

1. TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA

Métodos de identificação de danos em estruturas e a influência dos efeitos do ruído nos sinais de resposta.

2. INTRODUÇÃO

Os danos ocorrem frequentemente em membros estruturais e causam graves patologias estruturais e podem levar ao colapso. Os efeitos dessas fissuras influenciam nas respostas da estrutura, tanto dinâmica como estática, apresentando perdas de rigidez localizadas. Tais elementos devem ser identificados preferivelmente no seu estado inicial antes de comprometer a integridade total da estrutura. Entretanto se a fissura é relativamente pequena, é difícil de detectar com uma simples inspeção visual, por isso faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na localização e quantificação de possíveis danos (Andreaus et al. (2017)).

O conceito de identificação estrutural foi introduzido na Engenharia Civil somente há duas décadas (Aktan et al. (1997)) é importante que a engenharia proponha métodos eficazes e práticos para identificar este tipo de problema.

Assim sendo muitas fissuras superficiais em vigas de pontes, oleodutos superficiais, asas de aviões, podem ser detectadas utilizando-se técnicas de inspeção visual. Isto não é possível em estruturas com revestimento externo e isolamento ou fissuras superficiais em lugares de difícil acesso. Para superar estas dificuldades, técnicas não destrutivas tem sido aplicadas para possibilitar a tomada rápida de decisão quanto à minimização ou eliminação dos danos, visando uma manutenção adequada.

Como exemplo, poderemos citar que em estruturas de grande porte, a detecção de danos é uma questão muito importante do ponto de vista da segurança. Portanto, é essencial realizar a inspeção periódica em cada componente para detectar alterações na sua estabilidade estrutural. O custo de fazer reparos é geralmente menor em comparação a reconstrução parcial ou total do sistema estrutural.

Os procedimentos de manutenção e avaliação para pontes incluem: inspeção visual (Figura 2.1a), ensaios de carga, ultrassom, raio X (Nasrollahi et al. (2017)). E na manutenção de oleodutos é comum o uso *pigs*, sigla que significa “pipeline inspection gauge” (Figura 2.1b). Estes dispositivos são lançados dentro do oleoduto e são impulsionados pelo próprio fluido para serem recebidos em qualquer outra estação (Bagheri et al. (2017)).



(a) Ponte de Omaha do Sul- sobre o rio Missouri (Tatsumi, 2007)



(b) pigs.

Figura 2.1- Inspeção de Estruturas.

O objetivo dos sistemas de identificação de danos é solucionar um problema inverso, isto é: identificar um sistema cujo sinal de entrada é desconhecido, mas o sinal de saída é dado. Isso significa que o objetivo de identificação de danos é a descrição de

um modelo estrutural existente, com base em dados obtidos experimentalmente (resposta dinâmica ou estática). Muitas vezes, é desejável detectar irregularidades ou alterações da resposta da estrutura, considerando propriedades que foram alteradas pelo dano (Ren; Roeck (2002)).

Dessa forma, esta pesquisa está direcionada à avaliação dos métodos de identificação de danos que utilizam a resposta dinâmica da estrutura, aplicadas a modelos reduzidos de vigas, pórticos planos e espaciais. Também será realizada uma avaliação dos diferentes níveis de ruído presentes no sinal e como isto pode afetar a eficácia dos métodos de identificação de danos.

2.1 - CONCEITOS E GENERALIDADES

Alguns danos em estruturas podem causar diminuição da vida útil da estrutura. Define-se vida útil como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada sem necessidade de intervenções não previstas (Lausanne, 1990). As estruturas, como as pontes, estão sujeitas a condições ambientais que alteram suas propriedades físicas e químicas, comprometendo a sua durabilidade e favorecendo o surgimento de patologias. A NBR-6118 (2003) define durabilidade como a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Entende-se ainda por patologia a queda de desempenho de um produto, componente ou construção ao longo do tempo, devido a erros de: planejamento, projeto, execução, uso e deterioração, provenientes de sua interação com o meio ambiente.

Recentemente a detecção, localização e quantificação dos danos em estruturas por meio de resposta de vibração estrutural têm sido um dos muito tópicos importantes na pesquisa de identificação do sistema. Uma pesquisa recente sobre as literaturas técnicas mostra que os algoritmos de identificação de danos foram desenvolvidos utilizando a variação das características dinâmicas, especialmente, no domínio da frequência (Doebeling et al., 1996). Nesta linha de pesquisa Bezerra e Saigal (1993) estudaram a detecção de trincas em painéis a partir de métodos numéricos, utilizando o método dos elementos de contorno.

As frequências naturais são indicadores sensíveis de integridade estrutural. Assim, uma análise de medições de frequência periódica pode ser usada para monitorar o estado da estrutura. As medições de frequência fornecem uma técnica de avaliação de baixo custo estrutural (Salawu, 1997). Nas últimas décadas, os exames não destrutivos (nondestructive examination - NDE) e as técnicas de monitoramento têm recebido especial atenção, entre as quais a análise de vibração para a detecção de danos tem sido a mais popular, por causa da simplicidade de implementação e por ser um dos parâmetros mais sensível ao dano (Radzieński et al., 2011).

2.1.1 - Classificação do processo de detecção de danos.

Geralmente os sistemas de identificação de danos são classificados, principalmente, no domínio da frequência e do tempo. Os sistemas de identificação de danos, em grande parte, fazem uso de parâmetros dinâmicos.

De acordo com Rytter (1993), o processo de detecção de danos em estruturas, pode ser classificado como:

- I. Detecção de dano;
- II. Localização geométrica do dano;
- III. Avaliação da severidade do dano;
- IV. Determinação da vida útil remanescente da estrutura.

