

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM**

**KLEISON ANTONIO POSSENTI**

**ANÁLISE DINÂMICA UTILIZANDO MODELO SUBSTITUTO PARA  
DETERMINAÇÃO DO ENVELOPE DE PROJETO E ÍNDICE DE DANO APLICADO  
EM ESTRUTURAS DE MATERIAL COMPÓSITO**

**JOINVILLE**

**2021**

**KLEISON ANTONIO POSSENTI**

**ANÁLISE DINÂMICA UTILIZANDO MODELO SUBSTITUTO PARA  
DETERMINAÇÃO DO ENVELOPE DE PROJETO E ÍNDICE DE DANO APLICADO  
EM ESTRUTURAS DE MATERIAL COMPÓSITO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

**JOINVILLE**

**2021**

Possenti, Kleison Antonio

Análise dinâmica utilizando modelo substituto para determinação do envelope de projeto e índice de dano aplicado em estruturas de material compósito / Kleison Antonio Possenti. -- 2021.

131 p.

Orientador: Ricardo de Medeiros

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Joinville, 2021.

1. Metamodelo Kriging. 2. Materiais Compósitos. 3. Índice De dano. 4. Hipercubo Latino. 5. Otimização Global Eficiente. I. Medeiros, Ricardo de. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

**KLEISON ANTONIO POSSENTI**

**ANÁLISE DINÂMICA UTILIZANDO MODELO SUBSTITUTO PARA  
DETERMINAÇÃO DO ENVELOPE DE PROJETO E ÍNDICE DE DANO APLICADO  
EM ESTRUTURAS DE MATERIAL COMPÓSITO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) (presidente/orientador)

Membros:

Prof. Assoc. Pablo Andrés Muñoz Rojas

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CCT)

Dr. Olavo Mecias da Silva Junior

Fundação Stemmer para Pesquisa, desenvolvimento e inovação (FEESC)

Joinville, 29 de novembro de 2021.

A Deus, a meu pai, a minha mãe, a minha irmã, amigos e professores que acreditaram e apoiaram durante todo o desenvolvimento deste sonho.

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente a Deus, por possibilitar a realização deste sonho e estar presente nos momentos de alegria e dificuldade.

Ao meu pai João Roque Possenti e a minha mãe Olinda Machado Possenti por toda ajuda, incentivo, apoio emocional e financeiro, sendo pilares essenciais nessa trajetória.

Ao professor e orientador Dr. Ricardo de Medeiros, por fornecer todo o seu apoio, incentivo, conhecimento e sabedoria, não medindo esforços para esclarecer e solucionar as dúvidas encontradas ao longo deste período, ajudando em meu crescimento pessoal e profissional.

A minha avó Lucia Possenti (*In memoriam*), por incentivar e acreditar nos meus sonhos.

A minha irmã Emili e toda a minha família por me incentivarem e acompanharem nesta jornada.

A meus amigos de laboratório pelas conversas e trocas de conhecimento, auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), pela estrutura e material científico fornecido.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC - 2017TR1747 e 2019TR779), pela bolsa de estudos e pelo suporte financeiro.

“Nunca deixe ninguém lhe dizer que você não pode fazer alguma coisa. Se você tem um sonho, tem que correr atrás dele. As pessoas não conseguem vencer e dizem que você também não vai vencer. Se quer alguma coisa corra atrás. ” (Passagem do Filme: À Procura da Felicidade, 2006)

## RESUMO

Com os avanços tecnológicos na área da engenharia, cada vez mais ocorre a demanda por componentes com propriedades específicas, sendo necessária a combinação de diferentes tipos de materiais. Nesse contexto surgem os materiais compósitos, resultando na combinação dessas características. Para garantir a qualidade, segurança e a vida útil de componentes fabricados com esses materiais é necessária a busca por meios de monitorar e detectar defeitos/danos, visto que, elevados valores monetários são investidos nos projetos. Com isso, técnicas de detecção de defeitos/danos baseadas na resposta dinâmica da estrutura, como frequência natural, amortecimento e formas modais, podem ser utilizadas, sem a necessidade realizar ensaios destrutivos ou conhecer previamente o local do dano. Diante do exposto, este trabalho visa analisar dinamicamente estruturas fabricadas de material compósito utilizando um modelo substituto para determinar o envelope de projeto e avaliar os índices de dano considerando placas intactas e danificadas. Para isso, é utilizada uma metodologia contendo o metamodelo Kriging a fim de determinar o envelope de projeto. Inicialmente o Hipercubo Latino é aplicado para gerar os valores das variáveis de entrada e, o método de elementos finitos, através do software Abaqus<sup>TM</sup>, para determinar as frequências naturais. Com as entradas e saídas o metamodelo Kriging é utilizado para gerar um modelo substituto e, otimizado através do algoritmo *Efficient Global Optimization* e a métrica de melhoria esperada (EI) a fim de adicionar novos pontos de preenchimento e aproximar os resultados fornecidos pelo modelo aos dados computacionais. Com isso, um intervalo de frequência é obtido e o envelope de projeto é construído visando avaliar a qualidade de fabricação das estruturas. Devido à pequena variação entre as funções de resposta em frequência (FRFs) intacta e danificada, utilizou-se um índice de dano para identificação do dano na estrutura. Ao final, foi verificado que a metodologia adotada possibilitou a identificação e a estimativa do dano. Também foi possível verificar a influência da adição de métricas ao Hipercubo Latino a fim de diminuir o custo computacional. Portanto, a estratégia apresentada pode ser útil no estudo de sistemas de avaliação da qualidade de fabricação de estruturas de material compósito e na detecção de danos que utilizam a análise dinâmica como parte de seu processo.

**Palavras-chave:** Metamodelo Kriging. Materiais Compósitos. Índice de dano. Hipercubo Latino. Otimização Global Eficiente.



## ABSTRACT

With technological advances in engineering, there is a growing demand for components with specific properties, requiring a mixture of different materials types. In this context, composite materials emerge, resulting in the combination of these characteristics. Thus, to ensure the quality, safety, and useful life of components manufactured with these materials, it is necessary to search for ways to monitor and detect defects or damages, since high amounts of money are invested in the projects. For this, defect/damage detection techniques based on the dynamic properties and structural response, such as natural frequency, damping, and modal shape, can be used to detect defect/damage. In this case, without the need to carry out destructive tests or previously known location of the damage. Therefore, this work aims to dynamically analyze structures made of composite material using a surrogate model to determine the design envelope and evaluate the damage index in the intact and damaged structures. A methodology containing the Kriging metamodel is used to determine a project envelope. Initially, the Latin Hypercube is used to generate the values of the input variables and the finite element method, through the Abaqus™ software, to calculate the natural frequencies. The Kriging metamodel is used to generate a numerical model with the inputs and outputs. This model is optimized employing the Efficient Global Optimization (EGO) algorithm and the expected improvement metric (EI) to reduce the computational cost. A frequency range is obtained, and a design envelope is created to assess the manufacturing quality of the structures. Due to the slight variation between the intact and damaged frequency response functions (FRFs), the damage index was used to identify the damage to the structure. In the end, it was verified that the methodology allowed the identification and estimation of damage. It was also possible to verify the influence of adding metrics to the Latin Hypercube to reduce the computational cost. Therefore, the presented strategy can be useful in the study of systems for evaluating the quality of manufacturing of composite material structures and in damage detection that uses dynamic analysis as part of their process.

**Keywords:** Kriging metamodel. Composite materials. Damage index. Latin hypercube. Efficient Global Optimization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Classificação dos compósitos de acordo com o reforço .....   | 26 |
| Figura 2 – Classificação dos compósitos com fibras contínuas .....  | 27 |
| Figura 3 – Exemplo de lâminas e laminado.....   | 28 |
| Figura 4 – Processo de <i>Filament Winding</i> .....  | 29 |
| Figura 5 – Processo de <i>Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding</i> .....  | 30 |
| Figura 6 – Sistema SHM .....  | 32 |
| Figura 7 – Método baseado em vibração para análise de dano .....  | 33 |
| Figura 8 – Número de artigos publicados contendo as técnicas de amostragem<br>descritas .....   | 37 |
| Figura 9 – Exemplo de Hipercubo Latino de 3 dimensões e 10 amostras .....   | 38 |
| Figura 10 – Função de exemplo para a métrica EI .....   | 47 |
| Figura 11 – Avaliação da métrica EI para a função apresentada .....   | 47 |
| Figura 12 – Fluxograma da metodologia utilizada .....   | 49 |
| Figura 13 – Amostras de placas de compósito de fibra de carbono .....   | 52 |
| Figura 14 – Curvaturas presentes nas superfícies das placas .....   | 53 |
| Figura 15 – Amostras de cilindros de compósito de fibra de carbono.....   | 54 |
| Figura 16 – Amostra de placa de compósito de fibra de vidro .....   | 56 |
| Figura 17 – Placa de compósito CFRP (a) esquemático com posicionamento dos<br>sensores, (b) Setup experimental .....                                    | 63 |
| Figura 18 – Cilindro de compósito de fibra de carbono (a) Posicionamento dos<br>acelerômetros, (b) Layout experimental para o cilindro de carbono ..... | 64 |
| Figura 19 – Placa de compósito de fibra de vidro (a) Posicionamento dos<br>acelerômetros, (b) Layout experimental para a placa de vidro .....           | 65 |
| Figura 20 – Metodologia adotada para o Hipercubo Latino .....   | 66 |
| Figura 21 – Convergência do parâmetro $\phi$ .....  | 67 |
| Figura 22 – Modelo de elementos finitos para placa com fibra carbono .....  | 70 |
| Figura 23 – Condições de contorno para placa com fibra carbono.....   | 70 |
| Figura 24 – Modelo de elementos finitos para cilindro com fibra de carbono .....  | 72 |
| Figura 25 – Condições de contorno para cilindro com fibra de carbono .....  | 72 |
| Figura 26 – Modelo de elementos finitos para placa com fibra de vidro .....   | 73 |
| Figura 27 – Condições de contorno para placa com fibra de vidro .....   | 74 |
| Figura 28 – Fluxograma do metamodelo Kriging.....   | 75 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 29 – Fluxograma do envelope de projeto .....   | 77  |
| Figura 30 – Modos de vibração para a placa P-A.....   | 81  |
| Figura 31 – Melhoria Esperada para a placa P-A.....   | 81  |
| Figura 32 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa<br>P-A .....    | 83  |
| Figura 33 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-A.....                             | 84  |
| Figura 34 – Modos de vibração para a placa P-B.....   | 86  |
| Figura 35 – Melhoria Esperada para a placa P-B.....   | 87  |
| Figura 36 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa<br>P-B .....    | 88  |
| Figura 37 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-B.....                             | 89  |
| Figura 38 – Modos de vibração para o cilindro C-A.....  | 91  |
| Figura 39 – Melhoria Esperada para o cilindro C-A.....  | 92  |
| Figura 40 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o<br>cilindro C-A ..... | 93  |
| Figura 41 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-A .....                         | 94  |
| Figura 42 – Modos de vibração para o cilindro C-B.....  | 97  |
| Figura 43 – Melhoria Esperada para o cilindro C-B.....  | 97  |
| Figura 44 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o<br>cilindro C-B ..... | 98  |
| Figura 45 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-B.....                          | 99  |
| Figura 46 – Modos de vibração para o cilindro C-C .....   | 102 |
| Figura 47 – Melhoria Esperada para o cilindro C-C.....  | 103 |
| Figura 48 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o<br>cilindro C-C.....  | 104 |
| Figura 49 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-C.....                          | 105 |
| Figura 50 – Modos de vibração para a placa P-UD .....   | 107 |
| Figura 51 – Melhoria Esperada para a placa P-UD .....   | 108 |
| Figura 52 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa<br>P-UD.....    | 109 |
| Figura 53 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-UD ( $H_{21}$ ).....               | 110 |
| Figura 54 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-UD ( $H_{31}$ ).....               | 110 |
| Figura 55 – Modos de vibração para a placa P-BD .....   | 112 |
| Figura 56 – Melhoria Esperada para a placa P-BD .....   | 113 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 57 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa P-BD.....  | 114 |
| Figura 58 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-BD ( $H_{21}$ ).....  | 115 |
| Figura 59 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-BD ( $H_{31}$ ).....  | 115 |
| Figura 60 – Diferença entre o resultado obtido para o número de pontos de preenchimento e a literatura para a placa de CFRP (a) P-A e (b) P-B .                            | 116 |
| Figura 61 – Diferença entre o resultado obtido para o número de pontos de preenchimento e a literatura para o cilindro de fibra de carbono (a) C-A, (b) C-B e (c) C-C..... | 117 |
| Figura 62 – Diferença obtida para o número de IP em relação a literatura.....  | 118 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades geométricas para as placas de CFRP .....                            | 52 |
| Tabela 2 – Curvatura das placas de carbono/epóxi $[0]_8$ .....                              | 53 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas para as placas de CFRP.....                               | 54 |
| Tabela 4 – Propriedades geométricas dos cilindros de fibra de carbono.....                  | 55 |
| Tabela 5 – Propriedades geométricas para as placas de fibra de vidro .....                  | 56 |
| Tabela 6 – Propriedades mecânicas para as placas de GFRP unidirecional.....                 | 57 |
| Tabela 7 – Propriedades mecânicas para as placas de GFRP bidirecional.....                  | 57 |
| Tabela 8 – Análise geométrica para as placas de CFRP .....                                  | 58 |
| Tabela 9 – Análise geométrica para os cilindros de fibra de carbono .....                   | 58 |
| Tabela 10 – Análise geométrica para as placas de fibra de vidro.....                        | 59 |
| Tabela 11 – Análise das propriedades mecânicas dos compósitos.....                          | 60 |
| Tabela 12 – Análise do ângulo de variação das fibras .....                                  | 61 |
| Tabela 13 – Variáveis consideradas para cada tipo de amostra .....                          | 62 |
| Tabela 14 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis .....                           | 68 |
| Tabela 15 – Amortecimento para as placas de CFRP.....                                       | 71 |
| Tabela 16 – Amortecimento para os cilindros de CFRP .....                                   | 73 |
| Tabela 17 – Amortecimento para as placas de GFRP.....                                       | 74 |
| Tabela 18 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis da placa P-A.....               | 80 |
| Tabela 19 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-A .....              | 80 |
| Tabela 20 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-A<br>.....    | 82 |
| Tabela 21 – Índices de dano obtidos para a placa P-A .....                                  | 85 |
| Tabela 22 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis da placa P-B.....               | 85 |
| Tabela 23 – Frequências obtidas para as 10 rodadas da placa P-B.....                        | 86 |
| Tabela 24 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-B<br>.....    | 87 |
| Tabela 25 – Índices de dano obtidos para a placa P-B .....                                  | 90 |
| Tabela 26 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis do cilindro C-A.....            | 90 |
| Tabela 27 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-A.....                     | 91 |
| Tabela 28 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-A<br>..... | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 29 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ) ..... | 95  |
| Tabela 30 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ).....                | 95  |
| Tabela 31 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis do cilindro C-B .....   | 96  |
| Tabela 32 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-B.....   | 96  |
| Tabela 33 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-B .....  | 98  |
| Tabela 34 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ) ..... | 100 |
| Tabela 35 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ).....                | 101 |
| Tabela 36 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 15 variáveis do cilindro C-C.....  | 101 |
| Tabela 37 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-C .....  | 102 |
| Tabela 38 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-C .....  | 103 |
| Tabela 39 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ) ..... | 105 |
| Tabela 40 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ ).....                | 106 |
| Tabela 41 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 13 variáveis da placa P-UD .....   | 106 |
| Tabela 42 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-UD .....   | 107 |
| Tabela 43 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-UD .....  | 108 |
| Tabela 44 – Índices de dano obtidos para a placa P-UD.....  | 111 |
| Tabela 45 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 13 variáveis da placa P-BD .....   | 111 |
| Tabela 46 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-BD .....   | 112 |
| Tabela 47 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-BD .....  | 113 |
| Tabela 48 – Índices de dano obtidos para a placa P-BD.....  | 116 |
| Tabela 49 – Número de IP em relação a literatura .....  | 118 |
| Tabela 50 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ ) ..... | 129 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 51 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ ).....               | 129 |
| Tabela 52 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )..... | 130 |
| Tabela 53 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ ).....               | 130 |
| Tabela 54 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )..... | 131 |
| Tabela 55 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ ).....               | 131 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                             |
| BD     | Fibra bidirecional   |
| CFRP   | <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>                               |
| DoE    | <i>Design of experiments</i>   |
| EGO    | <i>Efficient global optimization</i>                                 |
| EI     | <i>Expected Improvement</i>  |
| FAPESC | Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina |
| FRF    | Função de Resposta em Frequência                                     |
| GFRP   | <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>                                |
| IP     | <i>Infill Points</i>   |
| LaVEL  | Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves                          |
| MEF    | Método dos elementos finitos   |
| MPI    | <i>Most Probable Improvement</i>                                     |
| MSE    | Erro quadrado médio  |
| RBF    | Funções de base radial   |
| RMSE   | Raiz do erro quadrado médio  |
| RTM    | <i>resin transfer molding</i>  |
| SHM    | <i>Structural Health Monitoring</i>                                  |
| SRV    | Regressão de Vetores de Suporte                                      |
| UD     | Fibra unidirecional  |
| UDESC  | Universidade do Estado de Santa Catarina                             |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $DI_{GAP}$            | Indicador de dano de amplitude e fase global                  |
| $e_d$                 | Índice de estrutura danificada                                |
| $e_i$                 | Índice de estrutura intacta                                   |
| $\omega$              | Frequência natural  |
| $H$                   | Amplitude   |
| $P$                   | Fase  |
| $x$                   | Variável de entrada   |
| $y$                   | Variável de saída   |
| $\mathbf{x}$          | Vetor de variáveis de entrada                                 |
| $\mathbf{y}$          | Vetor de variáveis de saída                                   |
| $f(\mathbf{x})$       | Função determinística   |
| $\hat{f}(\mathbf{x})$ | Função de aproximação   |
| $\varepsilon$         | Erro de aproximação aleatório                                 |
| $w$                   | Conjunto de parâmetros para função de aproximação             |
| $k$                   | Dimensão do vetor das variáveis de projeto                    |
| $d$                   | Distância entre pares de pontos para o Hipercubo Latino       |
| $J$                   | Quantidade de pares de pontos separados por uma distância $d$ |
| $\Phi$                | Critério de valor escalar                                     |
| $q$                   | Parâmetro da função de critério de valor escalar              |
| $\mathbf{X}$          | Espaço amostral   |
| $\Psi$                | Função do metamodelo Kriging                                  |
| $\theta$              | Parâmetro do Kriging relacionado a largura de base            |
| $\boldsymbol{\theta}$ | Vetor dos parâmetros $\theta_j$                               |
| $p$                   | Parâmetro do Kriging relacionado a suavidade                  |
| $\mathbf{p}$          | Vetor dos parâmetros $p_j$                                    |
| $\boldsymbol{\beta}$  | Vetor dos coeficientes de regressão linear do Kriging         |
| $Z$                   | Parcela extrínseca do Kriging                                 |
| $l$                   | Função de verossimilhança                                     |
| $\Psi$                | Matriz de correlação do Kriging                               |
| $\sigma^2$            | Desvio padrão para as variáveis                               |
| $\mu$                 | Tendência central do Kriging                                  |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\hat{\mu}$             | Estimador do parâmetro $\mu$ do Kriging          |
| $\hat{\sigma}^2$        | Estimador do parâmetro $\sigma^2$ do Kriging     |
| $\psi$                  | Vetor de correlação para o Kriging               |
| $\tilde{\psi}$          | Matriz de correlação aumentada                   |
| $\hat{y}$               | Predição para o metamodelo Kriging               |
| $\hat{s}^2$             | Erro quadrado médio para uma predição do Kriging |
| I                       | <i>Expected Improvement</i>                      |
| E                       | Valor do <i>Expected Improvement</i>             |
| $\Phi$                  | Distribuição acumulada de probabilidade          |
| $\phi$                  | Função densidade de probabilidade                |
| s                       | Raiz do erro quadrado médio                      |
| <b>EI<sub>Med</sub></b> | Vetor de valores de EI para modelo computacional |
| EI                      | EI para modelo computacional                     |
| W                       | Largura da placa                                 |
| L                       | Comprimento da placa/cilindro                    |
| D                       | Diâmetro do cilindro                             |
| T                       | Espessura da placa/cilindro                      |
| C <sub>1</sub>          | Distância 1 do plano até a placa                 |
| C <sub>2</sub>          | Distância 2 do plano até a placa                 |
| $\theta_x$              | Ângulo da fibra de x°                            |
| E <sub>11</sub>         | Módulo de elasticidade longitudinal              |
| E <sub>22</sub>         | Módulo de elasticidade transversal               |
| G <sub>12</sub>         | Módulo de cisalhamento no plano 1-2              |
| G <sub>23</sub>         | Módulo de cisalhamento no plano 2-3              |
| G <sub>13</sub>         | Módulo de cisalhamento no plano 1-3              |
| $\nu_{12}$              | Coeficiente de Poisson no plano 1-2              |
| $\rho$                  | Densidade do compósito                           |
| $\xi$                   | Amortecimento                                    |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>21</b> |
| 1.1          | OBJETIVO GERAL .....   | 23        |
| 1.2          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                  | 23        |
| 1.3          | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                  | 24        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                           | <b>25</b> |
| 2.1          | MATERIAIS COMPÓSITOS .....                                   | 25        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Classificação dos materiais compósitos .....</b>          | <b>26</b> |
| 2.1.1.1      | <i>Compósitos reforçados com fibras .....</i>                | <i>26</i> |
| 2.1.1.2      | <i>Compósitos estruturais .....</i>                          | <i>27</i> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Processo de fabricação dos materiais compósitos .....</b> | <b>28</b> |
| 2.1.2.1      | <i>Filament Winding .....</i>                                | <i>29</i> |
| 2.1.2.2      | <i>Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding .....</i>          | <i>30</i> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Defeitos e danos em materiais compósitos .....</b>        | <b>31</b> |
| 2.2          | STRUCTURAL HEALTH MONITORING .....                           | 32        |
| 2.3          | METAMODELOS .....  | 34        |
| 2.4          | PROJETO DE EXPERIMENTOS .....                                | 36        |
| 2.5          | HIPERCUBO LATINO .....                                       | 36        |
| 2.6          | KRIGING .....  | 40        |
| 2.7          | EFFICIENT GLOBAL OPTIMIZATION (EGO) .....                    | 44        |
| 2.8          | EXPECTED IMPROVEMENT (EI) .....                              | 45        |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA .....</b>                                     | <b>49</b> |
| 3.1          | AMOSTRAS DE COMPÓSITOS .....                                 | 51        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Placas de fibra de carbono .....</b>                      | <b>51</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Cilindros de fibra de carbono .....</b>                   | <b>54</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Placas de fibra de vidro .....</b>                        | <b>55</b> |
| 3.2          | ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE PROJETO .....                       | 58        |
| 3.3          | ANÁLISE EXPERIMENTAL .....                                   | 62        |
| 3.4          | HIPERCUBO LATINO .....                                       | 65        |
| 3.5          | MODELO COMPUTACIONAL .....                                   | 69        |
| <b>3.5.1</b> | <b>Placas de fibra de carbono .....</b>                      | <b>69</b> |
| <b>3.5.2</b> | <b>Cilindros de fibra de carbono .....</b>                   | <b>71</b> |
| <b>3.5.3</b> | <b>Placas de fibra de vidro .....</b>                        | <b>73</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.6      | METAMODELO KRIGING E MELHORIA EGO .....   | 74         |
| 3.7      | ENVELOPE DE PROJETO .....   | 77         |
| 3.8      | ÍNDICE DE DANO .....  | 78         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS.....</b>  | <b>79</b>  |
| 4.1      | PLACA DE COMPÓSITO CFRP (P-A) .....   | 79         |
| 4.2      | PLACA DE COMPÓSITO CFRP (P-B) .....   | 85         |
| 4.3      | CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-A).....   | 90         |
| 4.4      | CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-B).....   | 95         |
| 4.5      | CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-C) .....  | 101        |
| 4.6      | PLACA DE COMPÓSITO GFRP UNIDIRECIONAL (P-UD).....                               | 106        |
| 4.7      | PLACA DE COMPÓSITO GFRP BIDIRECIONAL (P-BD) .....                               | 111        |
| 4.8      | PONTOS DE PREENCHIMENTO DOS ESTUDOS REALIZADOS .....                            | 116        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>119</b> |
| 5.1      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....   | 121        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>123</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – ÍNDICE DE DANO <math>H_{31}</math> PARA O CILINDRO C-A.....</b> | <b>129</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – ÍNDICE DE DANO <math>H_{31}</math> PARA O CILINDRO C-B.....</b> | <b>130</b> |
|          | <b>APÊNDICE C – ÍNDICE DE DANO <math>H_{31}</math> PARA O CILINDRO C-C.....</b> | <b>131</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, a substituição de materiais metálicos por materiais alternativos tem ganhado força em projetos de engenharia envolvendo otimizações voltadas ao aumento de desempenho. Isso ocorre devido à necessidade de combinar propriedades de diferentes materiais e reduzir peso. Neste contexto, surgem os materiais compósitos. Eles permitem a combinação de diferentes propriedades encontradas em materiais distintos e suportam esforços superiores com uma quantidade inferior de material quando comparado aos materiais convencionais como o aço (KAW, 2005).

No entanto é imprescindível garantir a qualidade dessas estruturas, devido aos valores de projeto envolvidos. Com isso, faz-se necessário o uso de sistemas de monitoramento da qualidade de estruturas e componentes, a fim de evitar falhas e colapso nos sistemas. Além disso, muitas vezes é inviável produzir protótipos para efetuar ensaios nessas estruturas devido a elevados custos de fabricação ou restrições de aplicação (DOHERTY, 1987).

Em virtude disso, são utilizadas técnicas visuais e experimentais aplicadas no próprio componente para verificar a falha, porém só é possível utilizá-las quando o local da falha é conhecido. Para sanar este problema, foram desenvolvidas técnicas de detecção de dano baseadas em modelos computacionais, capazes de avaliar as propriedades por meio da análise das propriedades dinâmicas da estrutura, tais como a frequência, amortecimento e os modos de vibrar. Além disso, as simulações numéricas trazem benefícios como elevar a vida útil do componente e sua segurança, visto que é possível prever problemas e evitar a quebra de componentes, além de reduzir o custo de manutenção (DOEBLING *et al.*, 1996).

O método de monitoramento por vibrações é um método não-destrutivo que apresenta como característica utilizar parâmetros modais da estrutura para detectar falhas em componentes mecânicos. Ao se utilizar o método de monitoramento de dano baseado em vibrações, busca-se monitorar a estrutura de uma forma global, diferentemente da maioria dos métodos não-destrutivos, que avaliam apenas problemas locais. Para isso, se faz necessário realizar etapas, como a aquisição e filtragem de dados, a seleção e a avaliação de dados e o desenvolvimento de um modelo matemático (FARRAR; DOEBLING; NIX, 2001).

O metamodelo Kriging é uma opção para efetuar a parametrização dos dados, visto que é possível obter uma função de mapeamento que represente uma relação entre as entradas e saídas de dados, através de um modelo probabilístico. O Kriging permite analisar sistemas não lineares com um custo computacional relativamente barato. Aplicações do uso do metamodelo Kriging podem ser encontradas em Gao *et al.* (2013) para detectar falhas em estruturas do tipo placa e em Awadallah e El-sinawi (2020) para detecção de trincas e sua localização em pás de turbinas eólicas através da mudança de amplitude e frequências dos picos.

Os métodos de monitoramento de integridade estrutural para determinar danos em compósitos são amplamente utilizados em estruturas aeroespaciais. Com isso, pode-se detectar o dano nas primeiras alterações através da análise dinâmica da estrutura e minimizar os impactos de custo com a manutenção, reduzir o risco de falha catastrófica e o tempo de inatividade do componente (YUAN, 2016).

De Medeiros (2016) desenvolveu um novo sistema de monitoramento de saúde estrutural para identificar, localizar e estimar danos em estruturas compostas. Sua métrica permite verificar se uma estrutura se encontra intacta, parcialmente danificada ou totalmente danificada. Souza (2018) utilizou uma metodologia baseada em metamodelo Kriging para avaliar o processo de fabricação de materiais compósitos e obteve ganhos de 50% de tempo computacional com menos de 2% de erro quando comparada a uma metodologia sem o uso de metamodelos. Menezes (2020) construiu um modelo numérico capaz de fornecer as frequências naturais de uma estrutura composta utilizando o metamodelo Kriging e um algoritmo de otimização para avaliar a qualidade do processo de fabricação.

Diante desse contexto, este trabalho busca desenvolver uma ferramenta para a avaliação da qualidade de fabricação de estruturas de material compósito e a detecção de danos através do metamodelo Kriging. A implementação do projeto de experimentos foi realizada a fim obter uma melhora do tempo computacional. Além disso, o trabalho visa dar continuidade na linha de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa apresentar uma metodologia via modelo substituto e análise dinâmica para avaliação da qualidade de fabricação de estruturas de material compósito e identificação de dano entre a estrutura intacta e danificada. Para isso, utilizar-se uma metodologia através do metamodelo Kriging para gerar um modelo matemático aproximado das placas e cilindros de material compósito, reduzindo o esforço computacional e o custo de simulação. A fim de obter amostras iniciais e, de modo que haja um preenchimento do espaço de projeto, selecionou-se o método de projeto de experimentos baseado no Hipercubo Latino. Além disso, após o Kriging, é utilizado o algoritmo EGO com a métrica *Expected Improvement* para adição de novos pontos de preenchimento, buscando aproximar os resultados fornecidos pelo modelo aos dados computacionais. Com isso, um intervalo de frequência é obtido e um envelope de projeto é desenvolvido para verificar a qualidade de fabricação das estruturas. Por fim, para identificar o dano implementa-se a análise via índice de dano através dos dados obtidos das FRFs intactas e danificadas.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram traçados alguns objetivos específicos listados a seguir:

- a) Desenvolver uma rotina para o Hipercubo Latino composta por métricas capazes de garantir um preenchimento amostral, integrando a rotina com a metodologia previamente desenvolvida utilizando modelo substitutivo e melhoria esperada;
- b) Desenvolver e ajustar modelos de placas e cilindros de acordo com as variáveis de projeto consideradas e seus limites;
- c) Estimar a qualidade de fabricação das estruturas através das frequências naturais e do envelope de projeto desenvolvido;
- d) Identificar o dano nas estruturas através das FRFs e do índice de dano;
- e) Avaliar as potencialidades e limitações para a metodologia desenvolvida.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, conforme segue:

- **Capítulo 1: Introdução** – Apresenta uma contextualização do tema mostrando sua relevância e abrangência. Também são apresentados o objetivo principal e os específicos.
- **Capítulo 2: Revisão bibliográfica** – Esse capítulo aborda uma revisão da literatura sobre os principais assuntos abordados no trabalho. Os principais tópicos presentes na revisão são materiais compósitos, metamodelos, Projeto de Experimentos, Hipercubo Latino, Kriging e Otimização Global Eficiente.
- **Capítulo 3: Metodologia** – Descreve os procedimentos metodológicos, como a metodologia foi desenvolvida e executada e quais as etapas foram realizadas.
- **Capítulo 4: Resultados** – Apresenta os resultados obtidos para os intervalos de frequência, envelope de projeto e índice de dano para as placas e cilindros de fibra de carbono e para as placas de fibra de vidro.
- **Capítulo 5: Conclusões** – Esse capítulo apresenta as vantagens, potencialidades e limitações da metodologia utilizada e traz sugestões para trabalhos futuros com base no trabalho desenvolvido.
- **Referências:** Contém as referências utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.
- **Apêndice:** Contém os textos elaborados pelo autor a fim de complementar os resultados obtidos.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os embasamentos teóricos e científicos necessários para a elaboração do trabalho. São introduzidos conceitos relacionados aos materiais compósitos, metamodelos, Hipercubo Latino, Projeto de Experimentos, Kriging e *Efficient Global Optimization*.

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

A substituição de materiais convencionais por materiais alternativos como os compósitos têm ganhado força no mercado, visto que estes suportam esforços superiores com uma quantia inferior de material quando comparado aos materiais convencionais como o aço, proporcionando um ganho de rigidez e relação peso-resistência. Além disso, os compósitos permitem combinar as propriedades de seus materiais resultando em melhorias de propriedades como a resistência a corrosão e desgaste, rigidez, vida útil a fadiga, e isolamento térmico e acústico (JONES, 1999).

Apesar dos estudos relacionados aos compósitos serem relativamente novos, a utilização desses tipos de materiais pode ser evidenciada desde os anos de 1500 A.C., em que egípcios já combinavam bambus (fibra) com paredes de barro (matriz) a fim de elevar a resistência de suas construções. Outro exemplo encontrado na literatura é o do povo israelita que combinava tijolos feitos de barro com reforços de palha, evitando assim que eles rachassem com facilidade (KAW, 2005).

Com isso, pode-se definir que um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica e que não são solúveis entre si, sendo que seus constituintes são visíveis a olho nu. O material resultante é um compósito multifásico que pode resultar em propriedades desejadas de rigidez e resistência presentes em seus constituintes ou não (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2020).

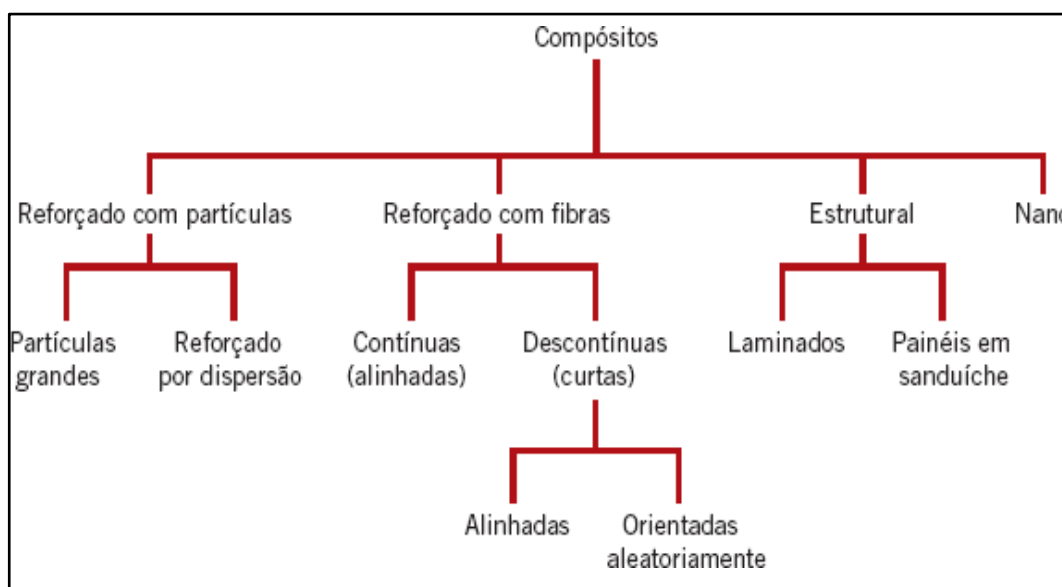
Os compósitos, geralmente são compostos por uma matriz (metálica, polimérica) e uma fase dispersa (fibras). Assim, é possível obter uma boa resistência com a utilização de fibras, por exemplo a fibra de vidro e de carbono, juntamente com boa ductilidade através da matriz polimérica, além de garantir a proteção das fibras de ataques químicos ou danos de desgaste. Além disso, pode-se utilizar diferentes combinações de orientações das lâminas, elevando a resistência em direções que

necessitam suportar maiores esforços, otimizando a utilização do material (MENDONÇA, 2005).

### 2.1.1 Classificação dos materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados de diferentes modos. É possível dividi-los entre naturais e sintéticos, pelo tipo de arranjo dos reforços existentes, de acordo com sua matriz ou com o seu reforço. A Figura 1 apresenta a classificação para os compósitos ao levar em consideração o tipo de reforço, dividindo-os em compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras, estruturais e nano compósitos (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2020).

Figura 1 – Classificação dos compósitos de acordo com o reforço



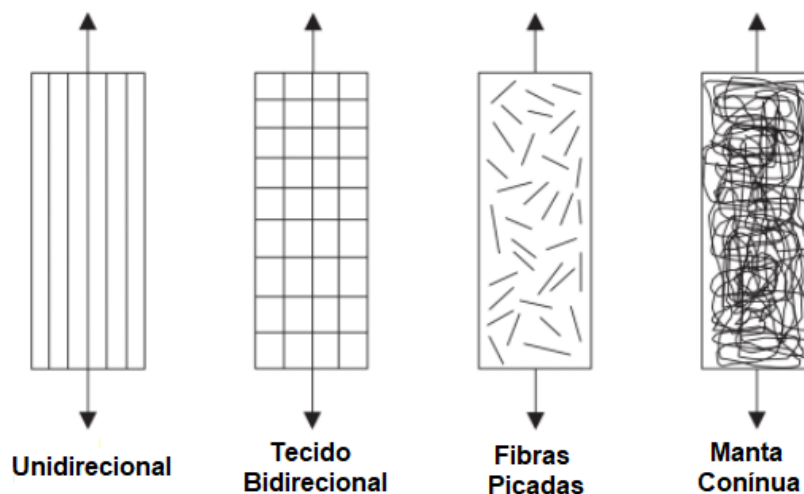
Fonte: Callister Junior e Rethwisch (2020).

#### 2.1.1.1 Compósitos reforçados com fibras

Os compósitos reforçados com fibras podem apresentar em sua estrutura fibras contínuas (longas) e descontínuas (curtas). Para compósitos sintéticos, a fase de reforço é formada por fibras contínuas com uma orientação preferencial. Sendo assim, é possível utilizar reforços unidirecionais ou tecidos que apresentam fibras em duas direções, chamados de tecido bidirecional. Há também situações em que se aplicam as fibras picadas ou a manta contínua submetida a esforços de tração uniaxial

longitudinal. A escolha para cada um dos tipos de fibra contínua dependerá da resistência mecânicas e rigidez necessárias em diferentes direções e do custo de fabricação (NETO; PARDINI, 2018). A Figura 2 mostra a classificação dos compósitos de fibras contínuas.

Figura 2 – Classificação dos compósitos com fibras contínuas



Fonte: Neto e Pardini (2018).

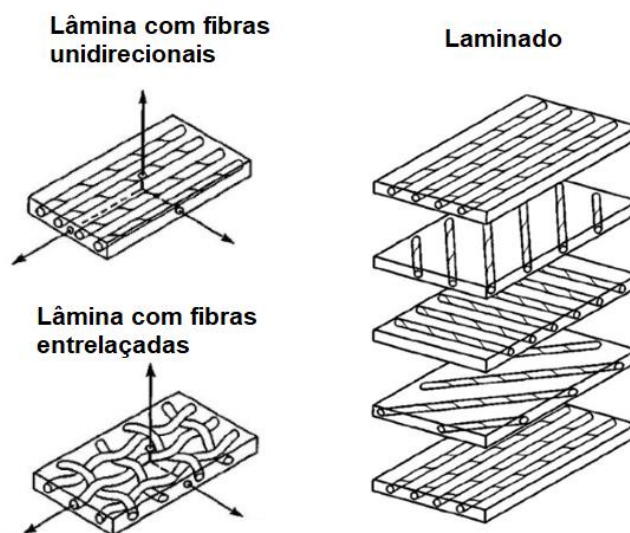
#### 2.1.1.2 Compósitos estruturais

Os compósitos estruturais são responsáveis pela maioria das aplicações estruturais e podem ser definidos como aqueles que apresentam várias camadas de fibras posicionadas uma sobre a outra. Essas camadas podem apresentar a mesma orientação ou não, dependendo das propriedades mecânicas desejadas (MALLICK, 2007).

A lâmina em um material compósito pode ser definida como um arranjo plano ou curvado de fibras unidirecionais ou entrelaçadas em uma matriz. As fibras podem ser de material sintético como o vidro, o carbono e a aramida ou naturais como bambu, o linho e o algodão. A matriz pode ser orgânica, metálica, cerâmica ou de carbono. O laminado por sua vez, é resultado da união de um conjunto de lâminas empilhadas, podendo conter orientações de fibras iguais ou diferentes. Geralmente utiliza-se o mesmo material para a matriz, porém as camadas podem conter materiais diferentes para as fibras (JONES, 1999). A Figura 3 mostra exemplos para as lâminas com fibras unidirecionais e entrelaçadas e um laminado com 5 camadas (lâminas).

As lâminas com fibras unidirecionais são resistentes e rígidas na direção longitudinal (direção das fibras), no entanto muito fracas na direção transversal, devido às propriedades da matriz polimérica. As aplicações estruturais geralmente utilizam materiais laminados, pois necessitam de alta resistência mecânica em múltiplas direções enquanto a matriz contribui para a distribuição das cargas entre as fibras (CAMPBELL, 2010).

Figura 3 – Exemplo de lâminas e laminado



Fonte: Adaptado de Jones (1999).

### 2.1.2 Processo de fabricação dos materiais compósitos

A obtenção de um material compósito envolve diversas etapas no processo de fabricação. Dentre elas, a orientação das camadas das fibras, o preenchimento dos interstícios com resina líquida para a formação da matriz e a cura da resina. O processo deve garantir uma boa ligação entre fibra e matriz, a fim de assegurar as propriedades mecânicas do compósito. Para que o compósito seja fabricado, diversos processos de fabricação podem ser utilizados. A seleção do processo deve levar em consideração dois parâmetros principais, a qualidade e o custo de fabricação (HOA, 2009).

