

# Compactação de sinais de campo para execução de ensaio acelerado de durabilidade

*Field data compression for durability accelerated test execution*

Rynaldo Zanotele Hemerly de Almeida<sup>a\*</sup>, José Gabriel Vicente<sup>a</sup>, Sérgio Francisco Dela Antônio<sup>a</sup>, Luiz Eduardo Lopes<sup>a</sup>, Bruno Lucena<sup>b</sup>

a Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Lab Test & Simulations, CNHi, Curitiba-PR, Brasil.

\*E-mail: rynaldo@ipt.br

Palavras-chave:  
durabilidade; fadiga; *rainflow*.

Keywords:  
*durability; fatigue; rainflow.*

## Resumo

Apesar da disponibilidade de ferramentas computacionais avançadas para análise de engenharia, os ensaios físicos de durabilidade continuam sendo uma etapa decisiva no projeto mecânico estrutural de novos produtos. Devido aos consideráveis custos e durações desses ensaios, profissionais qualificados procuram reduzir seus tempos de execução realizando-se a compactação de sinais de campo. Neste artigo, são apresentadas características do procedimento de compactação de sinais comparando-se os benefícios e limitações em sua utilização.

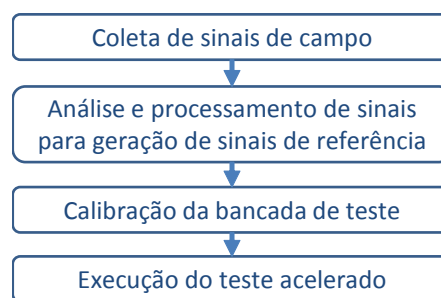
## Abstract

*Despite the availability of advanced computational tools for engineering analysis, physical durability tests still are a decisive step in structural mechanical design of new products. Due to significant costs and durations of these tests, qualified people work in order to reduce the test execution time based on field data compression. In this paper, compression procedure characteristics are presented and benefits and limitations of its employment are pointed out.*

## 1 Introdução

O projeto estrutural de novos produtos, notadamente o desenvolvimento de chassis ou subsistemas de veículos (automóveis, ônibus, caminhões) e máquinas automotoras (agrícolas, construção civil, etc.), passa por diversas etapas de validação, dentre as quais muitas são realizadas utilizando ferramentas computacionais de engenharia. Entretanto, devido à dificuldade em se modelar detalhes de fabricação (soldas, por exemplo) e suas consequências na vida em fadiga da estrutura do produto, recorre-se a execução de ensaios físicos laboratoriais de durabilidade (JOHANNESSON, SPECKERT, 2014; SHAFIULLAH, WU, 2013).

Devido aos consideráveis custos e durações desses ensaios, procura-se reduzir seus tempos de execução. Existem diferentes abordagens para se acelerar e executar ensaios de durabilidade (JOHANNESSON, SPECKERT, 2014; HALFPENNY, 2006), mas, de forma geral, são seguidas as etapas destacadas na **Figura 1**.



**Figura 1 – Sequência de etapas para a realização de ensaio de durabilidade acelerado.**

Primeiramente é realizada a coleta de sinais de campo, para que sejam levantados subsídios para a caracterização da solicitação mecânica da estrutura ou subsistema. Em geral, são medidas deformações em pontos críticos (previamente identificados por simulação computacional ou experiência) e acelerações em pontos estratégicos (extremidade de eixos, base de subsistemas, etc.). Nota-se que a coleta de sinais campo pode ser realizada em condições usuais de operação do produto ou em condições mais severas, como em uma pista de prova, em que se conheça a correspondência entre as vidas em fadiga de cada condição.

