as técnicas de interpolação clássica pode-se citar: Inverso da Distância e Polígonos. Algumas vantagens ao se usar tais técnicas são: os métodos são simples, intuitivos e facilmente implementáveis em rotinas computacionais. Porém, tem como desvantagem o fato de não considerarem o suporte amostral, o padrão de variabilidade espacial e não fornecem uma quantificação do erro da estimativa. (MATHERON, 1963).

Já os métodos de interpolação espacial mais comuns do Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) comumente pertencem a duas categorias: locais e globais. Os globais são mais empregados em superfícies de tendência, já os locais podem ser polinômios de baixa ordem, funções *spline*, médias móveis ponderadas e triangulação. Entretanto, tais métodos não oferecem os erros relacionados às estimativas. Apenas o Geoestatística (pelo método da krigagem) o faz por meio de um “modelo contínuo de variação espacial”. Os modelos de características quantitativas indeterminadas no campo se baseiam nas médias e nos erros

médios aleatórios. As médias são armazenadas nos mapas criados e os erros são definidos por intermédio do cálculo dos desvios-padrão. Entretanto, normalmente não é satisfatório apenas o desvio-padrão para o reconhecimento dos erros, mas também a inserção das correlações espaciais dos atributos (LOURENÇO, 1998)

Assim, Geoestatística foi desenvolvida como uma aplicação da Teoria das Variáveis Regionalizadas (MATHERON, 1963; MATHERON, 1967; MATHERON, 1971), e inicialmente aplicada para a solução de problemas de estimativas de recursos e reservas nas áreas de Engenharia de Minas e Geologia. Atualmente é aplicada em diversas áreas, entre as quais se pode citar: agricultura de precisão (MARTINS *et al.*, 2019; OBROSLAK; DOROZHYSKY, 2017; ZHAOYONG; ABUDUWAILI; YIMIT, 2014); meteorologia (DAYA, 2015; BOISVERT; MANCHUK; DEUTSCH, 2009; RAO; NARAYANA, 2015), e; meio ambiente (MACHIWAL *et al.*, 2018; AHAMED; LOGANATHAN, 2017; ELUMALAI *et al.*, 2017; DELBARI; AMIRI; MOTLAGH, 2016; KHANDUZI; PARIZANGANEH; ZAMANI, 2015).

As variáveis tratadas pelos métodos geoestatísticos, denominadas variáveis regionalizadas, são caracterizadas por possuírem uma continuidade espacial e/ou temporal no domínio sob análise, de tal forma que pontos amostrais espacialmente próximos uns dos outros possuem valores mais similares entre si, cuja diferença aumenta à medida que se aumenta a distância que separa tais pontos (REVUELTA, 2018; CHILÈS; DELFINER, 2012). Neste sentido, pontos amostrais mais próximos espacialmente possuem uma correlação maior entre si em relação àqueles mais distantes, em que tal correlação pode ser quantificada pela função semivariograma (Equação 2.6).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2.6)$$

O semivariograma ( $\gamma(h)$ ) quantifica a metade das diferenças quadradas médias entre dois dados espaciais ( $z(x_i)$  e  $z(x_i + h)$ ) separados um do outro por uma distância, a qual é caracterizada por ser um vetor  $h$  (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). O cálculo do semivariograma para várias classes de distâncias em uma direção espacial específica fornece um inventário da continuidade nesta na forma de um gráfico (semivariograma experimental) comparando os valores de semivariância ( $\gamma(h)$ ) e suas respectivas distâncias (Figura 2.7). Sua característica de ser uma função crescente reflete a perda progressiva da continuidade espacial nessa direção (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004; CHILÈS; DELFINER, 2012; ABZALOV, 2016).

Semivariogramas experimentais têm a necessidade de serem ajustados por funções matemáticas para seu uso no processo de estimação (equações de krigagem). As justificativas para isso circundam vários aspectos, cujos argumentos e discussões podem ser encontrados em (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; ROSSI; DEUTSCH, 2014; REVUELTA, 2018). Um modelo de semivariograma pode consistir em uma ou mais funções matemáticas simples, a

dependem da forma do semivariograma experimental (KITANIDIS, 1997). Algumas funções matemáticas para ajuste de semivariogramas incluem os seguintes modelos (Figura 2.8): esférico, exponencial e gaussiano, que são caracterizados por possuírem patamar (valor de semivariância) limitando o aumento da função.

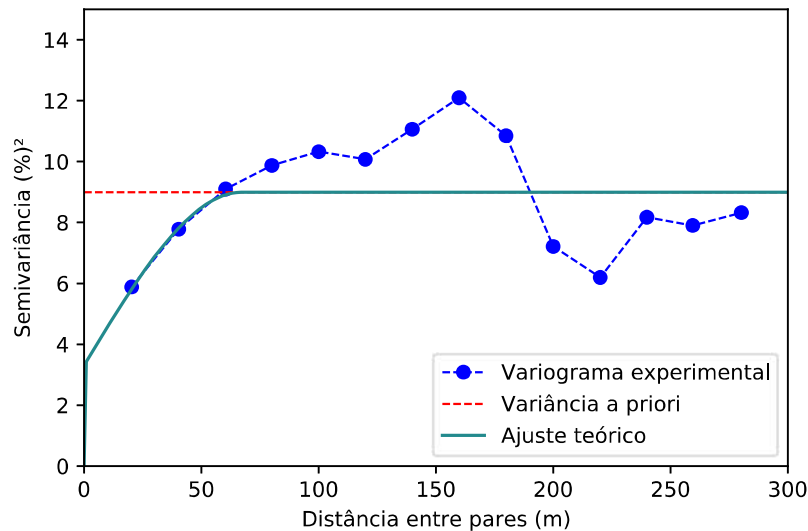


Figura 2.7 – Exemplo de um semivariograma experimental com variância amostral.

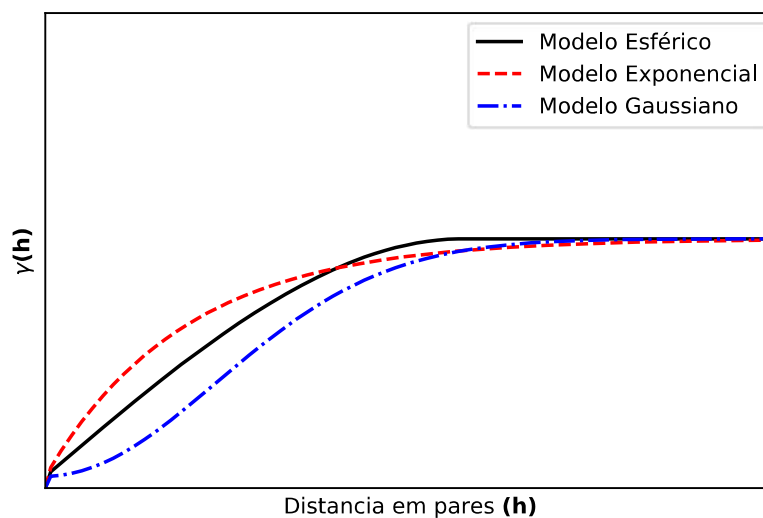


Figura 2.8 – Representação dos modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano para ajuste de semivariogramas.

Três parâmetros definem o formato dos modelos de semivariograma (Figura 2.9): Efeito Pepita, Patamar e Alcance. Efeito Pepita é uma variância caótica ou não estruturada e re-

apresenta uma variabilidade que ocorre numa escala menor que o espaçamento entre os dados amostrais, e portanto, não mapeada no semivariograma. O Patamar tem como significado a variância dos dados na direção do vetor  $h$ , geralmente igual à variância da variável analisada (variância a priori); e por último, o Alcance, é a distância a partir da qual não há correlação espacial entre os valores na direção do vetor  $h$  (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013; ROSSI; DEUTSCH, 2014). Estes parâmetros caracterizam a continuidade espacial da variável sob análise, e são utilizados para a estimativa da mesma nos locais não amostrados por meio de krigagem.

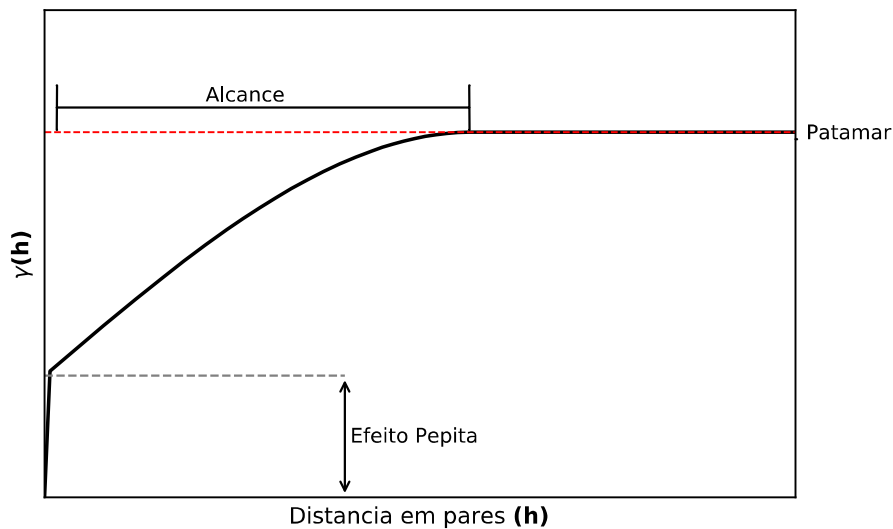


Figura 2.9 – Modelo de semivariograma esférico com seus parâmetros. A linha tracejada vermelha horizontal se refere à variância da amostra.

Entre os métodos de krigagem tem-se a krigagem ordinária, a qual é um método local de estimativas, onde a estimativa de um ponto em um local não amostrado ( $Z_{KO}^*(x_0)$ ) é obtida a partir de uma combinação linear (Equação 2.7) de  $n$  valores amostrais  $Z(x_i)$  contidos na vizinhança de busca, onde os ponderadores/pesos  $\lambda_i$  refletem a correlação espacial entre o ponto não amostrado (ou bloco) e os valores amostrais na vizinhança de busca, e entre os valores amostrais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i)] \quad (2.7)$$

Os pesos do desagrupamento são obtidos por um sistema de equações da krigagem ordinária (Equação 2.8), em que se visa obter a combinação de pesos de tal forma que haja a minimização da variância de krigagem, considerando os aspectos de continuidade espacial da variável a ser estimada, sendo estes, dados por meio dos valores de semivariograma entre os pontos amostrais ( $\gamma(x_i - x_j)$ ), e entre o ponto a ser estimado dos valores vizinhos ( $\gamma(x_i - x_0)$ ).

Ainda, uma restrição, a qual se refere à necessidade da soma dos ponderadores ser unitária, é imposta a este sistema com o objetivo de obter estimativas não enviesadas/tendenciosas, sendo denominada, portanto, de restrição de não-enviesamento. Este sistema pode ser expressado em forma de matriz (Equação 2.9), a partir da qual os pesos ótimos são calculados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - \mu = \gamma(x_i - x_0) \text{ para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \gamma(x_1 - x_2) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & \gamma(x_2 - x_2) & \dots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \dots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma(x_0 - x_1) \\ \gamma(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Além da estimativa do valor da variável no local não amostrado, os métodos de krigagem são capazes de fornecer também a variância do erro de estimativa, a qual, para o caso da krigagem ordinária, é dada pela Equação 2.10, em que  $\mu$  é o parâmetro de Lagrange.

$$\sigma_{KO}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_0 - x_i) + \mu \quad (2.10)$$

O estimador de krigagem ordinária pode ser usado como base para a estimativa de variáveis indicadoras (binárias), situação na qual tem-se a krigagem indicadora ou krigagem das indicatrizes, caracterizada por ser não paramétrica, de tal forma que a aplicação do método não é restringida pela distribuição da variável que será estimada (ROSSI; DEUTSCH, 2014; REVUELTA, 2018). A krigagem indicadora exige variáveis transformadas em 0 e 1, seguindo critérios específicos como mostrado na 2.11, onde, a partir da distribuição original, são indicados  $K$  patamares de corte (thresholds)  $z_k$ , e para cada um deles são geradas variáveis indicadoras, codificando os valores  $Z(x)$  conforme mostra a Equação 2.11, a qual trata da codificação de variáveis indicadoras a partir de uma variável contínua.

$$I(x, z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(x) \leq z_k \\ 0, & \text{se não} \end{cases} \quad (2.11)$$

Neste trabalho, a krigagem ordinária foi utilizada como base para a estimativa das variáveis indicadoras nos locais não amostrados/sem dados de entrada. Portanto, os valores

estimados  $I(x_0)$  são calculados como uma combinação linear (Equação 2.12) dos  $n$  dados de entrada  $I(x_i)$  na vizinhança de busca (forma elíptica), cujos respectivos pesos  $\lambda_i$  refletem a correlação espacial entre o ponto estimado (ou bloco) e os valores de entrada dentro da elipse de busca, que são calculados com base no sistema de krigagem ordinária (Equação 2.8), e utilizados na estimativa (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

$$I(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i) \quad (2.12)$$

Os valores das variáveis indicadoras estimados por meio da krigagem ordinária são determinados de forma que a variância do erro de estimativa seja mínima, considerando-se a restrição de não enviesamento (erro médio da estimativa é nulo) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

## 2.4 Algoritmos e Códigos

Os métodos e ferramentas geoestatísticas têm sido implementadas em diversas linguagens, entre elas o Python. O pacote *GeoestatsPy* são reimplementações das funcionalidades do *Geostatistics Software Library* (GSLIB) em Python. GSLIB é um conjunto de códigos bastante robusto para a construção de fluxos de trabalho de modelagem espacial. Logo este pacote oferece a oportunidade de criar projetos de modelagem espacial 2D em Python sem a necessidade de confiar no código Fortran compilado do GSLIB, juntamente com a utilização de conjuntos de dados que se movem entre os dados Geo-EAS do GSLIB para *Pandas - DataFrames*, e grades para *NumPy - ndarrays* respectivamente. Entre outras operações úteis pode ser citada a reamostragem de conjuntos de dados regulares e o redimensionamento de distribuições.

Para a funcionalidade do pacote *GeoestatsPy* é observada algumas dependências que contam com as seguintes bibliotecas: (1) *numpy* - para *ndarrays*; (2) *pandas* - para *DataFrames*; (3) *numpy.linalg* - para álgebra linear; (4) *numba* - para aceleração numérica; (5) *scipy* - para pesquisa rápida do vizinho mais próximo; e (6) *matplotlib.pyplot* - para construção de gráficos.

Este pacote contém duas partes, sendo *geostatspy.geostats* e *geostatspy.GSLIB*. O primeiro engloba funções GSLIB reescritas em Python, incluindo atualmente todos os variogramas, transformações de distribuição e métodos de estimativa e simulação espacial. Já o segundo inclui a reimplementação das visualizações GSLIB e invólucros de baixa tecnologia dos métodos numéricos, os quais exigem acesso a executáveis GSLIB.

A primeira parte, *geostatspy.geostats*, apresenta métodos numéricos, como por exemplo a função *ik2d* (programa IK3D do GSLIB reimplementado para estimativa de krigagem

indicadora para dados espaciais em duas dimensões (2D)), *correct\_trend* (corrige as relações de ordem de um modelo de tendência baseado em indicadores) e *backtr* (função *backtr* do GSLIB para transformar uma distribuição normal na distribuição original). Essas e outras funções são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Funções *geostatspy.geostats*.

| <b>Finalidade</b>   | <b>Função</b>        |
|---|----------------------|
| Corrige as relações de ordem de um modelo de tendência baseado em indicadores | <i>correct_trend</i> |
| Transforma uma distribuição normal na distribuição original                   | <i>backtr</i>        |
| Faz desagrupamento  | <i>declus</i>        |
| Cálculo de variograma com dados regulares em 2D                               | <i>gam</i>           |
| Cálculo de variograma com dados irregulares em 2D                             | <i>gamv</i>          |
| Para dados espaciais com espaçamento irregular em 2D                          | <i>varmapv</i>       |
| Visualização de modelos de variograma aninhados em 2D                         | <i>vmodel</i>        |
| Faz a transformação de distribuição de pontuação normal                       | <i>nscore</i>        |
| Para estimativa espacial 2D   | <i>kb2d</i>          |
| Para estimativa de krigagem indicadora 2D                                     | <i>ik2d</i>          |

Fonte: o autor.

Já a segunda parte, *geostatspy.GSLIB*, apresenta funções de utilitários que suportam movimentação entre tabela de dados, *DataFrames* e *ndarrays*, modelos em formato de arquivo Geo-EAS e dados em *grid*. Também apresenta funções de transformações de dados, continuidade espacial, reamostragem do modelo espacial e visualização utilizando *matplotlib*. Tais funções são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Funções *geostatspy.GSLIB*

| <b>Finalidade: Movimentação de dados</b>  | <b>Função</b>            |
|---|--------------------------|
| Converter 1D ou 2D numpy ndarray em um arquivo GSLIB no formato Geo-EAS para uso com métodos GSLIB    | <i>ndarray2GSLIB</i>     |
| Converter arquivos GSLIB no formato Geo-EAS em um ndarray 1D ou 2D para uso com métodos Python        | <i>GSLIB2ndarray</i>     |
| Converter pandas DataFrame em um arquivo GSLIB no formato Geo-EAS para uso com métodos GSLIB          | <i>Dataframe2GSLIB</i>   |
| Converter arquivos Geo-EAS (GSLIB) em um DataFrame pandas para uso com métodos Python                 | <i>GSLIB2Dataframe</i>   |
| Pegar dados espaciais de um DataFrame e fazer um ndarray 2D esparsa (NaN onde não há dados na célula) | <i>DataFrame2ndarray</i> |
| <b>Finalidade: Continuidade Espacial/Variograma</b>   | <b>Função</b>            |
| Transformação de distribuição afim para corrigir a média e o desvio padrão do recurso                 | <i>affine</i>            |
| Transformação de uma distribuição em uma distribuição normal/Gaussiana                                | <i>nscore</i>            |

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Desagrupamento baseado em células/ <i>grid</i>   | declus                       |
| Faz um dicionário de parâmetros de variograma para aplicação com estimativa espacial e simulação   | make_variogram               |
| Variograma com amostragem irregular (.exe deve estar no diretório de trabalho)   | gamv                         |
| Mapa de variogramas para dados espaçados regulares (.exe deve estar no diretório de trabalho)  | varmap                       |
| Mapa de variogramas para dados com espaçamento irregular (.exe deve estar no diretório de trabalho)  | varmapv                      |
| Para ajuste variográfico (.exe deve estar no diretório de trabalho)  | vmodel                       |
| <b>Finalidade: Modelagem Espacial/Krigagem</b>   | <b>Função</b>                |
| Estimativa de krigagem.  | kb2d                         |
| Simulação Sequencial Gaussiana (incondicional 2D).   | sgsim_uncond                 |
| Simulação Sequencial Gaussiana (2D e 3D).  | sgsim                        |
| Simulação Sequencial Gaussiana (incondicional 2D).   | cosgsim_uncond               |
| <b>Finalidade: Reamostragem do Modelo Espacial</b>   | <b>Função</b>                |
| Amostra do modelo 2D com X e Y fornecidos e anexar ao DataFrame.   | sample                       |
| Fazer um <i>kernel</i> gaussiano para convolução.  | gkern                        |
| Extrair amostras espaçadas regulares de um modelo espacial 2D.   | regular_sample               |
| Extrair amostras aleatórias de um modelo espacial 2D.  | random_sample                |
| Converter dados de pontos espaciais em um DataFrame para uma grade ndarray esparsa.  | DataFrame2ndarray            |
| <b>Finalidade: Visualização de dados</b>   | <b>Função</b>                |
| Reimplementação em Python do módulo <code>pixelplt</code> da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>matplotlib</code>   | <code>pixelplt</code>        |
| Reimplementação em Python do módulo <code>pixelplt</code> da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>matplotlib</code> com suporte para subplots   | <code>pixelplt_st</code>     |
| Reimplementação em Python do módulo <code>pixelplt</code> da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>matplotlib</code> com suporte para subplotagens e legenda em cores  | <code>pixelplt_log_st</code> |
| Plotagem de <i>grids</i> (modelos de blocos) e de dados de entrada/amostrais, sendo uma reimplementação em Python de um módulo da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>MatPlotLib</code>  | <code>locpix</code>          |
| Plotagem de <i>grids</i> (modelos de blocos) e de dados de entrada/amostrais, sendo uma reimplementação em Python de um módulo da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>MatPlotLib</code> com suporte para subplotagens                    | <code>locpix_st</code>       |
| Plotagem de <i>grids</i> (modelos de blocos) e de dados de entrada/amostrais, sendo uma reimplementação em Python de um módulo da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>MatPlotLib</code> com suporte para subplotagens e legenda em cores | <code>locpix_log_st</code>   |
| Plotagem de mapa de localização, sendo uma reimplementação em Python de um módulo da biblioteca <code>GSLIB</code> com métodos <code>MatPlotLib</code>   | <code>locmap</code>          |

|  |           |
|--|-----------|
| Plotagem de mapa de localização, sendo uma reimplantação em Python de um módulo da biblioteca GSLIB com métodos Matplotlib com suporte para subplotagens | locmap_st |
| Histogramas reimplantados em Python de GSLIB hist com métodos Matplotlib   | hist      |
| Histogramas reimplantados em Python de GSLIB hist com métodos Matplotlib com suporte para subplotagens   | hist_st   |

Fonte: o autor.