Métodos nível I consideram somente a determinação se a estrutura apresenta dano ou não. Métodos nível II consideram se a estrutura está danificada e a localização do dano. No nível III, a detecção e localização devem ser quantificadas em extensão e severidade e, no nível IV, a vida útil remanescente da estrutura deve ser determinada considerando o dano quantificado.

2.2 ESTADO DA ARTE

Identificação e localização de danos através da resposta dinâmica têm recebido especial atenção nos últimos anos. Sendo assim, será apresentada uma revisão da literatura que abrange estudos anteriores a fim de selecionar as principais análises e conclusões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Zhong et al. (2008) fizeram um estudo teórico de uma viga simplesmente apoiada, por meio da adição de uma função polinomial que representa a presença do dano. Eles determinaram a variação das frequências devidas a adição de uma massa no sistema (Figura 2.2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

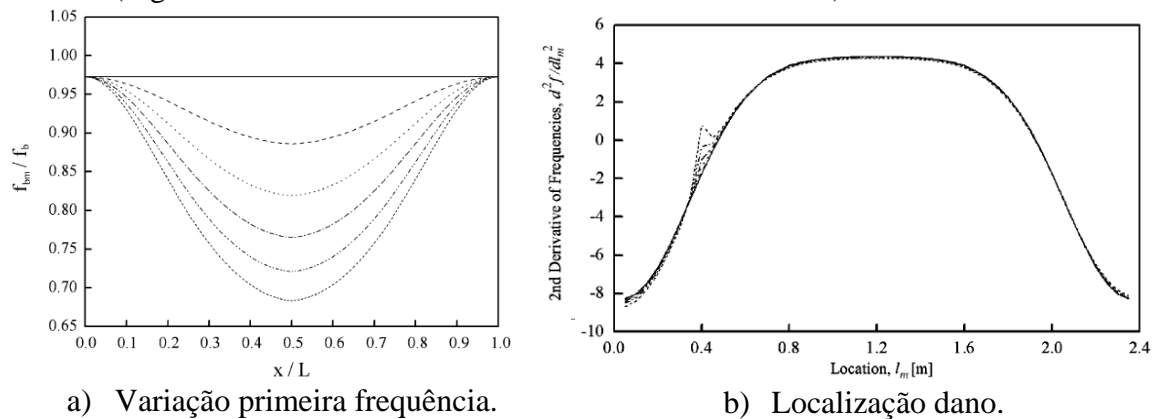


Figura 2.2- Estudo identificação do dano (Zhong e Oyadiji, 2007)

Zhichun e Le (2010) desenvolveram análises com base na nova concepção do vetor de frequência natural (NFV-Natural Frequency Vector) usando as frequências naturais para localizar danos. Para uma estrutura específica, uma série de estados de danos pode ser simulada com base no modelo de elementos finitos da estrutura intacta. Em seguida, os NFVs da estrutura danificada podem ser calculados e utilizados para construir um banco de dados. Por fim, o NFVAC (NFVAC-Natural Frequency Vector Assurance Criterion), que é definida pela relação de danos NFVs no banco de dados e a característica NFV medido sobre a estrutura corrente são utilizados como índice de dano. Um modelo de pórtico de oito andares é adotado como um exemplo para verificar a viabilidade e validade do método proposto. Ambas as simulações numéricas e experimentais foram realizadas para verificar a viabilidade do método proposto. Demonstrou-se como o índice proposto que a localização do dano pode ser corretamente identificada e as extensões podem ser estimadas também (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

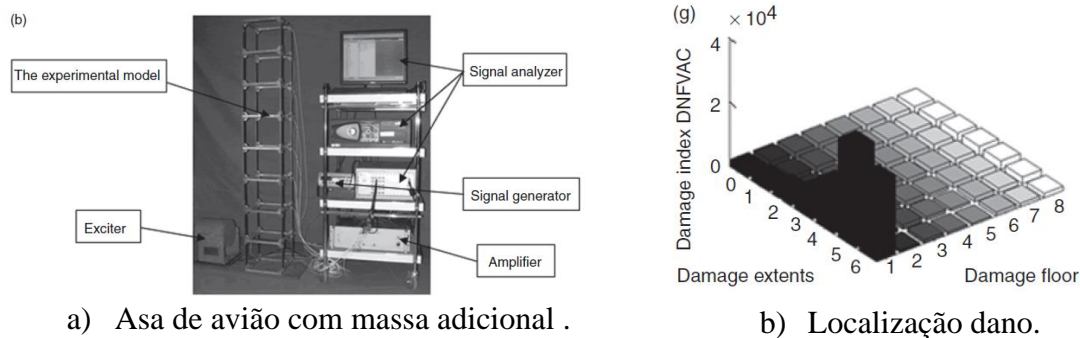


Figura 2.3- Estudo identificação do dano (Zhichun e Le, 2010)

Silva (2015), propôs um índice de dano leva em consideração a Curvatura da Energia dos Coeficientes da Wavelets Pacote (*CEWP*), aplicando equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.4.

$$CEWP = \left| \frac{E_{f_i}'' - E_{f_d}''}{E_{f_i}''} \right| \quad (2.1)$$

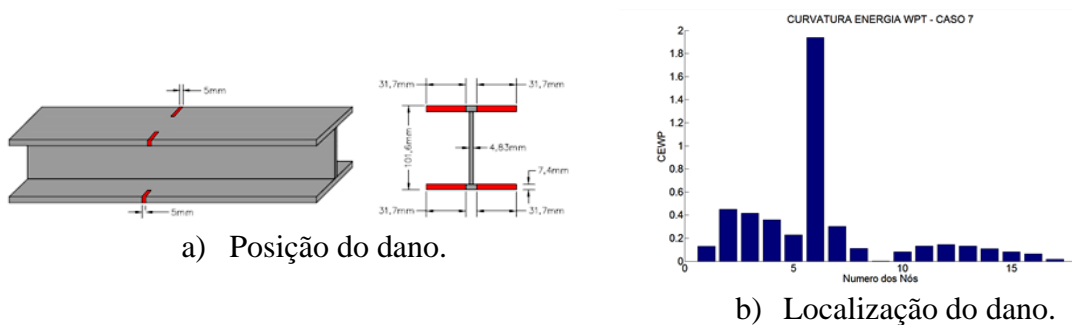


Figura 2.4- Estudo identificação do dano (Silva, 2015)

