

DETERMINAÇÃO DE PADRÕES DE DEFEITO EM MICROSENSORES TIPO COMB-DRIVE UTILIZANDO ANÁLISE HARMÔNICA EM UM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Daniel Gerhardt*, Ignacio Iturrioz*, Herbert Martins Gomes* e Renato P. Ribas†

* Grupo de Mecânica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, R Sarmiento Leite, 425, CEP 90050-170, Porto Alegre–RS, Brasil. Fone: (51) 3316-3522, e-mail: dangermec@yahoo.com.br, ignacio@mecanica.ufrgs.br, herbertmg@yahoo.com.br; web page: <http://www-gmap.mecanica.ufrgs.br>

† Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av Bento Gonçalves, 9500, CxP 15064, CEP 91501-970, Porto Alegre – RS, Brasil. Fone: (51) 3316-6810, e-mail: renato@inf.ufrgs.br; web page: <http://www.inf.ufrgs.br>

Palavras chave: Comb-drive, Análise Harmônica, MEMS, Defeitos, Elementos Finitos

Resumo. *A tecnologia na área de micromecanismos vem obtendo um avanço considerável nas últimas décadas, particularmente no que diz respeito aos transdutores eletro-mecânicos MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Estes dispositivos apresentam, entre outras vantagens, o fato de possuírem uma maior velocidade de resposta, além disso, atualmente já existem técnicas e processos compatíveis de fabricação destas estruturas, tornando mais viável sua produção. Sabe-se, porém, que os processos utilizados na fabricação ainda são deficientes em alguns aspectos, encontrando-se freqüentemente estruturas produzidas que apresentem falhas. Frente a isso, é necessário desenvolver uma metodologia de identificação dessas falhas, que ajudaria num processo de controle de qualidade e confiabilidade dos dispositivos fabricados. Neste trabalho, procura-se determinar a relação entre os padrões do sinal resposta e os tipos de defeitos mais comuns encontrados neste tipo de estrutura. Foi estudado particularmente um dos micromecanismos, chamado comb-drive, utilizado na fabricação de acelerômetros e filtros, entre outros. Para realizar este estudo, foi modelada, com o método dos elementos finitos, a estrutura em análise, obtendo a signature para uma entrada e uma saída pré-definidas, sendo esta a informação acessível na banca de testes deste tipo de componente. Comparando as mudanças da função ganho da estrutura, com e sem defeito, é possível identificar padrões e associá-los aos diferentes tipos de defeitos existentes. Também são mostrados resultados preliminares na implementação de um algoritmo de redes neurais para auxiliar na determinação do tipo e localização dos defeitos. Finalmente conclusões sobre o trabalho são apresentadas.*

1 INTRODUÇÃO

MEMS (Micro Electro-Mechanical System) são dispositivos que funcionam como transdutores eletro-mecânicos, relacionando deslocamentos com diferença de potencial, geralmente utilizados como sensores. Seu estudo tem ocupado a atenção de pesquisadores de diferentes áreas nos últimos anos como pode ser visto no livro de Senturia¹. Possuem, em geral, comportamento linear, alta velocidade de resposta e compatibilidade com circuitos integrados. Além disso, já existem processos e técnicas de fabricação que tornam possível a produção em larga escala destes mecanismos; por isso, observa-se a necessidade de um controle de qualidade cada vez mais rigoroso das peças produzidas. Sabe-se que as técnicas utilizadas na fabricação dos dispositivos ainda estão sendo aprimoradas, de forma que encontram-se, com frequência, peças produzidas apresentando defeitos que comprometem o funcionamento deste tipo de estrutura. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia de identificação de falhas, através de comparações de *assinaturas* para uma entrada e saída determinadas, utilizando o método dos elementos finitos. A comparação é feita entre os resultados obtidos para uma estrutura em perfeito funcionamento e uma estrutura danificada, tentando-se, assim, estabelecer uma relação entre o tipo de falha simulada e as mudanças causadas no padrão da *assinatura* por ela gerada. São também apresentadas, em forma resumida, as possibilidades que apresenta a utilização de redes neurais como uma ferramenta de auxílio na determinação do tipo de defeito. A identificação de falhas é importante para a implantação de um programa de controle de qualidade e confiabilidade das estruturas prontas, é importante salientar que o tipo de falha está diretamente associado à fase do processo de fabricação em que a mesma está ocorrendo, e sua identificação dará subsídios para a correção do defeito. O comb-drive foi escolhido por se tratar de um dos micromecanismos eletro-mecânicos mais conhecidos e utilizados.

2 FUNCIONAMENTO DO COMB-DRIVE

O comb-drive (Figura 1) é um micromecanismo que funciona como transdutor eletro-mecânico, isto é, seu princípio de funcionamento relaciona energia mecânica com energia elétrica, e é regido, portanto, pelas leis físicas destes dois domínios. É constituído de dois pares de *combs*, um par fixo e outro móvel. Cada comb fixo se encaixa, porém sem contato físico, com um comb móvel. Aplicando-se uma diferença de potencial entre o comb fixo e o móvel, consegue-se um efeito capacitivo entre dentes adjacentes devido à concentração de cargas opostas nas superfícies dos mesmos. Pequenas variações da diferença de potencial aplicada, geram forças elétricas de atração e repulsão entre os combs, resultando em pequenos deslocamentos do comb móvel na direção do eixo y. A amplitude dos deslocamentos gerados depende da frequência da variação de diferença de potencial aplicada.

