

6 Monitoramento Dinâmico de Compósitos

Uma vez analisado o desenvolvimento de um sistema SHM em um caso mais simples (material isotrópico, dano estrutural de maior impacto sobre o comportamento mecânico da estrutura e excitação estática), uma análise interessante é o desenvolvimento de um sistema SHM de maior complexidade. Com esse pensamento em mente, a proposta no atual capítulo é de consiste em desenvolver um sistema SHM para a determinação de processos de delaminação em estruturas de material compósito, quando submetidas à excitações dinâmicas.

6.1 Simulações Computacionais

Mais uma vez, será utilizado a abordagem numérica (em ANSYS) para a formação de uma base de dados que possibilite o desenvolvimento do sistema SHM em questão.

6.1.1 Modelagem do Problema

O corpo de prova numericamente modelado (C_{pm}), consiste em uma placa de material compósito formado por fibra de carbono e epóxi, composto por 16 camadas. Possui dimensões definidas por uma largura de 500mm, 250mm de comprimento e 3mm de espessura.

No centro do C_{pm} fora introduzido uma fina camada (de espessura igual a 0,07mm) com um recorte de tamanho pré-determinado, a fim de simular a existência de uma delaminação no material (figura 70). Mais adiante no texto, serão discutidas as dimensões (largura e comprimento) referentes à delaminação.

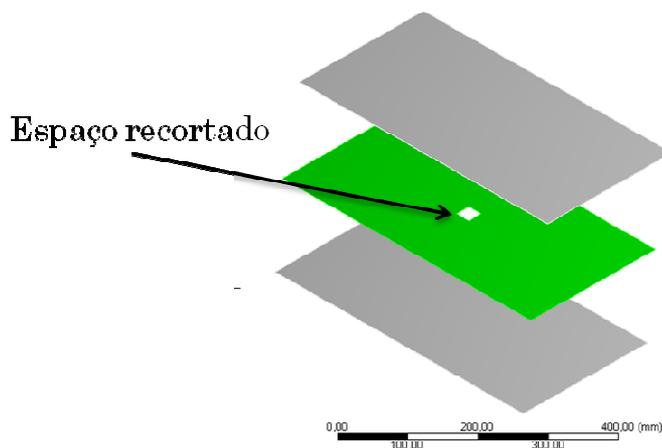


Figura 70 - Desenho esquemático, representando a disposição da camada extra no interior do compósito, a qual tem o papel de simular a delaminação.

- Modelagem da Excitação

Para provocar a excitação dinâmica, foram fixados ao modelo três atuadores piezelétricos (PZT). Estes atuadores vibram em fase e estão disposto em uma linha ao longo do comprimento. A posição dos seus centroides está descrita na tabela 9.

Tabela 9 – Posicionamento de cada atuador com relação ao seu centro.

	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]
PZT 1	38,75	35, 585
PZT 2	126,75	35, 585
PZT 3	213,75	35, 585

Na figura 71 pode-se observar o C_{pm} com os atuadores posicionados. A vibração dos PZT sobre a estrutura, que se encontra com as suas extremidades livres, produz oscilações harmônicas. Essas oscilações acabam por provocar tensões superficiais no modelo, as quais provocam deformações elásticas descritas pela equação 6,1.

$$\varepsilon(x, y, t) = f(x, y) \cdot \cos(\omega t) \tag{6,1}$$

Nas simulações realizadas, todas as deformações foram registradas para o tempo igual a zero ($t = 0$). Dessa maneira os resultados obtidos são independentes do tempo e dependente somente das coordenadas x e y e do corpo de prova.

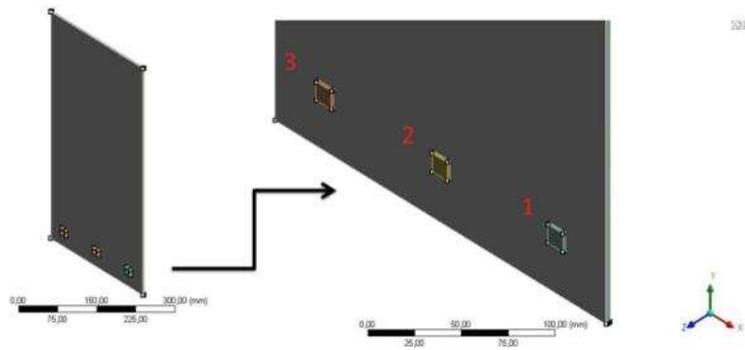


Figura 71 – Corpo de prova instrumentado com os atuadores piezelétricos.

- Modelagem da Delaminação

Como foi mencionado, a delaminação consiste em espaçamentos quadrados e retangulares entre duas camadas consecutivas da estrutura. Duas situações distintas foram contempladas. Na primeira a delaminação foi posicionada entre as camadas 4 e 5 (A4/A5), enquanto que na segunda a delaminação fora projetada entre as camadas 8 e 9 (A8/A9). Dessa forma dois modelos, contendo somente uma delaminação, foram desenvolvidos. Na figura 72 é apresentada um desenho esquemático mostrando a posição da delaminação em cada modelo.

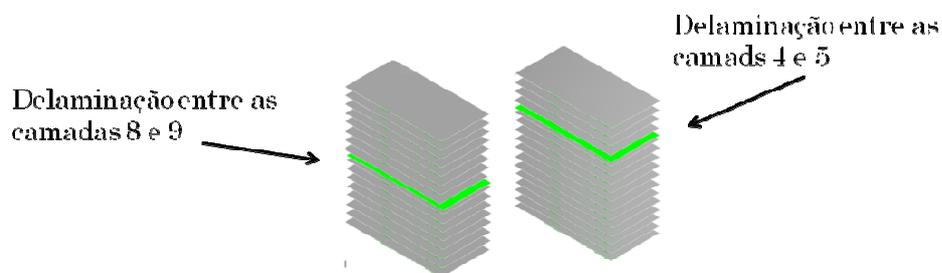


Figura 72 – Visão das camadas do compósito. No esquema da esquerda a delaminação está modelada entre as camadas 8 e 9 enquanto no esquema da direita a delaminação esta entre as camadas 4 e 5.

Diferentemente do modelo desenvolvido no capítulo 5, o registro das deformações superficiais foram tomados sobre as duas superfícies (superior e inferior) do *Cpm*, sendo que os atuadores foram fixados sobre a superfície superior.

O posicionamento das delaminações no modelo, foi dirigido para o centro da placa. Em quase todas as simulações realizadas esse parâmetro foi seguido, entretanto, um grupo de simulações fora executada com a delaminação deslocada do centro. Isso foi feito com o intuito de comparar os resultados obtidos numericamente com os experimentais realizados no laboratório, os quais também apresentam a delaminação fora do centro. Esse assunto será detalhado mais adiante no texto.

Com relação às dimensões das delaminações modeladas (tanto para A4/A5 quanto para A8A9), 12 situações foram propostas. Na tabela 10 pode-se observar os valores das dimensões propostas.

Tabela 10 - Tamanhos das delaminações testadas nas simulações.

Delaminação	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Formato
<i>Situação 1</i>	06,35	06,35	Quadrado
<i>Situação 2</i>	12,70	12,70	Quadrado
<i>Situação 3</i>	19,05	19,05	Quadrado
<i>Situação 4</i>	25,40	25,40	Quadrado
<i>Situação 5</i>	38,10	38,10	Quadrado
<i>Situação 6</i>	50,80	50,80	Quadrado
<i>Situação 7</i>	25,40	12,70	Retangular
<i>Situação 8</i>	38,10	25,40	Retangular
<i>Situação 9</i>	50,80	12,70	Retangular
<i>Situação 10</i>	12,70	63,50	Retangular
<i>Situação 11</i>	25,40	50,80	Retangular
<i>Situação 12</i>	12,70	38,10	Retangular

Para fins de comparação, também foi simulado uma situação em que não havia delaminação na placa.

6.1.2 Exame de Frequência

Inicialmente no projeto, foi idealizado que o sistema SHM seria excitado através de atuadores PZT, em frequências específicas. Para a determinação das frequências que melhor respondessem ao problema de identificação das delaminações (tanto numéricas quanto experimentais), iniciou-se uma série de simulações variando-se exclusivamente a frequência de excitação sobre o corpo de prova modelado.

De início, algumas frequências provocavam o aparecimento de padrões de deformação, os quais possibilitavam a clara indicação da presença de um dano, enquanto outras frequências nada informavam.

Embora esses primeiros resultados apresentassem uma clara percepção do dano estrutural, ao se analisar os padrões de deformação de outros modelos (com delaminações com dimensões diferentes) observou-se que as frequências de excitação que produziam padrões de deformação indicativos de delaminação para um caso não se repetia necessariamente para outro.

Dessa forma, partiu-se para a procura de uma faixa de frequência de atuação e não mais uma frequência específica. Assim, garantia-se que as simulações (e mais adiante ensaios experimentais) conseguiriam obter ao menos um resultado em que os padrões de deformação apontassem para a presença de delaminação na estrutura.

- Análise de ampla faixa de frequência (11 kHz a 50 kHz).

Inicialmente, por falta de um maior entendimento a respeito do comportamento da deformação com a frequência de excitação, tomou-se para análise uma faixa de frequência abrangente com um incremento grande o suficiente (1kHz) de modo a possibilitar varrer uma grande faixa de frequências.

Em cada simulação foi tomada informações a respeito das deformações superficiais (superfície superior do *Cpm*) em alguns pontos específicos. Essas deformações foram interpretadas como informações obtidas uma grande de "sensores fictícios".

Na figura 73, é possível ver um desenho esquemático do *Cpm* contendo uma malha de pontos brancos representando a localização de 20 "sensores fictícios". O quadrado em marrom representa a posição da delaminação, que está exatamente centrada no *Cpm*.

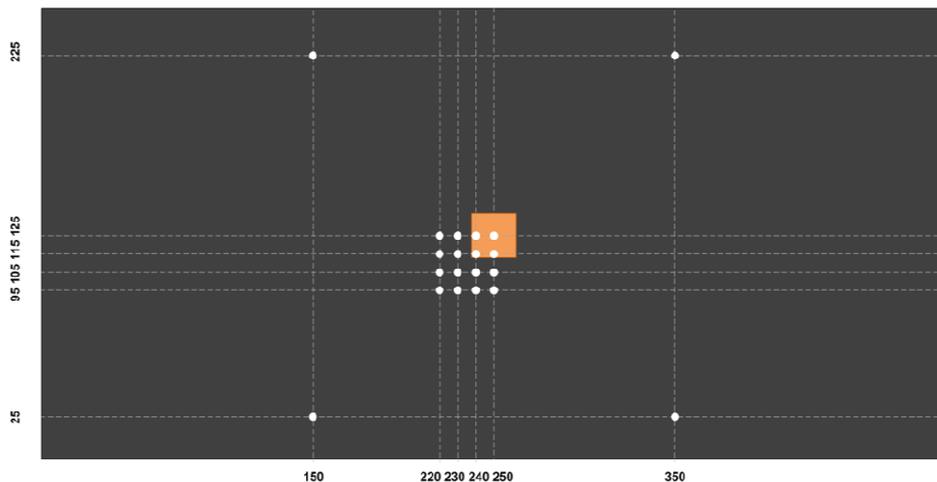


Figura 73 - Desenho esquemático da placa de compósito, com uma delaminação quadrada de lados com 25,4mm, instrumentada com uma malha de sensores fictícios espalhados sobre a sua superfície.

É importante explicar a razão de se denominar os sensores da malha de sensores fictícios. Trataram-se tais sensores desta forma, uma vez que na realidade as deformações registradas nestes pontos não são provenientes de nenhum sensor real. Tais informações são obtidas através das simulações. Dessa forma, obter um único valor de deformação condizente com o que um sensor mostraria (com simulações que geravam valores com uma frequência espacial de 1mm) é obtido calculando-se a média dos valores de deformação sobre o comprimento dos sensores reais. Assim, uma média de 10 pontos de deformação fora realizada e associada ao valor que um sensor de 1 cm de comprimento teria quando posicionado sobre o corpo de prova.

Os gráficos das figuras 74 e 75 apresentam a variação da deformação superficial no Cpm com delaminação central entre as camadas 4 e 5 e de dimensão igual a 25,4mm x 25,4m. Na figura 74 a variação da frequência ocorre de 10kHz até 24kHz e na figura 73 a faixa varrida é de 24kHz até 50kHz.

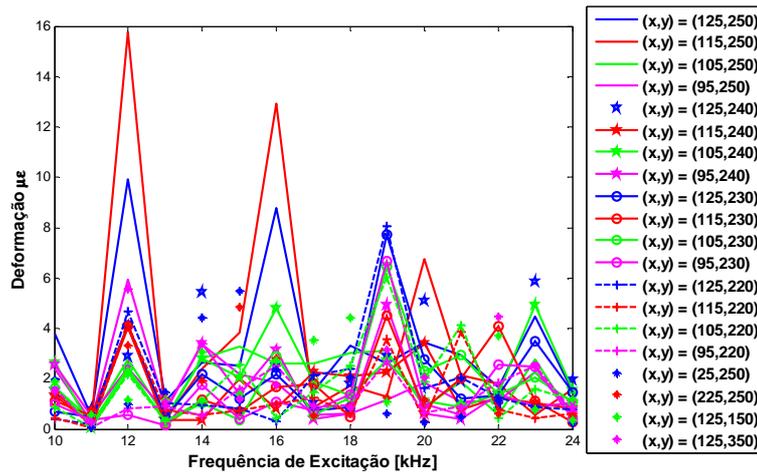


Figura 74 - Deformação superficial por varredura de frequência (10kHz a 24kHz).

Pode-se observar no gráfico 72 que existem faixas de frequências em torno de 12kHz e 16kHz em que as deformações registradas pelos "sensores" sobre a região da delaminação são destacadas em relação às deformações registradas pelos demais "sensores". Informações deste tipo são importantes, uma vez que possibilitam a detecção da delaminação.

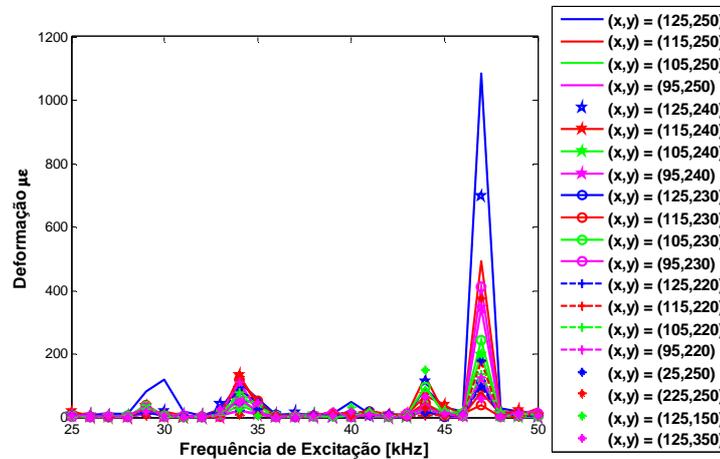


Figura 75 - Deformação superficial por varredura de frequência (24kHz a 50kHz).

É interessante observar que ao se aumentar o valor da frequência de excitação as deformações superficiais registradas apresentam um significativo aumento de intensidade. Essa condição aparentemente de melhor resolução do sinal pode ser enganadora, uma vez que a alta frequência de vibração produz vibrações de baixo

comprimento de onda, muito menores do que as dimensões dos defeitos que desejamos retratar.

- Análise de Faixa de frequência estreita (11kHz a 15kHz)

Com base no que fora observado no gráfico da figura 74, uma análise mais detalhada na faixa das frequências baixas se fez necessária. Dessa forma, ao invés de se variar a frequência de excitação em 1kHz, realizou-se uma varredura de 0,1kHz partindo de 11kHz até 15kHz, como mostrado no gráfico da figura 76. Mais uma vez, os resultados reproduzidos a seguir são relativos à delaminação quadrada de 25,4mm por 25,4mm (Situação 4 da Tabela 9, com a delaminação entre as camadas A4/A5).

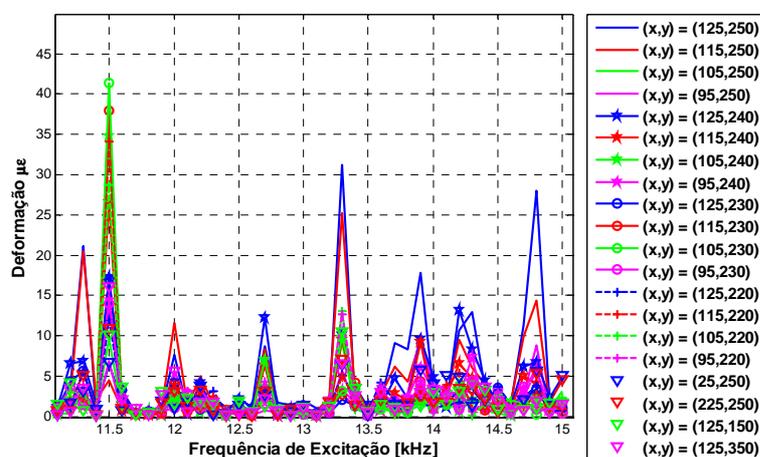


Figura 76 - Deformação superficial por varredura de frequência com passo de 100 Hz (11kHz à 15kHz).

Observa-se que para algumas frequências de excitação, a presença da delaminação é evidenciada pelo registro de deformações maiores na região da delaminação e inferiores nas regiões adjacentes. Observou-se também que, eventualmente, ocorre de todos os "sensores" indicarem aumento nas deformações superficiais evidenciando o comportamento de ressonância da placa como um todo, e não evidenciando a presença do dano. Quando se fala em deformações maiores, o que se quer informar é que as deformações registradas são mais elevadas das registradas sob as mesmas condições de excitação, mas sem presença de delaminação.

O cenário apresentado nos leva a ter a certeza que ao se varrer a frequência de excitação dos atuadores em uma faixa pré-determinada, nos permite observar

deformações que condizem com a presença da delaminação. Em outras palavras, pode-se não se observar o defeito em uma frequência especial para todos os defeitos, mas pode-se ter a certeza de que o mesmo será representado para uma frequência dentro de uma determinada faixa.

Não fora incluído nesse estudo casos em que as frequências de excitação são inferiores as 11kHz, uma vez que experimentalmente foi observado que a relação sinal ruído era desfavorável às medições.