Em seguida, os sinais de campo são analisados e processados para geração de sinais referenciais, para calibração da bancada de ensaio. Dependendo da estratégia de ensaio utilizada, pode-se gerar desde sinais mais simples, como blocos de senos, a sinais mais complexos, que replicam situações mais significativas de campo. Tanto num caso quanto no outro, existe a possibilidade de se acelerar o ensaio pela amplificação do sinal de referência. Essa técnica permite alcançar grande fator de redução de tempo de ensaio, pois, devido à relação exponencial entre vida em fadiga e deformação, um ligeiro aumento no carregamento implica num grande aumento de dano na estrutura por intervalo de tempo. Entretanto, a amplificação de sinais deve ser utilizada com muita cautela, pois pode causar

deformações plásticas localizadas em regiões de concentração de tensão e distorcer os resultados de fadiga da estrutura (HALFPENNY, 2006; SHAFIULLAH, WU, 2013), além de não propiciar garantia de proporcionalidade de amplificação das solicitações em toda a estrutura, principalmente na existência de vibrações próximas a frequências de ressonância estruturais. A técnica utilizada neste artigo não se baseia na amplificação de sinais, mas na eliminação de trechos que causam pouco dano, como explicado a seguir.

Uma vez gerados os sinais de referência, parte-se para a calibração da bancada de ensaio. Nessa etapa, busca-se definir quais entradas devem ser impostas aos atuadores da bancada de forma a se reproduzir, nos sensores instalados na estrutura, os desejados sinais de referência. Nota-se que para isso a bancada de ensaio deve ser capaz de excitar a estrutura de modo apropriado. Podem ser suficientes bancadas mais simples, com um único atuador, como ilustra a **Figura 2**, utilizada na execução de teste de durabilidade de um cortador de pontas de uma colheitadeira de cana-de-açúcar, ou necessárias montagens mais complexas (HABTOUR et al., 2014), como a bancada de seis graus de liberdade ilustrada na **Figura 3**, utilizada no ensaio de durabilidade do chassi de uma colheitadeira de cana-de-açúcar. Ambos os ensaios foram desenvolvidos e executados no Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas (LEME) do IPT.



Figura 2 – Exemplo de bancada de um único atuador.



Figura 3 – Exemplo de bancada com seis atuadores.

Por fim, com a bancada de ensaio calibrada, pode-se executar o ensaio de durabilidade acelerado.

Nas próximas seções, apresenta-se o princípio do método de compactação de sinais e aplica-se esse método em caso real de sinais coletados em campo. Em sequência, são analisados os ganhos em redução de tempo de ensaio e limitações na representação do sinal de campo original.

## 2 Método de compactação de sinais

Durante a operação de veículos e máquinas automotoras é comum a ocorrência de eventos esporádicos que causam danos significativos a suas estruturas. Complementarmente, períodos longos de operação contínua podem causar relativamente pouco dano estrutural. Dessa forma, a essência do método de compactação de sinais é a eliminação de trechos dos sinais de campo em que a estrutura sofre pouco dano (HALFPENNY, 2006). Nota-se que o termo dano se refere à porção da vida em fadiga que já foi atingida por consequência de solicitações mecânicas variáveis no tempo. Baseando-se no modelo de Palmgren-Miner, pode-se calcular o dano utilizando-se a **Equação 1** (JOHANNESSON, SPECKERT, 2014), em que um valor maior ou igual a um significa falha por fadiga.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

Onde:

$D$  = dano

$N_i$  = número de ciclos em que ocorria a falha por fadiga do material sob um nível de solicitação  $S_i$

$n_i$  = número de ciclos já atingidos sob um nível de solicitação  $S_i$

Como usualmente possuem certo conteúdo em frequência e amplitudes variáveis no tempo, as solicitações mecânicas são melhor caracterizadas utilizando-se abordagens baseadas no método de *Rainflow* para contagem de ciclos e cálculo de dano (JOHANNESSON, SPECKERT, 2014; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 2011; SCHIJVE, 2010).