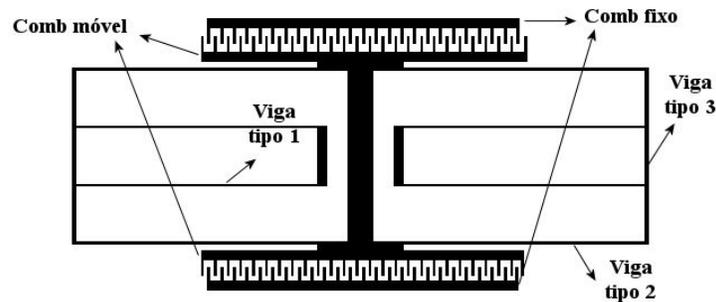


Figura 1: Geometria de um comb-drive.

Uma das vantagens do comb-drive é que ele pode funcionar como sensor e atuador. Como atuador, aplica-se uma variação de diferença potencial e obtém-se como resposta um deslocamento do comb; este deslocamento pode ser utilizado para acionar outros mecanismos do sistema. Como sensor, um deslocamento do comb móvel é gerado por alguma excitação do sistema, e, pelo efeito capacitivo, gera-se um sinal elétrico que pode ser processado. Além disso, o comb-drive pode funcionar também como filtro mecânico de frequências; projeta-se o comb móvel de forma que ele possua uma frequência natural de vibração desejada, e, assim que receber uma excitação externa (na forma de variação de diferença de potencial por exemplo) ele tenderá a vibrar naquela frequência específica. Esta frequência pode ser aproveitada pelo resto do sistema.

3 DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE FALHAS ANALISADAS

Existem, atualmente, vários processos de fabricação de MEMS, e a maioria deles ainda não consegue eliminar totalmente a ocorrência de falhas, que geralmente comprometem o perfeito funcionamento da estrutura. Consideram-se, neste trabalho, algumas das falhas mais comuns, suas causas e que tipo de alterações elas geram no comportamento do dispositivo. As falhas analisadas foram quebra de dentes, rompimento de vigas principais, e fixação de dentes. Cada falha foi considerada separadamente e não foi simulada a ocorrência de duas falhas simultâneas.

Como exemplo de processo de fabricação no qual tais falhas são possíveis pode-se citar o processo MUMPs™ (Multi-User MEMS Process)². Este processo é baseado na superposição de camadas de poli-silício (camada estrutural), camadas isolantes e camadas de sacrifício (retiradas ao final do processo). Podem ocorrer problemas tanto na fase de deposição de camadas quanto na fase de retirada das camadas de sacrifício. Esta última fase é fundamental pois ela irá liberar a parte móvel do comb-drive. O fato de a estrutura possuir dimensões tão pequenas dificulta a eliminação de falhas, pois simples contaminações por partículas de poeira são capazes de causar danos irreversíveis durante a fabricação. Vários trabalhos podem ser encontrados na bibliografia na determinação de defeitos em micromecanismos, entre eles podemos citar³.

3.1 Falha por quebra de dentes

Este tipo de falha gera inicialmente um decréscimo de massa no sistema, o que aumentaria a primeira frequência natural. No entanto, a retirada de um dente implica na retirada da força elétrica a ele relacionada, já que em um comb-drive real o efeito de capacitância entre estes dentes não mais existiria. A falha pode ocorrer na fase de retirada de camadas de sacrifício, em que o dente permaneça preso ao substrato, ocasionando sua ruptura no início do funcionamento do comb-drive. A contaminação por partículas de poeira também pode causar quebra de dentes, quando tais partículas, de massa elevada em comparação com a massa dos dentes, se depositam sobre os mesmos.

3.2 Falha por rompimento das vigas principais

Este tipo de falha representa uma diminuição da rigidez da estrutura do comb-drive, o que acarreta uma diminuição da primeira frequência natural. Além disso, há situações em que, dependendo da viga danificada, o primeiro modo de vibração é alterado, de forma que impossibilite o comb-drive de funcionar sob condições normais. A falha pode ocorrer devido a uma retirada mal sucedida das camadas de sacrifício, que fixaria partes das vigas e estas colapsariam durante o funcionamento do comb-drive. A contaminação por partículas de poeira pode causar danos semelhantes aos causados na quebra dos dentes. Aqui se definem, para orientação durante a análise, três tipos de vigas principais presentes na estrutura. As vigas do tipo 1 são horizontais (direção x) e estão ligadas aos engastes e às vigas do tipo 3, as vigas do tipo 2 são horizontais e estão ligadas ao comb e às vigas do tipo 3, e as vigas do tipo 3 são verticais (direção y) e unem vigas do tipo 1 e vigas do tipo 2 (estas aparecem indicadas na Figura 1).

3.3 Falha por fixação de dentes

A falha por fixação de dentes tende a aumentar a primeira frequência natural pelo acréscimo de um engaste à estrutura, isto é, um aumento da rigidez. Este tipo de falha pode ocorrer na retirada mal sucedida das camadas de sacrifício, fixando pontos da estrutura, mesmo sem causar o colapso da mesma; ou seja, a estrutura não quebra, apenas funciona de forma anormal.