6.1.3 Mapas de Deformação

Uma forma eficiente de observar o comportamento dos corpos de prova ao serem excitados, é através de mapas de deformação. A seguir serão apresentados alguns exemplos de mapas de deformação de placas com diferentes situações de delaminação e sem delaminação.

- *Caso 1 - Comparação entre casos com e sem delaminação.*

Para cada modelo gerado, 40 simulações foram realizadas, uma para uma frequência de excitação (11kHz até 15kHz em um passo de 0,1kHz). Como foram gerados 12 modelos de defeito mais um caso sem defeito e um caso com defeito deslocado do centro, são 560 mapas de deformação. Isso contando somente as delaminações entre as camadas 4 e 5. Essa quantidade de informação é muito elevada para que se possa apresentar todos os casos. Assim, serão mostrados somente mapas de deformação em algumas frequências cotendo todos os casos com e sem delaminação que foram modelados (somente para as delaminações entre as camadas A4/A5).

Os gráficos da figura 77 são referentes aos padrões de deformação obtidos com uma excitação de 11,2kHz.

Monitoramento Dinâmico de Compósitos

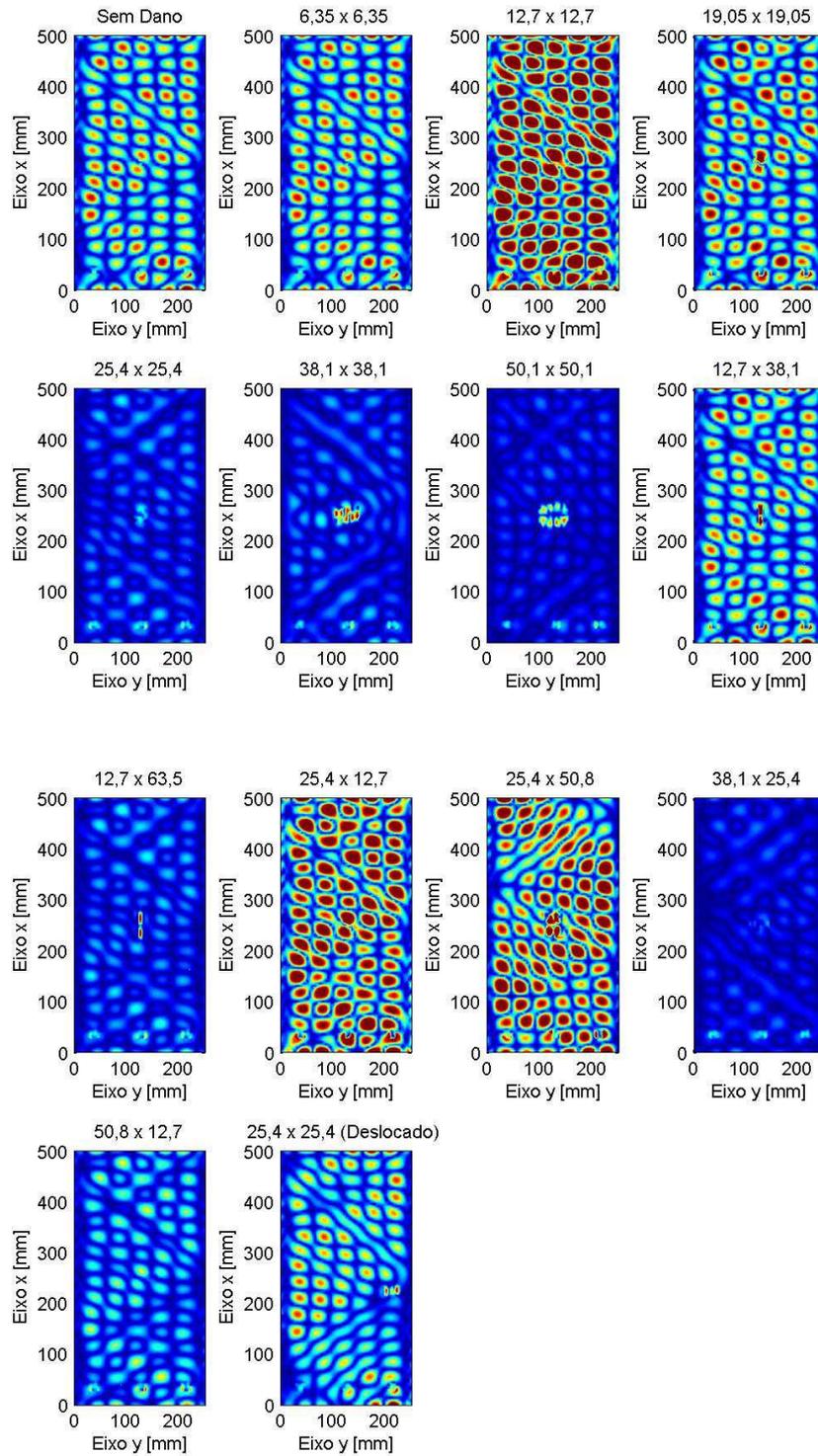


Figura 77 - Padrões de deformação para diferentes C_{pm} submetidos a frequência de 11,2 kHz.

Monitoramento Dinâmico de Compósitos

Os gráficos da figura 78 são referentes aos padrões de deformação obtidos com uma excitação de 13,3kHz.

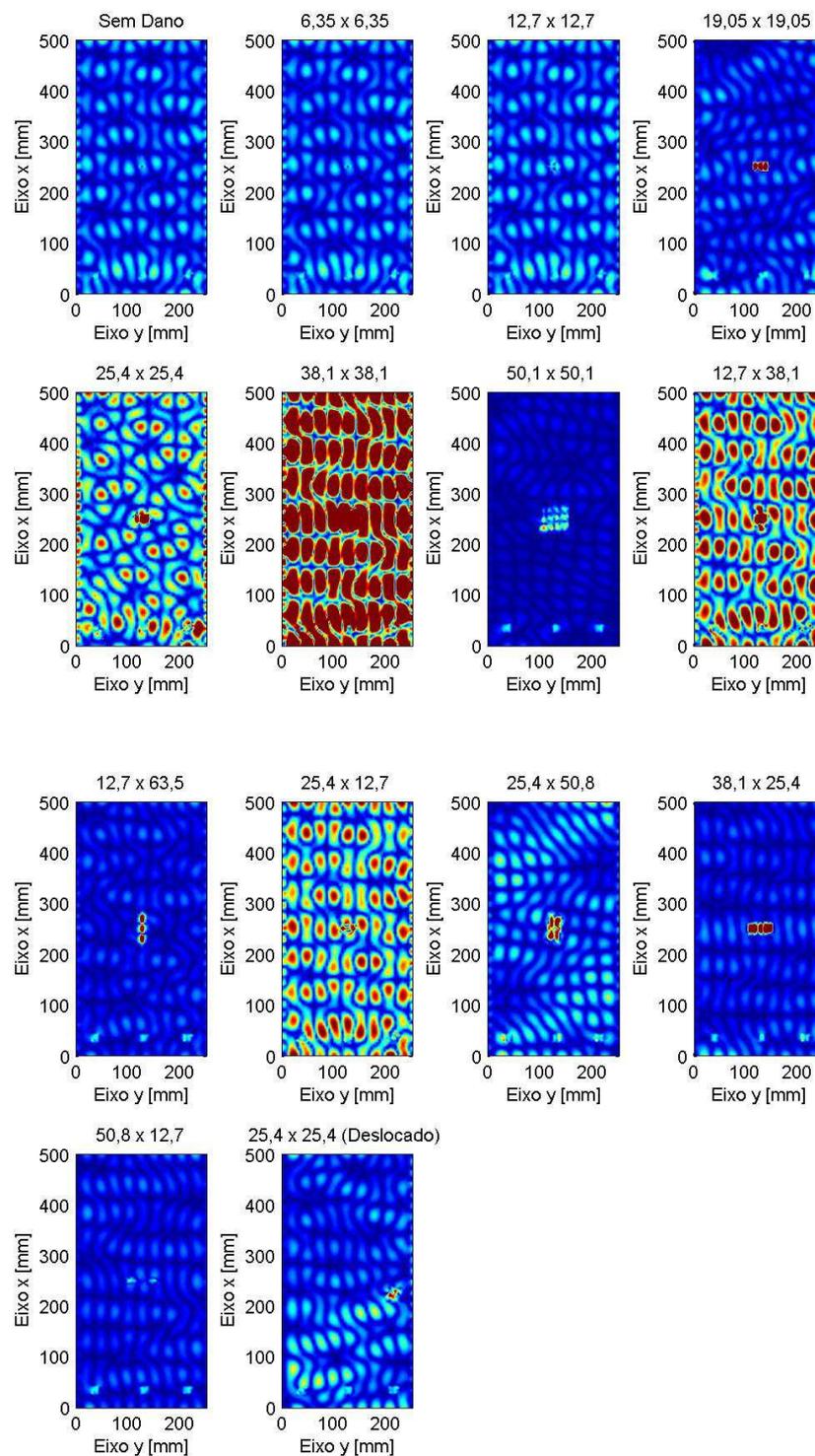


Figura 78 - Padrões de deformação para diferentes C_{pm} submetidos a frequência de 13,3 kHz.

Monitoramento Dinâmico de Compósitos

Os gráficos da figura 79 são referentes aos padrões de deformação obtidos com uma excitação de 13,5kHz.

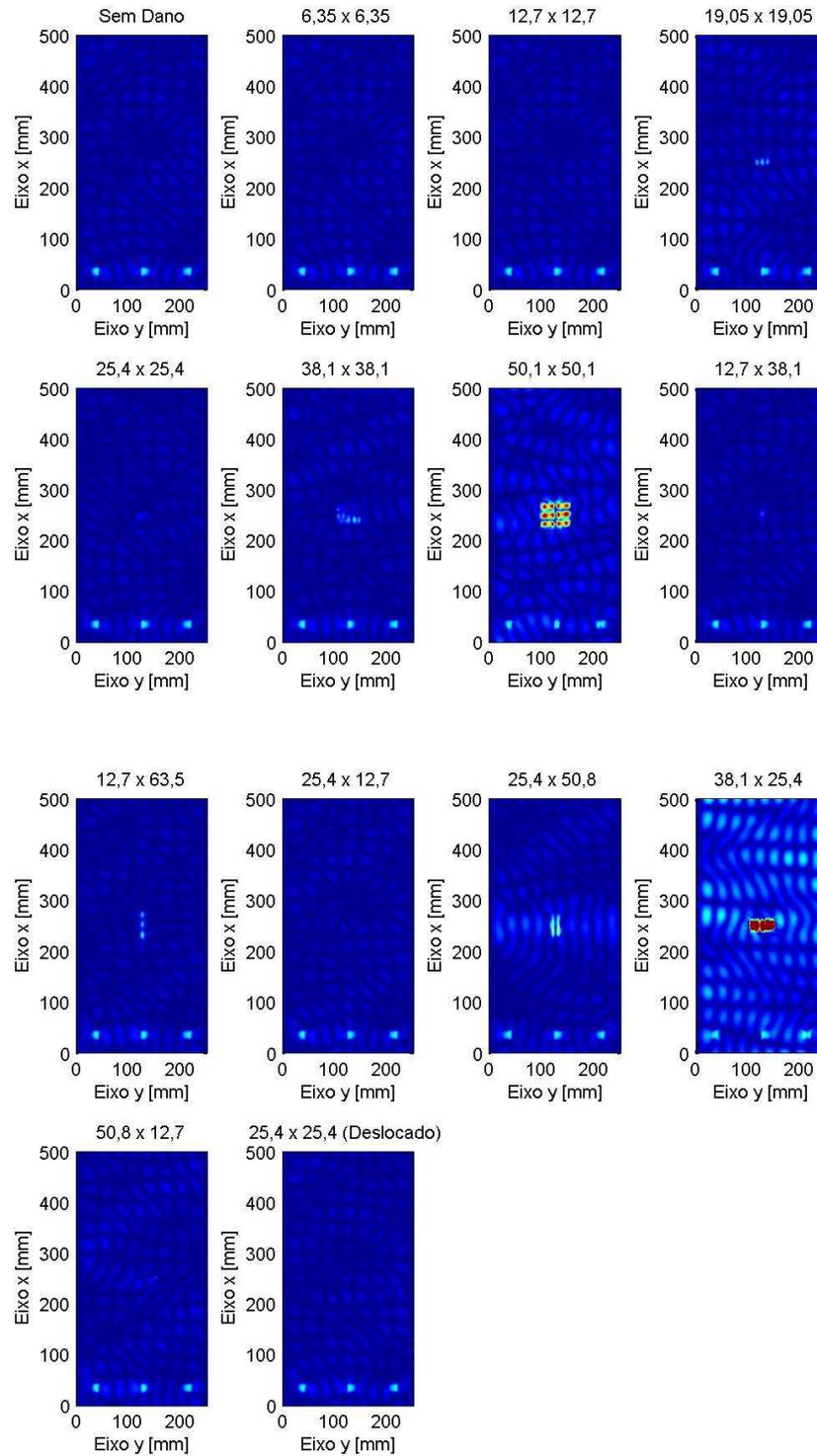


Figura 79 - Padrões de deformação para diferentes C_{pm} submetidos a frequência de 13,5 kHz.

Monitoramento Dinâmico de Compósitos

Os gráficos da figura 80, são referente aos padrões de deformação obtidos com uma excitação de 14,7kHz.

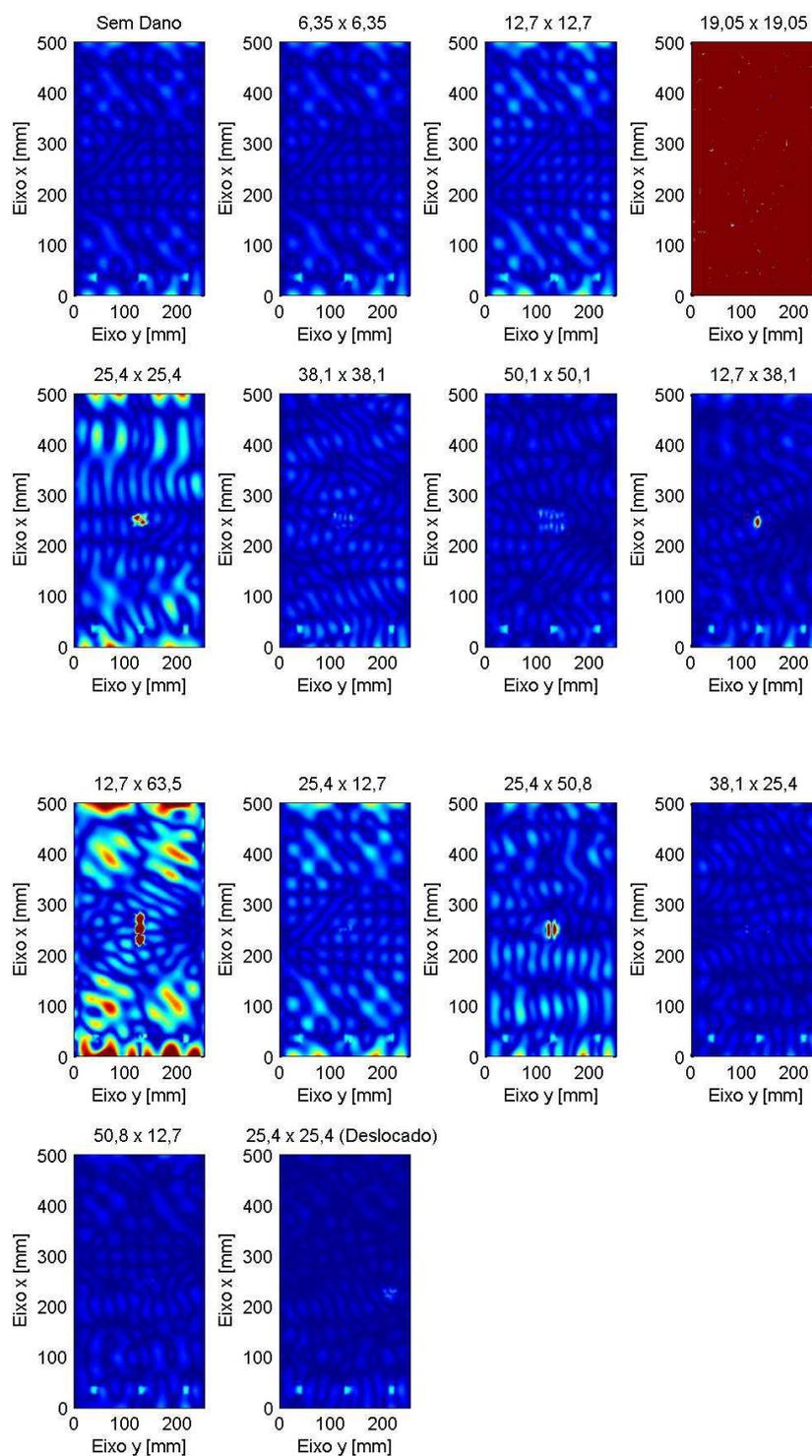


Figura 80 - Padrões de deformação para diferentes C_{pm} submetidos a frequência de 14,7 kHz.

- **Caso 2 - Frequência em que os modelos apresentaram melhor resultado.**

Nos gráficos das figuras 81 à 92, estão representados os gráficos de todas as 12 situações de delaminação mostradas na Tabela 9. Para cada situação de defeito testada fora escolhida uma frequência, na faixa de trabalho de 11kHz à 15kHz, que melhor represente a delaminação, a qual possui localização no centro do Cp (Como representado na figura 4). Pode-se observar todos os defeitos propostos apresentam boa resolução para a determinação frequência de excitação, o que reforça a tese de que não se deve focar em uma determinada frequência e sim em uma varredura.