Peng et al. (2013) abordaram o problema do vão livre (free-spans) ao longo gasodutos submarinos, tanto na fase de projeto de gasodutos e durante a operação de gasodutos. Um indicador de dano, WPECR, foi proposto com base na transformada de wavelet pacote para identificar vão livre ao longo de gasodutos submarinos. A confiabilidade e a eficiência do indicador de danos proposto é comprovada com dados de vibração simulados numéricos de gasoduto sob forças marinhas ambiente (Figura 2.5).

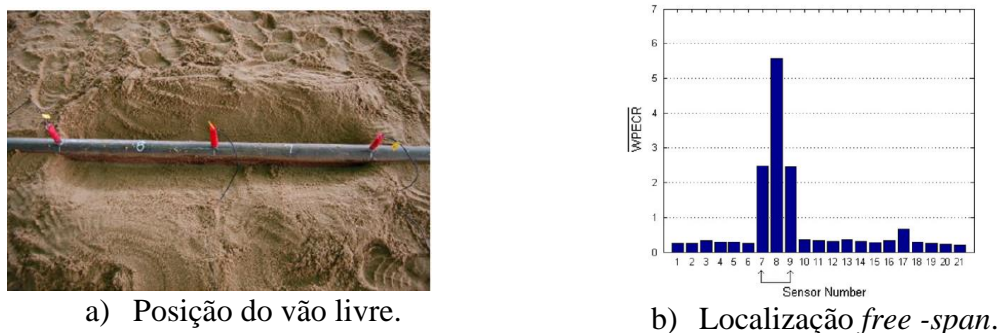
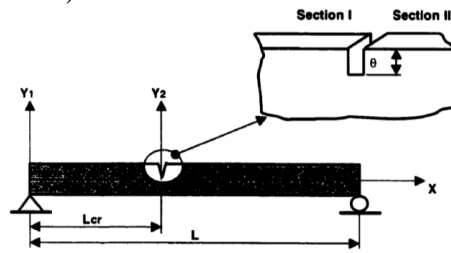


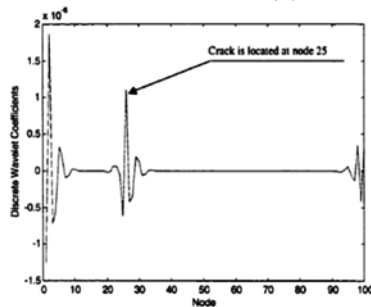
Figura 2.5- Estudo identificação do dano (Peng et al., 2013)

O estudo realizado por Ovanesova (2000) apresentou o desenvolvimento analítico de um método não destrutivo baseado no uso das Wavelets. O método

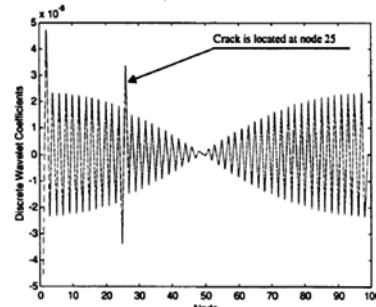
proposto baseia-se na análise do sinal de resposta da estrutura, submetida às diferentes condições de carga (Figura 2.6).



(a) Local do dano (Ovanesova, 2000)



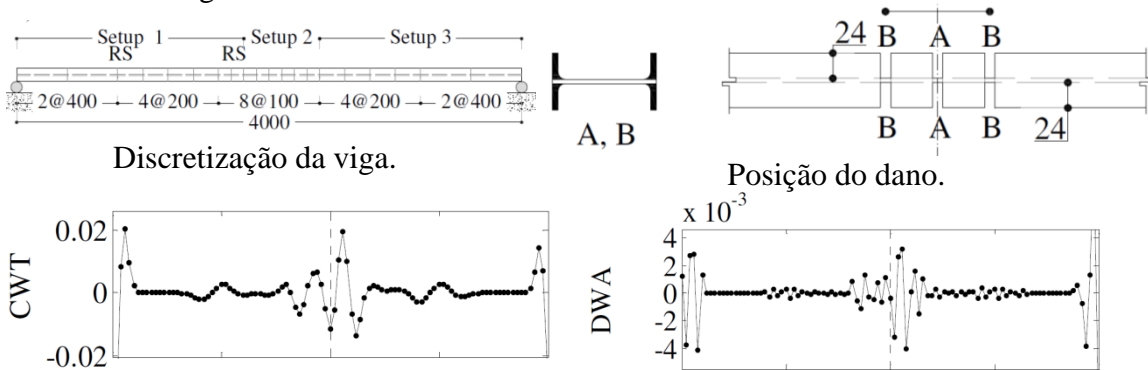
Identificação do dano utilizando a wavelet-mãe “boir6.8”.



Identificação do dano utilizando a wavelet-mãe “Haar”

Figura 2.6- Estudo identificação do dano (Ovanesova, 2000)

O trabalho desenvolvido por Estrada (2008) apresentou uma análise comparativa detalhada da eficácia de métodos de detecção de dano em pontes. Uma atenção especial foi dada aos métodos baseados, exclusivamente, na resposta dinâmica da estrutura danificada. Para este efeito são escolhidos os métodos baseados na análise de wavelets, na curvatura das formas modais e na modificação da matriz de flexibilidade Figura 2.7.



Identificação do dano com TCW.

(d) Identificação do dano com TDW.

