

# COMPRESSÃO DO TEMPO EM ENSAIOS DE VIBRAÇÃO RANDÔMICA

*David Shire  
Pira International*

*Traduzido por Mauricio Bordin*

Este artigo resume a apresentação original feita no Fórum Embalagem ISTA Transporte, realizada em Orlando, Florida. Com a concordância da ISTA um documento detalhado com a análise matemática completa foi publicada na revista "Packaging Technology & Science" (ver citação no final do artigo). Uma cópia deste documento está disponível gratuitamente para qualquer um participar do TPF 2010 (para isso, contacte o escritório da ISTA).

## INTRODUÇÃO

A maioria dos ensaios de vibração aleatória é do tipo acelerado, ou seja o seu tempo de duração é comprimido e isso proporciona economia, conveniência e eficiência, especialmente para simular viagens mais longas. A idéia de compressão no tempo é baseada no conceito de que as vibrações de maior intensidade provocam respostas mais rapidamente. Aumentar a intensidade de ensaio reduz o seu tempo. Há, obviamente, um limite para a quantidade de aumento de intensidade a ser aplicado, caso contrário pode-se atingir situações que nunca ocorrem na distribuição real.

Intuitivamente faz sentido que uma vibração mais intensa irá causar uma resposta mais rápida e outros exemplos disto podem ser vistos na natureza, por exemplo:

- O costado será erodido mais rapidamente se expostos ao mar revolto (ondas do mar).
- Pessoas ouvindo música alta irão sofrer perda de audição mais rapidamente (ondas sonoras).
- Sua pele se bronzeará (ou se queimará) mais rapidamente em sol forte (ondas de luz).

Apesar de alguns padrões de ensaio não indicarem se a compressão do tempo é utilizada, aparentemente todas as normas ISTA (contendo ensaios de vibração randômica) e ASTM D4169 usam a compressão do tempo.

A compressão do tempo é baseada na Teoria de Basquin de fadiga e utiliza a equação:

$$\frac{t_t}{t_a} = \left( \frac{a_a}{a_t} \right)^k$$

onde:

$t_t$  = duração do ensaio

$t_a$  = duração da viagem real

$a_t$  = intensidade do ensaio (Grms)

$a_a$  = intensidade da viagem real (Grms)

$k$  = constante cujo valor depende do material em questão

Para ensaios em embalagens um valor tipicamente usado para k é 2 e a relação de compressão de tempo é limitada a 5. Assim, a equação pode ser simplificada para

$$a_t = 2,24a_a \text{ (onde } 2,24 = \sqrt{5}\text{)}$$

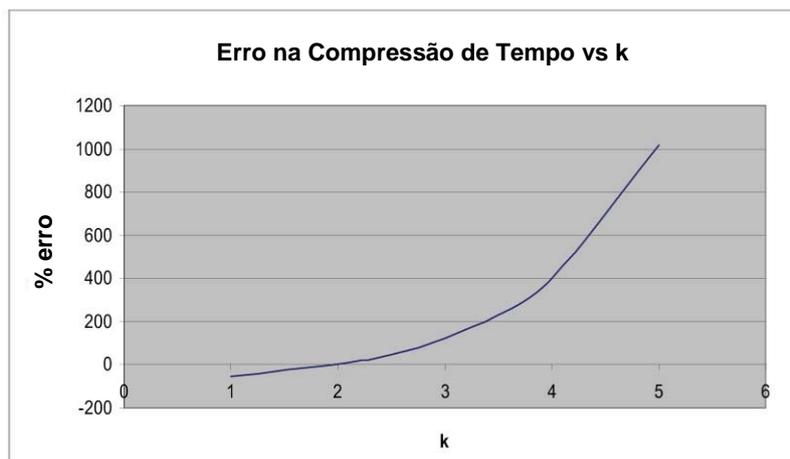
A Equação de Basquin descreve a taxa de desenvolvimento de fadiga (microfissuras) quando amostras de metal são sujeitas a ciclos de tensão alternada, dentro do seu limite elástico.

Muitos dos mecanismos de falha observados em embalagens não são baseados em fadiga e, muitas vezes, a resposta dos conjuntos de embalagens agrupados à vibração é não-linear. No entanto, podemos argumentar que as respostas são "semelhantes à fadiga" em que:

- A falha de vibração é progressiva / acumulativa.
- A falha de vibração se desenvolverá mais rapidamente quando em maior intensidade.

A fidelidade da equação de Basquin na descrição das respostas de embalagens à vibração e/ou fadiga não foi estudada em detalhe.

A constante k não é um valor absoluto (muda com o material e forma da amostra) e assim pode-se esperar que o valor de 2 (tipicamente utilizado para a compressão do tempo de ensaios de embalagem) não é um valor preciso para todos os ensaios. A equação de Basquin é uma equação exponencial de modo que se k tem um valor diferente de 2 o erro pode ser muito grande, como mostrado na figura 1.