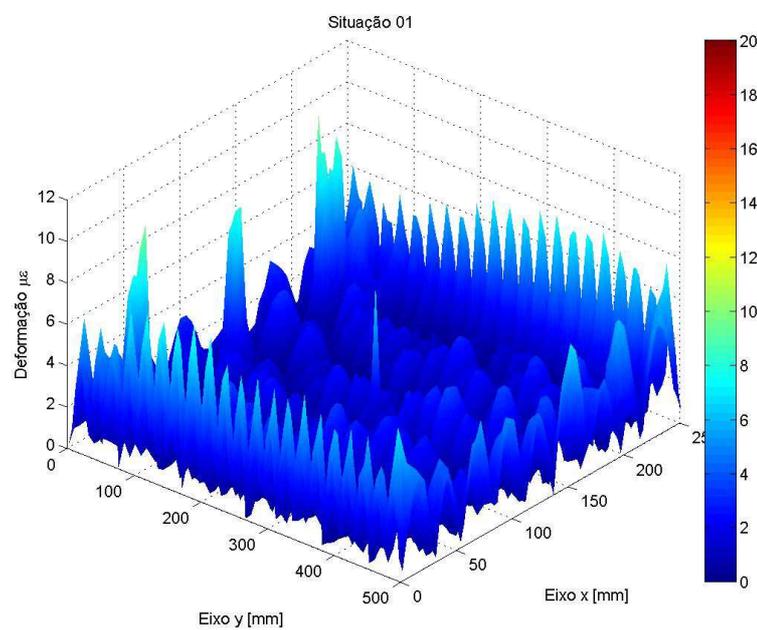


Figura 81 - Mapa de Deformação (Situação 01, frequência de 11,3 kHz).

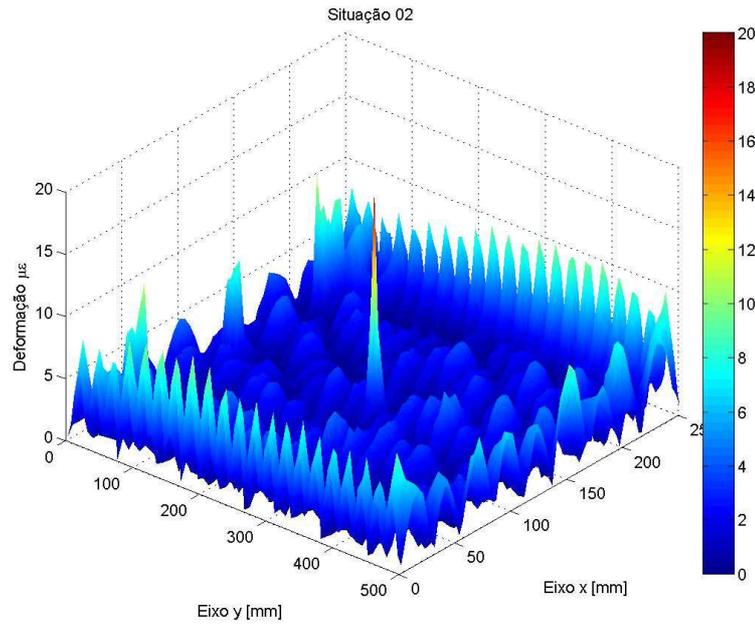


Figura 82 - Mapa de Deformação (Situação 2, frequência de 13,3 kHz).

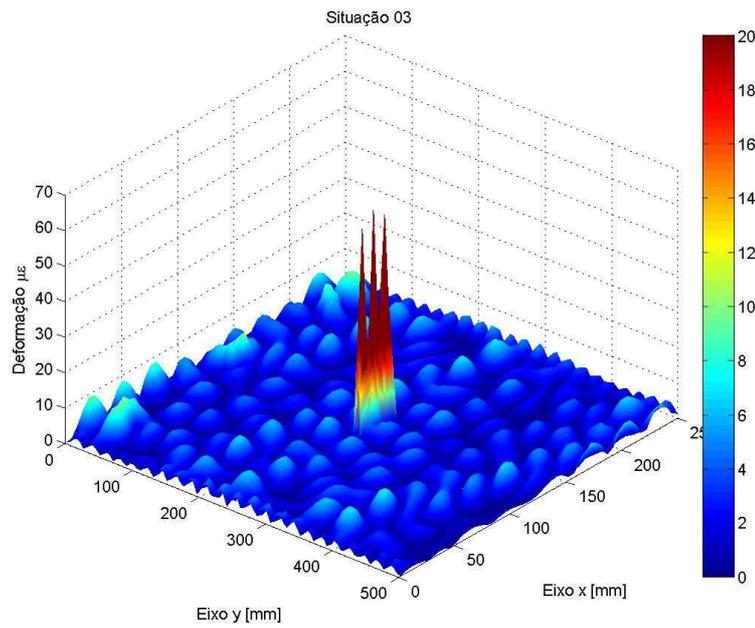


Figura 83 - Mapa de Deformação (Situação 3, frequência de 11,3 kHz).

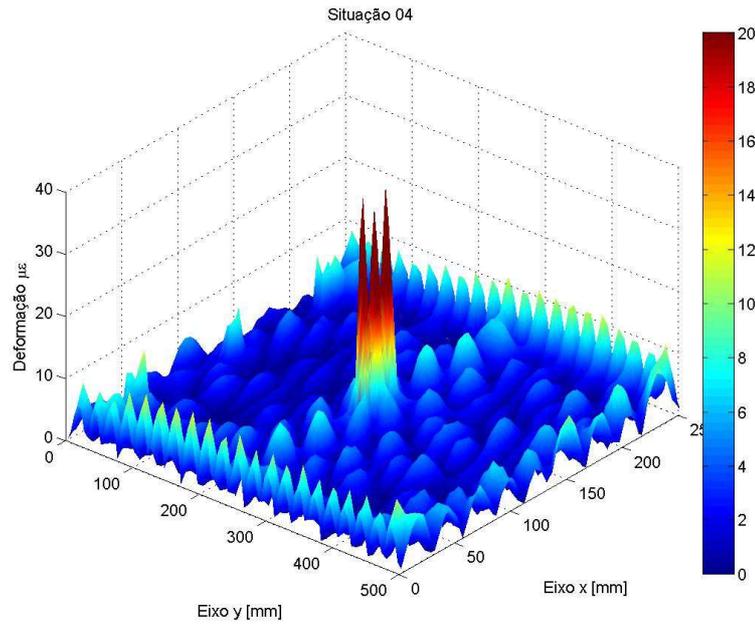


Figura 84 - Mapa de Deformação (Situação 4, frequência de 11,3 kHz).

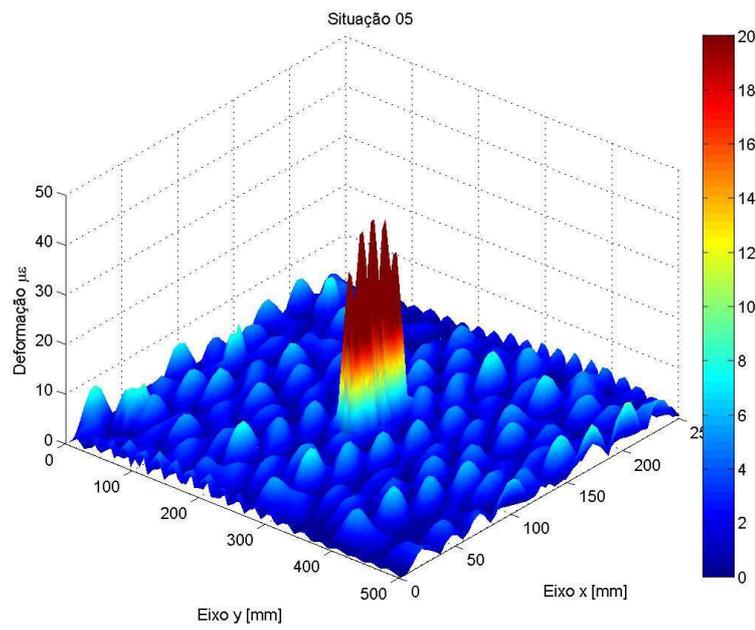


Figura 85 - Mapa de Deformação (Situação 5, frequência de 12,3 kHz).

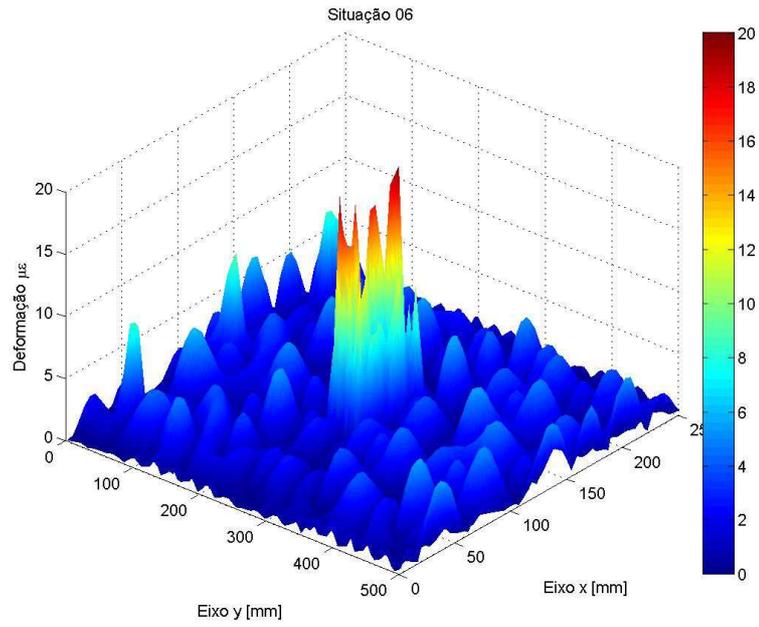


Figura 86 - Mapa de Deformação (Situação 6, frequência de 11,1 kHz).

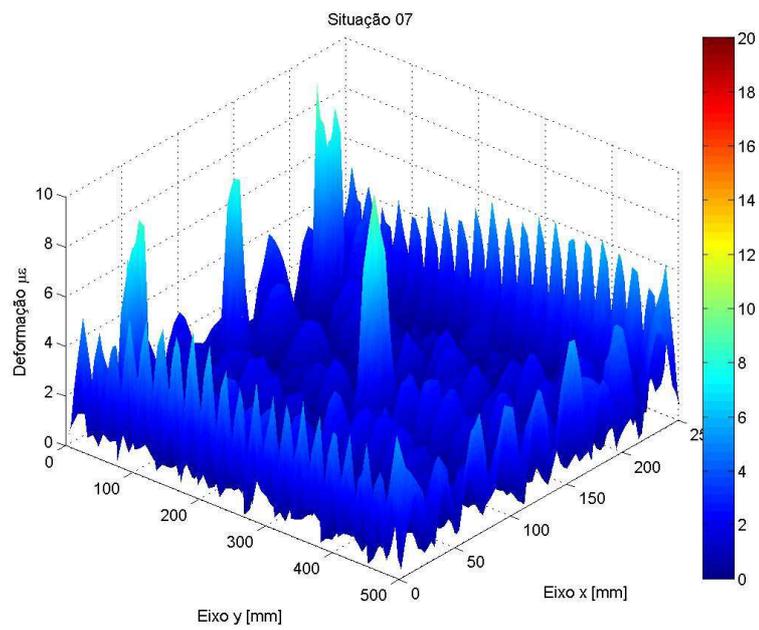


Figura 87 - Mapa de Deformação (Situação 7, frequência de 11,3 kHz).

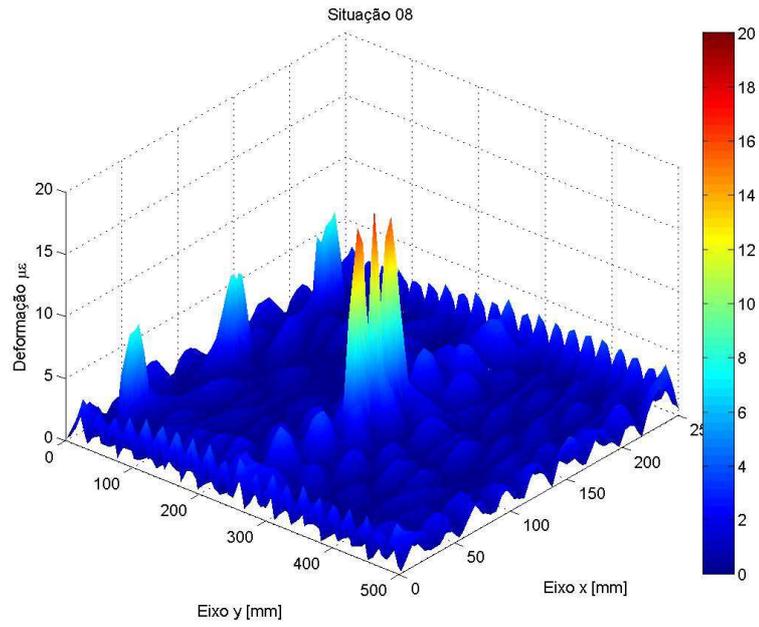


Figura 88 - Mapa de Deformação (Situação 8, frequência de 11,3 kHz).

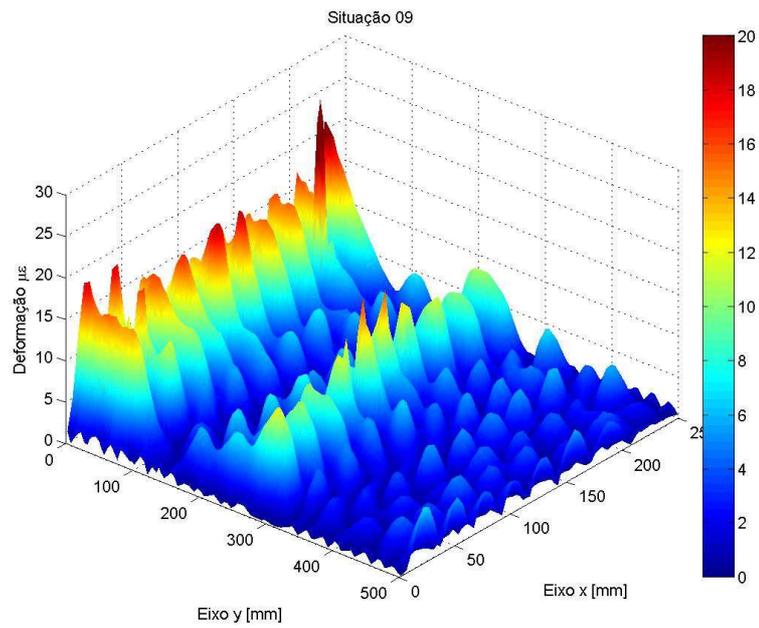


Figura 89 - Mapa de Deformação (Situação 9, frequência de 13,8 kHz).

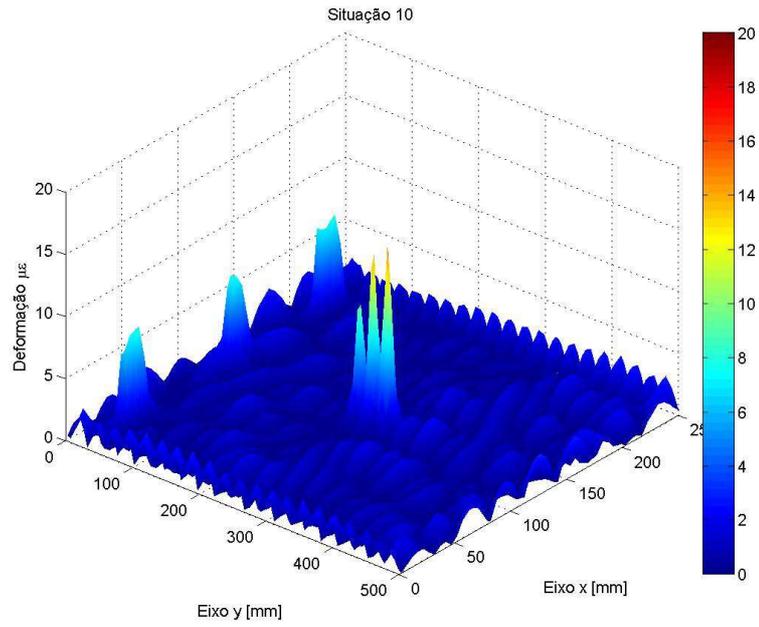


Figura 90 - Mapa de Deformação (Situação 10, frequência de 11,3 kHz).

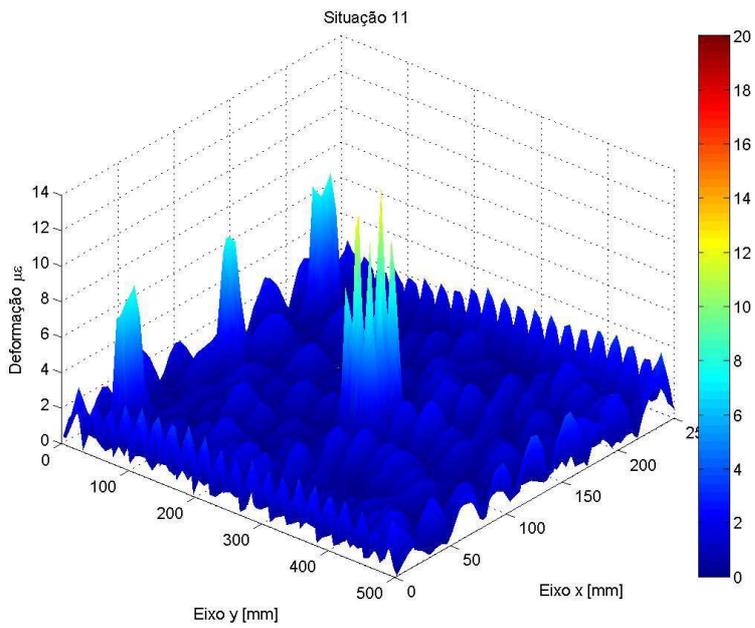


Figura 91 - Mapa de Deformação (Situação 11, frequência de 11,3 kHz).

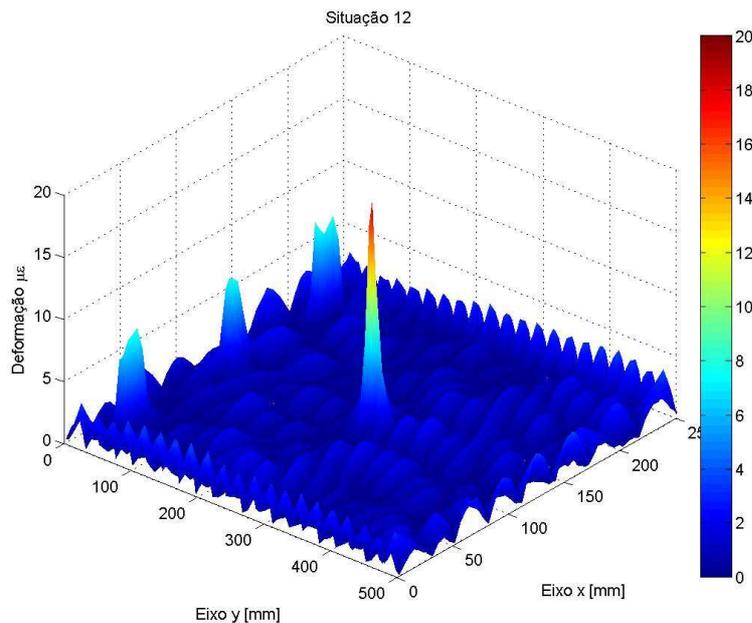


Figura 92 - Mapa de Deformação (Situação 12, frequência de 11,kHz).