Figura 2.7 - Estudo identificação do dano (Estrada, 2008)

2.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

Nesta seção é apresentada uma descrição geral de alguns dos métodos de detecção de danos baseados na resposta dinâmica de estruturas mais utilizados.

2.3.1 Método COMAC.

Um dos métodos mais simples de detecção de danos é o Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC). Este método mede a correlação entre vários vetores. Se os deslocamentos no nó i de um conjunto de modos de vibração são idênticos, então o valor COMAC é um para este nó. Em contraste, quando temos uma perturbação gerada pelo dano, os deslocamentos no nó i serão diferentes para o conjunto de modos de vibração. Em consequência disso, o valor COMAC para este nó pode dar valores menores que um. Sua interpretação matemática é dada pela seguinte equação (Estrada (2008) e Ndambi et al. (2002)):

$$COMAC_j = \frac{\left[\sum_{i=1}^N |\psi_{ij} \psi_{ij}^*| \right]^2}{\sum_{i=1}^N \psi_{ij}^2 \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{*2}} \quad (2.2)$$

Onde ψ_{ij} e ψ_{ij}^* são os modos de vibração correspondentes ao j -ésimo nó do i -ésimo modo de vibração da estrutura intacta e a estrutura danificada respectivamente.

2.3.2 Método da Curvatura.

Há algum tempo, descobriu-se que a curvatura formada pela resposta da estrutura é um bom parâmetro para identificação de danos. Esse método, proposto pela primeira vez por Pandey et al. (1991), baseia-se no fato de que a curvatura do modo de vibração está relacionada à rigidez de flexão da estrutura da seguinte maneira:

$$\epsilon = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d^2 \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.3)$$

Onde ϵ é a curvatura da seção transversal, M o momento de flexão correspondente à seção transversal, E o módulo de elasticidade, y é a deflexão total, I o momento de inércia da seção e corresponde à segunda derivada e à soma dos modos de vibração com relação a uma distância longitudinal x . Deste modo, se um dano aparece, a rigidez de flexão da viga (EI) irá diminuir o que causa um aumento na magnitude da curvatura.

Nesse método, o dano pode ser detectado apenas com a informação do modo de vibração da estrutura danificada. As principais desvantagens desse método estão relacionadas à técnica utilizada para obter as segundas derivadas dos modos de vibração. O método das diferenças centrais é comumente usado nesses casos. Com essa técnica, pequenas irregularidades nos modos de vibração não correspondentes aos danos também são ampliadas, contaminando os resultados com vários picos. Outros métodos para a obtenção da segunda derivada têm sido testados. No entanto, nenhum deles até agora têm resolvido esse problema (Maeck et al. (2000)).

2.3.3 Método Índice de dano (ID)

O método Índice de dano (ID), proposto por Kim e Stubbs (1995), calcula a mudança da energia armazenada na viga quando esta se deforma. Considerando-se uma viga de Euler-Bernoulli de comprimento L , na qual apenas a flexão em torno do eixo vertical é permitida, a energia de deformação da viga, correspondente ao modo de vibração ϕ_i , pode ser expressa da seguinte forma:

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (2.4)$$

A formulação do método de índice de dano pode ser expressa como segue:

$$\beta_{ij} = \frac{(\epsilon_{i,j}^*)^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2}{(\epsilon_{i,j})^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{i,j} = \left[\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right]_{x=x_i} \quad ; \quad \epsilon_{i,j}^* = \left[\frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2} \right]_{x=x_i} \quad (2.6)$$

Onde N_t é o total de nós na viga, ϵ é a curvatura do modo de vibração, ϕ_i e ϕ_i^* são os modos de vibração da viga intacta e da viga danificada respectivamente.

2.3.4 Método Mudança de Flexibilidade

Zimmerman (2016) desenvolveram um método de detecção de danos baseado nas alterações da matriz de rigidez de uma estrutura. O parâmetro proposto é deduzido a partir do problema de valores próprios de uma estrutura intacta e não amortecida:

$$(-\Omega M + K)\Phi = 0 \quad (2.7)$$

Onde M e K são a matriz de massa e de rigidez da estrutura intacta respectivamente. Se ΔM e ΔK são perturbações da matriz de massa e a matriz de rigidez respectivamente, o problema de eigenvalores da estrutura não amortecida resulta em:

$$[-\Omega^*(M - \Delta M) + (K - \Delta K)]\Phi^* = 0 \quad (2.8)$$

Onde o asterisco denota os parâmetros correspondentes à estrutura danificada. Separando as perturbações dos parâmetros originais, o parâmetro de índice D_i é definido como:

$$D_i = (w_i^{2*} M + K)\Phi_i^* = (w_i^{2*} \Delta M + \Delta K)\Phi_i^* \quad (2.9)$$

A matriz de rigidez da estrutura intacta e danificada pode ser obtida a partir de seus parâmetros modais de uma forma semelhante, como foi obtida a matriz de flexibilidade:

$$K = \Phi \Omega \Phi^T = \sum_{i=1}^N w_i^2 \Phi_i \Phi_i^T \quad (2.10)$$

$$K^* = \Phi^* \Omega^* \Phi^{*T} = \sum_{i=1}^N w_i^{*2} \Phi_i^* \Phi_i^{*T} \quad (2.11)$$

$$\Delta K = K^* - K \quad (2.12)$$

2.3.5 Método MAC

Um dos mais conhecidos métodos para determinar a correlação entre dois conjuntos de vetores é o método Modal Assurance Criterion (MAC). Este método permite determinar a proteção de um vetor para outro de tal maneira que ambos os vetores sejam iguais. Quando o valor MAC é igual a um, significa que os vetores são iguais; quando o resultado é um valor próximo de zero, indica que os vetores não são correlacionados. O método MAC entre dois vetores modais é definido como (Allemang (2003)):

$$\text{MAC}(\phi_i, \phi_i^*) = \frac{|\phi_i^T \phi_i^*|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_i^{*T} \phi_i^*)} \quad (2.13)$$

Onde ϕ_i e ϕ_i^* são o i -ésimo modo de vibração da estrutura intacta e da estrutura danificada respectivamente, e T denota a transposta do vetor.