Logo, a partir de tais funções apresentadas na Tabela 2.1 e 2.2 foi possível desenvolver os resultados apresentados no trabalho e suas respectivas conclusões.

## Capítulo 3

# Materiais e Métodos

Para o estudo, foram utilizados 100 dados numéricos de métrica de dano simulando dados reais com base no índice RMSD. Tais dados simulados foram posicionados cobrindo uma placa de alumínio de 100cm x 100cm (espaçamento entre dados de 9,09cm x 9,09cm), onde os valores de métrica de dano definidos representam valores reais quando apresentado um dano nesta placa. Tal dano foi simulado em três posições diferentes.

A primeira posição do dano foi simulado no centro da placa, o que pode ser visto pela variação espacial dos dados numéricos da Figura 3.1, onde os maiores valores estão localizados no centro da placa e vão diminuindo a medida que se aproximam das bordas.

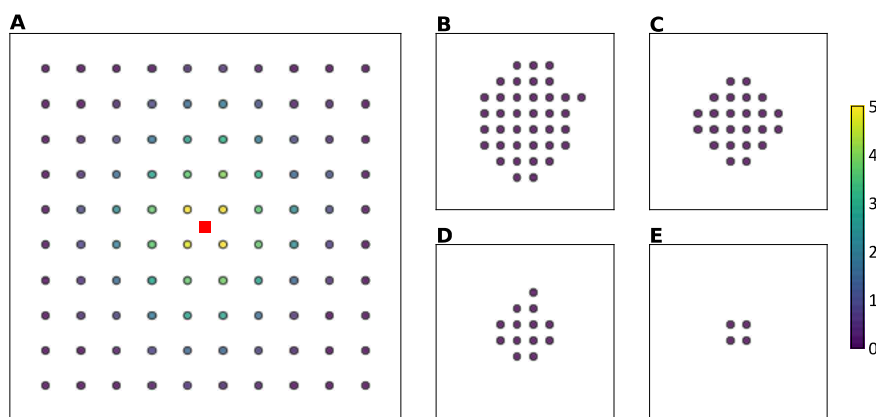


Figura 3.1 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no centro e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado.

A Segunda posição do dano foi simulada no canto inferior esquerdo da placa, o qual também pode ser visto pela variação espacial dos dados numéricos da Figura 3.2.

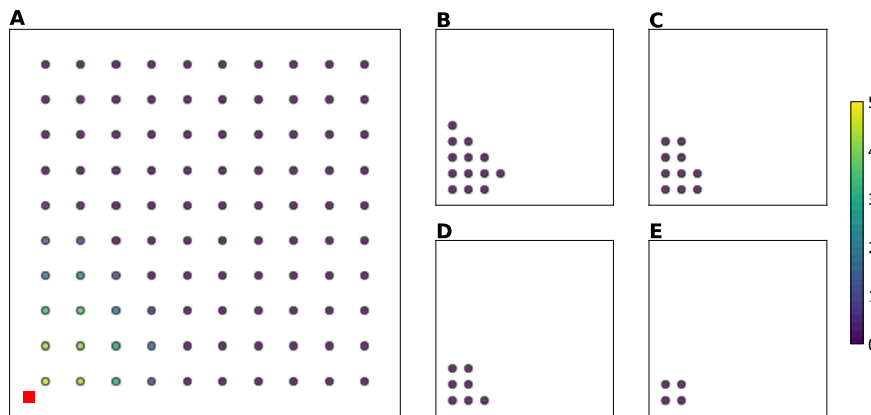


Figura 3.2 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no lado inferior esquerdo e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado.

A ultima simulação foi feita no canto direito da placa, como observado na Figura 3.3, onde os valores localizados a direita da placa se apresentam maiores e diminuem a medida que vão se distanciando.

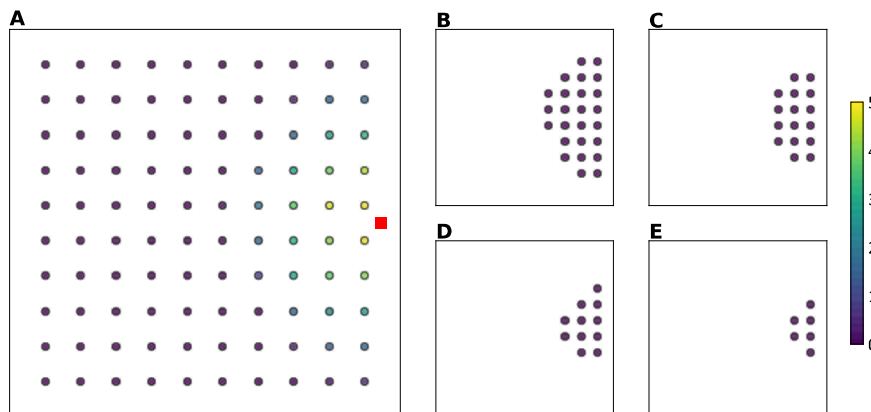


Figura 3.3 – Malha 9,09cm x 9,09 cm - Localização dos pontos numéricos na placa (A) com simulação de dano no canto direito e valores de métrica de dano superior a 1 (B), 2 (C), 3 (D) e 4 (E). O quadrado vermelho representa onde o dano está localizado.

Os dados da métrica de dano foram submetidos à análise estatística, a fim de identificar as principais características da distribuição. Em seguida, quatro limites/patamares de corte ( $z_i$ ) dos dados de métricas de dano (1, 2, 3, 4) foram estabelecidos para serem utilizados pela abordagem de krigagem indicadora. Com base neles, quatro variáveis indicadoras ( $I_i$ ), de valores binários, foram geradas, sendo um para cada limite, cuja distribuição de valores foi baseada na Equação 4.10.

Variogramas foram calculados em várias direções (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°) para cada variável indicadora, de forma a identificar as direções preferenciais de continuidade,

---

as quais foram os *azimutes* 0° (Norte) e 90° (Leste). Tais variogramas experimentais foram modelados e, os resultados, usados para realizar a krigagem indicadora.

A krigagem indicadora dos quatro limites/patamares de corte (1, 2, 3, 4) foi realizada tendo como base o estimador de krigagem ordinária, e utilizando as informações dos dados numéricos de métrica de dano, as suas respectivas variáveis indicadoras e as informações variográficas. O estimador de krigagem ordinária foi utilizado com o objetivo de mapear a vizinhança de busca, utilizando um raio de 17 cm, cujo valor foi menor que os alcances variográficos de todas as variáveis indicadoras, de forma que a vizinhança de pesquisa escolhida é uma interseção de todas as vizinhanças possíveis.

Os resultados entregues foram na forma de “probabilidade de estar abaixo do patamar de corte” em virtude do processo de geração das variáveis indicadoras (Equação 4.10). Logo, para o cálculo de “probabilidade de estar acima do patamar de corte”, os resultados obtidos foram subtraídos de 1, cujos novos resultados foram usados para mapear a probabilidade de estar acima destes (1, 2, 3, 4). Assim, a probabilidade da métrica de dano estar entre os limites  $i$  e  $i - 1$  foi definido como a diferença entre  $P(i)$  e  $P(i - 1)$ .

Com o objetivo de comparar diferentes cenários de dano e espaçamento entre os PZT's, quatro malhas regulares, com base em dados numéricos simulados, foram analisadas para cada dano. Tais malhas apresentam diferentes espaçamentos, como apresentado na Figura 3.4: (1) 11,11cm x 11,11cm; (2) 14,286cm x 14,286cm; (3) 16,67cm x 16,67cm e; (4) 20,0cm x 20,0cm. No primeiro caso, foi simulado um dano no centro de uma placa de alumínio 100cm x 100cm. Os mesmos procedimentos foram efetuados para cada um dos cenários apontados, em suas respectivas simulações de posição de dano. Em todos os cenários de malha regular com distanciamento 20cm x 20cm constata-se que não é apresentado valores maiores que 4, o que será discutido no capítulo seguinte (Capítulo 4).



Figura 3.4 – Ilustração dos valores de métricas de dano com o dano (quadrado vermelho) nos cenários 1 (linha 1), 2 (linha 2) e 3 (linha 3) com diferentes malhas regulares para cada cenário.

## Capítulo 4

---

# Resultados e Discussões

---

No presente capítulo serão abordados, individualmente, os resultados obtidos para cada um dos três cenários estudados: dano na posição central; dano na posição inferior esquerda; e dano na posição direita da placa. Em cada cenário foi feita uma análise estatística dos dados e, em seguida, apresentado os resultados variográficos, os respectivos resultados obtidos pelo método de krigagem indicadora e o comparativo entre os valores médios das variáveis indicadoras com o resultado do modelo obtido.

### 4.1 Cenário 1 - Dano Central

A partir da análise estatística dos dados numéricos para a malha regular de 9,09 cm x 9,09 cm, foi observado uma distribuição assimétrica positiva (Figura 4.1), cujo formato não foi determinado, possivelmente devido a quantidade limitada de dados. As análises de quartis apontam que 50% dos dados são inferiores a 0,6; 25% situados entre 0,6 e 1,9; e somente 25% são superiores a 1,9.

Os valores de *outliers* apresentados no box-plot (Figura 4.1) estão diretamente associados à localização do dano, uma vez que estão localizados no centro da placa e apontam valores superiores a 4. Dessa maneira os *outliers* são de fundamental importância para a previsão da posição do dano, o que justifica a utilização do limite igual a 4 para esta finalidade.

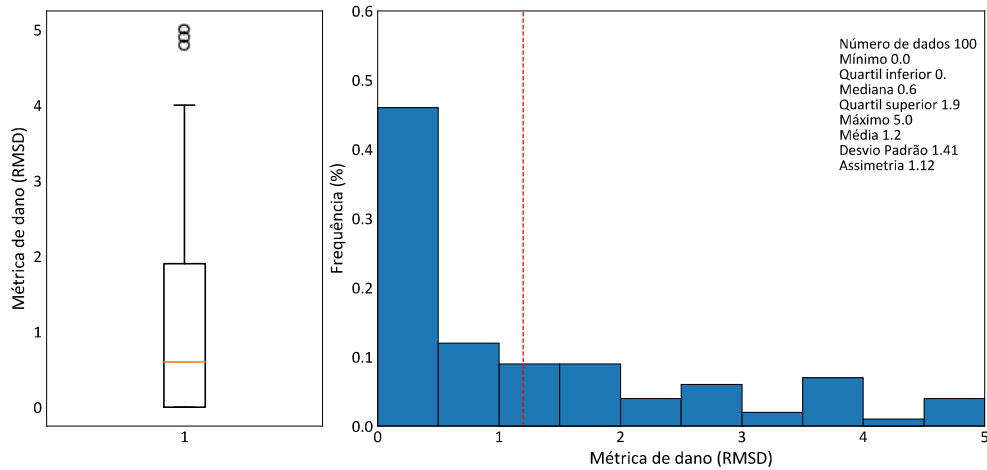


Figura 4.1 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto).

Para um mesmo cenário, a falha sendo apresentada no centro da placa, com um arranjo de pontos no formato 11,11cm x 11,11cm (Figura 4.2) apontou-se uma distribuição assimétrica positiva com média de 1,36 e sem a presença de outliers. Análises de quartis mostram que 50% dos dados estão abaixo de 0,69; 25% entre 0,69 e 2,63; e 25% acima de 2,63.

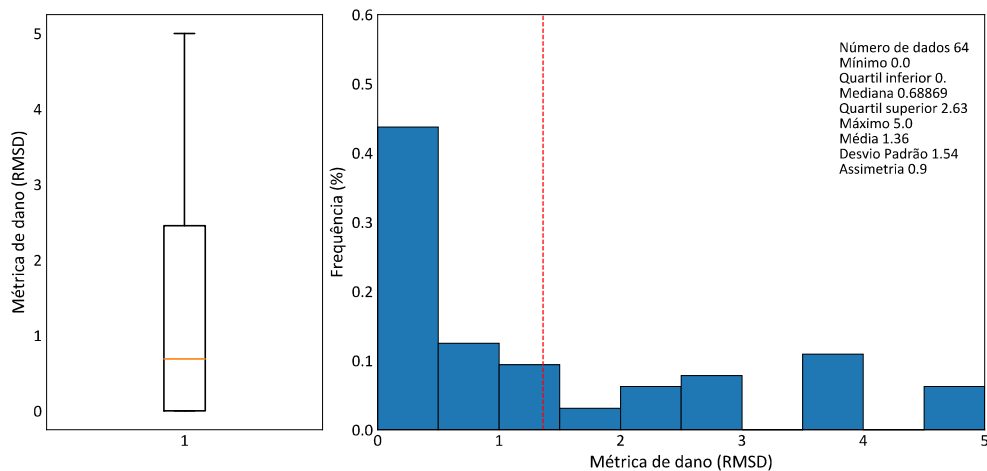


Figura 4.2 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11cm x 11,11cm) com valor médio apresentado pela linha tracejada em vermelho.

Já em um arranjo 14,286cm x 14,286cm, na análise estatística (Figura 4.3), é exibido novamente uma distribuição assimétrica positiva e a análise dos quartis indicam que 50% dos dados são menores que 0,78; 25% destes se situam entre 0,78 e 1,9; e apenas 25% são superiores a 1,9. Também, como apresentado no box-plot (Figura 4.3), há um *outlier*, cujo

valor é maior que 4, o que mais uma vez, pela sua localização próximo ao centro da placa, está diretamente associado à localização do dano.

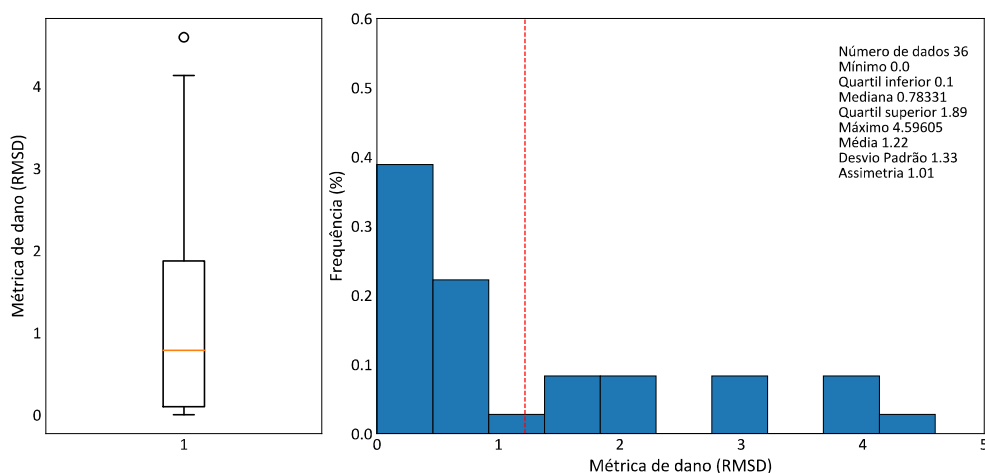


Figura 4.3 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e outliers (círculos em preto).

Também para este mesmo cenário, porém com uma malha regular de 16,67cm x 16,67cm, é observado através de análise estatística (Figura 4.4) uma distribuição assimétrica positiva (moda (0) < mediana (0,9) < média (1,77)). Através da análise de quartis constatou-se que 50% dos dados são inferiores a 0,9; 25% se encontram entre 0,9 e 3,6; e 25% são dados com valores acima de 3,6.

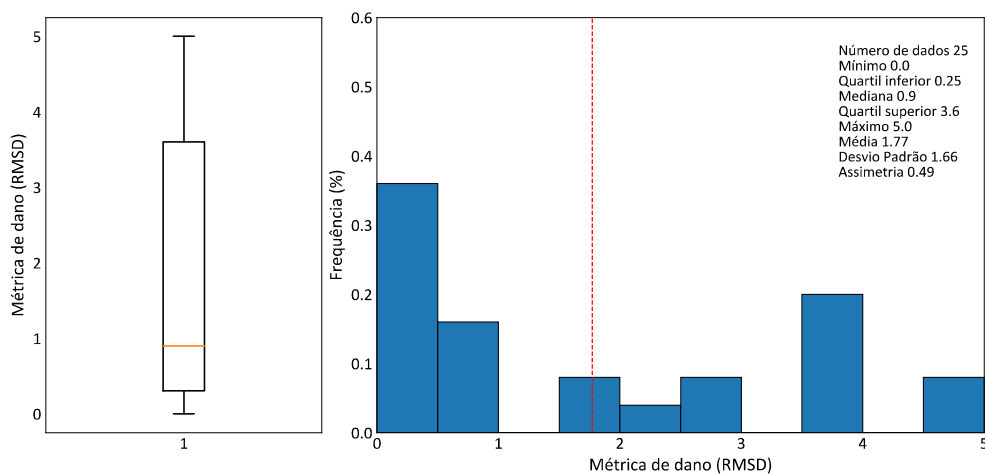


Figura 4.4 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho).

Por fim, através da análise estatística da malha 20,0cm x 20,0cm (Figura 4.5) não é possível observar visualmente um modelo de distribuição. É observado que não há presença de

*outliers* e que nenhum de seus dados ultrapassa o valor 4, possivelmente devido ao número de pontos (16) e a sua disposição na placa, estando mais afastados da falha que se encontra no centro da placa.

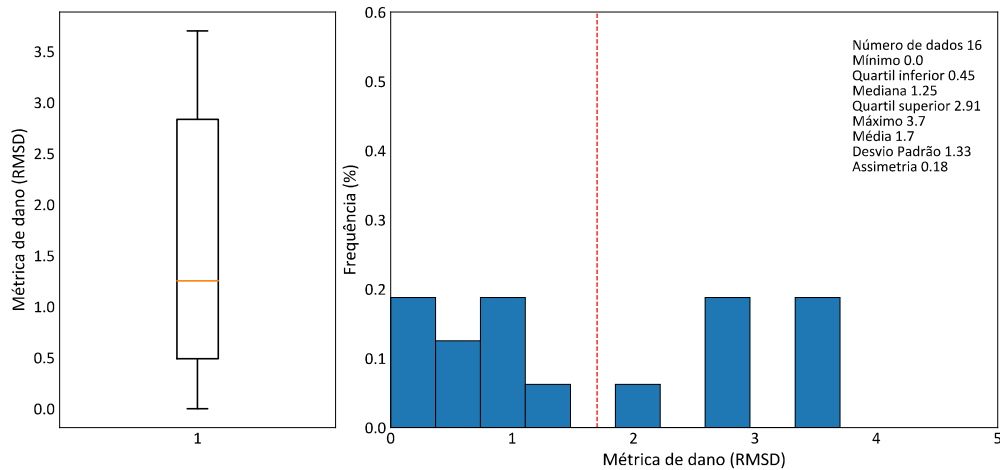


Figura 4.5 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) com representação do valor médio pela linha tracejada em vermelho.

Em todas as análises observadas (Figuras (4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5)), apesar de apresentarem uma distribuição assimétrica positiva, o formato não foi determinado, o que pode ser explicado devido a quantidade limitada de dados.

Os semivariogramas experimentais configurados em uma malha 9,09 cm x 9,09 cm (Figura 4.6), mostram direções preferenciais de continuidade Norte-Sul (Azimute 0°) e Leste-Oeste (Azimute 90°). Como observado (Tabela 4.1 e Figura 4.6), a direção Norte-Sul apresentou-se como direção de maior continuidade nos limiares 1 e 3 (anisotropia geométrica), enquanto nos outros limiares, 2 e 4, não foi observada anisotropia. Na modelagem de semivariograma, a existência de anisotropia pode ser uma evidência de propagação direcional da falha e/ou área afetada, sendo útil para o mapeamento dessas informações.