- ***Caso 3 - Modelos com Cpm de mesma dimensão observadas nas superfícies superior e inferior.***

A seguir são apresentados alguns casos de deformações registradas nos modelos com mesmo *Cpm*, variando-se a superfície da placa analisada. Esta análise visa identificar a não dependência das deformações quando observadas ora na mesma superfície em que os atuadores se encontram, ora na superfície oposta. Para garantir que a única variável fosse a presença ou não dos atuadores, foi escolhido para esta análise as placas com delaminação entre camadas A8/A9. Dessa forma a distância da delaminação para as duas superfícies da placa (superfície superior e inferior) não se altera, visto que a delaminação se encontra no centro da placa de compósito. É importante dizer que o tamanho da delaminação nesta análise não tinha muita relevância sendo então escolhida a Situação 4 da Tabela 9 por se estar usando esta configuração em outras análises.

Nos gráficos das figuras 93, 94 e 95 podem-se observar as deformações relativas às camadas superior e inferior quando excitadas pelas frequências de 11,3kHz, 13,3kHz e 13,8kHz.

Fica evidente que as deformações causadas pelos atuadores quando registradas na camada em que os mesmos se encontram são muito mais elevadas, mas as deformações ao longo da placa se mantêm relativamente com seu comportamento inalterado.

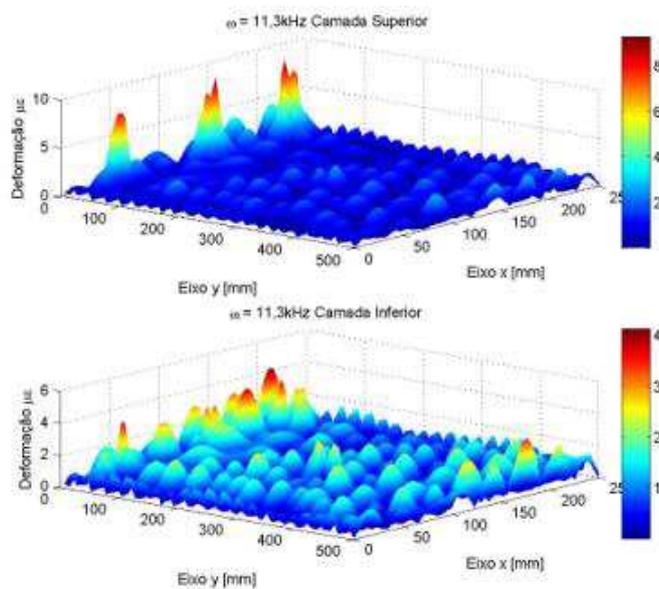


Figura 93 - Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 11,3kHz.

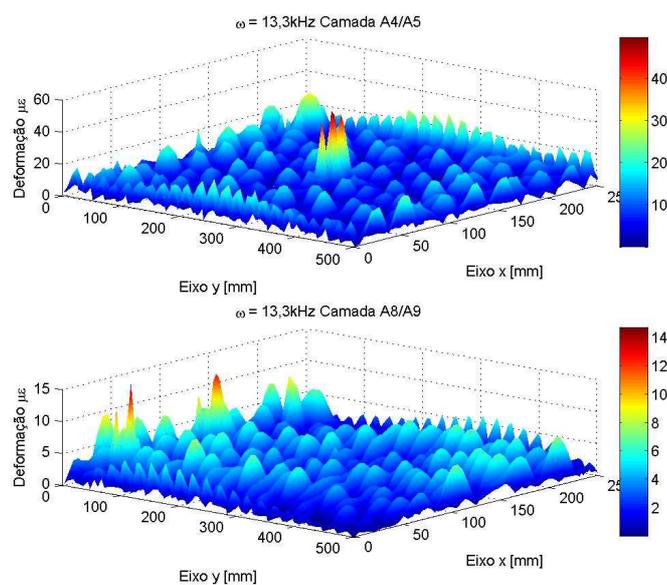


Figura 94 -- Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 13,3kHz.

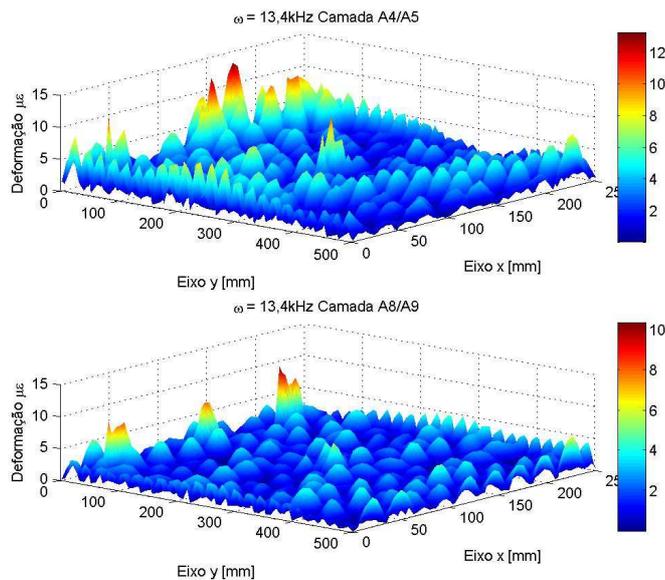


Figura 95 - Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 13,8kHz.

- *Caso 4 - Modelos com C_{pm} de mesma dimensão, mas em diferentes camadas.*

A seguir são apresentadas nos gráficos de 96 à 104, nove situações distintas: frequência de excitação de 13,3kHz, 13,4kHz e 13,5kHz e defeitos quadrados de uma polegada, 1,5 polegadas e 2 polegadas (todos localizados no centro do C_p).

Fica evidente que a observação da delaminação nas camadas mais superiores (entre a quarta e a quinta) é muito mais evidente do que nas camadas mais interiores (entre a oitava e nona) da placa de compósito.

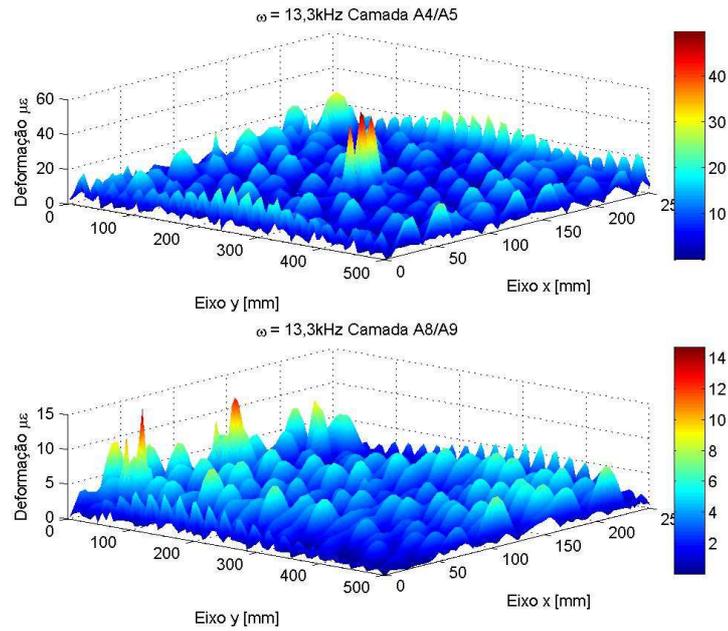


Figura 96 - Mapas de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).

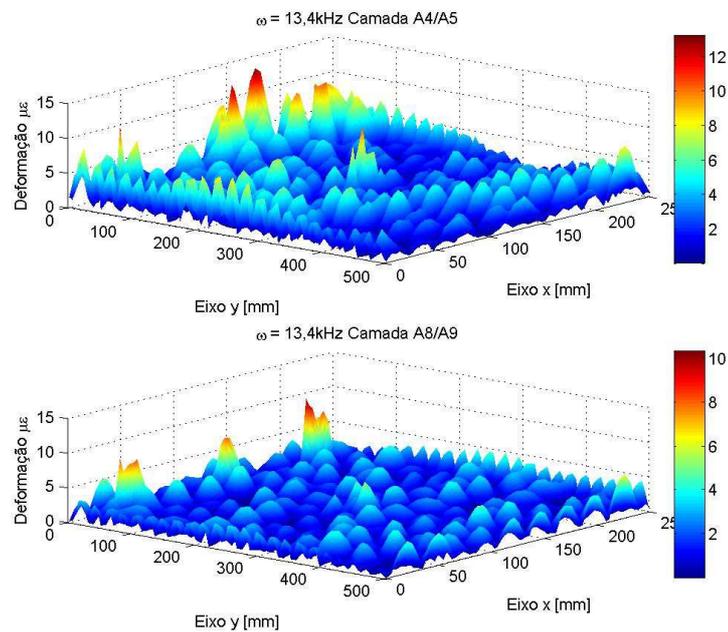


Figura 97 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).

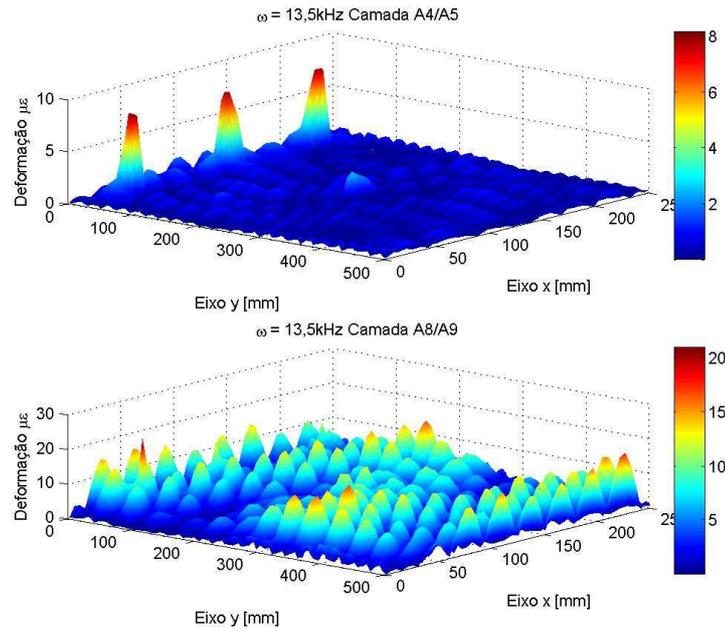


Figura 98 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).

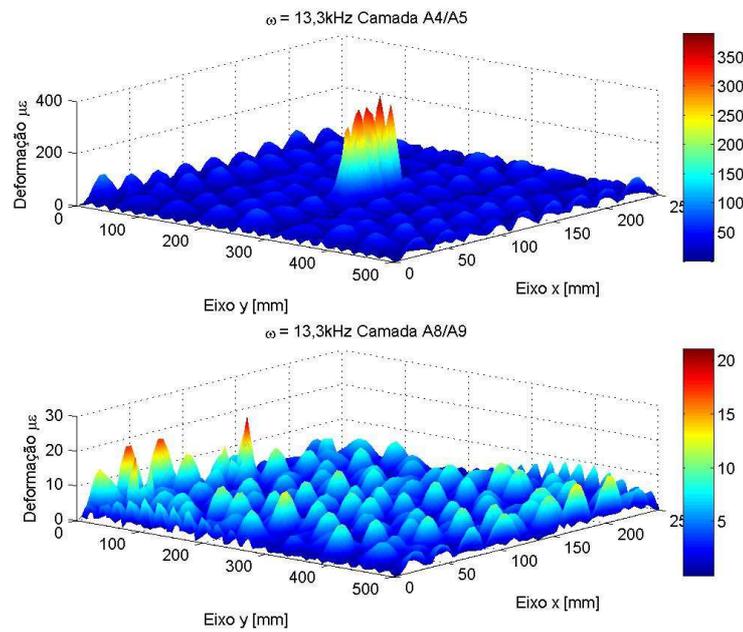


Figura 99 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada).

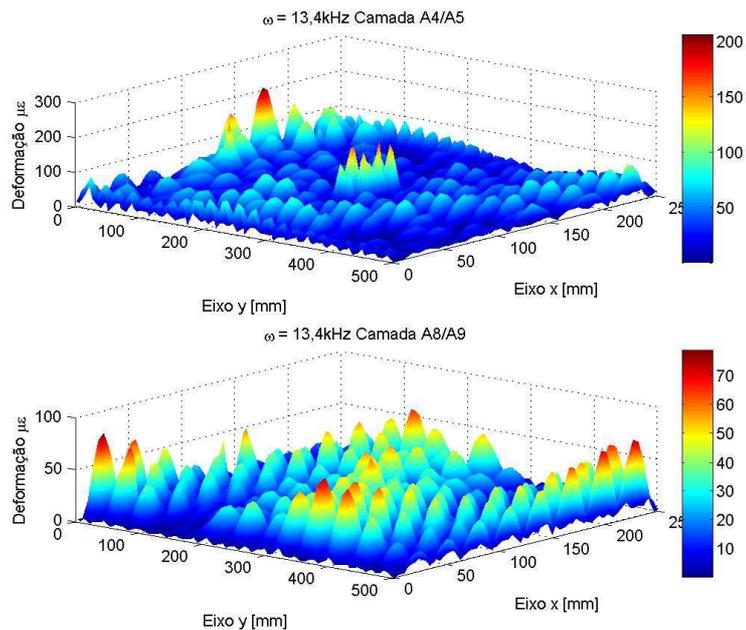


Figura 100 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada).

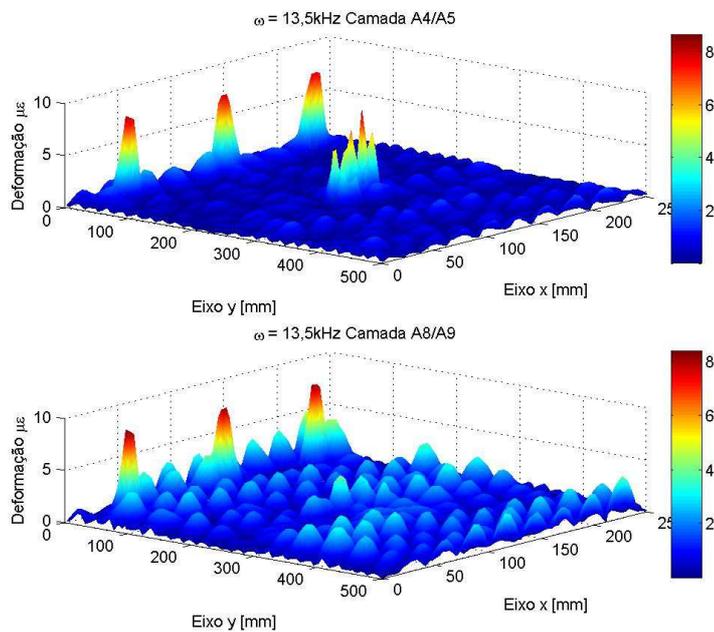


Figura 101 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada)

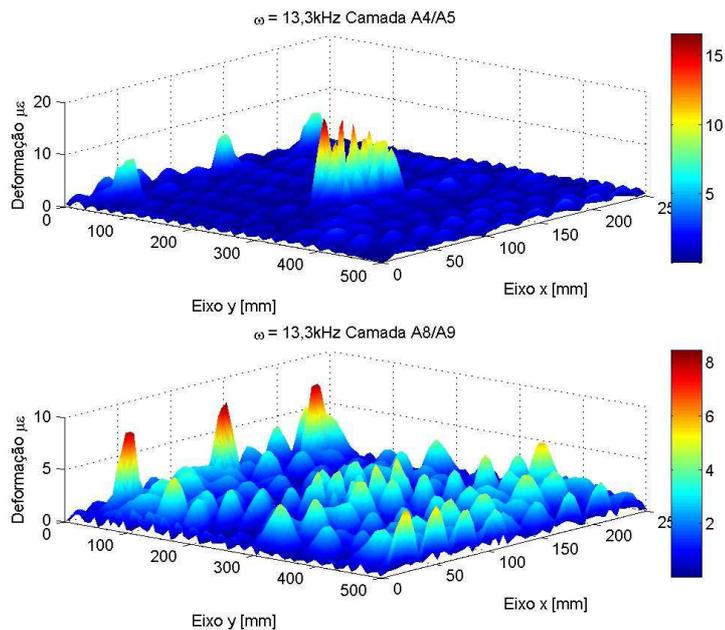


Figura 102 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).

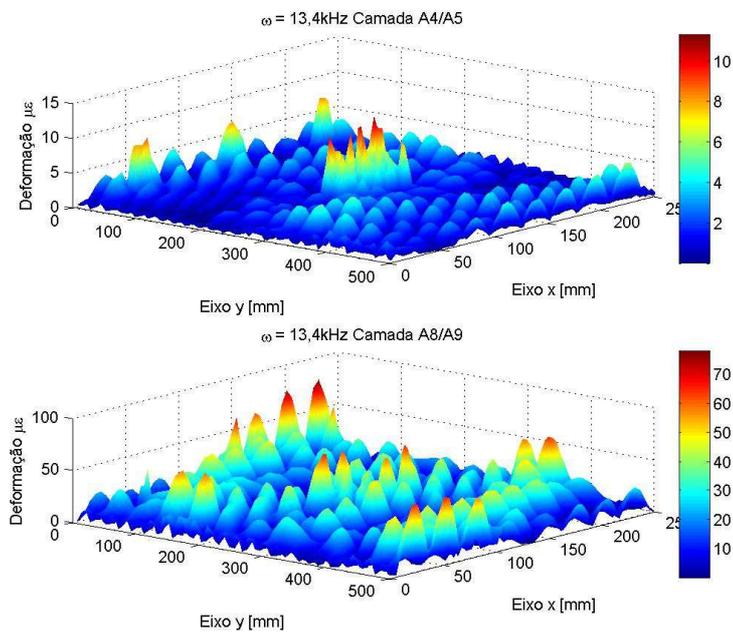


Figura 103 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).

