

EQUIVALÊNCIA DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO

Quantas horas de ensaio equivalem a quantos quilômetros de transporte?

*Tiago B. H. Dantas**

** tradução adaptada do artigo "Vibration testing equivalence", de William Kipp, originalmente apresentado na ISTA Con 2000 e disponível no site www.ista.org*

Quanto tempo deve durar um ensaio de vibração para reproduzir uma determinada quilometragem percorrida no transporte real? Uma questão simples, mas infelizmente a resposta não é simples nem direta. Este artigo examina os fatores envolvidos na tentativa de se obter tal equivalência, explica as metodologias por trás de uma abordagem aceita e demonstrada, e discute a questão da simulação de vibração acelerada (em relação ao tempo) em detalhes.

Ensaio e transporte

A fim de adequadamente iniciarmos a tratar da questão da equivalência do ensaio de vibração, precisamos ser específicos quanto aos tipos de ensaios e tipos e condições de transporte.

Ensaio de vibração

Há três categorias de ensaios comumente utilizados na área de embalagens para transporte. A primeira envolve o ensaio com deslocamento fixo, também conhecido como choque repetitivo ou "bounce test", de acordo com a ASTM D 999, métodos A1 ou A2¹, ou similares. Neste ensaio, a amostra é colocada em um equipamento que se move com um deslocamento de 25 mm, em movimento linear ou circular. O ensaio é usualmente conduzido em uma frequência (tipicamente por volta de 4,5 Hz) na qual a amostra se desprende momentaneamente da superfície do equipamento, sendo tal desprendimento evidenciado pela possibilidade de se inserir uma fina chapa (com 1 ou 2 mm de espessura) sob a amostra. Tecnicamente isto não se trata de vibração; o movimento causa um pequeno choque ou salto ("bounce") a cada contato da amostra com o equipamento. O ensaio não é uma simulação do transporte real – embora estes choques possam acontecer com as embalagens nos veículos de transporte, isso não ocorre com frequência e amplitude constantes.

A segunda categoria se refere ao ensaio senoidal, de acordo com os métodos B e C da ASTM D 999, ou similares. Neste caso, a mesa de vibração reproduz um movimento senoidal suave, com frequência e aceleração independentemente variáveis e controláveis, respeitando-se os limites do equipamento. Subcategorias deste são os ensaios de varredura ("sweep test"), no qual a frequência varia a uma taxa constante, e ensaios em frequência fixa ("dwell test"), nos quais, além da frequência, a amplitude de vibração também é fixa. Em algumas especificações, todos os requisitos de vibração são atendidos por uma ou várias varreduras senoidais. Mas no caso de embalagens para transporte, os ensaios de varredura são tipicamente utilizados para a determinação das frequências de ressonância (frequências naturais) no produto ou no sistema produto-embalagem, e então os ensaios em frequência fixa são utilizados para avaliar o potencial de danos em cada frequência de ressonância. Estes ensaios também não são simulações do transporte real – os veículos de transporte não vibram em um movimento senoidal suave.

A terceira categoria de ensaio se refere à vibração randômica (ou aleatória), de acordo com a ASTM D 4728 ou similar. A mesa de vibração se move em uma mistura complexa, em constante alteração, de frequências e amplitudes, geralmente similar ao modo como os veículos de transporte se comportam na realidade. Como resultado, estes ensaios podem quase simular as condições reais de transporte e distribuição. A vibração randômica é tipicamente descrita por gráficos de densidade espectral de potência (PSD, do inglês "power spectral density") – gráficos que representam a intensidade de aceleração "média" no domínio da

freqüência (PSD vs. freqüência²). Diferentes condições e veículos de transporte podem ser relacionados com diferentes formas e amplitudes de PSD.