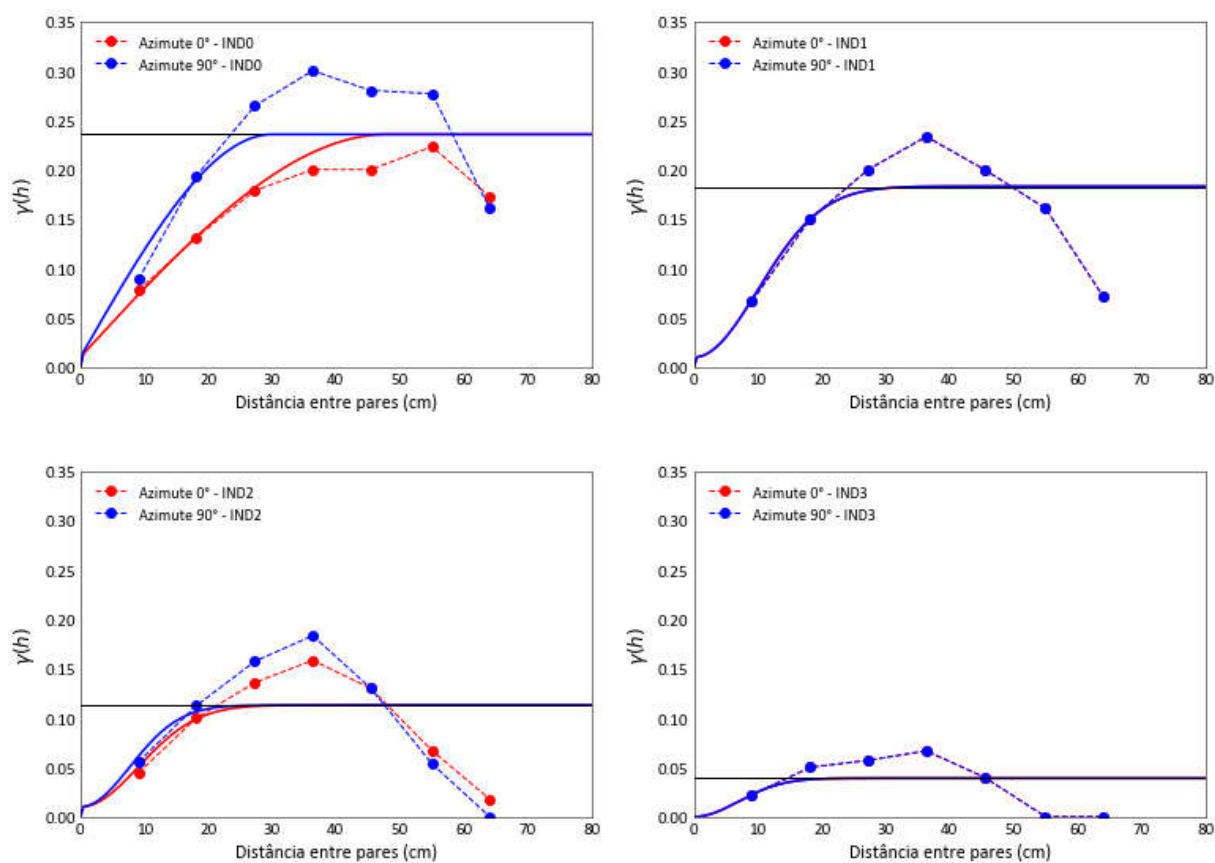


Figura 4.6 – Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.6 também se observa que os modelos utilizados na modelagem do semivariograma foram esféricos (limiar igual a 1) e Gaussiano (limiares iguais a 2, 3 e 4). O modelo Gaussiano reflete um fenômeno caracterizado por uma continuidade muito maior em relação à esférica. Desta forma, apesar do alcance dos semivariogramas diminuírem à medida que os limiares aumentam, o ajuste realizado pelo modelo Gaussiano e a presença de efeito pepita nulo indicam um fenômeno mais contínuo em relação às outras situações. Devido ao fato de 62% dos dados de métrica de dano serem menores que 1, a krigagem indicadora resultante para este valor limite é caracterizado por ter uma variabilidade espacial muito maior em relação aos demais, o que é refletido pelo formato do semivariograma (modelo esférico) e seu efeito pepita, que representa 4,06% do patamar.

Tabela 4.1 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09 cm x 9,09 cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito<br>Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|-------------|------------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |             |                  | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimute 0°  | 0,01             | Esférico  | 0,236        | 48,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,01             | Esférico  | 0,236        | 30,0    |
| 2      | IND1            | Azimute 0°  | 0,01             | Gaussiano | 0,182        | 24,5    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,01             | Gaussiano | 0,182        | 24,5    |
| 3      | IND2            | Azimute 0°  | 0,01             | Gaussiano | 0,114        | 22,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,01             | Gaussiano | 0,114        | 19,0    |
| 4      | IND3            | Azimute 0°  | 0,00             | Gaussiano | 0,039        | 17,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,00             | Gaussiano | 0,039        | 17,0    |

Fonte: o autor.

Para os semivariogramas experimentais realizados para a malha 11,11cm x 11,11cm (Figura 4.7), também são apresentadas direções preferenciais de continuidade Norte-Sul (Azimute 0 °) e Leste-Oeste (Azimute 90 °). Assim, é observado (Tabela 4.2) que os limiares 1 e 4 não apresentaram anisotropia, enquanto os limiares 2 e 3 apresentaram anisotropia geométrica. Constata-se ainda que o limiar igual a 2 apresentou a direção Norte-Sul como maior direção de continuidade, enquanto no limiar igual a 3 observa-se na direção Leste-Oeste uma maior continuidade.

Tabela 4.2 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 8x8.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito<br>Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|-------------|------------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |             |                  | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimute 0°  | 0,048            | Esférico  | 0,200        | 43,8    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,048            | Esférico  | 0,200        | 43,8    |
| 2      | IND1            | Azimute 0°  | 0,020            | Esférico  | 0,198        | 36,9    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,020            | Esférico  | 0,198        | 29,9    |
| 3      | IND2            | Azimute 0°  | 0,000            | Esférico  | 0,145        | 24,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000            | Esférico  | 0,145        | 26,0    |
| 4      | IND3            | Azimute 0°  | 0,001            | Gaussiano | 0,059        | 20,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,001            | Gaussiano | 0,059        | 20,0    |

Fonte: o autor.

Ainda, através da Tabela 4.2 e da Figura 4.7, são apresentados os modelos utilizados na modelagem de semivariogramas, sendo que, os limiares de corte iguais a 1, 2 e 3 foi utilizado para o ajuste variográfico o modelo esférico, caracterizado por apresentar uma maior variabilidade espacial. Em tais limiares o efeito pepita representou 19,35%, 9,17% e 0%, respectivamente, do patamar, o que mostra uma diminuição da variabilidade em escalas mais curtas que o espaçamento amostral conforme há o aumento do limiar de corte. Para limiar igual a 4 o ajuste foi realizado pelo modelo Gaussiano, caracterizado por representar

fenômenos extremamente contínuos, o que indica uma elevada homogeneidade da variável indicadora associada a este limiar.

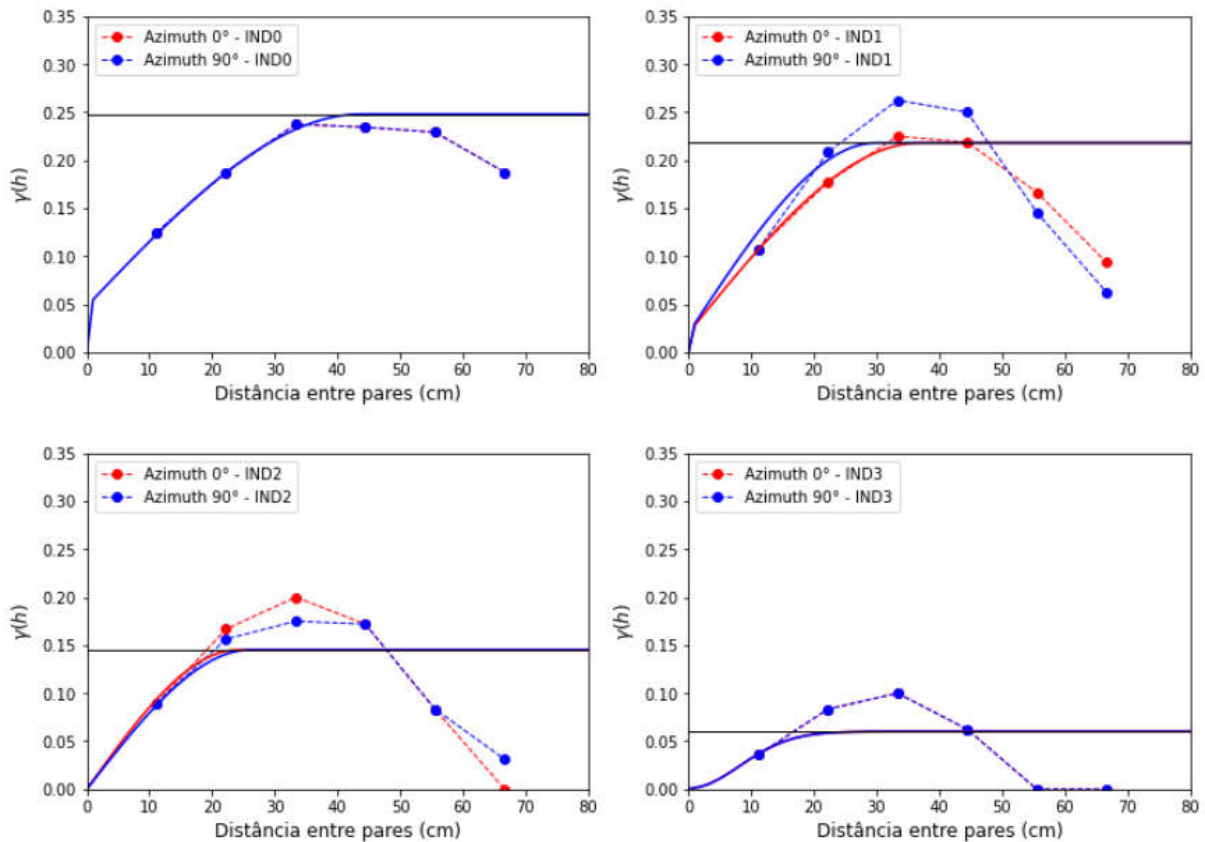


Figura 4.7 – Malha de configuração 11,11cm x 11,11cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Na malha de configuração 14,286cm x 14,286cm (Tabela 4.3 e Figura 4.8), observa-se nos limiares 1, 3 e 4 a utilização de semivariogramas unidirecionais, uma vez que não possível obter os variogramas das direções preferenciais, provavelmente em função da quantidade limitada de informação para tal. Dessa forma, foram utilizados os semivariogramas unidirecionais para esses limiares, cujos ajustes teóricos foram feitos a partir do modelo esférico. Para o limiar restante (limiar igual a 2), observa-se direções preferenciais Norte-Sul e Leste-Oeste, tendo sido utilizado o modelo esférico para o ajuste e apresentando a direção Norte-Sul como maior direção de continuidade (anisotropia geométrica).

Tabela 4.3 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,138         | Esférico  | 0,106        | 30,6    |
| 2      | IND1            | Azimuth 0°    | 0,007         | Esférico  | 0,154        | 33,8    |
|        |                 | Azimuth 90°   | 0,007         | Esférico  | 0,154        | 23,5    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,026         | Esférico  | 0,097        | 25,3    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,008         | Esférico  | 0,046        | 18,2    |

Fonte: o autor.

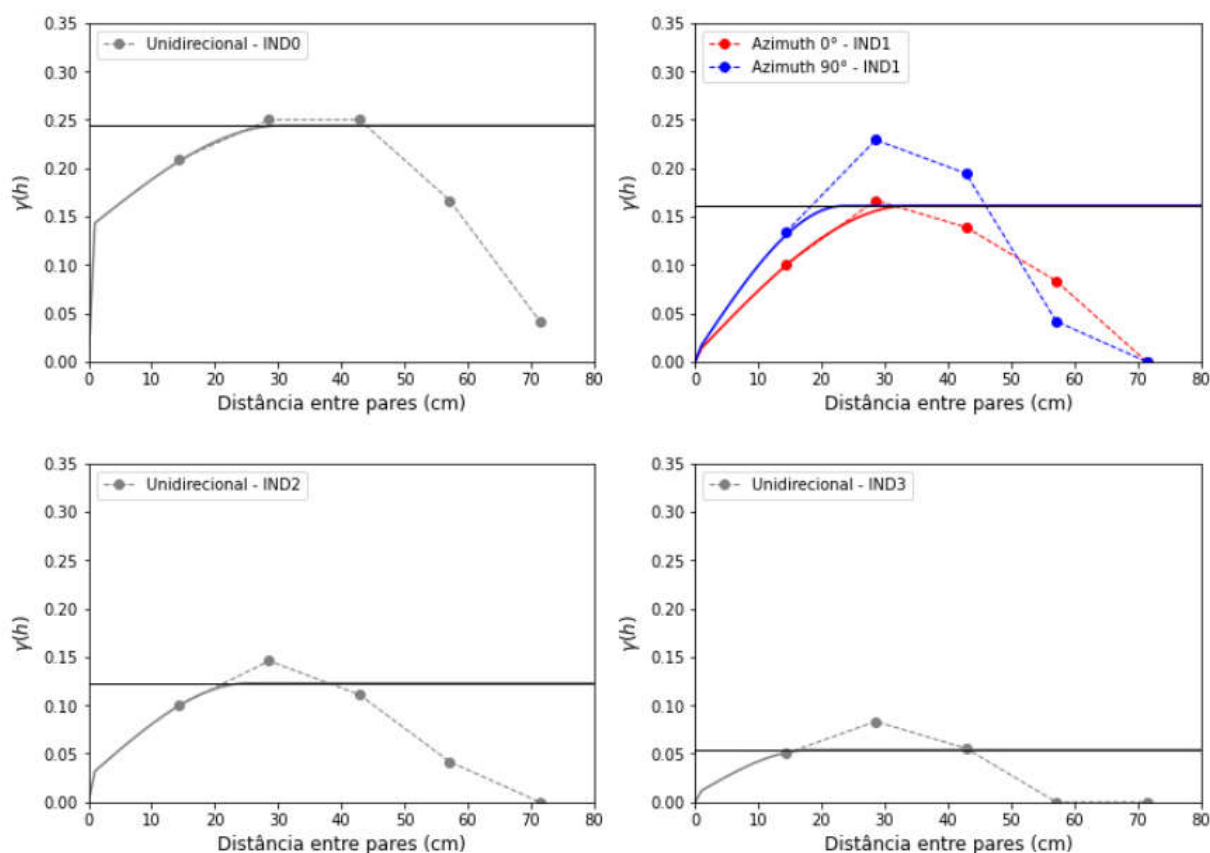


Figura 4.8 – Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Como ultima malha analisada, a malha de configuração 16,67cm x 16,67cm (Tabela 4.4 e Figura 4.9) apresentou como resultados variográficos apenas semivariogramas unidirecionais, os quais foram ajustados a partir de modelos esféricos.

Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,062         | Esférico  | 0,198        | 48,7    |
| 2      | IND1            | Unidirecional | 0,011         | Esférico  | 0,239        | 34,1    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,025         | Esférico  | 0,185        | 30,4    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,015         | Esférico  | 0,062        | 17,8    |

Fonte: o autor.

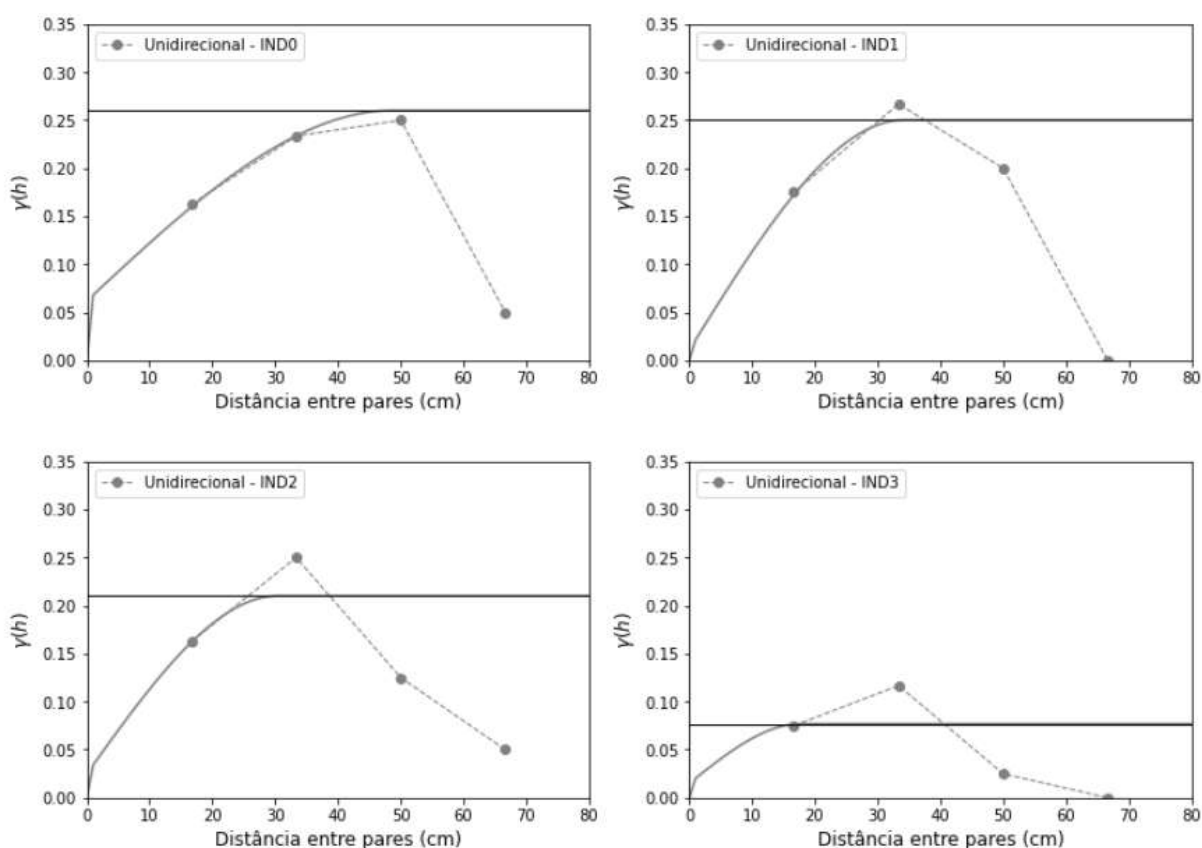


Figura 4.9 – Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariogramas experimentais com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

A qualidade dos semivariogramas experimentais, dada pelo número e disposição dos pontos do gráfico, foi maior no caso do limiar igual a 1 em todas as configurações de malha (Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9), deteriorando-se sequencialmente do segundo ao quarto limiar. Isso é esperado, pois limiares muito maiores que a maioria dos dados podem causar instabilidades em semivariogramas experimentais (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Observa-se também de maneira geral, que o ajuste do semivariograma da variável indicadora atribuída ao limiar igual a 4 mostra uma modelagem baseada em apenas um ponto do semivariograma experimental. Este é um resultado esperado, pois as variáveis indicadoras baseadas em valores muito superiores à maioria dos dados - na cauda superior da distribuição - podem resultar em semivariogramas deteriorados. No entanto, uma melhoria nos semivariogramas pode ser alcançada quando dados adicionais são incluídos na análise.

Na Figura 4.10 observa-se os mapas obtidos a partir da realização da krigagem indicadora. É apresentado nesta figura os mapas de probabilidade das respectivas malhas estudadas (9,09cm x 9,09cm, 11,11cm x 11,11cm, 14,286cm x 14,286cm e 16,67cm x 16,67) em colunas. As probabilidades de métrica de dano maiores que um determinado limiar estão dispostas em linhas, entendendo-se a figura como uma matriz, onde a primeira linha apresenta os mapas de probabilidade de limiar igual a 1 (patamar de corte = 1), a segunda limiar igual a 2 (patamar de corte = 2), até a quarta linha onde apresenta um limiar igual a 4 (patamar de corte = 4), ou seja, onde os mapas de probabilidade de métrica de dano são maiores que 4.

Como a falha está localizado no centro da placa, à medida que o valor do limiar aumenta, as probabilidades dos valores serem superiores a um determinado limiar são sequencialmente restritas ao centro da placa, convergindo a existência desses valores limitados a este local. Dessa forma, a probabilidade que o limiar igual a 4 esteja restrito ao centro da placa é maior pois é onde se localiza o dano. Assim, através do mapeamento de valores extremos seria possível prever a localização dos danos e tomar as medidas corretivas.

É constatado ainda na Figura 4.10, na malha 9,09 cm x 9,09 cm, que o mapa relacionado à probabilidade da métrica de dano ser superior a 1 (primeira linha da Figura 4.10) mostra uma ampla área de alta probabilidade, potencialmente indicando a área afetada devido à falha estrutural. Portanto, as informações aferidas pelos mapas de probabilidade podem ser utilizadas para mapear a área relativa à existência de uma falha estrutural (caso do limiar igual a 4) e/ou afetada pela falha (eventualmente o caso do limiar igual a 1), fornecendo dados para apoiar a manutenção da estrutura.

No cenário de malha 8x8 pontos (Figura 4.10), é possível verificar a redução da confiabilidade desse modelo, sendo observada pela ocorrência de valores de probabilidade mais distantes dos extremos (0 e 1). Este comportamento é evidenciado nos limiares iguais a 1, 2 e 3. Para o limiar igual a 4, especificamente na região do dano, não houve perda significativa de confiabilidade, podendo prever com precisão a localização da falha. Assim, pode-se concluir que a capacidade de prever a ocorrência de falha/dano não foi prejudicada com o aumento do espaçamento de 9,09 cm (malha 10x10 pontos) para 11,11 cm (malha 8x8 pontos).

A maior perda de confiabilidade para os limiares iguais a 1, 2 e 3 no cenário 8x8 pode ser devido à maior variabilidade espacial entre os valores das respectivas variáveis indica-

doras, já que as variâncias da amostra foram 0,248, 0,218 e 0,145, respectivamente. Isso não ocorre com o limiar de corte igual a 4, uma vez que há poucos valores de métrica de dano maiores que 4, resultando em uma variância de amostra igual a 0,060.