**FIGURA 1.** Erro na compressão do tempo para k = valor diferente de 2 (em relação a uma compressão de 5 vezes usando k = 2)

Aqui temos algo preocupante. Por um lado, temos utilizado ensaios de tempo comprimido por muitos anos com poucos relatos de discrepâncias entre os ensaios de laboratório e o desempenho no campo. Por outro lado, não podemos esperar que k = 2 para todas as situações e não se sabe ao certo se a equação de Basquin é um bom descritor para os ensaios de embalagem.

O valor de k para os metais é tipicamente de 5 - 8 (ver, por exemplo, MIL-SPEC 810G). Entende-se que o valor para itens embalados será menos por causa do aumento de amortecimento e uma gama de 2-5 pode ser assumida (e 2 é a escolha mais conservadora, resultando em um nível mais alto de ensaio).

**TABELA 1.** Compressão do tempo de ensaio nas diferentes normas.

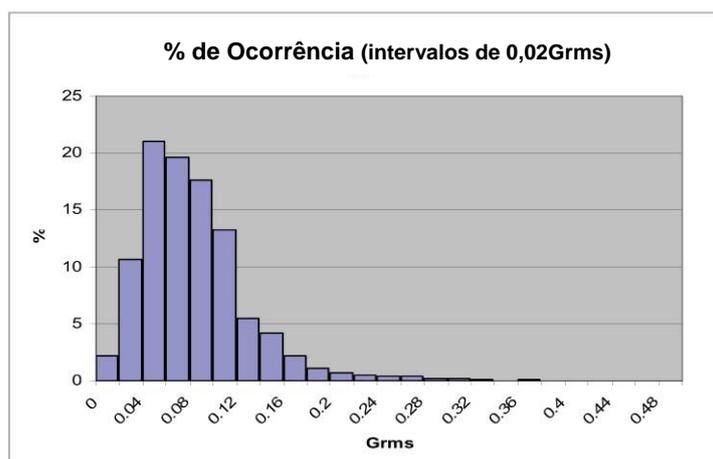
<b>ASTM D4728</b>	Use a compressão de tempo com cautela
<b>ASTM D4169; ISTA 3A 3F</b>	Nenhuma recomendação
<b>ISTA 3E 3H</b>	$t \text{ (horas)} = d \text{ (milhas)} / 5 *$
<b>ISTA 4AB</b>	A compressão do tempo é usada
<b>SRETS</b>	A compressão do tempo é usada com um valor de k=5

\*Equivale a uma compressão do tempo de 5x para uma velocidade de deslocamento médio de 60 mph.

## NÃO-ESTACIONARIEDADE

Tipicamente, a equação de compressão de tempo é aplicada ao valor de aceleração média eficaz (Grms) de um registo de viagem e usado para definir um nível único para o ensaio. Esta abordagem assume que a aceleração média eficaz (Grms) é uma boa representação da intensidade jornada.

Vibração real não tem um nível constante, mas varia ao longo do tempo (devido a alterações nas condições da estrada, a velocidade do veículo e do comportamento de condução). Em termos estatísticos isso é chamado de não-estacionariedade. Uma análise resumida da distribuição de intensidade de vibração pode ser apresentada como um gráfico de barras, mostrando o percentual de ocorrência vs o nível de aceleração média eficaz (Grms) (dados amostrados à taxa constante de tempo), como ilustrado na Figura 2.



**FIGURA 2.** Distribuição de intensidade de vibração; caminhão completamente carregado, com suspensão de feixe de molas, em estradas mistas.

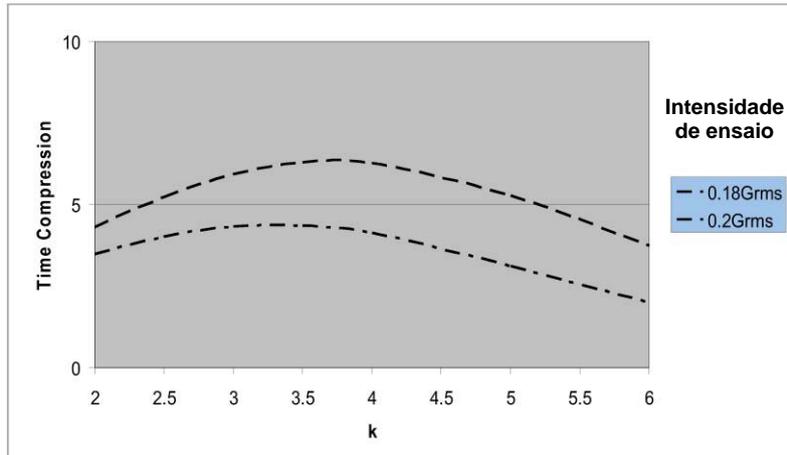
Embora difícil de se ver na Figura 2, os eventos de vibração registrados vão até 0,48 Grms. O valor de aceleração média eficaz (Grms) real para a viagem é 0,081 e o nível de compressão de tempo para o ensaio "normal" ( $x5$ ,  $k = 2$ ) é 0,181 Grms ( $0,081 \times \sqrt{5}$ ).