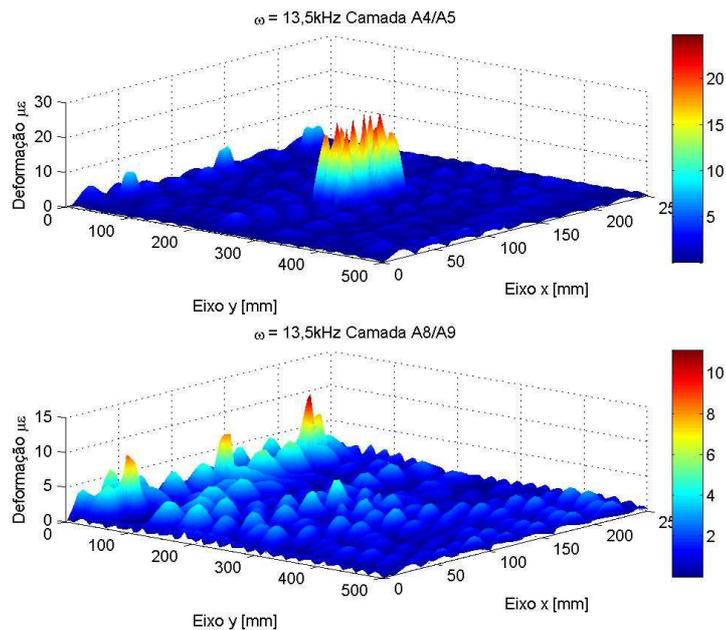


Figura 104 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).

6.1.4 Relação entre Malha e Detecção

Os mapas de deformação apresentados na secção anterior são importantes uma vez que enriquecem o conhecimento acerca dos fenômenos que serão abordados experimentalmente. Entretanto, eles pouco informam sobre o que será observado uma vez que não se pensa implementar uma malha de sensores posicionada em milímetro em milímetro. Assim, o próximo passo lógico consiste em construir mapas de deformação que representem informações colhidas em espaçamentos condizentes com o que se planeja realizar experimentalmente. É importante ressaltar que essas informações não representam a deformação do ponto central do sensor e sim a média de 3 pontos de deformação (um ponto anterior, um posterior e o ponto central).

- Malha de sensores em 15mm

O primeiro caso que foi abordado consiste em se representar uma malha de sensores fictícios com seus centros dispostos a 15mm um do outro, como apresentado na representação gráfica da figura 105. Esta malha representa uma configuração de grande densidade de sensores. Esta configuração foi testada com 6 delaminações (entre as

camadas 4 e 5), 3 quadradas e 3 retangulares com lados de dimensões iguais à: (6,35mm por 6,35mm), (25,4mm por 25,4mm), (50,8mm por 50,8mm), (25,4mm por 12,7mm), (25,4mm por 50,8mm) e (12,7mm por 63,5mm), todos com as delaminações entre as camadas A4/A5. Os gráficos das figuras de 106 à 111 representa, o mapa de deformação completo gerado pela simulação e os respectivos mapas de deformação gerados pela grade de sensores fictícios dispostos na malha proposta.

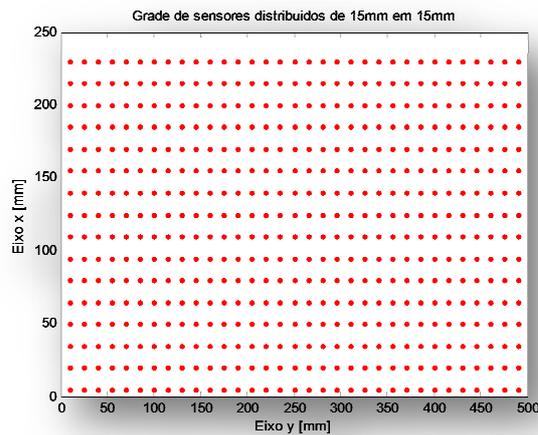


Figura 105 - Grade de Sensores espalhados de 15mm em 15mm.

Pode-se observar que para essa malha escolhida é possível realizar uma determinação visual dos defeitos (em sua maioria com grande resolução), mesmo trabalhando com uma frequência específica (11,3kHz). É importante ressaltar que o espaçamento da malha igual a 15mm é inferior a quase todos dos tamanhos de defeitos testados, só sendo superior às situações 1 e 2 (6,35mm por 6,35mm e 12,7mm por 12,7mm).

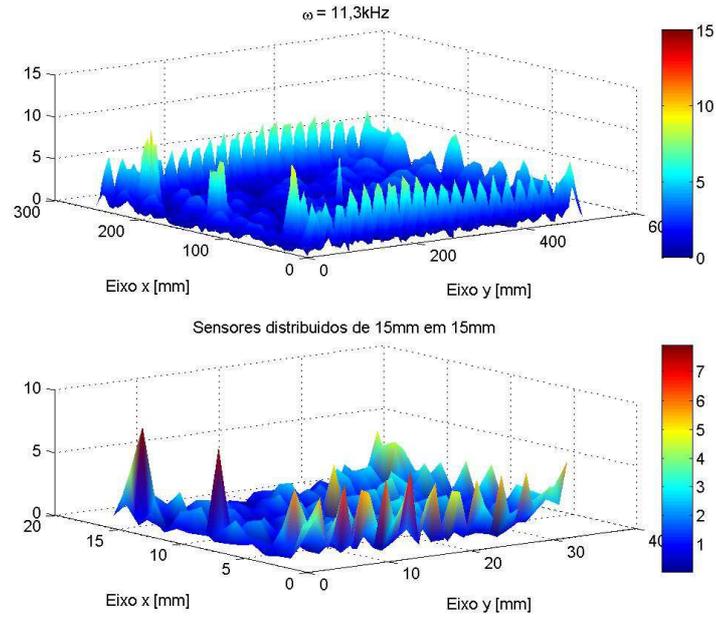


Figura 106 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.

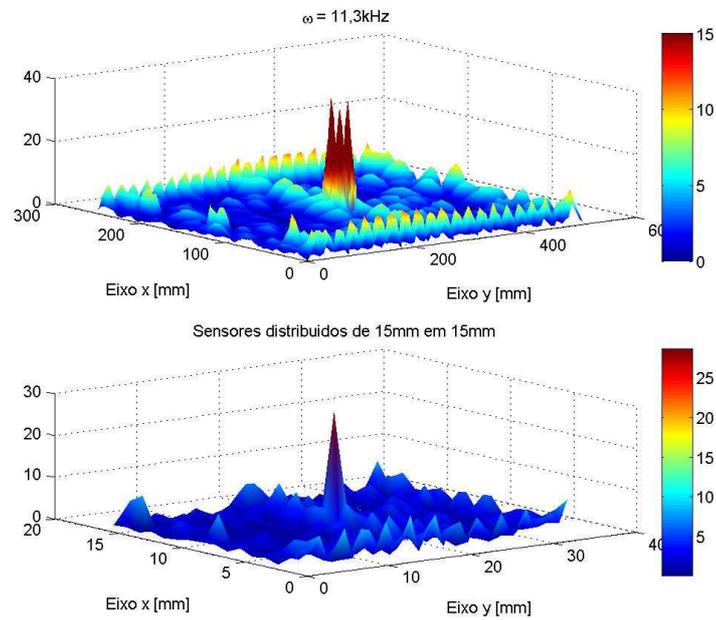


Figura 107 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.

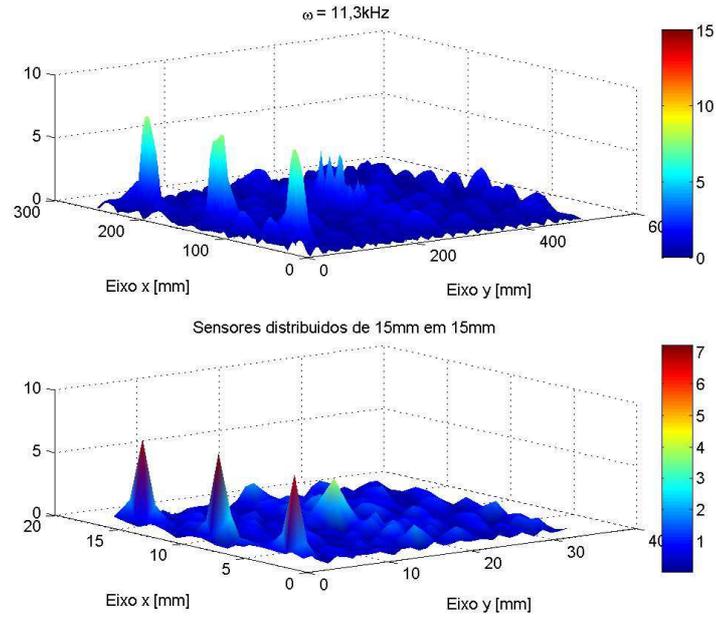


Figura 108 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.

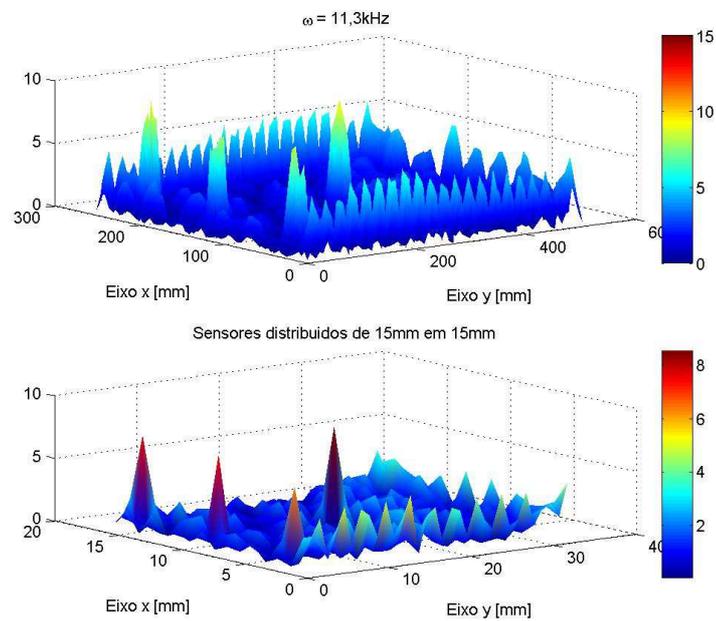


Figura 109 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 12,7mm.

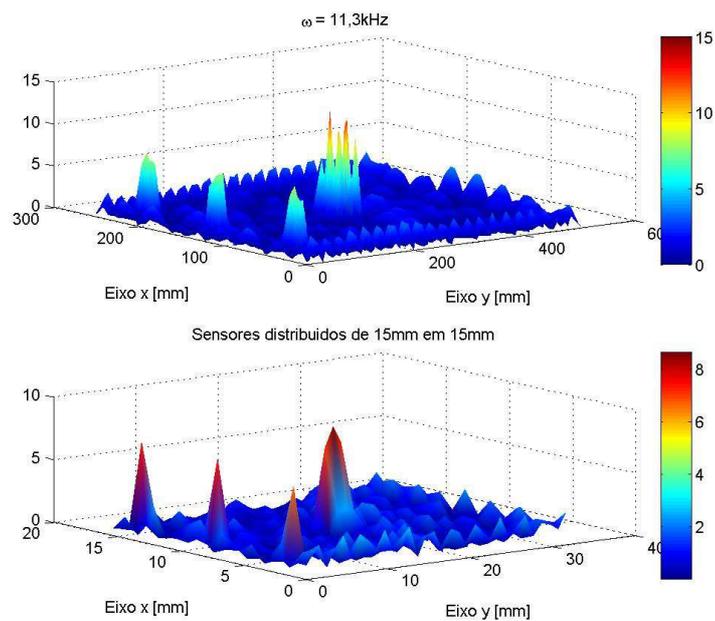


Figura 110 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.

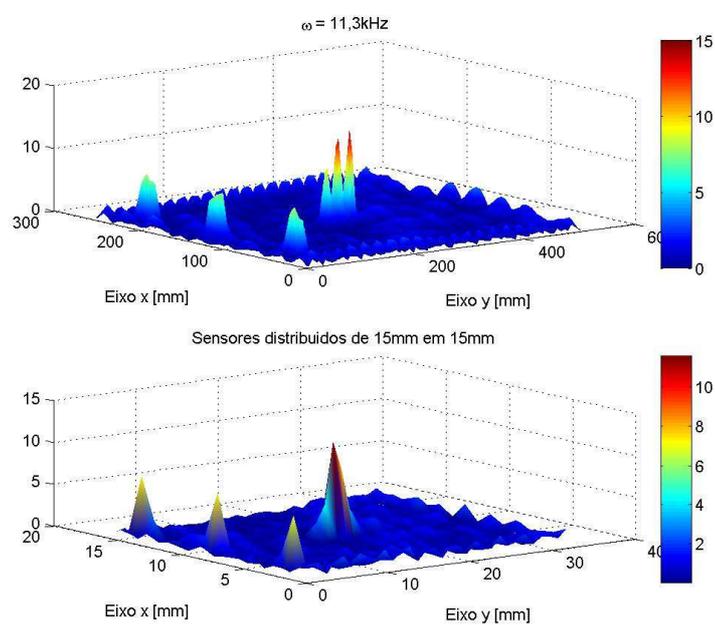


Figura 111 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.

- Malha de sensores em 30mm

Uma segunda análise foi feita para uma malha mais grosseira (figura 112), onde os sensores foram espalhados de 30mm um do outro. Nesse caso, o espaçamento da malha é superior a todos as situações testadas em pelo menos uma das suas dimensões (ou no comprimento ou na largura), e mesmo assim ainda é possível fazer uma determinação visual do dano na estrutura, como visto nos gráficos das figuras de 113 à 118.

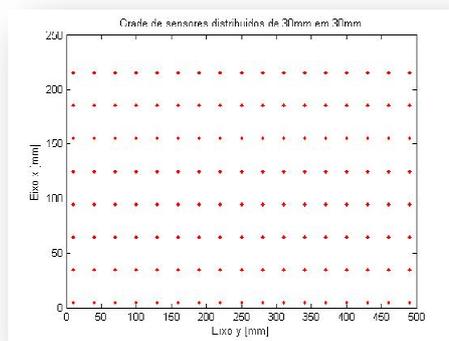


Figura 112 - Grade de Sensores espalhados de 30mm em 30mm.

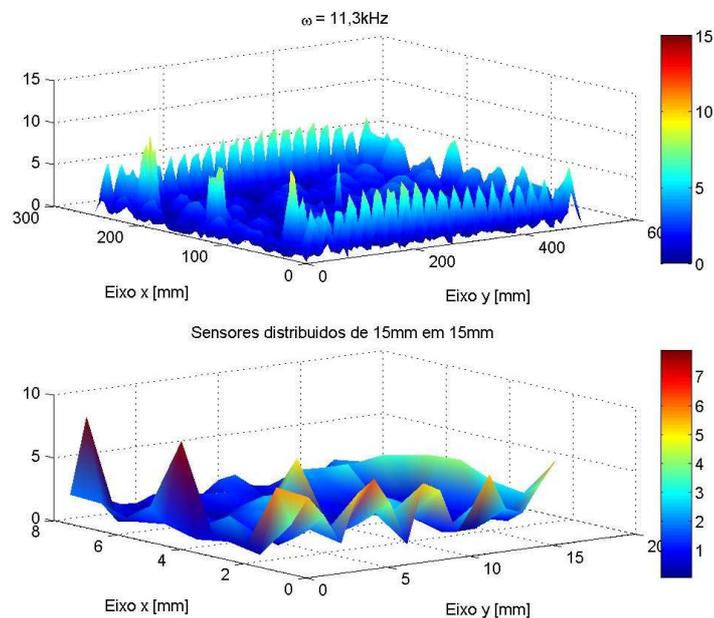


Figura 113 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.

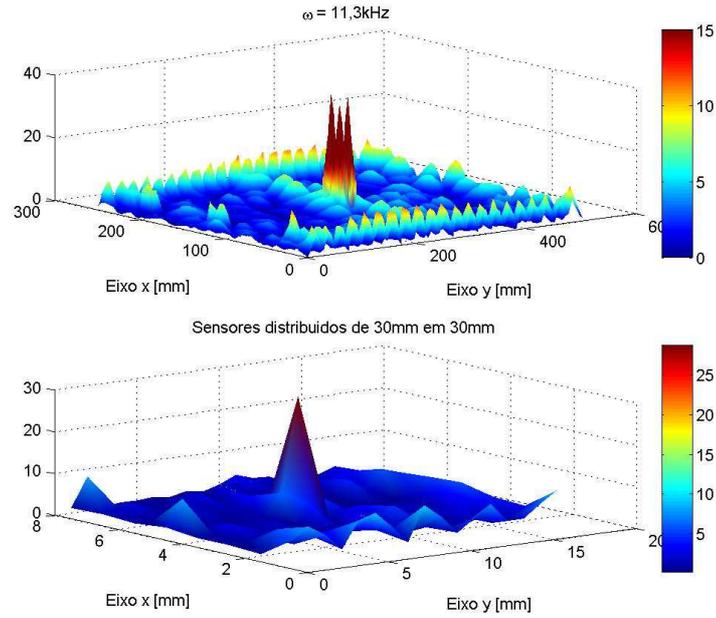


Figura 114 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.

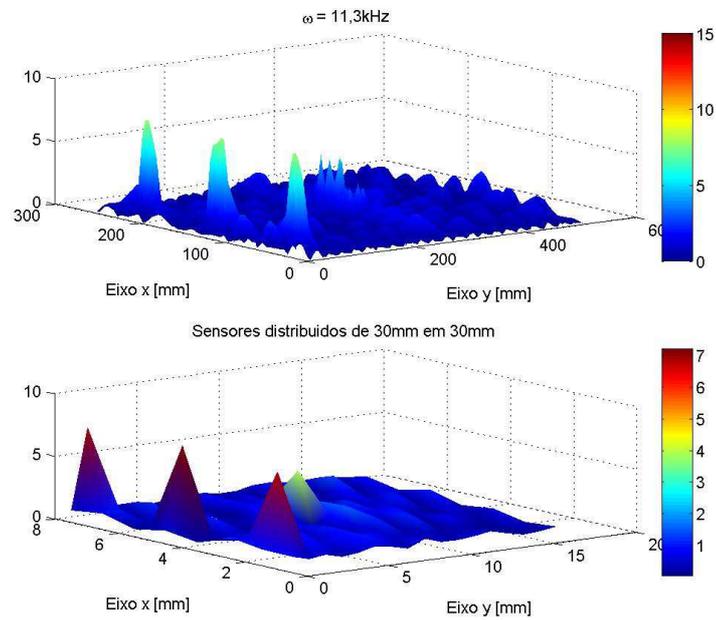


Figura 115 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.

