

3 Sistema de Monitoramento Estrutural - SHM

3.1 Introdução

Os sistemas SHM podem ser definidos como sistemas de implementação de técnicas de detecção e caracterização de danos, a fim de garantir uma constante manutenção e a segurança das estruturas (FRISWELL & PENNY, 2002). Esse novo paradigma vem sendo muito estudado e, nos últimos 50 anos, pesquisas envolvendo o tema se multiplicaram. Na literatura podem ser encontrados exemplos de sistemas SHM aplicados a diversas áreas tais como: monitoramento de estruturas civis (edificações, pontes, ferrovias, túneis), mecânicas (peças e equipamentos) e de aeronaves (INAUDI *et al*, 1997, 1999; VURPILLOT *et al*, 1997; DOEBLING *et al*, 1998; ENHELL-EL *et al*, 2003; GLISIC *et al*, 2005).

Durante o período compreendido entre os primeiros trabalhos sobre SHM e hoje em dia, extensivos estudos foram realizados. Em decorrência da experiência ganha nesse tempo, alguns princípios fundamentais (ou axiomas) sobre SHM foram propostos (WORDEN *et al*, 2011). Esses 8 axiomas são descritos a seguir.

1. Todo material apresenta falhas ou defeitos inerentes.
2. A avaliação de dano estrutural necessita da comparação entre 2 estados.
3. Identificar a existência e a localização de dano pode ser realizado por meio de aprendizado não supervisionado, entretanto identificar o tipo e o grau do dano geralmente requer um aprendizado supervisionado.
4. Sensores não podem medir danos estruturais. Extração e processamento de dados são necessários para a conversão de dados em informações relevantes.
5. Sem o uso de recursos inteligentes, as medições se tornam mais sensíveis ao dano, às condições operacionais e ambientais.
6. O tamanho e a escala de tempo associadas ao início e evolução do dano são as prerrogativas que ditam as propriedades necessárias para o sistema SHM.
7. Existe uma relação entre a sensibilidade de um algoritmo ao dano e o ruído.

8. O tamanho (dimensão) do dano pode ser determinado por meio de mudanças na dinâmica do sistema, e é inversamente proporcional à faixa de frequência de excitação.

Dessa forma, algumas considerações podem ser realizadas. A primeira consideração é referente ao axioma 1, que exprime a necessidade de inspecionar os materiais estruturais uma vez que todos estão sujeitos a falhas.

A segunda consideração diz respeito ao axioma 2. Fica claro que, para montar um sistema SHM, é necessário que se conheça o estado sem defeito, a fim de servir de referência para futuras avaliações.

Os axiomas 3, 4 e 5 falam a respeito do processamento dos dados adquiridos nas inspeções. Estes enfatizam a necessidade de processamento inteligente dos dados coletados a fim de se obter a determinação, localização e severidade do dano. Ainda relacionado ao processamento dos dados, o axioma 7 também mostra claramente a necessidade do desenvolvimento de algoritmos robustos e inteligentes, uma vez que o ruído influi diretamente no seu desempenho.

Por fim, os axiomas 6 e 8 discutem questões relacionadas com as prerrogativas do sistema SHM a fim de obter os resultados pretendidos. É sobretudo interessante a relação entre a detecção do dano e a faixa de frequência de excitação utilizada nas análises dinâmicas.

No capítulo 6, onde serão apresentadas as análises dinâmicas do sistema SHM proposto, esta consideração será melhor discutida.

3.2 Implementação de um Sistema SHM

Um sistema SHM tem a sua implementação dividida em quatro etapas distintas.

A primeira etapa diz respeito à aquisição dos sinais, e dessa forma tem foco nos sensores utilizados (tipo de sensores, tamanho de malha, etc.), assim como a forma de excitação (quando houver) exercida sobre a estrutura. Já na segunda etapa, o desafio se concentra em trabalhar os dados brutos, obtidos pela rede de sensores. Filtros para reduzir o nível de ruído registrado e análises realizadas ainda pelos instrumentos de aquisição (normalização e extração de atributos dos dados para a sua melhor

interpretação) são alguns exemplos de pré-processamentos realizados que aumentam a eficiência do sistema como um todo.