Dentre os diversos processos encontrados na literatura, pode-se citar a deposição manual, o método de spray ou pulverização, processo de autoclave em embalagem a vácuo, a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo

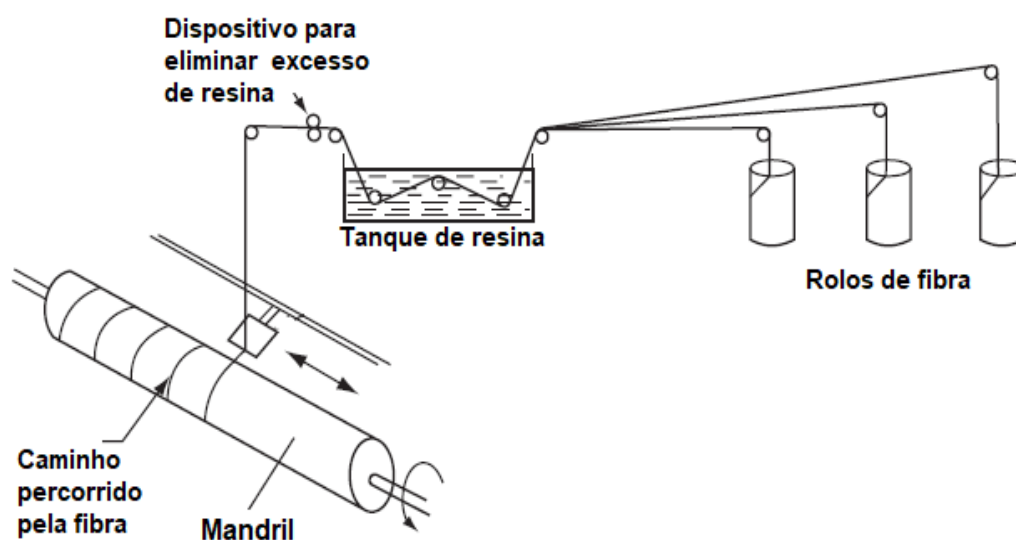
(VARTM, do inglês *Vacuum assisted resin transfer molding*), a pultrusão e o enrolamento filamental (do inglês *filament Winding*) (SMITH; HASHEMI, 2012).

#### 2.1.2.1 *Filament Winding*

O processo de enrolamento filamental ou *filament winding* é uma das técnicas mais utilizadas na engenharia para a fabricação de materiais compósitos, pois apresenta um alto custo-benefício e um fácil processo de automação. Dentre as soluções viáveis para substituir os sistemas de filamento convencionais, destacam-se os sistemas de enrolamentos robóticos, permitindo a carga e descarga automática dos mandris (MUNRO, 1988).

Nesse processo a fibra é alimentada por uma grande quantia de rolos e submetida a um banho de resina líquida em um tanque. Em seguida, o excesso de resina é retirado através de um dispositivo de limpeza e a fibra é enrolada em um mandril de acordo com a dimensão da peça desejada. Para manter a tensão da fibra constante, guias e barras de apoio são utilizadas. Após o final do processo, a peça é submetida a cura, que pode ser realizada a temperatura ambiente ou mais elevada dependendo das condições, conforme Figura 4 (MALLICK, 2007).

Figura 4 – Processo de *Filament Winding*



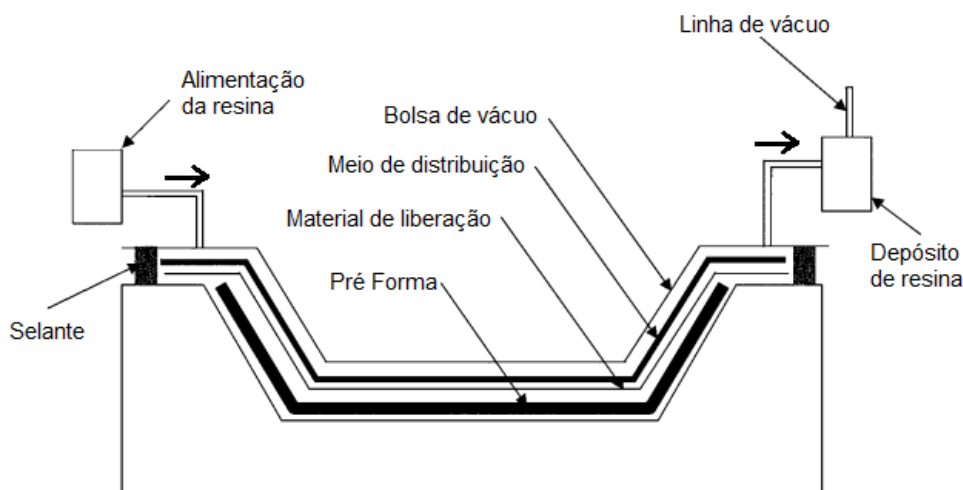
Fonte: Adaptado de Mallick (2007).

O processo apresenta diversas aplicações sendo principalmente utilizado na fabricação de eixos de transmissão automotivo, pás de helicóptero, tanques de oxigênio, vasos de pressão, grandes reservatórios de armazenamento de combustível e até invólucros para motores de foguetes e mísseis. Os custos para esse processo podem ser baixos, moderados ou altos dependendo do tamanho da peça e da sofisticação do sistema de controle (SMITH; HASHEMI, 2012).

#### 2.1.2.2 Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding

O *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM) consiste em um método de fabricação de materiais compósitos baseado na transferência da resina para as fibras através de um sistema de vácuo. Para esse método, um molde rígido no formato da peça é utilizado de um lado e uma bolsa plástica é inserida acima das fibras. Um material altamente permeável como tela de nylon ou tecido de polipropileno é inserido no topo do pré-molde para facilitar o escoamento da resina. Uma bomba de vácuo retira o ar e leva a resina por sucção para o meio das fibras (CAMPBELL, 2010). A Figura 5 apresenta um desenho esquemático do processo VARTM, no qual pode-se observar a obtenção de uma peça com o formato do molde e os materiais envolvidos no processo. A resina percorre todo o caminho através do meio de distribuição pelo processo de sucção produzido por uma linha de vácuo.

Figura 5 – Processo de *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding*



Fonte: Adaptado de Campbell (2010).

O VARTM apresenta como vantagens um baixo custo de fabricação, a possibilidade de produzir peças de grandes dimensões, uso de baixas pressões e a facilidade de produção do compósito quando comparado aos demais processos que envolvem transferência de resina. A principal desvantagem do método é que devido às baixas pressões, vazios podem aparecer na peça. Esse método é muito utilizado na fabricação de barcos, porém vem sendo aplicado em componentes para indústria espacial. Para peças de tamanho elevado são necessários múltiplos pontos de entrada de resina e saídas de ar (HOA, 2009).

### **2.1.3 Defeitos e danos em materiais compósitos**

Os defeitos e danos presentes em estruturas de material compósito são ocorrências comuns que se manifestam durante o processamento do material, o processo de fabricação ou durante sua vida útil. Com isso, as propriedades mecânicas dos componentes fabricados com esses materiais ficam afetadas, não permitindo mais a utilização dos mesmos (VASILIEV; MOROZOV, 2018).

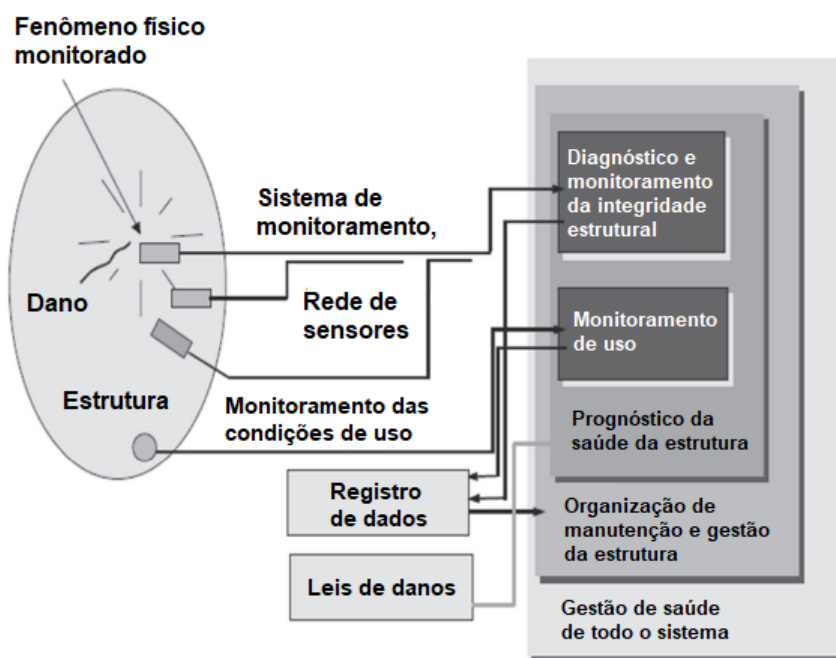
Os defeitos e danos podem ser divididos em três categorias. Os defeitos decorrentes do processamento de materiais ocorrem durante a produção ou preparação das fibras e das resinas, devido a problemas como armazenamento incorreto, falta de controle de qualidade e procedimentos incorretos no momento do preparo. Os defeitos na fabricação dos componentes são aqueles que ocorrem durante o processo de fabricação do compósito ou na montagem dos componentes. Por fim, os danos em uso de serviço são os que ocorrem através de ações mecânicas através de impactos, sobrecarga, aquecimento, ataques químicos, quedas, vibrações, fadiga e uso inadequado (HESLEHURST, 2014). Vale ressaltar que neste trabalho adotar-se-á a denominação defeito para problemas de manufatura/fabricação e dano para problemas durante a vida da estrutura em uso.

Na literatura é possível observar 52 tipos de defeitos/danos divididos em categorias, variando de falhas microscópicas no processo de fabricação até um dano sofrido por um componente devido a um impacto bruto no momento da aplicação. Para a identificação de um deles é necessário iniciar na escala mais baixa possível como uma inspeção visual e avançar até escalas microscópicas para identificar onde o dano se iniciou (KASSAPOGLOU, 2015).

## 2.2 STRUCTURAL HEALTH MONITORING

O monitoramento da integridade estrutural, (SHM, do inglês *Structural health monitoring*), é um método automatizado para determinar mudanças que ocorram na integridade da estrutura, fornecendo em tempo real os dados e diagnósticos da integridade estrutural. Ele é composto por um componente de diagnóstico para detectar o dano (nível baixo) e um componente de prognóstico (nível alto), para gerar informações sobre as consequências desse diagnóstico. A Figura 6 apresenta um sistema SHM onde um fenômeno físico é monitorado através de uma rede de sensores conectadas na estrutura da peça. Através dos dados obtidos, métodos de reconhecimento de padrões são utilizados para a classificação do estado estrutural (YUAN, 2016).

Figura 6 – Sistema SHM



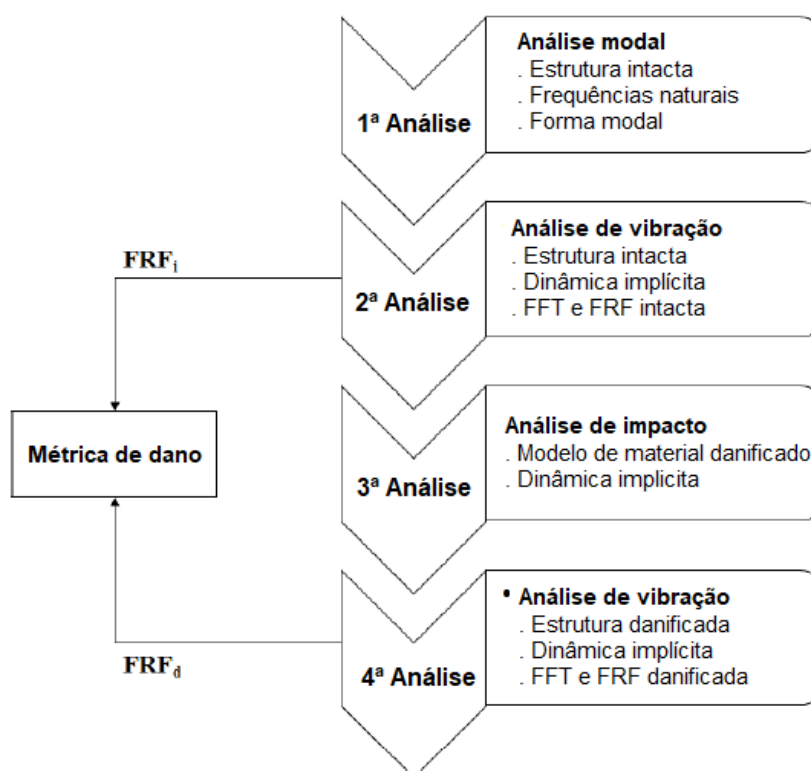
Fonte: Adaptado de Yuan (2016).

O uso de testes não-destrutivos combinado com técnicas de detecção de dano é amplamente utilizado para avaliar os resultados de resistência e de vida útil das estruturas de compósitos aeroespaciais. Dentre os métodos utilizados, destacam-se as correntes parasitas, inspeção ultrassônica, métodos ópticos, análise de vibração, radiografia, termografia e ondas de Lamb (JAWAID; THARIQ; SABA, 2019).



Em vista disso, o método baseado em vibração para SHM pode ser utilizado para a detecção de dano em materiais compósitos. Uma metodologia baseada em dados da estrutura intacta, da estrutura danificada e índice de dano é aplicada por De Medeiros (2016). A Figura 7 apresenta a metodologia, em que são realizadas as análises modais a fim de determinar as frequências naturais e as formas modais. Em seguida as análises de vibração são realizadas para as amostras intactas. Os testes de impactos são realizados nessas amostras. Por fim, as análises de vibração são realizadas nas amostras danificadas e o índice de dano é calculado.

Figura 7 – Método baseado em vibração para análise de dano



Fonte: Adaptado de Medeiros (2016).

O uso do índice de dano proposto por De Medeiros (2015a; 2015b) apresenta uma abordagem econômica e de fácil aplicação. Além disso, possui um potencial elevado para detecção de dano resultante de impactos, pouco visíveis a olho nu. O índice de dano proposto permite utilizar diferentes parâmetros para a obtenção da FRF como aceleração e força, deformação e força, velocidade e força. O *Global Amplitude Phase Damage Indicator* ( $DI_{GAP}$ ) é definido como

$$DI_{GAP} = \left| 1 - \frac{\sum_{\omega} (H_{jk}^{ed}(\omega) \cdot P_{jk}^{ed}(\omega))}{\sum_{\omega} (H_{jk}^{ei}(\omega) \cdot P_{jk}^{ei}(\omega))} \right|, \quad (1)$$

onde os índices *ei* e *ed* representam as amostras intactas e danificadas, os subscritos *j* e *k* são referentes à entrada e saída de dados (força/aceleração), *H* a amplitude, *P* a fase e  $\omega$  o intervalo de frequência analisado.

### 2.3 METAMODELOS

Os metamodelos, superfícies de resposta ou modelos substitutos consistem em modelos matemáticos que se aproximem do modelo de referência da forma mais fiel possível, a fim de obter uma resposta exata ou semelhante à do modelo original. Com isso, os modelos substitutos são alternativas mais baratas de se realizar as análises do problema, quando comparado aos modelos originais que são altamente custosos. Por consequência, esses modelos também reduzem consideravelmente o tempo de simulação, permitindo uma resposta mais rápida para o problema (RAMU; PRABHU, 2013).

A construção de um modelo substituto se dá pelo ajuste de uma curva ou superfície a partir de uma quantia inicial finita de amostras, também chamadas de pontos de suporte. Essas amostras devem estar localizadas dentro do intervalo das variáveis do projeto e de modo que preencham o domínio do problema da forma mais abrangente possível. O ajuste desse modelo ainda pode ser classificado em um modelo interpolador, em que os valores das repostas obtidas para os pontos amostrados terão o mesmo valor que o modelo original ou modelo de regressão, em que os valores terão um valor próximo do modelo original (HOYLE, 2006).

A partir da concepção do modelo substituto, é possível compreender o comportamento do modelo, a importância de cada parâmetro de projeto e realizar previsões através do metamodelo. Além disso, pode-se eliminar as variáveis que apresentam pouca influência e refinar o espaço amostral dos pontos escolhidos. Após efetuar o treino do modelo, é possível utilizar técnicas de otimização para adicionar pontos de amostras ao conjunto de dados de entrada, a fim de melhorar o resultado e a precisão do metamodelo (AHMED; QIN, 2009).

Dado um vetor de entrada  $x \in \mathfrak{R}$  com um conjunto de dados de entradas conhecidos  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e um vetor de saída  $y \in \mathfrak{R}$  com saídas conhecidas  $y_1, y_2, \dots, y_n$  é possível obter uma função de aproximação denominada de  $\hat{f}(x)$  que represente o modelo, com o objetivo de manter as características da função original do problema  $f(x)$ . Assim, a função original é representada por uma função aproximada acrescida de um erro aleatório  $\varepsilon$ , conforme,

$$f(x) = \hat{f}(x) + \varepsilon. \quad (2)$$

Para que a função aproximada expresse a função original, é necessário atribuir um conjunto de parâmetros  $w$  à função aproximada e a seu erro,

$$f(x) = \hat{f}(x, w) + \varepsilon(w). \quad (3)$$

Em vista disso, deve-se encontrar quais são os valores de  $w$  para que a função aproximada represente a função original. Para isso, deve-se minimizar o erro, de modo que ao utilizar a estimativa de máxima verossimilhança, considerando uma distribuição normal, com um desvio padrão constante, pode-se determinar os parâmetros  $w$  através

$$w = \arg \min(f(x) - \hat{f}(x, w)). \quad (4)$$

Dentre os diversos tipos de ajustes que podem ser utilizados para criar os metamodelos, pode-se destacar a regressão de vetores de suporte – SRV (CRISTIANINI; SHAW-TAYLOR, 2000), as funções de base radial – RBF (BROOMHEAD; LOWE, 1988), e Kriging (MATHERON, 1963). Os modelos como Kriging e RBF apresentam uma precisão e fidelidade superior quando comparados a modelos de regressão polinomial e ao método dos mínimos quadrados e, se aplicado para problemas que possuem entradas não lineares e de maior complexidade, tais como a maioria dos casos de engenharia (ELSAYED; LACOR, 2014).

## 2.4 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O projeto de experimentos ou *Design of experiments* (DoE), é uma teoria que apresenta como objetivo determinar o local que os pontos das amostras devem ser colocados no espaço de projeto, a fim de obter o melhor conjunto de informações a partir de uma quantia limitada de amostras. Em casos em que se deseja construir um metamodelo, o DoE deve realizar um preenchimento de espaço (*Space-filling*), ou seja, espalhar os pontos da melhor forma possível no espaço de projeto, visto que os resultados desejados podem ser encontrados em diferentes regiões de projeto. Além disso, pode-se destacar o DoE como um planejamento muito útil quando utilizado com metamodelos não paramétricos, como é o caso de Redes Neurais e paramétricos como o método Kriging (RYBERG; BÄCKRYD; NILSSON, 2012).

O *design* de projetos se diferencia do método tradicional principalmente em sua abordagem em relação aos parâmetros de entrada. Ele utiliza o princípio de variar simultaneamente os dados de entrada, fazendo o método ser mais eficiente. Assim, é possível analisar como esses parâmetros interagem um com o outro e alteram o resultado obtido no modelo (WEISSMAN; ANDERSON, 2014). Dentre as vantagens encontradas com a utilização do DOE encontram-se a possibilidade de se avaliar e verificar diversos fatores simultaneamente e proporcionar a eliminação sistemática de combinações de variáveis, reduzindo assim o tempo e o custo computacional (CONDRA, 2001).

Dentre os diversos métodos que podem ser aplicados para o DOE, destacam-se os métodos de preenchimento de espaço para os metamodelos. Esses métodos são classificados em Hipercubo Latino (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979), Sequência de Hammersley (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1960), matrizes ortogonais (OWEN, 1992) e design uniforme (FANG *et al.*, 2000).

## 2.5 HIPERCUBO LATINO

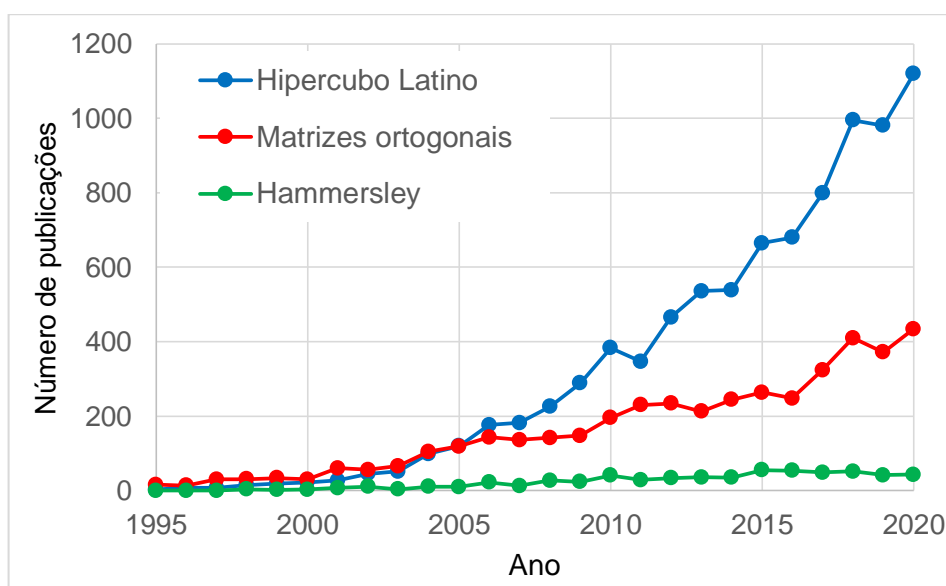
Quando se utiliza um modelo substituto para descrever um problema, é necessário ter um planejamento cuidadoso com os dados de entrada a serem utilizados. Em vista disso, técnicas de amostragem são utilizadas para selecionar as amostras iniciais de dados com o objetivo de obter uma boa representação do problema em estudo. Entre as diversas técnicas encontradas nos trabalhos

publicados, destacam-se o Hipercubo latino (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979), o projeto de Hammersley (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1960), e as matrizes ortogonais (OWEN, 1992). O Hipercubo Latino vem ganhando notoriedade em relação aos demais principalmente a partir de 2010.

Viana (2015) analisou o número de publicações contendo técnicas de amostragem para Matrizes ortogonais, Séries de Hammersley e Hipercubo Latino e comprovou que o uso do Hipercubo Latino se sobressai em relação aos demais a partir do ano de 2005. O estudo foi realizado a partir de artigos presentes no Google Acadêmico para o período de 1980 a 2013.

Ao realizar uma busca no Google Acadêmico com os termos “Projeto de Experimentos” e “Metamodelo” acrescido de cada um dos três métodos citados por Viana (2015), obteve-se o número de publicações até o ano de 2020. Ao observar a Figura 8, verificou-se que o Hipercubo Latino continua se destacando em relação aos demais quando associado ao uso de metamodelos.

Figura 8 – Número de artigos publicados contendo as técnicas de amostragem descritas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Uma das principais vantagens desse método, está no fato de que o Hipercubo Latino pode ser utilizado para cobrir desde pequenos até grandes espaços de projeto, além de ser computacionalmente barato de construir (PARK, 1994). Além disso, o Hipercubo Latino permite que cada uma das amostras de entrada seja retratada de

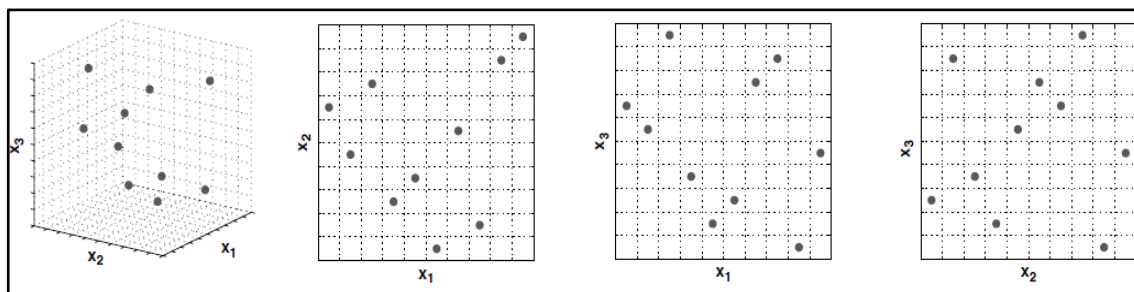
forma separada, independentemente de quais entradas sejam importantes e apresenta uma boa cobertura do espaço amostral (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979).

Além disso, o Hipercubo é frequentemente utilizado em metamodelos, pois não gera replicações de pontos, visto que modelos determinísticos não possuem ruídos experimentais e resultam em uma solução igual para o mesmo ponto. Outro fator de sua utilização está em seu potencial de preenchimento de espaço, de modo que técnicas interpoladoras de dados como o Hipercubo Latino acabam se sobressaindo em relação as demais (DEAN *et al.*, 2015).

O Hipercubo Latino pode ser compreendido como uma extensão multidimensional do quadrado latino. Sua construção parte do princípio de dividir o espaço de projeto em intervalos de tamanhos iguais. Inserem-se valores numéricos de 1 até  $n$  em cada um desses espaços, de modo que cada número apareça apenas uma única vez em cada direção desse espaço. Após isso, seleciona-se um desses valores aleatoriamente, substituindo-os por pontos, gerando então o hipercubo latino. Isso faz com que todos os pontos sejam marginalmente distribuídos uniformemente, sobre as variáveis de entrada (SANTNER; WILLIAMS; NOTZ, 2003).

A Figura 9 mostra um Hipercubo Latino com 3 dimensões e 10 pontos de amostras, com suas projeções bidimensionais. É possível perceber que nenhum ponto intercepta outro ponto nas direções paralelas aos eixos de orientação.

Figura 9 – Exemplo de Hipercubo Latino de 3 dimensões e 10 amostras



Fonte: Adaptado de Forrester, Sóbester e Keane (2008).

Apesar do Hipercubo Latino garantir um preenchimento completo em relação aos dados de entrada, ele não garante um preenchimento do espaço de maneira uniforme, como pode-se perceber em um hipercubo latino com os pontos preenchidos em sua diagonal. Para solucionar este problema, utiliza-se métricas que busquem

maximizar a distância entre os pontos amostrados. A métrica *maximin* é um tipo de métrica que pode ser utilizado. Dadas as distâncias entre os pares de pontos presentes no Hipercubo Latino, posicionam-se as mesmas em ordem crescente  $\{d_1, d_2, \dots, d_n / d_1 < d_2, \dots, d_{n-1} < d_n\}$  e busca-se maximizar a menor distância entre os pontos, ou seja,  $d_1$ . Após isso, o procedimento é repetido para a distância  $d_2$  e assim sucessivamente. Além disso, busca-se minimizar  $J_j$ , ou seja, minimizar o número de vezes em que uma determinada distancia  $d_j$  se repete (JOHNSON; MOORE; YLVISAKER, 1990). A definição de distância pode ser definida conforme

$$d_p(\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}) = \left( \sum_{j=1}^k |x_j^{(1)} - x_j^{(2)}|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (5)$$

em que o índice  $i$  representa os planos,  $k$  a dimensão do problema e  $p$  a norma utilizada. Para  $p=1$  tem-se a distância retangular (norma de Manhattan) e  $p=2$  a norma Euclidiana.

Uma desvantagem da métrica *maximin* é que a análise pode ser bastante enganosa do ponto de vista da otimização, visto que nem sempre analisa os vetores  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{J}$  em sua totalidade. O uso da função de critério de valor escalar permite utilizar esses vetores e determinar o melhor plano através do índice obtido. Os planos de amostragem concorrentes podem ser classificados através de (MORRIS; MITCHELL, 1995),

$$\Phi_q(\mathbf{X}) = \left( \sum_{j=1}^m J_j d_j^{-q} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (6)$$

onde quanto menor o valor obtido para  $\Phi$ , melhor será o espaço amostral de  $\mathbf{X}$ .

A dificuldade em utilizar o critério de valor escalar está em determinar o valor para a variável  $q$ , pois dependendo do valor escolhido pode-se resultar no mesmo problema encontrado para a métrica *maximin*. Morris e Mitchell (1995) sugeriram utilizar valores para  $q$  igual a 1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100 e encontrar o melhor plano obtido entre eles através da métrica *maximin*.

## 2.6 KRIGING

O modelo Kriging é amplamente utilizado em problemas de engenharia envolvendo correlações espaciais e foi concebido inicialmente pelo engenheiro de minas sul-africano Danie G. Krige (1951), em sua abordagem estatística de problemas de valorização de minas de ouro, nas águas da cadeia montanhosa de Witwatersrand na África do Sul. Em 1963, o matemático Matheron publicou em seu trabalho o uso do método de estatística espacial de Krige para um estudo sobre os graus e reservas de minério e verificou que o método era muito superior aos métodos tradicionais para estimar as respostas em virtude de se ajustar espontaneamente ao seu objetivo. Assim, Matheron nomeou o novo método de Kriging em homenagem ao engenheiro que o criou (MATHERON, 1963).

O modelo Kriging é um modelo computacional que apresenta por objetivo descrever o comportamento de um fenômeno ou um processo através de uma função de mapeamento, baseado em dados de entrada conhecidos e das respostas de saída geradas por esses dados. Ele é um modelo probabilístico, devido a fornecer um valor esperado com uma parcela de incerteza. Para isso, o modelo Kriging utiliza um conjunto de parâmetros que modelam a função e controlam as propriedades do modelo. Assim, é possível ter uma flexibilidade do modelo, verificando quais variáveis apresentam uma maior influência e garantir um controle da suavidade da superfície resultante (MARTIN; SIMPSON, 2005).

A função base para o modelo Kriging é dada por

$$\psi^i = \exp\left(-\sum_{j=1}^k \theta_j \cdot |x_j^i - x_j|^{p_j}\right), \quad (7)$$

e é muito semelhante a base gaussiana. O vetor  $\theta$  permite que a função de base se ajuste de acordo com a largura de base de cada variável enquanto o vetor  $\mathbf{p}$  do expoente fornece a suavidade adequada para cada dimensão de  $\mathbf{x}$ . A diferença do modelo gaussiano para o modelo Kriging é que o expoente  $p$  é fixado em 2 (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2008).

A construção do modelo Kriging consiste em uma função composta de duas parcelas. A primeira delas corresponde a uma tendência de resposta global e pode



ser descrita por uma regressão linear simples dos dados de entrada ou até mesmo por uma constante. A segunda parcela se refere aos erros, ou seja, os desvios do modelo linear que forma a superfície de resposta com base nos pontos próximos, conforme

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^k \beta_j \cdot f_j(\mathbf{x}) + Z(\mathbf{x}), \quad (8)$$

sendo que  $\mathbf{f}$  representa uma combinação de funções,  $\boldsymbol{\beta}$  é o vetor dos coeficientes da regressão linear e  $Z$  representa a segunda parcela referente aos erros e é considerado como um processo estocástico, com distribuição normal que apresenta uma média zero e desvio padrão  $\sigma^2$  (MARTIN; SIMPSON, 2005).

Para elaborar o modelo Kriging, deve-se partir de um conjunto de dados de entrada  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n\}^T$ , que são obtidos através de amostras. Cada vetor  $\mathbf{x}^m$  para  $m = 1 \dots n$ , contém os valores das variáveis de entrada do problema, que são selecionados através de um método DoE, como o Hipercubo Latino. Esses dados de entrada, geram uma resposta de saída  $\mathbf{y} = \{y^1, y^2, \dots, y^n\}^T$ . A partir desses dados, pretende-se encontrar uma função que apresente a melhor estimativa possível para esses dados de entrada. A partir desses dados e assumindo que se trata de um processo estocástico, é possível correlacionar as variáveis aleatórias através de

$$\text{cor}[Y(\mathbf{x}^i), Y(\mathbf{x}^l)] = \exp\left(-\sum_{j=1}^k \theta_j \cdot |x_j^i - x_j^l|^{p_j}\right), \quad (9)$$

em que o índice  $k$  representa a dimensão do problema ou o número de variáveis de projeto e os índices  $i$  e  $l$  representam os pontos das amostras (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2008).

A partir da Equação (8) é possível criar uma matriz de correlação  $\boldsymbol{\Psi}$  entre todos os pontos de amostras, como apresentado em

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{pmatrix} \text{cor}[Y(\mathbf{x}^1), Y(\mathbf{x}^1)] & \dots & \text{cor}[Y(\mathbf{x}^1), Y(\mathbf{x}^n)] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cor}[Y(\mathbf{x}^n), Y(\mathbf{x}^1)] & \dots & \text{cor}[Y(\mathbf{x}^n), Y(\mathbf{x}^n)] \end{pmatrix}. \quad (10)$$

O modelo Kriging apresenta um conjunto de parâmetros que devem ser determinados no problema, tais como  $\mu, \sigma^2, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m, p_1, p_2, \dots, p_m$ . Dado um conjunto de parâmetros, pode-se utilizar a estimativa da máxima verossimilhança para calcular a probabilidade desses dados. Assim, para solucionar os parâmetros desconhecidos, utiliza-se a função de probabilidade do ponto de amostra dada por,

$$l = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n}{2}} \cdot |\Psi|^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)^T \Psi^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)}{2\sigma^2}\right), \quad (11)$$

em que  $\mathbf{1}$  é um vetor coluna de dimensão  $n \times 1$ ,  $\Psi$  é a matriz de correlação,  $\sigma^2$  é o desvio padrão,  $\mathbf{y}$  é o vetor dos pontos de suporte.

Com o objetivo de simplificar a Equação (11), aplica-se o logaritmo natural resultando em

$$\ln(l) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln(\Psi) - \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)^T \Psi^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)}{2\sigma^2}, \quad (12)$$

Derivando a Equação (12) e igualando a zero, é possível se obter a estimativa de máxima verossimilhança para os parâmetros  $\mu$ , conforme

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{1}}, \quad (13)$$

e  $\hat{\sigma}^2$  conforme

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu})^T \Psi^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu})}{n}. \quad (14)$$

Assim esses parâmetros passam a depender apenas de  $\mathbf{p}$  e  $\theta$ , implícitos na matriz  $\Psi$ .

Substituindo a Equação (13) e a Equação (14) na Equação (11), pode-se obter a função de verossimilhança concentrada conforme

$$\ln(L) = -\frac{n}{2} \ln(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \ln|\Psi|. \quad (15)$$

Esta por sua vez, dependerá apenas dos parâmetros  $\mathbf{p}$  e  $\theta$ .

Para obter os parâmetros  $\mathbf{p}$  e  $\theta$ , basta maximizar a Equação (15). Infelizmente, esse processo é difícil de se realizar, devido a não ser possível diferenciar a função. Uma solução para esse problema é utilizar técnicas de otimização numérica como o algoritmo genético. Segundo Forrester, Sóbester e Keane (2008), é aconselhável utilizar intervalos entre 0 e 1 para os valores de  $\theta$  e, pode-se fixar o valor de  $\mathbf{p}$  em 2 para reduzir a complexidade do problema, visto que os valores de  $\mathbf{p}$  não apresentam grande influência na solução como os valores de  $\theta$ .

Com os parâmetros determinados, a próxima etapa é efetuar a previsão do modelo Kriging para um novo vetor  $\mathbf{x}$ . Para isso, faz-se necessário definir um vetor de correlação entre os pontos de amostra e o ponto da nova previsão através de

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{pmatrix} \text{cor}[Y(\mathbf{x}^1), Y(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ \text{cor}[Y(\mathbf{x}^n), Y(\mathbf{x})] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi^1 \\ \vdots \\ \psi^n \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Com isso, pode-se criar uma matriz de correlação aumentada, contendo a matriz de correlação dos pontos de amostra e o novo vetor de correlação,

$$\tilde{\boldsymbol{\Psi}} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Psi} & \boldsymbol{\psi} \\ \boldsymbol{\psi}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Ao utilizar a função de probabilidade apresentada na Equação (12), para a nova matriz de correlação, tem-se que apenas o último termo da equação depende da previsão, portanto, é necessário considerar apenas este termo na maximização. Fazendo todas as manipulações matemáticas, demonstradas anteriormente para os pontos de amostra, tem-se que a estimativa de máxima verossimilhança para o ponto de previsão é dada por

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \hat{\mu} + \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1} \hat{\mu}). \quad (18)$$

Assim como na Equação (8), tem-se uma média  $\hat{\mu}$  e um ajuste de previsão de acordo com a correlação do erro (JONES, 2001).

Devido ao modelo construído ser de uma previsão baseada em um processo gaussiano, pode-se utilizar o erro quadrado médio (MSE) para determinar o erro estimado do modelo através de

$$\hat{s}^2(x) = \sigma^2 \left[ 1 - \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \boldsymbol{\psi} + \frac{1 - \mathbf{1}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \boldsymbol{\psi}}{\mathbf{1}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{1}} \right]. \quad (19)$$

O segundo termo presente nos colchetes se refere à redução do erro na previsão, em que se não houver correlação  $\boldsymbol{\psi}$  será nulo, enquanto o último termo se refere a incerteza de não conhecer o valor de  $\hat{\mu}$ . Segundo Forrester, Sóbester e Keane (2008), devido à incerteza, o terceiro termo dentro dos colchetes geralmente é pequeno e pode ser omitido. Ao efetuar a raiz quadrada dessa equação ainda é possível quantificar a incerteza, em que caso algum ponto coincida com um ponto de suporte o valor encontrado será o próprio valor de  $\sigma$ .

## 2.7 EFFICIENT GLOBAL OPTIMIZATION (EGO)

Ao efetuar uma aproximação de um problema físico por um metamodelo, é necessário estimar um número de amostras necessárias para garantir a fidelidade deste ao problema real. Quanto mais amostras forem utilizadas, maior será a precisão, porém o problema começará a se tornar custoso. Em vista disso, deve-se garantir que o número de amostras escolhidas forneça as bacias de mínimos da função e, então utilizar um algoritmo de otimização para determiná-las com precisão, a fim de buscar o mínimo global (FERREIRA, 2016).

Em vista disso, pode-se utilizar o método de otimização eficiente global (EGO). Esse método parte do pressuposto de adicionar *infill points* (IP), também conhecidos como pontos de preenchimento, a partir do metamodelo criado e de informações obtidas a partir dele, como o preditor e o erro quadrático médio (MSE). Ao adicionar novos pontos, uma nova superfície de repostas é criada e um processo iterativo se inicia, até que o ótimo global seja determinado (JONES; SCHONLAU; WELCH, 1998).

Para adicionar os pontos de preenchimento, o EGO pode utilizar diferentes métricas para buscar uma solução como a métrica *Expected Improvement* (EI) e a métrica *Most Probable Improvement* (MPI). Essas métricas fazem o algoritmo EGO diferirem no modo em que os novos pontos são adicionados e influenciam no número

de iterações necessárias para se encontrar o resultado pretendido (TAKIMOTO; MORITA, 2015).

## 2.8 EXPECTED IMPROVEMENT (EI)

A métrica *Expected Improvement* (EI) é uma das métricas que podem ser utilizadas com o algoritmo EGO. Ela é altamente atraente para esses tipos de problemas devido a buscar um equilíbrio entre a pesquisa local e a pesquisa global. Para calculá-la parte-se do fato que a função estudada apresenta um valor mínimo atual, denominado de  $y_{min}$ , sendo que  $y_{min} = \min(y_1, y_2, \dots, y_n)$ . Ao calcular uma aproximação, obtém-se então o valor predito denominado de  $Y$ . Caso o valor encontrado para a função com o valor predito seja melhor que o mínimo atual, há alguma melhora em relação à solução anterior. Assim, pode-se definir a melhora em relação à melhor solução anterior através de

$$E[I(x)] = E[\max(y_{min} - Y, 0)], \quad (20)$$

e caso haja alguma melhora em relação ao ponto anterior, o resultado será a diferença entre o valor predito e o mínimo atual. Caso contrário, o resultado será zero (JONES; SCHONLAU; WELCH, 1998).

Para o presente trabalho, a Equação (20) foi utilizada para minimizar o erro entre a superfície de resposta fornecida pelo treino do metamodelo Kriging e o modelo de referência fornecido pelo método dos elementos finitos através do software Abaqus<sup>TM</sup>. Para isso, considerou-se que  $y_{min}$  representava o erro atual da superfície fornecida pelo Kriging em relação ao modelo fornecido pelo software. Ao adicionar um novo ponto de preenchimento sugerido, o novo erro  $Y$  era obtido. Caso o valor obtido na Equação (20) fosse maior que zero, o novo ponto de preenchimento era adicionado permitindo minimizar a diferença entre a superfície de resposta fornecida pelo modelo Kriging e a superfície de resposta obtida pelo software Abaqus<sup>TM</sup>.

A partir dessa melhoria encontrada, e considerando-a como uma variável aleatória devido à dependência de  $Y$ , distribuída normalmente, pode-se partir da função de densidade de probabilidade para se obter a métrica EI,

$$F(I) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(y_{min} - I - Y)^2}{2s^2} \right]. \quad (21)$$

Ao integrar a Equação (21), no intervalo de zero a infinito, devido à condição imposta pela Equação (20), onde  $I > 0$ , e resolver algumas integrais por partes, chega-se na métrica EI apresentada por

$$E[I(x)] = (y_{min} - \hat{y}) \Phi \left( \frac{y_{min} - \hat{y}}{s} \right) + s \phi \left( \frac{y_{min} - \hat{y}}{s} \right). \quad (22)$$

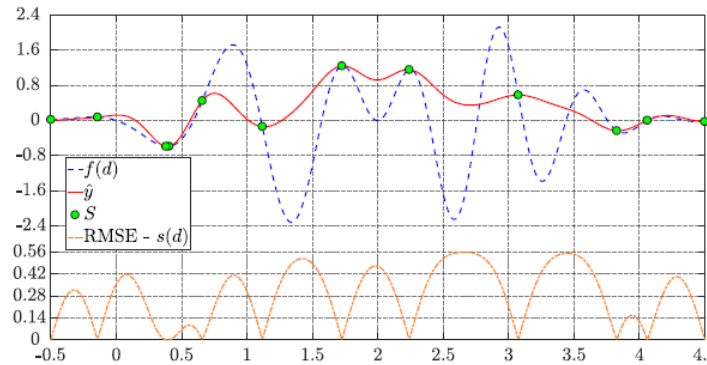
Na equação,  $\Phi$  representa a distribuição acumulada de probabilidade,  $\phi$  representa a função densidade de probabilidade,  $\hat{y}$  a média e  $s$  o erro quadrático do modelo.

É possível observar que o primeiro termo da Equação (22) carrega consigo uma penalização da probabilidade de haver melhora no valor predito, devido a estar sendo multiplicado pela distribuição acumulada de probabilidade. Já o segundo termo é influenciado pela média e pelo erro quadrático, e caso a média seja próxima de  $y_{min}$  e o erro seja alto, o valor obtido para a segunda parcela será alto. Isso faz com que a métrica EI apresente um equilíbrio entre uma exploração local e uma exploração global. Assim, ao se ter uma diferença grande entre  $y_{min}$  e  $\hat{y}$  ou incerteza, o valor de EI será alto e o algoritmo irá sugerir um ponto neste local (SCHONLAU, 1997). Para exemplificar a métrica EI, utiliza-se um exemplo encontrado em Nascentes (2019), em que a função utilizada é escrita por

$$f(d) = (2d - 4) \cdot \exp[-(d^2 - 4d + 3)] \cdot \sin(0,7d^2 + 4,9d). \quad (23)$$

Na Figura 10 pode-se observar, em azul pontilhado, a função original apresentada em um intervalo de  $[-0,5; 4,5]$ , e em vermelho uma aproximação obtida com o Kriging para uma amostragem de 12 pontos de suporte (S). Neste intervalo a função apresenta 6 mínimos locais e um mínimo global. Ao observar o erro RMSE, o mínimo da função seria em  $d=0,4$ , devido ao erro ser nulo, ou seja, um mínimo local.