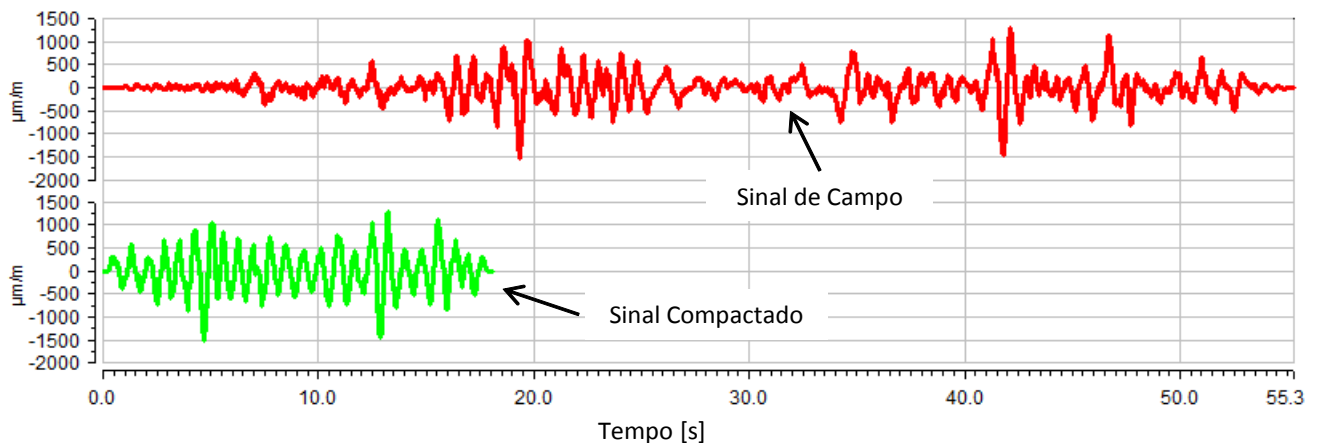
Após a eliminação dos trechos de pouco dano, é feita a junção dos trechos preservados, interpolando-se, de forma suave, seus instantes de início e término.

Assim, o algoritmo de compactação é composto pelas seguintes etapas:

- a. Divisão do sinal em trechos e cálculo de seus danos  $D_i$ ;
- b. Identificação de  $D_{\max}$  (máximo de  $D_i$ );
- c. Se  $\frac{D_i}{D_{\max}} \leq c$ , então elimina trecho (onde  $c$  é um limiar pré-definido); e
- d. Junção de trechos preservados.

Naturalmente, por ser constituído de trechos do sinal original, o sinal compactado sempre possui dano menor que o original. Mas, geralmente, a diminuição de duração é mais significativa que a diminuição de dano. Assim, obtém-se vantagem na utilização do sinal compactado.

No Sinal de Campo, de deformação, apresentado na parte superior da **Figura 4**, por exemplo, nota-se que há trechos com ciclos de pequena amplitude e, em instantes específicos, ocorrem ciclos de maiores amplitudes (e maior dano) sobrepostos a ciclos de menores amplitudes. Após a eliminação de trechos de pequeno dano e junção dos trechos preservados, obtém-se um Sinal Compactado como o apresentado na parte inferior da **Figura 4**.



**Figura 4 – Compactação por eliminação de trechos com pouco dano.**

Existem particularidades de implementação desse algoritmo que dependem de seus desenvolvedores. Dois softwares reconhecidos no mercado são o LMS Tecware da SIEMENS e o nCode da HBM. No software LMS Tecware, disponível no IPT e utilizado nos exemplos desse artigo, devem ser definidos parâmetros da curva de fadiga do material da estrutura sob análise (curva SN) e dois parâmetros principais para execução do algoritmo de compactação: a importância relativa entre danos de cada trecho (*Relative filter width*) e a duração da sobreposição na junção dos sinais preservados (*overlap for cut operation*). O primeiro parâmetro define, por meio de um valor percentual, o limiar para a eliminação de trechos de pequeno dano, com referência nos trechos de maior dano. Já o segundo define a duração da sobreposição necessária para se fazer uma transição suave entre dois trechos consecutivos que foram preservados no sinal. Quanto maior for a duração, mais suave se torna a transição. Porém, menor será a eficácia da compactação.