2.4 PROCESSAMENTO DE SINAIS.

As técnicas de processamento de sinais podem ser classificadas em: análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise no domínio tempo-frequência. Para o propósito de detecção de danos em estruturas, mudanças nas frequências naturais, modos de vibração e relações de amortecimento são usadas para identificar danos (Zhou (2006)).

2.4.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta útil que possibilita determinar a contribuição que cada função seno e cosseno, presentes numa série temporal, apresentam para a energia total desta série (periódica). A TF é definida da seguinte forma:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i \omega x} dx \quad (2.14)$$

Onde $f(x)$ é a série temporal ou sinal analisado, ω é a frequência que cada componente oscilatória inerente ao sinal apresenta, ou seja, representa as diferentes frequências contidas na série e a exponencial transforma para o espaço das frequências.

A TF é amplamente utilizada na engenharia para obtenção de informações adicionais contidas em um sinal temporal, tais informações são obtidas no espectro de frequência obtido após a transformação matemática.

O resultado da aplicação da TF sobre a série temporal é chamado de espectro de frequência da série e está apresentado na Figura 2.8 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

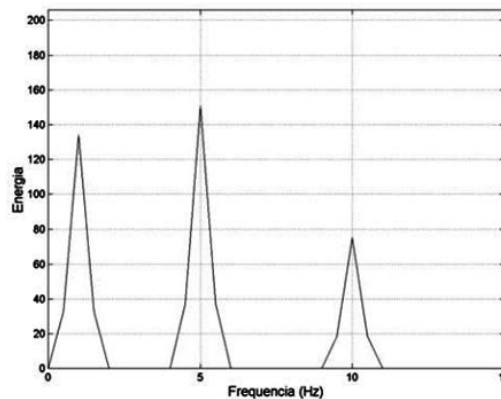


Figura 2.8 Espectro de frequência obtido pela TF da série temporal (Bolzan (2006)).

Observa-se na Figura 2.8 a presença das três frequências, definidas na série temporal. Porém a TF aplicada a toda a série temporal (16s) não mostra distinção com

relação às somas das componentes oscilatórias das séries e suas respectivas localizações temporais, ou seja, toda informação temporal é perdida.

A Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresenta uma deficiência referente à decomposição das várias frequências de um sinal com relação à sua localização no tempo. Gabor (1946) percebeu esta deficiência da TF em séries temporais não estacionárias, o que de fato é o caso da maioria dos fenômenos encontrados na natureza. Em consequência ele modificou a TF visando a melhor representatividade deste tipo de séries temporais. Neste esquema, a série temporal é dividida em intervalos iguais e a TF é aplicada em cada um destes. Este método ficou conhecido como a Transformada Janelada de Fourier (TJF) e será apresentada a seguir.

2.4.2 Transformada Janelada de Fourier (TJF)

A diferença que existe entre a TF e a TJF é que nesta última o sinal é dividido em pequenos segmentos, onde estes segmentos do sinal são assumidos como sendo estacionários. Para este propósito, uma função janela “W” é escolhida. A largura desta janela deve ser igual ao segmento do sinal onde a estacionaridade é válida (Polikar, 1994).

A TJF nada mais é do que o produto da TF por uma função janela. Para cada valor t e ω , um novo coeficiente da TJF é calculado pela seguinte expressão:

$$TJF(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) W(x - t) e^{-2\pi i \omega x} dx \quad (2.15)$$

Bolzan (2006) dividiu a série temporal da Figura 2.9a em cinco segmentos com intervalos iguais de tempo, ou seja, cada segmento com três segundos de duração. Em seguida foi aplicada a TF em cada um deles, a Figura 2.9b **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o resultado da aplicação da TJF.

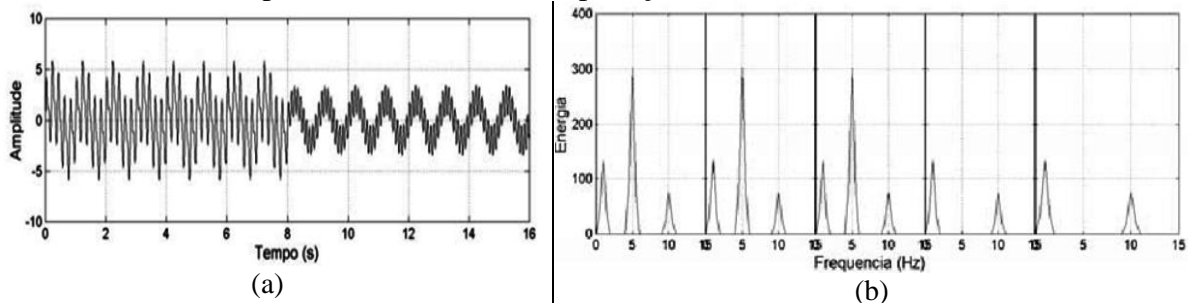


Figura 2.9 TF aplicada em cada segmento da série temporal.
(Bolzan (2006)).

Na Figura 2.9 percebe-se a presença das diferentes frequências de cada argumento da função seno (5Hz, 10Hz e 15Hz), em suas respectivas localizações temporais. Ou seja, nos oito primeiros segundos aparecem as três frequências, enquanto nos oito últimos segundos a frequência de 5Hz não está presente.

2.5 RUÍDO

Ruído é definido como qualquer degradação do sinal original, o que resulta em diferenças consideráveis em relação às respostas esperadas. Todos os sistemas reais têm ruídos tais como:

- Ruído de medição;
- Ruído de quantização / amostragem;

- Ruído térmico (vibração das partículas internas com a mudança de temperatura).