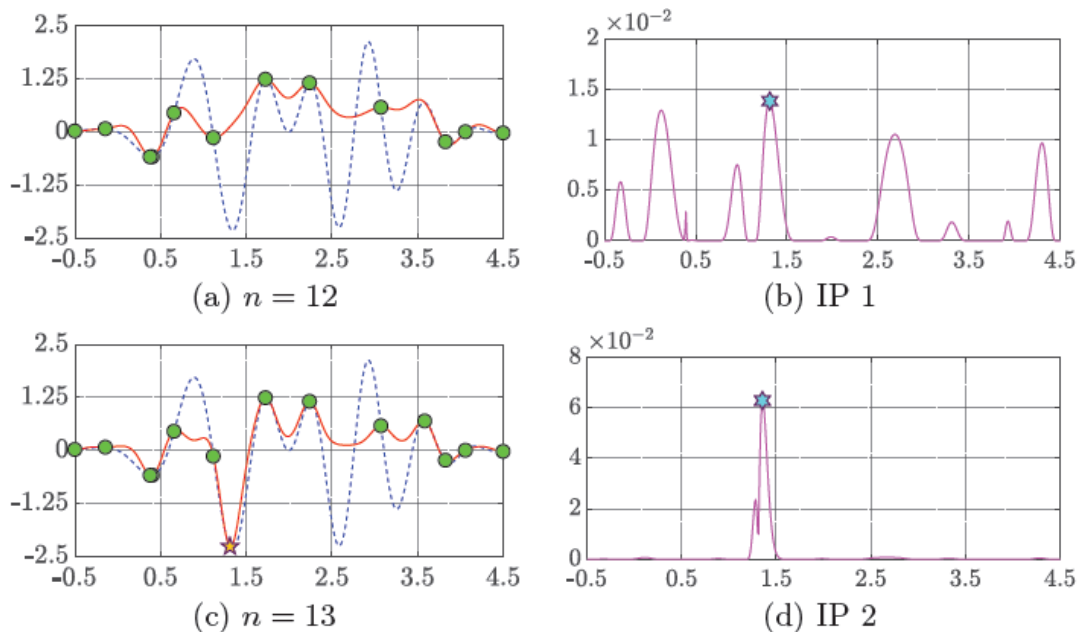
Figura 10 – Função de exemplo para a métrica EI



Fonte: Nascentes (2019).

Na Figura 11 é possível observar como os pontos de preenchimento são adicionados no modelo através do algoritmo EGO com a métrica EI.

Figura 11 – Avaliação da métrica EI para a função apresentada



Fonte: Adaptado de Nascentes (2019).

Na Figura 11(a) e (c) são demonstrados o metamodelo da função proposta com 12 e 13 pontos de suporte respectivamente e a Figura 11(b) e (d) as curvas da métrica EI para todo o domínio da função. Ao utilizar o algoritmo de EGO com a métrica EI, percebe-se pela curva (b) que o ponto de maior valor para a métrica é em  $d=1,3136$ , ou seja, há maior probabilidade desse ponto apresentar um valor menor para a função do que o valor atual. Logo um ponto de preenchimento é inserido em  $d=1,3136$ , como

demonstrado em (c). Assim, efetuam-se novamente os cálculos e as etapas se repetem até que o critério de parada seja atingido.

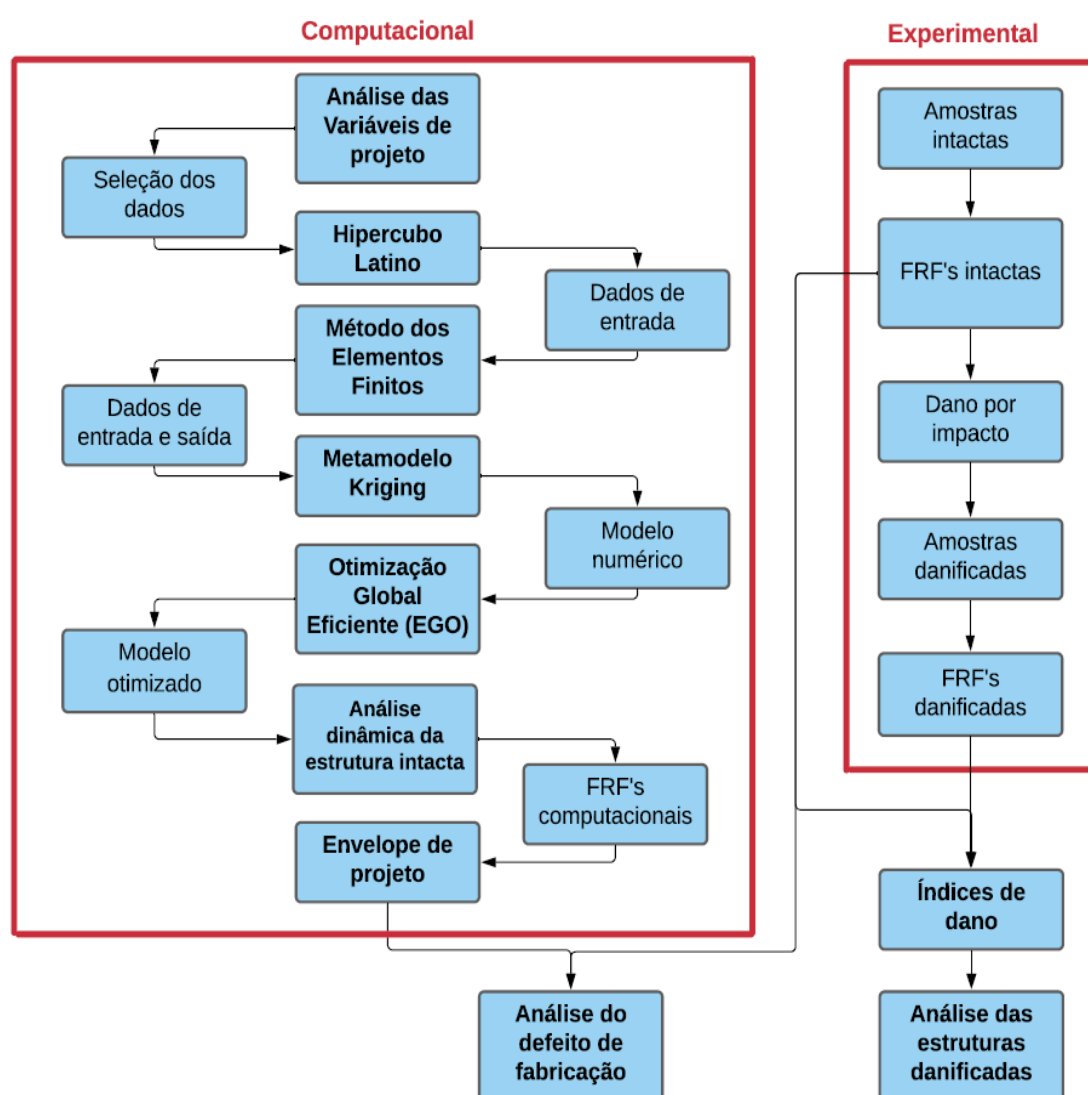
Pode-se concluir que a métrica  $EI$  apresenta como característica a inserção de um ponto de preenchimento onde a métrica  $EI$  apresenta o valor máximo. Além disso, em pontos de suporte o valor obtido para a métrica é zero, impedindo que sejam adicionados pontos de preenchimento sobre pontos de suporte e garantindo uma eventual convergência. Ela também sempre apresenta valores positivos para toda a curva e sua magnitude aumenta com o aumento da incerteza  $S$ .



### 3 METODOLOGIA

Esse capítulo visa apresentar a metodologia e os materiais utilizados em todas as etapas do trabalho. Os principais tópicos abordados são os materiais compósitos, as variáveis envolvidas, os testes experimentais e os modelos computacionais. A Figura 12 apresenta a metodologia desenvolvida através de um fluxograma contendo as principais etapas do trabalho.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Inicialmente realizou-se a seleção das variáveis de projeto envolvidas e a determinação dos intervalos de projeto. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_{11}$ ), o módulo de elasticidade transversal ( $E_{22}$ ), o módulo de cisalhamento no plano 1-2 ( $G_{12}$ ), o módulo de cisalhamento no plano 2-3 ( $G_{23}$ ), o módulo de cisalhamento no plano 1-3 ( $G_{13}$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ), as dimensões geométricas das estruturas e o ângulo de orientação das fibras. Essa etapa foi denominada de análise das variáveis de projeto. Com os dados selecionados, a próxima etapa consiste na realização do Design de experimentos (DoE), para isso optou-se pelo método do Hipercubo Latino para realizar a divisão do valor de cada variável de entrada dentro da faixa estipulada. Para garantir um melhor preenchimento do espaço amostral, selecionou-se a função de critério de valor escalar para determinar os melhores hipercubos entre 100 hipercubos aleatórios para 7 valores diferentes do parâmetro  $q$ . Em seguida aplicou-se a métrica *maximin* para escolher o melhor hipercubo entre as opções geradas para os diferentes valores de  $q$ . O hipercubo gerou 10 linhas de teste com valores diferentes para cada variável.

Com os dados de entrada obtidos foram determinadas, através do método dos elementos finitos, utilizando o software comercial Abaqus<sup>TM</sup>, as frequências para cada linha de teste gerada a partir do Hipercubo. Assim, para cada linha de dados de entrada ( $X$  entradas), obtiveram-se as frequências naturais ( $Y$  saídas). Esses dados foram utilizados para alimentar o metamodelo Kriging. Após treinar o modelo substituto pela primeira vez, utilizou-se a otimização global eficiente (EGO) para a adição de novos pontos ao modelo. Os pontos sugeridos para a nova adição também foram gerados a partir de um hipercubo latino. A cada novo ponto adicionado, o software Abaqus<sup>TM</sup> era chamado para fornecer as variáveis de saída e o modelo Kriging era treinado novamente. Utilizou-se a métrica de melhoria esperada (EI) como critério de parada até que ela atingisse um valor inferior ao limite especificado. Assim, após o treino do Kriging e a otimização (EGO), o modelo poderia prever novos pontos sem a necessidade do método dos elementos finitos, economizando tempo e custo computacional.

Com o treino do modelo concluído, selecionaram-se as amostras que apresentavam os valores máximos e mínimos para as frequências naturais e, então criou-se o envelope de projeto. O envelope de projeto é uma análise de robustez dos parâmetros de saída devido a variação dos parâmetros de projeto dentro dos limites estabelecidos na metodologia. Com o envelope obtido e as FRFs intactas das

amostras experimentais, realizou-se a análise dos defeitos de fabricação. Assim, a amostra que apresentasse sua FRF dentro dos limites estabelecidos seria classificada como sem defeito e estrutura fora dos limites seria classificada com defeito de fabricação.

Após a análise dos defeitos de fabricação, as amostras intactas foram danificadas por carregamento de impacto de baixa velocidade. As FRFs dessas amostras foram obtidas e denominadas como FRFs danificadas. Para avaliar as amostras danificadas, as FRFs das estruturas intactas e danificadas foram comparadas. Devido à pequena diferença apresentada na análise visual entre as FRFs, utilizou-se o índice de dano proposto por De Medeiros (2016) para comparar as FRFs intactas e danificadas e, assim verificar quais amostras apresentariam dano.

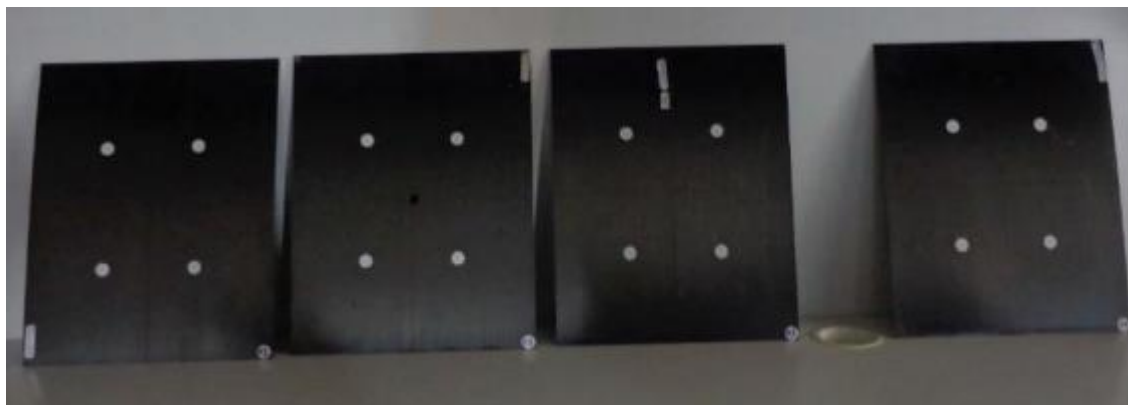
### 3.1 AMOSTRAS DE COMPÓSITOS

Com o objetivo de avaliar a metodologia, utilizaram-se dados experimentais e simulações numéricas. Os dados experimentais foram extraídos de 39 amostras, sendo 14 placas de compósito reforçados com fibra de carbono (CFRP, do inglês *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), 21 cilindros fabricados de CFRP e, 10 placas fabricadas de compósito polimérico reforçados com fibra de vidro (GFRP, do inglês *Glass Fiber Reinforced Polymer*) (DE MEDEIROS, 2016). Os tópicos a seguir apresentam os principais dados e características das estruturas selecionadas.

#### 3.1.1 Placas de fibra de carbono

Inicialmente, foram utilizados dados referentes a 14 placas de compósito CFRP, conforme mostrado na Figura 13. As placas 1 a 8 apresentam uma sequência de empilhamento  $[0]_8$  e as placas 9 a 14 uma sequência de empilhamento  $[0/15/-15/0/15/-15]_s$ . As placas foram fabricadas pelo processo de enrolamento filamentar (*filament winding*).

Figura 13 – Amostras de placas de compósito de fibra de carbono



Fonte: De Medeiros (2016).

As placas de CFRP possuem dimensões nominais de 305mm de comprimento, 245mm de largura e, espessura total de 2,2mm para as placas com sequência de empilhamento  $[0]_8$  e 3,3mm para as placas com sequência de empilhamento  $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$ . A Tabela 1 apresenta as propriedades geométricas dos corpos de prova. As placas com empilhamento  $[0]_8$  são denominadas de placas A e as placas com empilhamento  $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$  são denominadas de placas B.

Tabela 1 – Propriedades geométricas para as placas de CFRP

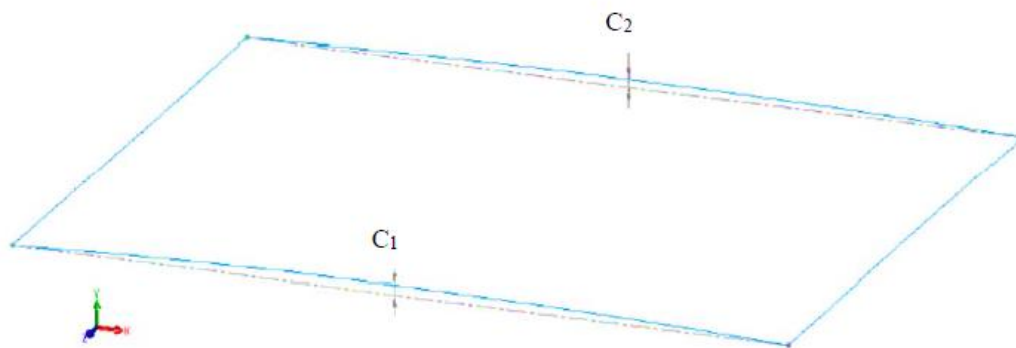
| Placa   | Comprimento<br>[mm] | Largura<br>[mm] | Espessura<br>[mm] | Sequência de<br>empilhamento |
|---------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| P01 – A | 305,00              | 245,00          | 2,247             | $[0]_8$                      |
| P02 – A | 305,39              | 244,86          | 2,245             | $[0]_8$                      |
| P03 – A | 305,39              | 244,71          | 2,257             | $[0]_8$                      |
| P04 – A | 305,00              | 245,00          | 2,246             | $[0]_8$                      |
| P05 – A | 304,90              | 245,67          | 2,207             | $[0]_8$                      |
| P06 – A | 304,94              | 246,12          | 2,218             | $[0]_8$                      |
| P07 – A | 305,30              | 245,79          | 2,208             | $[0]_8$                      |
| P08 – A | 303,84              | 245,88          | 2,212             | $[0]_8$                      |
| P09 – B | 306,64              | 247,45          | 3,331             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |
| P10 – B | 305,52              | 246,19          | 3,336             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |
| P11 – B | 305,45              | 245,21          | 3,493             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |
| P12 – B | 305,82              | 243,55          | 3,468             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |
| P13 – B | 306,62              | 247,13          | 3,370             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |
| P14 – B | 304,14              | 245,21          | 3,333             | $[0/15/-15 /0/15/-15]_s$     |

Fonte: De Medeiros (2016).

As placas com sequência de empilhamento  $[0]_8$  apresentam uma pequena curvatura devido ao processo de fabricação utilizado e tensões residuais geradas pelo processo de cura devido a sequência de empilhamento utilizada. Em vista disso, De Medeiros (2016) utilizou modelos computacionais com geometria obtida por um sistema de medição de coordenadas 3D para determinar os valores de curvatura  $C_1$

e  $C_2$ . A Figura 14 apresenta as curvaturas  $C_1$  e  $C_2$ , cujos valores são obtidos através das distancias máximas entre a placa real e uma linha de referência horizontal para uma placa plana ideal.

Figura 14 – Curvaturas presentes nas superfícies das placas



Fonte: Medeiros (2016).

Os valores obtidos para as curvaturas  $C_1$  e  $C_2$  das placas de fibra de carbono podem ser observadas na Tabela 2. A média aritmética para as curvaturas também foi calculada individualmente para cada uma das placas apresentadas.

Tabela 2 – Curvatura das placas de carbono/epóxi  $[0]_8$

| Placa   | $C_1$<br>[mm] | $C_2$<br>[mm] | Valor médio<br>[mm] | Sequência de<br>empilhamento |
|---------|---------------|---------------|---------------------|------------------------------|
| P01 – A | 3,825         | 3,182         | 3,504               | $[0]_8$                      |
| P02 – A | 4,269         | 4,008         | 4,139               | $[0]_8$                      |
| P03 – A | 4,557         | 4,180         | 4,369               | $[0]_8$                      |
| P04 – A | 3,937         | 3,705         | 3,821               | $[0]_8$                      |
| P05 – A | 3,940         | 3,721         | 3,831               | $[0]_8$                      |
| P06 – A | 4,165         | 3,200         | 3,683               | $[0]_8$                      |
| P07 – A | 4,060         | 4,225         | 4,143               | $[0]_8$                      |
| P08 – A | 4,385         | 4,643         | 4,514               | $[0]_8$                      |

Fonte: Adaptado de De Medeiros (2016).

O valor médio e o desvio padrão para as propriedades geométricas e de curvatura das placas de carbono/epóxi foram obtidos de Souza (2018). As propriedades mecânicas do material utilizado para a fabricação das placas são semelhantes às do material investigado por Tita *et al.* (2008), Ribeiro (2015) e Zhao *et al.* (2001).

A Tabela 3 apresenta os valores médios para as propriedades elásticas do material. A densidade das placas utilizadas apresentava o valor médio de 1560,0 kg/m<sup>3</sup> e é encontrado no trabalho de Ribeiro *et al.* (2015).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas para as placas de CFRP

| Propriedade           | Valor  | Unidade           | Referência                                  |
|-----------------------|--------|-------------------|---|
| $E_{11}$              | 130,00 | GPa               | Tita <i>et al.</i> (2008) e Ribeiro (2015)  |
| $E_{22} = E_{33}$     | 11,00  | GPa               | Tita <i>et al.</i> (2008) e Ribeiro (2015)  |
| $G_{12} = G_{23}$     | 5,25   | GPa               | Tita <i>et al.</i> (2008) e Ribeiro (2015)  |
| $G_{23}$              | 3,05   | GPa               | Tita <i>et al.</i> (2008) e Ribeiro (2015)  |
| $\nu_{12} = \nu_{23}$ | 0,31   | --                | Tita <i>et al.</i> (2008) e Ribeiro (2015)  |
| Densidade             | 1560,0 | Kg/m <sup>3</sup> | Ribeiro (2015) e Zhao <i>et al.</i> (2001). |

Fonte: Tita *et al.* (2008), Ribeiro (2015) e Zhao *et al.* (2001).

### 3.1.2 Cilindros de fibra de carbono

Os cilindros foram fabricados de compósito polimérico reforçados com fibra de carbono (CFRP) pelo processo de enrolamento filamental (*filament winding*), conforme mostra a Figura 15. Foram utilizadas 21 amostras divididas igualmente em três grupos denominados de A, B e C. Os cilindros do grupo A, B e C apresentam respectivamente uma sequência de empilhamento [90/60/-60/90/60/-60/90]<sub>s</sub>, [90/30/-30/90/30/-30/90]<sub>s</sub> e [90/30/-60/60/-60/30/-30]<sub>s</sub> e possuem comprimento nominal de 145mm, diâmetro de 162mm e espessura de 3,49mm, 3,25mm e 3,54mm, respectivamente.

Figura 15 – Amostras de cilindros de compósito de fibra de carbono



Fonte: De Medeiros (2016).

A nomenclatura adotada para os cilindros de carbono, assim como a sequência de empilhamento e as dimensões geométricas, para cada amostra podem ser encontradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades geométricas dos cilindros de fibra de carbono

| Placa   | Comprimento<br>[mm] | Diâmetro<br>[mm] | Espessura<br>[mm] | Sequência de<br>empilhamento           |
|---------|---------------------|------------------|-------------------|--|
| C01 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C02 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C03 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C04 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C05 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C06 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C07 – A | 145.00              | 163.70           | 3.49              | [90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub>  |
| C08 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C09 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C10 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C11 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C12 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C13 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C14 – B | 145.00              | 163.70           | 3.25              | [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub>  |
| C15 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C16 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C17 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C18 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C19 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C20 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |
| C21 – C | 145.00              | 163.70           | 3.54              | [90/30/-60/60/-60/30/-30] <sub>s</sub> |

Fonte: De Medeiros (2016).

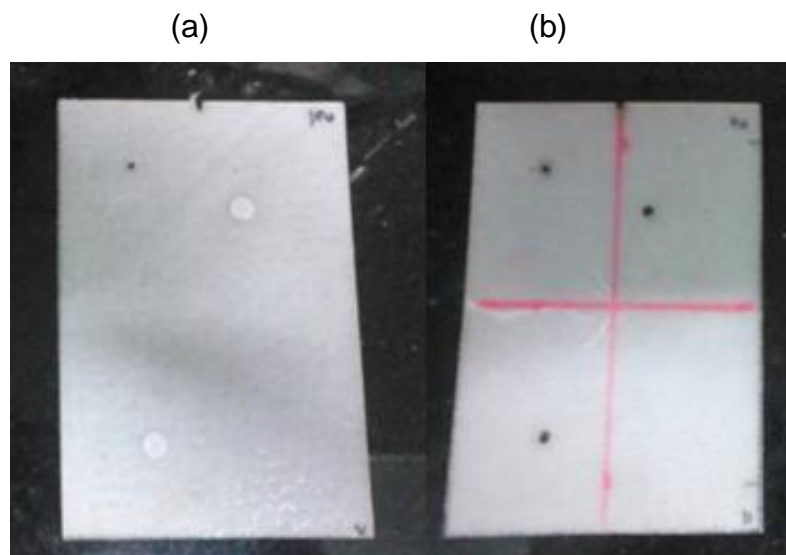
Devido ao material utilizado na fabricação dos cilindros ser o mesmo das placas de fibra de carbono, foram adotados os mesmos valores das propriedades mecânicas das placas de CFRP (conforme Tabela 3).

### 3.1.3 Placas de fibra de vidro

Foram utilizadas 10 placas de compósito polimérico reforçados com fibra de vidro (GFRP). As placas de fibra vidro foram produzidas pelo processo de VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) modificado e apresentam 16 camadas com sequência de empilhamento sendo [45/-45/0/90/45/-45/0/90]<sub>s</sub>. As cinco primeiras amostras são fabricadas de um tecido unidirecional (UD) de 140g/m<sup>2</sup> e as cinco restantes de um tecido bidirecional (BD) de 83g/m<sup>2</sup>. Ambas as fibras são fornecidas pela fabricante Texiglass e podem ser encontradas com as nomenclaturas [WRU-140] e [WR-83]. A matriz polimérica foi a resina epóxi [1564 BR (85% m/m)] e o

endurecedor [REN HY 150 BR (15% m/m)]. A Figura 16(a) apresenta uma amostra de compósito GFRP unidirecional e a Figura 16(b) uma amostra de compósito GFRP bidirecional.

Figura 16 – Amostra de placa de compósito de fibra de vidro



Fonte: Adaptado de De Medeiros (2016).

As placas de fibra de vidro apresentam comprimento nominal de 150mm e largura de 100mm. A espessura é 1,7mm para as amostras unidirecionais e 1,6mm para as bidirecionais, conforme apresentado na Tabela 5. A Sequência de empilhamento e a nomenclatura abordada também podem ser observadas.

Tabela 5 – Propriedades geométricas para as placas de fibra de vidro

| Placa    | Comprimento<br>[mm] | Largura<br>[mm] | Espessura<br>[mm] | Sequência de<br>empilhamento           |
|----------|---------------------|-----------------|-------------------|--|
| P01 – UD | 155,0               | 105,5           | 1,7               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P02 – UD | 151,0               | 100,0           | 1,7               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P03 – UD | 152,0               | 99,0            | 1,7               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P04 – UD | 152,0               | 103,5           | 1,7               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P05 – UD | 153,0               | 101,0           | 1,7               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P06 – BD | 150,0               | 101,6           | 1,6               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P07 – BD | 149,0               | 101,9           | 1,6               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P08 – BD | 149,0               | 98,8            | 1,6               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P09 – BD | 149,0               | 99,0            | 1,6               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |
| P10 – BD | 150,0               | 101,5           | 1,6               | [45/-45/0/90/45/-45/0/90] <sub>s</sub> |

Fonte: De Medeiros (2016).

O módulo de elasticidade longitudinal ( $E_{11}$ ), o módulo de elasticidade transversal ( $E_{22}$ ), o módulo de cisalhamento no plano 1-2 ( $G_{12}$ ) e o coeficiente de



Poisson ( $\nu_{12}$ ), adotados para as placas de fibra de vidro unidirecional foram estudadas em Costa *et al.* (2020). Utilizou-se o mesmo processo de fabricação para as placas adotado por De Medeiros (2016), com as mesmas especificações para a resina e a fibra de vidro. Além dessas propriedades, foi considerado o módulo de cisalhamento no plano 2-3 ( $G_{23}$ ). Silva (2014) apresentou valores semelhantes para as propriedades encontradas em Costa *et al.* (2020) e contempla o valor de  $G_{23}$ , porém utiliza a fibra de vidro de outro fabricante. Em vista disso, foram utilizadas as propriedades mecânicas de Costa *et al.* (2020) e o módulo de cisalhamento  $G_{23}$  de Silva (2014). A Tabela 6 apresenta essas propriedades obtidas pelos autores com o desvio padrão.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas para as placas de GFRP unidirecional

| Propriedade         | Valor   | Desvio padrão | Unidade           | Referência                 |
|---------------------|---------|---------------|-------------------|----------------------------|
| $E_{11}$            | 38,60   | 0,76          | GPa               | Costa <i>et al.</i> (2020) |
| $E_{22} = E_{33}$   | 13,61   | 0,94          | GPa               | Costa <i>et al.</i> (2020) |
| $G_{12} = G_{23}$   | 7,14    | 0,24          | GPa               | Costa <i>et al.</i> (2020) |
| $G_{23}$            | 2,30    | 0,24          | GPa               | Silva (2014)               |
| $\nu_{12}=\nu_{23}$ | 0,353   | 0,025         | --                | Costa <i>et al.</i> (2020) |
| Densidade           | 1616,40 | 116,24        | Kg/m <sup>3</sup> | Costa <i>et al.</i> (2020) |

Fonte: Costa *et al.* (2020) e Silva (2014).

Para as placas de fibra de vidro bidirecionais foram utilizados os dados presentes no trabalho de Balcioglu *et al.* (2018), visto que não foram encontradas informações de propriedades mecânicas de compósitos fabricados com a fibra de vidro bidirecional da Texiglass. O autor utiliza uma fibra de vidro bidirecional com uma matriz de epóxi através do processo de fabricação pelo método *hand lay-up*. Vale ressaltar que essa consideração pode acarretar pequenas variações nos valores das propriedades em relação ao método utilizado por De Medeiros (2016). A Tabela 7 apresenta os valores das propriedades obtidas com os valores de desvio padrão.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas para as placas de GFRP bidirecional

| Propriedade         | Valor   | Desvio padrão | Unidade           | Referência                     |
|---------------------|---------|---------------|-------------------|--------------------------------|
| $E_{11}$            | 32,64   | 0,58          | GPa               | Balcioglu <i>et al.</i> (2018) |
| $E_{22} = E_{33}$   | 30,32   | 0,78          | GPa               | Balcioglu <i>et al.</i> (2018) |
| $G_{12} = G_{23}$   | 2,85    | 0,24          | GPa               | Balcioglu <i>et al.</i> (2018) |
| $G_{23}$            | 1,42    | 0,24          | GPa               | Balcioglu <i>et al.</i> (2018) |
| $\nu_{12}=\nu_{23}$ | 0,320   | 0,025         | --                | Balcioglu <i>et al.</i> (2018) |
| Densidade           | 1555,61 | 47,99         | Kg/m <sup>3</sup> | Costa <i>et al.</i> (2020)     |

Fonte: Balcioglu *et al.* (2018).

### 3.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Realizou-se uma análise das variáveis de projeto para obter os valores máximos e mínimos. Foi utilizado 3 desvios padrão ( $3\sigma$ ) para determinar os valores limites de cada propriedade geométrica, garantindo que 99,7% dos valores obtidos para as amostras estivessem dentro do intervalo estabelecido. A Tabela 8 apresenta os valores limites adotados para as placas de CFRP.

Tabela 8 – Análise geométrica para as placas de CFRP

| Placa | Parâmetro     | Comprimento<br>[mm] | Largura<br>[mm] | Espessura<br>[mm] | C <sub>1</sub><br>[mm] | C <sub>2</sub><br>[mm] |
|-------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| P-A   | Média         | 305,00              | 245,34          | 2,176             | 3,923                  | 4,324                  |
|       | Desvio padrão | 0,50                | 0,54            | 0,018             | 0,251                  | 0,598                  |
|       | Máximo        | 306,50              | 246,96          | 2,231             | 4,667                  | 6,120                  |
|       | Mínimo        | 303,50              | 243,71          | 2,120             | 3,168                  | 2,527                  |
|       | Intervalo     | 3,00                | 3,25            | 0,110             | 1,508                  | 3,592                  |
| P-B   | Média         | 305,67              | 245,21          | 3,341             | -                      | -                      |
|       | Desvio padrão | 0,93                | 1,28            | 0,066             | -                      | -                      |
|       | Máximo        | 308,48              | 249,06          | 3,538             | -                      | -                      |
|       | Mínimo        | 302,85              | 241,36          | 3,144             | -                      | -                      |
|       | Intervalo     | 5,63                | 7,70            | 0,394             | -                      | -                      |

Fonte: Souza (2018).

A Tabela 9 mostra os valores limites para os 3 tipos de cilindro adotados nos experimentos. As dimensões de comprimento e largura são iguais para ambos os cilindros, variando somente a espessura com um desvio padrão igual para os três casos.

Tabela 9 – Análise geométrica para os cilindros de fibra de carbono

| Placa | Parâmetro     | Comprimento<br>[mm] | Largura<br>[mm] | Espessura<br>[mm] |
|-------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| C-A   | Média         | 145,00              | 163,70          | 3,49              |
|       | Desvio padrão | 0,50                | 0,07            | 0,07              |
|       | Máximo        | 146,50              | 163,91          | 3,70              |
|       | Mínimo        | 143,50              | 163,49          | 3,28              |
|       | Intervalo     | 3,00                | 0,42            | 0,42              |
| C-B   | Média         | 145,00              | 163,70          | 3,25              |
|       | Desvio padrão | 0,50                | 0,07            | 0,07              |
|       | Máximo        | 146,50              | 163,91          | 3,46              |
|       | Mínimo        | 143,50              | 163,49          | 3,04              |
|       | Intervalo     | 3,00                | 0,42            | 0,42              |
| C-C   | Média         | 145,00              | 163,70          | 3,54              |
|       | Desvio padrão | 0,50                | 0,07            | 0,07              |
|       | Máximo        | 146,50              | 163,91          | 3,75              |
|       | Mínimo        | 143,50              | 163,49          | 3,33              |
|       | Intervalo     | 3,00                | 0,42            | 0,42              |

Fonte: Menezes *et al.* (2021).

Os dados geométricos de valor médio e desvio padrão referente aos cilindros de fibra de carbono foram retirados de Menezes *et al.* (2021). Foram utilizados três desvios padrão ( $3\sigma$ ) para determinar os valores máximos e mínimos de cada propriedade analisada, mantendo um intervalo de 99,7% para as amostras do cilindro de CFRP.

Para a análise das placas GFRP, foram coletados os dados de comprimento, largura e espessura das amostras presentes na Tabela 5, no trabalho de De Medeiros (2016). Utilizaram-se 5 amostras para cada tipo de placa (unidirecional – UD e bidirecional – BD) e calcularam-se os valores médios e de desvio padrão populacional para essas amostras. Utilizou-se o mesmo critério de três desvios padrão ( $3\sigma$ ) abordado nas placas e cilindros de fibra de carbono para determinar os valores máximos e mínimos, mantendo um padrão para todas as amostras em relação às propriedades geométricas. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos através de cálculos estatísticos para média e desvio padrão, assim como os valores máximos e mínimos para cada propriedade para as placas de GFRP.

Tabela 10 – Análise geométrica para as placas de fibra de vidro

| Placa       | Parâmetro     | Comprimento<br>[mm] | Largura<br>[mm] | Espessura<br>[mm] |
|-------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| <b>P-UD</b> | Média         | 152,60              | 101,20          | 1,70              |
|             | Desvio padrão | 1,36                | 1,63            | 0,33              |
|             | Máximo        | 156,68              | 106,90          | 1,80              |
|             | Mínimo        | 148,54              | 96,31           | 1,60              |
|             | Intervalo     | 8,16                | 9,78            | 0,20              |
| <b>P-BD</b> | Média         | 149,40              | 100,56          | 1,60              |
|             | Desvio padrão | 0,49                | 1,36            | 0,33              |
|             | Máximo        | 150,87              | 104,64          | 1,70              |
|             | Mínimo        | 147,93              | 96,48           | 1,50              |
|             | Intervalo     | 1,47                | 2,72            | 0,20              |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A análise das propriedades mecânicas dos compósitos foi realizada com base nos valores médios e nos desvios apresentados na Tabela 3 (fibra de carbono), Tabela 6 (fibra de vidro unidirecional) e Tabela 7 (fibra de vidro bidirecional), além dos valores de densidade obtidos por Ribeiro (2015) e Zhao *et al.* (2001) para ambos os materiais. Assim como no trabalho de Menezes (2020), foi utilizado um desvio padrão ( $1\sigma$ ) para determinar os valores máximos e mínimos dessas propriedades mecânicas, o que representa que 68,3% dos valores obtidos para as amostras se encontram dentro do intervalo estabelecido. Essa padronização foi mantida para que os resultados obtidos

no presente trabalho fossem comparados com a literatura de Menezes (2020). A Tabela 11 apresenta o valor médio, o desvio padrão, os limites e o intervalo das propriedades mecânicas dos compósitos para cada tipo de material abordado no trabalho.

Tabela 11 – Análise das propriedades mecânicas dos compósitos

| Material                            | Parâmetro     | E <sub>11</sub><br>[GPa] | E <sub>22</sub><br>[GPa] | G <sub>12</sub><br>[GPa] | G <sub>23</sub><br>[GPa] | $\nu_{12}$<br>[GPa] | Densidade<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] |
|-------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| <b>Fibra de carbono/<br/>Epóxi</b>  | Média         | 130,00                   | 11,00                    | 5,25                     | 3,05                     | 0,310               | 1560,00                           |
|                                     | Desvio padrão | 1,77                     | 0,46                     | 0,20                     | 0,12                     | 0,003               | 60,84                             |
|                                     | Máximo        | 131,77                   | 11,46                    | 5,45                     | 3,17                     | 0,313               | 1620,84                           |
|                                     | Mínimo        | 128,23                   | 10,54                    | 5,05                     | 2,93                     | 0,307               | 1499,16                           |
|                                     | Intervalo     | 3,54                     | 0,92                     | 0,40                     | 0,24                     | 0,006               | 121,68                            |
| <b>Fibra de vidro UD/<br/>Epóxi</b> | Média         | 38,60                    | 13,61                    | 7,14                     | 2,30                     | 0,353               | 1616,40                           |
|                                     | Desvio padrão | 0,76                     | 0,94                     | 0,24                     | 0,24                     | 0,025               | 116,24                            |
|                                     | Máximo        | 39,36                    | 14,55                    | 7,38                     | 2,54                     | 0,378               | 1732,64                           |
|                                     | Mínimo        | 37,84                    | 12,67                    | 6,90                     | 2,06                     | 0,327               | 1500,16                           |
|                                     | Intervalo     | 1,52                     | 1,88                     | 0,48                     | 0,48                     | 0,050               | 232,48                            |
| <b>Fibra de vidro BD/<br/>Epóxi</b> | Média         | 32,64                    | 30,32                    | 2,85                     | 1,42                     | 0,320               | 1555,61                           |
|                                     | Desvio padrão | 0,58                     | 0,78                     | 0,24                     | 0,24                     | 0,025               | 47,98                             |
|                                     | Máximo        | 32,06                    | 31,10                    | 3,09                     | 1,66                     | 0,345               | 1603,60                           |
|                                     | Mínimo        | 29,55                    | 29,54                    | 2,61                     | 1,18                     | 0,295               | 1507,63                           |
|                                     | Intervalo     | 1,16                     | 1,56                     | 0,48                     | 0,48                     | 0,050               | 95,96                             |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Além das propriedades materiais e das dimensões das amostras, também foi considerada a variação do ângulo das fibras no processo de fabricação. Para isso, foi considerado o processo de fabricação de cada amostra. O valor utilizado como desvio padrão para cada processo, foi obtido com base em trabalhos encontrados na literatura.

Ao fabricar amostras de compósitos pelo processo de enrolamento filamentar, Quanjin *et al.* (2018) verificaram que esse método de fabricação apresenta resultados semelhantes ao processo de simulação resultando em uma precisão do ângulo de enrolamento moderado-alto. Para suas simulações o erro do processo foi de 1 a 2%. Portanto, considerou-se que as amostras produzidas de material compósito para esse trabalho apresentavam uma pequena variação em suas angulações, tendo como média o valor nominal do ângulo e um desvio padrão de 0,33.

Sutcliffe *et al.* (2012) avaliou a orientação da fibra para o processo de moldagem por transferência de resina (RTM do inglês: *resin transfer molding*) através de seções polidas de dois componentes CFRP e obteve um desvio padrão de 0,6° para a orientação no plano do componente pré-impregnado. Assim como para o

processo anterior, foram considerados três desvios padrão ( $3\sigma$ ) para determinar os valores máximos e mínimos de cada ângulo.

A Tabela 12 apresenta os intervalos para cada ângulo de cada amostra com base no desvio padrão apresentado por Quanjin *et al.* (2018) e Sutcliffe *et al.* (2012).

Tabela 12 – Análise do ângulo de variação das fibras

| Amostra   | Parâmetro     | Orientação da fibra |      |      |      |      |      |       |      |       |      |
|-----------|---------------|---------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
|           |               | 0°                  | 15°  | -15° | 30°  | -30° | 45°  | -45°  | 60°  | -60°  | 90°  |
| P-A       | Média         | 0                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Desvio padrão | 0,33                | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Máximo        | 1                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Mínimo        | -1                  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Intervalo     | 2                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
| P-B       | Média         | 0                   | 15   | -15  | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Desvio padrão | 0,33                | 0,33 | 0,33 | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Máximo        | 1                   | 16   | -14  | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Mínimo        | -1                  | 14   | -16  | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
|           | Intervalo     | 2                   | 2    | 2    | -    | -    | -    | -     | -    | -     | -    |
| C-A       | Média         | -                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | 60   | -60   | 90   |
|           | Desvio padrão | -                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | 0,33 | 0,33  | 0,33 |
|           | Máximo        | -                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | 61   | -59   | 91   |
|           | Mínimo        | -                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | 59   | -61   | 89   |
|           | Intervalo     | -                   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | 2    | 2     | 2    |
| C-B       | Média         | -                   | -    | -    | 30   | -30  | -    | -     | -    | -     | 90   |
|           | Desvio padrão | -                   | -    | -    | 0,33 | 0,33 | -    | -     | -    | -     | 0,33 |
|           | Máximo        | -                   | -    | -    | 31   | -29  | -    | -     | -    | -     | 91   |
|           | Mínimo        | -                   | -    | -    | 29   | -31  | -    | -     | -    | -     | 89   |
|           | Intervalo     | -                   | -    | -    | 2    | 2    | -    | -     | -    | -     | 2    |
| C-C       | Média         | -                   | -    | -    | 30   | -30  | -    | -     | 60   | -60   | 90   |
|           | Desvio padrão | -                   | -    | -    | 0,33 | 0,33 | -    | -     | 0,33 | 0,33  | 0,33 |
|           | Máximo        | -                   | -    | -    | 31   | -29  | -    | -     | 61   | -59   | 91   |
|           | Mínimo        | -                   | -    | -    | 29   | -31  | -    | -     | 59   | -61   | 89   |
|           | Intervalo     | -                   | -    | -    | 2    | 2    | -    | -     | 2    | 2     | 2    |
| P-UD      | Média         | 0                   | -    | -    | -    | -    | 45   | -45   | 60   | -60   | 90   |
|           | Desvio padrão | 0,6                 | -    | -    | -    | -    | 0,6  | 0,6   | 0,6  | 0,6   | 0,6  |
| e<br>P-BD | Máximo        | 1,8                 | -    | -    | -    | -    | 46,8 | -43,2 | 61,8 | -58,2 | 91,8 |
|           | Mínimo        | -1,8                | -    | -    | -    | -    | 43,2 | -46,8 | 58,2 | -61,8 | 88,2 |
|           | Intervalo     | 3,6                 | -    | -    | -    | -    | 3,6  | 3,6   | 3,6  | 3,6   | 3,6  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, todas as variáveis foram agrupadas em uma única tabela para fornecer os limites dos dados de entrada do hipercubo latino. A Tabela 13 sintetiza as amostras utilizadas com a quantidade e a descrição das variáveis consideradas.