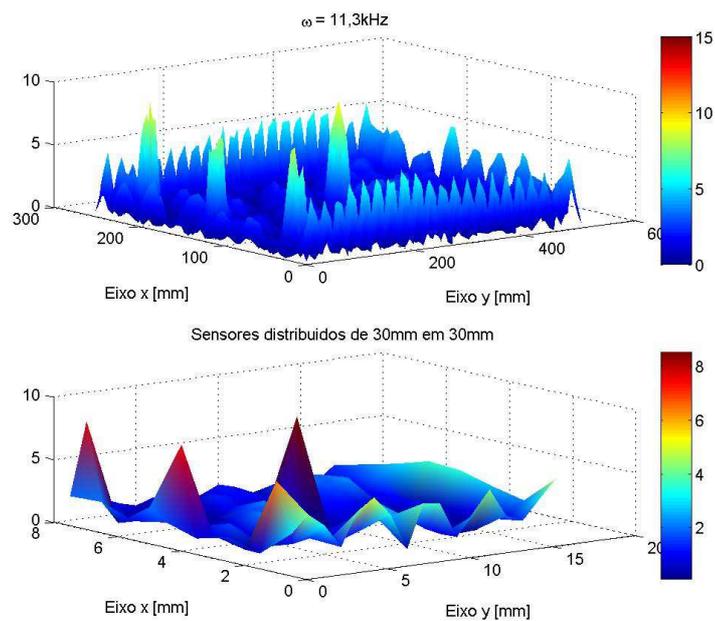


Figura 116 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 12,7mm.

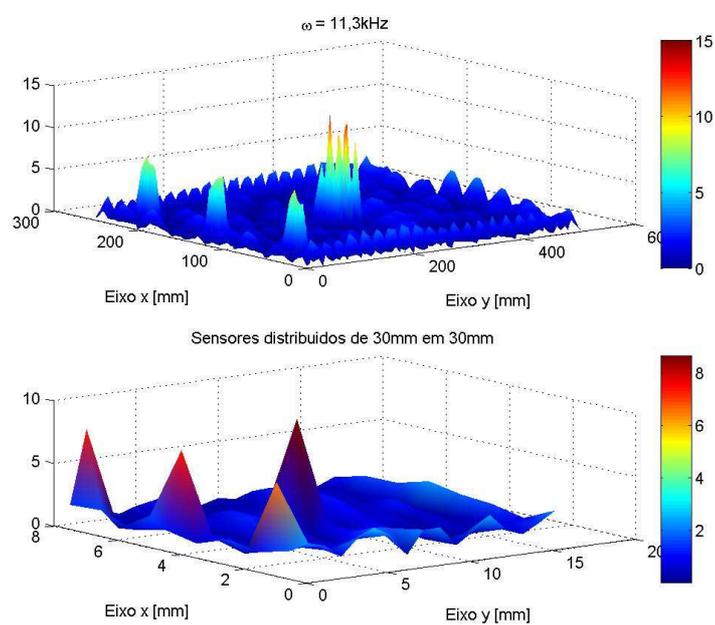


Figura 117 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.

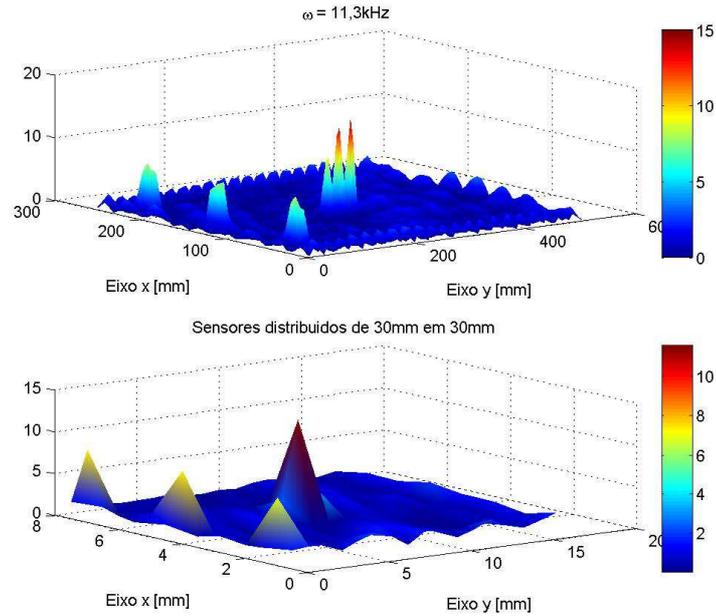


Figura 118 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.

- Malha de sensores em 50mm

Por último fora testado uma malha com sensores distantes 50mm um do outro (figura 119). Nessa análise grande parte dos defeitos ficaram menores que o espaçamento dos sensores, o que prejudicou bastante o reconhecimento do mesmo, como pode-se observar pelos gráficos das figuras de 120 à 125.

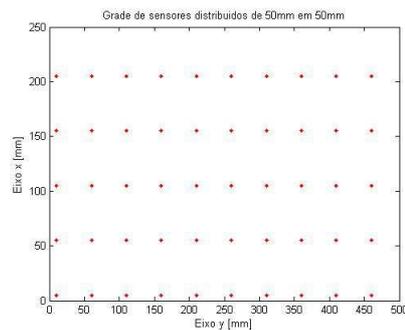


Figura 119 - Grade de Sensores espalhados de 50mm em 50mm.

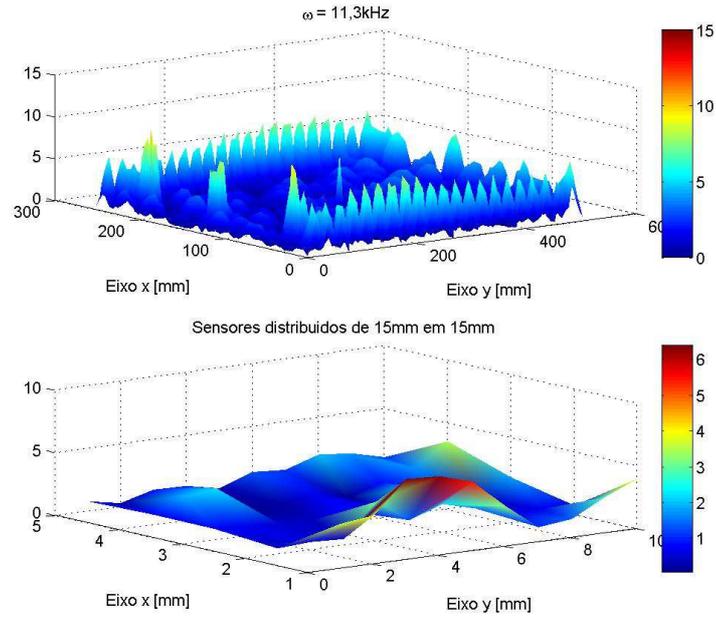


Figura 120 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.

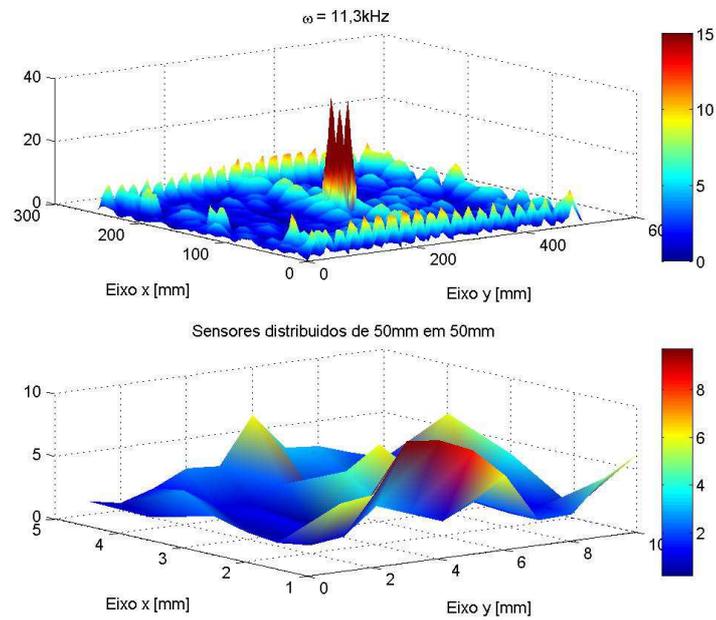


Figura 121 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.

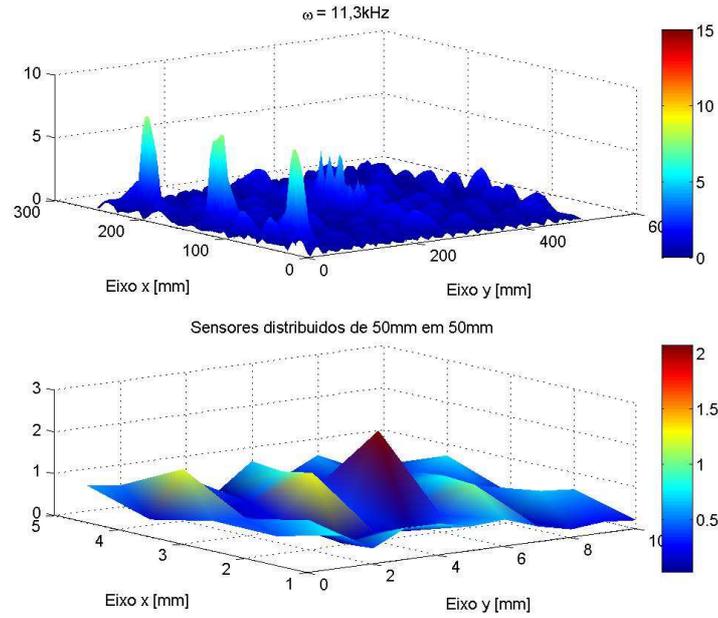


Figura 122- Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.

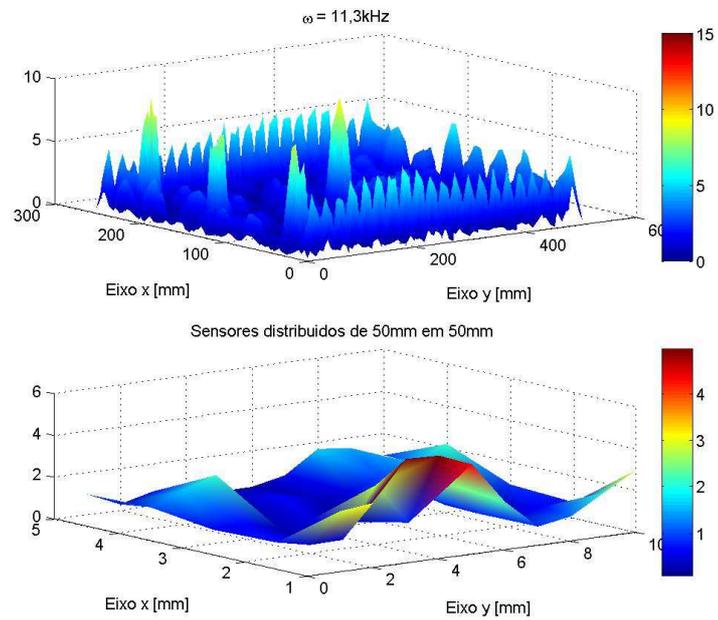


Figura 123 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 12,7mm.

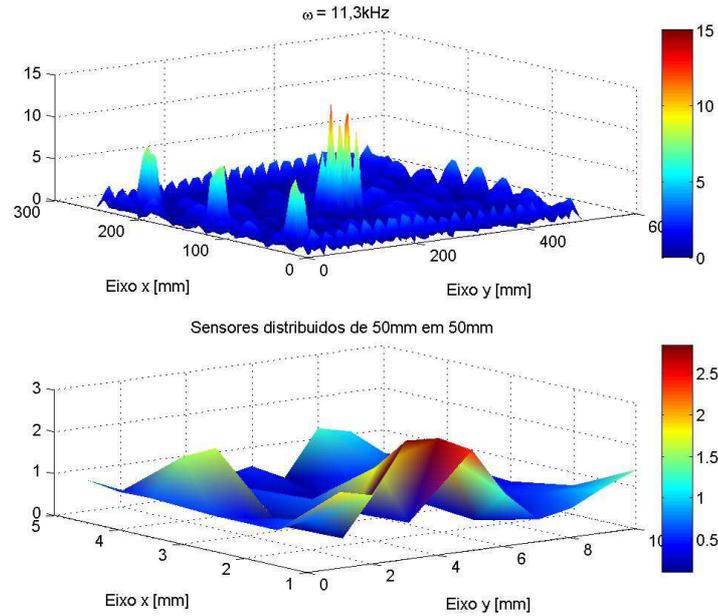


Figura 124 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.

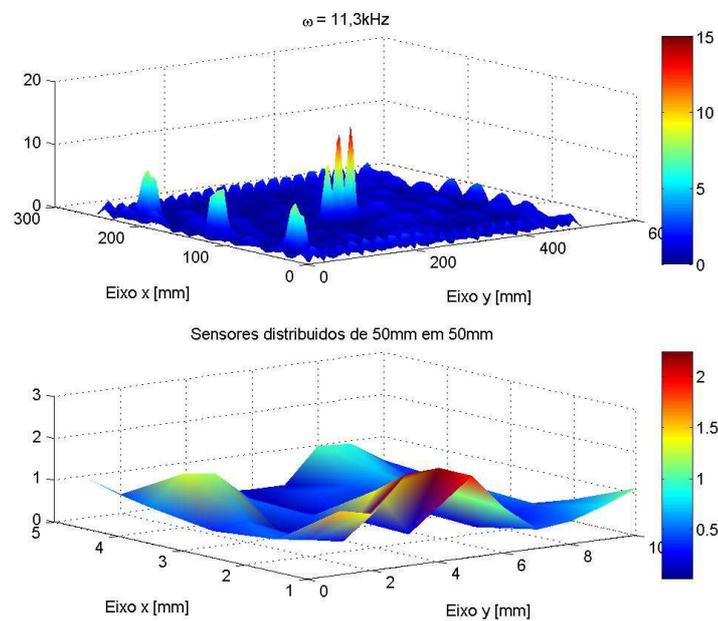


Figura 125 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.

6.2 Ensaio Experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados em placas de material compósito (*coupons*), com as mesmas dimensões dos *Cpm* usados nas simulações. Estes ensaios, foram desenvolvidos através do trabalho dos pesquisadores do laboratório de sensores à fibra óptica (LSFO) da PUC-Rio, e foram cedidos para complementar as análises desta tese, não tendo o presente autor, mérito pela sua aquisição. Desta forma, os procedimentos de aquisição desenvolvidos não serão detalhados, sendo apenas brevemente apresentados.

6.2.1 Descrição experimental.

Analogamente ao modelo numérico, foram fixados sobre o *coupon* 3 atuadores PZT para excitação dinâmica.

O *Coupon* ensaiado continha uma delaminação entre as camadas 4 e 5, com dimensões de 25,4mm x 25,4mm. As suas extremidade foram deixadas livres, suspensas por fios como mostra a foto da figura 126

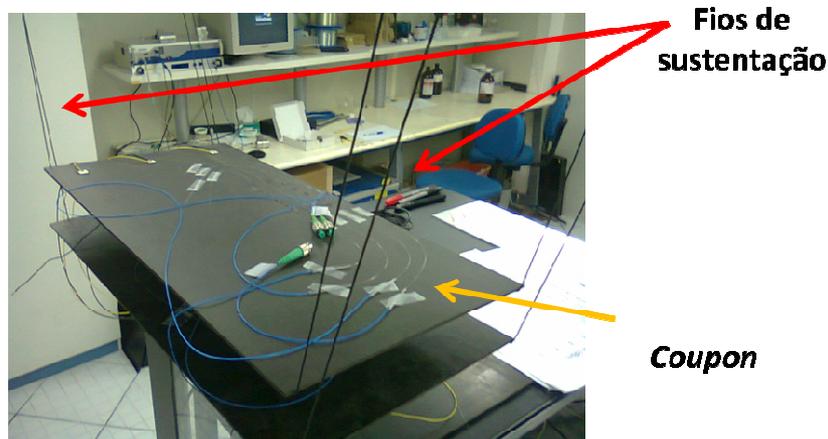


Figura 126 - Foto do Coupon suspenso por fios no laboratório LSFO da PUC-Rio.

O aparato utilizado para as medições era composto dos seguintes equipamentos:

- 1 Laser sintonizável *TSL-510*;
- 1 *Lock-In 7270 DSP*;
- Circuito de foto detecção;
- 1 Acoplador óptico;
- 1 amplificador de potência *7500 amplifier*.

O procedimento de medição envolvia a utilização de um *Software* desenvolvido na plataforma *LabView*, o qual controlava a sintonia do laser via comunicação GP-IB, além de pré-processar o sinal obtido. A aquisição dos dados é feita da seguinte forma:

1. O laser (de comprimento de onda da ordem de pm) é sintonizado sobre o a parte linear do espectro de uma determinada FBG (da ordem de nm).
2. Simultaneamente o *Lock-in* aciona os atuadores PZT fixados ao *coupon*, controlando a amplitude e a frequência da tensão sobre eles .
3. O laser ao interferir com a rede de Bragg, tem parte do seu espectro refletido de volta, figura 127.

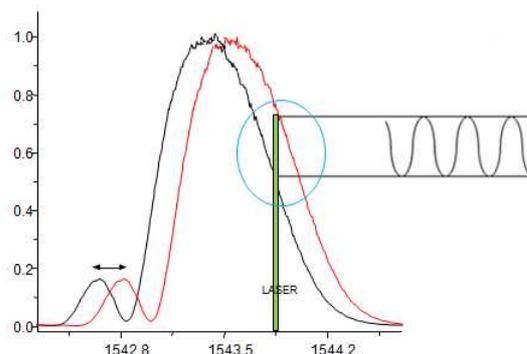


Figura 127 - Sinal obtido pela convolução do espectro do laser e da FBG.