4 SIMULAÇÃO

Para simulação das estruturas danificadas e da estrutura intacta, utilizou-se um modelo de Elementos Finitos (Ansys), o problema foi modelado como estado plano de tensões. A análise realizada consistiu em aplicar uma excitação harmônica de valor conhecido (força harmônica aplicada nos dentes), medindo sua resposta em outro ponto da mesma estrutura. Realizou-se esta análise para diferentes frequências de excitação numa faixa determinada, desta forma foi possível obter o valor da resposta em função da frequência. A este gráfico dá-se o nome de *assinatura* (“signature”) e ele permite, de certa forma, identificar a estrutura estudada. Mais detalhes, sobre este tipo de análise, podem ser encontrados em Dimaragonas⁴ ou em qualquer outro texto clássico de vibrações. Existe uma relação direta entre os picos do gráfico e as

freqüências naturais da estrutura, isto é, as freqüências em que as amplitudes dos deslocamentos são maiores (os picos) correspondem às freqüências naturais. Para este trabalho, as análises foram feitas em um comb-drive possuindo 50 dentes em cada comb, com dimensões e propriedades do material indicadas na Figura 2 e na Tabela 1, sendo estas dimensões coerentes com aquelas de estruturas fabricadas atualmente. O comb-drive é fixo nos dois engastes ou âncoras (*anchor*), as forças são aplicadas em cada um dos dentes e correspondem à força gerada pelo efeito elétrico de capacitância entre este dente e o dente do comb fixo, como é indicado na Figura 3. Logo, não é necessário que o comb fixo seja considerado fisicamente, basta levar em conta o efeito elétrico gerado por ele. A intensidade da força aplicada em cada dente foi de $1E-8N$, a faixa de freqüências em que se realizou a análise foi de 2KHz a 40KHz, dividindo este intervalo em 80 pontos para construção da assinatura. Considerou-se ainda um índice de amortecimento estrutural de 0.01. Apesar da força elétrica ser uma força de superfície, usou-se uma simplificação, e aplicou-se uma força concentrada centralizada na ponta do dente. Finalmente, é importante salientar que o fato de modelar o problema como um estado plano de tensões elimina, da análise, algumas freqüências e modos de vibração, porém os mesmos não interferem na validade do estudo por serem de ordem superior às freqüências e modos avaliados no plano no qual a estrutura se desenvolve.

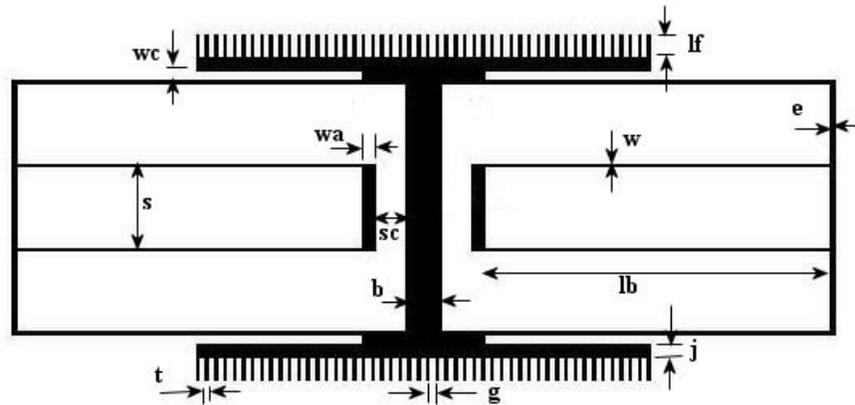


Figura 2: Dimensões e características do comb-drive estudado.

Tabela 1: Dimensões e propriedades do comb-drive em estudo.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
b	30 μm	w	2 μm	t	20 μm
sc	27 μm	wc	11 μm	g	2 μm
wa	11 μm	j	11 μm	E	165 GPa
lb	300 μm	e	4 μm	Nº dedos/comb	50
s	70 μm	lf	20 μm	ρ	2330 Kg/m ³

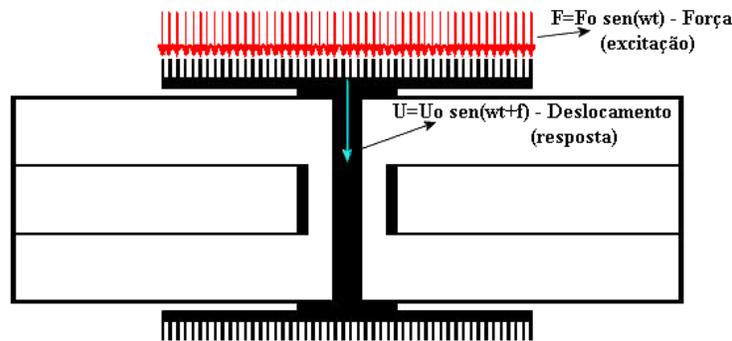


Figura 3: Localização das forças aplicadas.

A simulação das falhas por quebra de dentes não foi feita em todos os 50 dentes de cada comb. Aproveitando-se a simetria, aplicou-se a análise retirando-se apenas alguns dentes ao longo de meio comprimento do comb, numerando-se os dentes de 1 a 25 a partir do dente da extremidade mais externa. Foram retirados o 3º (terceiro) dente, o 10º (décimo) dente, o 19º (décimo nono) dente e o 25º (vigésimo quinto) dente. É importante salientar que, ao retirar o dente, ou seja, considerá-lo rompido, teve-se cuidado para retirar também a força de excitação daquela posição.