Tabela 13 – Variáveis consideradas para cada tipo de amostra

| <b>Amostra</b> | <b>N° variáveis</b> | <b>Variáveis consideradas</b>  |
|----------------|---------------------|--|
| <b>P-A</b>     | 12                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 0, Curvatura 1, Curvatura 2, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                                 |
| <b>P-B</b>     | 12                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 0, ângulo 15, ângulo -15, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                                    |
| <b>C-A</b>     | 12                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 30, ângulo -30, ângulo 90, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                                   |
| <b>C-B</b>     | 12                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 60, ângulo -60, ângulo 90, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                                   |
| <b>C-C</b>     | 15                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 30, ângulo -30, ângulo 60, ângulo -60, ângulo 90, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{13}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade. |
| <b>P-UD</b>    | 13                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 0, ângulo 90, ângulo 45, ângulo -45, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                         |
| <b>P-BD</b>    | 13                  | Comprimento, largura, espessura, ângulo 0, ângulo 90, ângulo 45, ângulo -45, $E_{11}$ , $E_{22}$ , $G_{12}$ , $G_{23}$ , $\nu_{12}$ e densidade.                         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

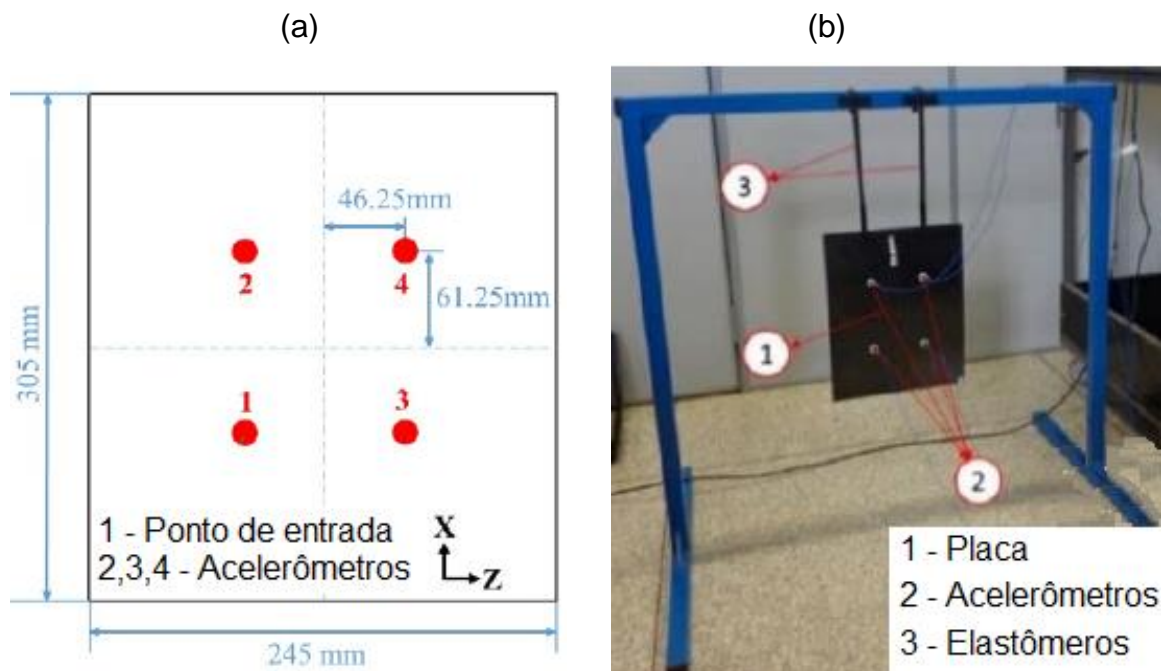
### 3.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

As análises experimentais foram realizadas através ensaios de vibração utilizando cabos elastoméricos para simular a condição de contorno livre-livre e, assim determinar as frequências naturais e as FRFs das estruturas. Essas frequências foram obtidas previamente por uma análise experimental. Analisaram-se 6 modos para as placas de CFRP e GFRP e 4 modos para os cilindros de CFRP. Para as placas CFRP foram utilizados quatro pontos de saída, onde foram posicionados sensores, e um ponto de entrada através do impulso realizado pelo martelo de impacto. O ponto de entrada estava localizado na posição 1 na parte oposta aos sensores. Os acelerômetros utilizados foram do modelo 352A24 de estrutura leve com sensibilidade de 102.34mV/g, 104,59 mV/g, 99,95 mV/g e 104.35mV/g posicionados em 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A excitação para os conjuntos de testes de vibração foi aplicada usando um sinal tipo impulso através de um martelo de impacto PCB modelo 0860C3 (Piezotronics).

O impulso realizado com o martelo permitiu gerar um amplo espectro de frequência. Obteve-se um sinal com 2048 pontos para um intervalo de amostragem de 0 a 512Hz, resultando em um tempo de aquisição de 4s. Os resultados obtidos foram coletados e processados através do software Test.Lab (LMS Test.Lab). A Figura 17(a) apresenta o desenho esquemático contendo o posicionamento dos sensores e o ponto de entrada, referente ao martelo de impacto. Na Figura 17(b) é

possível observar o layout utilizado no momento do experimento, com a utilização de fios elastoméricos para simular a condição livre-livre.

Figura 17 – Placa de compósito CFRP (a) esquemático com posicionamento dos sensores, (b) Setup experimental

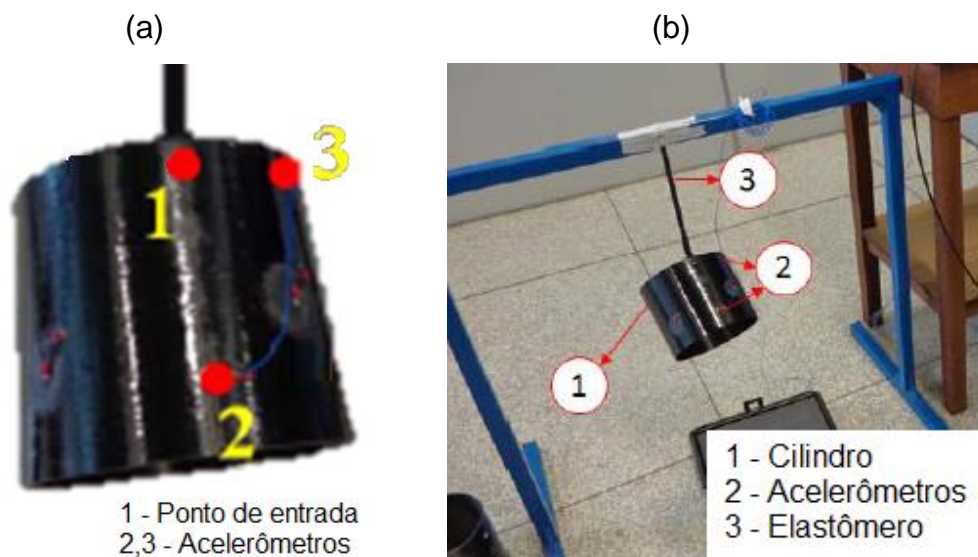


Fonte: De Medeiros (2016).

Para os cilindros de CFRP utilizaram-se dois pontos de saída (2 e 3), onde posicionaram-se dois acelerômetros. Utilizou-se um ponto de entrada (1), para fornecer o sinal de entrada através de um martelo de impacto, o qual estava localizado na posição 1. Foram utilizados os acelerômetros do modelo 352C22 de estrutura leve com sensibilidade de 9,57 mV/g para o ponto 1 e do modelo 352A24 de estrutura leve com sensibilidade de 99,6 mV/g para o ponto 2. O martelo de impacto utilizado no ponto 1 foi o PCB do modelo 0860C3.

Obteve-se um sinal com 3000 pontos, em um intervalo de amostragem de 0 a 1500Hz, resultando em um ponto a cada 0,50Hz. Os resultados obtidos foram coletados e processados através do software Test.Lab (LMS Test.Lab). A Figura 18(a) mostra um desenho esquemático contendo o posicionamento dos acelerômetros nos pontos 2 e 3 e o ponto de entrada 1, referente ao martelo de impacto. Na Figura 18(b) é possível observar o layout utilizado no momento do experimento, com o uso de fios elastoméricos para simular a condição livre-livre.

Figura 18 – Cilindro de compósito de fibra de carbono (a) Posicionamento dos acelerômetros, (b) Layout experimental para o cilindro de carbono



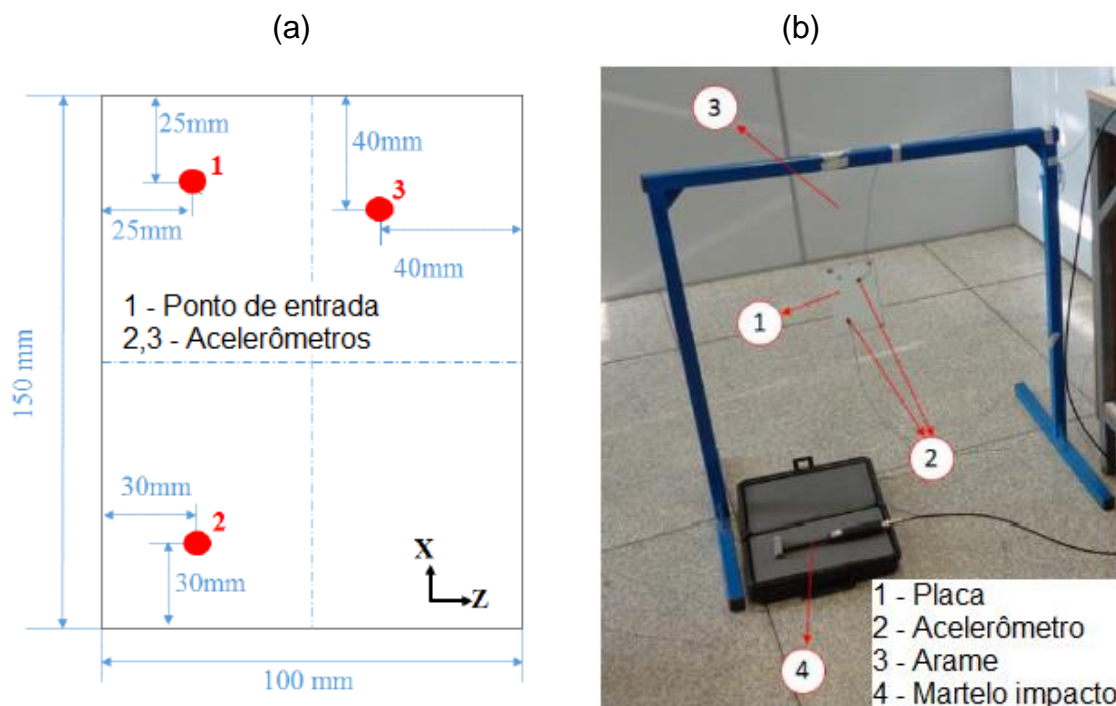
Fonte: De Medeiros (2016).

Para as placas de GFRP foram utilizados dois pontos de saída, onde foram posicionados dois acelerômetros localizados nas posições 2 e 3. Também foi utilizado um ponto de entrada, para fornecer o sinal de entrada através de um martelo de impacto, o qual estava localizado na posição 1. Os acelerômetros utilizados foram do modelo 352C22 de estrutura leve com sensibilidade de 9,57 mV/g e do modelo 352A24 de estrutura leve com sensibilidade de 99,6 mV/g, posicionados nos pontos 3 e 2 respectivamente. O martelo de impacto utilizado no ponto 1 foi o PCB do modelo 0860C3. Assim como nos ensaios anteriores, as posições dos acelerômetros foram determinadas com base em análises modais previas, considerando as cinco primeiras formas modais.

Para esse estudo, foi obtido um sinal com 2048 pontos com um intervalo de amostragem e 0 a 1024Hz, resultando em um ponto a cada 0,50Hz. Os resultados obtidos foram coletados e processados através do software Test.Lab (LMS Test.Lab). A Figura 19(a) mostra um esquemático contendo o posicionamento dos acelerômetros nos pontos 2 e 3 e o ponto de entrada 1, referente ao martelo de impacto. Na Figura 19(b) é possível observar o layout utilizado no momento do experimento, com o uso de fios elastoméricos para simular a condição livre-livre para as placas de GFRP.



Figura 19 – Placa de compósito de fibra de vidro (a) Posicionamento dos acelerômetros, (b) Layout experimental para a placa de vidro



Fonte: De Medeiros (2016).

### 3.4 HIPERCUBO LATINO

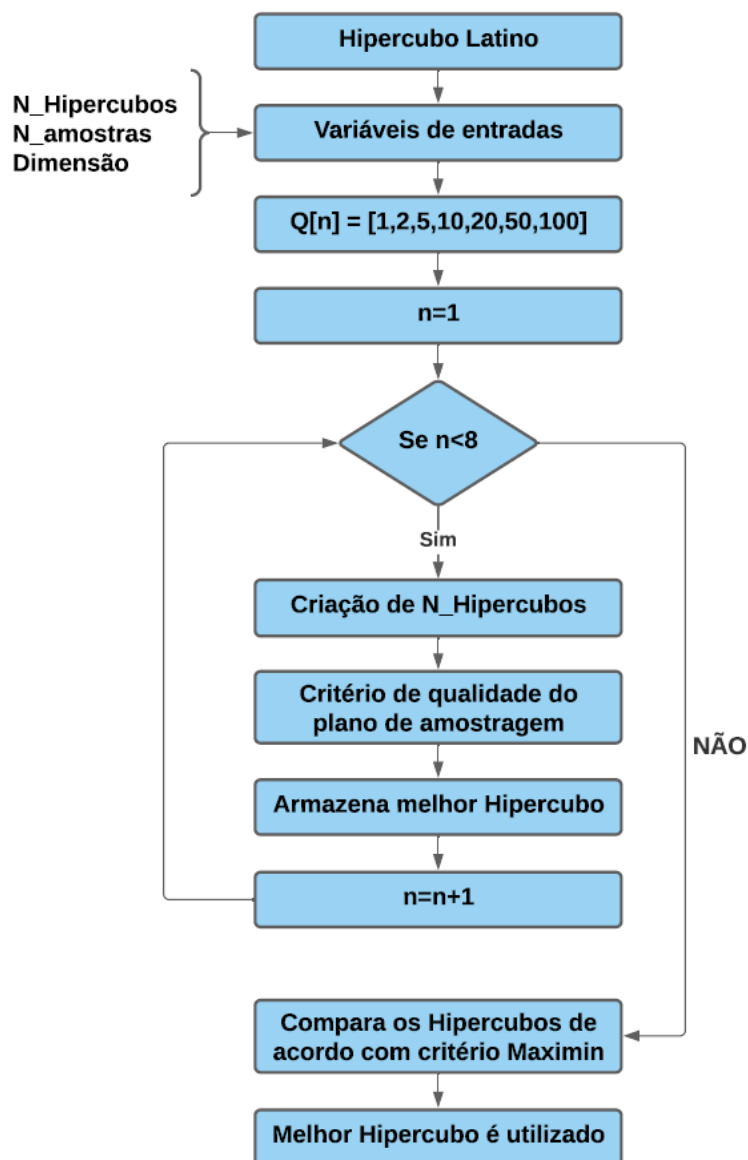
Para realizar um planejamento cuidadoso com os dados de entrada do metamodelo Kriging utilizou-se uma técnica de projeto de experimentos. A técnica utilizada foi a do Hipercubo Latino. Com isso, elaborou-se uma rotina em Python, a qual era responsável por gerar uma matriz com  $m$  linhas e  $n$  colunas. Cada linha  $m$  gerada pelo Hipercubo representava um ensaio para uma determinada estrutura e cada coluna  $n$  representava uma variável de projeto.

Definiram-se 10 amostras iniciais ( $N_{amostras}$ ), fixando o número de linha  $m$  igual a 10 para os experimentos realizados com as placas e os cilindros. Esse número de amostras foi mantido em virtude da continuação do trabalho de Menezes (2020), a fim de comparar os resultados obtidos. Consideraram-se 12 variáveis distintas (Dimensão) para os ensaios das placas de fibra de carbono e os cilindros A e B, definindo assim  $n=12$ . Assim a matriz gerada pelo Hipercubo Latino resultou em uma matriz  $10 \times 12$ . Para o cilindro C, o número de variáveis foi fixado em 15, resultando

em uma matriz 10×15 e as placas de polímero reforçadas com fibra de vidro foram adotadas 13 variáveis, resultando em matrizes 10×13.

Com o objetivo de maximizar o Hipercubo Latino, ou seja, garantir um melhor preenchimento amostral, adotou-se uma metodologia com o uso de métricas para melhorar o desempenho. Essa metodologia segue o fluxograma apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Metodologia adotada para o Hipercubo Latino

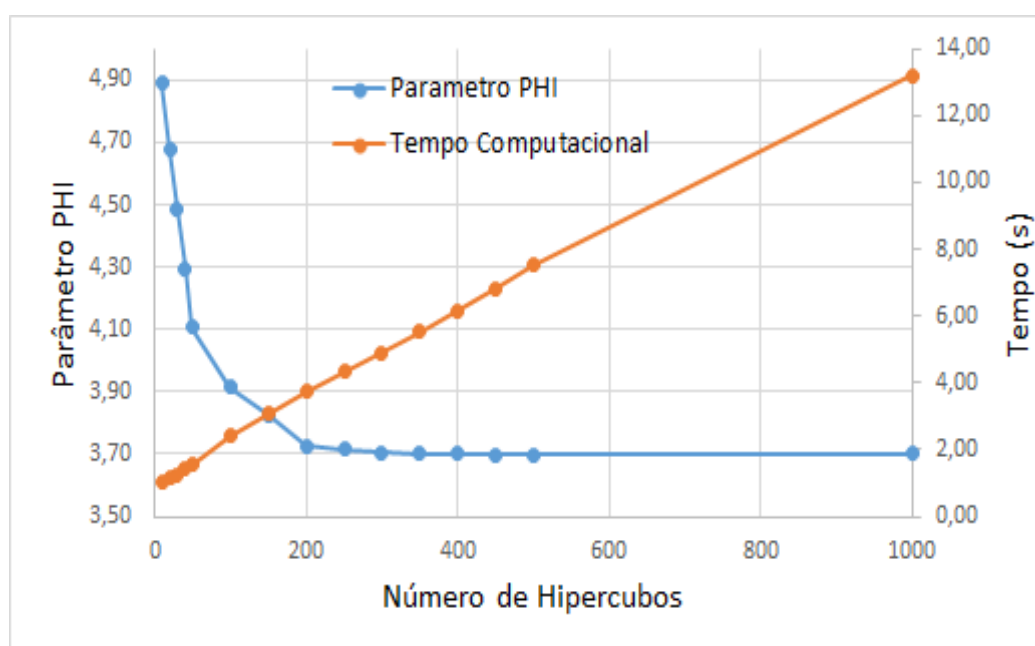


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A primeira etapa foi definir no hipercubo o número de amostras iniciais desejadas (fixado em 10 para todos os ensaios), a dimensão do problema (número de variáveis adotadas de acordo com cada tipo de amostra) e o número de hipercubos desejados que seriam gerados de maneira aleatória. Esse número de hipercubos foi fixado em 500 após realizar uma análise de convergência.

A Figura 21 apresenta o teste realizado para definir o número de hipercubos iniciais. Para essa análise, o número de amostras foi fixado em 10, devido a ser o valor para todos os experimentos e o número de variáveis foi fixado em 15, devido a ser o número máximo de dimensões do problema.

Figura 21 – Convergência do parâmetro  $\Phi$



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foi realizada uma análise do parâmetro  $\Phi$  responsável por classificar os hipercubos segundo o critério de qualidade do plano de amostragem e o tempo computacional necessário para criar esses hipercubos. Quanto menor o valor de  $\phi$  obtido, melhor o preenchimento amostral e quanto menor o tempo computacional, menor o custo computacional.

Analisando os gráficos obtidos verificou-se que com 500 hipercubos não há mais variações significativas para o valor de  $\Phi$ , visto que há uma assíntota horizontal próxima a 3,70, e o tempo computacional necessário apresenta uma parcela pequena

em relação a todo o processo do Kriging. Também foi observado que o tempo computacional se comporta de modo linear ao aumentar o número de hipercubos.

Após definir as variáveis de entrada, um vetor **Q** era gerado com os valores padrões de 1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100. Esses valores de **Q** são utilizados para o cálculo do critério de qualidade do plano de amostragem e foram obtidos em Forrester, Sóbester e Keane (2008). Para cada valor de **Q**, 500 hipercubos aleatórios eram gerados com *n* linhas e *m* colunas. Esses hipercubos eram classificados de acordo com o critério de qualidade do plano de amostragem e o melhor hipercubo era armazenado. Após o processo se repetir por 7 vezes (para todos os valores de **Q**), foi utilizado a métrica *Maximin* para definir o melhor hipercubo entre os 7 armazenados. A métrica *Maximin* é superior ao critério  $\phi$  para encontrar o melhor preenchimento amostral, porém é muito custosa, visto que compara os hipercubos em pares, sendo necessário a utilização do critério de qualidade do plano de amostragem para uma quantia mais elevada de hipercubos.

Assim, ao final do processo, o melhor Hipercubo era armazenado. Esse hipercubo armazenado apresentava valores entre 0 e 1, onde 0 representava o limite inferior para uma determinada variável e 1 representava o limite superior. A Tabela 14 mostra o Hipercubo Latino gerado para a placa de CFRP, através da metodologia apresentada, contendo 10 rodadas e 12 variáveis. É possível observar que há apenas um único valor máximo (1,00) para cada variável e o processo se repete para os demais valores (0,89; 0,78; ...; 0,11; 0,00). Isso significa que para uma determinada variável V1 haverá um valor diferente em todas as rodadas.

Tabela 14 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis

| X                | V1          | V2          | V3          | V4          | V5          | V6          | V7          | V8          | V9          | V10         | V11         | V12         |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Rodada 1</b>  | 0,11        | 0,33        | 0,56        | 0,67        | 0,78        | 0,22        | 0,00        | <b>1,00</b> | 0,56        | 0,11        | 0,33        | 0,00        |
| <b>Rodada 2</b>  | 0,89        | <b>1,00</b> | 0,00        | 0,33        | 0,22        | 0,11        | 0,22        | 0,67        | 0,89        | 0,56        | 0,67        | 0,67        |
| <b>Rodada 3</b>  | 0,33        | 0,11        | 0,11        | 0,56        | 0,56        | 0,67        | 0,33        | 0,11        | 0,11        | 0,44        | 0,78        | 0,44        |
| <b>Rodada 4</b>  | 0,56        | 0,67        | 0,22        | 0,00        | <b>1,00</b> | 0,00        | 0,67        | 0,00        | 0,22        | 0,67        | 0,22        | 0,22        |
| <b>Rodada 5</b>  | <b>1,00</b> | 0,78        | 0,78        | 0,11        | 0,89        | 0,89        | 0,56        | 0,44        | 0,00        | 0,89        | 0,56        | 0,11        |
| <b>Rodada 6</b>  | 0,67        | 0,00        | 0,44        | 0,89        | 0,11        | <b>1,00</b> | 0,78        | 0,22        | <b>1,00</b> | 0,78        | 0,89        | 0,89        |
| <b>Rodada 7</b>  | 0,00        | 0,56        | 0,67        | 0,44        | 0,00        | 0,78        | 0,89        | 0,89        | 0,33        | 0,33        | 0,44        | 0,33        |
| <b>Rodada 8</b>  | 0,78        | 0,44        | 0,89        | <b>1,00</b> | 0,44        | 0,44        | <b>1,00</b> | 0,78        | 0,78        | 0,22        | 0,11        | <b>1,00</b> |
| <b>Rodada 9</b>  | 0,22        | 0,89        | 0,33        | 0,78        | 0,67        | 0,56        | 0,44        | 0,56        | 0,44        | <b>1,00</b> | 0,00        | 0,56        |
| <b>Rodada 10</b> | 0,44        | 0,22        | <b>1,00</b> | 0,22        | 0,33        | 0,33        | 0,11        | 0,33        | 0,67        | 0,00        | <b>1,00</b> | 0,78        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 3.5 MODELO COMPUTACIONAL

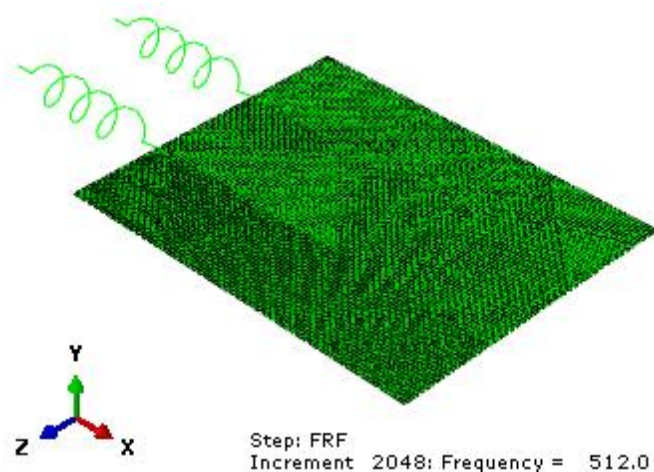
Com os parâmetros de entrada definidos através do Hipercubo Latino, foram criados modelos computacionais com o objetivo de obter as variáveis de saída e assim fornecer os dados necessários para o metamodelo. Para isso, desenvolveram-se rotinas em linguagem *python* para alimentar o *software* comercial Abaqus™ e obter as frequências naturais das estruturas. Para as placas de fibra de carbono e fibra de vidro foram adotadas as 6 primeiras frequências naturais, enquanto para os cilindros de fibra de carbono foram utilizadas as 4 primeiras frequências naturais. Foram desconsideradas as 6 primeiras frequências de corpo rígido.

A rotina também foi utilizada em outros dois momentos posteriores. A rotina desenvolvida foi utilizada durante o metamodelo Kriging para calcular os pontos de preenchimentos. Assim, a cada novo ponto adicionado pelo EGO a rotina era chamada para calcular as frequências para as variáveis de entrada. Além disso, ao final do treino do metamodelo, pequenas alterações foram realizadas no código para possibilitar a adição dos valores dos coeficientes de amortecimento e fornecer as funções de resposta em frequência necessárias para criar os envelopes de FRFs.

#### 3.5.1 Placas de fibra de carbono

Modelaram-se as placas de CFRP com base no trabalho de De Medeiros (2016). O tipo de elemento utilizado foi o S8R5, o qual corresponde a uma casca fina duplamente curvada de 8 nós com integração reduzida e 5 graus de liberdade por nó, sendo 3 translações e 2 rotações. Realizou-se um refino de malha para as variáveis de interesse até atingir uma convergência numérica. Com isso, foram utilizados 8080 elementos quadriláteros com 24603 nós para a criação da malha. A Figura 22 apresenta o modelo para a placa de material compósito com fibra de carbono. Realizou-se o estudo para uma faixa de frequência de 0 a 512Hz com 2048 pontos, resultando em uma resposta a cada 0,25 Hz, seguindo as mesmas condições do ensaio experimental.

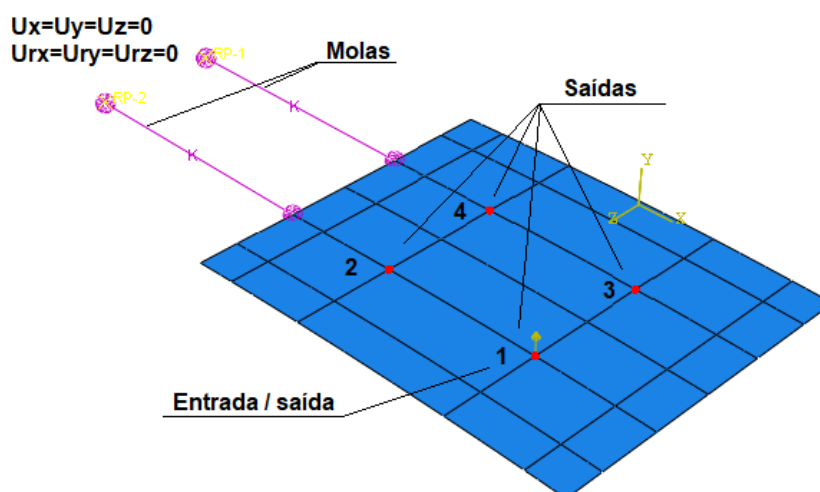
Figura 22 – Modelo de elementos finitos para placa com fibra carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Durante a modelagem, utilizaram-se duas molas paralelas ao eixo x. Essas foram fixadas em movimentos de translação ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ) e rotação ( $U_{rx}$ ,  $U_{ry}$  e  $U_{rz}$ ), conforme mostra a Figura 23. Adicionou-se 4 pontos referentes aos acelerômetros, denominados de saídas. Devido à massa dos acelerômetros ser muito menor em relação à massa da placa, não houve a necessidade de adicionar uma massa no modelo. Realizou-se a simulação da entrada através do martelo de impacto no ponto 1.

Figura 23 – Condições de contorno para placa com fibra carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os amortecimentos utilizados para o ajuste dos picos de frequência no modelo computacional foram extraídos dos dados experimentais em De Medeiros (2016) através das amostras intactas. A Tabela 15 mostra os amortecimentos obtidos para os 6 primeiros modos e o valor médio.

Tabela 15 – Amortecimento para as placas de CFRP

| Condição | Tipo    | $\xi_1$       | $\xi_2$       | $\xi_3$       | $\xi_4$       | $\xi_5$       | $\xi_6$       |
|----------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| P01 – A  | Intacto | 0,0123        | 0,0050        | 0,0064        | 0,0063        | 0,0068        | 0,0056        |
| P02 – A  | Intacto | 0,0130        | 0,0057        | 0,0078        | 0,0058        | 0,0086        | 0,0090        |
| P03 – A  | Intacto | 0,0114        | 0,0062        | 0,0089        | 0,0037        | 0,0050        | 0,0183        |
| P04 – A  | Intacto | 0,0071        | 0,0057        | 0,0076        | 0,0036        | 0,0046        | 0,0075        |
| P05 – A  | Intacto | 0,0076        | 0,0052        | 0,0068        | 0,0086        | 0,0076        | 0,0102        |
| P06 – A  | Intacto | 0,0080        | 0,0053        | 0,0068        | 0,0070        | 0,0064        | 0,0144        |
| P07 – A  | Intacto | 0,0077        | 0,0063        | 0,0061        | 0,0076        | 0,0064        | 0,0120        |
| P08 – A  | Intacto | 0,0077        | 0,0053        | 0,0066        | 0,0083        | 0,0075        | 0,0106        |
| Média    | -       | <b>0,0094</b> | <b>0,0056</b> | <b>0,0071</b> | <b>0,0064</b> | <b>0,0066</b> | <b>0,0110</b> |
| P09 – B  | Intacto | 0,0061        | 0,0058        | 0,0057        | 0,0060        | 0,0110        | 0,0047        |
| P10 – B  | Intacto | 0,0059        | 0,0055        | 0,0054        | 0,0064        | 0,0105        | 0,0042        |
| P11 – B  | Intacto | 0,0061        | 0,0057        | 0,0056        | 0,0067        | 0,0088        | 0,0040        |
| P12 – B  | Intacto | 0,0065        | 0,0057        | 0,0056        | 0,0059        | 0,0085        | 0,0042        |
| P13 – B  | Intacto | 0,0057        | 0,0056        | 0,0055        | 0,0069        | 0,0086        | 0,0040        |
| P14 – B  | Intacto | 0,0065        | 0,0058        | 0,0054        | 0,0053        | 0,0099        | 0,0042        |
| Média    | -       | <b>0,0061</b> | <b>0,0057</b> | <b>0,0055</b> | <b>0,0062</b> | <b>0,0096</b> | <b>0,0042</b> |

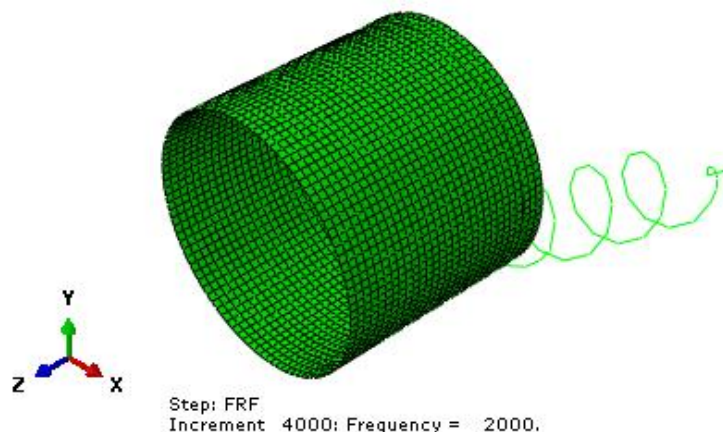
Fonte: De Medeiros (2016).

### 3.5.2 Cilindros de fibra de carbono

Modelaram-se os cilindros de compósito CFRP de acordo com o trabalho de De Medeiros (2016). Utilizou-se o S4R como tipo de elemento para os cilindros, o qual corresponde a uma casca de 4 nós com integração reduzida com controle de ampulheta e tensões de membranas finas e 6 graus de liberdade por nó, conforme especificações fornecidas pelo *software* Abaqus™. Realizou-se um refino de malha para as variáveis de interesse até atingir uma convergência numérica. Com isso, utilizaram-se 3090 elementos quadriláteros com 3193 nós para a criação da malha.

A Figura 24 apresenta o modelo para o cilindro de material compósito com fibra de carbono. A força é aplicada para faixa de frequência de 0 a 2000Hz com 4000 pontos, resultando em uma resposta a cada 0,5 Hz.

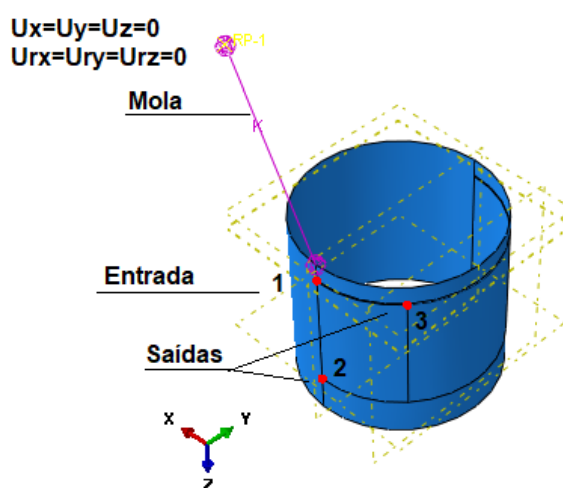
Figura 24 – Modelo de elementos finitos para cilindro com fibra de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o cilindro, foi inserida uma mola na borda de sua superfície superior. Assim como nas placas, fixou-se a mola em movimentos de translação ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ) e rotação ( $U_{rx}$ ,  $U_{ry}$  e  $U_{rz}$ ), conforme mostra a Figura 25. A simulação da entrada através do martelo de impacto, foi realizada através do ponto 1. Posicionou-se uma força transversal de amplitude igual a 1N na superfície lateral do cilindro. Adicionou-se 2 pontos referente aos acelerômetros na superfície lateral do cilindro, denominados de saídas. Desprezou-se a massa dos acelerômetros também para esse caso.

Figura 25 – Condições de contorno para cilindro com fibra de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os amortecimentos utilizados para o ajuste dos picos de frequência no modelo computacional foram extraídos dos dados experimentais em De Medeiros (2016)



através das amostras intactas. A Tabela 16 mostra os amortecimentos obtidos para os 4 primeiros modos e o valor médio.

Tabela 16 – Amortecimento para os cilindros de CFRP

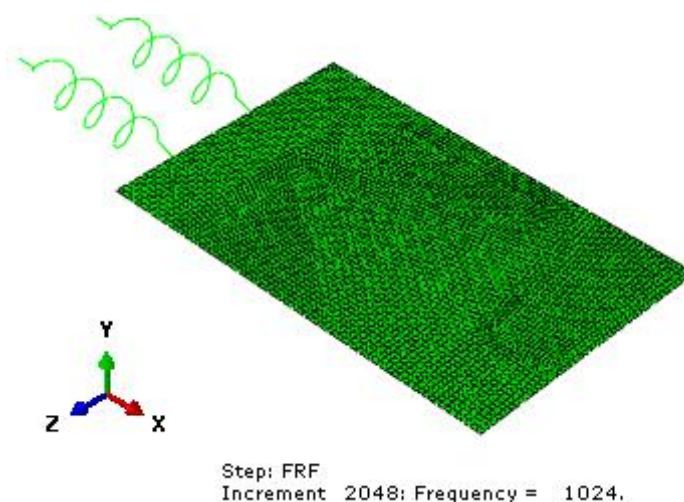
| Condição | Tipo    | $\xi_1$     | $\xi_2$     | $\xi_3$     | $\xi_4$     |
|----------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C01 – A  | Intacto | 0,24        | 0,40        | 0,46        | 0,53        |
| C02 – A  | Intacto | 0,23        | 0,43        | 0,46        | 0,69        |
| C03 – A  | Intacto | 0,21        | 0,41        | 0,40        | 0,63        |
| Média    | -       | <b>0,23</b> | <b>0,41</b> | <b>0,44</b> | <b>0,62</b> |
| C08 – A  | Intacto | 0,24        | 0,41        | 0,37        | 0,68        |
| C09 – A  | Intacto | 0,24        | 0,33        | 0,34        | 0,58        |
| C10 – A  | Intacto | 0,24        | 0,42        | 0,39        | 0,72        |
| Média    | -       | <b>0,24</b> | <b>0,39</b> | <b>0,37</b> | <b>0,66</b> |
| C15 – A  | Intacto | 0,22        | 0,46        | 0,27        | 0,51        |
| C16 – A  | Intacto | 0,24        | 0,34        | 0,32        | 0,52        |
| C17 – A  | Intacto | 0,23        | 0,45        | 0,29        | 0,47        |
| Média    | -       | <b>0,23</b> | <b>0,42</b> | <b>0,29</b> | <b>0,50</b> |

Fonte: De Medeiros (2016).

### 3.5.3 Placas de fibra de vidro

Modelaram-se as placas GFRP com o mesmo tipo de elemento utilizado para as placas de carbono, o S8R5. Realizou-se um refino de malha para as variáveis de interesse até atingir uma convergência numérica. Com isso, utilizou-se 4287 elementos quadriláteros com 12951 nós para a criação da malha. A Figura 26 apresenta o modelo criado para a placa de material compósito com fibra de vidro. Realizou-se o estudo para uma faixa de frequência de 0 a 1024Hz com 2048 pontos, resultando em uma resposta a cada 0,50 Hz.

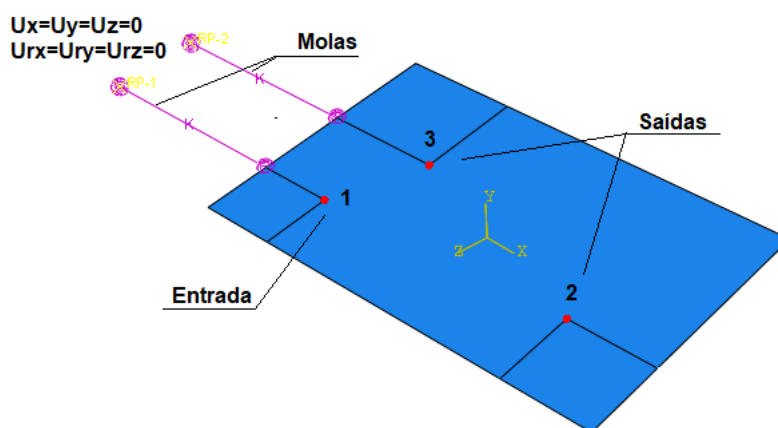
Figura 26 – Modelo de elementos finitos para placa com fibra de vidro



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Assim como na placa de carbono, foram inseridas duas molas paralelas ao eixo x. Essas também foram fixadas em movimentos de translação ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ) e rotação ( $U_{rx}$ ,  $U_{ry}$  e  $U_{rz}$ ), conforme mostra a Figura 27. A força de impulso unitária foi inserida na entrada 1 e os acelerômetros nas saídas 2 e 3.

Figura 27 – Condições de contorno para placa com fibra de vidro



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os amortecimentos utilizados para o ajuste dos picos de frequência no modelo computacional foram extraídos dos dados experimentais em De Medeiros (2016) através das amostras intactas. A Tabela 17 apresenta os amortecimentos obtidos para os 4 primeiros modos e o valor médio.