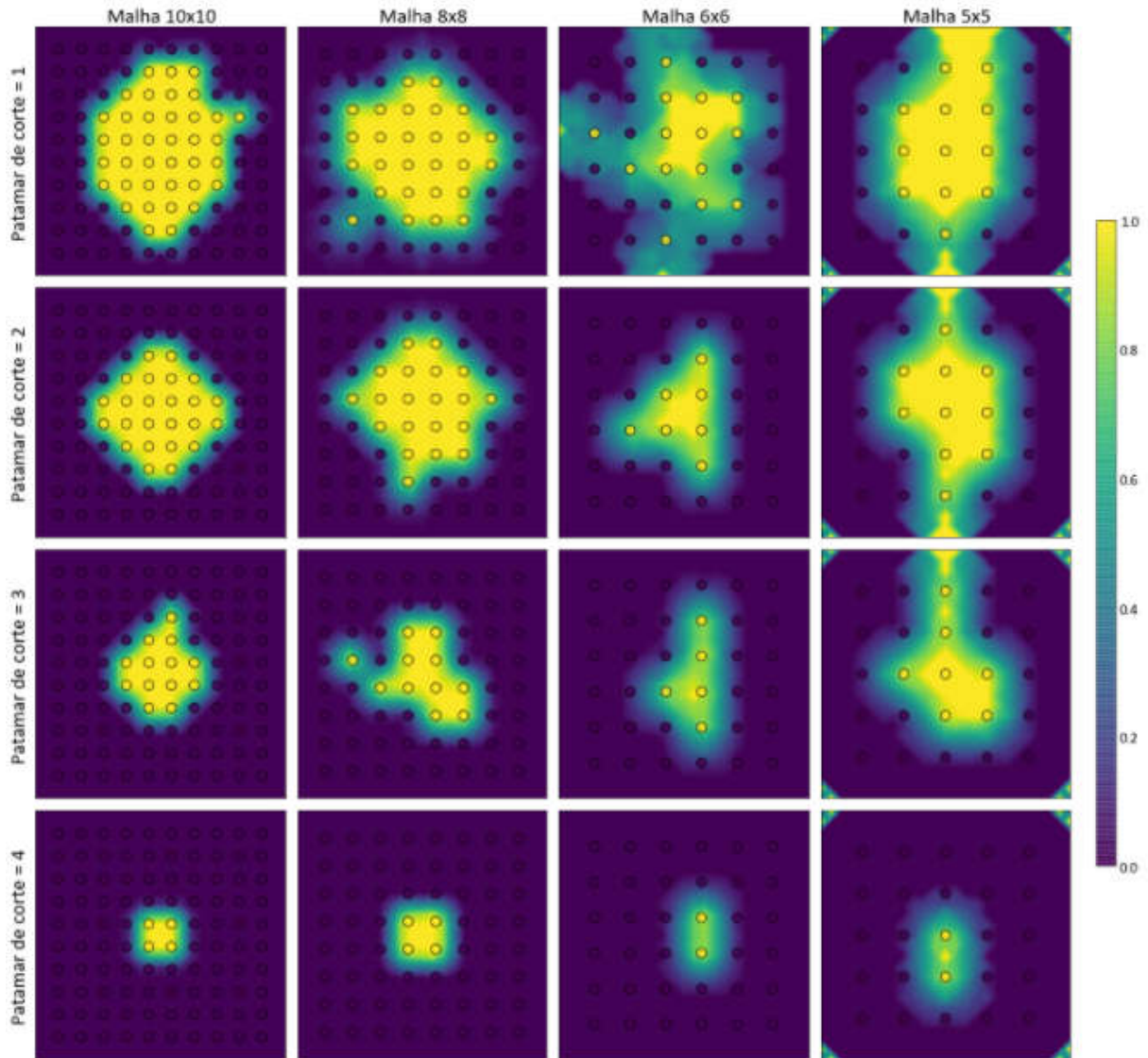


Figura 4.10 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano.

Nos casos de malhas configuradas em 6x6 e 5x5 pontos (observadas na Figura 4.10), é possível verificar o aumento da confiabilidade dos resultados dos cenários de 6x6 para 5x5, evidenciado pela ocorrência de valores de probabilidade mais próximos dos extremos (0 e 1) com o aumento de espaçamento nos dados de métricas de dano. Isso pode ser explicado como consequência da presença de um valor de métrica de dano se sobrepondo ao local da falha (centro da placa) para o cenário de 5x5 pontos, o que não ocorre para a malha 6x6.

Os resultados para o limiar igual a 4 mostram menor capacidade de prever a posição do dano no centro da placa para esses dois últimos modelos quando comparados aos

resultados citados. Isso ocorre devido à maior distância entre os pontos amostrados nesses cenários. O cenário de malha 5x5 pontos apresentaram resultado mais adequado em relação ao cenário de 6x6 pontos, provavelmente devido à sobreposição de amostragem ao local da falha. Porém, em condições gerais de falha em várias posições, o resultado dessa condição (6x6) poderia ser menos confiável em relação aos demais cenários considerados.

A partir da realização da krigagem indicadora, ao se comparar os valores médios das variáveis indicadoras nos resultados do modelo com os dados numéricos (amostra) (Figura 4.11), verifica-se que os valores médios respectivos foram reproduzidos aproximadamente no modelo, visto que a maior diferença foi, em todos os cenários, atribuído ao limiar igual a 1. Este desvio pode ser consequência da maior variabilidade espacial desta situação em relação aos demais limiares. O menor desvio foi atribuído ao limiar igual a 4, também em todos os cenários abordados. Apesar da baixa confiabilidade dos semivariogramas experimentais no limiar igual a 4, a atribuição do menor desvio a esse limiar pode ser consequência da alta continuidade deste cenário, com probabilidades superiores a 0 estritamente limitadas ao centro da placa, onde o dano está localizado.

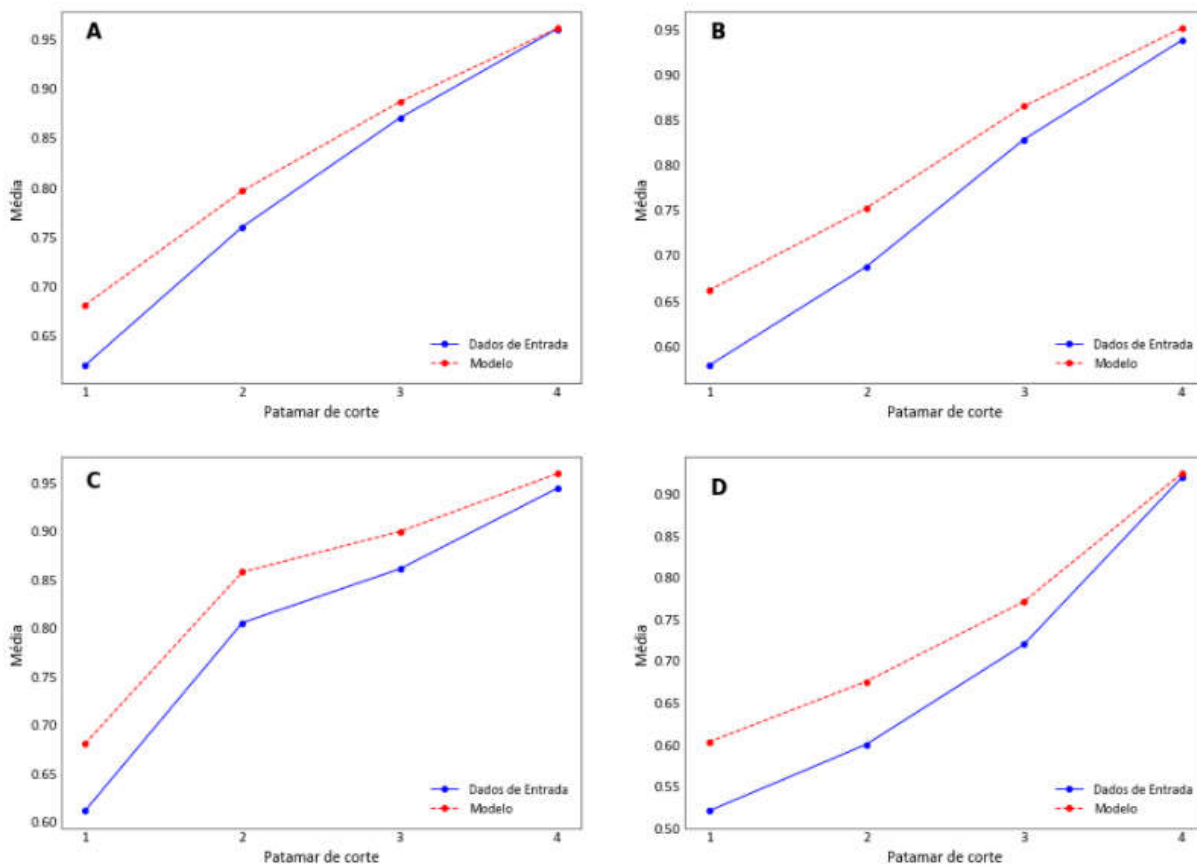


Figura 4.11 – Valores médios das variáveis indicadoras relacionadas aos seus respectivos limiares no modelo e dados numéricos (de entrada). A, B, C e D representam os respectivos cenários estudados: 10x10, 8x8, 6x6 e 5x5.

Observa-se ainda, na Figura 4.11, que o cenário 10x10 (A), e o cenário 5x5 (D) apresentaram respectivamente 0,047% e 0,55% de desvio no patamar de corte igual a 4, ou seja,

menores desvios nesse limiar (que se aproxima da falha) quando comparados aos cenários 8x8 (B)(14,4%) e 6x6 (C)(15,9%). No cenário 5x5, apesar de apresentar uma menor quantidade de pontos quando comparado aos cenários 8x8 e 6x6, esse pequeno desvio provavelmente pode ser explicado pela posição da malha contendo um valor de métrica de dano que se sobrepõe sobre o local da falha.

Em um outro cenário, com espaçamento regular de 20 cm (4x4 pontos), não foi possível obter semivariogramas experimentais e, dessa forma, realizar a krigagem indicadora. Isso representa para a estrutura em estudo, devido ao seu tamanho e geometria, que não é possível obter modelos para prever locais de ocorrência de falhas para malhas regulares com espaçamento superior a 16,67 cm (malha com 5x5 pontos). Este foi um procedimento avaliado nesta contribuição para definir alguns critérios para limitar a distribuição amostral das assinaturas de impedância dos patches de PZT, podendo ainda ser estudado em situações de falhas em outros locais da estrutura. No entanto, este mesmo procedimento de ensaio deve ser realizado para cada estrutura específica a ser estudada.

## 4.2 Cenário 2 - Dano Inferior Esquerdo

Para o presente cenário, a análise estatística dos dados numéricos para a malha regular de 9,09cm x 9,09cm apresentou distribuição assimétrica positiva (Figura 4.12). As análises de quartis apontam que mais de 75% dos dados neste cenário apresentaram valor zero, o que explica a quantidade de *outliers* presentes na análise, os quais apontam para a posição que o dano se encontra.

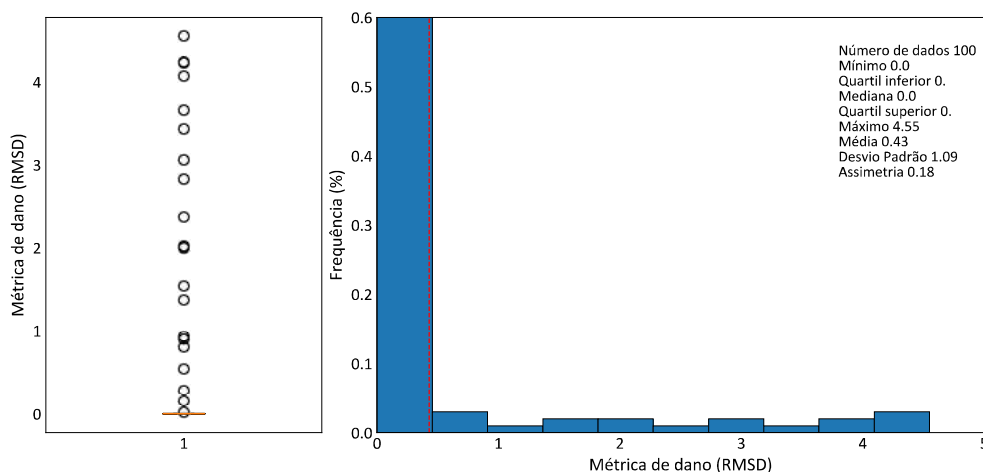


Figura 4.12 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Na malha 11,11cm x 11,11cm (Figura 4.13) observa-se uma distribuição positiva com média de 0,39 e a presença de 75% dos dados com valor zero, esclarecendo a presença dos

varios *outliers*.

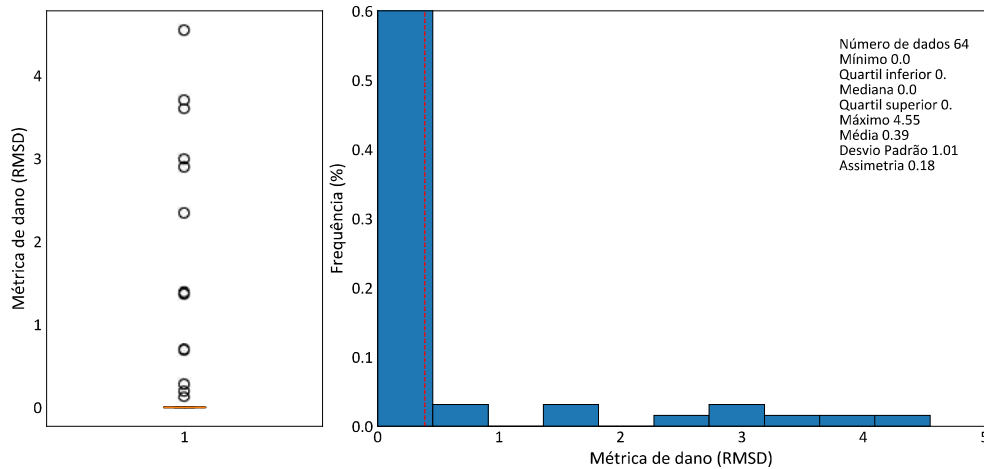


Figura 4.13 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11 cm x 11,11 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

A análise estatística da malha 14,286cm x 14,286cm (Figura 4.14) observa-se também uma distribuição positiva dos dados, porém com média 0,42 e 50% dos dados com valor zero. Nessa malha, constata-se ainda que 25% dos dados estão entre 0 e 0,08 e 25% estão acima de 0,08, estando presente alguns *outliers*.

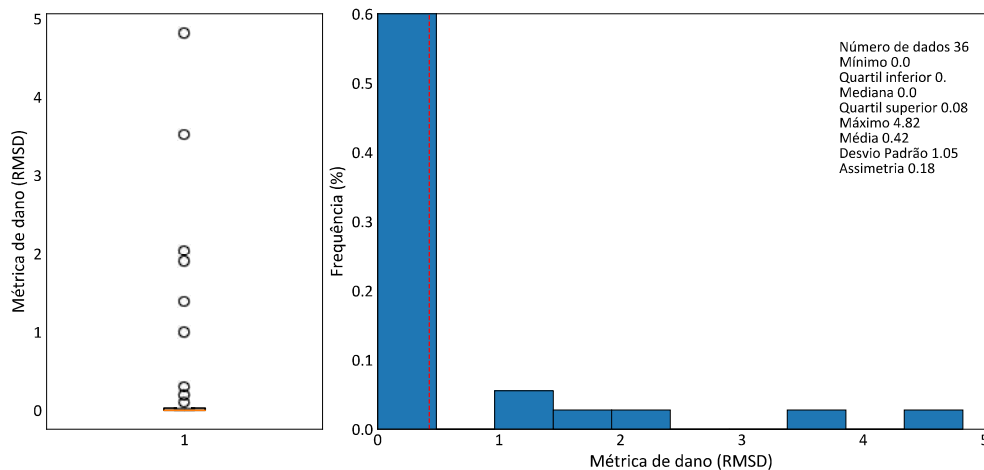


Figura 4.14 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Já a malha 16,67cm x 16,67cm (Figura 4.15) é apresentada pela análise estatística dos dados uma distribuição positiva, sendo que 75% dos dados apresentam valor igual a zero, sendo apresentados na análise cinco *outliers*.

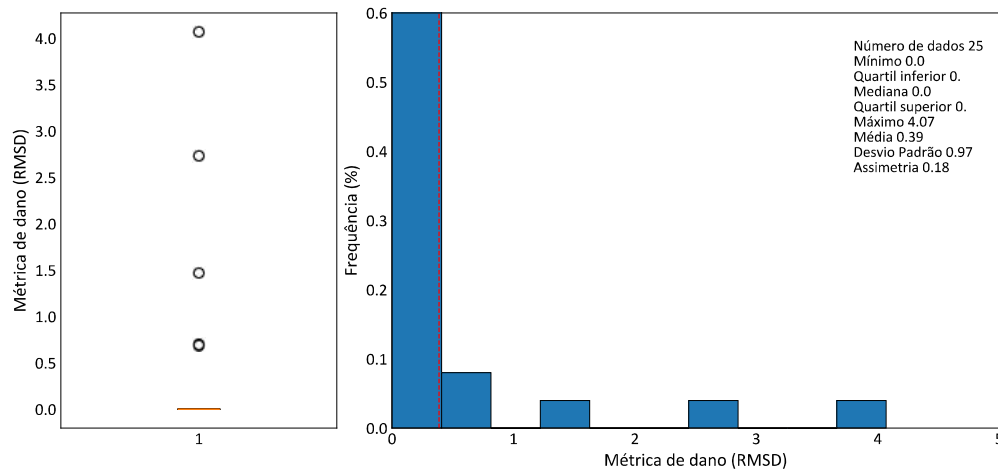


Figura 4.15 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Por fim, através da análise estatística da malha 20,0cm x 20,0cm (Figura 4.16) é possível observar um modelo de distribuição positiva dos dados. É observado que há presença de outliers, porém nenhum de seus dados ultrapassa o valor 4, possivelmente devido ao número de pontos (16) e a sua disposição na placa, estando mais afastados da falha que se encontra no canto inferior da placa.

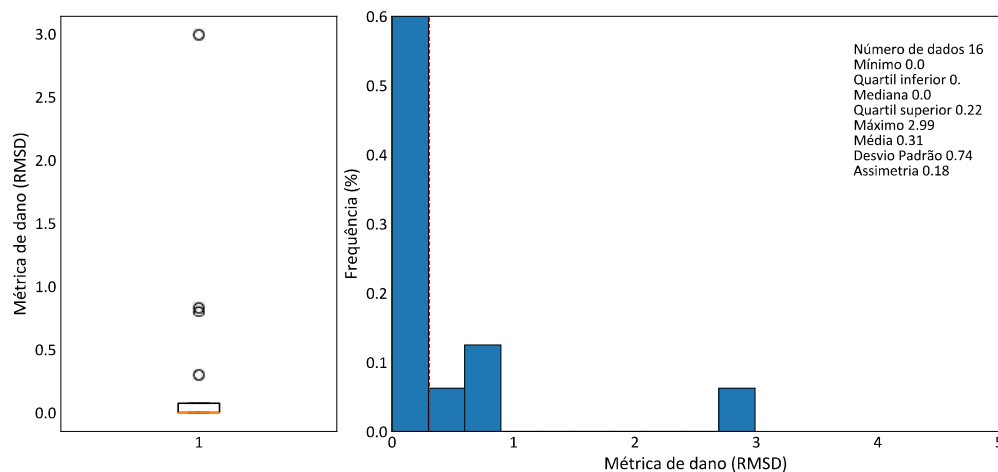


Figura 4.16 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Nas análises estatísticas (Figuras (4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16)) é observado que, mesmo apresentando distribuição assimétrica positiva, o formato não foi determinado, podendo ser devido a limitada quantidade de dados.

Para a malha com configuração 9,09cm x 9,09cm é observado (Figura 4.17) os semiva-

riogramas experimentais, os quais mostram direções preferenciais de continuidade Norte-Sul e Leste-Oeste. Ainda, é apresentado (Figura 4.17 e Tabela 4.5) como direção de maior continuidade a direção Norte-Sul nos limiares 1,2 e 3, apresentando anisotropia geométrica, o que não é observado no limiar 4 (sem anisotropia observada).