A terceira etapa é caracterizada pela transferência dos dados medidos para os sistemas que realizarão a sua interpretação. É importante notar que nem sempre o sistema processamento e interpretação dos dados está fisicamente próximo ao sistema de medição. A escolha de como essa comunicação será realizada, comunicação com fio (via cabos metálicos e/ou ópticos) ou comunicação sem fio (via dispositivos de transmissão por ondas de rádio, entre outros), é realizada nesta etapa.

A última etapa é talvez a mais importante. Nela é que serão empregados algoritmos de classificação e interpretação dos dados. Os algoritmos utilizados nesse tipo de processamento podem ser de diferentes naturezas como, por exemplo, algoritmos estatísticos, redes neurais, lógica Fuzzy, algoritmos genéticos, entre outros. Uma vez que cada algoritmo processa as informações de uma forma específica, a sua escolha deve ser baseada no tipo de problema enfrentado.

Ainda nesta etapa, os resultados de classificação, posicionamento e severidade do dano são apresentados. A partir desses resultados, previsões de durabilidade da estrutura e progressão de algum dano registrado podem ser realizados. Assim, uma melhor estratégia para os problemas detectados pode ser traçada.

A figura 19 apresenta um diagrama mostrando cada uma das etapas de um sistema SHM que foram discutidas anteriormente.

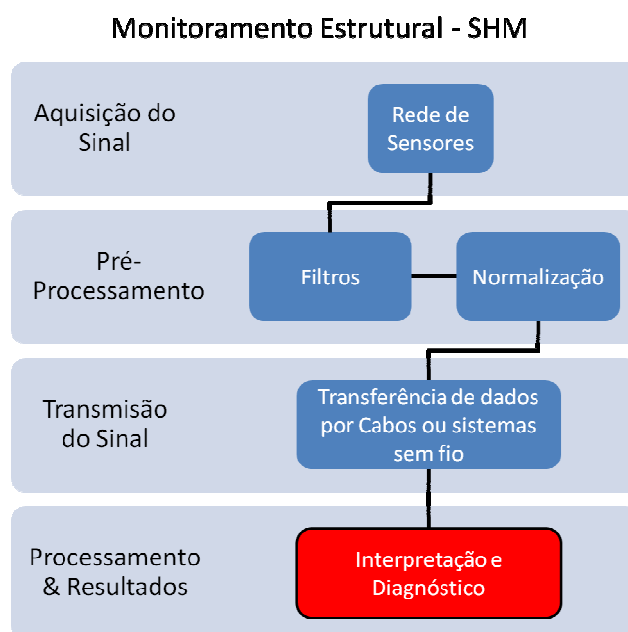


Figura 19 – Diagrama de processos inerentes ao SHM.

É importante lembrar que, como visto no axioma 2, todo o processo de classificação e previsão de danos se dá por meio de análises comparativas. Essa comparação é realizada entre a base de dados estruturais em duas diferentes situações básicas: estrutura na qual se apresentam danos, e estrutura não danificada (PARK *et al*, 2010).

Dessa forma, o processamento dos resultados na última etapa de um sistema SHM deve levar em conta, além dos resultados medidos, dados de referência, ou seja, os dados da estrutura sem defeito.

3.3

Formas de interrogação estrutural

Ao se iniciar o desenvolvimento de um projeto para o monitoramento estrutural (desenvolvimento de um sistema SHM), é preciso estabelecer a forma de interrogação que será empregada.

A interrogação de uma estrutura é somente a análise das suas características intrínsecas, tais como densidade, frequência natural de vibração, temperatura e deformação, entre outras (IHN & CHANG, 2008). Apesar das escolhas quanto ao tipo de sensor ou tamanho da malha utilizada, duas formas de se interrogar uma estrutura são conhecidas:

- Interrogação Passiva – Uso de sensores.
- Interrogação Ativa – Uso de sensores e atuadores.

A interrogação passiva ocorre com o uso de sensores posicionados em determinadas regiões da estrutura, a fim de obter medições contínuas que apresentem alteração dos sinais registrados sinalizando alterações nas condições estruturais. Esse método de interrogação apresenta a dificuldade de ter que monitorar toda a área de interesse com uma quantidade limitada de sensores, ou seja, o método se restringe a uma análise local do dano estrutural. Já a interrogação ativa se vale do uso conjunto de atuadores e sensores, simultaneamente. Os atuadores são utilizados para excitar a estrutura com determinado sinal, e os sensores realizam o registro do comportamento da estrutura. O sinal obtido é comparado com os obtidos anteriormente e classificados como sinais de referência. Esse método possibilita a interrogação de áreas mais amplas e da identificação global do comportamento da estrutura.