Além da aplicação para um único sinal, esse método pode ser aplicado para um conjunto de sinais diferentes de sensores instalados numa mesma estrutura. Neste caso, o algoritmo verifica se os danos são simultaneamente pequenos em todos os sinais para, então, eliminar trechos de mesma duração em todos os sinais. Dessa forma, preserva-se a fase entre os diversos sinais.

Os sinais compactados permanecem similares aos sinais originais quanto ao dano e também quanto ao seu conteúdo de frequência (HALFPENNY, 2006). A preservação do conteúdo de frequência é de fundamental importância, pois, nesses casos, a solicitação mecânica variável no tempo é consequência da vibração estrutural, que é fortemente dependente do conteúdo em frequência de suas fontes de excitação e das frequências naturais da estrutura. Para a avaliação do conteúdo em frequência dos sinais, recorre-se normalmente ao cálculo da densidade espectral de potência ou PSD do inglês *power spectrum density* (HABTOUR et al., 2014), que resulta em curvas da potência do sinal em função da frequência. Matematicamente podem ser estimadas pelo quadrado da magnitude da Transformada de Fourier, normalizada pela frequência (PRESS et al., 1992).

De forma geral, quanto mais intensa for a compactação (de acordo com os parâmetros do algoritmo), maior será a distorção do conteúdo de frequência do sinal, como será exemplificado a seguir.

### 3 Exemplo de aplicação do método de compactação em caso real

Para ilustrar os efeitos do método de compactação de sinais foram processados os sinais de deformação de três *strain gages* (GA, GB e GC) obtidos em três diferentes condições de operação de uma máquina agrícola (Pista I, Pista II e Pista III).

Para cada condição de operação, foi feita a compactação de cada sinal independentemente (apenas para demonstração das características do algoritmo) e a compactação conjunta dos três sinais (como deve ser efetivamente realizada nesse caso).

O parâmetro de importância relativa entre danos de cada trecho foi ajustado de forma a se obter sinais compactados com danos variando entre 60 % e 95 % dos danos dos sinais originais. O parâmetro de sobreposição na junção de sinais preservados foi mantido constante, igual a 0,2 s.

Nas **Figuras 5 a 7** podem ser observadas as durações dos sinais compactados em relação às durações dos sinais originais, em que a legenda *Gages* se refere à compactação conjunta dos sinais dos três *strain gages*.