Da mesma forma, as falhas por fixação de dentes foram feitas nos mesmos dentes (3º, 10º, 19º e 25º). A simulação das falhas por rompimento das vigas principais da estrutura também aproveitou a simetria e, considerando-se apenas um quarto da estrutura, foi necessário realizar apenas quatro análises: uma análise para cada viga horizontal (direção x) e duas análises para a viga vertical (direção y). As posições das falhas na estrutura, bem como os eixos de simetria, estão apresentados na Figura 4, e numerados segundo a Tabela 2.

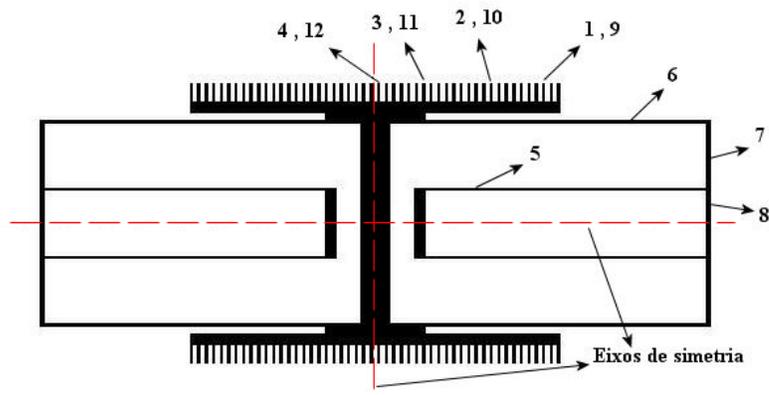


Figura 4: Posição das falhas e eixos de simetria.

Tabela 2: Posição das falhas.

Falha	Descrição	Falha	Descrição
1	Quebra do 3° dente	7	Rompimento da viga tipo 3
2	Quebra do 10° dente	8	Rompimento da viga tipo 3
3	Quebra do 19° dente	9	Fixação do 3° dente
4	Quebra do 25° dente	10	Fixação do 10° dente
5	Rompimento da viga tipo 1	11	Fixação do 19° dente
6	Rompimento da viga tipo 2	12	Fixação do 25° dente

5 RESULTADOS

Apresentam-se, aqui, os resultados obtidos em termos das *assinaturas* e do primeiro modo natural de vibração; estabelece-se uma relação entre as falhas e a modificação das *assinaturas* da estrutura analisada em relação às *assinaturas* da estrutura sem defeito.

5.1 Características da estrutura intacta

A Figura 5 apresenta a *assinatura* do comb-drive intacto com as dimensões e condições de análise harmônica especificadas anteriormente. A Figura 6 mostra o primeiro modo de vibração do comb-drive intacto. Note-se que a forma do primeiro modo (deslocamento do comb unicamente ao longo do eixo y) é imprescindível ao bom funcionamento do dispositivo. Os valores das frequências dos três primeiros modos podem ser vistos na Tabela 3. Os valores aqui apresentados são considerados agora padrões de comportamento, e todos os resultados das análises subseqüentes serão comparados com estes parâmetros.

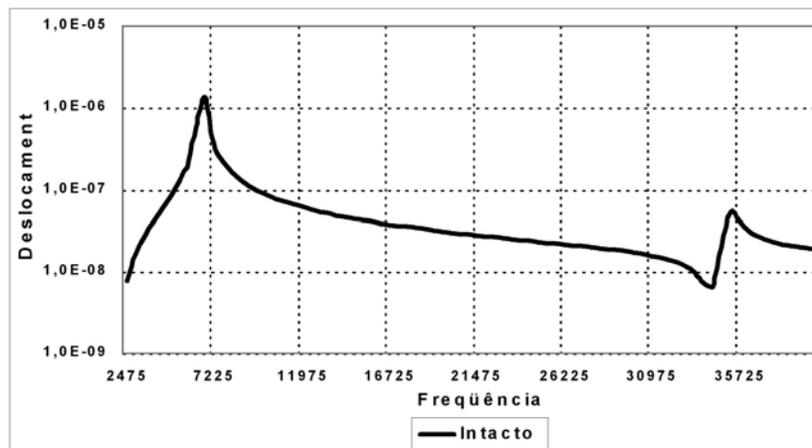


Figura 5: Assinatura do comb-drive intacto.

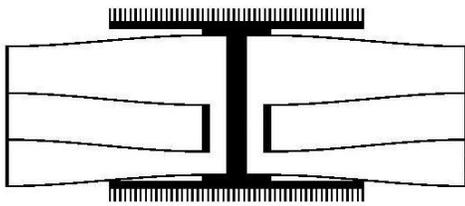


Figura 6: Modo de vibração fundamental do comb-drive intacto.

Tabela 3: Três primeiras freqüências naturais de vibração.

Modo	Freqüência [Hz]
1	6606,9
2	31950
3	35187

5.2 Falhas causadas por quebra de dentes (falhas 1 a 4)

Foi verificado que a posição do dente retirado não produz mudança significativa nem na assinatura nem na forma do modo fundamental de vibração, como pode se observar nas Figuras 7 e 8. Na Figura 7, apresenta-se a assinatura da estrutura danificada junto à assinatura da estrutura intacta. No caso de ruptura de algum dente, foi retirada também a força a ele aplicada. A diferença é quase imperceptível, mas o primeiro pico (correspondente à primeira freqüência natural) ocorreu para uma freqüência um pouco superior à freqüência da estrutura intacta. De uma forma geral, pode-se dizer que a assinatura foi transladada para a direita. Na Figura 8 é possível observar que não há mudanças significativas na forma do modo fundamental relacionado ao comb intacto e são apresentadas as freqüências naturais correspondentes na Tabela 4.