Tabela 17 – Amortecimento para as placas de GFRP

| Condição | Tipo    | $\xi_1$       | $\xi_2$       | $\xi_3$       | $\xi_4$       | $\xi_5$       | $\xi_6$       |
|----------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| P01 – UD | Intacto | 0,3600        | 0,2100        | 0,2600        | 0,2300        | 0,2500        | 0,2400        |
| P02 – UD | Intacto | 0,4800        | 0,2100        | 0,2400        | 0,2200        | 0,3100        | 0,2300        |
| P03 – UD | Intacto | 0,3200        | 0,2100        | 0,2000        | 0,2400        | 0,3000        | 0,2700        |
| Média    | -       | <b>0,3867</b> | <b>0,2100</b> | <b>0,2333</b> | <b>0,2300</b> | <b>0,2867</b> | <b>0,2467</b> |
| P06 – UD | Intacto | 0,2800        | 0,2400        | 0,2700        | 0,3300        | 0,2300        | 0,2800        |
| P07 – UD | Intacto | 0,4400        | 0,2700        | 0,2800        | 0,3200        | 0,2300        | 0,4400        |
| P08 – UD | Intacto | 0,3600        | 0,2500        | 0,2500        | 0,3900        | 0,2500        | 0,3600        |
| Média    | -       | <b>0,3600</b> | <b>0,2533</b> | <b>0,2667</b> | <b>0,3467</b> | <b>0,2367</b> | <b>0,3600</b> |

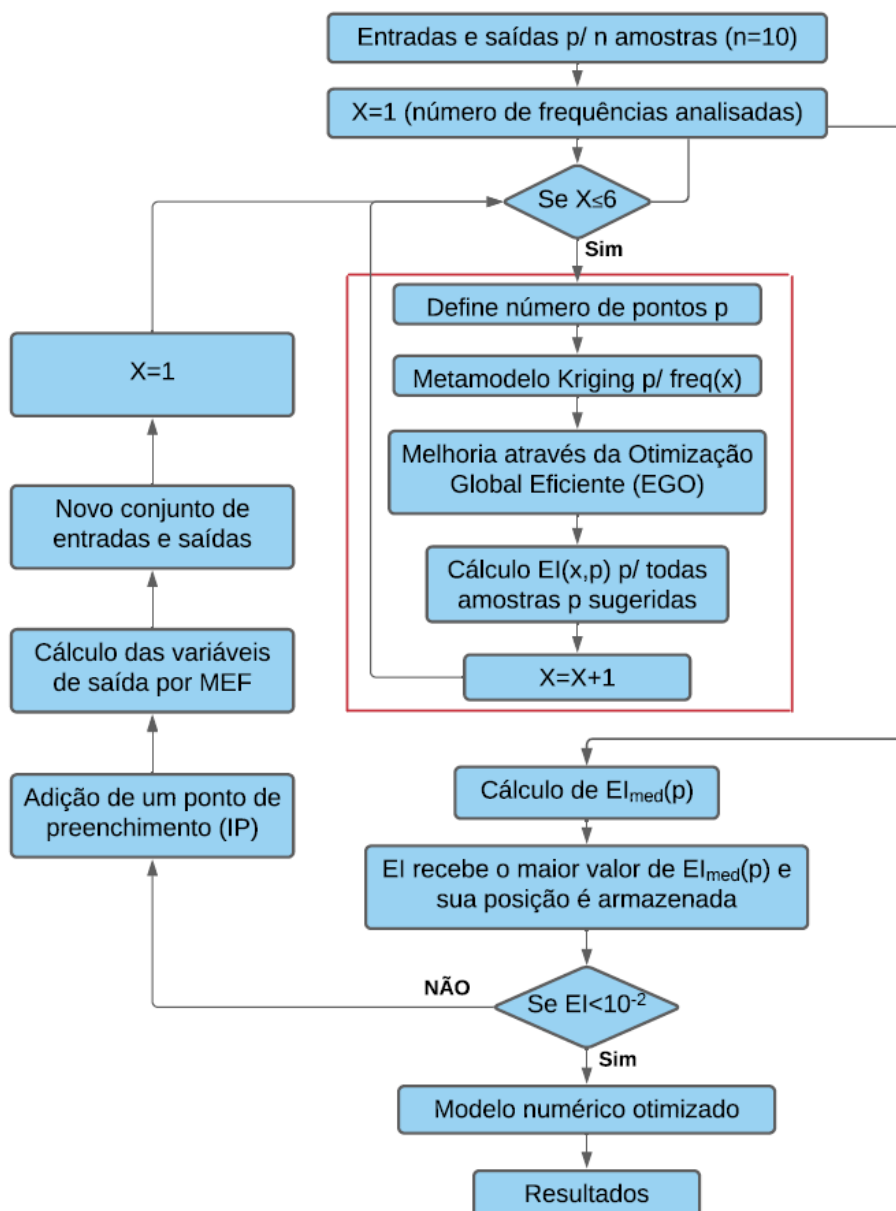
Fonte: De Medeiros (2016).

### 3.6 METAMODELO KRIGING E MELHORIA EGO

Com os parâmetros de entrada e saídas definidos para as 10 amostras iniciais, iniciou-se o treinamento do metamodelo Kriging. A Figura 28 apresenta um fluxograma

detalhado sobre as etapas realizadas durante o treino do metamodelo para encontrar um modelo numérico otimizado.

Figura 28 – Fluxograma do metamodelo Kriging



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após efetuar a leitura das entradas e saídas, a primeira etapa consiste em informar ao programa o número de frequências analisadas. Para as placas, esse número foi definido como 6 e para os cilindros o número foi definido como 4. Também se definiu que o número de pontos de análise “p” durante o processo do Kriging e sua

otimização seria de 100 amostras, ou seja, seriam sugeridos a adição de 100 pontos ao modelo. Essas amostras foram obtidas através de um Hipercubo Latino.

De posse dessas informações, o metamodelo Kriging foi treinado para o conjunto de entradas a fim de obter a primeira frequência de saída. Com o treino do modelo Kriging finalizado, um modelo numérico foi gerado e o modelo foi melhorado através da otimização global eficiente (EGO). Para isso, foi utilizado a métrica de melhoramento esperado (EI). A métrica EI era calculada para a primeira frequência de saída para todos as 100 amostras sugeridas. Ao final do processo o vetor de dimensão  $1 \times 100$  contendo todos os valores de EI para a primeira frequência era armazenado.

O processo do Kriging com a otimização global era repetido para as demais frequências de saída (etapas destacadas no fluxograma). Ao final do processo 4 ou 6 metamodelos eram criados, de acordo com o número de frequências analisadas, resultando assim em uma matriz  $4 \times 100$  ou  $6 \times 100$ . A média dos valores de EI para cada um dos 100 pontos era calculada e armazenada no vetor  $\mathbf{EI}_{med}$  de dimensão  $1 \times 100$ , conforme

$$\mathbf{EI}_{med}(p) = \frac{\sum_{x=1}^6 EI(x, p)}{6} \quad (24)$$

Com o vetor  $\mathbf{EI}_{med}$  calculado, o maior valor de  $\mathbf{EI}_{med}$  era armazenado na variável  $\mathbf{EI}_{max}$ . Caso o valor obtido para a métrica  $\mathbf{EI}_{max}$  fosse superior a um limite estabelecido, um novo ponto de preenchimento era adicionado. Esse limite foi fixado em  $10^{-2}$  para todos os estudos realizados. Com a adição desse ponto, as variáveis de entrada eram armazenadas e, então submetido ao método dos elementos finitos através do *software* Abaqus<sup>TM</sup> para obter as variáveis de saída. Esse conjunto de entradas e saídas eram adicionados as 10 amostras e um novo ciclo se iniciava.

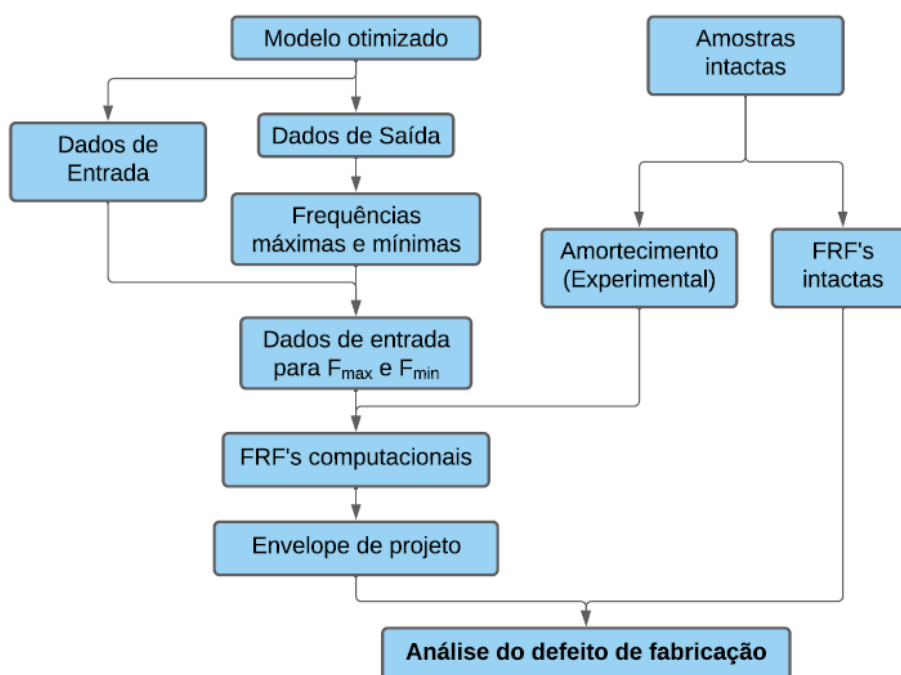
No momento em que o valor obtido para a métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ , as variáveis do modelo numérico otimizado eram obtidas, podendo ser efetuado as devidas análises de frequência e obtidas as funções de resposta em frequência para os limites superiores e inferiores de frequência através do *software* Abaqus<sup>TM</sup>.

### 3.7 ENVELOPE DE PROJETO

Após a etapa do Kriging tem-se o modelo otimizado. Com isso, dois arquivos .txt são gerados contendo as entradas e saídas para cada rodada. Os dados de saída (frequências) são analisados a fim de obter os valores máximos e mínimos. Esses valores foram obtidos com base nos valores fornecidos pelos pontos de suporte, assumindo que não havia pontos de frequência máxima e mínima entre esses pontos. Os valores máximos e mínimos para cada frequência podem estar contidos em amostras distintas. Em virtude disso, realizou-se a normalização desses valores e adotou-se a média máxima e mínima como critério de seleção das amostras limites.

Com os limites definidos, utilizaram-se os dados de entrada para as frequências máximas e mínimas e a média do amortecimento experimental para obter as FRFs computacionais. Essas FRFs foram plotadas e os vales e picos foram interligados de modo a fornecer o envelope de projeto. Com isso, foram inseridas as FRFs intactas no gráfico a fim de analisar o defeito de manufatura. Se uma amostra apresentasse sua FRF dentro dos limites estabelecidos, essa amostra seria considerada intacta. As etapas descritas podem ser visualizadas no fluxograma presente na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do envelope de projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 3.8 ÍNDICE DE DANO

Para avaliar o dano em estruturas de material compósito foi necessário comparar dados das amostras intactas com as danificadas. Os danos investigados nas amostras foram causados por carregamento de impacto e via processo de fabricação através de um furo central. Maiores informações sobre os danos realizados nas amostras podem ser encontradas em De Medeiros (2015a; 2015b).

Inicialmente, compararam-se as frequências naturais e as FRFs das amostras intactas com as danificadas. No entanto, essas análises não permitiram a detecção eficaz do dano, visto que ocorreram casos em que as frequências das amostras danificadas se encontravam dentro da faixa das amostras intactas e as FRFs de ambas eram semelhantes. Em vista disso, foi necessário utilizar o índice de dano.

Nesta etapa foram verificados os índices de dano para as amostras danificadas em relação as intactas, a fim de comprovar que elas apresentavam algum tipo de dano. Para isso, utilizaram-se as informações de amplitude e fase presentes nas amostras intactas e danificadas. Para calcular os índices de dano foi utilizada a equação proposta por De Medeiros (2015a; 2015b). A expressão retorna um valor igual a zero caso a estrutura não sofra alterações em seu comportamento estrutural e esse valor vai aumentando à medida que o comportamento estrutural se altera.

Determinou-se o índice de dano das amostras de placa de CFRP e GFRP através de dados intactos e danificados de mesma placa e mesmos pontos de entrada e saída. Para os cilindros de CFRP isso não foi possível, em virtude das amostras dos cilindros intactos serem diferentes dos cilindros danificados. Em vista disso, o índice de dano foi comparado entre diferentes cilindros para um mesmo ponto de entrada e saída. Também foi comparada o índice de dano entre diferentes amostras intactas a fim de verificar o índice obtido.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões obtidos através das análises computacionais e experimentais para as placas e cilindros de CFRP e para as placas de GFRP. Os resultados obtidos são apresentados em seções secundárias deste capítulo de acordo com o tipo de amostra utilizada. Para cada tipo de ensaio são apresentados os resultados do Hipercubo Latino gerado para as 10 amostras iniciais, os valores das frequências para esses pontos e os modos de vibrar da estrutura, gerados através do *software* Abaqus<sup>TM</sup>. Também são apresentados os valores da melhoria esperada (EI) obtidos a cada rodada do programa desenvolvido. Com os resultados da rotina, uma tabela contendo os valores máximos e mínimos para cada frequência é apresentado. Os resultados obtidos pelo modelo computacional são confrontados com os resultados experimentais através de gráficos de frequência e FRFs. Por fim, os índices de dano são calculados a fim de comparar os dados experimentais das FRFs intactas com as FRFs danificadas.

### 4.1 PLACA DE COMPÓSITO CFRP (P-A)

A primeira etapa para a placa de compósito de fibra de carbono com resina epóxi foi informar à rotina os valores máximos e mínimos de cada variável de entrada. Após iniciar a etapa 1 do código, obteve-se o Hipercubo Latino para essas variáveis, com base no intervalo fornecido. A Tabela 18 mostra os resultados obtidos para as 10 amostras iniciais para uma cada das 12 variáveis de entrada. Cada coluna representa uma amostra, denominadas pela letra “A” e cada linha representa uma variável. Vale ressaltar que as variáveis envolvidas são o comprimento  $L$  [mm], a largura  $W$  [mm], as curvaturas da placa  $C_1$  [mm] e  $C_2$  [mm], ângulo da fibra de  $\theta_0$  [°], a espessura da placa  $T$  [mm], o módulo de Young longitudinal  $E_{11}$  [GPa], o módulo de Young transversal  $E_{22}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3  $G_{23}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 1-2  $G_{12}$  [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>].

Tabela 18 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis da placa P-A

| V               | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| W               | 245,15 | 243,71 | 245,88 | 244,07 | 245,52 | 244,79 | 246,24 | 244,43 | 246,60 | 246,96 |
| L               | 305,17 | 304,83 | 306,50 | 304,17 | 304,50 | 305,83 | 303,50 | 303,83 | 305,50 | 306,17 |
| C1              | 3,84   | 4,34   | 4,17   | 3,50   | 3,67   | 4,51   | 3,17   | 4,68   | 3,34   | 4,01   |
| C2              | 6,12   | 4,92   | 4,12   | 2,53   | 3,33   | 4,52   | 5,32   | 2,93   | 5,72   | 3,72   |
| $\theta_0$      | -1,00  | -0,11  | -0,33  | 0,33   | -0,56  | 0,11   | -0,78  | 1,00   | 0,56   | 0,78   |
| T               | 2,13   | 2,22   | 2,23   | 2,21   | 2,12   | 2,14   | 2,19   | 2,17   | 2,16   | 2,18   |
| E <sub>11</sub> | 130,59 | 130,98 | 129,80 | 128,23 | 129,41 | 129,02 | 130,20 | 131,38 | 128,62 | 131,77 |
| E <sub>22</sub> | 11,26  | 11,05  | 10,74  | 11,15  | 10,95  | 10,54  | 11,46  | 10,64  | 11,36  | 10,85  |
| G <sub>23</sub> | 3,14   | 3,06   | 3,01   | 2,99   | 3,12   | 2,93   | 2,96   | 3,17   | 3,04   | 3,09   |
| $\nu_{12}$      | 0,312  | 0,309  | 0,313  | 0,311  | 0,307  | 0,310  | 0,308  | 0,308  | 0,310  | 0,312  |
| G <sub>12</sub> | 5,23   | 5,18   | 5,45   | 5,32   | 5,41   | 5,09   | 5,36   | 5,14   | 5,05   | 5,27   |
| $\rho$          | 1566,8 | 1620,8 | 1580,3 | 1526,2 | 1607,3 | 1512,7 | 1553,2 | 1539,7 | 1593,8 | 1499,2 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os resultados obtidos para as variáveis de entrada, a segunda etapa do código é executada. A rotina das simulações via *software* Abaqus™ faz a leitura dessas variáveis e retorna os valores das 6 primeiras frequências naturais para as 10 amostras. Os valores das frequências naturais para cada uma das amostras são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-A

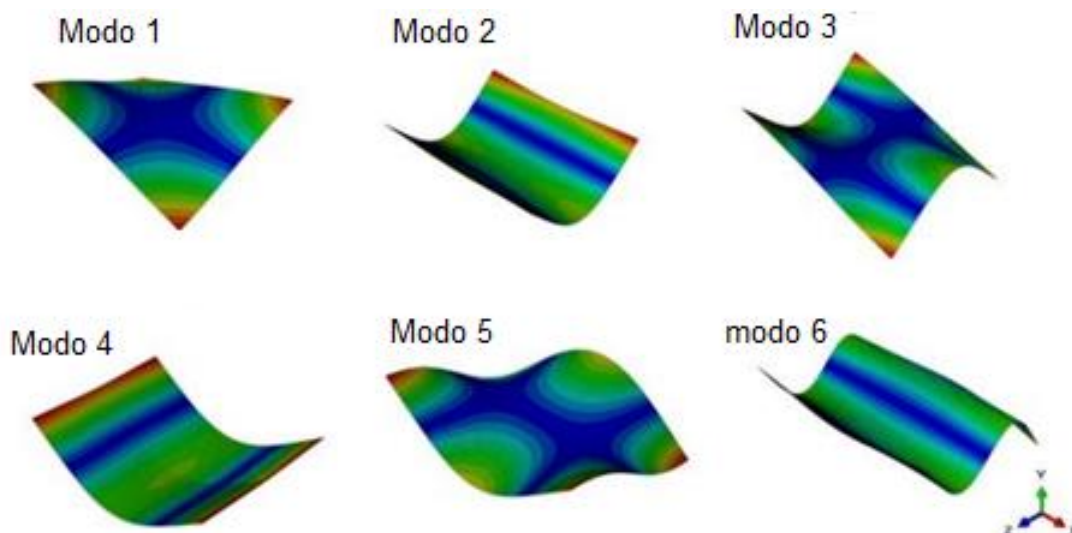
| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz | $f(5)$<br>Hz | $f(6)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 55,33        | 159,84       | 180,79       | 215,04       | 241,09       | 338,04       |
| A2      | 56,72        | 161,73       | 173,56       | 220,83       | 247,40       | 342,70       |
| A3      | 58,30        | 161,35       | 162,15       | 221,51       | 249,40       | 338,81       |
| A4      | 58,86        | 142,56       | 161,74       | 225,11       | 253,08       | 328,05       |
| A5      | 55,17        | 144,47       | 151,82       | 211,20       | 237,44       | 317,43       |
| A6      | 55,82        | 158,15       | 170,03       | 217,88       | 243,95       | 333,90       |
| A7      | 57,91        | 162,87       | 168,05       | 224,40       | 251,68       | 344,06       |
| A8      | 56,65        | 154,91       | 157,43       | 223,30       | 249,61       | 332,10       |
| A9      | 54,17        | 155,76       | 168,17       | 213,66       | 238,77       | 331,14       |
| A10     | 57,43        | 157,31       | 159,36       | 224,54       | 251,34       | 335,80       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Além das frequências naturais, foi possível extrair do *software* os 6 primeiros modos de vibrar da placa. A Figura 30 mostra os 6 primeiros modos de vibrar da placa de compósito CFRP, em que é possível verificar o 1° modo de torção, 1° modo de flexão, 2° modo de torção, 2° modo de flexão, 3° modo de torção e 3° modo de flexão, respectivamente.



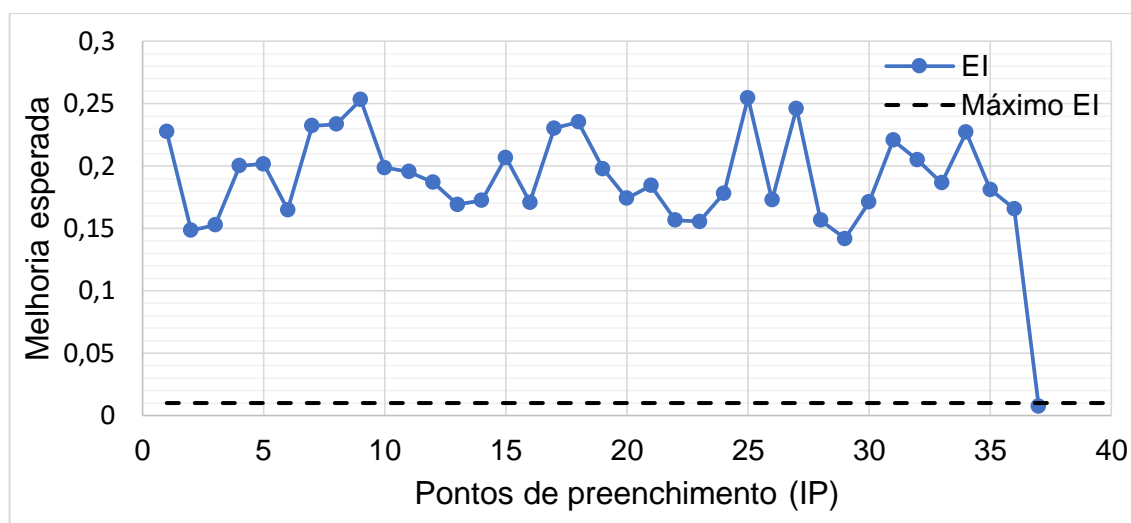
Figura 30 – Modos de vibração para a placa P-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conhecendo as variáveis de entrada e saída, o metamodelo Kriging foi treinado. Em seguida o modelo numérico foi otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Adicionaram-se 37 pontos ao modelo para atingir o critério de parada, totalizando 47 pontos ao final do modelo. A Figura 31 apresenta a evolução dos valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento.

Figura 31 – Melhoria Esperada para a placa P-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O valor inicial para a métrica EI foi de 0,2278, atingindo um pico de 0,2546 no ponto 25. Ao final de 37 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0073, apresentando uma redução de 96,80% em relação ao valor inicial.

Ao final da otimização do modelo numérico, os valores das 6 primeiras frequências naturais foram analisados para cada ponto experimental, a fim de obter os valores máximos e mínimos. Devido aos valores máximos e mínimos para cada frequência natural estarem em pontos distintos, realizou-se a normalização das frequências e calculou-se a média desses valores normalizados. O menor valor encontrado para a média forneceu o ponto responsável pelas frequências mínimas e o maior valor forneceu o ponto das frequências máximas. A Tabela 20 apresenta os dois pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas. É possível verificar que o ponto de mínimo apresenta as menores frequências para o 3º e o 6º modo e o ponto de máximo apresenta as maiores frequências para o 2º e o 6º modo.

Tabela 20 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-A

| <b>Frequência</b>         | <b><math>f(1)</math></b> | <b><math>f(2)</math></b> | <b><math>f(3)</math></b> | <b><math>f(4)</math></b> | <b><math>f(5)</math></b> | <b><math>f(6)</math></b> |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Mínimo</b>             | 54,172                   | 134,633                  | 150,944                  | 211,199                  | 237,437                  | 307,071                  |
| <b>Máximo</b>             | 58,855                   | 162,870                  | 180,791                  | 226,182                  | 253,078                  | 344,062                  |
| <b>Mínimo normalizado</b> | 0,259                    | 0,028                    | 0,000                    | 0,267                    | 0,234                    | 0,000                    |
| <b>Máximo normalizado</b> | 0,798                    | 1,000                    | 0,573                    | 0,881                    | 0,911                    | 1,000                    |

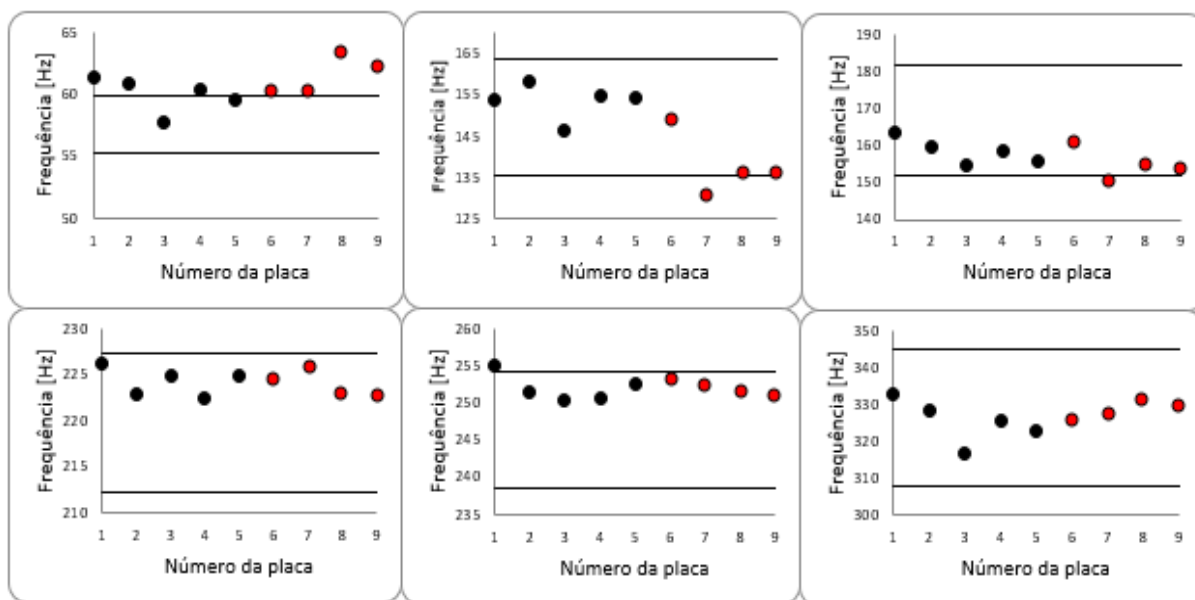
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos pelo modelo computacional, gráficos contendo os intervalos de frequências intactas foram desenvolvidos, a fim de verificar se os valores das frequências naturais das amostras experimentais estariam dentro dos limites estabelecidos. A Figura 32 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 6 primeiras frequências e 9 amostras experimentais. As 5 primeiras amostras são consideradas intactas e as 4 últimas sofreram algum tipo de dano. Foi possível verificar que as amostras intactas 1, 2 e 3 se encontram fora dos limites para a 1ª frequência e a amostra 1 se encontra fora dos limites para a 5ª frequência. Em vista disso, há um possível indício de defeito de fabricação para as placas 1, 2 e 3. Por outro lado, apenas para a 1ª frequência as amostras danificadas se encontram fora do intervalo e somente a amostra 7 se encontra fora dos limites para a 2ª e 3ª frequência. As demais amostras se encontram dentro do intervalo definido como intacto. Assim, uma análise previa de placas

danificadas podem ser verificadas pelas 3 primeiras frequências, contudo não se pode afirmar que a placa está danificada apenas pela sua frequência natural.

Figura 32 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa

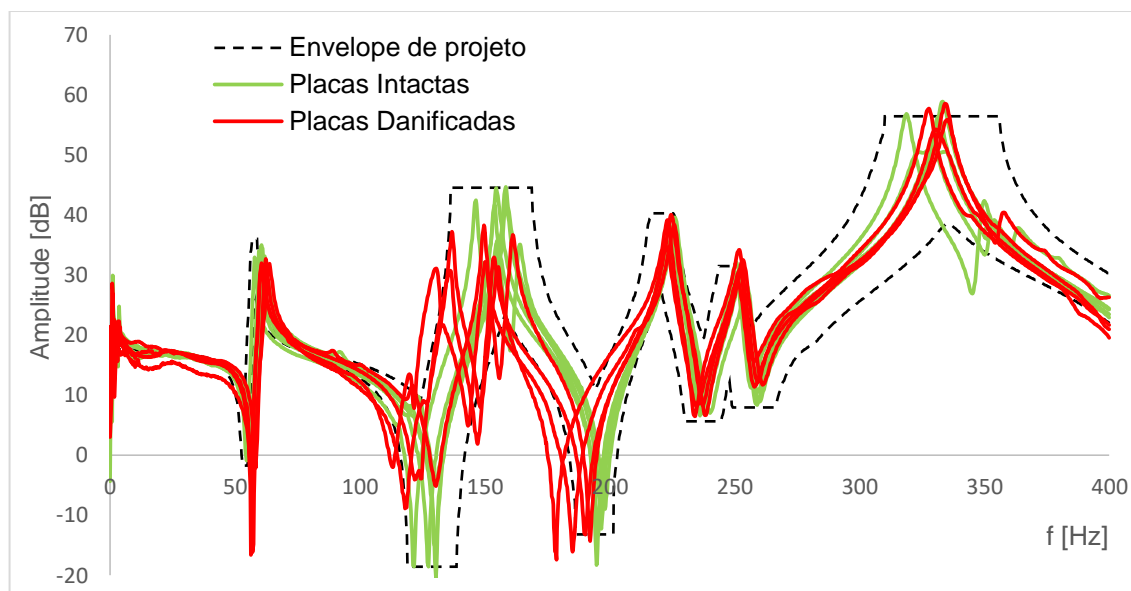
P-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, foram utilizados os dados de entrada desses pontos e obtidas as FRFs através do software Abaqus™. Essas FRFs proporcionaram a determinação de um envelope de projeto da estrutura, em que se uma FRF experimental se encontrasse dentro desse intervalo seria considerada intacta, caso contrário, a FRF seria de uma placa com defeito de fabricação. A Figura 33 apresenta o envelope de projeto determinado a partir desses pontos, em conjunto com as FRFs das 9 placas analisadas. É possível verificar que as placas intactas apresentam uma semelhança com o envelope proposto. Os picos das placas intactas coincidem com o envelope de projeto. Em vista disso, pode-se afirmar que as placas intactas não sofreram nenhum defeito de fabricação. Uma diferença no formato das FRFs das placas danificadas é verificada em relação as intactas, em torno de 150Hz e os picos apresentam-se amortecidos em alguns modos, como é o caso do 1º e do 2º modo.

Figura 33 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No entanto, quando comparamos as FRFs das estruturas intactas com as danificadas, algumas partes das FRFs estão fora do envelope. Isso mostra a influência do dano na resposta dinâmica da estrutura e implica na necessidade de sistemas mais robustos para detectar a presença de danos, uma vez que algumas perturbações dos sistemas de fabricação podem confundir os sistemas de detecção de danos. Assim, realizou-se uma análise via índice de dano através da equação proposta por De Medeiros (2015). A equação retorna um valor igual a zero caso a estrutura não sofra alterações em seu comportamento estrutural e esse valor vai aumentando à medida que o comportamento estrutural se altera. Para isso, foram comparados valores de amplitude e fase de placas inicialmente intactas que posteriormente foram danificadas, ou seja, dados intactos e danificados de uma mesma amostra. A Tabela 21 apresenta os índices de dano encontrados para as 6 placas analisadas. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores elevados na média para todas as amostras analisadas.

Apenas a amostra 6 apresenta valores próximos a zero para  $H_{11}$  e  $H_{31}$ . De certo modo, pode-se mensurar que esta placa é a que apresenta um dano menor quando comparado a sua estrutura intacta. Por outro lado, as placas 1 e 4 apresentam os maiores valores para os índices de dano, levando a conclusão de que sofreram maiores alterações em sua estrutura.

Tabela 21 – Índices de dano obtidos para a placa P-A

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 512 Hz |                 |                 |                 |                 |       |               |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|---------------|
| Placa   | H <sub>11</sub> | H <sub>21</sub> | H <sub>31</sub> | H <sub>41</sub> | Média | Desvio Padrão |
| 1   | 3,783           | 1,815           | 1,121           | 6,266           | 3,247 | 1,998         |
| 2   | 1,036           | 0,747           | 1,017           | 0,980           | 0,945 | 0,116         |
| 3   | 1,002           | 0,889           | 0,988           | 0,970           | 0,962 | 0,044         |
| 4   | 1,001           | 9,432           | 0,989           | 0,979           | 3,100 | 3,656         |
| 5   | 1,138           | 1,169           | 1,152           | 1,440           | 1,225 | 0,125         |
| 6   | 0,116           | 1,590           | 0,098           | 0,394           | 0,550 | 0,612         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.2 PLACA DE COMPÓSITO CFRP (P-B)

Foi obtido o Hipercubo Latino para as variáveis de entrada com base no intervalo. A Tabela 22 mostra os resultados obtidos para as 10 amostras para as 12 variáveis de entrada. As variáveis envolvidas e suas unidades são o comprimento L [mm], a largura W [mm], ângulo da fibra de  $\theta_0$  [°], o ângulo da fibra  $\theta_{15}$  [°], o ângulo da fibra  $\theta_{-15}$  [°], a espessura da placa T [mm], o módulo de Young longitudinal E<sub>11</sub> [GPa], o módulo de Young transversal E<sub>22</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3 G<sub>23</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 1-2 G<sub>12</sub> [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m³].

Tabela 22 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis da placa P-B

| V               | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| W               | 246,49 | 243,07 | 245,64 | 241,36 | 249,06 | 242,22 | 248,20 | 243,93 | 244,78 | 247,35 |
| L               | 305,35 | 306,60 | 303,48 | 305,98 | 302,85 | 307,23 | 304,10 | 307,85 | 304,73 | 308,48 |
| $\theta_{15}$   | 16,00  | 15,78  | 14,89  | 14,67  | 14,22  | 15,11  | 14,44  | 15,33  | 14,00  | 15,56  |
| $\theta_{-15}$  | -15,56 | -14,00 | -16,00 | -15,33 | -14,89 | -14,67 | -15,11 | -15,78 | -14,22 | -14,44 |
| $\theta_0$      | 0,56   | -0,11  | 0,33   | 0,11   | 0,78   | 1,00   | -0,56  | -1,00  | -0,33  | -0,78  |
| T               | 3,54   | 3,45   | 3,14   | 3,19   | 3,36   | 3,32   | 3,23   | 3,28   | 3,49   | 3,41   |
| E <sub>11</sub> | 129,78 | 128,44 | 128,89 | 131,11 | 130,67 | 128,00 | 132,00 | 130,22 | 3,00   | 129,33 |
| E <sub>22</sub> | 10,83  | 10,72  | 11,17  | 10,61  | 11,28  | 11,39  | 11,50  | 11,06  | 10,50  | 10,94  |
| G <sub>23</sub> | 3,01   | 2,98   | 3,09   | 3,12   | 2,96   | 3,17   | 3,14   | 2,93   | 3,04   | 3,06   |
| $\nu_{12}$      | 0,312  | 0,312  | 0,311  | 0,308  | 0,309  | 0,310  | 0,313  | 0,310  | 0,308  | 0,307  |
| G <sub>12</sub> | 5,05   | 5,41   | 5,45   | 5,36   | 5,18   | 5,23   | 5,09   | 5,27   | 5,14   | 5,32   |
| $\rho$          | 1512,7 | 1553,2 | 1499,2 | 1620,8 | 1580,3 | 1607,3 | 1566,8 | 1539,7 | 1526,2 | 1593,8 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os resultados para as variáveis de entrada, foram determinadas as 6 primeiras frequências naturais para as 10 amostras através do *software* Abaqus™. Os valores das frequências naturais para cada uma das amostras são apresentados nas linhas da Tabela 23.

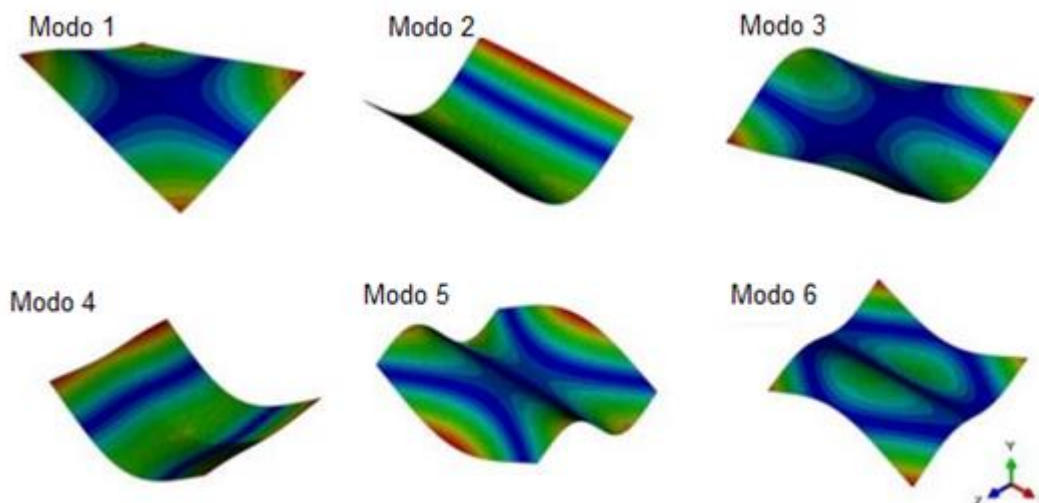
Tabela 23 – Frequências obtidas para as 10 rodadas da placa P-B

| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz | $f(5)$<br>Hz | $f(6)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 117,87       | 161,30       | 288,12       | 349,02       | 410,05       | 460,04       |
| A2      | 114,56       | 159,06       | 281,08       | 332,74       | 396,09       | 450,20       |
| A3      | 107,29       | 147,25       | 262,77       | 315,45       | 372,66       | 418,31       |
| A4      | 104,58       | 145,07       | 256,88       | 305,56       | 362,96       | 410,55       |
| A5      | 107,09       | 149,45       | 263,66       | 333,03       | 385,20       | 425,86       |
| A6      | 107,07       | 155,41       | 266,67       | 313,20       | 374,03       | 437,88       |
| A7      | 104,17       | 146,54       | 257,27       | 320,23       | 372,61       | 416,42       |
| A8      | 109,75       | 152,65       | 269,90       | 316,37       | 377,32       | 432,04       |
| A9      | 113,57       | 158,10       | 279,30       | 349,38       | 406,18       | 449,12       |
| A10     | 109,29       | 151,05       | 268,04       | 321,37       | 380,06       | 428,31       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Além das frequências naturais, foi possível extrair os 6 primeiros modos de vibrar da placa. A Figura 34 apresenta os 6 primeiros modos de vibrar da placa de compósito CFRP, em que é possível verificar o 1º modo de torção, 1º modo de flexão, 2º modo de torção, 2º modo de flexão, 3º modo de torção e 4º modo de torção respectivamente.

Figura 34 – Modos de vibração para a placa P-B

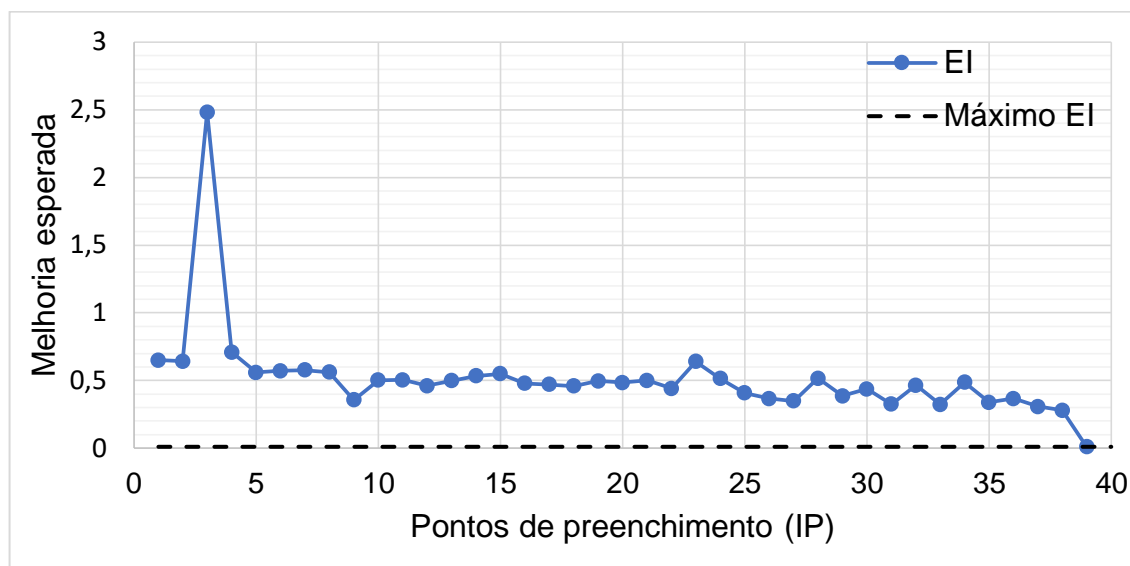


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os resultados obtidos, o metamodelo Kriging foi treinado e otimizado até que a métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Foram adicionados 39 pontos ao modelo para se obter um valor inferior ao estipulado, totalizando 49 pontos para construir modelo. A Figura 35 apresenta a evolução dos valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento. O valor inicial para a métrica EI foi de 0,6497, atingindo um

pico de 2,4820 no ponto 3. Ao final de 39 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0098, apresentando uma redução de 98,49% em relação ao valor inicial.

Figura 35 – Melhoria Esperada para a placa P-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final da otimização do modelo numérico, os valores das 6 primeiras frequências foram analisados para cada ponto. Assim como no primeiro caso, os valores máximos e mínimos para cada frequência natural apresentam-se em pontos distintos, sendo necessário a normalização das frequências e o cálculo da média. A Tabela 24 mostra os dois pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas. É possível verificar que o ponto de mínimo contém as menores frequências para o 1º, 3º e o 5º modo e o ponto de máximo engloba a maior frequência para o 1º modo. Apesar de conter apenas 1 frequência máxima, os demais valores são muito semelhantes às frequências máximas de outros pontos, o que fez com que esse ponto fosse escolhido.

Tabela 24 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-B

| Frequência         | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$  | $f(4)$  | $f(5)$  | $f(6)$  |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mínimo             | 99,694  | 136,035 | 245,103 | 296,892 | 350,945 | 389,198 |
| Máximo             | 117,874 | 165,523 | 288,169 | 351,865 | 411,317 | 467,658 |
| Mínimo normalizado | 0,000   | 0,098   | 0,000   | 0,024   | 0,000   | 0,064   |
| Máximo normalizado | 1,000   | 0,857   | 0,999   | 0,948   | 0,979   | 0,903   |

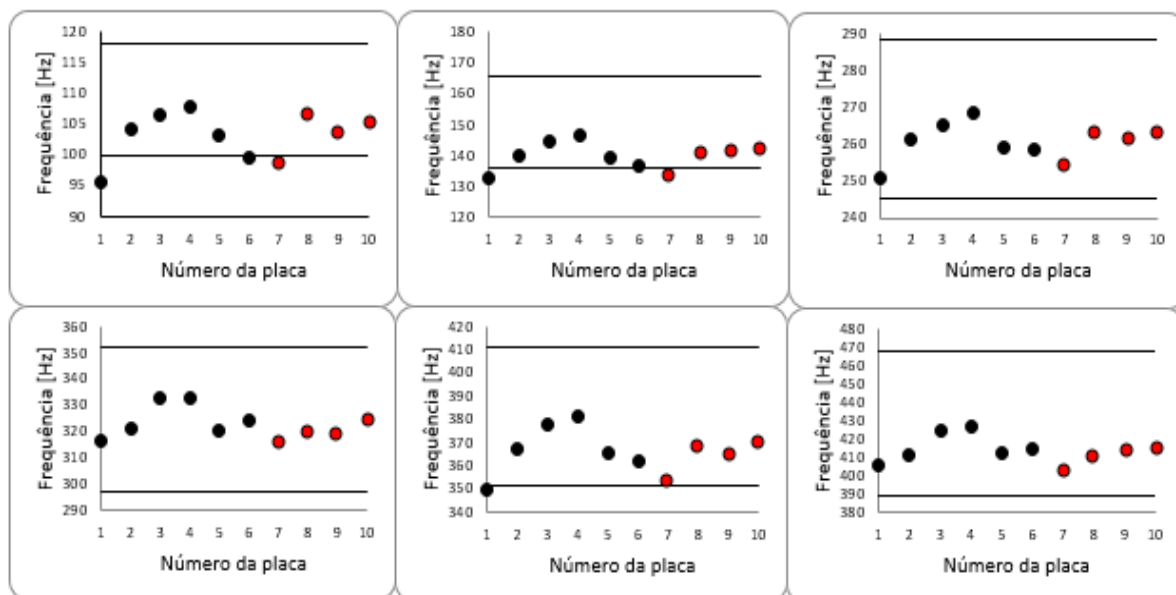
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos, foram desenvolvidos gráficos contendo os intervalos de frequências naturais intactos. A Figura 36 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 6 primeiras frequências e 10 amostras experimentais. As 6 primeiras amostras são consideradas intactas e as 4 últimas sofreram algum tipo de dano.