Se pensamos sobre o nível compressão de tempo de ensaio (0,181Grms) em relação à distribuição mostrada na Figura 2, um modelo mais elaborado de compressão do tempo emerge:

- Os eventos de vibração representados nas faixas de energia muito baixos sofrem compressão de tempo por mais de 5x.
- Os eventos de vibração representados nas faixas logo abaixo do nível do ensaio sofrem compressão de tempo por menos de 5x.
- Os eventos de vibração representados nas faixas acima do nível do ensaio são o "expandidos" no tempo (o nosso nível de ensaio é inferior a alguns dos eventos de vibração).
- Apenas os eventos de vibração nas 2 faixas ao redor de 0,08 Grms sofrem compressão do tempo de 5x – o que representa cerca de 36% da viagem.

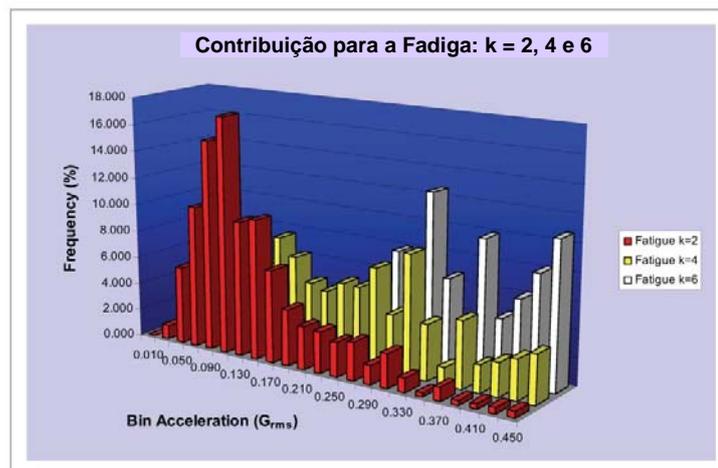
Isso fica ainda mais complicado, porque a vibração de baixa energia terá um efeito muito pequeno, a vibração de alta energia potencialmente poderia ter um efeito destrutivo, mas elas ocorrem por muito pouco tempo.

Pode-se calcular o histograma de compressão do tempo faixa a faixa para verificar se a não-estacionariedade afeta a sensibilidade para o valor de  $k$ . Isso é feito utilizando uma série de "mini" compressões de tempo, uma para cada faixa do histograma, todas somadas. É neste ponto onde a matemática e as planilhas de cálculo vêm nos resgatar. A Figura 3 mostra a compressão do tempo como uma função de  $k$  em dois níveis de ensaio, 0,18 e 0,2 Grms (calculado para os dados da viagem na Figura 2). Isso mostra erros consideravelmente reduzidos, quando comparados com a Figura 1, embora o nível de ensaio "normal" de 0,18 Grms dá uma compressão de tempo abaixo de 5x.



**FIGURA 3.** Compressão do tempo vs k calculado levando a não-estacionariedade em consideração.

Por que considerar a não-estacionariedade faz uma diferença tão dramática? Usando a equação de Basquin também podemos calcular a contribuição potencial de danos da vibração em cada nível. Isto depende da intensidade da vibração, a duração acumulada de vibração nesse nível e da constante k. A Figura 4 mostra um gráfico de barras para contribuição danos pela intensidade de vibração para três valores de k (calculado para os dados de viagem na Figura 2).



**FIGURA 4.** Contribuição para a fadiga por intensidade de vibração calculada para diferentes valores de k (mesmo viagem ilustrada na Figura 2).

Se  $k = 2$  a maior parte dos danos é proveniente dos eventos de baixa-média energia.

