

# TÉCNICAS PARA REDUZIR O TEMPO DE SIMULAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM LABORATÓRIO

*Kyle Dunno*

*Sealed Air Corporation, Especialista de Aplicações Sênior*

*Texto traduzido por Mauricio Bordin*

*Pesquisador Científico do Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA/ITAL*

*O seguinte trabalho foi apresentado no Fórum TransPack 2014 da ISTA, referente a pesquisa feita enquanto Kyle estava na Universidade de Clemson.*

Vibração é o risco mais comum que ocorre a todos os produtos embalados quando eles enfrentam qualquer ciclo de distribuição. Uma vez que a vibração ocorre em todos os produtos embalados, é necessário avaliá-los a fim de determinar se a embalagem e o produto serão capazes de sobreviver e serem funcionais, no final de um dado transporte. Outros riscos também são importantes, tais como choques, compressão e exposição ambiental, mas o risco a que todos os produtos embalados irão encontrar é a vibração (McKinley, 2004).

O objetivo do ensaio de vibração em laboratório é o de replicar o mais próximo possível, a vibração real ocorrida no ambiente de distribuição. Idealmente, os ensaios de laboratório querem realizar isto no mais curto espaço de tempo possível. Reproduzir transportes com durações menores, apresenta bons resultados em laboratório, mas e se a viagem de interesse demora 15 ou 20 horas? Para a maioria dos laboratórios de ensaio, realizar um ensaio de vibração de 15 ou 20 horas não é muito prático. Para estes casos, a redução na duração do ensaio é uma opção atraente. Este artigo incide sobre os seguintes métodos para redução do tempo de ensaio de vibração: Compressão do Tempo (Aceleração), Análise de Probabilidade e Métodos Não-estacionários e Não-gaussianos. Estas técnicas foram introduzidas em Fóruns TransPack da ISTA do passado como tendo a capacidade de correlacionar com precisão a vibração que ocorre durante os transportes reais (Dunno, 2013). Este projeto utilizou-se de produtos embalados para determinar se estas técnicas podem ser empregadas para reduzir adequadamente o tempo de ensaio em vibração, mantendo a reprodução dos resultados reais de campo.

## Vibração com Compressão do Tempo (Acelerado)

Muitos dos perfis de vibração publicados descritos pela ASTM e pela ISTA são comprimidos no tempo, a fim de diminuir a duração total do ensaio de laboratório (ASTM, 2009 e ISTA, 2014). Como regra geral, o perfil não deve exceder uma compressão de mais de 5:1; onde cinco é o número de horas de vibração em caminhões reais e um é o número de horas de ensaio de vibração em laboratório. A equação comumente utilizada (equação 1) mostra o método para a aceleração, ou a compressão do tempo de um ensaio de vibração. Quando se comprime o tempo de um perfil a forma do mesmo permanece inalterada; o que acontece é um aumento na intensidade global (Grms) para permitir a compressão do tempo de ensaio (Kipp, 2008).

$$\text{Equação 1: } I_T = I_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_T}}$$

Onde  $I_T$  = Intensidade global do perfil para ensaio em laboratório (espresso em Grms)

$I_0$  = Intensidade do perfil de transporte medido em campo (em Grms)

$T_0$  = Tempo de duração da vibração em transporte real

$T_T$  = Tempo de ensaio

## Análise de Probabilidade

A técnica de Análise de Probabilidade divide os dados de vibração em diferentes níveis com base na probabilidade de ocorrência. Os níveis analisados e utilizados por Root foram os seguintes: 50%, 80%, 90%, 95%, 99%, e 100% (Root, 2009). Os diferentes percentuais produzem perfis de PSD individuais que são executados em uma sequência para avaliar os dados de vibração gravados. Os perfis de PSD gerados não representam qualquer evento real, mas sim são uma representação estatística da energia total que ocorreu dentro desse intervalo percentil. Os perfis de PSD individuais são executados durante períodos de tempo variáveis, que dependem do número de eventos que ocorrem para esse intervalo percentual, e a duração de cada evento gravado.

## Síntese de não-estacionário e não-Gaussiano

Vibração randômica estacionária é definida por propriedades estatísticas que não mudam com o tempo. No ambiente de distribuição, tal condição pode ser aproximada por um caminhão viajando longas distâncias sobre o mesmo tipo de estrada com a mesma velocidade (Kipp, 2008). Na realidade, durante o transporte rodoviário as vibrações estão constantemente mudando, devido a fatores, tais como a superfície da estrada e a velocidade do veículo. Estes fatores irão variar a intensidade das vibrações observadas pelo veículo. Uma vez que estes fatores mudam, as características estatísticas também irão mudar, ou seja, a vibração não é mais estacionária, mas pode ser descrito como não-estacionária (Rouillard, 2007). A empresa “Real Vibrations” localizada em Victoria, Austrália, apresentou a hipótese de que vibrações randômicas não estacionárias (e não-Gaussianas) pode ser decompostas em elementos de Gauss aleatórios independentes com amplitudes de variação, desvios-padrão e durações (Kipp, 2008).