4. A luminosidade refletida pela FBG incide sobre o foto detector que o transforma em tensão elétrica.
5. O *Lock-in* calcula a transformada de Fourier desse sinal para analisa-lo no domínio da frequência.
6. A frequência dessa tensão é comparada com a frequência de excitação aplicada nos PZT, eliminando qualquer sinal de frequência diferente.
7. É calculada a razão entre a amplitude do sinal filtrado e a amplitude do sinal emitido para os atuadores.
8. Essa razão de tensão, é por fim transformada em deformação através de uma calibragem realizada anteriormente.

Na figura 128, está representado o esquemático das descrições enumeradas.

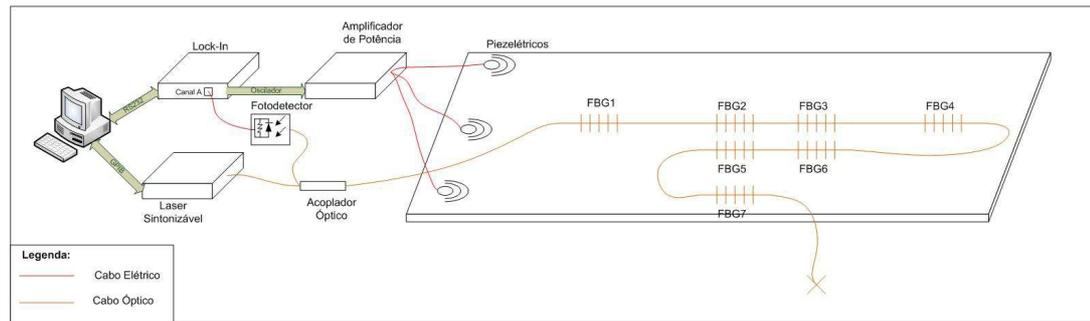


Figura 128 - Desenho esquemático do sistema de medição do *Coupon*.

6.2.2 Ensaio realizado.

Alguns ensaios foram realizados utilizando o *coupon* II-H na qual uma delaminação de uma polegada quadrada (25,4mm por 25,4mm) está formada entre as camadas 4 e 5.

Será apresentado os resultados de um ensaio feito no LSFO. Este ensaio é composto por uma grade de sensores FBG, contendo 20 sensores e foi implementada no *coupon* II-H.

Uma malha regular de 20 sensores FBG foi distribuída sobre a superfície acima da delaminação no *coupon*. No desenho da figura 129, pode-se ver o posicionamento dos sensores (pontos brancos sobre o *coupon*) assim como o posicionamento da delaminação. Embora este desenho não mostre, os atuadores PZT estão anexados à mesma superfície dos sensores, e a sua posição é a mesma dada pela tabela 8. Observa-se ainda que nesta configuração de malha, existe um sensor exatamente sobre o dano.

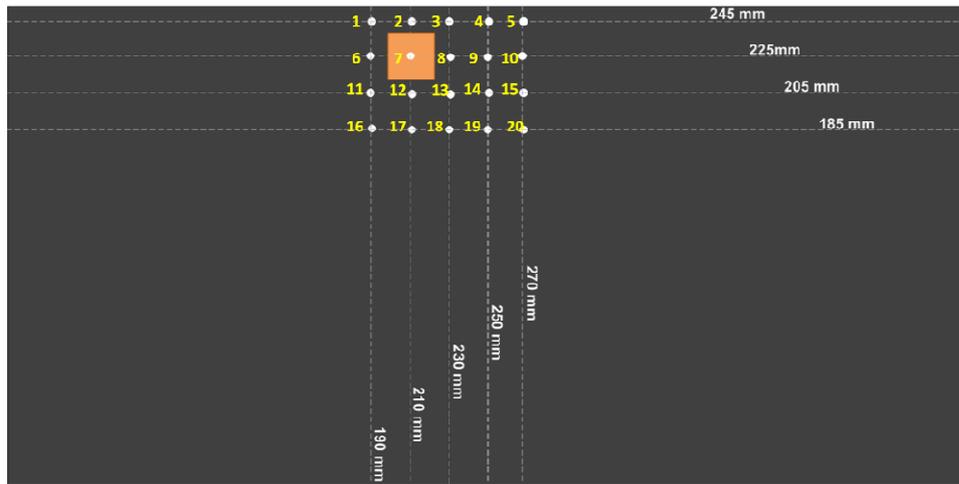


Figura 129 - Representação da configuração da grade de 20 sensores FBG.

Alguns resultados obtidos neste caso podem ser observados nos gráficos das figuras 130, 131 e 132.

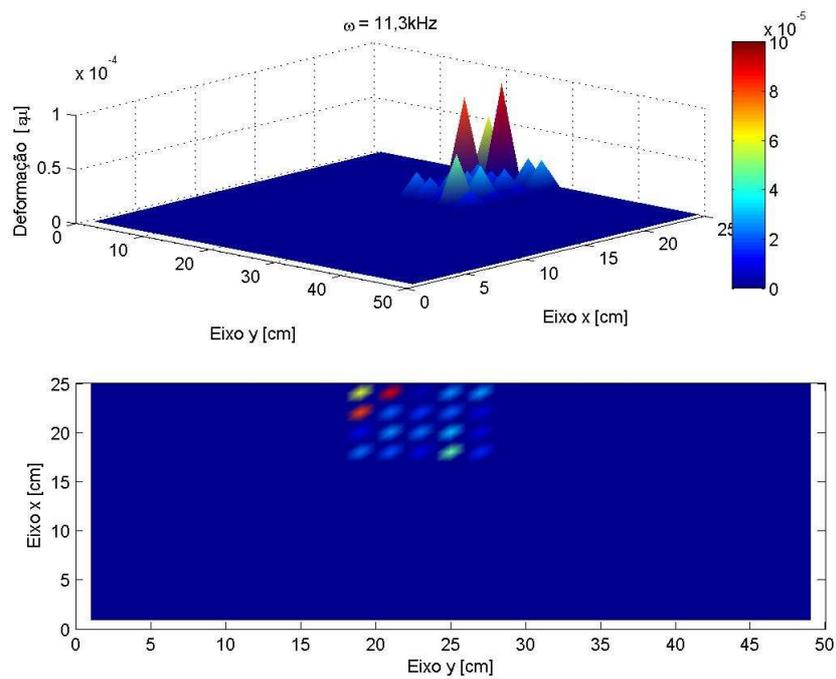


Figura 130 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,3kHz.

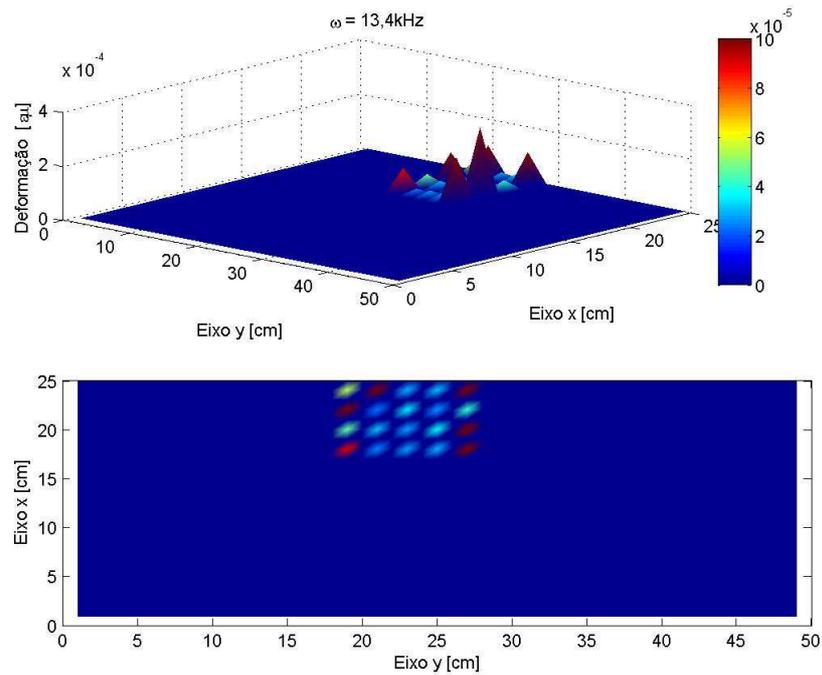


Figura 131 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,4kHz.

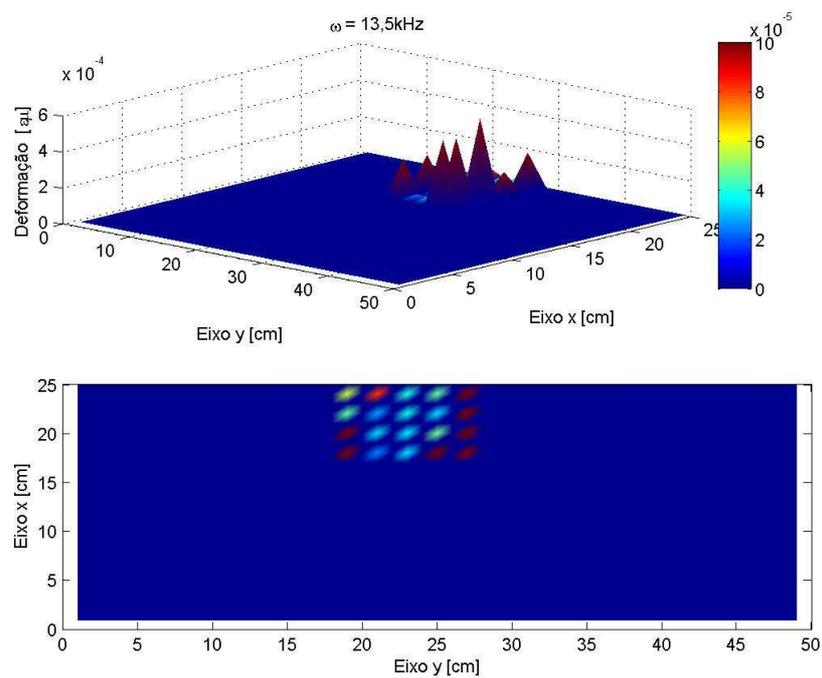


Figura 132 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,kHz.

6.3 Sistema SHM para Delaminação

6.3.1 Detecção

Através das simulações do comportamento mecânico de uma placa de material compósito, de dimensões iguais a 250mm de largura (eixo x) 500mm de comprimento (eixo y) e 3mm de espessura, foi possível extrair informações a cerca das deformações superficiais apresentadas quando a mesma se encontravam submetidas a excitação de 3 atuadores PZT em fase.

Duas situações foram analisadas para estes resultados, uma situação sem defeito e outra com uma delaminação no centro da placa, entre as camadas 4 e 5 e de dimensões de 25,4mm por 25,4mm (1 polegada quadrada).

A partir desses dados foram extraídos informações de linhas de pontos ao longo da placa (ao longo do eixo y), simulando a aquisição de dados por sensores pontuais. Foi escolhido trabalhar com linhas de sensores equidistantes 20mm, iniciando da posição $x = 25\text{mm}$ até 225. Nessas 11 linhas, foram obtidos pontos de deformação também de 20 em 20 milímetros, partindo de 0mm até 500mm. É interessante notar aqui, que de acordo com o que foi proposto a cima, as linhas de sensores simulados, passam pelas regiões em que os atuadores PZT estão fixados. Entretanto, como será mostrado a seguir, os dados de deformação de regiões próximas à atuadores não acarretaram em prejuízo para a detecção da delaminação.

Com relação às simulações, foram executados simulações com diferentes frequência de excitação. De fato foram realizados 40 simulações, correspondendo a frequências de excitação de 11,1kHz até 15kHz, com passo de 0,1kHz.

A figura 133 mostra 11 mapas de deformação (formado por uma linha de sensor a qual é informada no título de cada mapa) por frequência de excitação aplicada.

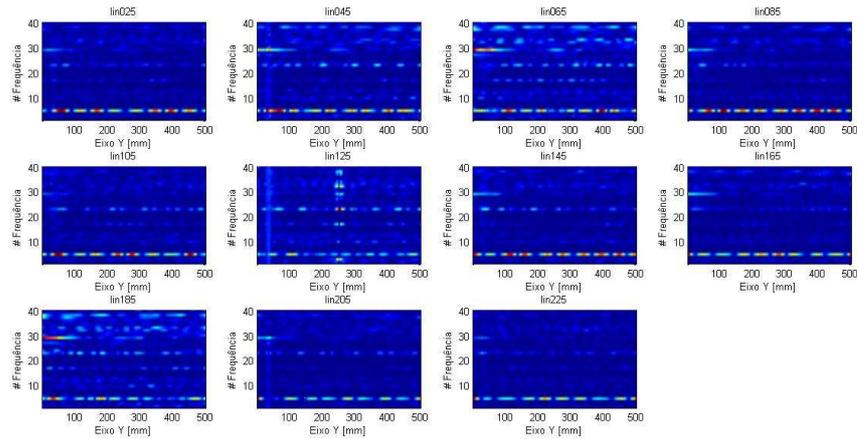


Figura 133 - Mapas de deformação por frequências de excitação.

Esses resultados possibilitam duas conclusões. A primeira é que para o mapa da linha que passa sobre o defeito (no caso a linha 125), o comportamento das deformações sobre os pontos $y = 250\text{mm}$ são acentuados. Esse tipo de efeito não foi registrado nos outros mapas. A segunda conclusão é que mesmo havendo variações entre os sinais nos outros mapas, estas só aparecem em algumas frequências específicas.

Dessa forma, foi desenvolvido um código, em MatLab, que interpretasse os dados de cada ponto nas linhas de deformação, para todas as frequências de excitação, a fim de se determinar uma região de destaque em relação às demais, sinalizado desta forma, a presença de delaminação. Nas figuras 134 e 135 são apresentados os esquemáticos, geral e detalhado, do algoritmo desenvolvido.



Figura 134 - Esquemático geral de detecção.

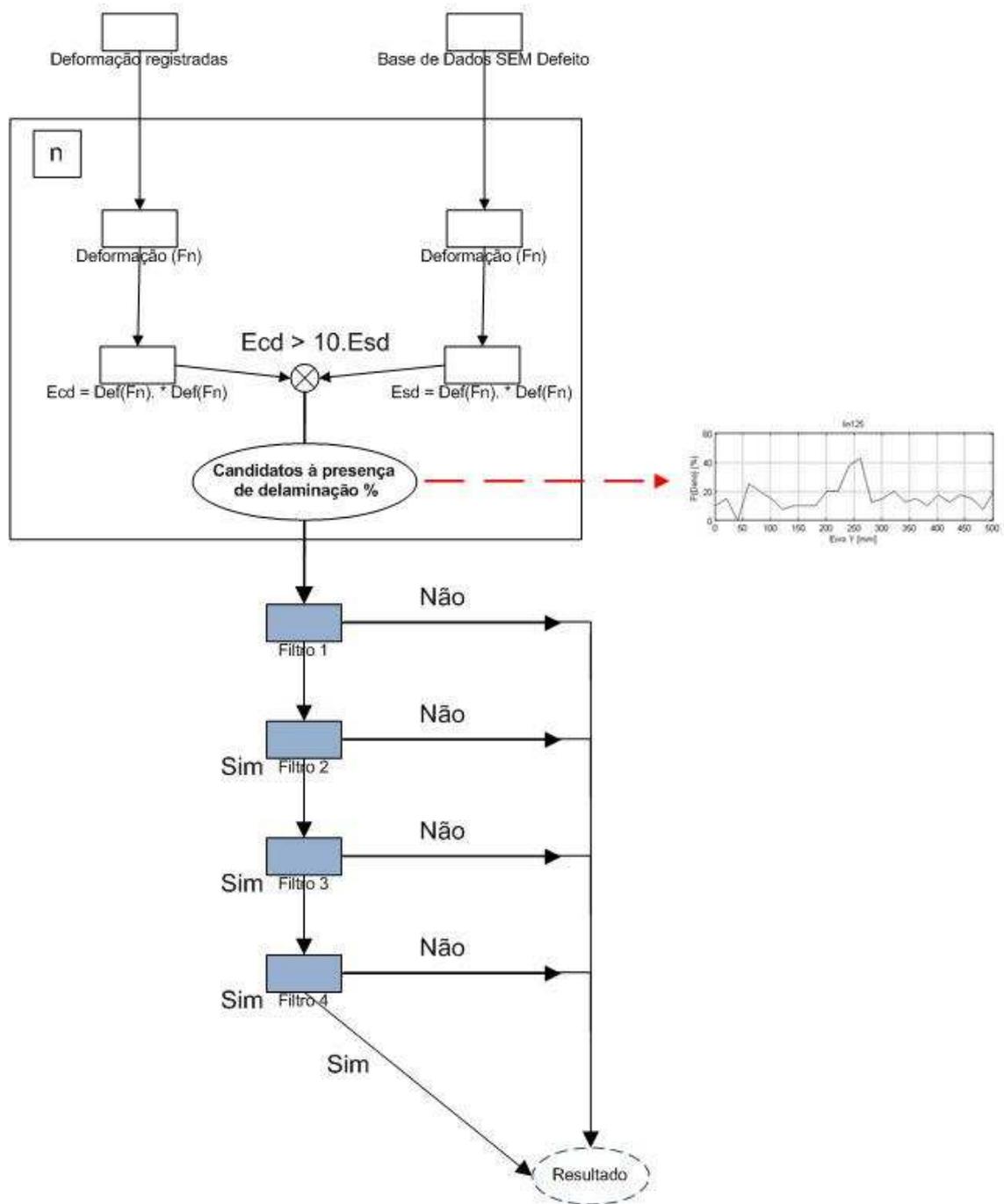


Figura 135 - Esquemático do algoritmo desenvolvido para a detecção de delaminação em uma placa de material compósito.

A detecção das regiões de delaminação foi realizada com a comparação dos valores das energias de cada linha de deformação ao longo de y das simulações com e sem defeito. Assim, todo valor de energia superior a um limiar igual a 2 vezes a energia na mesma linha sob a frequência de excitação de uma simulação de placa sem defeito,

era considerada como um defeito em potencial e armazenado. Após terem sido processados valores de todas as linhas de sensores sob todas as 40 frequências de excitação, calculou-se a probabilidade (dentro da amostra de dados fornecida) de uma dada região da placa conter uma delaminação. A figura 136 mostra os resultados obtidos com a análise realizada.