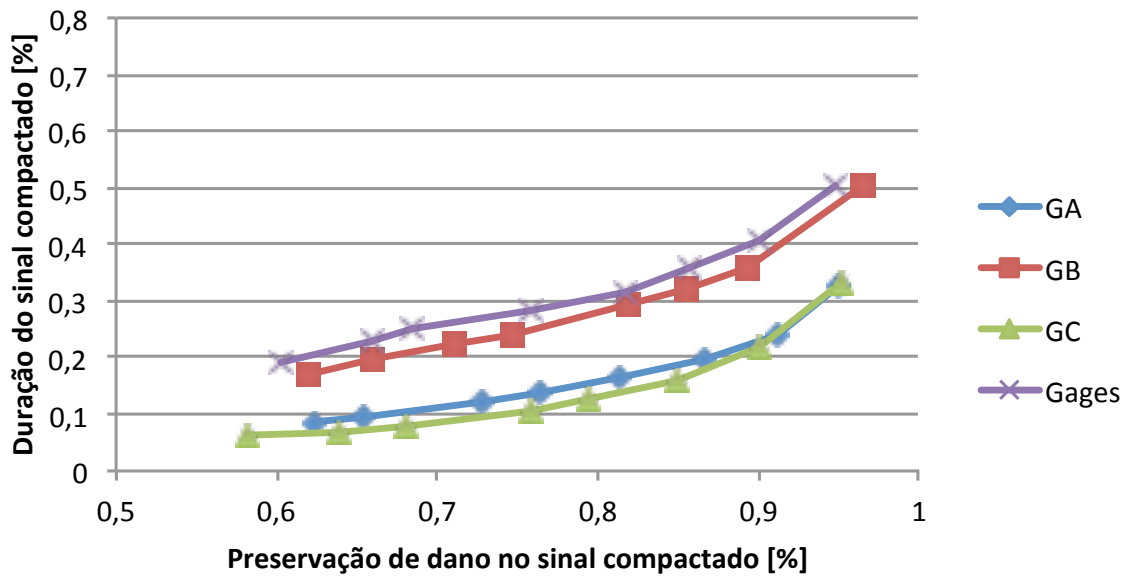


Figura 5 – Resultados de compactação para Pista I.

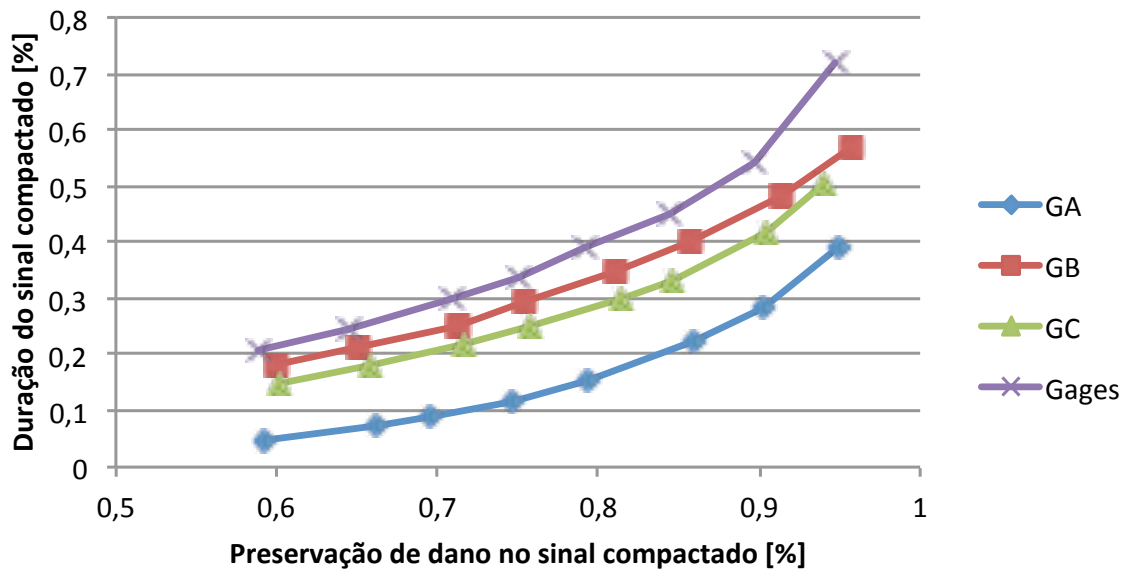


Figura 6 – Resultados de compactação para Pista II.