A equipe de pesquisadores da Universidade de Clemson registrou dados reais de vibração, de um caminhão de mola de aço viajando de Anderson, SC para Dallas, TX. Os dados de vibração foram analisados com base nas técnicas de análise mencionados acima e os resultados foram fornecidos.

## Materiais e métodos

Um Shock and Vibration Environment Recorder (SAVER™) (Lansmont Corp., Monterey, CA) modelo 9X30 foi utilizado neste estudo. Estes gravadores de dados usam um acelerômetro triaxial interno para medir os níveis de vibração. O gravador de dados foi montado rigidamente no interior da parte traseira do reboque. A Figura 1 ilustra a localização do gravador de dados.



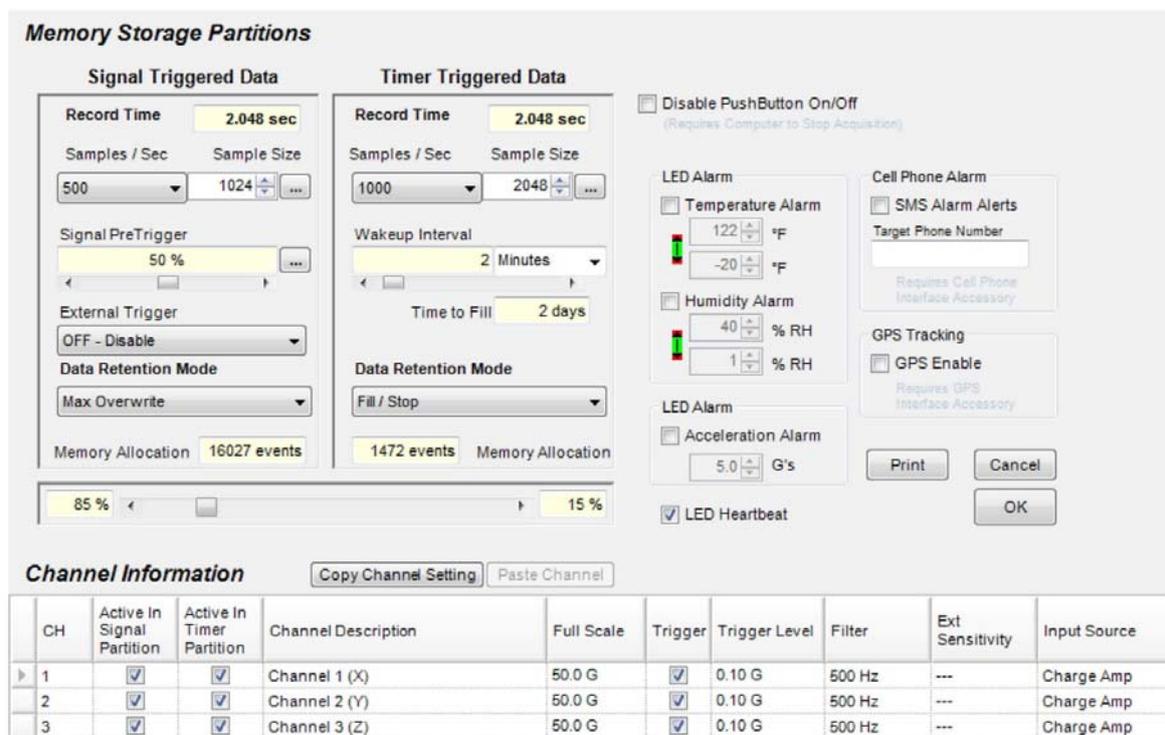
**FIGURA 1.** Localização do gravador SAVER™ 9X30 na parte interna traseira do reboque.

O gravador de dados foi rigidamente fixado a uma carreta reboque de 53 pés (16 metros) totalmente carregado. A carreta tinha suspensão de molas de aço, e quando totalmente carregado tinha um peso total de carga útil de 16.800 lbs (7.620 kg). A carreta permaneceu totalmente carregada ao longo de toda a viagem. O gravador de dados foi ligado antes da carreta deixar o armazém em Anderson, SC e foi desligado quando chegou no centro de distribuição perto de Dallas, TX.

O gravador de dados foi programado para gravar e analisar vibração usando métodos de disparo da gravação (“trigger”) tanto por intensidade quanto por tempo. Gravação disparada por intensidade refere-se aos dados registrados durante um evento em que a intensidade excedeu um limite pré-definido. Gravação disparada por tempo refere-se aos dados registrados a um dado intervalo de tempo, durante um período pré-definido.

Embora ambos os métodos de gravação de dados tenham sido utilizados para este estudo, apenas os dados do sinal disparado por intensidade foi utilizado para análise durante este estudo. Isto aconteceu devido ao limiar de disparo muito baixo utilizado. O baixo nível de disparo permitiu que o gravador de dados registrasse o movimento do veículo durante toda a viagem. Os métodos

tradicionais de gravação de dados podem ser distorcidos devido ao nível do limiar de disparo. Os métodos tradicionais (nível de disparo de 0,5 G) resultam em um nível global Grms mais elevado, mas para este estudo, tendo um baixo nível de disparo permitiu que todos os eventos de vibração de importância fossem gravados usando apenas os dados de disparo por intensidade. Ao definir um nível de disparo baixo, o nível global Grms passa a ser representativo de toda a viagem enquanto o veículo estava em movimento. A Figura 2 ilustra a configuração utilizada para este projeto.