Existem vários métodos utilizados a fim de promover uma interrogação ativa em uma determinada estrutura. Entre os mais utilizados estão os métodos de emissão acústica (AE, *Acoustic Emissions*), eletromagnéticos, térmicos, vibracionais e de resposta em frequência, métodos baseados em ondas Lamb e métodos baseados em técnicas de impedância (PARK *et al*, 2010). Grande parte dos estudos de SHM têm se focado em técnicas de detecção de danos globais por meio de excitações dinâmicas (LI & ZHISHEN WU, 2007).

3.3.1 Sensores e Atuadores

Muitos sensores podem ser utilizados para fins de monitoramento estrutural (SHM), entretanto, como visto no capítulo 2, os sensores a fibra óptica têm se mostrado bastante eficientes e, dessa forma, têm ganho espaço entre os pesquisadores da área (METJE *et al*, 2008). Tal preferência se explica diante das características desses sensores, como a versatilidade para diferentes aplicações, a robustez e estabilidade, e por não apresentarem problemas de interferência eletromagnética. Nesta tese, os sensores utilizados para o desenvolvimento dos sistemas SHM propostos são os sensores FBG.

Os atuadores constituem outra classe de instrumentos que agem diretamente sobre a estrutura, e representam parte importante para o monitoramento estrutural. No caso de se interrogar a estrutura com respeito a sua vibração e resposta em frequência, os atuadores piezelétricos são bastante úteis. Esses materiais foram descobertos em 1880, quando Pierre e Marie Curie observaram que, ao se pressionar um cristal de quartzo, o mesmo ficava carregado eletricamente (IKEDA, 1990), figura 20. No mesmo ano, Lippman verificou o efeito inverso. Essas características de transformar energia elétrica em energia mecânica (e vice versa) transformam os dispositivos piezelétricos em instrumentos muito úteis, podendo ser usados tanto como atuadores quanto como sensores (RÍCON, 2007).

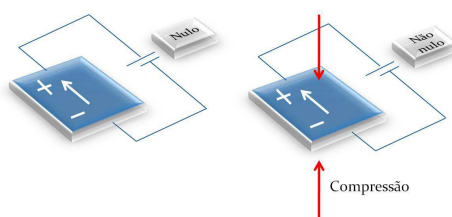


Figura 20 – Ilustração do efeito Piezelétrico direto.

Essa característica pode ser explicada pelo efeito piezelétrico, que descreve como a aplicação de uma tensão mecânica provoca o aparecimento de um campo elétrico, e que pode ser representado pelo par de equações 3,1 e 3,2.

$$S_i = S_i^E T_j + d_m E_m \quad (3,1)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon_{mk}^T E \quad (3,2)$$

onde:

- S: vetor das deformações.
- T: vetor das tensões.
- E: vetor campo elétrico.
- D: vetor deslocamento elétrico.
- s: tensor de flexibilidade.
- d: tensor das constantes piezelétricas em deformação.
- ε : permissividade elétrica.

Os atuadores piezelétricos são mais indicados para eventos de alta frequência, como no caso de impactos ou em vibrações (podendo gerar ondas elásticas acústicas e elásticas), e não são recomendados para situações estáticas.

3.4 Transmissão de Dados

Outro aspecto importante do SHM diz respeito à transmissão dos sinais (dados medidos). Recentemente o desenvolvimento de sistemas de comunicação a distância tem possibilitado a transmissão dos dados medidos pelos sensores até as unidades de processamento sem o uso de cabos. Essa inovação tem ajudado, em alguns casos, para a redução significativa de custos de instalação e operação, além de permitir a implementação de redes de sensores mais densas ou de aumentar a sua área de cobertura (LUNCH & LOH, 2006).

Com mais sensores, há mais informações a serem transmitidas, e essa situação pode se tornar problemática no que se refere à transmissão e análise das mesmas, em virtude do grande número de dados a serem processados. Esse problema é mais evidente

quando se considera o monitoramento de estruturas em tempo real. Nesses casos, o armazenamento desses dados se torna mais crítico. Assim, é sempre relevante realizar reduções nos sinais medidos a fim de evitar, ou ao menos reduzir, tais complicações. Diversas formas de compactação e redução de sinais têm sido propostas e implementadas, e uma visão desse tema pode ser obtida em (PARK *et al*, 2010).