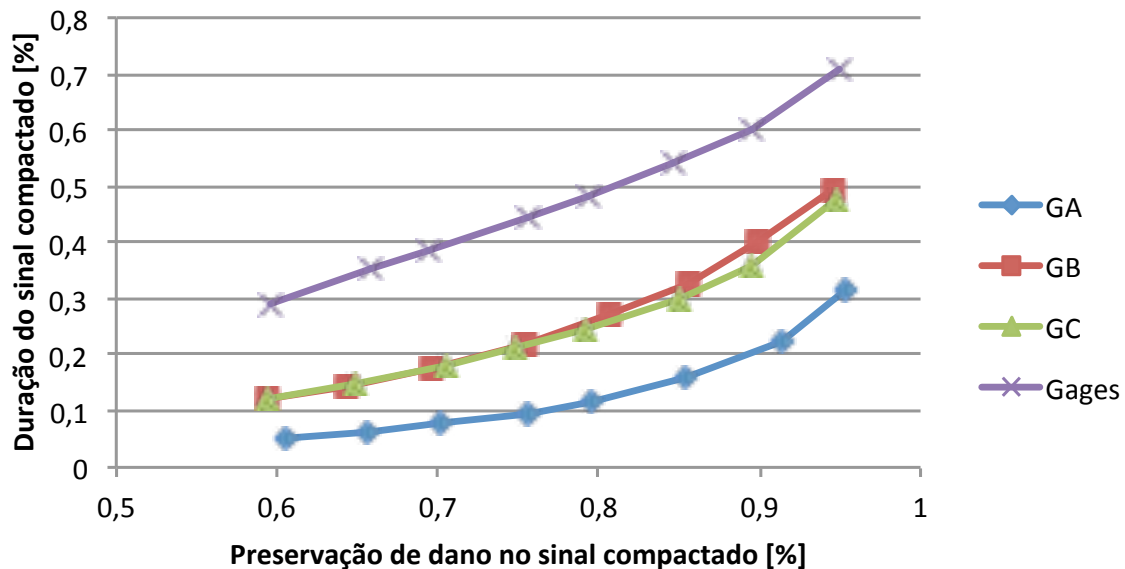


Figura 7 – Resultados de compactação para Pista III.

Observa-se, em todos os casos, que a diminuição nas durações dos sinais é mais significativa que a diminuição de seus danos. Notadamente para a Pista I, mesmo com a preservação de aproximadamente 95 % do dano do sinal original, a duração do sinal compactado é de aproximadamente 50 % da duração do sinal original, considerando-se os três *strain gages* em conjunto.

Nota-se ainda que a compactação conjunta dos sinais é sempre menos eficaz em diminuição da duração pois está limitada a simultaneidade de trechos de pequeno dano em todos os sinais em processamento. Nas Pistas I e II os resultados da compactação conjunta ficaram próximos aos resultados da compactação de um sinal isoladamente. Já na Pista III, diversos trechos de pequeno dano dos sinais não foram simultâneos, resultando numa compactação conjunta menos eficaz.

Considerando que o sinal compactado pode ser replicado tantas vezes quanto necessário para se atingir 100 % do dano do sinal original, são obtidos efetivamente os fatores de redução de tempo de ensaio apresentados na **Figura 8**, em que foram considerados apenas os exemplos de compactação conjunta dos três sensores instalados na estrutura.