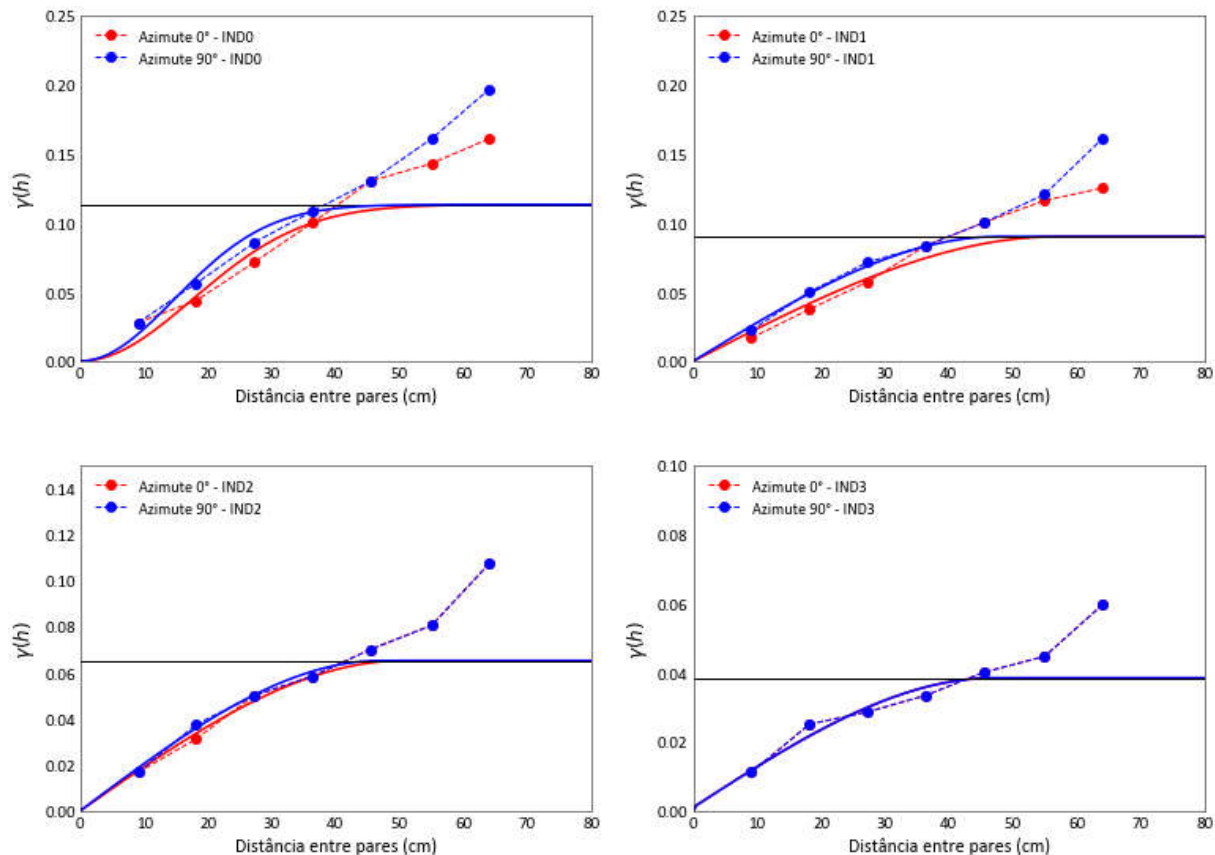


Figura 4.17 – Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.5 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09 cm x 9,09 cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|-------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |             |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimute 0°  | 0,000         | Gaussiano | 0,113        | 43,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000         | Gaussiano | 0,113        | 36,0    |
| 2      | IND1            | Azimute 0°  | 0,000         | Esférico  | 0,089        | 57,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000         | Esférico  | 0,089        | 47,8    |
| 3      | IND2            | Azimute 0°  | 0,000         | Esférico  | 0,065        | 50,5    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000         | Esférico  | 0,065        | 47,0    |
| 4      | IND3            | Azimute 0°  | 0,001         | Esférico  | 0,037        | 47,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,001         | Esférico  | 0,037        | 47,0    |

Fonte: o autor.

Observa-se também (Figura 4.17 e Tabela 4.5) que o limiar igual a 1 apresentou maior

continuidade quando comparado aos demais limiars. Constata-se ainda um aumento da homogeneidade dos valores analisado, observado pela diminuição do patamar (contribuição) a medida que o limiar (patamar de corte) aumenta.

Já os semivariogramas experimentais configurados em uma malha 11,11cm x 11,11 (Figura 4.18) também mostraram direções preferenciais Norte-Sul e Leste-Oeste, entretanto, apenas nos limiars 1 e 2 foi apresentado a direção Norte-Sul como direção de maior continuidade, permanecendo os outros limiars sem anisotropia observada.

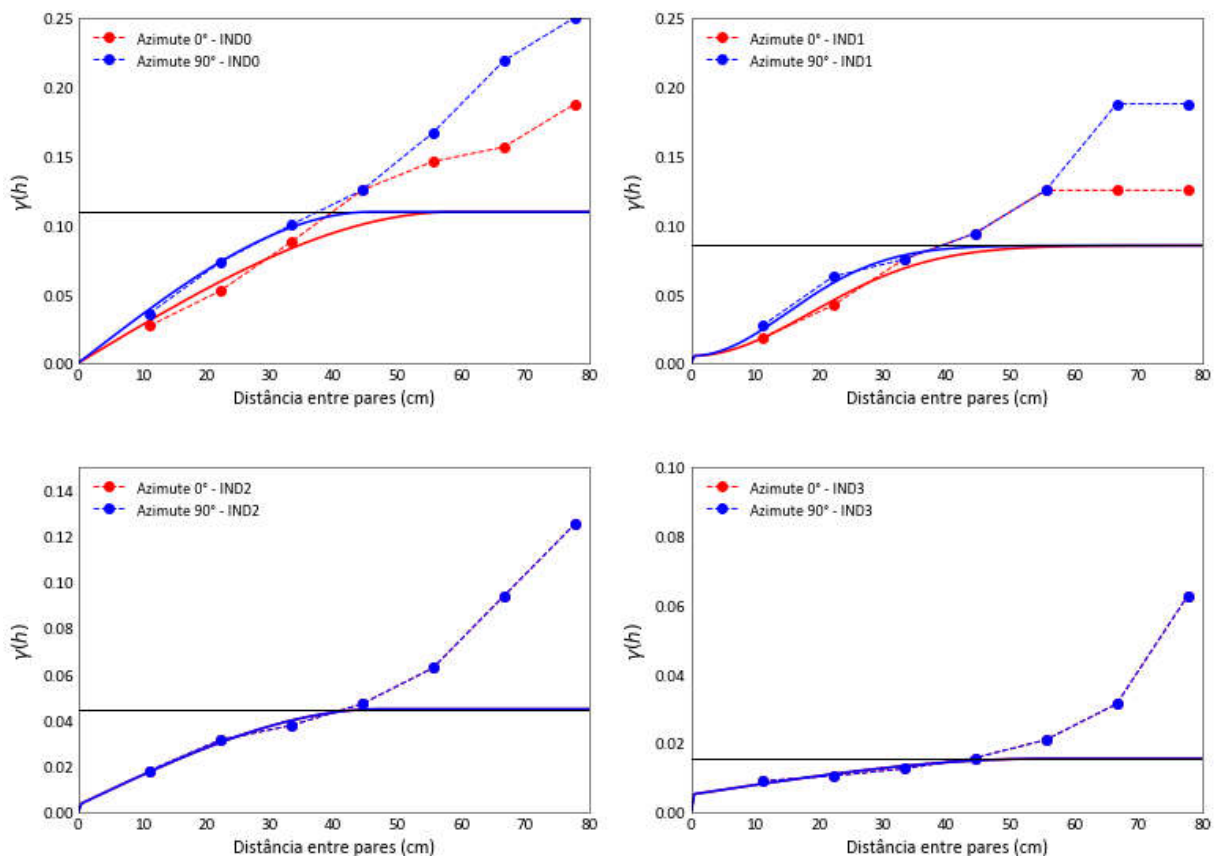


Figura 4.18 – Malha de configuração 11,11cm x 11,11cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Na Tabela 4.6 e Figura 4.18 se observa uma maior continuidade no limiar igual a 1, refletido pelo modelo gaussiano apresentado. É apresentado também um possível aumento da homogeneidade dos dados analisados, constatado pelo decréscimo do patamar ao passo que o limiar aumenta.

Tabela 4.6 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 11,11cm x 11,11cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|-------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |             |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimute 0°  | 0,000         | Esférico  | 0,109        | 59,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000         | Esférico  | 0,109        | 46,0    |
| 2      | IND1            | Azimute 0°  | 0,005         | Gaussiano | 0,079        | 46,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,005         | Gaussiano | 0,079        | 37,0    |
| 3      | IND2            | Azimute 0°  | 0,003         | Esférico  | 0,041        | 47,5    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,003         | Esférico  | 0,041        | 47,5    |
| 4      | IND3            | Azimute 0°  | 0,005         | Esférico  | 0,010        | 55,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,005         | Esférico  | 0,010        | 55,0    |

Fonte: o autor.

Na malha de configuração 14,286cm x 14,286cm (Figura 4.19 e Tabela 4.7) observa-se anisotropia geométrica nos limiares 1 e 3 com direção preferencial de continuidade Norte-Sul. Ainda, é apontado na modelagem do semivariograma os modelos gaussiano (limiares iguais a 1,2 e 3) e esférico (limiar igual a 4), refletindo assim uma maior continuidade nos três primeiros limiares.

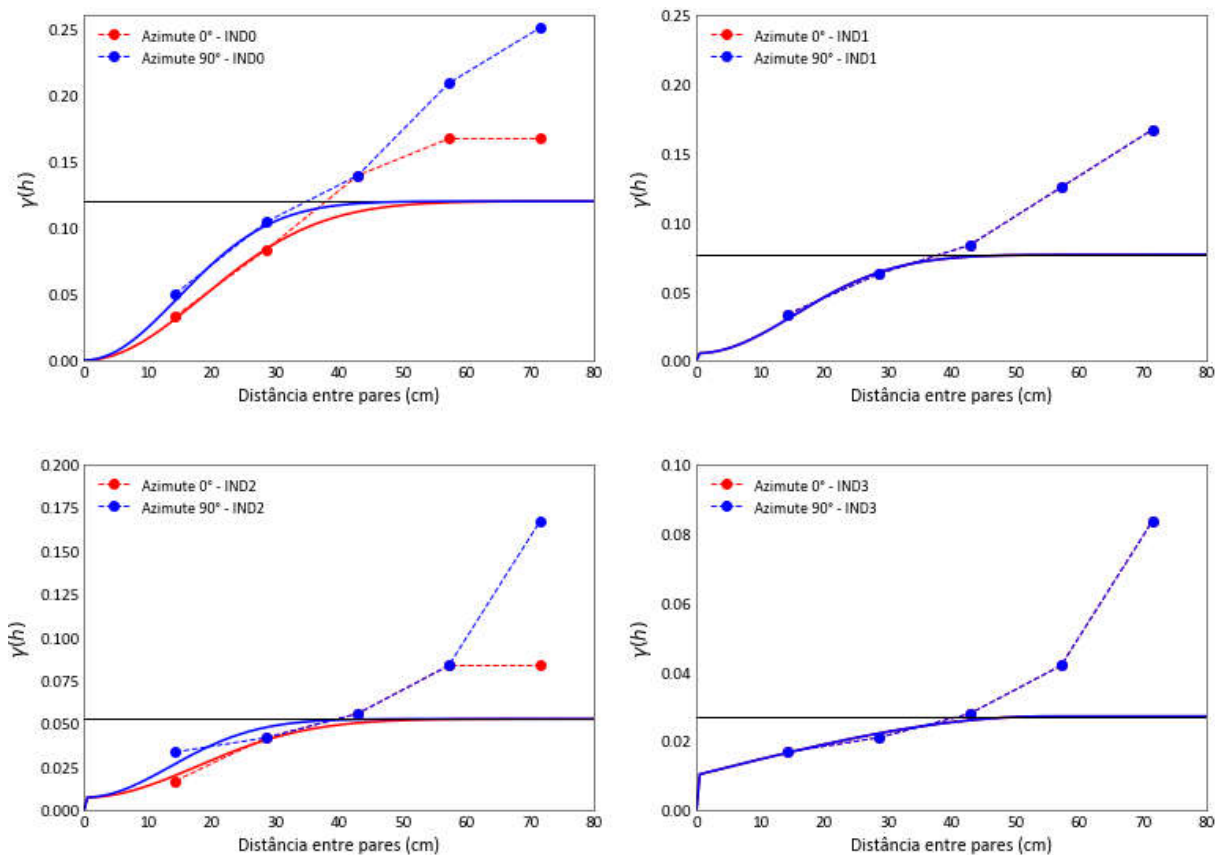


Figura 4.19 – Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|-------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |             |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimute 0°  | 0,000         | Gaussiano | 0,119        | 45,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,000         | Gaussiano | 0,119        | 36,0    |
| 2      | IND1            | Azimute 0°  | 0,005         | Gaussiano | 0,071        | 37,8    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,005         | Gaussiano | 0,071        | 37,8    |
| 3      | IND2            | Azimute 0°  | 0,007         | Gaussiano | 0,045        | 43,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,007         | Gaussiano | 0,045        | 33,0    |
| 4      | IND3            | Azimute 0°  | 0,010         | Esférico  | 0,017        | 55,0    |
|        |                 | Azimute 90° | 0,010         | Esférico  | 0,017        | 55,0    |

Fonte: o autor.

Para a malha de configuração 16,67cm x 16,67cm (Figura 4.20 e Tabela 4.8) apresenta-se como o único limiar com anisotropia geométrica o limiar igual a 2, com direção preferencial de continuidade no Azimute 0°. Nos demais patamares de corte não é observada anisotropia geométrica.

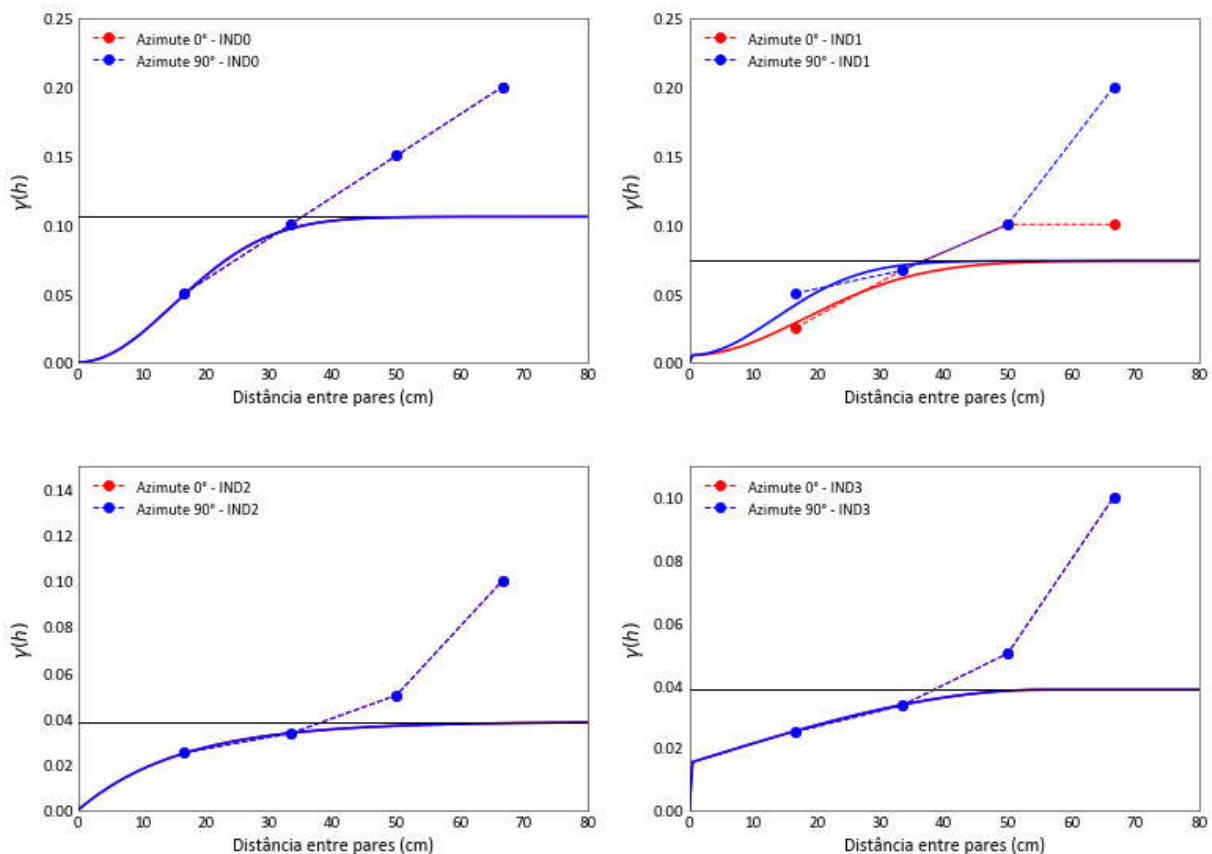


Figura 4.20 – Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Na Figura 4.20 e Tabela 4.8 também observa-se que os modelos utilizados na modela-

gem do semivariograma foram Gaussiano (limiares iguais a 1 e 2), Exponencial (limiar igual a 3) e Esférico (limiar igual a 4). Dessa forma se constata maior continuidade nos limiares 1 e 2, seguido pelo limiar 3 e por ultimo o limiar igual a 4, sendo este modelado por um modelo menos contínuo (Esférico) quando comparado aos demais (Gaussiano e Exponencial).

Tabela 4.8 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação  | Efeito<br>Pepita | Estrutura   |              |         |
|--------|-----------------|-------------|------------------|-------------|--------------|---------|
|        |                 |             |                  | Modelo      | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Azimuth 0°  | 0,000            | Gaussiano   | 0,105        | 36,5    |
|        |                 | Azimuth 90° | 0,000            | Gaussiano   | 0,105        | 36,5    |
| 2      | IND1            | Azimuth 0°  | 0,005            | Gaussiano   | 0,068        | 44,5    |
|        |                 | Azimuth 90° | 0,005            | Gaussiano   | 0,068        | 33,0    |
| 3      | IND2            | Azimuth 0°  | 0,000            | Exponencial | 0,038        | 48,5    |
|        |                 | Azimuth 90° | 0,000            | Exponencial | 0,038        | 48,5    |
| 4      | IND3            | Azimuth 0°  | 0,015            | Esférico    | 0,023        | 55,5    |
|        |                 | Azimuth 90° | 0,015            | Esférico    | 0,023        | 55,5    |

Fonte: o autor.

Para a configuração 20,0cm x 20,0cm não foi possível obter semivariogramas experimentais, logo não sendo possível realizar a krigagem indicadora. Ainda, nos semivariogramas apresentados, constata-se nas quatro malhas analisadas decréscimo no valor de contribuição a medida que o patamar de corte aumenta, ou seja, as variáveis analisadas, em todas as malhas, apresentam um aumento contínuo de homogeneidade dos dados.

A Figura 4.21 apresenta os mapas obtidos a partir da realização da krigagem indicadora. É apresentado nesta figura os mapas de probabilidade das respectivas malhas estudadas (9,09cm x 9,09cm, 11,11cm x 11,11cm, 14,286cm x 14,286cm e 16,67cm x 16,67) em colunas. As probabilidades de métrica de dano maiores que um determinado limiar estão dispostas em linhas, entendendo-se a figura como uma matriz, onde a primeira linha apresenta os mapas de probabilidade de limiar igual a 1 (patamar de corte = 1), a segunda limiar igual a 2 (patamar de corte = 2), até a quarta linha onde apresenta um limiar igual a 4 (patamar de corte = 4), ou seja, onde os mapas de probabilidade de métrica de dano são maiores que 4.

Como a falha está localizado no canto inferior esquerdo da placa, conforme o valor do limiar aumenta, as probabilidades dos valores serem superiores a um determinado limiar são sequencialmente restritas ao canto inferior esquerdo da placa, convergindo a existência desses valores limitados a este local. Dessa forma, a probabilidade que o limiar igual a 4 esteja restrito ao canto inferior esquerdo da placa é maior pois é onde se localiza o dano. Dessa forma, através do mapeamento de valores extremos seria possível prever a localização dos danos e tomar as medidas corretivas.