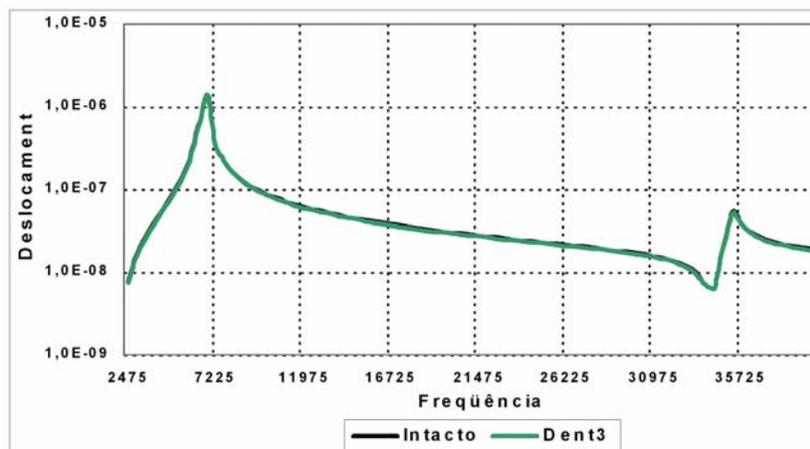


Figura 7: Comparação da assinatura obtida com a assinatura padrão, no caso de ruptura de um dos dentes.

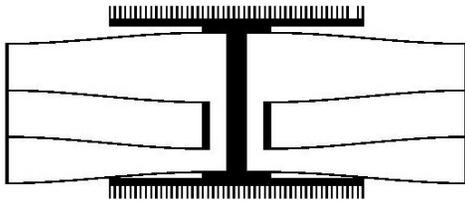


Figura 8: Modo fundamental de vibração para falha de ruptura de dente.

Tabela 4: Três primeiras freqüências naturais de vibração.

Modo	Freqüência [Hz]
1	6612,5
2	31952
3	35189

5.3 Falhas causadas por rompimento das vigas principais

De um modo geral, o rompimento de uma das vigas principais implica numa diminuição da rigidez do sistema e uma conseqüente diminuição da primeira freqüência natural da estrutura. Porém deve-se analisar como a falha interfere nos modos de vibração.

5.3.1 Rompendo a viga horizontal tipo 1 (falha 5)

Estes resultados correspondem à falha devido ao rompimento da então denominada viga horizontal tipo 1 segundo nomenclatura definida na Figura 1. A assinatura da estrutura danificada está sobreposta à assinatura da estrutura intacta na Figura 9, e na continuação apresenta-se o modo de vibração na faixa de freqüência analisada na Figura 10, juntamente com os valores de suas freqüências na Tabela 5.

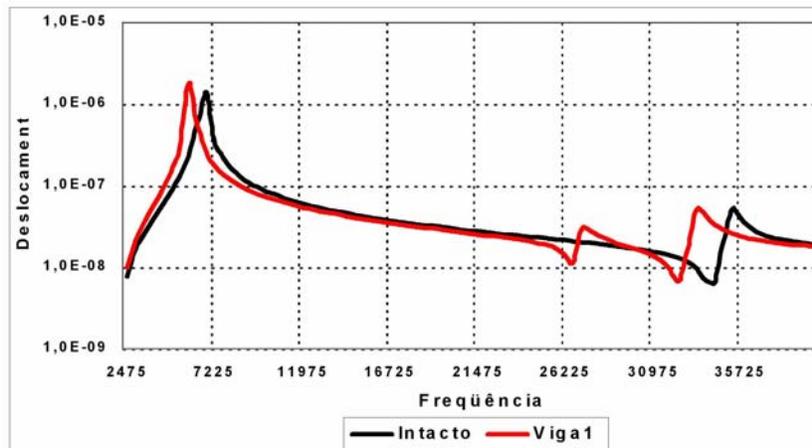


Figura 9: Comparação da assinatura obtida e padrão, no caso de rompimento de viga principal tipo 1.

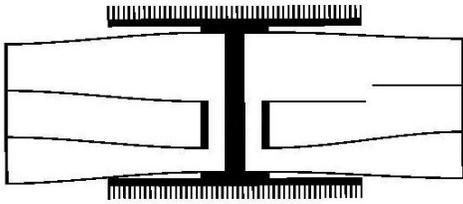


Figura 10: Modo fundamental de vibração para falha de rompimento da viga tipo 1.

Tabela 5: Três primeiras freqüências naturais de vibração.

Modo	Freqüência [Hz]
1	5891,1
2	27165
3	33341

5.3.2 Rompendo a viga horizontal tipo 2 (falha 6)

A Figura 11 apresenta a *assinatura* da estrutura danificada com a *assinatura* da estrutura intacta. O primeiro modo fundamental de vibração da estrutura se ilustra na Figura 12 com os valores das respectivas freqüências na Tabela 6.