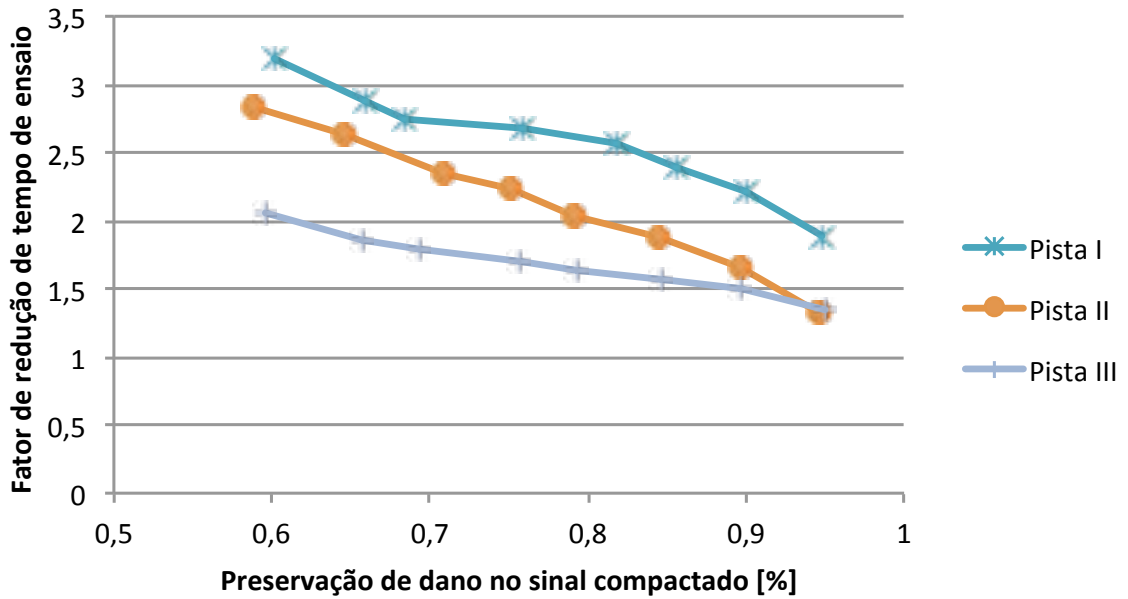


Figura 8 – Fator de redução de tempo de ensaio.

Observa-se que a compactação cada vez mais intensa leva a reduções significativas no tempo de ensaio. Entretanto, pode levar à distorção do sinal no domínio da frequência. Na Figura 9 são apresentadas as densidades espectrais de potência (PSD) do sinal original GA da Pista II e dos sinais compactados a 90 %, 80 %, 70 % e 60 % de preservação de dano.

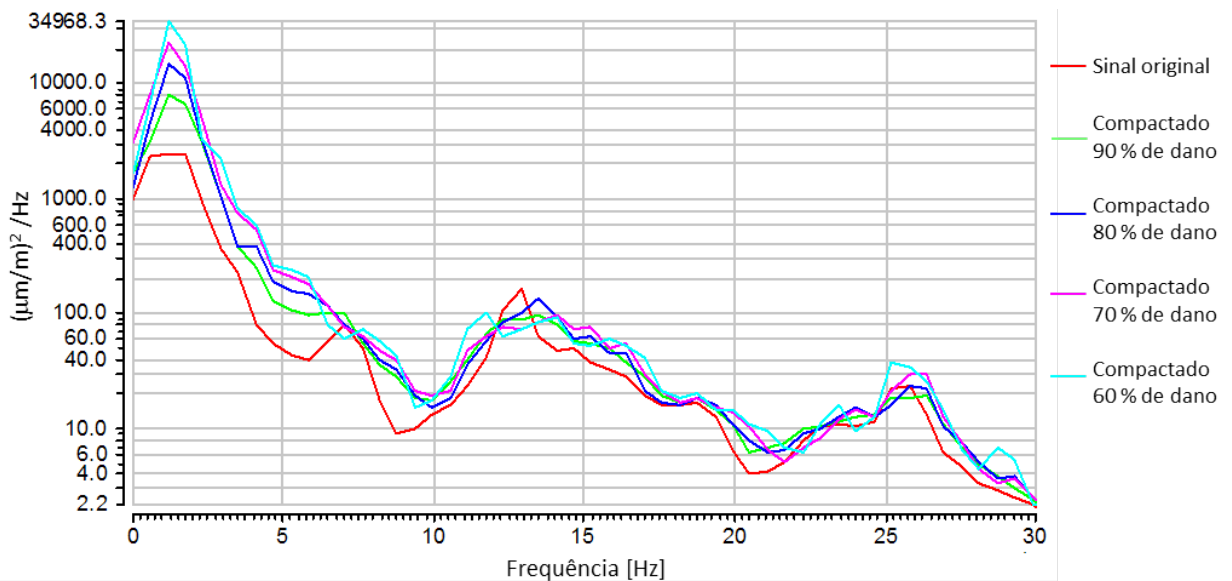


Figura 9 – Evolução da densidade espectral em função da compactação do sinal.