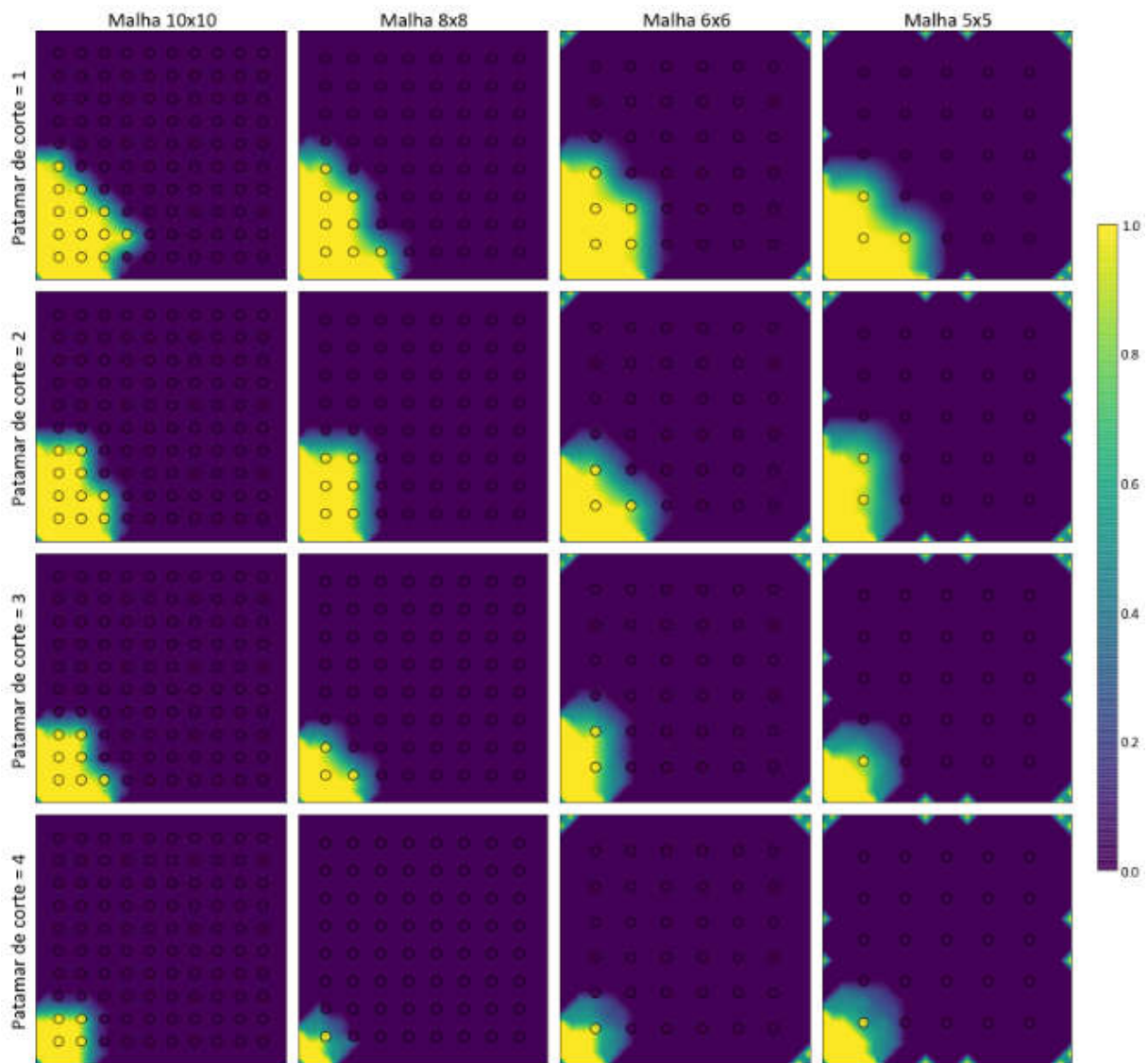


Figura 4.21 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano.

Obseva-se na Figura 4.21 que a malha 10x10 apresentou os resultados com maior confiabilidade, diminuindo esta a medida que diminui o número de amostras, ou seja, respectivamente a malha 8x8, 6x6 e 5x5. Apesar de apresentarem uma menor confiabilidade, ainda é possível constatar a localização do dano, perdendo resultado na direção preferencial do dano na placa.

Ainda, assim como no primeiro cenário (Seção 4.1), os resultados para o patamar de corte igual a 4 mostram menor capacidade de prever a posição do dano no canto inferior esquerdo da placa nas configurações 8x8, 6x6 e 5x5 quando comparados aos resultados da configuração de malha 10x10. Isso ocorre devido à maior distância entre os pontos amostrados nesses cenários.

A partir da realização da krigagem indicadora, ao se comparar os valores médios das

variáveis indicadoras nos resultados do modelo com os dados numéricos (amostra) (Figura 4.22), verifica-se, nesse cenário, que os valores médios respectivos foram reproduzidos com maiores desvios quando comparados ao cenário anterior (Seção 4.1). Este desvio pode ser consequência da maior variabilidade espacial desta situação de posição de dano, onde apresentou-se maiores valores zeros que quando comparado ao primeiro cenário (Seção 4.1).

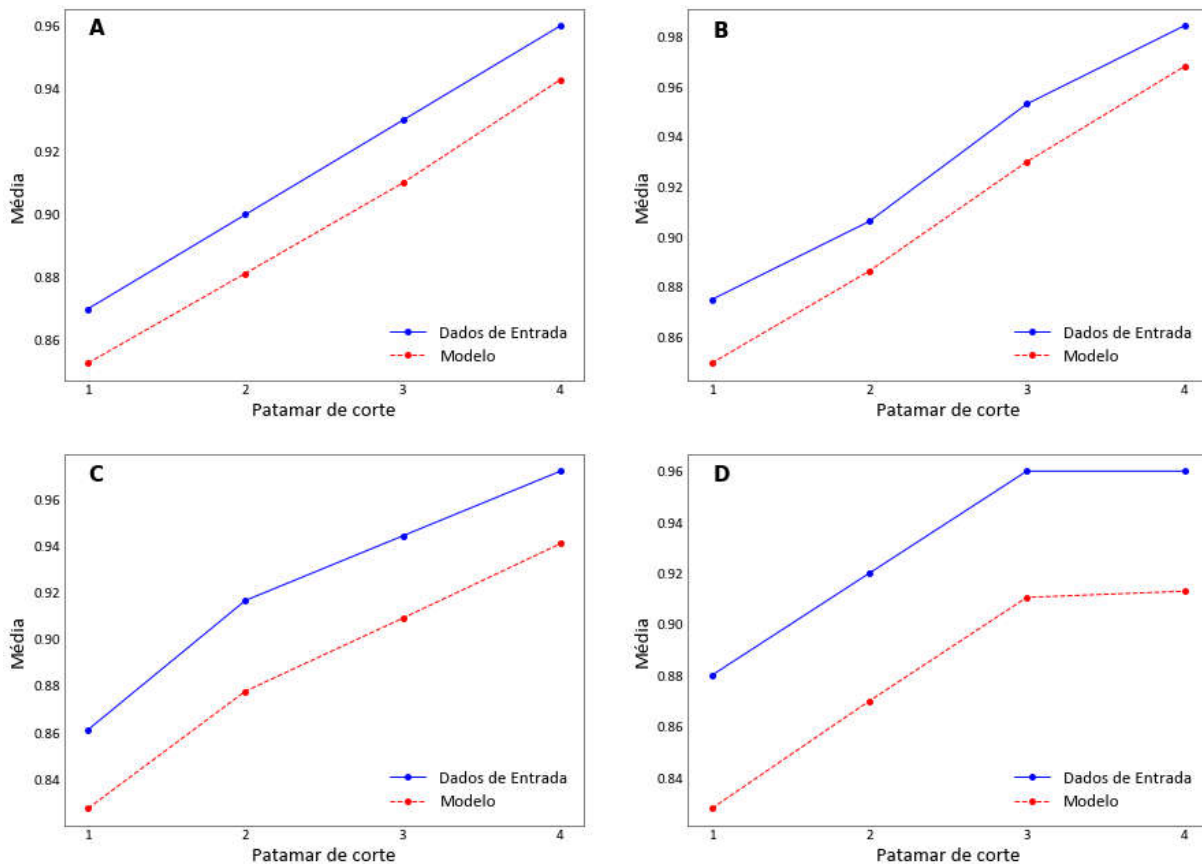


Figura 4.22 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano.

Observa-se que conforme houve diminuição da malha estudada houve aumento no desvio do modelo. Logo, além da posição do dano e de maiores valores zeros, a quantidade de amostras também mostrou-se importante na análise comparativa do presente cenário.

### 4.3 Cenário 3 - Dano Canto Direito

Para o último cenário, a análise estatística dos dados numéricos para a malha regular de 9,09cm x 9,09cm apresentou distribuição assimétrica positiva (Figura 4.23). As análises de quartis apontam que 50% dos dados neste cenário apresentaram valor zero, o que explica a quantidade de *outliers* presentes na análise, os quais apontam para a posição que o dano se encontra. Observa-se que 25% dos dados estão entre 0 e 1,31 e que os outros 25% dos

dados são maiores que 1,31, sendo estes o conjunto de dados que apontam para a possível localização do dano.

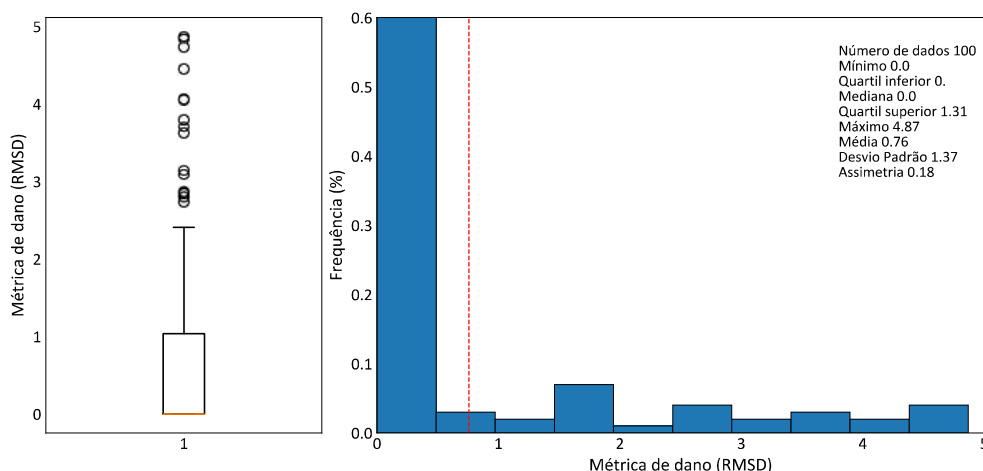


Figura 4.23 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (9,09 cm x 9,09 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Na malha 11,11cm x 11,11cm (Figura 4.24) apontou-se uma distribuição assimétrica positiva com média de 0,39, a presença de 50% dos dados com valor zero, 25% dos dados com valores entre 0 e 1,29 e 25% dos dados com valores acima de 1,29. Esse ultimo conjunto de dados aponta diretamente para os valores presente como *outliers*, ou seja, valores que se aproximam da região direita da placa onde está localizado o dano.

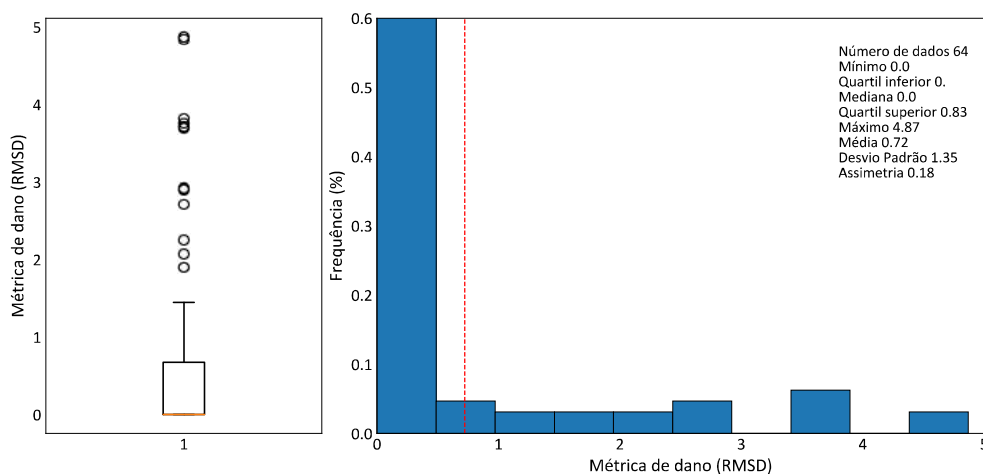


Figura 4.24 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (11,11 cm x 11,11 cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Já no arranjo 14,286cm x 14,286cm (Figura 4.25) observa-se também uma distribuição assimétrica positiva dos dados, porém com média 0,79 e 50% dos dados com valor zero.

Nessa malha, constata-se ainda que 25% dos dados estão entre 0 e 1,29 e 25% estão acima de 1,29, estando presente alguns *outliers* que direcionam para a localização do dano.

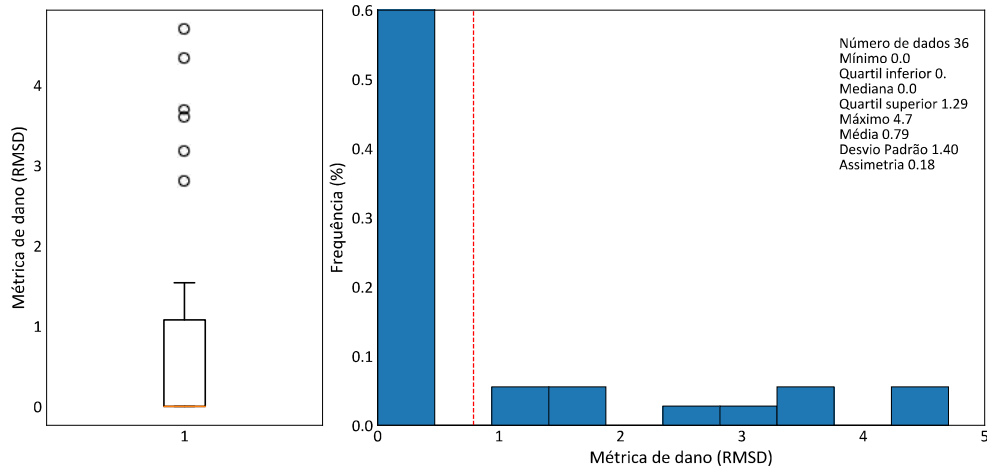


Figura 4.25 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (14,286cm x 14,286cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Na malha 16,67cm x 16,67cm (Figura 4.26) é apresentado pela análise estatística dos dados uma distribuição assimétrica positiva, sendo que 50% dos dados apresentam valor igual a zero e apenas 25% dos dados apresentam valores superiores a 1,32, dentre esse três valores *outliers* que apontam para a região do dano estrutural.

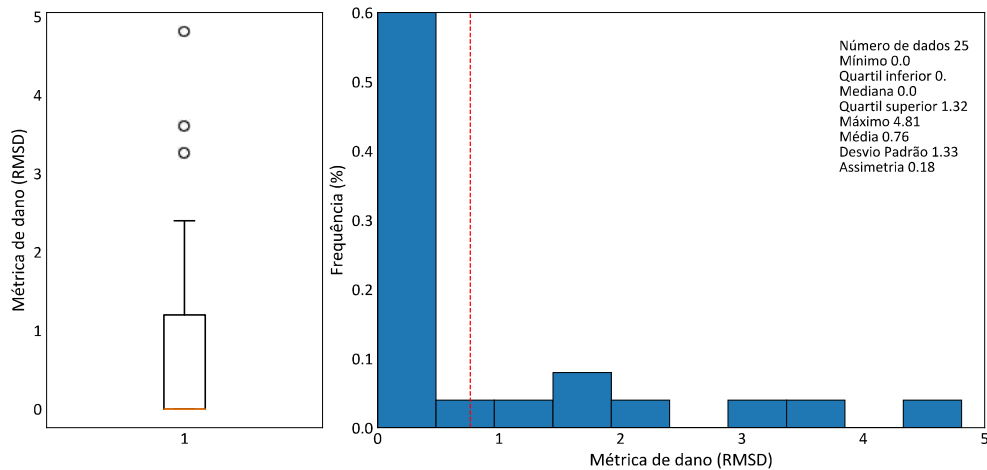


Figura 4.26 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (16,67cm x 16,67cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Por fim, através da análise estatística da malha 20,0cm x 20,0cm (Figura 4.27) é possível observar um modelo de distribuição assimétrica positiva dos dados. É observado que há presença de outliers, porém nenhum de seus dados ultrapassa o valor 4, possivelmente de-

vido ao número de pontos (16) e a sua disposição na placa, estando mais afastados da falha que se encontra no canto direito central da placa.

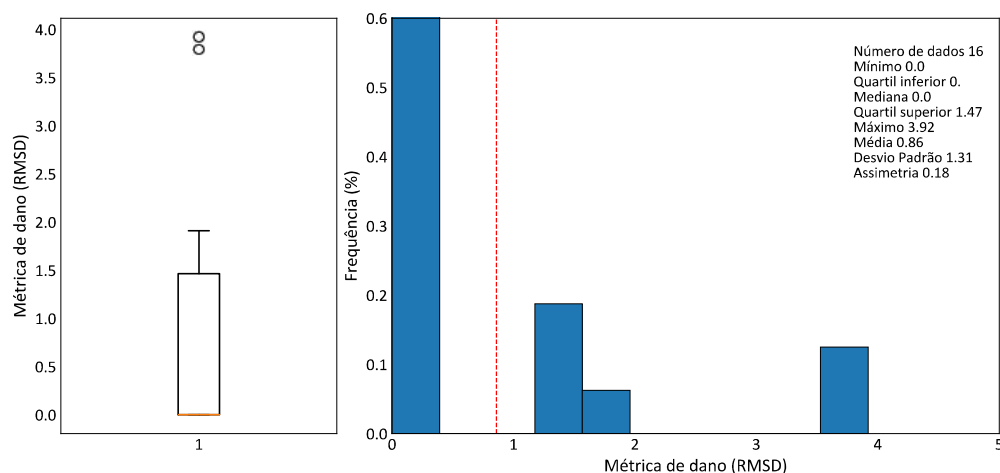


Figura 4.27 – Box-plot e histograma dos dados de métricas de dano (20,0cm x 20,0cm) mostrando o valor médio (linha tracejada em vermelho) e *outliers* (círculos em preto).

Todas as análises estatísticas (Figuras (4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27)) é observado que, mesmo apresentando distribuição assimétrica positiva, o formato não foi determinado, podendo ser devido a quantidade limitada de dados assim como observado nos outros dois cenários analisados (Seções 4.1 e 4.2).

Após a análise estatística, foram feitos os semivariogramas experimentais para cada uma das malhas apresentadas. A malha com espaçamento 9,09cm x 9,09cm (Figura 4.28 e Tabela 4.9) apresentou nos limiares 1, 2, 3 e 4 a utilização de semivariogramas unidirecionais, visto que as direções preferenciais dos variogramas não foram determinadas, o que pode estar associado a quantidade limitada de informações.

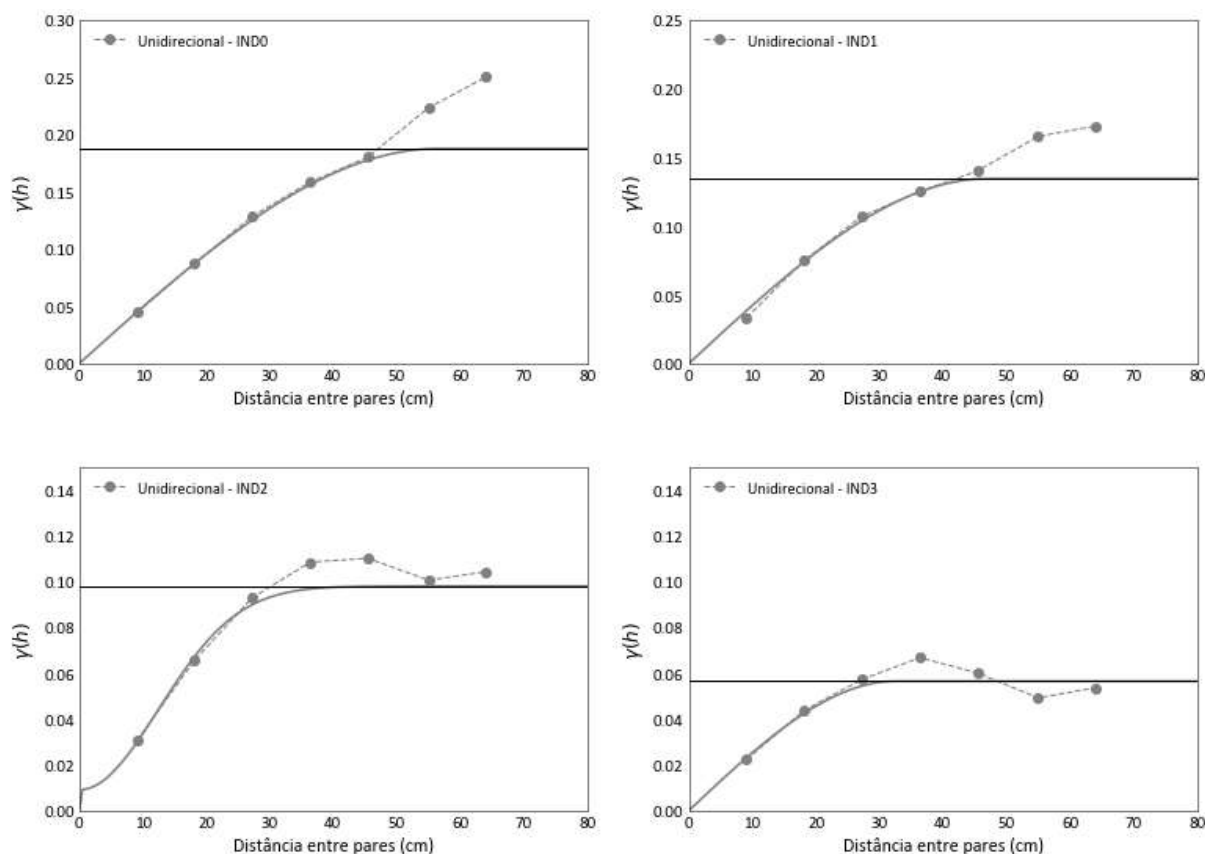


Figura 4.28 – Malha de configuração 9,09cm x 9,09cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 9,09cm x 9,09cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,185        | 56,5    |
| 2      | IND1            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,134        | 47,0    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,009         | Gaussiano | 0,089        | 30,5    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,056        | 32,5    |

Fonte: o autor.