Verificou-se que a amostra intacta 1 se encontra fora dos limites para a 1ª, 2ª e 5ª frequência e a amostra 6 se encontra fora dos limites para a 1ª frequência. Em visto disso, indícios há indícios que a placa 1 apresenta defeito de fabricação. Para as amostras danificadas, apenas a placa 7 apresenta valores de frequências naturais fora do intervalo intacto. As demais amostras se encontram dentro do intervalo definido como intacto. Para a análise dessas placas, nenhuma informação de dano pode ser obtida através do intervalo de frequências.

Figura 36 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa

P-B



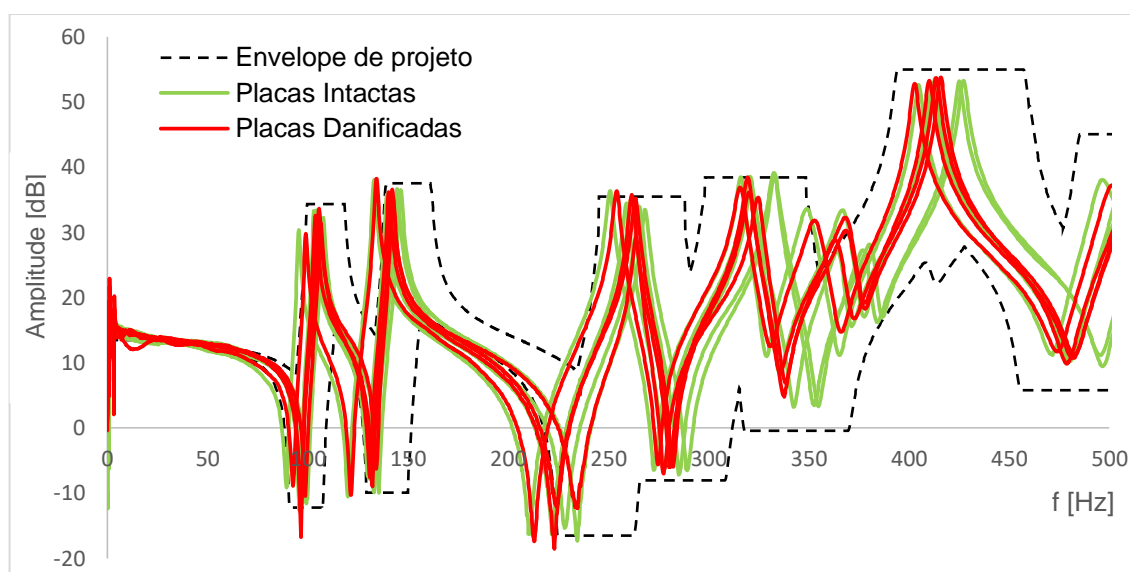
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, foram obtidas as FRFs através do software Abaqus™. Essas FRFs proporcionaram a criação do envelope de projeto da estrutura intacta, utilizado para avaliar se uma amostra apresente defeito de fabricação. A Figura 37 apresenta o envelope de projeto criado a partir desses pontos, em conjunto com as FRFs das 10 placas analisadas.



É possível verificar que as placas intactas e as placas danificadas apresentam FRFs semelhantes em quase todo o intervalo de frequência apresentado, dificultando a análise de dano entre FRFs. Os picos das placas danificadas e das placas intactas seguem de acordo com os limites estabelecidos pelo envelope, o que pode indicar que o dano realizado nessas placas não causou grandes alterações nas propriedades estruturais. Pode-se verificar que apenas uma FRF intacta se encontra fora das frequências iniciais, o que comprova as informações obtidas pelo intervalo de frequência. Possivelmente essa amostra apresenta defeitos no processo de fabricação.

Figura 37 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, foi realizado a análise dos índices de dano através da equação proposta por Medeiros (2015). A Tabela 25 apresenta os índices de dano encontrados para as 4 placas analisadas. Pode-se verificar que para essa análise os índices de dano não apresentam valores elevados como no caso anterior, porém os valores obtidos podem ser considerados para definir as amostras como danificadas. Esta diferença entre os índices de dano das Placas P-A e P-B estão associados a sequência de empilhamento e ao dano causado pelo impacto na estrutura, maiores detalhes sobre o processo de danificação das estruturas podem ser encontrados em De Medeiros (2016).

Tabela 25 – Índices de dano obtidos para a placa P-B

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 512 Hz |                 |                 |                 |                 |       |               |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|---------------|
| Placa   | H <sub>11</sub> | H <sub>21</sub> | H <sub>31</sub> | H <sub>41</sub> | Média | Desvio Padrão |
| 1   | 0,7371          | 0,0345          | 3,2130          | 0,0983          | 1,021 | 1,295         |
| 2   | 2,0515          | 0,0195          | 1,6205          | 0,0770          | 0,942 | 0,907         |
| 3   | 0,5009          | 0,1902          | 0,4015          | 1,8725          | 0,741 | 0,663         |
| 4   | 0,3340          | 0,4188          | 0,1789          | 0,4523          | 0,346 | 0,106         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.3 CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-A)

Para o cilindro de compósito CFRP, foi obtido o Hipercubo Latino. A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos para as 10 amostras iniciais para uma cada das 12 variáveis de entrada. As variáveis envolvidas e suas unidades são o comprimento L [mm], o diâmetro do cilindro D [mm], o ângulo da fibra de  $\theta_{90}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{60}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{-60}$  [°], a espessura do cilindro T [mm], o módulo de Young longitudinal E<sub>11</sub> [GPa], o módulo de Young transversal E<sub>22</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3 G<sub>23</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 1-2 G<sub>12</sub> [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>].

Tabela 26 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis do cilindro C-A

| V               | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L               | 145,83 | 144,50 | 144,17 | 144,83 | 143,83 | 145,17 | 143,50 | 146,17 | 145,50 | 146,50 |
| T               | 163,77 | 163,59 | 163,63 | 163,68 | 163,81 | 163,85 | 163,72 | 163,55 | 163,50 | 163,90 |
| D               | 3,60   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| $\theta_{90}$   | 89,44  | 91,00  | 89,22  | 89,89  | 89,67  | 89,00  | 90,78  | 90,56  | 90,11  | 90,33  |
| $\theta_{60}$   | 60,11  | 59,44  | 60,78  | 61,00  | 59,00  | 59,67  | 60,33  | 60,56  | 59,22  | 59,89  |
| $\theta_{-60}$  | -59,00 | -59,44 | -59,22 | -60,33 | -59,67 | -61,00 | -60,56 | -60,78 | -60,11 | -59,89 |
| E <sub>11</sub> | 129,02 | 129,80 | 129,41 | 130,98 | 131,77 | 131,38 | 128,62 | 130,20 | 130,59 | 128,23 |
| E <sub>22</sub> | 10,69  | 11,10  | 11,20  | 11,30  | 11,41  | 10,59  | 10,89  | 11,51  | 10,79  | 11,00  |
| G <sub>12</sub> | 5,18   | 5,14   | 5,41   | 5,05   | 5,32   | 5,23   | 5,27   | 5,45   | 5,36   | 5,09   |
| G <sub>23</sub> | 3,12   | 3,17   | 2,98   | 3,14   | 3,04   | 3,09   | 3,01   | 3,06   | 2,96   | 2,93   |
| $\rho$          | 1539,7 | 1553,2 | 1512,7 | 1593,8 | 1526,2 | 1499,2 | 1566,8 | 1580,3 | 1607,3 | 1620,8 |
| $\nu_{12}$      | 0,312  | 0,313  | 0,310  | 0,310  | 0,309  | 0,307  | 0,312  | 0,311  | 0,308  | 0,308  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os resultados obtidos para as variáveis de entrada, utilizou-se o software Abaqus<sup>TM</sup> para obter as 4 primeiras frequências naturais para as 10 amostras. Os valores das frequências naturais para cada uma das amostras são apresentados na Tabela 27.

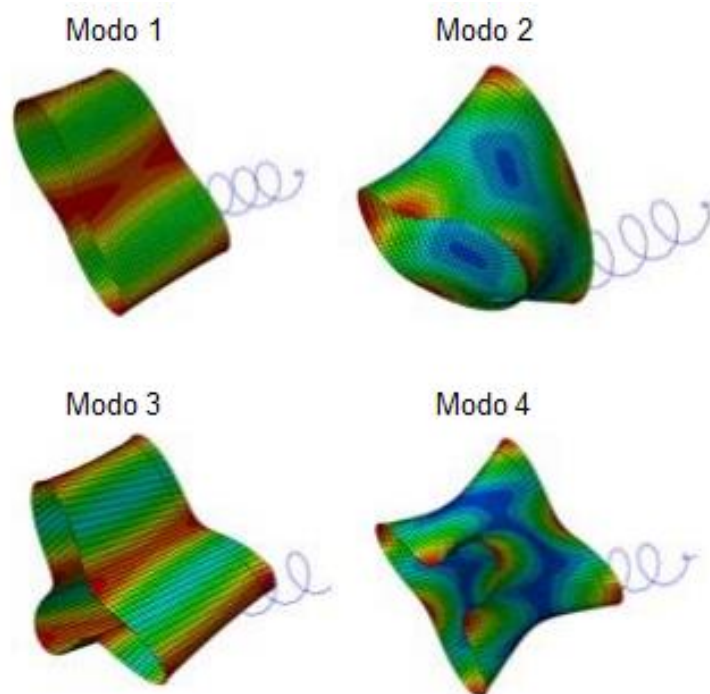
Tabela 27 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-A

| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 527,27       | 616,68       | 1479,91      | 1638,51      |
| A2      | 497,87       | 579,18       | 1397,17      | 1540,56      |
| A3      | 509,81       | 597,47       | 1432,67      | 1589,71      |
| A4      | 508,13       | 588,59       | 1426,29      | 1570,71      |
| A5      | 489,24       | 575,13       | 1374,93      | 1527,59      |
| A6      | 500,27       | 585,85       | 1406,61      | 1560,14      |
| A7      | 533,84       | 618,58       | 1496,44      | 1647,15      |
| A8      | 524,20       | 605,40       | 1470,52      | 1614,70      |
| A9      | 534,48       | 623,05       | 1498,45      | 1654,38      |
| A10     | 501,60       | 582,09       | 1407,22      | 1549,49      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Além das frequências naturais, foi possível extrair os 4 primeiros modos de vibrar do cilindro. A Figura 38 mostra os 4 primeiros modos de vibrar do cilindro de compósito de CFRP.

Figura 38 – Modos de vibração para o cilindro C-A

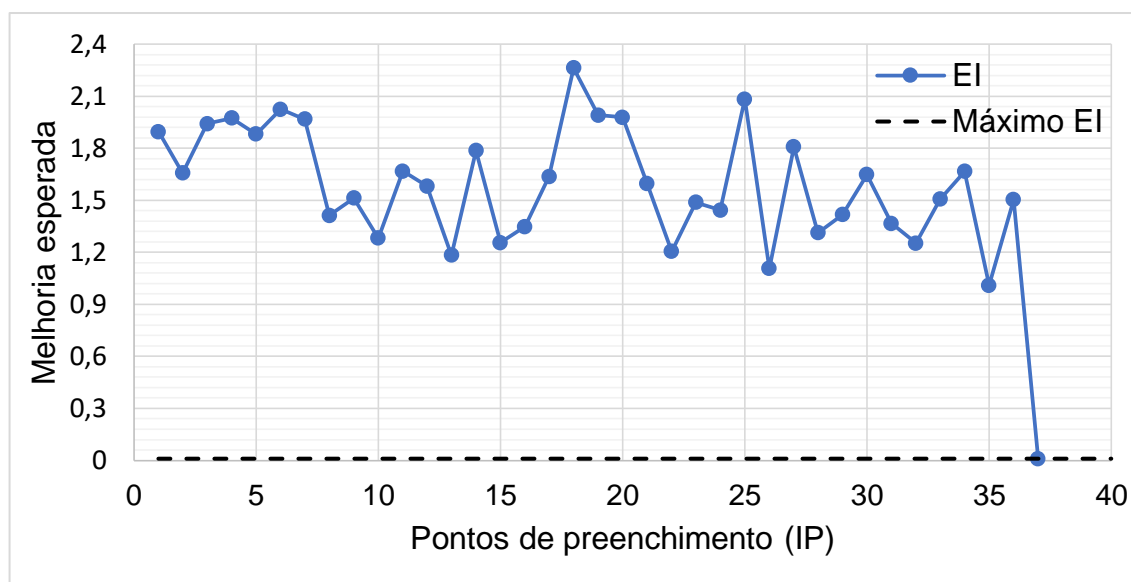


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após inserir na rotina as variáveis de entrada e saída, o metamodelo Kriging foi treinado. Em seguida o modelo numérico foi otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Foram adicionados 37 pontos ao modelo para atingir esse valor, totalizando 47 pontos para construir modelo. A Figura 39 apresenta a evolução dos

valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento. O valor inicial para a métrica EI foi de 1,8951, atingindo um pico de 2,2625 no ponto 18. Ao final de 37 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0089, apresentando uma redução de 99,01% em relação ao valor inicial.

Figura 39 – Melhoria Esperada para o cilindro C-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com a otimização do modelo numérico finalizado, os valores das 4 primeiras frequências foram analisados para cada ponto. Diferente dos casos anteriores, os valores limites para cada frequência se apresentaram nos mesmos pontos. Assim, ao realizar a normalização das frequências foi verificado um valor nulo para todos os valores das frequências mínimas e um valor unitário para todos os valores das frequências máximas. Com isso, os pontos selecionados compreenderam todos os demais pontos nos intervalos de frequência criados. A Tabela 28 mostra os dois pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas.

Foram desenvolvidos gráficos contendo os intervalos de frequências naturais intactos. A Figura 40 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 4 primeiras frequências e 7 amostras experimentais. As 3 primeiras amostras são consideradas intactas e as 4 últimas sofreram danos por impacto. Foi possível verificar que para a 1ª frequência as amostras intactas se localizavam dentro do limite estabelecido, porém para as demais frequências ficaram

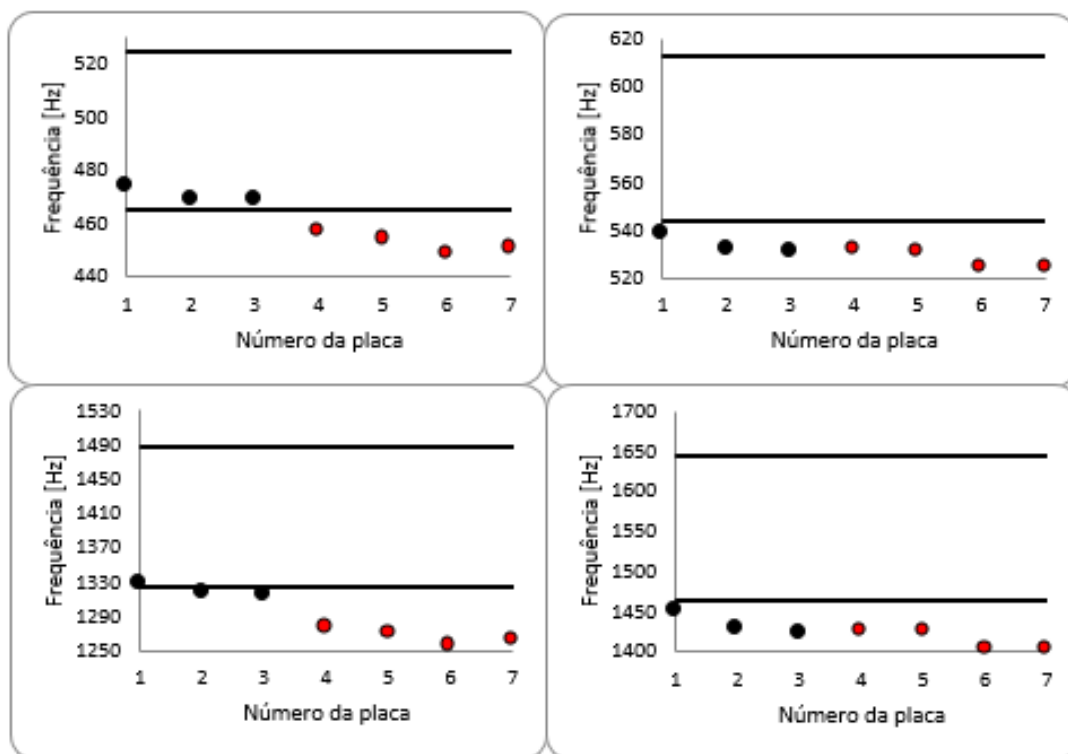
abaixo do limite mínimo. As amostras danificadas apresentaram todos os valores de frequência abaixo do limite mínimo estabelecido. Pode-se verificar que para todas as frequências analisadas os valores de frequência das amostras danificadas eram inferiores as intactas. Com isso, cria-se indícios que todas as amostras intactas apresentam defeitos no processo de fabricação.

Tabela 28 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-A

| Frequência         | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$   | $f(4)$   |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|
| Mínimo             | 475,275 | 553,370 | 1335,278 | 1474,205 |
| Máximo             | 534,477 | 623,047 | 1498,449 | 1654,384 |
| Mínimo normalizado | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    |
| Máximo normalizado | 1,000   | 1,000   | 1,000    | 1,000    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 40 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o cilindro C-A

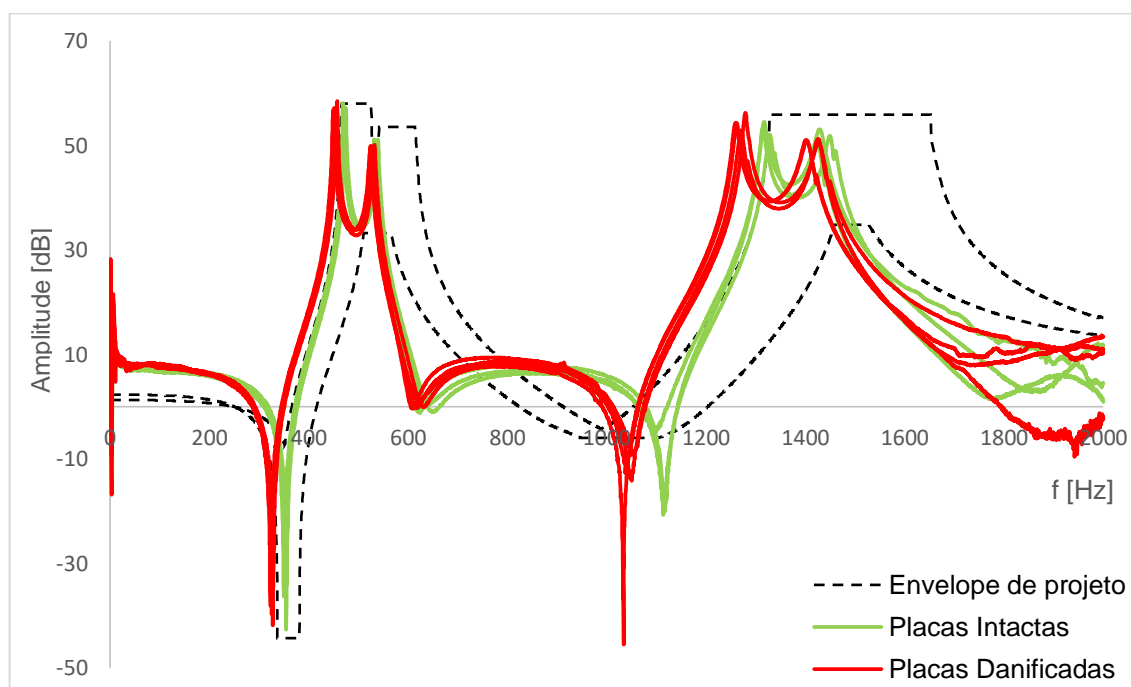


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, foi utilizado os dados de entrada e foram obtidas as FRFs através do Abaqus<sup>TM</sup>. A Figura 41 apresenta o envelope de projeto, em conjunto com as FRFs dos 7 cilindros analisados.

É possível verificar que o grupo de cilindros intactos se encontra próximo ao limite esquerdo da FRF do envelope, porém está fora do intervalo. Com isso, é possível concluir que todas as amostras intactas apresentam problemas no processo de fabricação. Ao comparar as FRFs intactas com as danificadas, percebe-se que os cilindros danificados estão deslocados à esquerda das amostras intactas, o que indica a possibilidade de estarem danificados.

Figura 41 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, foi realizado a análise dos índices de dano através de Medeiros (2015). A equação retorna um valor igual a zero caso a estrutura não sofra alterações em seu comportamento estrutural. Como os cilindros intactos utilizados no estudo não foram submetidos a algum tipo de dano, diferentes cilindros foram utilizados para determinar o índice de dano. A Tabela 29 apresenta os índices de dano encontrados para os 3 cilindros intactos em relação aos danificados. Para esse estudo foi utilizado a Força na posição 1 e o acelerômetro na posição 2. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores semelhantes na média para todas as amostras analisadas, devido às FRFs intactas e danificadas estarem agrupadas em regiões diferentes.

Tabela 29 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |              |              |              |              |       |               |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------|
| Cilindro                                       | Danificada 4 | Danificada 5 | Danificada 6 | Danificada 7 | Média | Desvio Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,571        | 0,714        | 0,740        | 0,693        | 0,680 | 0,065         |
| Intacta 2                                      | 0,528        | 0,664        | 0,771        | 0,644        | 0,652 | 0,086         |
| Intacta 3                                      | 0,970        | 1,166        | 0,542        | 1,136        | 0,954 | 0,249         |
| Média  | 0,690        | 0,848        | 0,685        | 0,824        | --    | --            |
| Desvio Padrão                                  | 0,199        | 0,226        | 0,101        | 0,222        | --    | --            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 30 traz os índices de dano para os cilindros intactos. Foi possível verificar a teoria de Medeiros (2015), ao comparar o cilindro intacto com ele mesmo, resultando em um índice de dano nulo. Ao comparar entre cilindros distintos, foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos em sua estrutura.

Tabela 30 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |           |           |           |       |               |
|--|-----------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Cilindro                                       | Intacta 1 | Intacta 2 | Intacta 3 | Média | Desvio Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000     | 0,042     | 0,271     | 0,105 | 0,119         |
| Intacta 2                                      | 0,041     | 0,000     | 0,301     | 0,114 | 0,133         |
| Intacta 3                                      | 0,372     | 0,430     | 0,000     | 0,268 | 0,191         |
| Média  | 0,138     | 0,158     | 0,191     | --    | --            |
| Desvio Padrão                                  | 0,167     | 0,194     | 0,135     | --    | --            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os índices de dano foram calculados novamente para os cilindros utilizando a força na posição 1 e o acelerômetro na posição 3. Os resultados podem ser observados no Apêndice A.

#### 4.4 CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-B)

Para o estudo do cilindro, foi obtido o Hipercubo Latino para as variáveis de entrada com base no intervalo. A Tabela 31 mostra os resultados para as 10 amostras

iniciais com 12 variáveis. As variáveis envolvidas são o comprimento  $L$  [mm], o diâmetro do cilindro  $D$  [mm], o ângulo da fibra de  $\theta_{90}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{30}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{-30}$  [°], a espessura do cilindro  $T$  [mm], o módulo de Young longitudinal  $E_{11}$  [GPa] e transversal  $E_{22}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3  $G_{23}$  [GPa] e no plano 1-2  $G_{12}$  [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m³].

Tabela 31 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 12 variáveis do cilindro C-B

| V                            | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>L</b>                     | 144,50 | 144,17 | 146,50 | 145,50 | 145,17 | 143,83 | 145,83 | 144,83 | 146,17 | 143,50 |
| <b>T</b>                     | 163,50 | 163,54 | 163,81 | 163,63 | 163,77 | 163,90 | 163,72 | 163,59 | 163,86 | 163,68 |
| <b>D</b>                     | 3,10   | 3,18   | 3,05   | 3,23   | 3,32   | 3,40   | 3,27   | 3,14   | 3,36   | 3,45   |
| $\theta_{90}$                | 91,00  | 90,11  | 90,33  | 89,22  | 89,67  | 90,78  | 90,56  | 89,44  | 89,00  | 89,89  |
| $\theta_{30}$                | 30,11  | 29,00  | 29,44  | 31,00  | 29,22  | 29,89  | 29,67  | 30,56  | 30,78  | 30,33  |
| $\theta_{-30}$               | -29,44 | -31,00 | -29,67 | -29,22 | -29,00 | -30,56 | -30,33 | -30,78 | -30,11 | -29,89 |
| <b>E<sub>11</sub></b>        | 130,98 | 131,38 | 129,41 | 129,02 | 131,77 | 130,20 | 128,23 | 129,80 | 130,59 | 128,62 |
| <b>E<sub>22</sub></b>        | 11,51  | 10,59  | 10,69  | 11,20  | 11,30  | 11,00  | 11,41  | 10,79  | 11,10  | 10,89  |
| <b>G<sub>12</sub></b>        | 5,23   | 5,36   | 5,14   | 5,18   | 5,41   | 5,05   | 5,45   | 5,09   | 5,27   | 5,32   |
| <b>G<sub>23</sub></b>        | 3,06   | 3,17   | 3,01   | 3,09   | 3,12   | 3,14   | 2,96   | 2,93   | 3,04   | 2,98   |
| <b><math>\rho</math></b>     | 1512,7 | 1539,7 | 1526,2 | 1499,2 | 1553,2 | 1580,3 | 1620,8 | 1566,8 | 1607,3 | 1593,8 |
| <b><math>\nu_{12}</math></b> | 0,312  | 0,310  | 0,309  | 0,313  | 0,310  | 0,308  | 0,312  | 0,311  | 0,307  | 0,308  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foi utilizado o software Abaqus<sup>TM</sup> para obter as 4 primeiras frequências naturais para as 10 amostras. Os valores das frequências são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-B

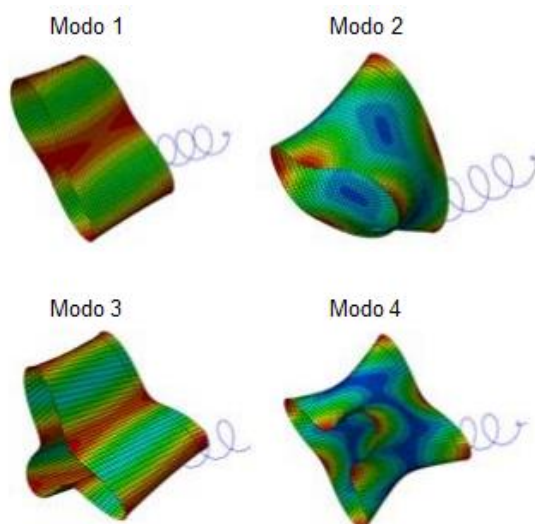
| Amostra    | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>A1</b>  | 395,01       | 488,48       | 1110,46      | 1268,44      |
| <b>A2</b>  | 402,02       | 497,91       | 1130,04      | 1292,32      |
| <b>A3</b>  | 382,77       | 471,38       | 1076,35      | 1225,96      |
| <b>A4</b>  | 408,82       | 508,40       | 1149,43      | 1318,55      |
| <b>A5</b>  | 415,57       | 513,05       | 1167,63      | 1332,97      |
| <b>A6</b>  | 420,70       | 521,11       | 1181,26      | 1350,95      |
| <b>A7</b>  | 398,36       | 492,55       | 1119,21      | 1277,76      |
| <b>A8</b>  | 390,82       | 485,87       | 1098,66      | 1259,55      |
| <b>A9</b>  | 412,02       | 512,41       | 1157,69      | 1327,65      |
| <b>A10</b> | 422,81       | 526,02       | 1187,19      | 1361,97      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foi possível extrair os 4 primeiros modos de vibrar do cilindro. A Figura 42 mostra os 4 primeiros modos de vibrar do cilindro de compósito com fibra de carbono.



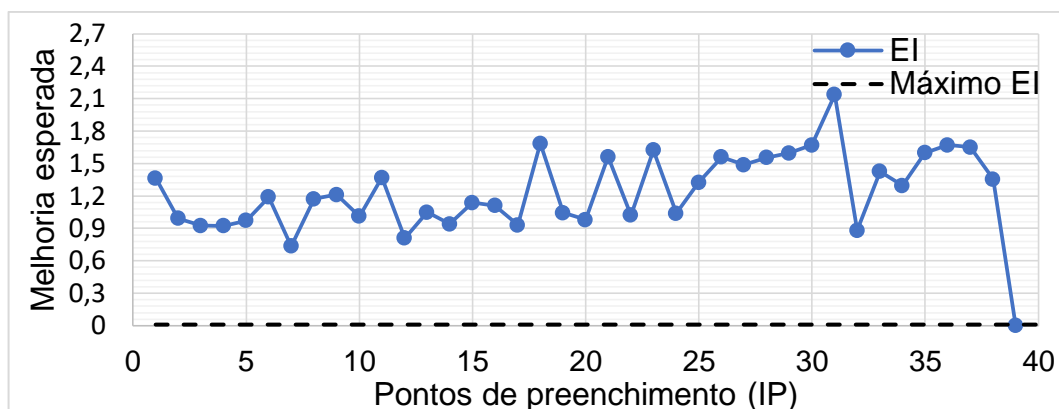
Figura 42 – Modos de vibração para o cilindro C-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com as variáveis de entrada e saída, o metamodelo Kriging foi treinado e o modelo numérico foi otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Foram adicionados 39 pontos ao modelo para atingir esse valor, totalizando 49 pontos para construir modelo. A Figura 43 apresenta a evolução dos valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento. O valor inicial para a métrica EI foi de 1,3659, atingindo um pico de 2,1371 no ponto 31. Ao final de 39 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0042, apresentando uma redução de 99,69% em relação ao valor inicial.

Figura 43 – Melhoria Esperada para o cilindro C-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com a otimização do modelo numérico finalizado, os valores das 4 primeiras frequências foram analisados. Assim como no caso do cilindro anterior, os valores

máximos e mínimos para cada uma das quatro frequências se apresentaram nos mesmos pontos. A Tabela 33 mostra os pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas.

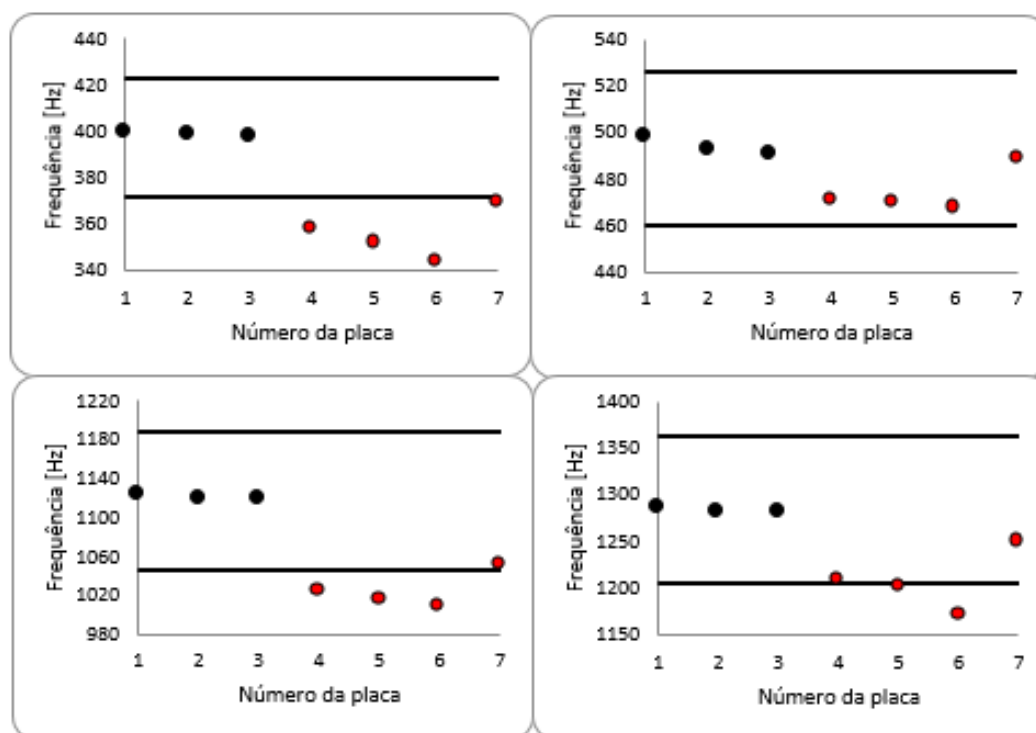
Tabela 33 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-B

| Frequência         | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$   | $f(4)$   |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|
| Mínimo             | 371,871 | 459,671 | 1045,854 | 1194,467 |
| Máximo             | 422,807 | 526,021 | 1187,185 | 1361,971 |
| Mínimo normalizado | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    |
| Máximo normalizado | 1,000   | 1,000   | 1,000    | 1,000    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos, foram criados gráficos contendo os intervalos de frequências intactas. A Figura 44 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 4 primeiras frequências naturais e 7 amostras experimentais. As 3 primeiras amostras são consideradas intactas e as 4 últimas sofreram algum tipo de dano.

Figura 44 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o cilindro C-B

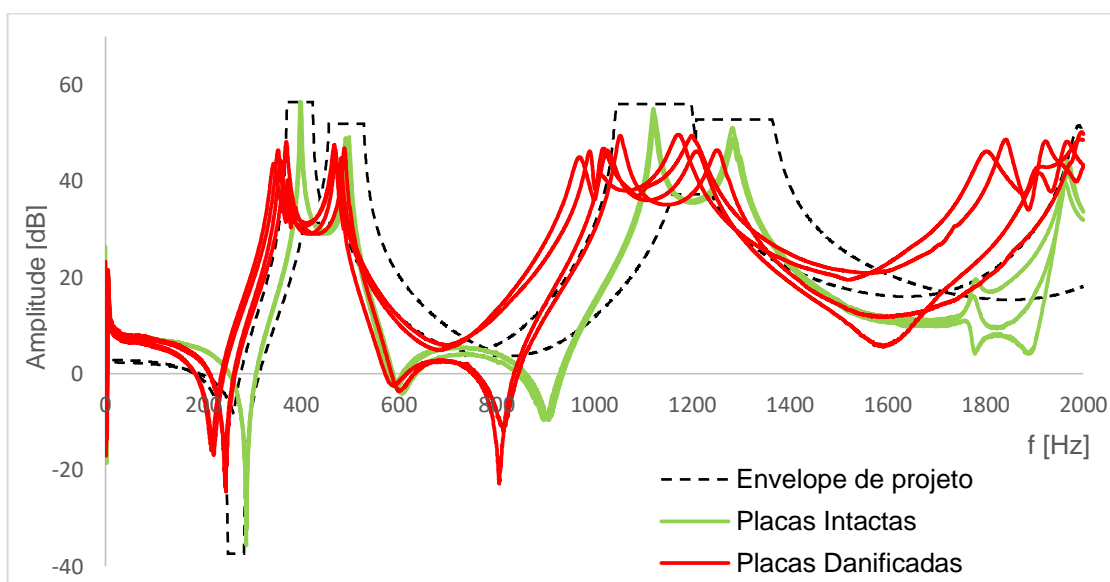


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foi possível verificar que para todos os gráficos os cilindros intactos apresentaram valores de frequência dentro dos limites estabelecidos. Pode-se concluir que é possível fazer uma análise previa para este caso, afirmando que as amostras 1, 2 e 3 se encontram intactas. Os cilindros danificados 4, 5 e 6 apresentaram valores fora dos limites para a 1ª, 3ª e 4ª frequência enquanto todas as amostras danificadas se apresentaram dentro dos limites para a 2ª frequência. O cilindro 7 apresentou todos os valores de frequência dentro dos intervalos criados. Com isso, as amostras 4, 5 e 6 estão danificadas, porém ao olhar somente para os intervalos de frequências a amostra 7 seria considerada intacta. Com isso, cria-se uma hipótese que seu dano é muito pequeno ou não é possível determinar se essa amostra apresenta falha somente pelo intervalo de frequências.

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, foram obtidas as FRFs através do *software* Abaqus™. A Figura 45 apresenta o envelope intacto, em conjunto com as FRFs dos 7 cilindros analisados. É possível verificar que o grupo de cilindros intactos se encontra ao centro do envelope intacto criado. Com isso, pode-se afirmar que as amostras intactas não apresentam defeitos de fabricação.

Figura 45 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao comparar as FRFs intactas com as danificadas, percebe-se que as danificadas apresentam valores menores para as frequências naturais o que as desloca à esquerda e as caracteriza como danificadas. Também é possível verificar

que uma FRF de cilindro danificado se encontra próxima às FRFs intactas. Essa amostra é referente ao cilindro 7, cujos valores de frequência plotados no gráfico anterior se apresentam próximos aos limites inferiores das frequências. Apesar de apresentar valores próximos para as frequências, pelas FRFs é possível verificar que o cilindro 7 se diferencia do grupo de cilindros intactos, caracterizando assim como um cilindro danificado.

Assim como no caso anterior, foi realizado uma análise dos índices de dano. Como os cilindros intactos utilizados no estudo não foram submetidos a algum tipo de dano, diferentes cilindros foram utilizados para determinar o índice de dano. A Tabela 34 apresenta os índices de dano encontrados para os 3 cilindros intactos em relação aos cilindros danificados. Para esse estudo foi utilizado a Força na posição 1 e o acelerômetro na posição 2. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores altos, o que caracteriza os cilindros 4 a 7 como danificados.

Tabela 34 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 (H<sub>21</sub>)

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |              |              |              |              |       |               |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------|
| Cilindro                                       | Danificada 4 | Danificada 5 | Danificada 6 | Danificada 7 | Média | Desvio Padrão |
| Intacta 1                                      | 3,266        | 5,463        | 8,165        | 2,075        | 4,742 | 2,320         |
| Intacta 2                                      | 2,336        | 4,055        | 6,168        | 1,405        | 3,491 | 1,815         |
| Intacta 3                                      | 1,998        | 3,542        | 5,441        | 1,161        | 3,035 | 1,630         |
| Média  | 2,533        | 4,353        | 6,591        | 1,547        | --    | --            |
| Desvio Padrão                                  | 0,536        | 0,812        | 1,152        | 0,386        | --    | --            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 35 traz os índices de dano para os cilindros intactos. Ao comparar entre cilindros distintos, foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, novamente foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos em sua estrutura.

Os índices de dano foram calculados novamente para os cilindros utilizando a força na posição 1 e o acelerômetro na posição 3. Os resultados podem ser observados no Apêndice B.

Tabela 35 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |           |           |           |       |               |
|--|-----------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Cilindro                                       | Intacta 1 | Intacta 2 | Intacta 3 | Média | Desvio Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000     | 0,279     | 0,423     | 0,234 | 0,176         |
| Intacta 2                                      | 0,218     | 0,000     | 0,113     | 0,110 | 0,089         |
| Intacta 3                                      | 0,297     | 0,101     | 0,000     | 0,133 | 0,123         |
| Média  | 0,172     | 0,127     | 0,179     | --    | --            |
| Desvio Padrão                                  | 0,126     | 0,115     | 0,179     | --    | --            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.5 CILINDRO DE COMPÓSITO CFRP (C-C)

Para o cilindro de fibra de carbono C-C, foram inseridos no programa os valores máximos e mínimos de cada variável de entrada e então obtido o Hipercubo Latino. A Tabela 36 mostra os resultados para as 10 amostras iniciais com 15 variáveis. As variáveis envolvidas são o comprimento  $L$  [mm], o diâmetro do cilindro  $D$  [mm], o ângulo da fibra de  $\theta_{90}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{30}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{-30}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{60}$  [°], o ângulo da fibra de  $\theta_{-60}$  [°], a espessura do cilindro  $T$  [mm], o módulo de Young longitudinal  $E_{11}$  [GPa] e transversal  $E_{22}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3  $G_{23}$  [GPa], no plano 1-3  $G_{13}$  [GPa] e no plano 1-2  $G_{12}$  [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m³].

Tabela 36 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 15 variáveis do cilindro C-C

| V              | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L              | 145,37 | 144,20 | 143,97 | 145,60 | 143,50 | 145,13 | 143,73 | 144,67 | 144,90 | 144,43 |
| T              | 163,72 | 163,77 | 163,63 | 163,59 | 163,68 | 163,54 | 163,50 | 163,86 | 163,81 | 163,90 |
| D              | 3,65   | 3,47   | 3,61   | 3,56   | 3,69   | 3,74   | 3,52   | 3,43   | 3,34   | 3,39   |
| $\theta_{90}$  | 89,67  | 91,00  | 89,22  | 89,44  | 89,00  | 90,56  | 90,11  | 89,89  | 90,78  | 90,33  |
| $\theta_{30}$  | 29,22  | 29,44  | 29,67  | 29,89  | 30,33  | 31,00  | 30,11  | 30,78  | 30,56  | 29,00  |
| $\theta_{-60}$ | -59,00 | -61,00 | -60,78 | -59,67 | -60,33 | -60,11 | -59,22 | -59,44 | -60,56 | -59,89 |
| $\theta_{60}$  | 59,44  | 60,78  | 60,33  | 59,22  | 59,00  | 59,67  | 60,11  | 60,56  | 59,89  | 61,00  |
| $\theta_{-30}$ | -31,00 | -29,67 | -29,44 | -30,78 | -30,33 | -29,22 | -30,11 | -30,56 | -29,00 | -29,89 |
| $E_{11}$       | 131,77 | 128,23 | 129,80 | 129,41 | 130,59 | 130,20 | 129,02 | 128,62 | 131,38 | 130,98 |
| $E_{22}$       | 10,79  | 11,51  | 11,10  | 11,41  | 11,00  | 10,69  | 11,30  | 10,59  | 11,20  | 10,89  |
| $G_{12}$       | 5,27   | 5,32   | 5,05   | 5,23   | 5,45   | 5,09   | 5,41   | 5,14   | 5,36   | 5,18   |
| $G_{23}$       | 3,14   | 3,09   | 3,17   | 2,93   | 2,98   | 3,01   | 3,06   | 3,04   | 3,12   | 2,96   |
| $\nu_{12}$     | 0,307  | 0,312  | 0,309  | 0,311  | 0,308  | 0,313  | 0,313  | 0,310  | 0,310  | 0,307  |
| $G_{13}$       | 5,32   | 5,27   | 5,18   | 5,36   | 5,23   | 5,05   | 5,09   | 5,14   | 5,45   | 5,41   |
| $\rho$         | 1566,8 | 1620,8 | 1580,3 | 1499,2 | 1593,8 | 1607,3 | 1512,7 | 1553,2 | 1539,7 | 1526,2 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os resultados obtidos para as variáveis de entrada, foi utilizado o software Abaqus™ para obter as 4 primeiras frequências naturais para as 10 amostras. Os

valores das frequências para cada uma das amostras são apresentados na Tabela 37.