Pode ser observado que as densidades espectrais, de modo geral, foram preservadas. Em algumas frequências específicas, há atenuação ou mesmo amplificação das componentes do sinal. Particularmente neste exemplo, isso ocorre principalmente no primeiro pico, próximo a 2 Hz, em que as componentes do sinal são amplificadas com o aumento da compactação (ou diminuição da preservação de dano). Não há critérios bem estabelecidos na literatura para a aceitação ou rejeição dos sinais compactados em função dessas variações na densidade espectral. Assim, deve-se basear na experiência do profissional para tomada de decisão. Em geral, trabalhando-se na faixa de 70 % a 80 % de preservação de dano no sinal compactado, as alterações nas densidades espectrais podem ser toleradas. Nessas condições, seria obtido um fator de redução de tempo de ensaio entre duas e três vezes, o que é bastante significativo para ensaios de durabilidade que podem durar meses de execução. Dependendo das características do sinal, o fator de redução de tempo de ensaio pode chegar a cinco vezes ou mais (HALFPENNY, 2006).

Ressalta-se que os fatores de redução de tempo de ensaio, obtidos nos softwares de processamento de sinais, somente serão atingidos no ensaio de durabilidade se o sinal compactado for efetivamente reproduzido na bancada de ensaio, por meio da execução de sua calibração de modo adequado.

## 4 Conclusões

A compactação de sinais é vantajosa, pois permite a execução de ensaios de durabilidade de forma acelerada sem distorcer significativamente as características dos sinais, seja no domínio do tempo, seja no domínio da frequência.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem à CNHi pela autorização de publicação de fotos de ensaio de seus produtos e, em especial, aos seus funcionários Aristides Filho e Rodrigo Silva (*Field Data Acquisition*), Diego Hoepfner e João Paulo Conceição (*Virtual Simulations*), Sandro Moreira, Marcus Vinicius dos Santos, Luiz Leandro Junior e Rafael Gazeta (*Support Team*).

## 6 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **E1049-85**: standard practices for cycle counting in fatigue analysis. West Conshohocken: ASTM, 2011. 10 p.

HABTOUR, E.; CONNON, W.; POHLAND, M. F.; STANTON, S. C.; PAULUS, M.; DASGUPTA, A. Review of response and damage of linear and nonlinear systems under multiaxial vibration. **Shock and Vibration**, v. 2014, Article ID 294271, p. 1-21, 2014. Disponível em: <<http://downloads.hindawi.com/journals/sv/2014/294271.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2017.

HALFPENNY, A. Methods for accelerating dynamic durability tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN STRUCTURAL DYNAMICS, 9., 2006, Southampton. **Proceedings...** Southampton: 2006. Disponível em: <[http://www.ncode.com/fileadmin/mediapool/nCode/downloads/Whitepaper\\_nCode\\_MethodsforAcceleratingDynamicDurabilityTests\\_v2-Halfpenny.pdf](http://www.ncode.com/fileadmin/mediapool/nCode/downloads/Whitepaper_nCode_MethodsforAcceleratingDynamicDurabilityTests_v2-Halfpenny.pdf)>. Acesso em: 8 ago. 2017.

JOHANNESSON, P.; SPECKERT, M. **Guide to load analysis for durability in vehicle engineering**. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 434 p.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes in fortran 77: the art of scientific computing**. New York: Cambridge University Press, 1992. v. 1, 973 p. Disponível em: <[https://websites.pmc.ucsc.edu/~fnimmo/eart290c\\_17/NumericalRecipesinF77.pdf](https://websites.pmc.ucsc.edu/~fnimmo/eart290c_17/NumericalRecipesinF77.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2017.

SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials**. Delft: Springer, 2010. 621 p.

SHAFIULLAH, A. K. M., WU, C. Q. Generation and validation of loading profiles for highly accelerated durability tests of ground vehicle components. **Engineering Failure Analysis**, v. 33, p. 1-16, 2013.