Ainda, observa-se que os ajustes teóricos utilizados para os limiares 1, 2 e 4 foram feitos a partir do modelo esférico, e para o limiar 3 foi utilizado o modelo gaussiano, o qual apresentou uma descontinuidade na origem de 0,009.

Para a malha 11,11cm x 11,11cm (Figura 4.29 e Tabela 4.10) observa-se também a utilização de semivariogramas unidirecionais em todos os limiares. Ainda, nota-se que foram

utilizado os modelos esférico (limiar 1 e 2) e gaussiano (limiar 3 e 4) para a realização dos ajustes teóricos, ou seja, a medida que o patamar de corte da variável aumenta, a continuidade da variável também aumenta. Logo, observa-se que para os limiares 1 e 2 a variabilidade dos dados é maior quando comparados aos limiares 3 e 4.

Observa-se ainda que patamar (contribuição) diminui a medida que o limiar (patamar de corte) aumenta, constatando-se um aumento da homogeneidade dos valores analisados. Para o alcance também é observado o mesmo panorama, porem esta diminuição do alcance pode estar associada a menores quantidades de valor 1 e maiores quantidades de 0.

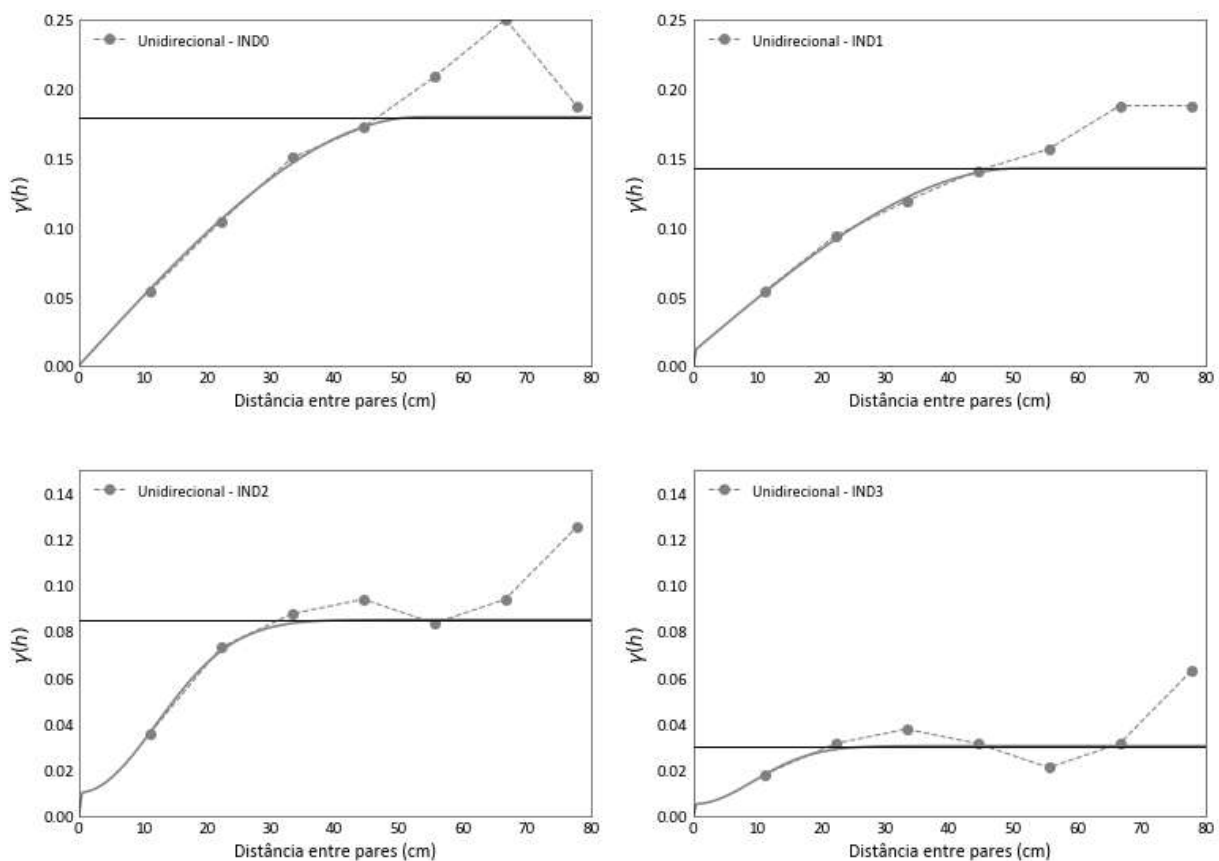


Figura 4.29 – Malha de configuração 11,11cm x 11,11cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 11,11cm x 11,11cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,179        | 53,5    |
| 2      | IND1            | Unidirecional | 0,010         | Esférico  | 0,132        | 51,0    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,010         | Gaussiano | 0,075        | 29,5    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,005         | Gaussiano | 0,025        | 23,0    |

Fonte: o autor.

Na terceira malha analisada, ou seja, a malha 14,286cm x 14,286cm (Figura 4.30 e Tabela 4.11), também é observado semivariogramas unidirecionais em todos os limiares, ou seja, constata-se um fenômeno isotrópico, em que a continuidade é a mesma em todas as direções analisadas, não sendo observado, dessa forma, direções preferenciais de dano.

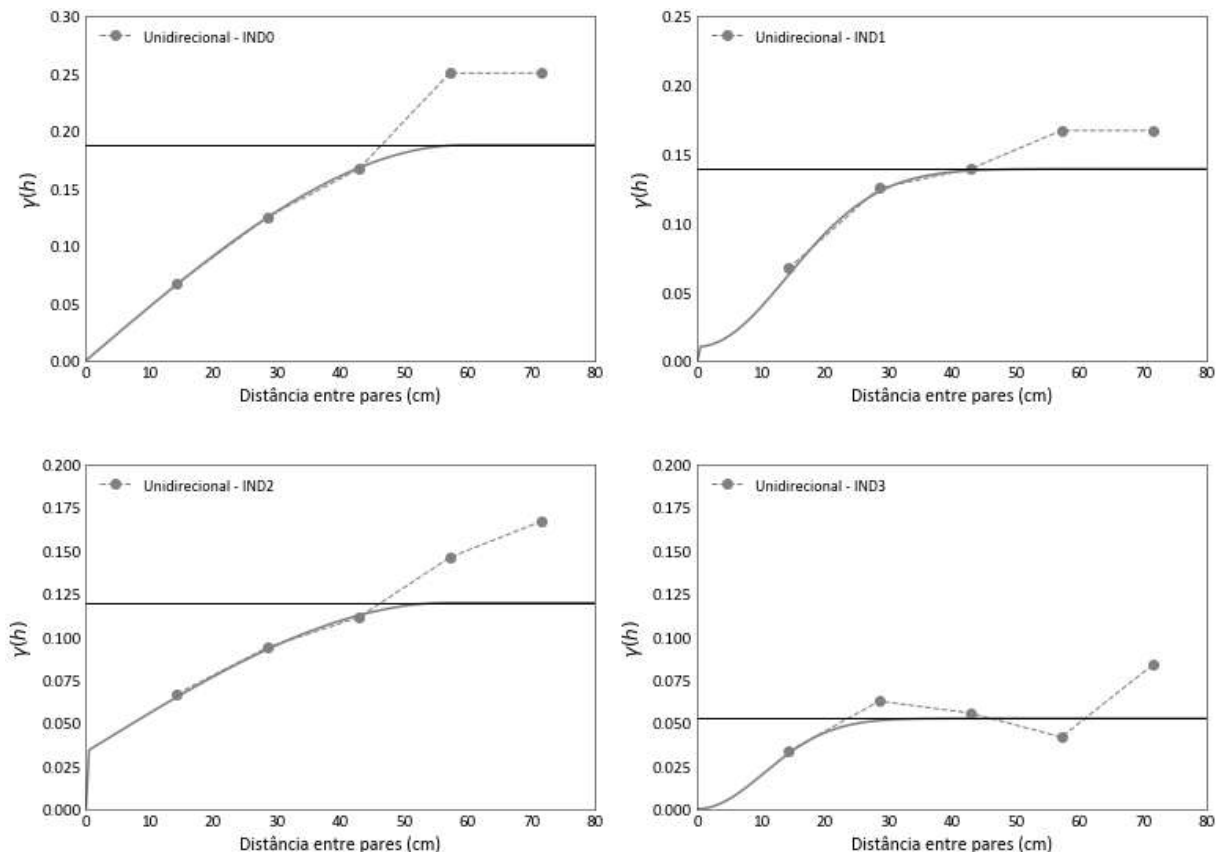


Figura 4.30 – Malha de configuração 14,286cm x 14,286cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.11 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 14,286cm x 14,286cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,187        | 59,5    |
| 2      | IND1            | Unidirecional | 0,010         | Gaussiano | 0,129        | 34,5    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,033         | Esférico  | 0,086        | 57,0    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,000         | Gaussiano | 0,052        | 25,5    |

Fonte: o autor.

Na ultima malha analisada, malha de configuração 16,67cm x 16,67cm (Figura 4.26 e Tabela 4.12) apresentou como resultados variográficos apenas semivariogramas unidirecionais, os quais foram ajustados nos modelos esférico (limiar 1, 2 e 3) e gaussiano (limiar 4), indicando maior continuidade na ultima variavel indicadora.

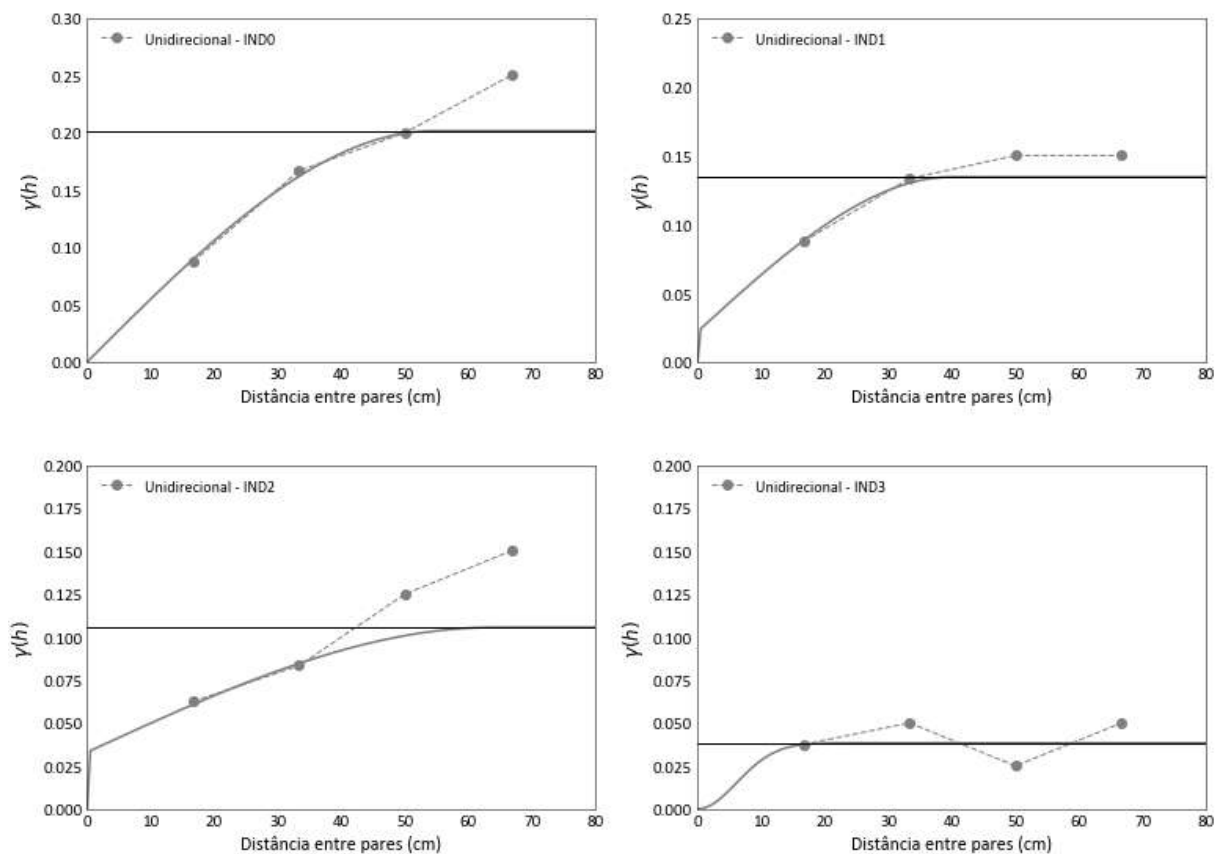


Figura 4.31 – Malha de configuração 16,67cm x 16,67cm - Semivariograma experimental com respectivos ajuste do modelo para cada variável indicadora (IND0, IND1, IND2, e IND3.) e sentido preferencial de continuidade.

Tabela 4.12 – Parâmetros de ajuste de semivariogramas para cada variável indicadora na configuração de malha 16,67cm x 16,67cm.

| Limiar | Var. Indicadora | Orientação    | Efeito Pepita | Estrutura |              |         |
|--------|-----------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------|
|        |                 |               |               | Modelo    | Contribuição | Alcance |
| 1      | IND0            | Unidirecional | 0,000         | Esférico  | 0,201        | 54,5    |
| 2      | IND1            | Unidirecional | 0,022         | Esférico  | 0,112        | 40,0    |
| 3      | IND2            | Unidirecional | 0,033         | Esférico  | 0,072        | 64,0    |
| 4      | IND3            | Unidirecional | 0,000         | Gaussiano | 0,038        | 15,0    |

Fonte: o autor.

Dessa forma, a qualidade dos semivariogramas experimentais foi maior para o limiar igual a 1 em todas as configurações observadas (Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31), perdendo qualidade sequencialmente do segundo ao quarto limiar, sendo este um cenário já esperado devido a instabilidade causada por limiares maiores que a maioria dos dados em estudo.

Observa-se ainda que em todas as malhas estudadas nesse cenário a contribuição se apresenta de forma decrescente conforme aumenta o patamar de corte, apresentando, dessa forma, homogeneidade dos dados analisados em todas as malhas avaliadas.

Para a malha com configuração de espaçamento de 20cm x 20 cm não foi possível obter os semivariogramas. Tal fato sugere que para os formato e dimensões da placa em estudo, não é possível a utilização do método de krigagem para espaçamentos entre sensores maiores que 16,67 cm. Entretanto, são necessários estudos com estruturas de maiores dimensões para a análise deste comportamento, o qual foi apresentado nos três cenários estudados.

Na Figura 4.32 são apresentados os mapas obtidos a partir da realização da krigagem indicadora. É observado nesta figura os mapas de probabilidade das respectivas malhas estudadas (9,09cm x 9,09cm, 11,11cm x 11,11cm, 14,286cm x 14,286cm e 16,67cm x 16,67) em colunas. As probabilidades de métrica de dano maiores que um determinado limiar estão dispostas em linhas, entendendo-se a figura como uma matriz, onde a primeira linha apresenta os mapas de probabilidade de limiar igual a 1 (patamar de corte = 1), a segunda limiar igual a 2 (patamar de corte = 2), até a quarta linha onde apresenta um limiar igual a 4 (patamar de corte = 4), ou seja, onde os mapas de probabilidade de métrica de dano são maiores que 4.

Os resultados obtidos por meio da krigagem indicadora (Figura 4.32) mostram que os valores mais elevados de probabilidade indicam as áreas com valores de métricas de dano acima de um valor específico (patamar de corte), sendo capaz de indicar aproximadamente o local de ocorrência do dano e/ou eventualmente a área afetada pelo mesmo. Conforme

há o aumento do patamar de corte, os valores mais elevados de probabilidade se limitam, sequencialmente, a borda direita da placa, local em que esta posicionado no dano estrutural (Figura 3.4). Particularmente para o patamar de corte igual a 4, foi possível estimar, aproximadamente, a posição da falha.

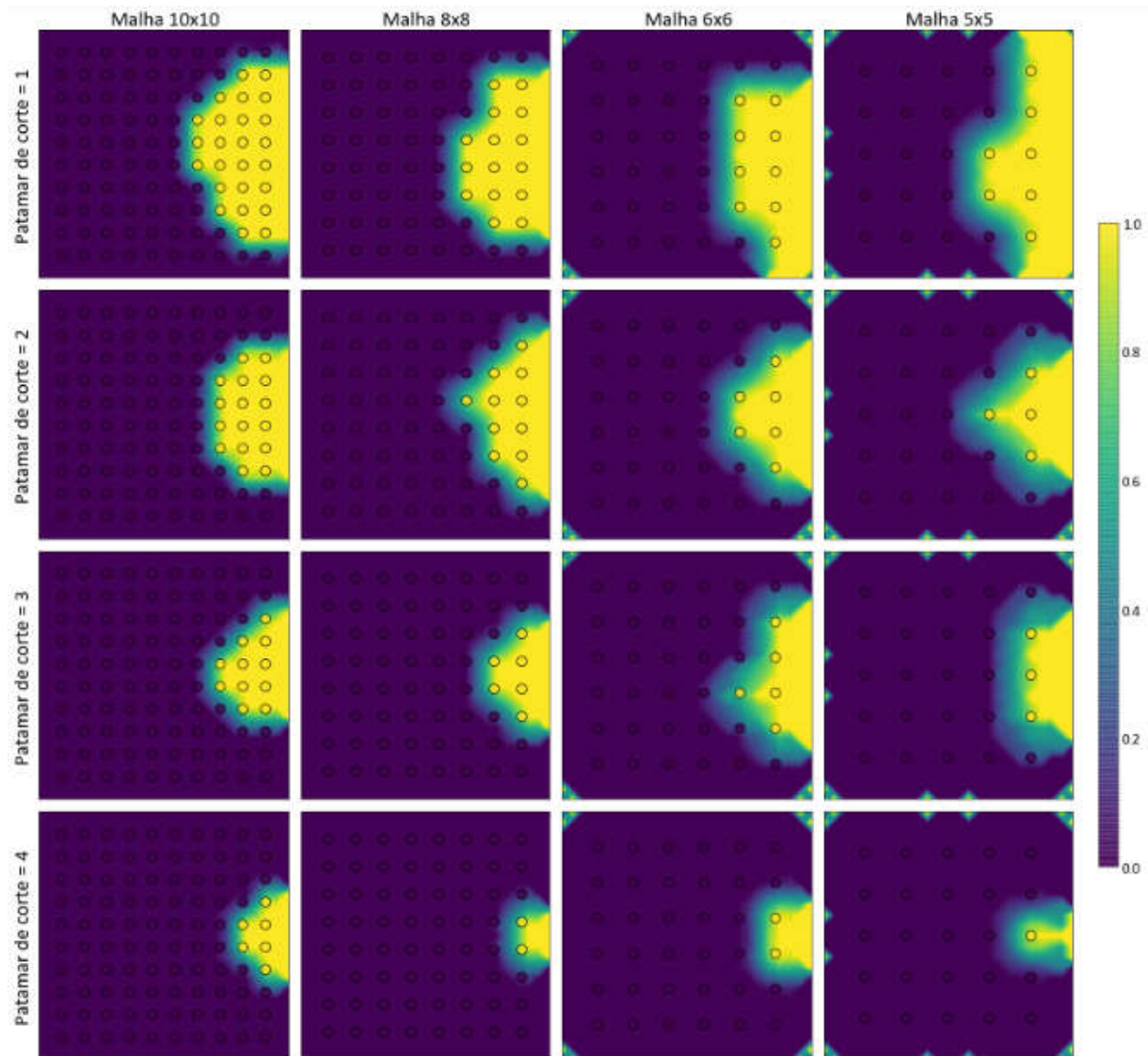


Figura 4.32 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano.

A parti da execução da krigagem indicadora, ao se comparar os valores médios das variáveis indicadoras nos resultados do modelo com os dados numéricos (amostra) (Figura 4.33), verifica-se que os valores médios respectivos foram reproduzidos aproximadamente no modelo, apresentando melhor resultado as malhas de configuração 9,09cm x 9,09cm (A) e 11,11cm x 11,11cm (B), visto que a maior diferença nesses dois cenários foi atribuída ao limiar igual a 3 e 4 respectivamente. Este desvio pode ser consequência da baixa confiabilidade dos semivariogramas experimentais no limiar igual a 4. O menor desvio foi atribuído ao limiar igual a 1 no cenário A.