É importante considerar a inclusão de ruído no sinal, devido a alta influência que apresenta nos ensaios experimentais, nos resultados e na efetividade do método de identificação de danos proposto.

Em princípio, cada fenômeno físico está definido pela sua própria função de densidade de probabilidade, no entanto os processos aleatórios estacionários são geralmente de natureza gaussiana e portanto, tem a conhecida distribuição de densidade de probabilidade gaussiana dada por (Norton; Karczub (2007)):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{\frac{1}{2}}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma^2} \quad (2.16)$$

Onde:

m_x : é a média do sinal ;

σ : é ao desvio padrão.

Esta distribuição de probabilidade, também chamada de distribuição normal é parametrizada pelo valor médio (m_x) e pelo desvio padrão (σ). Quando o valor médio é nulo e o desvio padrão unitário, é chamada gaussiana.

Nesta pesquisa pretende-se utilizar um sinal de ruído branco com distribuição gaussiana $r(t)$, com média nula e desvio padrão unitário adotando como parâmetro de referência a maior amplitude gerada no sinal temporal $a(t)$ (espectro de acelerações), que pode ser obtido da modelagem numérica. Serão testados valores de ruído de 1%, 2% 5% e 10% em relação aquela amplitude.

Na Figura 2.10 são apresentados alguns exemplos dos espectros de acelerações $a(t)$ e o sinal de $r(t)$, com valores de ruído de 1%.

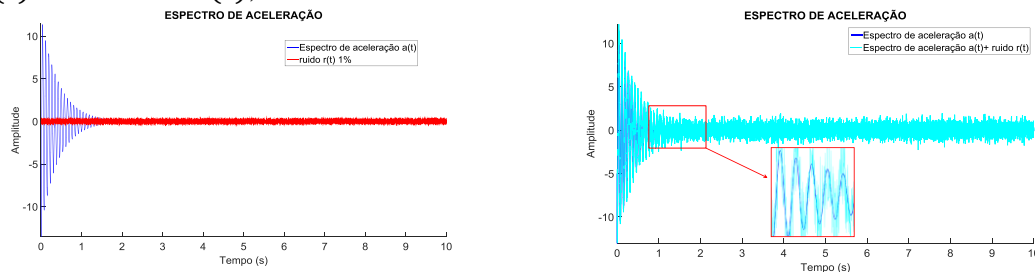


Figura 2.10 – Sinal temporal $a(t)$, ruído $r(t)$ de 1%.

3. OBJETIVOS E METAS A SEREM ALCANÇADOS

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa será avaliar a eficácia dos diferentes métodos para identificação de danos que utilizam a resposta dinâmica da estrutura (frequências e modos de vibração) sob a presença de ruído no sinal. O estudo será aplicado em vigas e estruturas aporticadas, desenvolvendo análises numéricas e executando ensaios experimentais em modelos reduzidos.

3.1.2 Objetivos específicos

- Aplicar os seguintes métodos: COMAC, índice de dano, mudança de flexibilidade, MAC, transformadas de wavelet, curvatura de energia dos

coeficientes wavelets pacote (CEWP), todos eles para identificação de danos em modelos reduzidos de viga e pórticos planos e espaciais de alumínio.

- Realizar as modelagens numéricas, procurando reproduzir ao máximo as condições dos ensaios experimentais.
- Definir a influência do ruído presente nos sinais utilizados na aplicação dos métodos de identificação de danos anteriormente mencionados.
- A partir da teoria da viga de Euler-Bernoulli e Timoshenko, realizar a modelagem analítica de uma viga danificada e a correspondente obtenção das frequências naturais.
- Definir qual método é menos susceptível à presença de ruído no sinal.

4. METODOLOGIA A SER EMPREGADA;

Avaliar vários métodos para identificação de danos em estruturas, dentre eles os métodos COMAC, índice de dano, mudança de flexibilidade, MAC, transformadas de wavelet, curvatura de energia dos coeficientes wavelets pacote (CEWP).

Inicialmente serão desenvolvidos ensaios dinâmicos experimentais em vigas, pórticos planos e espaciais feitos de alumínio com modelos reduzidos adquiridos com recursos próprios do pesquisador. O dano será simulado provocando uma diminuição da seção transversal do elemento danificado, através de entalhes.

A obtenção da resposta dinâmica da estrutura (espectro de acelerações $a(t)$ e deslocamentos $x(t)$), se realizará, com o software livre CVMOB que utiliza as imagens captadas em vídeo para calcular os deslocamentos e acelerações de pontos fixos da estrutura analisada.

Após a obtenção do sinal de resposta e com ajuda do software ARTEMIS, serão calculadas as frequências e modos de vibração experimentais.

Depois serão aplicados os métodos de identificação de danos anteriormente mencionados e será definida sua eficácia.

Paralelamente aos ensaios experimentais serão desenvolvidos modelos numéricos realizados no software ANSYS, reproduzindo ao máximo, as condições obtidas nos ensaios experimentais. Esta análise levará em consideração a resposta dinâmica da estrutura danificada por meio de uma diminuição da rigidez à flexão. A análise executada será transiente, onde, será obtido o sinal de resposta que depois será adicionado ao ruído branco, para tentar aproximar ao máximo do sinal experimental.

Serão adicionados ruídos brancos nos sinais de resposta, com níveis de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%, após os sinais, serão processados no software ARTEMIS para obter as frequências e modos de vibração experimentais e posteriormente serão aplicados os métodos de identificação de danos nos sinais de resposta.

Posteriormente, será desenvolvida uma análise analítica de um modelo de viga danificada utilizando a formulação de Euler Bernoulli e Timoshenko, considerando a utilização de viga escalonada com diminuição de seção transversal no local danificado. O objetivo desta análise será determinar as frequências naturais da estrutura danificada e compará-las com as frequências obtidas nos ensaios experimentais e análises numéricas.