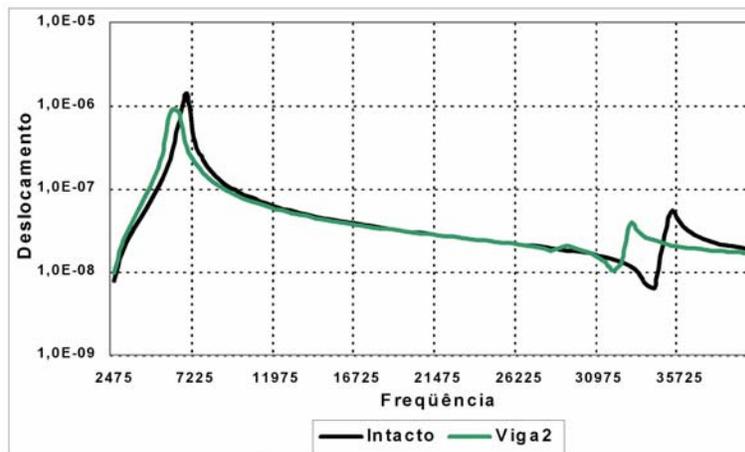


Figura 11: Comparação da *assinatura* obtida com a *assinatura* padrão, no caso de rompimento de viga principal tipo 2.

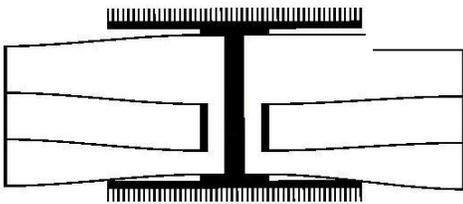


Figura 12: Modo fundamental de vibração para falha de rompimento da viga tipo 2.

Tabela 6: Três primeiras freqüências naturais de vibração.

Modo	Freqüência [Hz]
1	6025,3
2	28627
3	32735

5.3.3 Rompendo a viga vertical tipo 3 (falha 7 e 8)

Nesta viga, simularam-se falhas em dois pontos. Um dos pontos se localiza entre as conexões da viga vertical tipo 3 com uma viga horizontal tipo 1 e uma viga horizontal tipo 2. O outro ponto se localiza entre as conexões da viga vertical tipo 3 com duas vigas horizontais tipo 1, e corresponde à falha número 8 da Figura 4.

Simulando a falha da viga vertical tipo 3 entre uma viga horizontal tipo 1 e uma viga horizontal tipo 2, obteve-se a *assinatura* mostrada na Figura 13, juntamente com a *assinatura* da estrutura intacta. A Figura 14 mostra o primeiro modo de vibração desta estrutura e os valores das respectivas freqüências na Tabela 7.

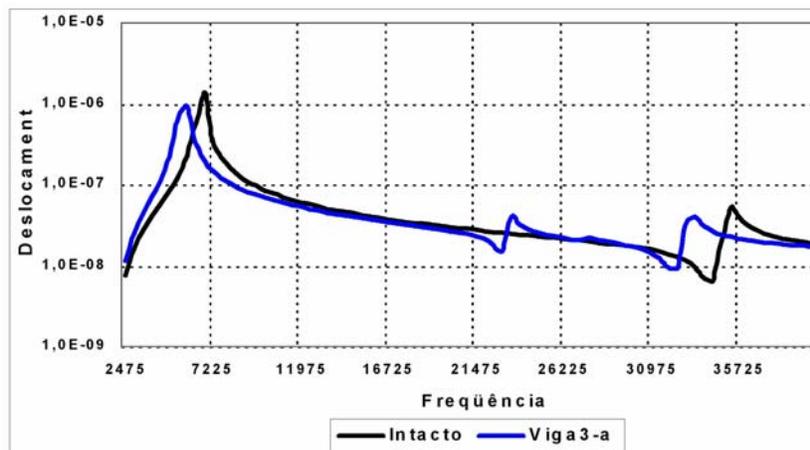


Figura 13: Comparação da *assinatura* obtida com a *assinatura* padrão, no caso de rompimento de viga principal tipo 3, entre vigas do tipo 1 e 2.

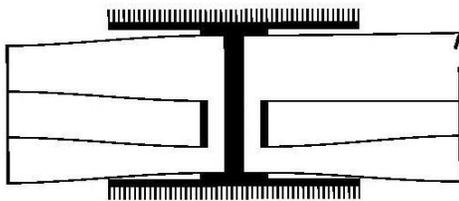


Figura 14: Modo fundamental de vibração para falha de rompimento da viga tipo 3 entre vigas tipo 1 e 2.

Tabela 7: Cinco primeiras freqüências naturais de vibração.

Modo	Freqüência [Hz]
1	5585,4
2	23189
3	27222
4	30218
5	32975

Simulando a falha da viga vertical tipo 3 entre duas vigas horizontais tipo 1, a *assinatura* obtida aparece com a *assinatura* da estrutura intacta na Figura 15. O primeiro modo de vibração está na Figura 16 com os valores das respectivas freqüências na Tabela 8.

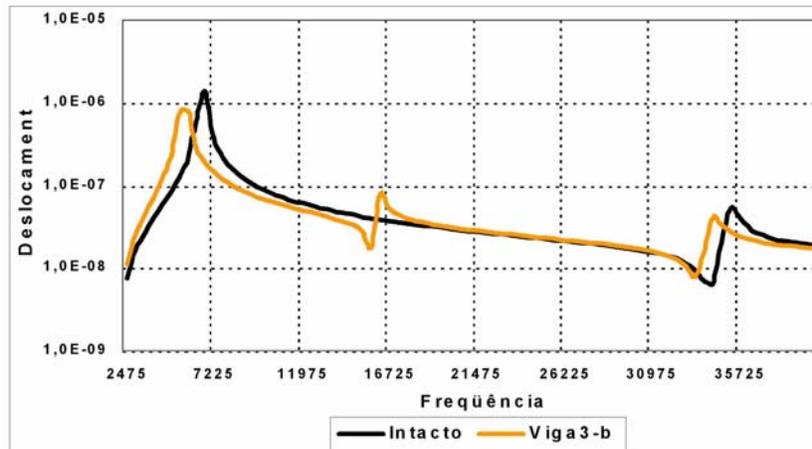


Figura 15: Comparação da assinatura obtida com a assinatura padrão, no caso de rompimento de viga principal tipo 3, entre vigas do tipo 1.