3.5 Sistemas SHM Propostos

Esta tese aborda o desenvolvimento de dois sistemas SHM distintos. No primeiro foi analisado um caso de uma estrutura laminar de alumínio sob condições estáticas e na presença de corrosão. Já no segundo caso, a análise foi realizada sobre uma placa de material compósito, sob condições dinâmicas e na presença de delaminação.

Dessa forma, é interessante abrir espaço para uma breve descrição desses materiais e dos danos a eles associados.

3.5.1 Estruturas de Alumínio e Corrosão

O alumínio é o elemento metálico mais abundante encontrado na crosta da Terra, entretanto devido à sua afinidade com o oxigênio, só é encontrado em estruturas combinadas de óxidos e silicatos. De fato, a obtenção de alumínio na forma metálica somente foi conseguida em 1825, por meio de processos químicos. Os métodos utilizados produziam poucas quantidades de alumínio metálico e foi preciso quase 30 anos de pesquisas para que, em 1854, o químico francês Henri Sainte-Claire Deville obtivesse um método de produção em escala comercial. A produção de alumínio em escala industrial só foi obtida em 1886 através do trabalho de dois cientistas, Charles Martin Hall e Paul Louis Héroult, que de forma independente propuseram um processo eletrolítico de redução de alumina em alumínio. Este procedimento é utilizado atualmente e ficou conhecido como procedimento Hall-Héroult.

Embora o alumínio puro tenha boas propriedades contra corrosão (ao ser exposto à atmosfera, uma fina camada de óxido se forma protegendo-o de oxidações posteriores), sua resistência à tração é de aproximadamente de 90MPa, o que torna a sua utilização como material estrutural um tanto limitado (aços de alta resistência possuem resistência à tração de 1400MPa). Este tipo de problema é solucionado com a adição de

outros elementos tais como zinco, magnésio, cobre, ferro, cromo e silício, para a formação de ligas de alumínio (VARGEL, 2004). Outra expediente muito utilizado para melhorar as características mecânicas das ligas de alumínio é o seu tratamento térmico. Dessa forma, é possível a obtenção de ligas de Al com resistência à tração de aproximadamente 700MPa.

As ligas de Al se destacam por suas características de baixa densidade (a densidade do alumínio é de 2700 kg/m^3 , enquanto as densidades de aço e cobre são respectivamente 7860 kg/m^3 e 8960 kg/m^3), alta relação resistência/peso e passividade química, o que o caracteriza como um potencial substituto ao aço. A sua utilização em aplicações nas quais o peso é um fator importante (como na indústria aeroespacial) facilitam o desenvolvimento de alguns projetos.

Outra grande vantagem apresentada pelas ligas de Al é a sua capacidade quase ilimitada de reciclagem (sem perda de propriedades físico-químicas), o que as tornam um material extremamente versátil.

Entretanto, a adição de outros elementos químicos ao alumínio puro (para a formação de ligas de alumínio) reduz a sua resistência quanto a processos de corrosão, o que eleva o risco de formações de danos estruturais importantes (SNODGRASS, 2003, p.689).

Dentre alguns dos mecanismos de corrosão possíveis em ligas de Al podem ser citados:

- Corrosão Galvânica

Ocorre devido ao efeito galvânico existente quando há o contato do alumínio com materiais como cobre e níquel, na presença de algum eletrólito. Esse efeito pode ser observado até mesmo devido ao contato do alumínio com ferro e aço sob condições de alta salinidade, como em ambientes marinhos (Figura 21).



Figura 21 - Exemplo da formação de corrosão galvânica em uma estrutura de alumínio e aço. (Fonte: <http://aluminumsurface.blogspot.com.br/2009/04/corrosion-between-anodized-aluminum-and.html>, acessado em 15/09/2013).

- Corrosão por ponto (*Pit Corrosion*)

Este tipo de corrosão é a mais comum entre ligas de Al. Neste, regiões da película de óxido que protege as ligas sofrem descontinuidades, provocando o surgimento de pontos concentrados de corrosão ou mesmo de regiões de corrosão mais extensas (Figura 22).