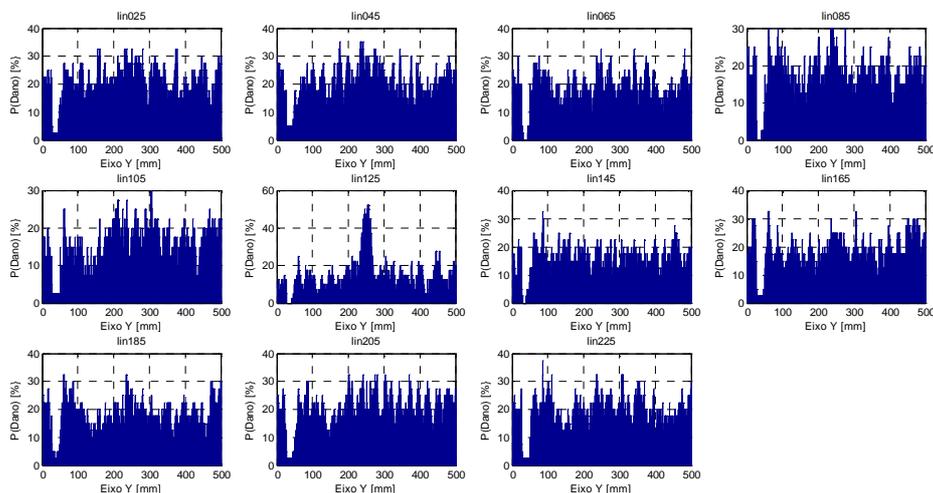


Figura 136 - Mapas de probabilidade de se obter um caso de defeito (delaminação).

É possível identificar o gráfico lin125 como o que apresenta uma visível alteração na probabilidade de delaminação quando comparado com a região ao redor. Nota-se também, que nos demais gráficos a probabilidade é indistinta entre os pontos ao redor, o que indica a ausência de dano. Por fim, é interessante observar que a região aonde os atuadores PZT estão localizados, a probabilidade de detecção foi sempre mais baixa, mostrando a ausência de interferência dos atuadores no que se refere à identificação da delaminação.

Uma vez determinada a eficiência da metodologia empregada no algoritmo de detecção desenvolvido, é necessário estender a análise realizada pra outras dimensões de delaminação. Foram testados 11 delaminações de dimensões diferentes da que já foi testada. Na tabela 11, pode-se observar as larguras e comprimentos de cada uma das delaminações propostas pra esta análise, incluindo a de uma polegada que já foi testada.

Tabela 11 - Dimensões das delaminações testadas com respeito à detecção.

Delaminação	Largura [Polegada]	Comprimento [Polegada]	Área [Polegada quadrada]
Modelo 1	0,25	0,25	0,0625
Modelo 2	0,50	0,50	0,2500
Modelo 3	0,75	0,75	0,5625
Modelo 4	1,00	1,00	1,0000
Modelo 5	1,50	1,50	2,2500
Modelo 6	2,00	2,00	4,0000
Modelo 7	0,50	1,50	0,7500
Modelo 8	0,50	2,50	1,2500
Modelo 9	1,00	0,50	0,5000
Modelo 10	1,00	2,00	2,0000
Modelo 11	1,50	1,00	1,5000
Modelo 12	2,00	0,50	1,0000

Como a posição da delaminação em todos os casos é conhecida, (todas estão localizadas no centro da placa de compósito, coordenadas $x = 125\text{mm}$ e $y = 400\text{mm}$) os resultados mostrados a seguir representam somente as linhas de sensores que passam sobre o defeito. Desta forma pretende-se somente observar a eficiência da metodologia em detectar quando se sabe que o dano existe.

Os gráficos das figuras 137 à 148 representam as probabilidades de detecção por posição e as intensidades de energia dos padrões de deformação por posição e frequência de excitação nos atuadores.

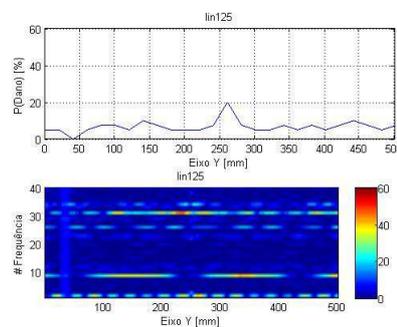


Figura 137- Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 0,5 polegadas.

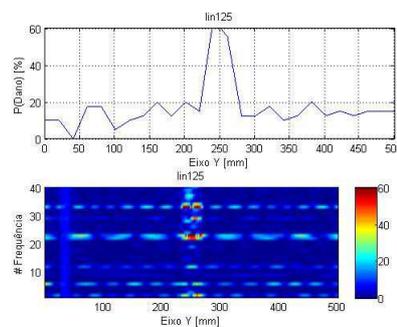


Figura 138 - Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 1,5 polegadas.

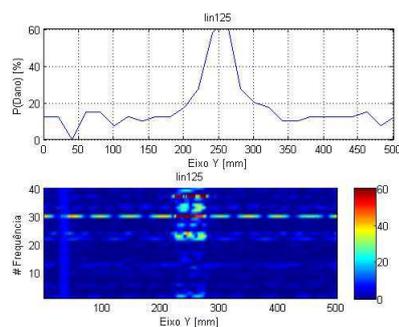


Figura 139- Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 2,5 polegadas.

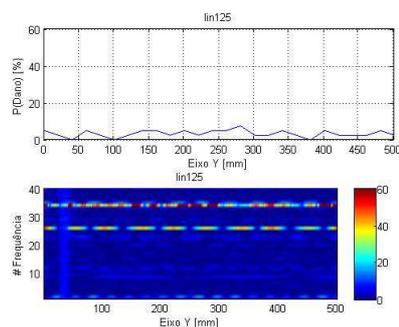


Figura 140 - Delaminação de dimensões iguais à 0,25 polegadas por 0,25 polegadas.

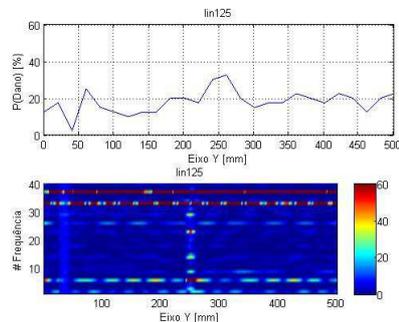


Figura 141 - Delaminação de dimensões iguais à 0,75 polegadas por 0,75 polegadas.

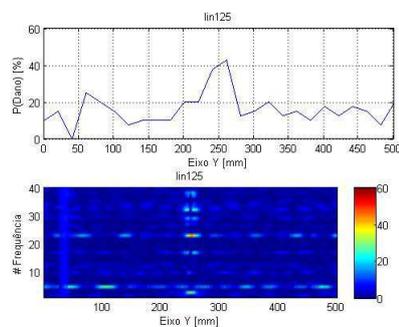


Figura 142 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 1,0 polegadas.

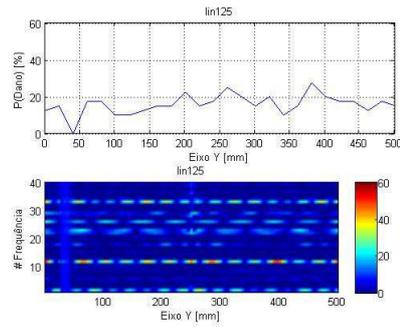


Figura 143 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 0,5 polegadas.

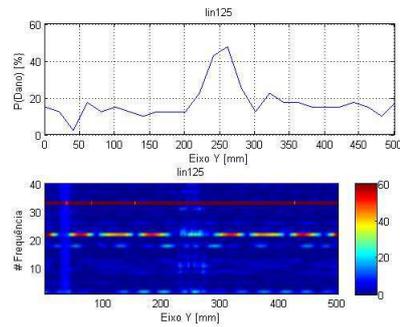


Figura 144 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 2,0 polegadas.

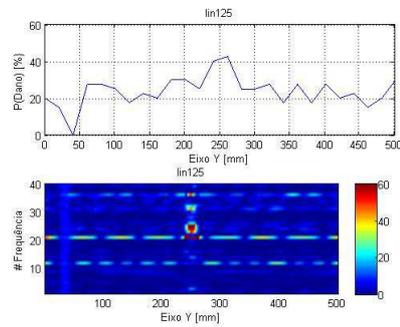


Figura 145 - Delaminação de dimensões iguais à 1,5 polegadas por 1,0 polegadas.

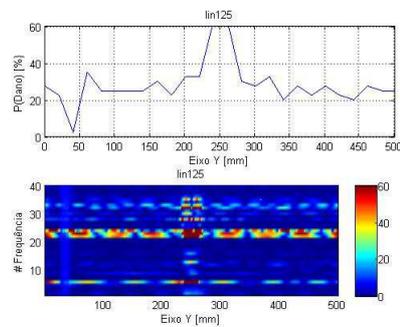


Figura 146 - Delaminação de dimensões iguais à 1,5 polegadas por 1,5 polegadas.

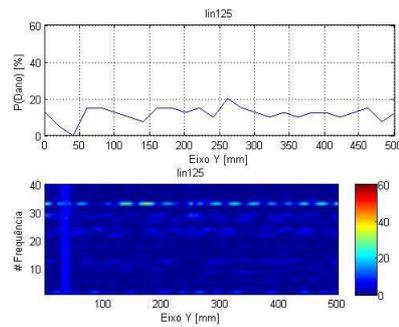


Figura 147 - Delaminação de dimensões iguais à 2,0 polegadas por 0,5 polegadas.

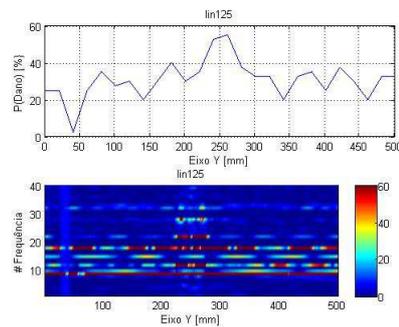


Figura 148 - Delaminação de dimensões iguais à 2,0 polegadas por 2,0 polegadas.

Fica evidente que a metodologia utilizada para a detecção apresenta resultados interessantes, visto que a maioria das delaminações foram reconhecidas. Entretanto, é interessante analisar com mais cuidado os casos em que não ficou aparente a sua presença. Na tabela 12 se encontra resumida as informações a respeito das detecções delaminações reconhecidas (detectadas) pelo algoritmo.

Tabela 12 - Relação das delaminações testadas e suas detecções.

	Largura (Polegada)	Comprimento (Polegada)	Deteção
Delaminação 1	0,50	0,50	Sim
Delaminação 2	0,50	1,50	Sim
Delaminação 3	0,50	2,50	Sim
Delaminação 4	0,25	0,25	Não
Delaminação 5	0,75	0,75	Sim
Delaminação 6	1,00	1,00	Sim
Delaminação 7	1,00	0,50	Não
Delaminação 8	1,00	2,00	Sim
Delaminação 9	1,50	1,00	Sim
Delaminação 10	1,50	1,50	Sim
Delaminação 11	2,00	0,50	Não
Delaminação 12	2,00	2,00	Sim

O que se nota é que a área da delaminação não interfere tanto na sua detecção quanto o seu comprimento. Na verdade o comprimento tem uma influência maior do que a largura, visto que não foi observado detecções para comprimentos menores que meia polegada, e somente a delaminação com meia polegada quadrada conseguiu ser classificada como com defeito. Reforçando essa conclusão, foi observado que delaminações com comprimento iguais a 0,5 polegada foram classificadas como "Não" para presença de defeito, mesmo sendo quando associadas a larguras de 1,0 e 2,0 polegadas. Em contra partida, delaminações com larguras iguais a 0,5 polegadas foram classificadas como "Sim" para defeito quando associadas a comprimentos maiores que meia polegada (caso 2 - comprimento de 1,5 polegadas e caso 3 - 2,5 polegadas).

Estes resultados podem ser entendidos ao se avaliar o cálculo das energias de cada padrão de delaminação. Segundo a metodologia utilizada, o sinal que é analisado para classificar a delaminação é a soma das energias dos sensores ao longo do comprimento da placa de compósito (e conseqüentemente, comprimento da delaminação). Dessa forma, delaminações com comprimento inferiores a meia polegada, produzem variações de energia, ao longo do eixo y, reduzidas de mais para que seja possível a sua identificação.

6.3.2 Probabilidade de Detecção - PoD

Foram simulados 12 defeitos de delaminação distintos, aonde foram variadas as áreas (comprimento e largura) mas a camada da delaminação foi mantida constante (delaminação entre as camadas 4 e 5).

Para cada um dessas 12 delaminações, 40 simulações envolvendo frequências de excitação diferentes (11.1kHz até 15.0kHz, com passo de 0.1kHz) foram feitas.

Com esses dados, foi escrito uma rotina em MatLab para retirar dos mapas de deformação, obtidos em cada simulação, pontos de deformação que condissessem com informações coletadas por sensores distribuídos em uma malha de 20 por 20 milímetros.

Essas informações foram apresentadas a outra rotina que de classificação quanto à presença de delaminação (Detecção de Defeito), que gerou uma tabela de área de

delaminação por detecção da mesma (a detecção foi representada por 1 e a não detecção por 0).

Esse procedimento foi repetido para 8 posições diferentes da malha de sensores (na verdade pontos escolhidos nos mapas de deformação para representar a obtenção das deformações por sensores), aonde a posição da malha de sensores foi deslocada da posição inicial ao longo do eixo x, em 2mm, 5mm, 8mm, 10mm, 12mm, 15mm, 17mm e 19mm.

Os resultados de classificação de cada um dos testes acima descritos estão dispostos na tabela 13 e a sua representação gráfica pode ser vista na figura 149.

Tabela 13 - Resultados de classificação das delaminações nos testes simulados

Área [polegada quadrada	Testes							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
0.75	1	1	1	1	1	1	1	1
1.25	1	1	1	1	1	1	1	1
0.0625	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5625	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.5	0	0	0	1	1	0	1	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1
1.5	1	1	1	1	1	1	1	1
2.25	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1

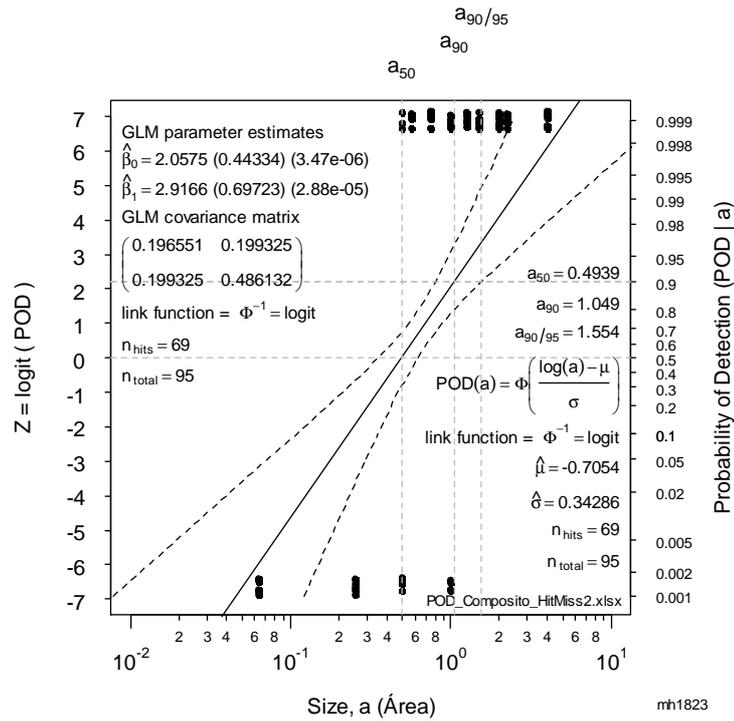


Figura 149 - Dados classificados por defeito (Delaminação).

Através das informações de classificação obtidas, a curva de POD pode ser definida. O gráfico da figura 150 apresenta a curva de POD da delaminação na placa de compósito.

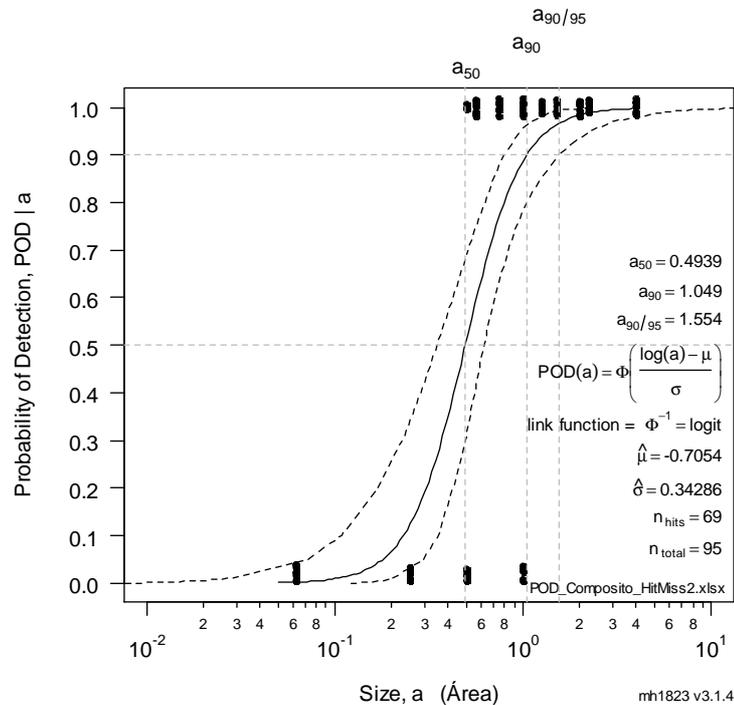


Figura 150 - Curva de PoD obtida com os dados simulados para os coupons.

Através de uma análise da curva de POD gerada, é possível observar que as delaminações de área inferiores a 0,5 polegadas quadrada só são detectadas em 50% vezes em que forem inspecionados. Já as inspeções das delaminações com área superior a 1 polegada quadrada são detectadas com 90% de probabilidade, visto o indicador a90 ter valor igual a 1,049.

Pode-se ainda afirmar que todas as delaminações com área superior a 1,5 polegadas quadrada são detectados com uma probabilidade de 90% em um intervalo de confiança de 95%.