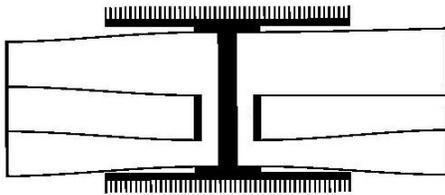


Figura 16: Modo fundamental de vibração para falha de rompimento da viga tipo 3 entre vigas tipo 1.

Tabela 8: Cinco primeiras frequências naturais de vibração.

Modo	Frequência [Hz]
1	5553,4
2	16220
3	29938
4	30218
5	34204

5.4 Falhas causadas por fixação de dentes

Qualitativamente, essas falhas tendem a representar o acréscimo de um engaste à estrutura, e, conseqüentemente, um aumento das frequências naturais de oscilação.

5.4.1 Fixando o 3°, 10°, 19° e 25° dente (falha 9 - 12)

Observa-se claramente a variação do modo de vibração devido ao acréscimo de um engaste através da fixação do dente. Na Figura 17 e na Tabela 9 se apresenta o modo e as frequências naturais para o caso de fixação do primeiro dente. A assinatura da estrutura, com os dentes fixos indicados um a um, está, juntamente com a assinatura da estrutura intacta, apresentada na Figura 18.

Neste caso, o comportamento dinâmico do comb-drive é fortemente afetado, de forma que seu funcionamento em condições normais não é possível.

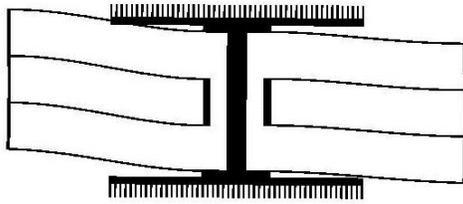


Figura 17: Modo fundamental de vibração para falha por fixação do 3º dente.

Tabela 9: Duas primeiras frequências naturais de vibração.

Modo	Frequência [Hz]
1	32941
2	34171

Observou-se que os resultados obtidos fixando-se dentes diferentes foram, qualitativamente, muito semelhantes, como mostra a Figura 18.

Na *assinatura*, todos tiveram o primeiro pico transladado para a direita, até valores de frequência elevados, embora os valores das frequências do primeiro modo de vibração tivessem valores diferentes. O gráfico em que estão as *assinaturas* da estrutura intacta e das estruturas com dentes fixos, nos permite constatar que há uma relação entre a posição do dente fixo e o valor da frequência do primeiro pico (primeiro modo); quanto mais próximo da extremidade do comb está o dente fixo, menor é a frequência do primeiro modo de vibração.

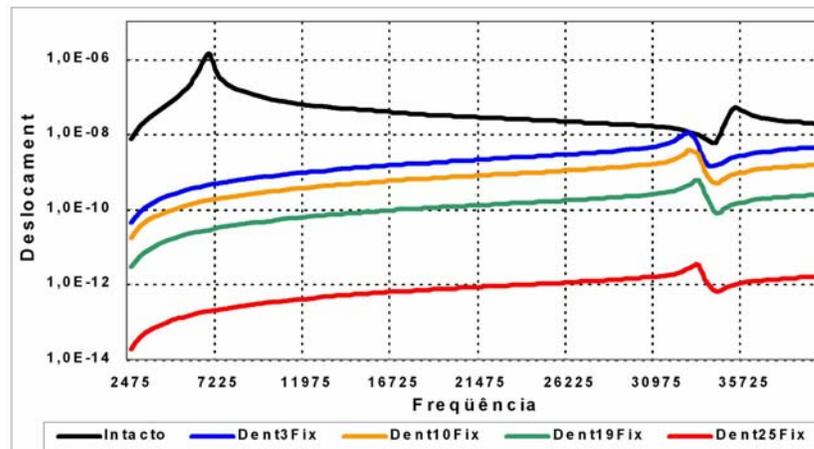


Figura 18: Comparação das *assinaturas* obtidas com a *assinatura* padrão, nos casos de fixação de dentes simulados (3º dente, 10º dente, 19º dente, 25º dente).

As frequências também apresentaram valores muito próximos, como pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10: Frequências [Hz] obtidas na fixação de dentes.

Modos	3º dente	10º dente	19º dente	25º dente
1	32941	33150	33368	33402
2	34171	34225	34241	33241

6 APLICAÇÕES DE REDES NEURAI NA DETERMINAÇÃO DE UM DEFEITO.

Redes neurais⁵, podem ser úteis na identificação dos casos de falha devido à sua boa capacidade de generalização quando comparada a outros modelos de regressão⁶. Assim, uma boa arquitetura de rede, associada a algoritmos eficientes de treinamento e amostras que representem adequadamente os principais casos de falha possíveis podem reduzir drasticamente o esforço computacional, além de fornecer uma possibilidade de robustez quanto a ruídos nos sinais adquiridos experimentalmente e velocidade de tomada de decisões.