A vibração randômica ainda pode ser dividida em duas: normalizada e focada. O ensaio dito normalizado segue um PSD definido em uma determinada norma e é por excelência geral e se aplica a uma extensa gama de produtos e veículos. Já o ensaio dito focado envolve o levantamento de um conjunto específico de fatores, tais como carga, veículo, trajeto e uma viagem típica para a definição de um PSD específico, além de comparações entre o transporte real e ensaios em laboratório para a definição do nível de severidade a ser aplicado ao ensaio. Dessa forma o ensaio de vibração passa a ser específico para a situação estudada.

Apresentadas estas três categorias de ensaio, muito diferentes entre si, a questão não pode simplesmente ser iniciada com “Quantas horas de ensaio...”, mas se deve perguntar quantas horas de qual categoria de ensaio, bem como seus parâmetros específicos.

Tipos e condições de transporte

Existem quatro meios básicos de transporte: rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo. E dentro de cada um podem existir inúmeras variáveis – tipos e subtipos de veículos; capacidade de carga e configuração, condições de trânsito (rodovia, trajeto, turbulência, condição do mar) etc. O resultado é um quase infinito número de combinações. Um caminhão com feixe de molas, viajando por rodovias acidentadas, pode produzir níveis de vibração muito altos mesmo que percorra poucos quilômetros em um período de tempo. Neste mesmo período, um avião a jato pode produzir vibrações muito baixas, mas viajar uma grande distância. Qualquer tentativa para relacionar o tempo de ensaio em laboratório com a distância de transporte deve considerar as variáveis e combinações.

Então, a pergunta não pode simplesmente terminar com “... quantos quilômetros de transporte?”, mas deve especificar o modal e as condições a serem simulados.

Equivalência entre ensaios em laboratórios e transporte

Uma vez especificado adequadamente o ensaio a ser realizado e o tipo de transporte a ser simulado, então podemos focar a questão da equivalência.

Ensaio de choque repetitivo

Historicamente, a equivalência deste ensaio ao transporte real tem sido objeto de reclamações. Ocasionalmente ainda se ouve o velho contra-senso “uma hora de ensaio reproduz mil quilômetros”, mas não existem pesquisas que corroborem isto de forma geral. Pode haver caso onde os ensaios de choque repetitivo reproduzam o mesmo nível de danos ou desempenho que o observado no transporte real. Certamente isto ocorreu para conjuntos produto-embalagem particulares, tempos de ensaio específicos e determinados modais e distâncias percorridas. Mas uma correlação limitada não deve ser traduzida como uma equivalência generalizada. Os usuários devem ser extremamente cuidadosos ao estender resultados específicos a situações generalizadas de transporte e conjuntos produto-embalagem.

O critério atual determina que o choque repetitivo não “simula situações do ambiente”³, isto é, não pode e não deve ser relacionado a modais ou distâncias de transporte específicos. Isto não quer dizer que os ensaios são inúteis, apenas que estes não têm por objetivo a simulação e, portanto, não podem representar adequadamente o transporte real.

Ensaio senoidais

Os ensaios senoidais também não são simulações do ambiente, portanto também não podem e não devem ser relacionados a modais e distâncias de transporte específicos. Os tempos recomendados em freqüência fixa (“dwell”) pela ASTM D 4169 e ASTM D 999 (5 a 15 minutos) não têm por objetivo estarem relacionados ao transporte real, apenas determinam se uma ressonância identificada é crítica, isto é, pode resultar em dano.

Assim como no ensaio de choque repetitivo, uma exceção possível seria no caso de um sistema produto-embalagem específico, bem como modais e condições de transporte específicas, onde o desempenho no transporte real é conhecido. Se “x” minutos de um ensaio senoidal em frequência fixa, aplicado a um conjunto produto-embalagem específico, criaram consistentemente o mesmo dano ou desempenho que “y” quilômetros do transporte real específico, ambos podem ser considerados equivalentes neste caso. Mas, como citado anteriormente, o usuário deve ser muito cauteloso ao estender esta conclusão a qualquer outro conjunto produto-embalagem e situação de transporte.