Ácidos fortes e soluções alcalinas são agentes que provocam o surgimento de descontinuidades da camada de óxido no alumínio. Existem também uma forte dependência do tipo de impureza adicionada na formação das ligas de Al e a corrosão por ponto.



Figura 22 - Corrosão por pontos em uma peça de alumínio (Fonte: <http://www.amteccorrosion.co.uk/aluminium.html>, acessado em 15/09/2013).

- Corrosão Intergranular

Este tipo de corrosão é caracterizado pelo ataque seletivo em regiões entre os grãos de alumínio. Ela acontece quando há um caminho preferencial para a corrosão na região entre os grãos. O interessante deste processo é que os grãos de alumínio não são atacados diretamente, mas vão sendo destacados na medida da sua propagação devido à perda de ligação com a matriz. Apesar da corrosão efetiva ser pequena, a massa total desprendida (grãos envolvidos pela corrosão) acaba sendo grande. A figura 23 exemplifica esse tipo de corrosão

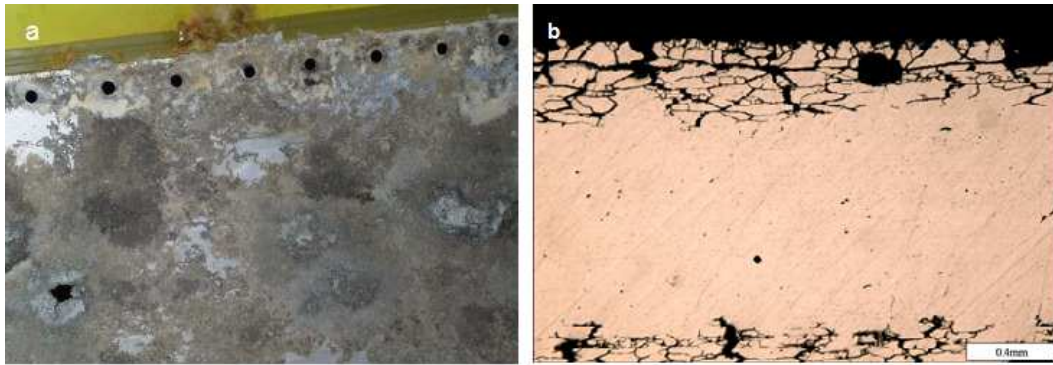


Figura 23 - Em *a*, é exemplificado a corrosão intergranular em uma placa de liga de Al, enquanto que em *b* é observada microscopicamente a estrutura. (Fonte: <http://moraivinna.blogspot.com.br/2011/10/quanto-tempo-dura-um-aviao-comercial.html>, acessado em 15/09/2013)

- Corrosão por Esfoliação

A corrosão por esfoliação ocorre ao longo dos contornos dos grãos paralelos à superfície da liga de alumínio. Esse tipo de corrosão provoca a esfoliação de sucessivas camadas do metal através de um processo de expansão da camada de óxido produzida.

Normalmente ocorre em materiais que tiveram seus grãos alongados ou achatados. O seu ataque pode ocorrer nas áreas que ficam submetidas a esforços mecânicos na sua fabricação. Na figura 24 é apresentada uma amostra de uma estrutura de alumínio com presença de corrosão por esfoliação.



Figura 24 - Corrosão por esfoliação em uma peça feita de liga de alumínio. (Fonte: <http://www.epoxipiso.com.br/2012/11/formas-de-corrosao.html>, acessado em 15/09/2013)

- Corrosão sob Tensão

Esse tipo de corrosão é extremamente danosa, uma vez que pode levar a uma rápida falha estrutural provocada pelo surgimento de trincas (Figura 25).

Ela surge em estruturas de alumínio submetidos a ambientes corrosivos e que estejam submetidos a tensão. A propagação das trincas originadas por esse tipo de corrosão ocorre de forma irregular e é mais observada em ligas de alta resistência mecânica.



Figura 25 - Falha estrutural ocorrida em uma aeronave, devido a falhas na detecção de processos de corrosão por tensão na sua fuselagem de alumínio. (Fonte: http://aviationtroubleshooting.blogspot.com.br/2010_10_01_archive.html)

3.5.2 Laminados Compósitos e Delaminação

Os materiais estruturais se dividem em quatro categorias: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. Em especial os materiais compostos ou compósitos são constituídos da união de dois ou mais dos materiais citados anteriormente. Essa união tem o efeito de produzir propriedades singulares, não presentes originalmente nos materiais que o compõem.