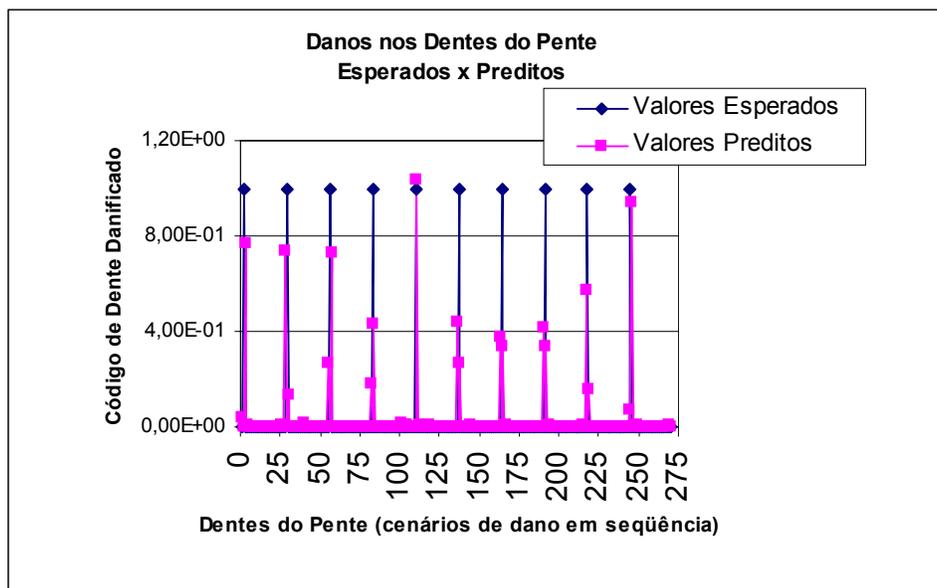


Figura 19: Danos nos dentes do Pente avaliados por redes neurais

Como estudo preliminar, fez-se uma série de testes com o modelo apresentado, simulando casos de falha e avaliando-se a *assinatura* dinâmica correspondente. Utilizou-se uma rede neural artificial para treinar os cenários de dano juntamente com a respectiva assinatura dinâmica. Os dados de entrada foram três: a 1ª frequência natural do modelo, a amplitude da resposta em um ponto especificado do Comb-drive e a fase desta resposta em relação à excitação de entrada. O tipo de rede neural utilizada foi a “perceptron multicamada” com arquitetura (3-20-25), utilizando algoritmo de aprendizado por gradiente descendente associado a momentos⁶. Simulou-se casos de dentes do pente emperrados, um por vez de forma aleatória (1/4 dos dentes do Comb-Drive por questões de simetria), com o intuito de avaliar a possibilidade de haver falha na produção deste componente com a ligação do mesmo à matriz base. Criou-se assim um banco de dados de casos de *assinaturas* dinâmicas (frequências naturais, amplitudes e fases) e respectivos casos de danos os quais foram classificados, de acordo com o número do dente, e codificados num arranjo onde se atribuiu 1 para o dentes emperrados e 0 para os dentes livres. Do total de 25 casos simulados, 14 foram

utilizados para treinamento e 11 para validação. Na tabela 11, se indica uma amostra utilizada no treinamento no caso do dente n° 11 emperrado.

Tabela 11 – Amostra de treinamento para dente N° 11 emperrado.

Frequência	Amplitude	Fase	Dentes do pente																								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
.3320E+05	.3238E-08	.1054E+03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na figura 19, indicam-se os resultados para a simulação da rede treinada, colocando-se as simulações realizadas em seqüência para facilitar sua visualização em conjunto, os resultados obtidos permitem observar a sensibilidade do método empregado.

Como trabalho futuro pretende-se avaliar o projeto de experimentos para a geração de diversos novos casos de cenários de danos, assim como o uso de novos tipos de arquiteturas e algoritmos de treinamento.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho se apresentaram simulações realizadas com o método dos elementos finitos de uma estrutura de comb-drive, estudando a identificação de diversos tipos de defeitos através da comparação da *assinatura* da estrutura com e sem dano. Analisando os resultados obtidos foi possível concluir que:

-É possível identificar claramente, em muitos dos tipos de defeitos estudados, uma mudança característica no padrão da *assinatura*. O que torna esta forma de trabalho uma ferramenta viável na identificação rápida de defeitos em micromecanismos.

-A utilização de redes neurais permitiria uma precisão maior na identificação da localização e tipo de defeito através da informação obtida com a *assinatura* da estrutura estudada.

9. REFERÊNCIAS

[1] Senturia, Stephen D.; *Microsystems Design*, Massachussets Institute of Technology, Kluwer Academic Publishers (2001).

[2] Koester, David A.; Mahadevan, Ramaswamy; Shishkoff, Alex; Markus, Karen W.; “MUMPs™ Design Handbook”, Revision 4.0, Cronos Integrated Microsystems (1999).

[3] Kolpekwar, Abhijeet; Jiang, Tao; Blanton, R. D. (Shawn); “CARAMEL: Contamination And Reliability Analysis of MicroElectromechanical Layout”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 3 (1999).

[4] Dimarogonas, Andrew; *Vibration for Engineers*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey (1996).

[5] Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*, NY: Macmillan, 1994.

[6] Rhim, J. W.; Lee, S. W., *A Neural Network Approach for Damage Detection and Identification of Structures*, Proceedings of AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, Hilton Head, SC, Apr. 1994, pp. 173-180.