Vibração randômica

Os ensaios de vibração randômica têm por objetivo a simulação do ambiente de transporte. Esta é a única categoria de ensaio de vibração comumente utilizada na área de embalagem para transporte que pode ser realisticamente relacionada ao transporte real. Assumindo-se que o perfil PSD e sua intensidade são uma representação aceitável e exata do modal e da condição de transporte, então uma hora do ensaio equivaleria a uma hora do meio de transporte representado. Deve-se notar que isto não é uma correlação “tempo vs. quilometragem”, é uma correlação “tempo vs. tempo”. Porém, uma vez que o tempo de transporte é a duração do real “movimento” (não o tempo total da viagem), uma relação com a distância pode ser estabelecida. Por exemplo, se o veículo manteve uma velocidade constante de 100 km/h e durante este percurso obteve-se um PSD com perfil e intensidade reproduzidos em laboratório, então 1 hora de ensaio seria equivalente a 100 km.

Ensaio de vibração acelerado

Assim, um ensaio de vibração randômica em laboratório, configurado adequadamente, pode ser relacionado ao transporte real. Mas a idéia de um ensaio de 1 hora para simular apenas 100 km não é das mais interessantes. Aqui entra o conceito do ensaio de vibração acelerado.

Em uma monografia de 1971 sobre choque e vibração, Curtis, Tinling e Abstein da Hughes Aircraft Company postularam uma metodologia para os ensaios de vibração acelerados⁴. Em 1993, Dennis Young (então Diretor Técnico da ISTA) fez referência a este trabalho em seu artigo “Simulação Focada”⁵, onde apresentou uma fórmula para se calcular o aumento da aceleração de vibração correspondente à diminuição do tempo de ensaio. A fórmula é:

$$I_T = I_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_T}}$$

onde:

I_T = aceleração rms (“root mean square”) do ensaio, ou seja, a intensidade global do perfil de vibração (PSD);

I_0 = aceleração original (intensidade global do perfil original);

T_0 = duração total do perfil original;

T_T = tempo de ensaio

Um fator de compressão não maior que 5:1 é recomendado para preservar a validade do ensaio. Baseando-se no fator T_0/T_T definido, uma nova intensidade (aceleração) é calculada para o ensaio. A forma do perfil permanece inalterada; este é simplesmente trasladado para cima no gráfico de PSD para aumentar sua intensidade.

Assim, em nosso exemplo “1 hora = 100 quilômetros”, se multiplicarmos a intensidade do ensaio (aceleração global rms) por um fator de $\sqrt{5}$, podemos acelerar o ensaio (redução do tempo) por um fator de 5, chegando a “1 hora = 500 quilômetros”.

ASTM D4169 rodoviário, nível de segurança II

O perfil de vibração rodoviária randômica sugerido na ASTM D 4169, nível de segurança II, talvez seja o ensaio de simulação geral de vibração mais amplamente utilizado no mundo. Foi apresentado em livros por vários anos, utilizado por centenas de organizações na execução de dezenas de milhares de ensaios, e foi útil na solução e prevenção de inúmeros problemas de transporte. Encontra-se um pouco desatualizado e há espectros mais atualizados disponíveis³, porém funciona adequadamente em muitos casos.

O nível de segurança II daquela norma estabelece uma intensidade global de 0,52 G rms, e é especificado para um total de 180 minutos (3 horas). Pode-se equipará-lo a uma certa quilometragem com uma análise racional que faça sentido e explique sua efetividade? A ASTM não menciona qualquer tipo de equivalência, e o que segue se refere estritamente à experiência e opinião do autor. Mas parece ter um mérito aceitável, baseando-se em duas informações principais:

1. Nos últimos seis anos, participamos e tivemos acesso a dados de um considerável número de medições de vibração em campo. Certamente existem variações tanto no perfil quanto na intensidade das vibrações, mas para carretas com suspensão de feixe de mola, a aceleração global rms fica na faixa de 0,2 a 0,3 G, com “média” próxima a 0,25 G.
2. Na Conferência da ISTA em 1996, o palestrante principal foi Donald Bowman, da “American Trucking Associations”⁶. Durante sua apresentação, mencionou que o percurso “médio” em transportes de longa distância nos Estados Unidos era de 1.250 km. Não foi mencionada a velocidade “média”, mas ao considerarmos esta como 100 km/h, a duração média da viagem será 12,5 horas.