Algumas das características especiais apresentadas em materiais compósitos são baixa densidade (baixo peso), boas propriedades térmicas, vida útil maior, rigidez, força, resistência à abrasão e à corrosão. Essas características fazem com que tais materiais sejam amplamente utilizados pelas indústrias esportiva, aeroespacial, construção civil, entre outras (BELO, 2006). A maioria dos compósitos industriais são constituídos por fases distintas chamadas de fibra e matriz, que são separadas por

interfaces. A matriz é a base do material e tem o papel de envolver e dar suporte à fibra que, por sua vez, é a parte que produz as características físicas e mecânicas especiais dos compósitos.

As fibras podem aparecer como curtas ou longas, contínuas ou descontínuas, unidirecionais ou bidirecionais e trançadas ou com distribuição aleatória. As fibras mais utilizadas são as fibras de carbono, grafite-carbono, vidro, boro e aramida (Kevlar). Dentre as matrizes mais utilizadas estão as resinas de epóxi e poliéster, as minerais e as metálicas.

Os materiais compósitos podem ser classificados em três grupos principais:

- Compósitos Particulados.
- Compósitos Fibrosos.
- Compósitos Estruturais.

Os compósitos particulados apresentam partículas de diâmetro entre $1\ \mu m$ e $0,1\ \mu m$ (GUO, 2007; GUEMES *et al*, 2010). Os compósitos fibrosos apresentam alta resistência, tenacidade e rigidez em comparação com seu peso. Os compósitos estruturais são formados pela composição em camadas distintas de diferentes materiais, incluindo os do próprio compósito. A figura 26 apresenta um diagrama de classificação dos materiais compósitos mais detalhado.

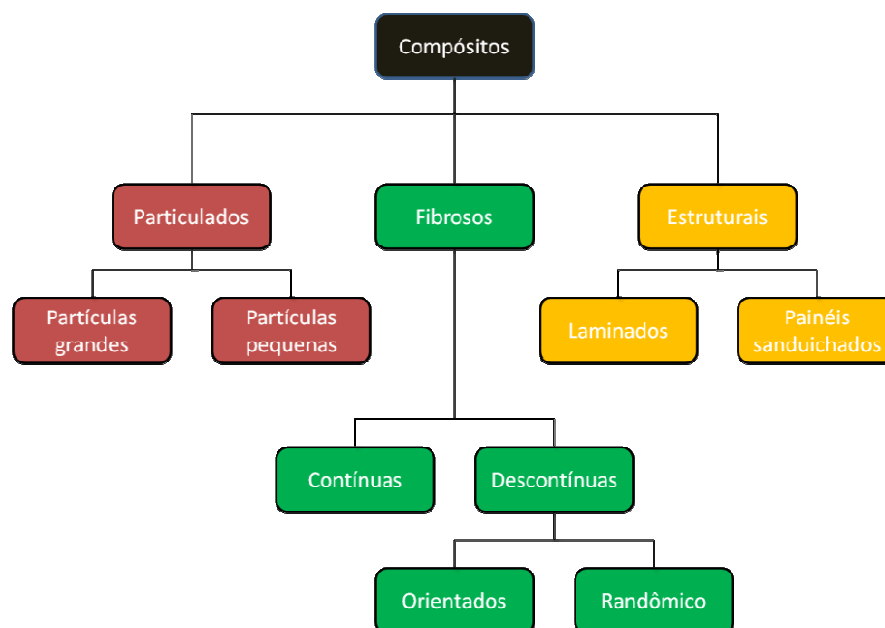


Figura 26 – Diagrama de classificação dos materiais compósitos.

No presente trabalho o material compósito utilizado é do tipo estrutural laminado, constituído por folhas ou painéis bidimensionais cimentados um sobre o outro. Essas placas podem estar orientadas unidirecionalmente ou apresentar diferentes orientações.

Como todo material, os compósitos apresentam falhas. Os compósitos laminares, quando submetidos a choques a baixas velocidades ou através de ciclos repetitivos de *stress*, podem apresentar uma separação entre duas camadas (lâminas) sobrepostas. Esse fenômeno é denominado de delaminação. Na figura 27, é apresentado um desenho esquemático da ocorrência de uma delaminação em uma placa de material compósito.