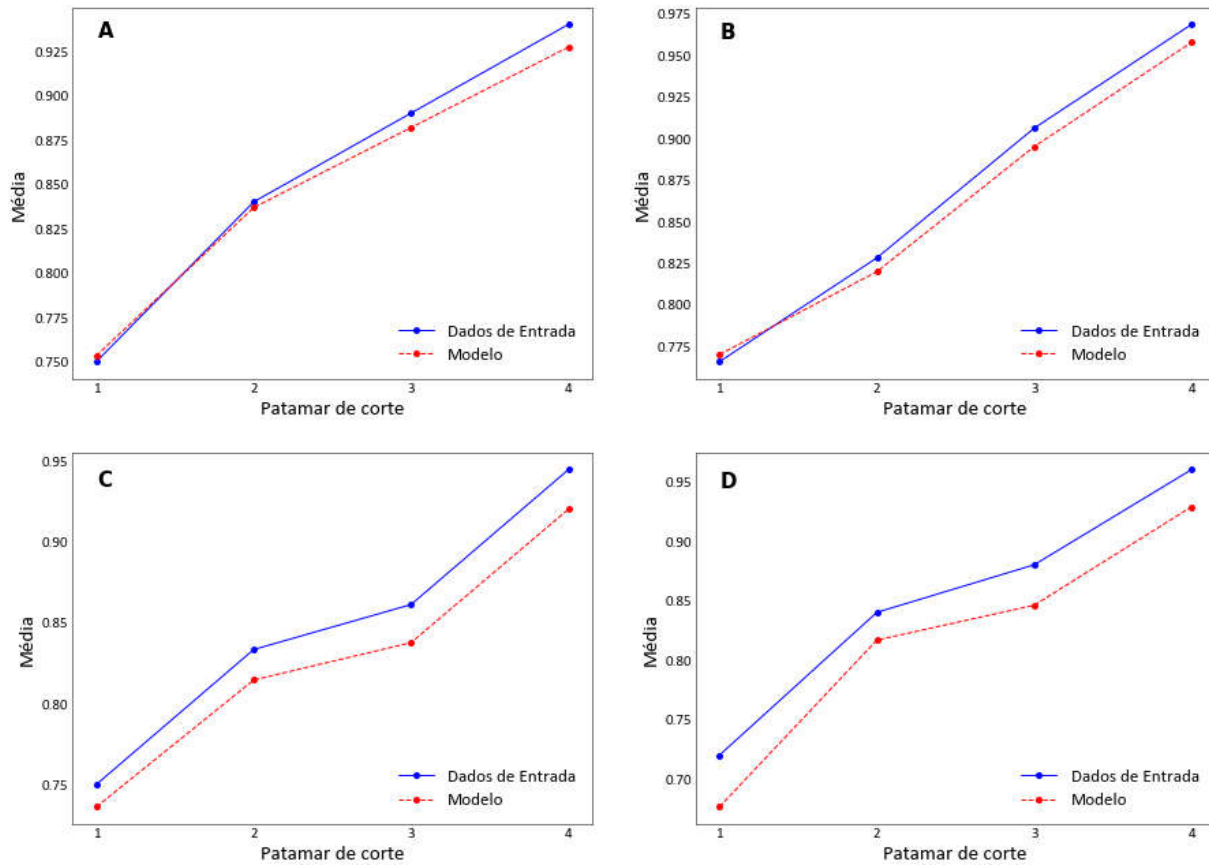


Figura 4.33 – Mapas de probabilidade dos valores de métrica de dano serem a 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As configurações das malhas estão dispostas nas respectivas colunas com respectivo aumento dos valores de métrica de dano.

Na Figura 4.33, observa-se ainda que o maior desvio provavelmente está relacionado com a posição do dano na placa conjuntamente associado ao número de amostras (PZTs), pois uma maior quantidade de amostras contribui para a diminuição do erro de estimativa. Isso é observado no cenário A e B, que apresentaram respectivamente 0,44% e 0,55% de desvio no patamar de corte igual a 1 e, de forma inversa, no cenário C e D, apresentaram respectivamente 2,81% e 4,02% de desvio no patamar de corte igual a 3.

## Capítulo 5

---

# CONCLUSÃO

---

Através dos resultados, foi possível mapear as probabilidades de ocorrência de diversos valores de métrica de dano em uma malha de sensores possibilitando a detecção de danos pelo uso de krigagem indicadora. Especialmente, no modelo de probabilidade baseado no limiar igual a 4 mostrou que as maiores probabilidades eram estritamente limitadas a localização do dano na placa em todos os três cenários analisados. Portanto, a partir desta abordagem, é possível delinear a posição do dano mapeando as probabilidades de valores da métrica de dano serem maiores do que os extremos (*outliers*).

A anisotropia geométrica observada nos semivariogramas provavelmente é um indicativo de direções preferenciais de propagação do dano e pode ser útil para adquirir essas informações. No entanto, essa questão necessita de pesquisas adicionais, com o objetivo de validá-la.

A análise dos cenários com base nos diferentes espaçamentos dos PZTs em localizações de dano em locais distintos mostrou que o aumento no espaçamento dos dados de métrica de dano ocasionou uma perda de confiabilidade do modelo para prever a localização da falha estrutural. Isso foi mais pronunciado nas malhas com espaçamento de 14,286 cm (malha 6x6) e 16,67 cm (malha 5x5). Porém, mesmo nesses cenários, seria possível identificar a posição aproximada do dano em todos os cenários estudados.

A impossibilidade de obtenção de variogramas experimentais para o cenário com espaçamento de 20cm entre os PZTs mostrou um fator limitante na metodologia (nos três cenários analisados). Porém, embora seja um procedimento experimental, pode ser aplicado a outras dimensões e geometrias de estruturas para identificar o número mínimo de sensores/atuadores bem como sua disposição na placa.

Constata-se ainda que os resultados para a metodologia podem variar (maiores desvios) a depender da localização, tamanho da malha amostral e do número de zeros (amostras que não constataram dano) no sistema analisado. Entretanto, mesmos com tais limitações, as informações obtidas no mapeamento de probabilidades podem ser úteis para identificar

a localização das fontes de falha e/ou áreas afetadas devido a uma falha estrutural, como apresentado nos três cenários analisados (Seções 4.1, 4.2 e 4.3), os quais tiveram bons resultados de localização e direção de propagação do dano através da metodologia proposta.

---

## REFERÊNCIAS

---

ABZALOV, M. Variography. In: *Applied Mining Geology*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016, (Modern Approaches in Solid Earth Sciences, v. 12). p. 239–262. <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6_18)>. Citado na página 25.

AHAMED, A. J.; LOGANATHAN, K. Water quality concern in the amaravathi river basin of karur district: a view at heavy metal concentration and their interrelationships using geostatistical and multivariate analysis. *Geology, Ecology, and Landscapes*, Taylor Francis, v. 1, n. 1, p. 19–36, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301055>>. Citado na página 25.

AI, D. *et al.* An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 97–104, 2014. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.029>>. Citado na página 15.

ALMEIDA, V. A. D. D.; BAPTISTA, F. G. An experimental assessment of pzt patches for impedance-based shm applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, v. 7, n. 5, p. 1–5, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

AND, W. W. P. L. *et al.* Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 450–455, 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.173>>. Citado na página 15.

ANTUNES, R. A. *et al.* Modeling, simulation, experimentation, and compensation of temperature effect in impedance-based shm systems applied to steel pipes. *Sensors*, v. 19, p. 1–23, 2019. <<https://doi.org/10.3390/s19122802>>. Citado na página 15.

BANKS, H.; SMITH, R.; WANG, Y. Smart material structures: modeling, estimation, and control. *France: John Wiley Sons*, p. 304, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 19.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. Optimal frequency range selection for pzt transducers in impedance-based shm systems. *IEEE Sensors Journal*, v. 10, n. 8, p. 1297–1303, 2010. <<https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2044037>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 22.

BENTO, J. P. M. *Uso das Cadeias de Markov Associado ao Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica. Dissertação (Mestrado)*. Catalão: [s.n.], 2018. Citado na página 18.

- BHALLA, S.; SOH, C. K. Electro-mechanical impedance technique. In: SOH, C.-K.; YANG, Y.; BHALLA, S. (Ed.). *Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics*. [S.l.]: Springer+Business Media, 2012, (Advanced Topics in Science and Technology in China). p. 17–51. <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-24463-6>>. Citado na página 22.
- BOISVERT, J. B.; MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Kriging in the presence of locally varying anisotropy using non-euclidean distances. *Mathematical Geosciences*, v. 41, n. 5, p. 585–601, Jul 2009. ISSN 1874-8953. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11004-009-9229-1>>. Citado na página 25.
- BOLLER, C. Structural health monitoring - an introduction and definitions. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd., Houston, 2009. p. 1–23. <<https://doi.org/10.1002/9780470061626>>. Citado na página 15.
- BOUKABACHE, H. *et al.* System-on-chip integration of a new electromechanical impedance calculation method for aircraft structure health monitoring. *Sensors*, v. 12, n. 10, p. 13617–13635, 2012. <<https://doi.org/10.3390/s121013617>>. Citado na página 15.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. Princípios básicos em geoprocessamento. *Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na Agricultura)*, 2.ed. Brasília: SPI/ EMBRAPA-CPAC, p. 434, 1998. Citado na página 24.
- CHERRIER, P. S. O. *et al.* Damage localization map using electromechanical impedance spectrums and inverse distance weighting interpolation: Experimental validation on thin composite structures. *Structural Health Monitoring*, v. 12, p. 311–324, 2013. <<https://doi.org/10.1177/1475921713493343>>. Citado na página 15.
- CHILÈS, J.-P.; DELFINER, P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2. ed. Hoboken, United States of America: John Wiley & Sons, 2012. <<https://doi.org/10.1002/9781118136188>>. Citado na página 25.
- DAYA, A. A. Application of median indicator kriging in the analysis of an iron mineralization. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 367–377, 2015. Citado na página 25.
- DELBARI, M.; AMIRI, M.; MOTLAGH, M. B. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. *Applied Water Science*, v. 6, n. 4, p. 371–381, Nov 2016. ISSN 2190-5495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-014-0230-6>>. Citado na página 25.
- ELUMALAI, V. *et al.* Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 12, p. 11601–11617, Apr 2017. ISSN 1614-7499. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8681-6>>. Citado na página 25.
- FRANCO, V. R. Monitoramento da integridade em estruturas aeronáuticas. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- GIURGIUTIU, V. *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. 2. ed. Waltham, MA: Academic Press, 2014. 1024 p. <<https://doi.org/10.1016/C2013-0-00155-7>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

GIURGIUTIU, V.; REYNOLDS, A.; ROGERS, C. A. Experimental investigation of e/m impedance health monitoring for spot-welded structural joints. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 10, n. 10, p. 802–812, 1999. <<https://doi.org/10.1106/NOJ5-6UJ2-WIGV-Q8MC>>. Citado na página 21.

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. <<https://doi.org/10.1117/12.316923>>. Citado na página 23.

GONÇALVES, D. *et al.* Indicator kriging for damage position prediction by the use of electro-mechanical impedance-based structural health monitoring. *Comptes Rendus. Mécanique*, v. 349, p. 225–240, 04 2021. Citado na página 15.

GONÇALVES, D. R.; MOURA Jr., J. R. V.; PEREIRA, P. E. C. Monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica utilizando o método de krigagem ordinária. *HOLOS*, v. 36, n. 2, p. 1–17, 2020. <<https://doi.org/10.15628/holos.2020.9480>>. Citado na página 16.

HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. Orebody description. In: *Open Pit Mine Planning & Design*. 3. ed. London, United Kingdom: CRC Press, 2013. v. 1, p. 186–289. <<https://doi.org/10.1201/b15068>>. Citado na página 27.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Ordinary kriging. In: *Applied Geostatistics*. 1. ed. New York, United States of America: Oxford University Press, 1989. p. 278–322. Citado na página 29.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining Geostatistics*. London, United Kingdom: Academic Press Limited, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

KHANDUZI, F.; PARIZANGANEH, A.; ZAMANI, A. Application of multivariate statistics and geostatistical techniques to identify the spatial variability of heavy metals in groundwater resources. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, University of Guilan, v. 13, n. 4, p. 333–347, 2015. ISSN 1735-3033. Disponível em: <[https://cjes.guilan.ac.ir/article\\_1546.html](https://cjes.guilan.ac.ir/article_1546.html)>. Citado na página 25.

KIM, H. *et al.* Performance assessment method for crack repair in concrete using pzt-based electromechanical impedance technique. *NDT and E International*, v. 104, p. 90–97, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.04.004>>. Citado na página 15.

KITANIDIS, P. K. Intrinsic model. In: *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1997. p. 41–82. <<https://doi.org/10.1017/CBO9780511626166>>. Citado na página 26.

KRALOVEC, C.; SCHAGERL, M.; MAYR, M. Localization of damages by model-based evaluation of electro-mechanical impedance measurements. *European Workshop on Structural Health Monitoring*, v. 9, p. 1–12, 2018. Citado na página 16.

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. 5, n. 1, p. 12–20, 1994. <<https://doi.org/10.1177/1045389X9400500102>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

LIN, B.; GIURGIUTIU, V. Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors. *Smart Materials and Structures*, v. 15, n. 4, p. 1085–1093, 2006. <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/4/022>>. Citado na página 21.

LOURENÇO, R. Comparação entre métodos de interpolação para sistemas de informações geográficas. *Dissertação de mestrado elaborada junto ao curso de Pós-Graduação em Geociências – área de concentração em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista*, Campus de Rio Claro. Rio Claro, SP, 1998. Citado na página 25.

MACHIWAL, D. *et al.* A review of gis-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, p. 1–30, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7872-x>>. Citado na página 25.

MARQUI, C. R. *et al.* External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. *Proceedings of the International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA*, v. 47, p. 286, 02 2008. Citado na página 23.

MARTINS, R. N. *et al.* Accuracy assessments of stochastic and deterministic interpolation methods in estimating soil attributes spatial variability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Taylor Francis, v. 50, n. 20, p. 2570–2578, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1670836>>. Citado na página 25.

MARTOWICZ, A. *et al.* Application of electromechanical impedance-based shm for damage detection in bolted pipeline connection. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 31, p. 17–44, 2016. <<https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1058376>>. Citado na página 15.

MARUO, I. I. C. *et al.* 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. <<http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v7i3.447>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22 e 24.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246–1266, 1963. <<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

\_\_\_\_. Kriging, or polynomial interpolation procedures? a contribution to polemics in mathematical geology. *The Canadian Mining and Metallurgical Transactions*, v. 70, p. 240–244, 1967. Citado na página 25.

\_\_\_\_. *The Theory of Regionalized Variables and its Applications*. Paris, France: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. v. 05. (Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, v. 05). Citado na página 25.

METROLOG, A. M. *Piezofilme Série LDT1-028K*. 2020. Disponível em: <<https://www.metrolog.net/ldt1028k.php?lang=ptbr>>. Citado na página 19.

MONTANEZ, C. "What is a Piezoelectric Ceramic?". *Advanced Ceramic Materials*. 2019. Disponível em: <<https://www.preciseceramic.com/blog/what-is-a-piezoelectric-ceramic/>>. Citado na página 20.

MOURA Jr., J. R. V. *Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais*. Tese de Doutorado. Uberlândia: [s.n.], 2008. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 20, 21 e 22.

NA, S.; LEE, H. Steel wire electromechanical impedance method using a piezoelectric material for composite structures with complex surfaces. *Composite Structures*, v. 98, p. 79–84, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.046>>. Citado na página 15.

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. <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.019>>. Citado na página 15.

NASA. *Mechanical and Fluid Systems – Macro-Fiber Composite (MFC) Actuator*. National Aeronautics and Space Administration. 2007. Disponível em: <<https://ntrs-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LAR-TOPS-209.pdf>>. Citado na página 20.

\_\_\_\_\_. *Technology Transfer Program. Piezoelectric Fiber Composite Actuator Portfolio*. 2020. Disponível em: <[https://ntrs-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/img/LAR-TOPS-17/TOP40\\_front.jpg](https://ntrs-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/img/LAR-TOPS-17/TOP40_front.jpg)>. Citado na página 20.

OBROSLAK, R.; DOROZHYNKY, O. Selection of a semivariogram model in the study of spatial distribution of soil moisture. *Journal of Water and Land Development*, Polish Academy of Sciences Committee on Agronomic Sciences Section of Land Reclamation and Environmental Engineering in Agriculture; Institute of Technology and Life Sciences, n. No 35, 2017. Disponível em: <<http://journals.pan.pl/Content/102250/PDF/19+Obroslak.pdf>>. Citado na página 25.

OLIVEIRA, S. A. *Modelagem Termomecânica De Ligas Com Memória De Forma Em Um Contexto Tridimensional*. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013. Citado na página 17.

PALOMINO, L. V. *Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutura*. Dissertação (Mestrado). Uberlândia: [s.n.], 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 22.

PARK, G.; INMAN, D. J. Smart bolts: An example of self-healing structures. *Smart Materials Bulletin*, v. 2001, p. 5–8, 2001. Citado na página 17.

PARK, G. *et al.* Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest*, v. 35, n. 6, p. 451–463, 2003. <<https://doi.org/10.1177/05831024030356001>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J.; PARK, G. Circuit analysis of impedance-based health monitoring of beams using spectral elements. *Structural Health Monitoring*, v. 6, n. 1, p. 81–94, 2007. <<https://doi.org/10.1177/1475921707072621>>. Citado na página 22.

PEAIRS, D. M.; TARAZAGA, P. A.; INMAN, D. J. Frequency range selection for impedance-based structural health monitoring. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 129, n. 6, p. 701–709, 2007. <<https://doi.org/10.1115/1.2775506>>. Citado na página 22.

RAJU, V. *Implementing impedance-based health monitoring (Master's thesis)*. Blacksburg: [s.n.], 1997. Citado na página 21.

RAO, V.; NARAYANA, A. C. Application of nonlinear geostatistical indicator kriging in lithological categorization of an iron ore deposit. *Current Science*, v. 108, p. 413–421, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.18520/CS/V108/I3/413-421>>. Citado na página 25.

REVUELTA, M. B. Mineral resource evaluation. In: *Mineral Resources: From Exploration to Sustainability Assessment*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018, (Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment). p. 223–309. <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_4)>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. *Mineral Resource Estimation*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science+Business Media, 2014. <<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>>. Citado 4 vezes nas páginas 25, 27, 28 e 45.

SAFAEI, M.; SODANO, H. A.; ANTON, S. R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008–2018). In: *Smart Materials and Structures*. 1. ed. [S.l.]: IOP Publishing, 2019. v. 28, p. 113001. Citado na página 17.

SELVA, P. *et al.* Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. *Engineering Structures*, v. 56, p. 794–804, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.025>>. Citado na página 15.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. Spatial (structural) analysis: An introduction to semivariograms. In: *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2004. p. 192–214. <<https://doi.org/10.1017/CBO9780511545993>>. Citado na página 25.

SU, Y.-F. *et al.* Instantaneous monitoring the early age properties of cementitious materials using pzt-based electromechanical impedance (emi) technique. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 340–347, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.164>>. Citado na página 15.

SUN, F. P. *et al.* Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. *Proc. SPIE 2443, Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems*, v. 2443, 1995. <<https://doi.org/10.1117/12.208261>>. Citado na página 21.

TEBALDI, A.; COELHO, L. S.; JUNIOR, V. L. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. *Sba: Controle Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 17, p. 312–330, 2006. Citado na página 18.

TINOCO, H. A. *et al.* 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. <<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.011>>. Citado na página 15.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Estimativas geoestatísticas. In: *Geoestatística: Conceitos e Aplicações*. 1. ed. São Paulo, Brazil: Oficina de Textos, 2013. p. 55–119. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.

YANG, Y.; DIVSHOLI, B. S. Sub-frequency interval approach in electromechanical impedance technique for concrete structure health monitoring. *Sensors*, v. 10, n. 12, p. 11644–11661, 2010. <<https://doi.org/10.3390/s101211644>>. Citado na página 15.

YANG, Y.; DIVSHOLI, B. S.; SOH, C. K. A reusable pzt transducer for monitoring initial hydration and structural health of concrete. *Sensors*, v. 10, n. 5, p. 5193–5208, 2010. <<https://doi.org/10.3390/s100505193>>. Citado na página 15.

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electromechanical impedance modeling. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. p. 71–89. <<https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm003>>. Citado na página 22.

ZHANG, C. *et al.* Real-time monitoring stiffness degradation of hardened cement paste under uniaxial compression loading through piezoceramic-based electromechanical impedance method. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119395–119410, 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119395>>. Citado na página 15.

ZHAOYONG, Z.; ABUDUWAILI, J.; YIMIT, H. The occurrence, sources and spatial characteristics of soil salt and assessment of soil salinization risk in yanqi basin, northwest china. *PLOS ONE*, Public Library of Science, v. 9, n. 9, p. 1–12, 09 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106079>>. Citado na página 25.

ZHU, J. *et al.* Electromechanical impedance-based damage localization with novel signature extraction methodology and modified probability-weighted algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 146, p. 210–220, 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107001>>. Citado na página 15.

ZHU, J.; WANG, Y.; QING, X. Modified electromechanical impedance-based disbond monitoring for honeycomb sandwich composite structure. *Composite Structures*, v. 217, p. 175–185, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.033>>. Citado na página 15.