Se inserirmos estas informações na fórmula para “ensaio de vibração acelerado” apresentada, com 0,25 G para I_0 , 12,5 horas para T_0 e 3 horas para T_T (a partir da ASTM D4169), temos:

$$I_T = 0,25\sqrt{12,5/3} \text{ ou } I_T = 0,51G$$

Este valor é quase o mesmo que a aceleração rms da ASTM D4169, perfil rodoviário, nível de segurança II. Isto pode levar à conclusão de que o ensaio simula uma viagem com “média” de 12,5 horas ou aproximadamente 1.250 km. Uma vez que isto certamente se baseia em um número de suposições discutíveis, os números parecem razoáveis e o método com que são obtidos parece sensato.

Algumas advertências: primeiro, se isto é totalmente válido, provavelmente se aplique apenas a Estados Unidos, Europa Ocidental e caminhões e rodovias similares. Sabemos que em muitas regiões do mundo as rodovias e os veículos podem ser significativamente diferentes, o que pode afetar muito qualquer equivalência. Segundo, esta avaliação foca apenas os níveis de aceleração rms e ignora o formato do perfil, o que pode ter grande efeito nos resultados do ensaio. O espectro na D4169 necessita ser atualizado, sendo que espectros mais realísticos estão disponíveis⁵.

Sentimo-nos confortáveis em acreditar que o perfil rodoviário da ASTM D 4169, nível de segurança II, é uma simulação aceitável de um transporte de 1.250 km, em caminhão com suspensão de feixe de molas, em estradas americanas. A utilização de um espectro mais moderno poderia provavelmente melhorar a simulação. No momento não temos bases similares para opinar a respeito de outros perfis e níveis da D4169.

Como obter equivalência no ensaio de vibração

A discussão acima ilustra um método “reverso” de cálculo: inicia-se com um ensaio e calcula-se sua equivalência em relação à distância percorrida. Geralmente se procura criar um ensaio realístico em laboratório, a partir de condições e distâncias de transporte estimadas ou conhecidas. Neste caso, os passos a serem seguidos são:

1. Selecionar ou determinar um ou mais perfis de PSD e intensidades que representem exata e racionalmente o modal e as condições de transporte a serem simuladas. Esta não é uma questão trivial. As recomendações em especificações das indústrias usualmente apresentam ensaios acelerados, mas não informam os fatores de aceleração. Mesmo quando trabalhamos com os dados básicos (resultantes das medições em campo), estes devem ser cuidadosamente examinados com relação às suas origens e

aplicabilidades a qualquer situação de ensaio ou simulação. Geralmente a melhor abordagem é a medição de transportes reais que se apliquem diretamente à situação em questão, utilizando-se registradores de condições (vibração, choque, temperatura e umidade relativa) de transporte disponíveis no mercado. Além disso, deve-se estar atento de que os transportes podem englobar diferentes condições de rodovias, bem como outros parâmetros; se este for o caso, os PSD's e os ensaios devem ser alterados, para que se mantenha a correlação apropriada. Para a melhor exatidão e equivalência, é óbvio que o ensaio global deve corresponder às condições reais em campo. Se esta correlação se degrada, isso também ocorrerá com a equivalência.