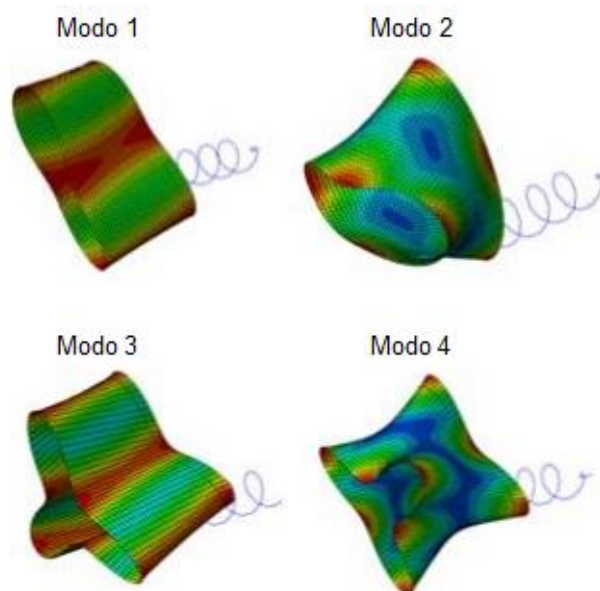
Tabela 37 – Frequências obtidas para as 10 rodadas do cilindro C-C

| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 432,41       | 570,41       | 1215,12      | 1446,57      |
| A2      | 402,36       | 528,24       | 1131,15      | 1342,43      |
| A3      | 421,64       | 558,52       | 1185,84      | 1418,24      |
| A4      | 428,96       | 567,34       | 1205,85      | 1438,32      |
| A5      | 430,92       | 575,98       | 1211,12      | 1456,52      |
| A6      | 435,15       | 574,33       | 1222,22      | 1455,80      |
| A7      | 423,04       | 560,08       | 1189,30      | 1420,14      |
| A8      | 404,24       | 535,88       | 1137,13      | 1359,22      |
| A9      | 399,81       | 527,99       | 1124,95      | 1340,95      |
| A10     | 405,88       | 532,95       | 1141,42      | 1355,57      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foi possível extrair do software os 4 primeiros modos de vibrar. A Figura 46 mostra os 4 modos de vibrar do cilindro de compósito CFRP.

Figura 46 – Modos de vibração para o cilindro C-C

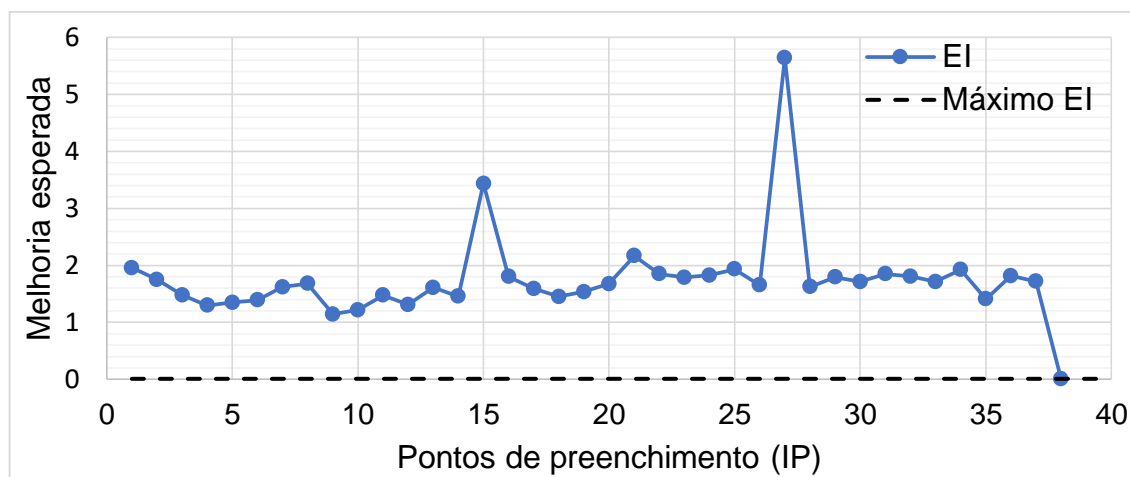


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O Kriging foi treinado e otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Foram adicionados 38 pontos ao modelo para atingir esse valor, totalizando 48 pontos para construir modelo. A Figura 47 apresenta a evolução dos valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento. O valor inicial para a métrica

EI foi de 1,9565, atingindo um pico de 5,6394 no ponto 27. Ao final de 38 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0041, apresentando uma redução de 99,79% em relação ao valor inicial.

Figura 47 – Melhoria Esperada para o cilindro C-C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 38 apresenta os dois pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas. É possível verificar que o ponto de mínimo apresenta as menores frequências para todos os modos e o ponto de máximo apresenta a maior frequência para o 1º, 2º e 4º modo, porém é muito próximo ao valor máximo do 3º modo.

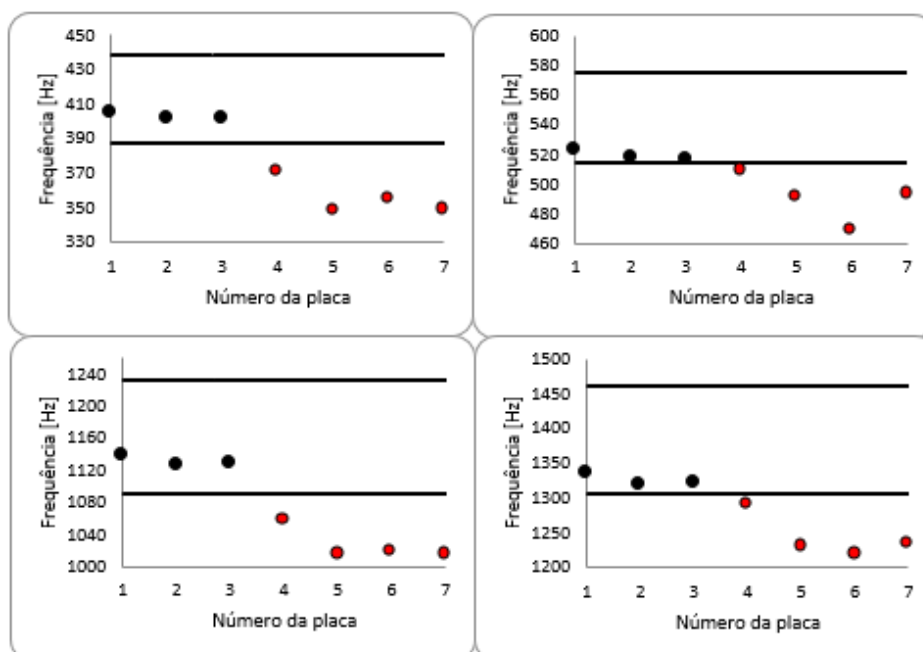
Tabela 38 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais do cilindro C-C

| Frequência         | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$   | $f(4)$   |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|
| Mínimo             | 387,885 | 514,875 | 1091,578 | 1306,328 |
| Máximo             | 438,567 | 575,982 | 1231,814 | 1461,370 |
| Mínimo normalizado | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    |
| Máximo normalizado | 1,000   | 0,996   | 1,000    | 1,000    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos, foram desenvolvidos gráficos contendo os intervalos de frequências naturais intactos. A Figura 48 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 4 primeiras frequências e 7 amostras experimentais.

Figura 48 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para o cilindro C-C



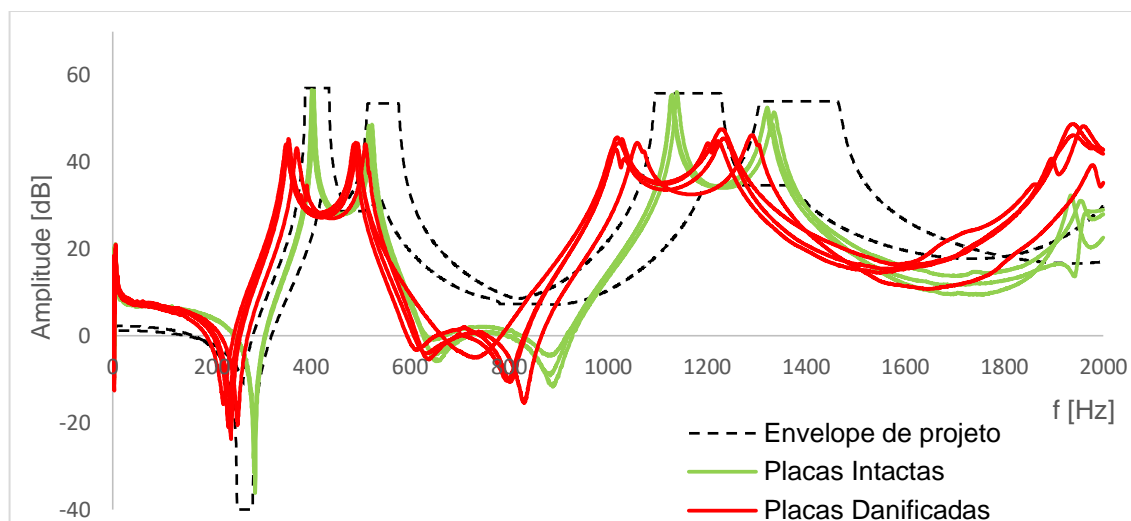
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As 3 primeiras amostras são consideradas intactas e as 4 últimas sofreram algum tipo de dano. Foi possível verificar que para todas as 4 frequências, as amostras intactas se localizavam dentro do limite estabelecido. Com isso, verificou-se que não houve problemas de fabricação. As amostras danificadas apresentaram todos os valores de frequência abaixo do limite mínimo estabelecido. Para o caso do cilindro C, pode-se concluir que as amostras 4 a 7 que apresentam valores inferiores, apresentam algum tipo de dano.

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, foram obtidas as FRFs através do Abaqus<sup>TM</sup>. A Figura 49 apresenta o envelope intacto, em conjunto com as FRFs dos 7 cilindros analisados anteriormente. É possível verificar que o grupo de cilindros intactos se encontra dentro dos limites estabelecidos com os picos próximos aos valores propostos pelo intervalo, comprovando que as amostras não apresentam defeitos de fabricação. Para o caso dos cilindros danificados, as FRFs são diferentes das FRFs intactas. Além disso, apresentam picos mais amortecidos. Assim, com a análise entre FRFs intactas e danificadas é possível concluir que as amostras 4 a 7 apresentam algum tipo de dano em sua estrutura.



Figura 49 – Envelope intacto e FRFs experimentais para o cilindro C-C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, foi realizada uma análise dos índices de dano. A Tabela 39 apresenta os índices de dano encontrados para os 3 cilindros intactos em relação aos cilindros danificados. Para esse estudo foram utilizados a Força na posição 1 e o acelerômetro na posição 2. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores semelhantes na média para todas as amostras analisadas, devido às FRFs intactas e danificadas estarem agrupadas em regiões diferentes.

Tabela 39 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |                 |                 |                 |                 |       |                  |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Danificada<br>4 | Danificada<br>5 | Danificada<br>6 | Danificada<br>7 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,046           | 1,684           | 1,422           | 1,326           | 1,119 | 0,634            |
| Intacta 2                                      | 0,042           | 1,695           | 1,432           | 1,336           | 1,126 | 0,640            |
| Intacta 3                                      | 0,264           | 1,070           | 0,868           | 0,794           | 0,749 | 0,298            |
| Média  | 0,117           | 1,483           | 1,241           | 1,152           | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 0,104           | 0,292           | 0,263           | 0,253           | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 40 traz os índices de dano para os cilindros intactos. Ao comparar entre cilindros distintos, foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos em sua estrutura.

Tabela 40 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 2 ( $H_{21}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |           |           |           |       |               |
|--|-----------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Cilindro                                       | Intacta 1 | Intacta 2 | Intacta 3 | Média | Desvio Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000     | 0,004     | 0,296     | 0,100 | 0,139         |
| Intacta 2                                      | 0,004     | 0,000     | 0,302     | 0,102 | 0,141         |
| Intacta 3                                      | 0,229     | 0,232     | 0,000     | 0,153 | 0,109         |
| Média  | 0,078     | 0,079     | 0,199     | --    | --            |
| Desvio Padrão                                  | 0,107     | 0,108     | 0,141     | --    | --            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os índices de dano foram calculados novamente para os cilindros utilizando a força na posição 1 e o acelerômetro na posição 3. Os resultados podem ser observados no Apêndice C.

#### 4.6 PLACA DE COMPÓSITO GFRP UNIDIRECIONAL (P-UD)

Para essas placas, foram adotadas 13 variáveis de entrada. Foi obtido o Hipercubo Latino para essas variáveis. A Tabela 41 mostra os resultados para as 10 amostras. As variáveis envolvidas e são o comprimento  $L$  [mm], a largura  $W$  [mm], ângulo da fibra de  $\theta_0$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{45}$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{-45}$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{90}$  [°], a espessura da placa  $T$  [mm], o módulo de Young longitudinal  $E_{11}$  [GPa], o módulo de Young transversal  $E_{22}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3  $G_{23}$  [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 1-2  $G_{12}$  [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m³].

Tabela 41 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 13 variáveis da placa P-UD

| V                                | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>W</b>                         | 153,22 | 153,67 | 151,44 | 151,89 | 152,33 | 152,78 | 154,11 | 155,00 | 154,56 | 151,00 |
| <b>L</b>                         | 101,50 | 101,00 | 100,50 | 100,00 | 99,00  | 102,00 | 99,50  | 102,50 | 103,50 | 103,00 |
| <b><math>\theta_{45}</math></b>  | 44,22  | 44,89  | 45,56  | 45,78  | 45,33  | 45,11  | 44,00  | 46,00  | 44,44  | 44,67  |
| <b><math>\theta_{-45}</math></b> | -45,56 | -45,78 | -46,00 | -44,22 | -44,67 | -44,44 | -45,33 | -44,89 | -45,11 | -44,00 |
| <b><math>\theta_0</math></b>     | 1,00   | 0,33   | 0,78   | -1,00  | -0,78  | -0,56  | 0,11   | -0,33  | 0,56   | -0,11  |
| <b><math>\theta_{90}</math></b>  | 90,56  | 90,11  | 89,67  | 89,00  | 89,89  | 90,33  | 89,22  | 90,78  | 91,00  | 89,44  |
| <b>T</b>                         | 1,78   | 1,76   | 1,64   | 1,80   | 1,60   | 1,69   | 1,71   | 1,67   | 1,73   | 1,62   |
| <b><math>E_{11}</math></b>       | 38,38  | 39,56  | 38,21  | 38,55  | 38,04  | 39,22  | 39,05  | 38,88  | 38,72  | 39,39  |
| <b><math>E_{22}</math></b>       | 14,39  | 14,17  | 13,10  | 12,88  | 13,31  | 14,60  | 13,53  | 13,96  | 12,67  | 13,74  |
| <b><math>G_{23}</math></b>       | 2,33   | 2,43   | 2,27   | 2,38   | 2,11   | 2,54   | 2,17   | 2,49   | 2,22   | 2,06   |
| <b><math>\nu_{12}</math></b>     | 0,380  | 0,341  | 0,358  | 0,347  | 0,330  | 0,363  | 0,369  | 0,336  | 0,352  | 0,374  |
| <b><math>G_{12}</math></b>       | 7,01   | 7,07   | 7,40   | 7,12   | 6,90   | 6,96   | 7,29   | 7,34   | 7,23   | 7,18   |
| <b><math>\rho</math></b>         | 1551,8 | 1732,6 | 1526,0 | 1629,3 | 1706,8 | 1500,2 | 1577,7 | 1603,5 | 1655,1 | 1681,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foram determinadas as 6 primeiras frequências naturais para as 10 amostras. Os valores das frequências naturais para cada uma das amostras são apresentados na Tabela 42.

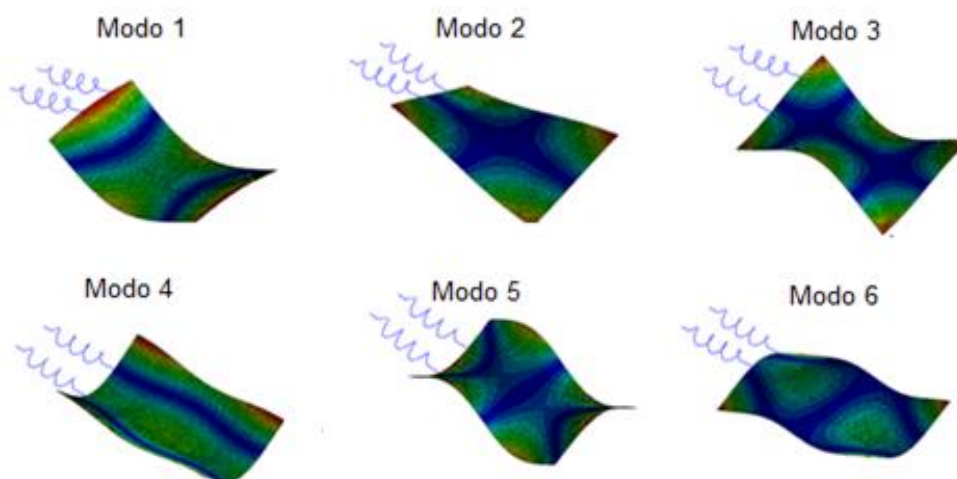
Tabela 42 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-UD

| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz | $f(5)$<br>Hz | $f(6)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 245,76       | 263,33       | 566,08       | 627,90       | 709,70       | 829,04       |
| A2      | 234,75       | 245,08       | 537,10       | 589,76       | 665,06       | 775,96       |
| A3      | 234,71       | 250,08       | 538,69       | 585,85       | 677,36       | 772,15       |
| A4      | 248,43       | 260,22       | 568,07       | 622,03       | 707,12       | 815,94       |
| A5      | 216,17       | 223,07       | 493,15       | 546,89       | 607,93       | 713,06       |
| A6      | 240,33       | 256,61       | 553,10       | 602,95       | 690,88       | 803,00       |
| A7      | 239,96       | 248,84       | 548,46       | 621,44       | 677,77       | 803,97       |
| A8      | 226,09       | 237,98       | 517,69       | 562,52       | 645,73       | 741,79       |
| A9      | 225,98       | 240,48       | 518,37       | 557,01       | 650,59       | 738,39       |
| A10     | 218,37       | 237,97       | 504,29       | 536,30       | 635,57       | 724,70       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Obteve-se os 6 primeiros modos de vibrar da placa de GFRP. A Figura 50 mostra esses modos, em que se verifica o 1° modo de flexão, 1° modo de torção, 2° modo de torção, 2° modo de flexão, 3° modo de torção e 4° modo de torção.

Figura 50 – Modos de vibração para a placa P-UD

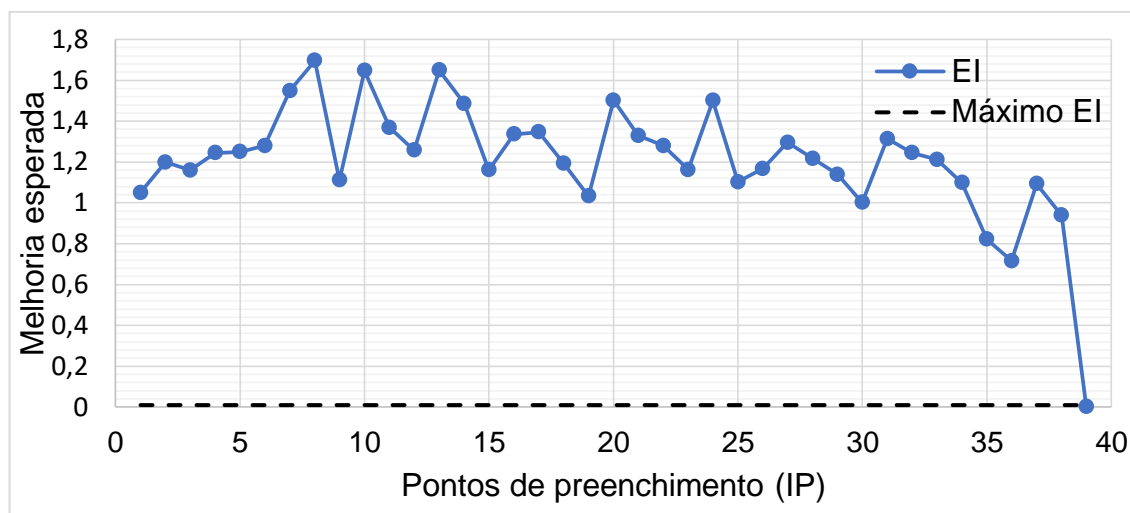


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após o metamodelo Kriging treinado, o modelo numérico foi otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Foram adicionados 39 pontos ao modelo, totalizando 49 pontos para construir modelo. A Figura 51 apresenta a evolução dos valores de EI para cada rodada de adição de pontos de preenchimento. O valor inicial

para a métrica EI foi de 1,0495, atingindo um pico de 1,6959 no ponto 8. Ao final de 39 pontos o valor obtido para a métrica foi de 0,0023, apresentando uma redução de 99,78% em relação ao valor inicial.

Figura 51 – Melhoria Esperada para a placa P-UD



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final da otimização do modelo numérico, os valores das 6 primeiras frequências foram analisados para cada ponto. Verificou-se através da normalização que para a frequência mínima o ponto escolhido apresentou todos os valores mínimos entre os pontos do modelo. Para o ponto de máximo apenas as frequências 2,4,5 e 6 apresentaram os valores máximos, porém os valores normalizados para as frequências 1 e 3 apresentaram valores muito próximos a 1. A Tabela 43 apresenta os dois pontos selecionados para os limites, assim como os valores das frequências normalizadas.

Tabela 43 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-UD

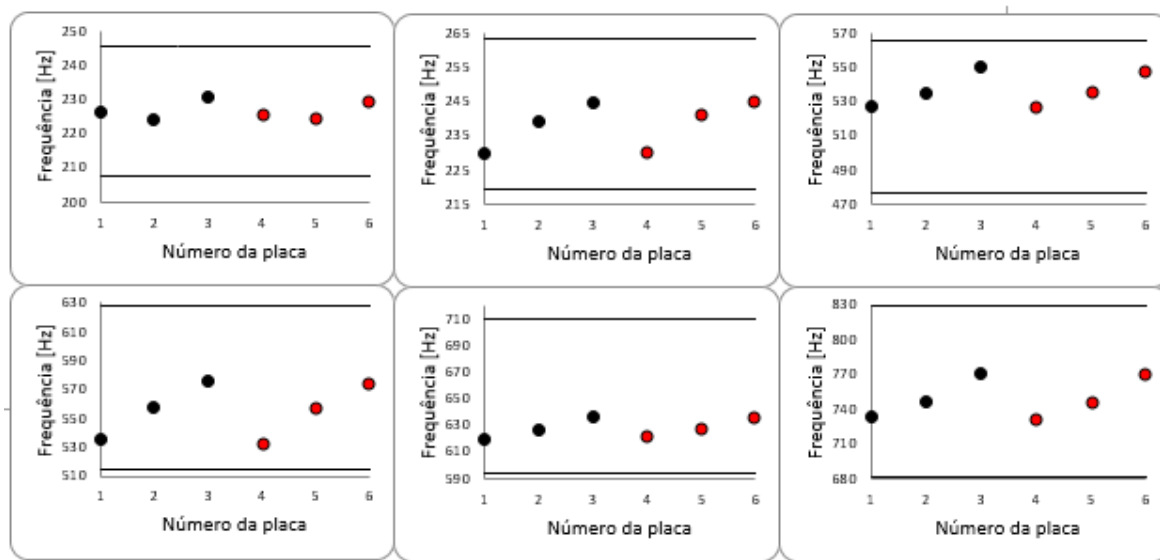
| Frequência                | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$  | $f(4)$  | $f(5)$  | $f(6)$  |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Mínimo</b>             | 207,596 | 219,587 | 476,064 | 513,027 | 594,387 | 681,896 |
| <b>Máximo</b>             | 248,433 | 263,329 | 568,065 | 627,899 | 709,700 | 829,039 |
| <b>Mínimo normalizado</b> | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,012   | 0,000   | 0,000   |
| <b>Máximo normalizado</b> | 0,935   | 1,000   | 0,978   | 1,000   | 1,000   | 1,000   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos pelo modo computacional, criou-se gráficos contendo os intervalos de frequências naturais intactas. A Figura 52

apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 6 primeiras frequências naturais e 6 amostras experimentais.

Figura 52 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa P-UD

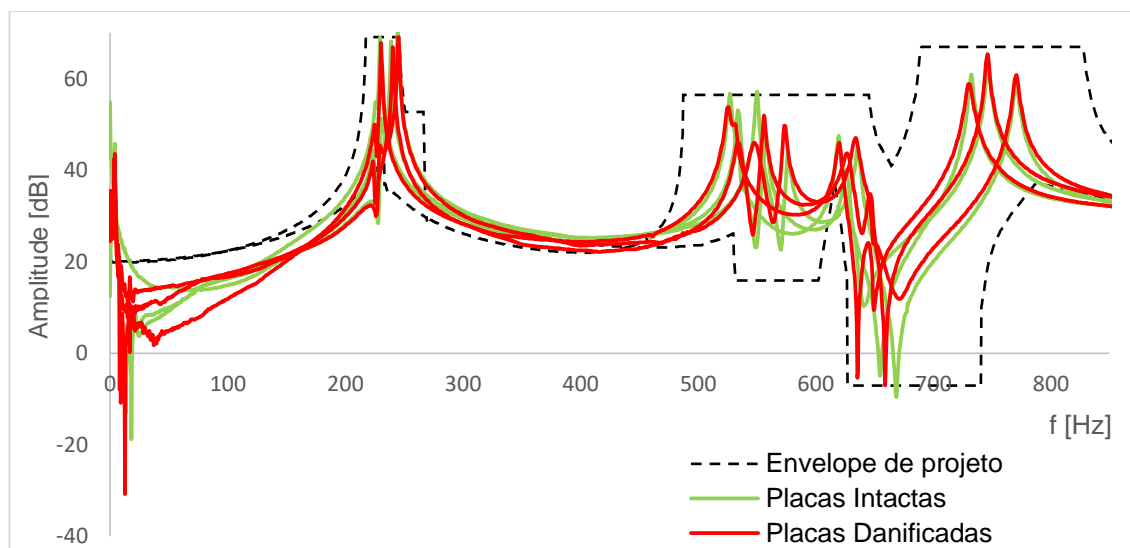


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As 3 primeiras amostras são consideradas intactas e as 3 últimas sofreram algum tipo de dano. Verificou-se que todas as amostras intactas e todas as amostras danificadas se encontravam dentro dos limites estabelecidos para cada frequência. Assim, foi possível definir que as amostras intactas não apresentavam defeitos de fabricação. Observou-se que as amostras intactas e danificadas 1 e 3, 2 e 4, 5 e 6 apresentavam valores semelhantes para suas frequências.

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, obteve-se as FRFs através do Software Abaqus<sup>TM</sup>. A Figura 53 apresenta o envelope intacto criado a partir desses pontos, em conjunto com as FRFs das 6 placas analisadas. Para esse envelope, consideraram-se os dados extraídos do acelerômetro no ponto 2 e impacto do martelo no ponto 1. É possível verificar que as placas intactas se encontram dentro do envelope de projeto, confirmando que não apresentam problemas no processo de fabricação. Pequenas diferenças entre as FRFs intactas e danificadas são notadas próximo entre 550 e 600 Hz. Com os resultados apresentados pelas FRFs intactas e danificadas, torna-se difícil definir quais amostras apresentam dano.

Figura 53 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-UD ( $H_{21}$ )

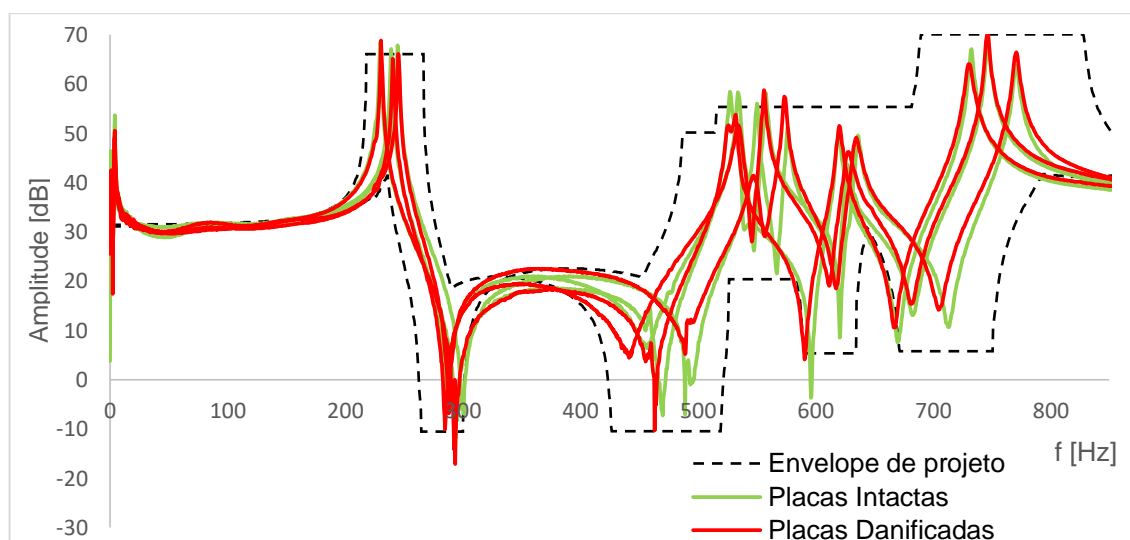


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também se criou um envelope para os dados extraídos do acelerômetro no ponto 3 e o impacto do martelo no ponto 1. A Figura 54 apresenta o envelope de projeto em conjunto com as FRFs das 6 placas analisadas.

Para esse caso, também é possível verificar que as placas intactas se encontram no intervalo do envelope proposto, caracterizando por não apresentar defeitos. Quando verificado entre FRFs danificadas e intactas percebe-se que os picos das FRFs danificadas se diferenciam das FRFs intactas nas faixas de 450 a 750 Hz.

Figura 54 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-UD ( $H_{31}$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, realizou-se uma análise dos índices de dano. Para isso, foi comparado valores de amplitude e fase de placas inicialmente intactas que posteriormente foram danificadas, ou seja, dados intactos e danificados de uma mesma amostra. A Tabela 44 apresenta os índices de dano encontrados para as 3 placas analisadas. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores maiores para os dados analisados através do acelerômetro 3, semelhante ao observado nas FRFs anteriores, caracterizando o dano.

Tabela 44 – Índices de dano obtidos para a placa P-UD

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 1024 Hz |                 |                 |       |               |
|--|-----------------|-----------------|-------|---------------|
| Placa  | H <sub>21</sub> | H <sub>31</sub> | Média | Desvio Padrão |
| 1  | 2,632           | 2,146           | 2,389 | 0,243         |
| 2  | 0,149           | 1,003           | 0,576 | 0,427         |
| 3  | 1,205           | 1,871           | 1,538 | 0,333         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.7 PLACA DE COMPÓSITO GFRP BIDIRECIONAL (P-BD)

Para essas placas, foram adotadas 13 variáveis de entrada. Foi obtido o Hipercubo Latino para essas variáveis. A Tabela 41 mostra os resultados para as 10 amostras. As variáveis envolvidas e são o comprimento L [mm], a largura W [mm], ângulo da fibra de  $\theta_0$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{45}$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{-45}$  [°], ângulo da fibra de  $\theta_{90}$  [°], a espessura da placa T [mm], o módulo de Young longitudinal E<sub>11</sub> [GPa], o módulo de Young transversal E<sub>22</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 2-3 G<sub>23</sub> [GPa], o módulo de cisalhamento no plano 1-2 G<sub>12</sub> [GPa], o coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$  e a densidade  $\rho$  [Kg/m³].

Tabela 45 – Hipercubo latino para 10 rodadas e 13 variáveis da placa P-BD

| V               | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     | A6     | A7     | A8     | A9     | A10    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| W               | 149,67 | 150,00 | 149,33 | 149,00 | 149,22 | 149,11 | 149,56 | 149,44 | 149,78 | 149,89 |
| L               | 99,14  | 100,87 | 101,90 | 100,52 | 99,49  | 101,21 | 101,56 | 100,18 | 99,83  | 98,80  |
| $\theta_{45}$   | 46,00  | 44,22  | 44,44  | 45,56  | 44,89  | 44,67  | 45,33  | 45,78  | 44,00  | 45,11  |
| $\theta_{-45}$  | -44,22 | -44,89 | -44,44 | -45,56 | -44,67 | -45,11 | -45,33 | -46,00 | -45,78 | -44,00 |
| $\theta_0$      | 0,78   | -0,78  | 0,56   | 0,33   | -0,11  | -1,00  | 1,00   | -0,56  | -0,33  | 0,11   |
| $\theta_{90}$   | 90,78  | 89,44  | 89,00  | 89,22  | 91,00  | 90,56  | 90,33  | 90,11  | 89,89  | 89,67  |
| T               | 1,57   | 1,54   | 1,52   | 1,68   | 1,61   | 1,63   | 1,70   | 1,50   | 1,59   | 1,66   |
| E <sub>11</sub> | 33,21  | 33,16  | 33,33  | 33,04  | 33,50  | 33,10  | 33,44  | 33,39  | 33,56  | 33,27  |
| E <sub>22</sub> | 30,39  | 30,16  | 30,33  | 30,50  | 30,56  | 30,10  | 30,27  | 30,21  | 30,44  | 30,04  |
| G <sub>23</sub> | 1,50   | 1,29   | 1,18   | 1,23   | 1,34   | 1,66   | 1,39   | 1,45   | 1,61   | 1,55   |
| $\nu_{12}$      | 0,290  | 0,303  | 0,297  | 0,323  | 0,337  | 0,350  | 0,310  | 0,343  | 0,317  | 0,330  |
| G <sub>12</sub> | 2,77   | 2,82   | 2,88   | 2,93   | 3,04   | 3,09   | 2,66   | 2,61   | 2,72   | 2,98   |
| $\rho$          | 1546,9 | 1514,9 | 1600,2 | 1589,6 | 1557,6 | 1504,2 | 1578,9 | 1536,2 | 1568,2 | 1525,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Obteve-se os valores para as 6 primeiras frequências naturais para as 10 amostras através de uma simulação numérica. Os valores das frequências para cada uma das amostras são apresentados nas linhas da Tabela 46.

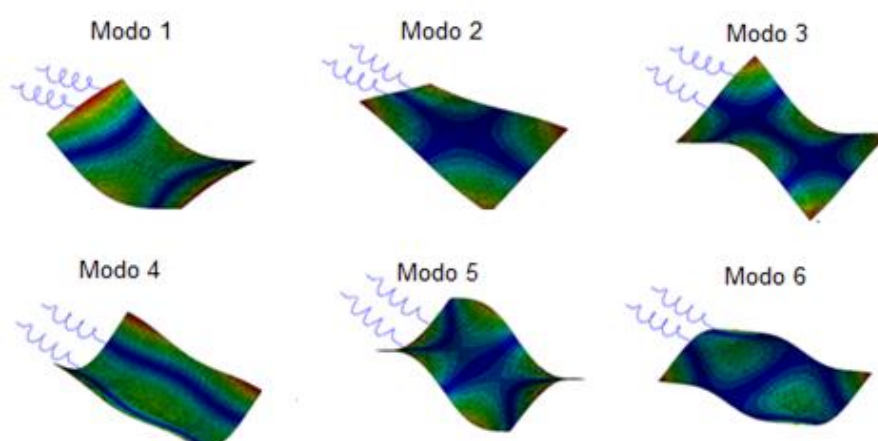
Tabela 46 – Frequências naturais obtidas para as 10 rodadas da placa P-BD

| Amostra | $f(1)$<br>Hz | $f(2)$<br>Hz | $f(3)$<br>Hz | $f(4)$<br>Hz | $f(5)$<br>Hz | $f(6)$<br>Hz |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A1      | 193,90       | 195,32       | 445,15       | 488,49       | 523,95       | 670,96       |
| A2      | 189,10       | 193,08       | 434,53       | 471,83       | 515,00       | 656,17       |
| A3      | 181,84       | 187,87       | 418,71       | 445,56       | 497,38       | 628,66       |
| A4      | 202,34       | 209,83       | 466,57       | 511,79       | 556,22       | 713,01       |
| A5      | 199,65       | 205,62       | 459,93       | 513,72       | 548,24       | 706,93       |
| A6      | 200,26       | 211,31       | 463,94       | 510,77       | 556,84       | 714,50       |
| A7      | 202,77       | 207,93       | 466,62       | 503,23       | 551,54       | 707,78       |
| A8      | 181,90       | 185,96       | 419,19       | 466,96       | 495,37       | 648,74       |
| A9      | 193,48       | 196,53       | 445,21       | 491,91       | 525,17       | 679,47       |
| A10     | 205,79       | 209,35       | 472,88       | 532,29       | 561,74       | 724,67       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foram obtidos os 6 primeiros modos de vibrar da placa. A Figura 55 mostra os modos de vibrar da placa, em que é possível verificar o 1º modo de flexão, 1º modo de torção, 2º modo de torção, 2º modo de flexão, 3º modo de torção e 4º modo de torção respectivamente.

Figura 55 – Modos de vibração para a placa P-BD



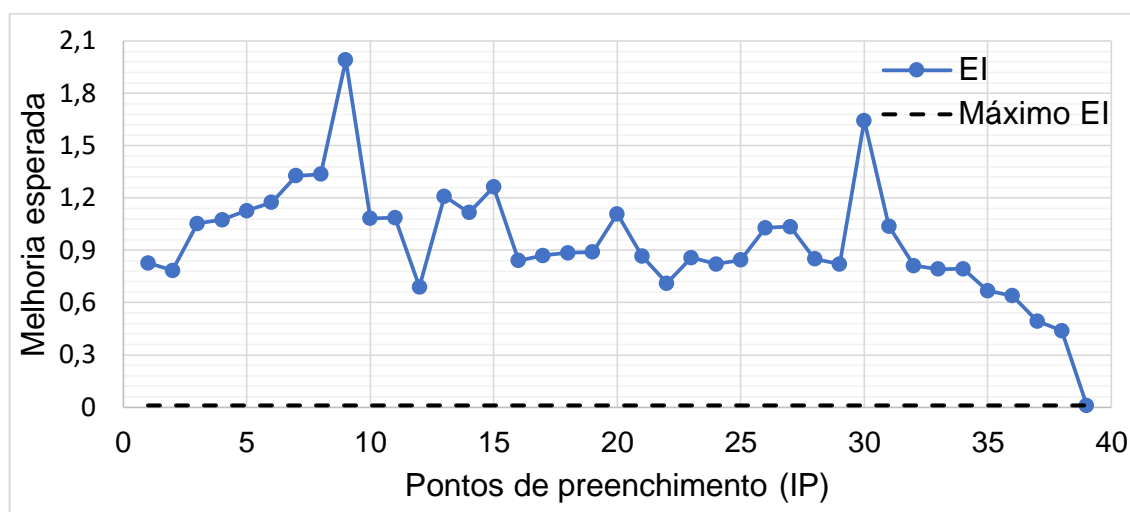
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após o metamodelo Kriging treinado, o modelo numérico foi otimizado até que o valor da métrica EI fosse inferior a  $10^{-2}$ . Adicionou-se 39 pontos, totalizando 49 pontos para construir modelo. A Figura 56 apresenta a evolução dos valores de EI. O valor inicial para a métrica EI foi de 0,8272, atingindo um pico de 1,9998 no ponto 9.



Ao final de 39 pontos, obteve-se um valor para a métrica de 0,0014, apresentando uma redução de 99,83% em relação ao valor inicial.

Figura 56 – Melhoria Esperada para a placa P-BD



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final da otimização do modelo numérico, analisaram-se os valores das 6 primeiras frequências. Diferente do caso anterior, os valores máximos e mínimos para cada uma das frequências se apresentaram nos mesmos pontos. Assim, ao realizar a normalização das frequências foi verificado um valor nulo para todos os valores das frequências mínimas e um valor unitário para todos os valores das frequências máximas. A Tabela 47 apresenta os dois pontos selecionados, assim como os valores das frequências normalizadas.