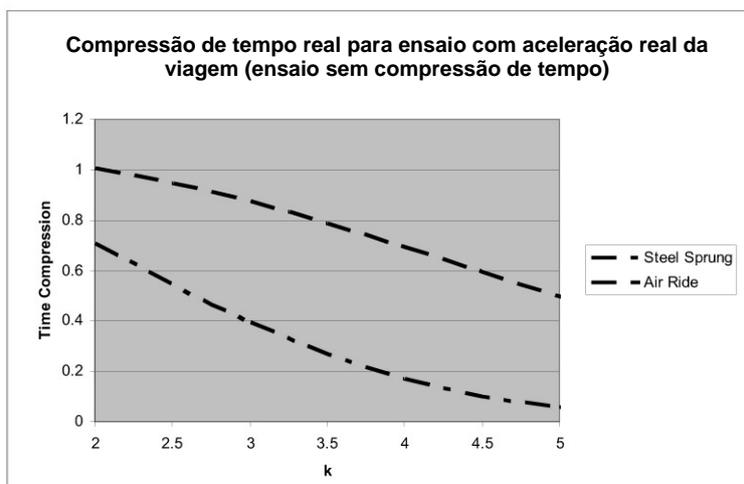
Se  $k = 4$  os danos se espalham de forma bastante equilibrada em todas as faixas de energia.

Se  $k = 6$  os eventos de alta energia causam mais danos, apesar de serem apenas uma pequena componente de toda a viagem.

Daqui decorre que a nossa compressão de tempo de ensaio "normal" (0,181 Grms) situa-se acima da maior parte da vibração prejudicial se  $k = 2$ , mas fica abaixo da vibração mais prejudicial se  $k = 6$ . No entanto, se  $k = 6$ , o grau de compressão do tempo dos eventos mais baixos é muito mais elevada do que se  $k = 2$ . Por acaso esses dois efeitos se compensam um ao outro.

A compensação não é perfeita e depende do espalhamento da distribuição de intensidade de vibração. A mesma análise para uma viagem em um caminhão com suspensão a ar (onde há menos eventos de alta energia acima do nível "normal") mostra maiores erros à medida que aumenta o valor de k, embora os erros não sejam ainda tão grandes como na Figura 1. Reduzindo a compressão do tempo para cerca de x2, minimiza-se o erro potencial.

Alguns laboratórios fazem os ensaios na aceleração média eficaz Grms para evitar os possíveis erros causados pela compressão do tempo. Se usamos a equação de Basquin para relacionar todos as faixas do histograma para o nível de ensaio Grms, este mostra um risco de ensaio subestimado à medida que o valor de  $k$  aumenta, como mostrado na Figura 5.



**FIGURA 5.** Compressão de tempo quando ensaiado na aceleração média eficaz real (Grms).

Outros laboratórios utilizam níveis de ensaio divididos ou modulados para refletir melhor a não-estacionariedade das viagens registradas. Aqui a divisão do nível de ensaio irá reduzir o espalhamento de níveis de vibração em torno de cada nível de ensaio e assim aumentar a sensibilidade a  $k$  para ensaios com tempo comprimidos.

Concluindo:

- O efeito da não-estacionariedade nos registros de vibração da viagem reduz drasticamente a sensibilidade para o valor assumido do  $k$  nos ensaios com compressão de tempo. Isto deve ser a razão pela qual a maioria dos laboratórios está satisfeita com os ensaios com compressão de tempo.
- Os testes de nível único são menos sensíveis ao valor de  $k$  quando o tempo é comprimido: ensaios com tempo não-comprimido de nível único tendem a ensaios subestimados.
- Ensaios com níveis divididos e/ou modulados são os melhores ensaios quando não se usa compressão de tempo: quando o tempo é comprimido os ensaios de níveis divididos são sensíveis ao valor real de  $k$ .

## TRABALHOS FUTUROS

Há um considerável debate na comunidade de pesquisa e ensaios de embalagens sobre a validade dos ensaios de nível único e ensaios de tempo comprimido. A análise acima mostra por que a experiência indica que os ensaios de nível único com tempo comprimido dão um resultado melhor do que poderia ser esperado quando comparado com os resultados de viagens reais.

O grupo de pesquisa trabalhando em vibração do IAPRI (Associação Internacional de Embalagem Institutos de Pesquisa) concluiu que havia uma necessidade de comparar métodos diferentes de vibração por estudos de correlações e pelo desenvolvimento de técnicas para quantificar a resposta a entradas de vibração.

O trabalho aqui relatado mostra a necessidade de compreender o quão bem respostas da embalagem em vibração pode ser descrita pela equação de Basquin e quais os valores de  $k$  se aplicam a respostas reais.

O PIRA está patrocinando um estudante de PhD da Universidade de Bath (no Reino Unido) e realizando pesquisa em seus próprios laboratórios para avaliar as relações entre os diferentes métodos de ensaio e simulações reais de viagem, para fazer estudos de correlações das amostras e medir a resposta de vibração que permita uma melhor aplicabilidade da equação de Basquin. Nós encorajamos a participação da indústria e teremos prazer em discutir nosso trabalho com as empresas interessadas.

## Referência

On the time compression (test acceleration) of broadband random vibration tests; David Shires; Packaging Technology and Science published online: 17 SEP 2010, DOI: 10.1002/pts.915