2. Estimar ou determinar a duração da viagem (ou a duração dos trechos por condição) a ser simulada. Se forem feitas medições reais, esta informação pode ser obtida diretamente, como o período total de deslocamento. Estimar ou equiparar tais durações às distâncias.
3. Utilizar a fórmula do ensaio de vibração acelerado para comprimir o tempo (e distância) e calcular a intensidade do ensaio. Recomenda-se uma compressão do tempo não superior a 5:1. Caso se tenha interesse em simular múltiplos trechos por condição, um ensaio separado deve ser configurado para cada trecho.
4. O ensaio (ou ensaios) resultante, com tempo comprimido e aceleração aumentada, será equivalente às distâncias do passo 2.

Exemplo: assumindo um perfil PSD com aceleração global rms de 0,15 G que represente com exatidão um trecho de uma determinada viagem. Pretende-se simular 5 horas daquela condição (que representaria uma distância de 400 km) no laboratório. Utilizando-se a compressão de tempo máxima de 5:1, $\sqrt{T_0/T_T} = \sqrt{5/1} = 2,24$. Multiplicando-se 0,15 G por 2,24 temos que a intensidade do ensaio (com o mesmo perfil de vibração) será de 0,336 G. Assim, uma hora deste ensaio com 0,336 G seria equivalente a 400 km de uma determinada condição de transporte.

A melhor demonstração de equivalência

Isto foi mencionado anteriormente, mas garante uma clara explicação adicional: a melhor demonstração de que um ensaio ou uma série de ensaios em laboratório é equivalente a alguma condição de transporte é a correlação de dano ou desempenho. Se um ensaio razoável reproduz consistentemente os danos ou resultados similares aos obtidos na experiência em campo, provavelmente se trata de um bom ensaio – pelo menos para aquelas situações particulares. Muitas vezes ouvimos: “Não consigo entender; passamos por todos os ensaios em laboratório, mas ainda temos problemas em campo”. Então os ensaios estão errados! O oposto também acontece: “Não temos qualquer problema no transporte, mas não passamos nos ensaios em laboratório”. Então os ensaios estão errados!

O trabalho do engenheiro de embalagens de transporte não acaba simplesmente com o desenho do produto e da embalagem e com a finalização dos ensaios em laboratório. Devem-se obter dados de desempenho em campo, sendo estes cuidadosamente estudados para se obter a correlação adequada, fazendo-se ajustes quando necessário.

Conclusões

Quantas horas equivalem a quantos quilômetros? A resposta curta é que os ensaios de choque repetitivo e senoidais, embora ainda amplamente utilizados e úteis para outros propósitos, não são simulações do ambiente de transporte; portanto, não podem ser considerados “equivalentes” aos tempos e distâncias do transporte real. Somente um ensaio de vibração randômica realmente “representativo”, adequadamente configurado, pode ser considerado de alguma maneira “equivalente”. Uma metodologia estabelecida para se acelerar um ensaio de vibração randômica pode ser utilizada para se reduzir o tempo de ensaio aumentando-se adequadamente a intensidade de aplicação do ensaio.

Referências

ASTM INTERNATIONAL. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken, PA, c2009. v.15.10, 1141 p.

KIPP, W. I. PSD and SRS in simple terms. In: ISTA CON 98, 1998, Orlando, FL. **Proceedings...** East Lansing, MI: International Safe Transit Association, 1998. Disponível em: <<http://www.ista.org>>.

ISTA Resource Book. Disponível em: <<http://www.ista.org>>.

CURTIS, A. J.; TINLING, N.G.; ABSTEIN, H. T. JR. **Selection and performance of vibration tests**. Arvonía, VA: The Shock and Vibration Information and Analysis Center, 1971. Disponível em: <<http://www.saviac.org>>.

YOUNG, Dennis E. **Focused Simulation**. 1993. Disponível em: <www.ista.org>.

AMERICAN TRUCKING ASSOCIATIONS. Disponível em: <<http://www.truckline.com>>.