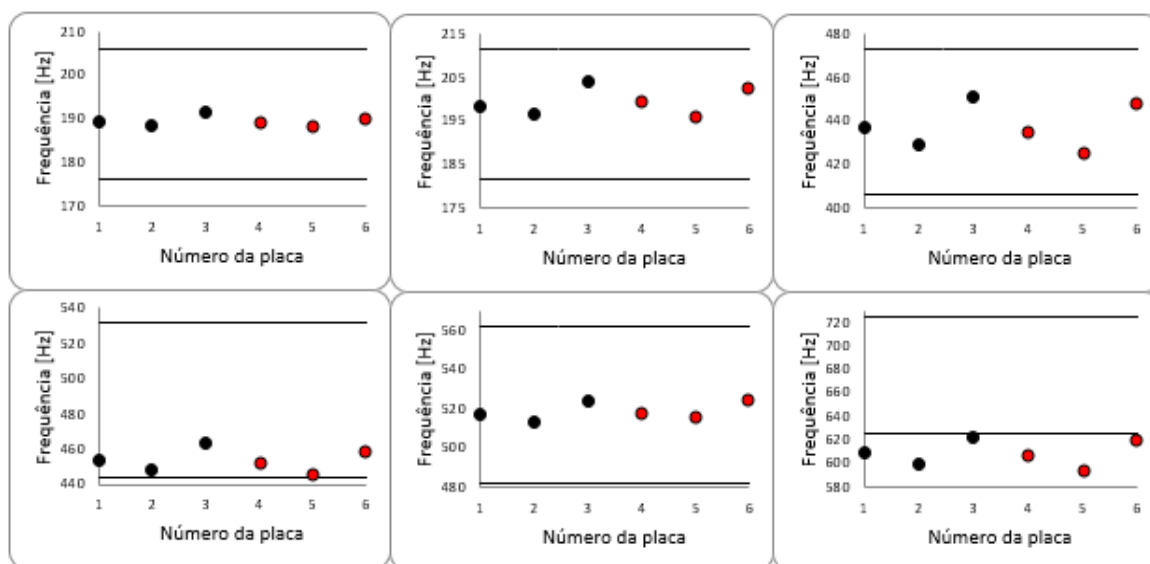
Tabela 47 – Limites máximos e mínimos para as frequências naturais da placa P-BD

| Frequência         | $f(1)$  | $f(2)$  | $f(3)$  | $f(4)$  | $f(5)$  | $f(6)$  |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mínimo             | 176,016 | 181,753 | 406,456 | 443,891 | 481,585 | 624,392 |
| Máximo             | 205,791 | 211,308 | 472,876 | 532,288 | 561,737 | 724,674 |
| Mínimo normalizado | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,046   | 0,000   | 0,031   |
| Máximo normalizado | 1,000   | 0,934   | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os limites de frequência definidos pelo modo computacional, gerou-se os gráficos contendo os intervalos de frequências intactas. A Figura 57 apresenta os limites máximos e mínimos obtidos pelo modelo computacional para as 6 primeiras frequências e 6 amostras experimentais. As 3 primeiras amostras são consideradas intactas e as 3 últimas sofreram algum tipo de dano.

Figura 57 – Limites de frequências naturais e resultados experimentais para a placa P-BD



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

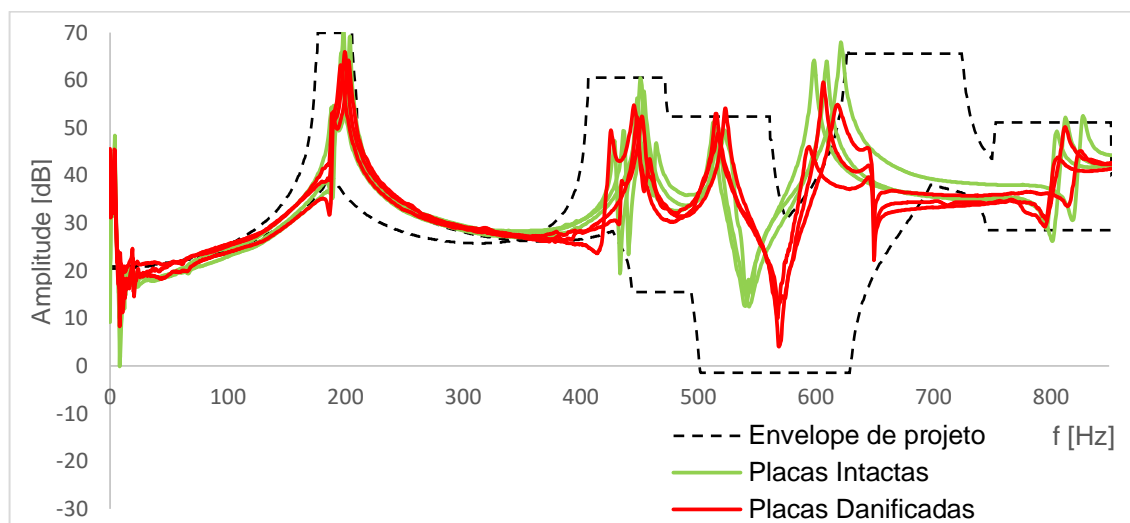
Verificou-se que em todas as amostras intactas e todas as amostras danificadas para as 5 primeiras frequências se encontravam dentro dos limites estabelecidos pelo intervalo e para a 6ª frequência todos os valores se encontravam fora dos limites estabelecidos. Por essa análise, todas as amostras intactas apresentariam defeitos de fabricação. Porém, o problema relacionado a 6ª frequência pode ter ocorrido devido as propriedades mecânicas utilizadas serem de outros autores, com uma gramatura da fibra um menor. Observou-se que as amostras intactas e danificadas 1 e 3, 2 e 4, 5 e 6 apresentavam valores semelhantes para suas frequências.

Após efetuar a análise do intervalo das frequências, obteve-se as FRFs através do Abaqus™. A Figura 58 apresenta o envelope intacto criado a partir desses pontos, em conjunto com as FRFs das 6 placas analisadas anteriormente. Para esse envelope, considerou-se os dados extraídos do acelerômetro no ponto 2 e impacto do martelo no ponto 1.

Verificou-se que as placas intactas ficaram no envelope de projeto com exceção do 6 modo. Pela metodologia utilizada, isso caracteriza um defeito de fabricação, porém devido ao demais frequências estarem no intervalo e os dados utilizados serem de outros autores, a diferença de análise pode ser justificada. Ao analisar as FRFs intactas com as danificadas, diferenças consideráveis foram

observadas entre as frequências de 450 e 650 Hz, podendo caracterizar assim que as placas 4 a 6 apresentavam algum tipo de dano em suas estruturas.

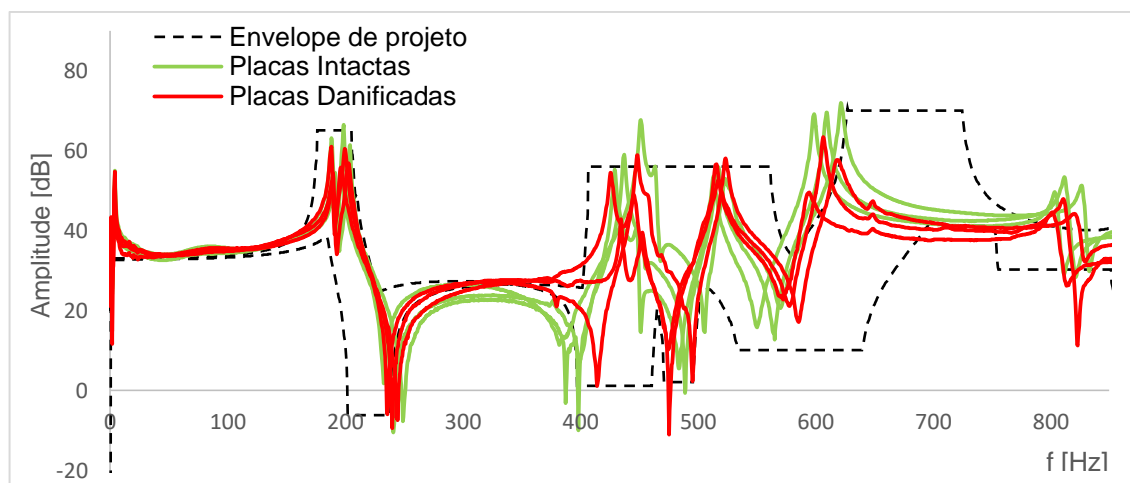
Figura 58 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-BD ( $H_{21}$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foi plotado o envelope para os dados extraídos do acelerômetro no ponto 3 e o impacto do martelo no ponto 1. A Figura 59 apresenta o envelope intacto criado a partir desses pontos, em conjunto com as FRFs das 6 placas analisadas. Para esse estudo, é possível verificar que as placas intactas e as placas danificadas apresentam divergências em suas amplitudes a partir do valor de frequência de 350Hz.

Figura 59 – Envelope intacto e FRFs experimentais para a placa P-BD ( $H_{31}$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, realizou-se uma análise dos índices de dano. A Tabela 48 apresenta os índices de dano encontrados para as 3 placas analisadas. Pode-se verificar que os índices de dano apresentaram valores altos para ambos os casos, sendo uns mais expressivos para os dados analisados através do acelerômetro 3 e outros do acelerômetro 2. Com isso, pode-se afirmar que ambas as amostras apresentam dano em sua estrutura.

Tabela 48 – Índices de dano obtidos para a placa P-BD

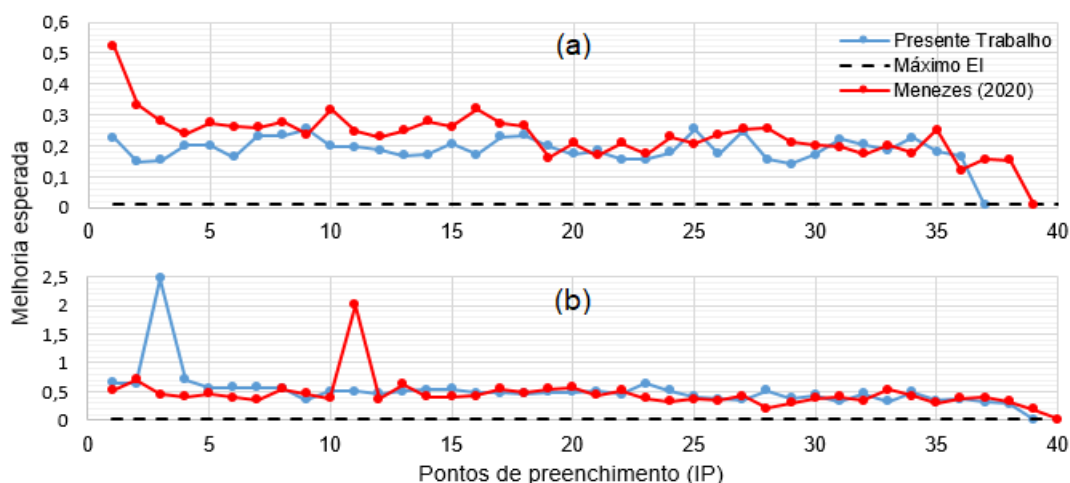
| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 1024 Hz |                 |                 |       |               |
|--|-----------------|-----------------|-------|---------------|
| Placa  | H <sub>21</sub> | H <sub>31</sub> | Média | Desvio Padrão |
| 1  | 0,609           | 0,267           | 0,438 | 0,171         |
| 2  | 2,578           | 0,778           | 1,678 | 0,900         |
| 3  | 0,730           | 0,454           | 0,592 | 0,138         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 4.8 PONTOS DE PREENCHIMENTO DOS ESTUDOS REALIZADOS

Após efetuar as simulações para as placas e os cilindros CFRP, comparou-se o comportamento gráfico e os números de *Infill Points* necessários para que o critério de parada fosse atingido para cada um dos casos. Comparou-se os resultados obtidos para as placas de CFRP aos resultados encontrados em Menezes (2020). A Figura 60 apresenta os resultados obtidos para as placas de compósito de CFRP para os ensaios A e B.

Figura 60 – Diferença entre o resultado obtido para o número de pontos de preenchimento e a literatura para a placa de CFRP (a) P-A e (b) P-B

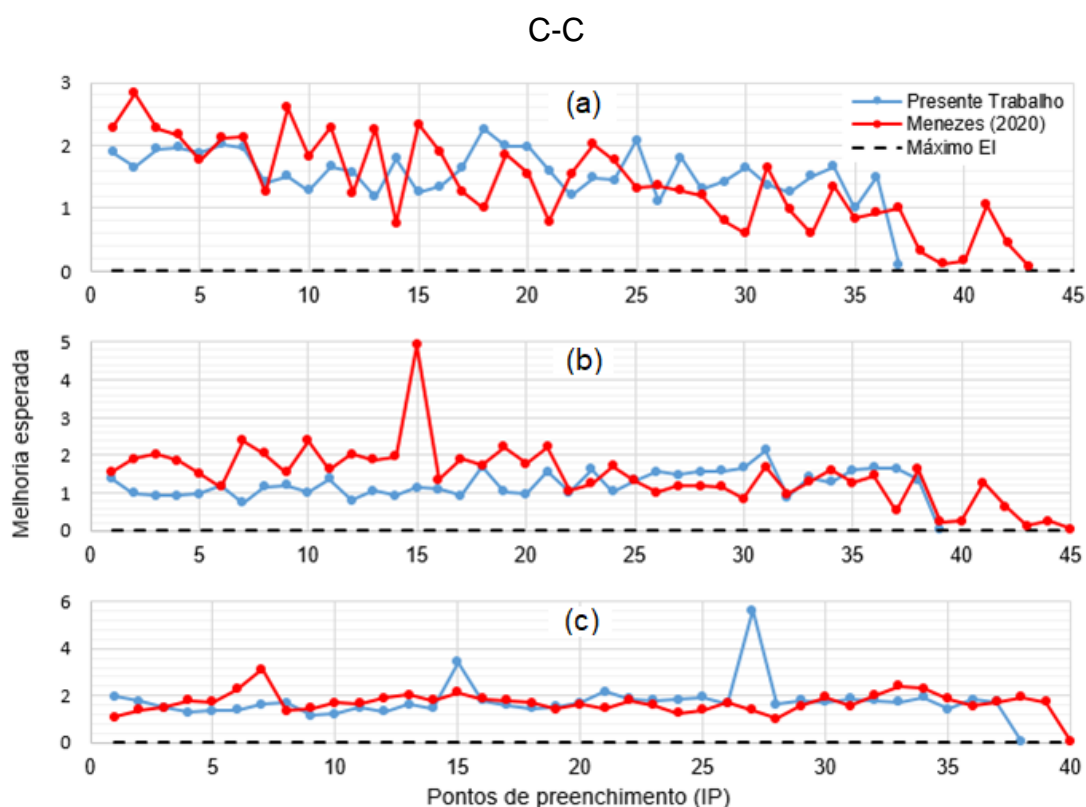


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em ambos os gráficos é possível verificar que os valores de EI são próximos ou inferiores aos resultados encontrados por Menezes (2020), o que leva a sugerir uma melhora na busca do ponto inicial. Essa melhora pode estar relacionada às métricas adicionadas no Hipercubo Latino. Para ambos os casos, houve uma diminuição dos pontos de preenchimento adicionados, o que também pode estar relacionado ao Hipercubo, visto que durante o processo da busca por novos pontos o mesmo é utilizado.

Os resultados obtidos para os gráficos dos cilindros C-A, C-B e C-C também foram comparados aos resultados apresentados por Menezes (2020). A Figura 61 apresenta os resultados obtidos para os cilindros de compósito com fibra de carbono para os ensaios A, B e C.

Figura 61 – Diferença entre o resultado obtido para o número de pontos de preenchimento e a literatura para o cilindro de fibra de carbono (a) C-A, (b) C-B e (c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para os gráficos dos cilindros C-A e C-B verificou-se que o valor de EI no ponto inicial foi inferior ao encontrado por Menezes (2020), porém para o cilindro C-C isso não aconteceu. Pode-se notar em todos os casos houve a necessidade de uma

quantia menor de pontos de preenchimento para que o critério estabelecido fosse atingido, gerando assim um ganho computacional e uma redução de tempo nas simulações. A diferença da quantia de pontos adicionados para o cilindro C não foi muito elevada quando comparada aos cilindros A e B. Isso pode ter ocorrido devido ao valor de EI do cilindro C ser maior para o estudo realizado em relação à literatura comparada, necessitando da adição de mais pontos para atingir o critério de parada.

Foram calculadas as diferenças entre os resultados obtidos pela literatura e os resultados obtidos neste trabalho. A Tabela 49 apresenta esses resultados em que se pode observar ganhos de até 14% em relação a quantidade de pontos de preenchimento adicionados. Esse ganho é considerável visto que os últimos pontos para cada ensaio apresentam um tempo próximo a 24 horas para serem adicionados ao modelo.

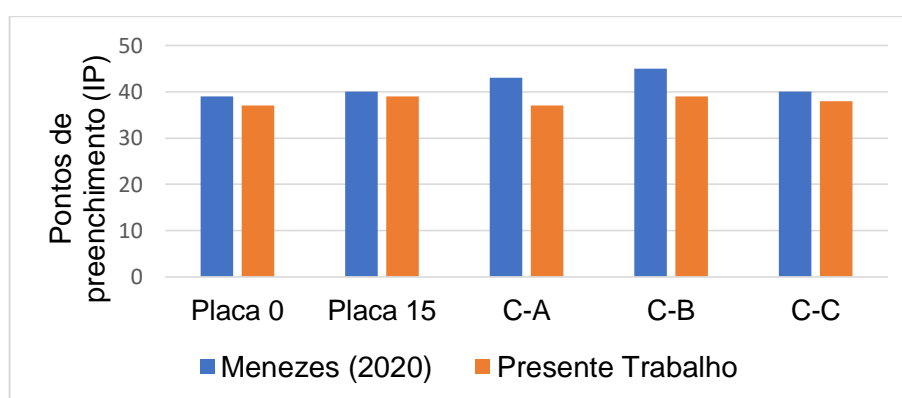
Tabela 49 – Número de IP em relação a literatura

| Amostra      | Menezes (2020) | Presente trabalho | Diferença | Redução |
|--------------|----------------|-------------------|-----------|---------|
| Placa P-A    | 39             | 37                | -2        | -5%     |
| Placa P-B    | 40             | 39                | -1        | -3%     |
| Cilindro C-A | 43             | 37                | -6        | -14%    |
| Cilindro C-B | 45             | 39                | -6        | -13%    |
| Cilindro C-C | 40             | 38                | -2        | -5%     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, os resultados obtidos foram apresentados em um gráfico de barras para facilitar a visualização do ganho verificado. A Figura 62 apresenta os resultados para as placas e os cilindros de fibra de carbono.

Figura 62 – Diferença obtida para o número de IP em relação a literatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal do trabalho foi desenvolver uma metodologia baseada em análises dinâmicas e no metamodelo Kriging, algoritmo EGO e a métrica de melhoria esperada, para determinar um envelope de projeto e avaliar dano de estruturas fabricadas de material compósito. Para isso, selecionou-se o Hipercubo Latino para determinar os valores das variáveis de projeto, das amostras iniciais e das amostras adicionadas ao modelo e o *software* comercial Abaqus<sup>TM</sup> com o objetivo de determinar as frequências naturais e FRFs para as estruturas.

O trabalho contribuiu para o estudo de detecção de defeitos/danos em estruturas de material compósito aplicando técnicas não-destrutivas, propondo a utilização das frequências naturais, do envelope de projeto e dos índices de dano para identificar e mensurar possíveis defeitos e/ou danos. De modo geral, foi possível identificar defeitos de fabricação e danos devido ao impacto, porém é necessária uma aquisição de dados precisa para que não ocorresse considerações errôneas durante a análise. Além disso, foi possível verificar a influência da adição de métricas ao Hipercubo Latino, colaborando no desenvolvimento do metamodelo, diminuindo o custo computacional e consequentemente proporcionando um ganho de tempo ao final da simulação.

Ao analisar os resultados obtidos para os limites de frequências das placas de CFRP (P-A e P-B), foi possível estimar a presença de defeitos no processo de fabricação para algumas placas, porém a confirmação só foi possível através do envelope de projeto. Ao comparar as FRFs intactas e danificadas para o grupo P-A observou-se diferenças nos picos das frequências naturais e diferenças nos valores do terceiro modo. Isso refletiu em valores elevados para os índices de dano dessas placas, levando a conclusão de que as mesmas apresentavam danos. Para duas placas desse grupo os valores apresentados para os índices de dano foram maiores, o que levou à conclusão de que essas apresentavam maiores alterações em suas estruturas. Para as placas do grupo P-B, as FRFs intactas e danificadas não forneceram resultados conclusivos, visto que as diferenças não foram perceptíveis. Ao analisar o índice de dano desse grupo, foram observados valores elevados, porém menores quando comparados ao grupo anterior, isto pode ser explicado pela diferença na sequência de empilhamento e consequentemente diferença no tamanho do dano.

Ao analisar os cilindros de compósito de fibra de CFRP, foi possível verificar que os valores obtidos para as frequências das amostras danificadas eram inferiores em relação aos valores apresentados para as amostras intactas. De modo geral, para os três grupos, as frequências das amostras danificadas estavam localizadas fora dos limites estabelecidos, levando a conclusão de que as mesmas apresentavam algum tipo de dano. As amostras intactas cujos valores de frequência encontravam-se foram dos limites apresentavam problemas no processo de fabricação. Ao observar o envelope de projeto, foi verificado que as amostras intactas para os cilindros C-B e C-C encontravam-se dentro dos limites estabelecidos, confirmando que as amostras não apresentavam defeito enquanto para os cilindros C-A encontravam-se a esquerda do envelope caracterizando defeitos no processo de fabricação. Em relação as FRFs intactas e danificadas dos cilindros, foi verificado que para ambos os grupos todas as FRFs danificadas ficaram deslocadas a esquerda das FRFs intactas, sendo perceptível a diferença entre elas levando a conclusão que as amostras apresentavam dano. Os índices de danos para os cilindros confirmaram os resultados observados para as frequências e as FRFs. Para ambos os grupos, foram obtidos valores elevados nos índices em relação ao acelerômetro no ponto 2 e 3, caracterizando assim as amostras 4 a 7 como cilindros danificados. Ao comparar os índices de danos dos cilindros intactos/danificados com os índices de dano entre cilindros intactos foi observado que os índices dos cilindros danificados eram 4,69 vezes maiores para o C-A, 23,6 vezes maiores para o C-B e 8,56 vezes maiores para o C-C. Com isso, pode-se concluir que as estruturas mais danificadas eram as pertencentes ao C-B e ao cilindro C-C. Ao observar o gráfico, pode-se perceber que as amostras danificadas que apresentaram maiores diferenças em relação as FRFs intactas eram as do grupo do cilindro C-B, C-C e C-A em ordem decrescente, confirmando os resultados apresentados para os índices de dano.

Ao analisar o grupo de amostras de compósito de GFRP unidirecional, foi verificado que todas as amostras não apresentavam defeitos de fabricação. Essas informações foram confirmadas através do envelope de projeto. Ao analisar as frequências e ao comparar as FRFs intactas com as danificadas nenhuma informação sobre danos pode ser obtida. Foi possível constatar o dano apenas através dos índices de dano. Ao analisar o grupo de amostras de compósito de GFRP bidirecional, verificou-se através das frequências e do envelope de projeto que todas as amostras intactas apresentam defeito de fabricação. Porém isso pode ser um erro devido aos



dados utilizados para determinar o envelope, visto que especificações da fibra utilizada divergem em relação a fibra das amostras. Ao analisar as FRFs intactas com as danificadas, nenhuma informação de dano pode ser obtida, porém com o índice de dano, pode-se constatar que as amostras apresentavam algum tipo de dano.

De modo geral, pode-se concluir que apenas o uso do intervalo de frequência natural não é suficiente para estimar defeitos no processo de fabricação, sendo necessário a metodologia adotada através do envelope de projeto. Para a detecção de dano, se faz necessário calcular o índice de dano entre a estrutura intacta e a estrutura danificada, visto que as informações de frequência não são conclusivas em todos os casos e muitas vezes as diferenças não são perceptíveis analisando apenas as FRFs intactas e danificadas.

Vale ressaltar que a eficiência dos resultados para os índices de dano também depende da faixa de frequência que está sendo analisada e do tipo de dano, apresentando resultado mais expressivos para alguns casos e menos expressivos para outros. Também é importante citar que a qualidade dos dados amostrados deve ser alta, para manter integridade dos resultados. Caso contrário, a presença de ruídos pode acarretar uma classificação errônea de uma amostra.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se como sugestões para trabalhos futuros, com base na dissertação desenvolvida:

- ✓ Aplicação da metodologia desenvolvida em uma estrutura de material compósito com geometria complexa. Com isso, seria possível prever o tempo de vida útil dessa estrutura e o momento certo para efetuar a substituição.
- ✓ Implementação de técnicas baseadas na operação evolutiva (EVOP) para melhorar o Hipercubo Latino da metodologia abordada. Assim seria possível garantir um melhor preenchimento amostral para as variáveis de entrada e possivelmente reduzir o número de pontos de preenchimento.
- ✓ Aplicação da metodologia desenvolvida para diferentes compósitos encontrados. Com isso, poderia ser verificado o comportamento das FRFs e dos índices de dano e comparados aos resultados obtidos nesse trabalho.
- ✓ Avaliar o comportamento das FRFs e dos índices de dano para diferentes tipos e níveis de danos conhecidos. Com isso, seria possível mensurar o real efeito

dos valores obtidos para os índices de dano e classificar uma peça/amostra a partir desses valores.

## REFERÊNCIAS

AHMED, M.; QIN, N.. Comparison of Response Surface and Kriging Surrogates in Aerodynamic Design Optimization of Hypersonic Spiked Blunt Bodies. **International Conference On Aerospace Sciences And Aviation Technology**, [s.l.], v. 13, n. , p. 1-17, 1 maio 2009. Egypts Presidential Specialized Council for Education and Scientific Research. <http://dx.doi.org/10.21608/asat.2009.23443>.

AWADALLAH, Mohammed; EL-SINAWI, Ameen. Effect and detection of cracks on small wind turbine blade vibration using special Kriging analysis of spectral shifts. **Measurement**, [s.l.], v. 151, p. 107076, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107076>.

BALCIOĞLU, H Ersen; SAKIN, Raif; GÜN, Halit. Development of fixed end type flexural fatigue Test machine and static and dynamic behaviour of Glass/epoxy laminated composite. **International Ege Composite Materials Symposium**, [S.L.], p. 300-317, nov. 2018.

BROOMHEAD, D.; LOWE, D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks. **Complex Systems**, [s.l.], v. 2, p. 321-355, 1988.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2020. 864 p. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/>. Acesso em: 02 jan. 2021.

CAMPBELL, F.C.. **Structural Composite Materials**. Ohio: Asm Intl, 2010. 612p.

CONDRA, Lloyd W.. **Reliability Improvement with Design of Experiments**. 2. ed. New York City: CRC Press, 2001. 408p.

COSTA, Romeu Rc da; SATO, Eduardo s; RIBEIRO, Marcelo L; MEDEIROS, Ricardo de; VIEIRA, André Fc; GUEDES, Rui M; TITA, Volnei. Polyurethane derived from castor oil reinforced with long cotton fibers: static and dynamic testing of a novel eco-friendly composite material. **Journal Of Composite Materials**, [S.L.], v. 54, n. 22, p. 3125-3142, 17 mar. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998320911984>.

CRISTIANINI, N.; SHAW-TAYLOR, J. **An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.

DEAN, Angela *et al.* **Handbook of Design and Analysis of Experiments**. Boca Raton, London, New York: Crc Press, 2015. 946p.

DE MEDEIROS, R.; LOPEZ, H.M.R.; GUEDES, R.M.; VAZ, M.A.P.; VANDEPITTE, D.; TITA, V. A new approach for SHM system: combination of vibration based method and shearography speckle. In: **5th International Symposium on Solid Mechanics (MecSol2015)**, Belo Horizonte, Brazil, 2015a.

DE MEDEIROS, Ricardo de; LOPES, Hernani M.R.; GUEDES, Rui M.; VAZ, Mário A.P.; VANDEPITTE, Dirk; TITA, Volnei. A New Methodology for Structural Health Monitoring Applications. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 114, p. 54-61, 2015b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815016756>. Acesso em: 04 jul. 2021.

DE MEDEIROS, Ricardo de. **Development of a criterion for predicting residual strength of composite structures damaged by impact loading**. 2016. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Aeronáutica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18148/tde-26072016-221608/publico/PhD\\_RdM\\_USP.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18148/tde-26072016-221608/publico/PhD_RdM_USP.pdf). Acesso em: 10 set. 2020.

DOEBLING, Scott W. *et al.* **Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics**: a literature review. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1996. 135p.

DOHERTY, J. E. Nondestructive Evaluation, Chapter 12 in Handbook on Experimental Mechanics, AS Kobayashi Edt. **Society for Experimental Mechanics**, Inc, 1987.

ELSAYED, Khairy; LACOR, Chris. Robust parameter design optimization using Kriging, RBF and RBFNN with gradient-based and evolutionary optimization techniques. **Applied Mathematics And Computation**, [s.l.], v. 236, p. 325-344, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.03.082>.

FANG, Jianguang *et al.* On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, [s.l.], v. 55, n. 3, p. 1091-1119, 16 set. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y>.

FANG, Kai-tai *et al.* Uniform Design: theory and application. **Technometrics**, [s.l.], v. 42, n. 3, p. 237-248, ago. 2000. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00401706.2000.10486045>.

FARRAR, Charles R.; DOEBLING, Scott W.; NIX, David A.. Vibration-based structural damage identification. **Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], v. 359, n. 1778, p. 131-149, 15 jan. 2001. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2000.0717>.

FERREIRA, Wallace Gusmão. **Efficient Global Optimization Driven by Ensemble of Metamodels: New Directions Opened by Least Squares Approximation**. 2016. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanical Engineering, Solid Mechanics And Mechanical Design, University Of Campinas, Campinas, 2016.

FORRESTER, Alexander I. J.; SÓBESTER, András; KEANE, Andy J.. **Engineering Design via Surrogate Modelling**: a practical guide. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 210p.

GAO, Haiyang *et al.* Crack Identification of Cantilever Plates Based on a Kriging Surrogate Model. **Journal Of Vibration And Acoustics**, [s.l.], v. 135, n. 5, p. 1-11, 18 jun. 2013. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4023813>.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo methods**. Springer, 1964. 178p.

HESLEHURST, Rikard Benton. **Defects and Damage in Composite Materials and Structures**. Boca Raton: Crc Press, 2014. 206p.

HOA, Suong V.. **Principles of the manufacturing of composite materials**. Lancaster: Destech Publications, Inc., 2009. 343p.

HOYLE, Nicola. **Automated Multi-Stage Geometry Parameterization of Internal Fluid Flow Applications**. 2006. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctor Of Philosophy, Faculty Of Engineering, Science And Mathematics, University Of Southampton, Southampton, 2006.

JAWAID, Mohammad; THARIQ, Mohamed; SABA, Naheed. **Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. 312 p. (Composites Science and Engineering).

JOHNSON, M. E.; MOORE, L. M.; YLVISAKER, D.. Minimax and maximin distance designs. **Journal Of Statistical Planning And Inference**, [s.l.], v. 26, n. 2, p. 131-148, out. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758\(90\)90122-b](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758(90)90122-b).

JONES, Donald R.. A Taxonomy of Global Optimization Methods Based on Response Surfaces. **Journal Of Global Optimization**, [s.l.], v. 21, n. 4, p. 345-383, 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1012771025575>

JONES, Donald R.; SCHONLAU, Matthias; WELCH, William J.. Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions. **Journal Of Global Optimization**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 455-492, 1998. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1008306431147>.

JONES, Robert M.. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Blacksburg: Taylor & Francis Inc, 1999. 450p.

KASSAPOGLOU, Christos. **Modeling the Effect of Damage in Composite Structures**: simplified approaches. Chichester: Wiley, 2015. 253 p. (Aerospace).

KAW, Autar K. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Boca Raton: Editora Informa, 2005. 457 p. (V. 29). ISBN 0-8493-1343-0.

MALLICK, Pankaj .K.. **Fiber-reinforced composites**: materials, manufacturing, and design. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2007. 638p.

MARTIN, Jay D.; SIMPSON, Timothy W.. Use of Kriging Models to Approximate Deterministic Computer Models. **AIAA Journal**, [s.l.], v. 43, n. 4, p. 853-863, abr. 2005. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/1.8650>.

MATHERON, Georges. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, [s.l.], v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1 dez. 1963. Society of Economic Geologists. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>.

MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J.. Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. **Technometrics**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 239-245, maio 1979. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00401706.1979.10489755>.

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: Projeto e Análise**. Barueri: Editora Manole, 2005. 632 p. ISBN:85-204-1882-1.

MENEZES, Vanessa Guimarães Soares de. **A methodology to analyze the structural state due to the quality of the manufacturing process using an optimized numerical approach and dynamic analysis**. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020. Disponível em: <https://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000083/000083fd.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MENEZES, Vanessa G.s. de; SOUZA, Gabriel S.C.; VANDEPITTE, Dirk; TITA, Volnei; MEDEIROS, Ricardo de. Defect and damage detection in filament wound carbon composite cylinders: a new numerical-experimental methodology based on vibrational analyses. **Composite Structures**, [S.L.], v. 276, p. 114548, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114548>.

MORRIS, Max D.; MITCHELL, Toby J.. Exploratory designs for computational experiments. **Journal Of Statistical Planning And Inference**, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 381-402, fev. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758\(94\)00035-t](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758(94)00035-t).

MUNRO, M.. Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding. **Polymer Composites**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 352-359, out. 1988. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.750090508>.

NASCENTES, Fábio Felipe dos Santos. **Contribuições à eficiência da otimização global estocástica adaptativa**. 2019. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 418 p. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521210795/>. Acesso em: 04 maio 2021.

OWEN, Art B.. Orthogonal arrays for computer experiments, integration and visualization. **Statistica Sinica 2**: Statistica Sinica, [s.l.], v. 99, n. 99, p. 439-452, fev. 1992.

PARK, Jeong-soo. Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments. **Journal Of Statistical Planning And Inference**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 95-111, abr. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758\(94\)90115-5](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3758(94)90115-5).

QUANJIN, Ma; REJAB, M R M; KAIGE, Jiang; IDRIS, M s; HARITH, M N. Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 342, n. 1, p. 012029, 1 abr. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/342/1/012029>.

RAMU, M.; PRABHU, R. V. Metamodel based analysis and its applications: A review. **Acta Technica Corvininesis - Bulletin of Engineering**, v. 6, n. 2, p. 25-34, 2013.

RIBEIRO, Marcelo Leite; VANDEPITTE, Dirk; TITA, Volnei. Experimental analysis of transverse impact loading on composite cylinders. **Composite Structures**, [S.L.], v. 133, p. 547-563, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.088>.

RYBERG, Ann-britt; BÄCKRYD, Rebecka Domeij; NILSSON, Larsgunnar. **Metamodel-Based Multidisciplinary Design Optimization for Automotive Applications**. Linköping: Linköping University, 2012. 132p.

SANTNER, Thomas J.; WILLIAMS, Brian J.; NOTZ, William I. N. **The Design and Analysis of Computer Experiments**. New York: Springer, 2003. 283p.

SCHONLAU, Matthias. **Computer Experiments and Global Optimization**. 1997. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Statistics, University Of Waterloo, Waterloo, 1997.

SILVA, Henrique Pereira da. **Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epóxi nano-reforçados**. 2014. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012. 734 p. Tradução de: Necesio Gomes Costa. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580551150/>. Acesso em: 04 jun. 2021.

SOUZA, Luiz Fernando dos Santos. **A methodology to analyses the dynamic response of composites plates using design of experiments and kriging model**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: <https://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000053/00005362.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2021.

SUTCLIFFE, M.P.F.; LEMANSKI, S.L.; SCOTT, A.e.. Measurement of fibre waviness in industrial composite components. **Composites Science And Technology**, [S.L.], v. 72, n. 16, p. 2016-2023, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.09.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353812003235>. Acesso em: 05 ago. 2021.

TAKIMOTO, Naoya; MORITA, Hiroshi. Global Optimization with Gaussian Regression Under the Finite Number of Evaluation. **Proceedings Of The 5th International Conference On Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications**, [s.l.], p. 192-198, jan. 2015. SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <http://dx.doi.org/10.5220/0005559701920198>.

TITA, Volnei; CARVALHO, Jonas de; VANDEPITTE, Dirk. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: experimental and numerical approaches. **Composite Structures**, [S.L.], v. 83, n. 4, p. 413-428, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.003>.

VASILIEV, Valery; MOROZOV, Evgeny. **Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures**. 4. ed. [S. L.]: Elsevier, 2018. 882p.

VIANA, Felipe A. C.. A Tutorial on Latin Hypercube Design of Experiments. **Quality And Reliability Engineering International**, [s.l.], v. 32, n. 5, p. 1975-1985, 25 nov. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1924>.

WEISSMAN, Steven A.; ANDERSON, Neal G.. Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. **Organic Process Research & Development**, [s.l.], v. 19, n. 11, p. 1605-1633, 29 ago. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/op500169m>.

YUAN, Fuh-Gwo. **Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures**. Amsterdam: Elsevier, 2016. 493 p. (Composites Science and Engineering).

ZHAO, Liyang; MANTELL, Susan C.; COHEN, David; MCPEAK, Reed. Finite element modeling of the filament winding process. **Composite Structures**, [S.L.], v. 52, n. 3-4, p. 499-510, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8223\(01\)00039-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8223(01)00039-3).



## APÊNDICE A – ÍNDICE DE DANO $H_{31}$ PARA O CILINDRO C-A

A Tabela 50 apresenta os índices de dano encontrados para os 3 cilindros intactos em relação os cilindros danificados. Pode-se verificar novamente que os índices de dano apresentam valores semelhantes na média para todas as amostras analisadas.

Tabela 50 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |                 |                 |                 |                 |       |                  |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Danificada<br>4 | Danificada<br>5 | Danificada<br>6 | Danificada<br>7 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,961           | 0,661           | 0,776           | 0,123           | 0,630 | 0,312            |
| Intacta 2                                      | 0,861           | 0,210           | 0,201           | 2,129           | 0,850 | 0,785            |
| Intacta 3                                      | 0,917           | 0,279           | 0,524           | 0,864           | 0,646 | 0,260            |
| Média  | 0,913           | 0,383           | 0,501           | 1,039           | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 0,041           | 0,198           | 0,235           | 0,828           | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Novamente, foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 51 traz os índices de dano para os cilindros intactos. Ao comparar entre cilindros distintos, foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, novamente foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos em sua estrutura.

Tabela 51 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-A utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |              |              |              |       |                  |
|--|--------------|--------------|--------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Intacta<br>1 | Intacta<br>2 | Intacta<br>3 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000        | 0,360        | 0,265        | 0,208 | 0,152            |
| Intacta 2                                      | 0,128        | 0,000        | 0,339        | 0,156 | 0,140            |
| Intacta 3                                      | 0,563        | 0,202        | 0,000        | 0,255 | 0,233            |
| Média  | 0,230        | 0,187        | 0,201        | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 0,241        | 0,147        | 0,146        | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

## APÊNDICE B – ÍNDICE DE DANO $H_{31}$ PARA O CILINDRO C-B

Os índices de dano foram calculados novamente para os cilindros utilizando a força na posição 1 e o acelerômetro na posição 3. A Tabela 52 apresenta os índices de dano encontrados. Pode-se verificar novamente que os índices de dano apresentam valores altos para todas as amostras analisadas. Outra característica observada, foi que o cilindro danificado 4, ou seja, o cilindro 7, apresentou índices de dano menores que os demais cilindros danificados, indicando que sofreu menores alterações em sua estrutura.

Tabela 52 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |                 |                 |                 |                 |       |                  |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Danificada<br>4 | Danificada<br>5 | Danificada<br>6 | Danificada<br>7 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 3,409           | 4,566           | 4,877           | 2,085           | 3,734 | 1,098            |
| Intacta 2                                      | 4,508           | 6,194           | 6,646           | 2,581           | 4,982 | 1,599            |
| Intacta 3                                      | 7,105           | 10,039          | 10,825          | 3,751           | 7,930 | 2,783            |
| Média  | 5,007           | 6,933           | 7,449           | 2,806           | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 1,550           | 2,294           | 2,494           | 0,698           | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Novamente, foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 53 traz os índices de dano para os cilindros intactos. Ao comparar entre cilindros distintos, novamente foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos.

Tabela 53 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-B utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |              |              |              |       |                  |
|--|--------------|--------------|--------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Intacta<br>1 | Intacta<br>2 | Intacta<br>3 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000        | 0,313        | 0,605        | 0,306 | 0,247            |
| Intacta 2                                      | 0,456        | 0,000        | 0,425        | 0,294 | 0,208            |
| Intacta 3                                      | 1,534        | 0,740        | 0,000        | 0,758 | 0,627            |
| Média  | 0,664        | 0,351        | 0,344        | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 0,643        | 0,303        | 0,254        | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### APÊNDICE C – ÍNDICE DE DANO $H_{31}$ PARA O CILINDRO C-C

Os índices de dano foram calculados novamente para os cilindros utilizando a força na posição 1 e o acelerômetro na posição 3. A Tabela 54 apresenta os índices de dano encontrados para os 3 cilindros intactos em relação os cilindros danificados. Pode-se verificar que os índices de dano apresentam valores altíssimos para todas as amostras analisadas.

Tabela 54 – Índices de dano entre cilindros intactos e danificadas para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |                 |                 |                 |                 |        |                  |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------------|
| Cilindro                                       | Danificada<br>4 | Danificada<br>5 | Danificada<br>6 | Danificada<br>7 | Média  | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 10,386          | 16,376          | 15,411          | 13,380          | 13,888 | 2,293            |
| Intacta 2                                      | 3,404           | 4,938           | 4,691           | 4,171           | 4,301  | 0,587            |
| Intacta 3                                      | 5,854           | 8,951           | 8,452           | 7,402           | 7,664  | 1,186            |
| Média  | 6,548           | 10,088          | 9,518           | 8,317           | --     | --               |
| Desvio Padrão                                  | 2,893           | 4,738           | 4,441           | 3,815           | --     | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foram calculados os índices de dano entre os 3 cilindros intactos com o objetivo comparar com os índices calculados anteriormente. A Tabela 55 traz os índices de dano para os cilindros intactas. Ao comparar entre cilindros distintos, foram obtidos índices de danos pequenos. Ao analisar os índices de dano entre estruturas intactas com os índices obtidos anteriormente, novamente foi possível afirmar que os cilindros 4 a 7 apresentavam danos em sua estrutura.

Tabela 55 – Índices de dano entre cilindros intactos para o cilindro C-C utilizando a força em 1 e o acelerômetro em 3 ( $H_{31}$ )

| Intervalo de Frequência analisado: 0 a 2000 Hz |              |              |              |       |                  |
|--|--------------|--------------|--------------|-------|------------------|
| Cilindro                                       | Intacta<br>1 | Intacta<br>2 | Intacta<br>3 | Média | Desvio<br>Padrão |
| Intacta 1                                      | 0,000        | 2,905        | 0,934        | 1,279 | 1,211            |
| Intacta 2                                      | 0,744        | 0,000        | 0,505        | 0,416 | 0,310            |
| Intacta 3                                      | 0,483        | 1,019        | 0,000        | 0,501 | 0,416            |
| Média  | 0,409        | 1,308        | 0,480        | --    | --               |
| Desvio Padrão                                  | 0,308        | 1,203        | 0,382        | --    | --               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).