Por último, será determinado qual método de identificação de danos é mais eficiente sob a presença de ruído nos sinais de resposta.

Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma geral da pesquisa.

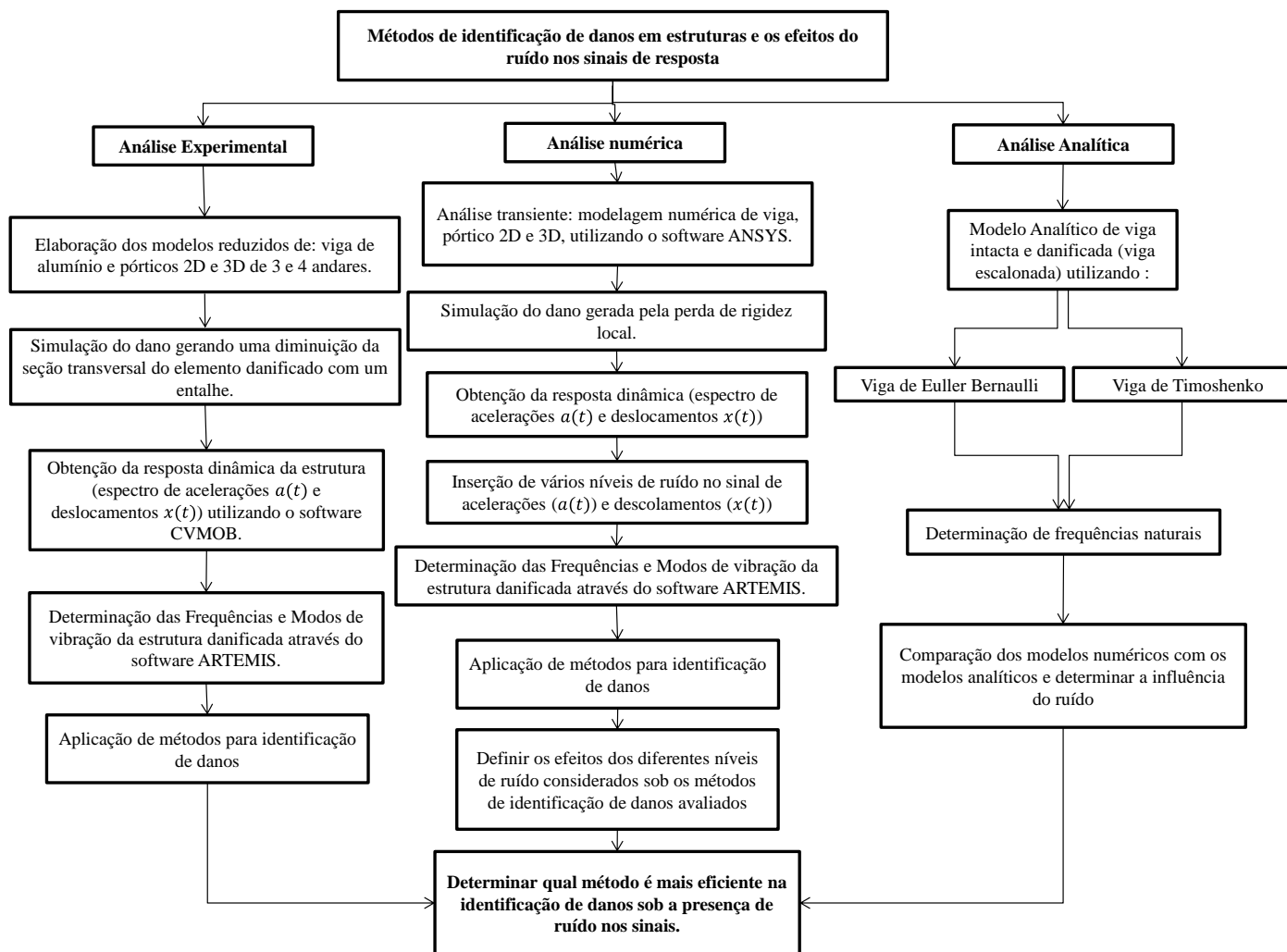


Figura 4.1 Fluxograma geral da pesquisa.

5. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS OU DE INOVAÇÃO DA PROPOSTA;

O desempenho de uma peça estrutural diminui ao longo de sua vida útil devido a muitos processos de deterioração (fadiga, carbonatação, deslocamento do concreto, corrosão de armaduras, oxidação de estruturas metálicas, ligações, etc.). Sendo assim, a falha de uma parte importante da estrutura pode causar perdas econômicas significantes e também perda de vidas humanas, que é mais grave ainda (Estrada (2008)).

Um dos requisitos mais importantes para a manutenção bem-sucedida de estruturas é a detecção de danos, ainda nas fases iniciais. As fissuras, em elementos estruturais, podem causar variações locais de rigidez que podem afetar o comportamento dinâmico da estrutura. Em particular, as alterações das frequências naturais e modos de vibração podem ocorrer por causa da existência de fissuras. Isto levou a proposta de analisar os diferentes métodos de identificação de danos que utilizam as frequências e modos de vibração da estrutura (modelos reduzidos de: vigas, pórticos planos e pórticos espaciais) e o efeito que pode causar o ruído inerente, presente nos equipamentos de medição.

As frequências naturais e modos de vibração são indicadores sensíveis de integridade estrutural. Assim, uma análise de medições periódica de sinais não estacionários podem ser usadas para monitorar o estado atual da estrutura. Estas medições associadas aos diferentes métodos de identificação de danos fornecem técnicas de avaliação de baixo custo e alta praticidade, por causa da facilidade na medição das frequências naturais e o subsequente cálculo dos modos de vibração.

6. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO PROJETO;

As atividades a serem realizadas são:

- AT1. Revisão bibliográfica;
- AT2. Elaboração dos modelos reduzidos para os ensaios experimentais (vigas, pórticos planos e espaciais);
- AT3. Execução dos ensaios experimentais das estruturas intactas;
- AT4. Execução dos ensaios experimentais das estruturas danificadas;
- AT5. Processamentos dos sinais de resposta;
- AT6. Determinação das frequências e modos de vibração experimentais;
- AT7. Aplicação dos métodos de identificação de danos nos dados experimentais;
- AT8. Modelagem numérica das estruturas testadas nos ensaios experimentais;
- AT9. Simulação dos danos nos modelos numéricos;
- AT10. Obtenção da resposta dinâmica da estrutura através da análise transiente;
- AT11. Aplicação dos métodos de identificação de danos;
- AT12. Inserção do ruído no sinal;
- AT13. Aplicação dos métodos de identificação de danos nos sinais com ruído;
- AT14. Determinação dos efeitos dos diferentes níveis de ruído sob a eficácia dos métodos de identificação de danos analisados.
- AT15. Modelo analítico da viga intacta e danificada utilizando a teoria de Euler-Bernoulli.
- AT16. Modelo analítico da viga intacta e danificada utilizando a teoria de Timoshenko.
- AT17. Comparação das frequências obtidas nas análises: experimental, numérica e analítica.
- AT18. Análise do efeito do ruído nos métodos de identificação de danos.

Nº	2019										2020	
	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02
AT1	X	X										
AT2		X	X	X								
AT3				X	X							
AT4						X						
AT5						X						
AT6						X	X					
AT7							X					
AT8						X	X					
AT9								X				
AT10								X	X			
AT11									X	X		
AT12										X		
AT13										X		
AT14										X	X	
AT15	X	X	X									
AT16				X	X	X						
AT17							X	X	X			
AT18											X	X

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AKTAN, A. E.; FARHEY, D. N.; HELMICKI, A. J.; et al. Structural Identification for Condition Assessment: Experimental Arts. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1674–1684, 1997.

ALLEMANG, R. J. The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. **Journal of Sound and Vibration**, v. 1, n. August, p. 14–21, 2003.

ANDREAUS, U.; BARAGATTI, P.; CASINI, P.; IACOVIELLO, D. Experimental damage evaluation of open and fatigue cracks of multi-cracked beams by using wavelet transform of static response via image analysis. **STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING**, v. 24, n. June 2016, p. 1–16, 2017.

BAGHERI, A.; RIZZO, P.; LI, K. Ultrasonic imaging algorithm for the health monitoring of pipes. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 7, n. 1, p. 99–121, 2017. Springer Berlin Heidelberg.

- BEZERRA, L. M.; SAIGAL, S. A boundary element formulation for the inverse elastostatics problem (IESP) of flaw detection. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 36, n. July 1993, p. 2189–2202, 1993.
- BOLZAN, M. J. A. Transformada em ondeleta: uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 563–567, 2006.
- DOEBLING, S.W., FARRAR, C.R., PRIME, M.B., SHEVITZ, D. . Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics. ,1996. Los Alamos National Laboratory.
- ESTRADA, R. S. **Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring : Evaluation and Application**, 2008. University of Minho.
- KIM, J.-T.; STUBBS, N. Model-Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy in Plate Girder. **Journal of Structural Engineering**, v. 121, n. 10, p. 1409–1417, 1995.
- LAUSANNE. CEB-FIP model code 1990. ,1990.
- MAECK, J.; ABDEL WAHAB, M. M.; PEETERS, B.; et al. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. **Engineering Structures**, v. 22, n. 10, p. 1339–1349, 2000.
- NASROLLAHI, A.; DENG, W.; RIZZO, P. Multimodal structural health monitoring based on active and passive sensing. **Structural Health Monitoring**, p. 1–15, 2017.
- NBR-6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. ,2003. Rio de Janeiro.
- NDAMBI, J. M.; VANTOMME, J.; HARRI, K. Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives. **Engineering Structures**, v. 24, n. 4, p. 501–515, 2002.
- NORTON, M. P.; KARCZUB, D. G. **Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, 2nd Edition**. 2007.
- OVANESOVA, A. V. **Applications of Wavelets to Crack Detection in Frame Structures.**, 2000. University of Puerto Rico.
- PANDEY, A. K.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. M. Damage detection from changes in curvature mode shapes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 145, n. 2, p. 321–332, 1991.
- PENG, X.-L.; HAO, H.; LI, Z.-X.; FAN, K.-Q. Experimental study on subsea pipeline bedding condition assessment using wavelet packet transform. **Engineering Structures**, v. 48, p. 81–97, 2013.
- RADZIENSKI, M.; KRAWCZUK, M.; PALACZ, M. Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 6, p. 2169–2190, 2011.

REN, W.; ROECK, G. DE. Structural Damage Identification using Modal Data . II : Test Verification. **JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING**, v. 128, p. 96–104, 2002.

RYTTER, A. **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures.**, 1993. Aalborg University.

SALAWU, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. **Engineering Structures**, v. 19, n. 9, p. 718–723, 1997.

SILVA, R. S. R. C. **Monitoramento e identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet.**, 2015. Universidade de Brasília.

ZHICHUN, Y.; LE, W. Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 21, n. 3, p. 309–319, 2010.

ZHONG, S.; OYADIJI, S. O.; DING, K. Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies with auxiliary mass spatial probing. **Journal of Sound and Vibration**, v. 311, n. 3-5, p. 1075–1099, 2008.

ZHOU, Z. **Vibration-Based Damage Detecton of Simple Bridge Superstructures**, 2006. University of Saskatchewan.

ZIMMERMAN, D. C. Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory. , v. 116, n. April 1994, 2016.