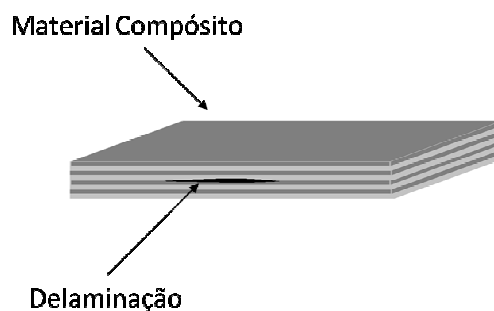


Figura 27 - Desenho exemplificando uma seção transversal de um corpo de material compósito com a presença de delaminação localizado entre as suas camadas centrais.

A delaminação pode ter escala macro ou microscópica, entretanto este defeito tem o poder de comprometer as características mecânicas do material e, dessa forma, comprometer a estrutura da qual ele faz parte. Na figura 28, pode-se observar um processo de delaminação em que Botelho e colaboradores analisaram em pesquisas a respeito de delaminações em materiais compósitos híbridos de fibra/epóxi/alumínio (BOTELHO, et al, 2006).

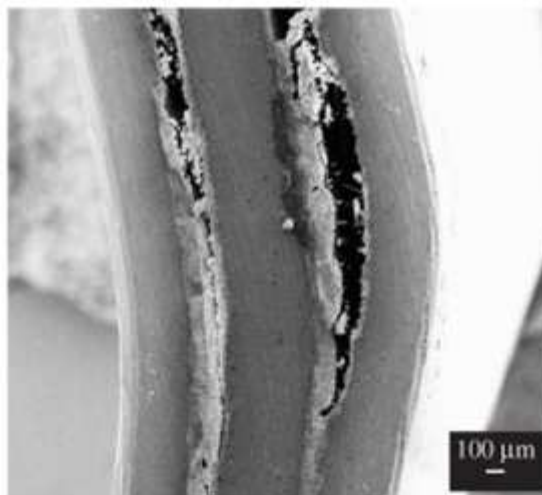


Figura 28 - Delaminação observada em um material compósito híbrido de fibra/epóxi/alumínio, provocada por uma força de compressão.

Inspeções de estruturas para determinar efeitos de delaminação podem ser efetuadas por meio de técnicas em que há a emissão de ondas ultrassônicas na estrutura, e posterior análise da recepção desse sinal. Chang e colaboradores (CHANG *et al*, 1998) demonstraram que uma rede de discos piezelétricos podem se integrar em um filme dielétrico, por meio da emissão controlada de sinais de referência por um dos discos piezelétricos, que são detectados pelos outros piezelétricos ao redor. Wang e Chang (WANG & CHANG, 1999) empregaram este método para realizar a identificação de danos produzidos por impacto em materiais compósitos. A montagem experimental consistia em uma rede de 4 discos piezelétricos conectados através de um multiplexador a um gerador de sinais e a uma placa de aquisição de sinais. O sinal emitido tinha frequência variando de 40 kHz até 150 kHz. A interpretação do sinal podia ser realizada por meio da análise espectral do sinal, assim como pelo tempo de voo (TOF, *Time of Flight*), ou seja, o tempo em que o sinal levava no percurso entre os discos piezelétricos que, quando comparado com o modelo analítico do problema, dava informações a respeito do tamanho e posição do dano, resultando em estimativas comparáveis com as técnicas de formação de imagens de estruturas por raios x.

3.6 Processamento de sinais

A última parte do SHM consiste na análise dos sinais e extração das informações de interesse. Existem diferentes técnicas utilizadas, tais como inferência estatística e

técnicas de inteligência artificial. Com relação à última, destacam-se as técnicas de algoritmos genéticos (GA, *Genetic Algorithm*), Lógica Fuzzy (FL, *Fuzzy Logic*) e de Redes Neurais Artificiais (ANN, *Artificial Neural Networks*). No capítulo 4 desta tese serão apresentados algoritmos com base em ANN a fim de caracterizar danos em placas de alumínio sujeitas a efeitos de perda de espessura e placas de laminado compósito (carbono resina epóxi) sujeitas a delaminação. Os algoritmos de classificação quando à presença de dano, assim como para a determinação da sua posição são apresentados nos capítulos 5 (no caso estático) e 6 (caso dinâmico).