CH	Active In Signal Partition	Active In Timer Partition	Channel Description	Full Scale	Trigger	Trigger Level	Filter	Ext Sensitivity	Input Source
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 1 (X)	50.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	0.10 G	500 Hz	---	Charge Amp
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 2 (Y)	50.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	0.10 G	500 Hz	---	Charge Amp
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 3 (Z)	50.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	0.10 G	500 Hz	---	Charge Amp

**FIGURA 2.** Configuração do gravador de dados.

As amostras utilizadas para este estudo foram refrigeradores Electrolux 18' Top Mount (TM) modelo FGHT1834KW. Antes do ensaio, as unidades foram inspecionadas visualmente quanto a danos. Todos os danos existentes foram identificados e as unidades foram re-embaladas para os ensaios. As unidades foram posicionadas em uma mesa de vibração servo-hidráulica, com 60 x 60 polegadas, fabricada pela Lansmont Corporation, da mesma maneira como foram posicionadas no transporte real. Dois refrigeradores foram posicionados na vertical sobre a mesa de vibração, e um refrigerador foi colocado na posição horizontal sobre as primeiras. Para cada ensaio de vibração, a unidade horizontal e uma das verticais foram avaliadas, sendo a segunda unidade na posição vertical utilizada apenas como apoio. A Figura 3 ilustra a configuração utilizada para todos os ensaios. Novas amostras foram usadas para cada método de ensaio avaliado.

A fim de avaliar os refrigeradores ao final de cada simulação foi utilizado um protocolo de avaliação de danos. A parte utilizada para esta avaliação foi o trilho interno no qual as prateleiras são encaixadas. A avaliação dos danos foi focada no acabamento da pintura e nas prateleiras. Durante a avaliação dos refrigeradores ensaiados, eles foram comparados visualmente com os refrigeradores reais de campo, que haviam sido inspecionados na entrega de Dallas, TX. As Figuras 4 e 5 ilustram os tipos de danos observados durante a inspeção das amostras entregues em Dallas, TX e que foram utilizados para comparação das amostras de ensaio. As amostras do ensaio que se correlacionaram com os resultados de campo foram classificadas como "Correlacionada" e as amostras do ensaio que não se correlacionaram com os resultados de campo foram classificadas como "Não Correlacionadas".



**FIGURA 3.** Montagem da mesa de vibração para os ensaios.



**FIGURA 4.** Exemplo de dano observado no transporte real para comparação com os ensaios de laboratório.



**FIGURA 5.** Exemplo de dano observado no transporte real para comparação com os ensaios de laboratório.

## Resultados e discussão

O software *SaverXware* foi utilizado para análise inicial dos dados gravados. Para todos os métodos de análise, foram considerados apenas os dados do eixo vertical, uma vez que foi o de maior intensidade de vibração total entre todos os eixos, além de ser o único que poderia ser simulado. O intervalo para os eventos gravados por disparo por intensidade durante a viagem foi de 0,01 Grms até 1,729 Grms. A duração da gravação foi de 8 horas e 9 minutos.

As seções a seguir irão discutir e rever a forma como os dados foram analisados para cada um dos métodos de vibração utilizados para este estudo.

### Vibração com Compressão do Tempo (Acelerado)

O software *SaverXware* foi usado para desenvolver o perfil médio de PSD. O perfil de PSD gerado tinha um nível médio global de 0,195 Grms. Para a realização do ensaio de vibração com compressão do tempo, foram utilizados no cálculo os níveis globais médios e a duração da viagem. Também foi necessário definir o tempo de ensaio (em horas), que foi definido como 3 horas. O tempo de ensaio de 3 horas foi escolhido para não se exceder a proporção de 5: 1. O cálculo a seguir mostra como os níveis globais Grms para o ensaio de vibração foi determinado:

$$0,44 \text{ Grms} = 0,195 \text{ Grms} \sqrt{\frac{15 \text{ horas}}{3 \text{ horas}}}$$

O valor de aceleração global Grms para o ensaio de vibração com compressão de tempo foi calculada em 0,44 Grms. Este perfil de PSD foi inserido no controlador de vibração e usado para controlar a mesa de vibração durante 3 horas.

Ao completar-se o ensaio de vibração, as amostras foram inspecionadas visualmente quanto a danos. Durante a inspeção, verificou-se que havia danos significativos tanto para o trilho quanto para as prateleiras, nas unidades inspecionadas. Estes resultados mostraram que o ensaio de vibração com compressão de tempo não se correlacionou com os resultados da viagem real. As Figuras 6 e 7 ilustram o tipo de danos observados durante a inspeção. Como resultado da inspeção, este ensaio foi classificado como Não Correlacionada.



**FIGURA 6.** Exemplo de dano no trilho interno ao final do ensaio de vibração com compressão de tempo.



**FIGURA 7.** Exemplo de dano na prateleira ao final do ensaio de vibração com compressão de tempo.

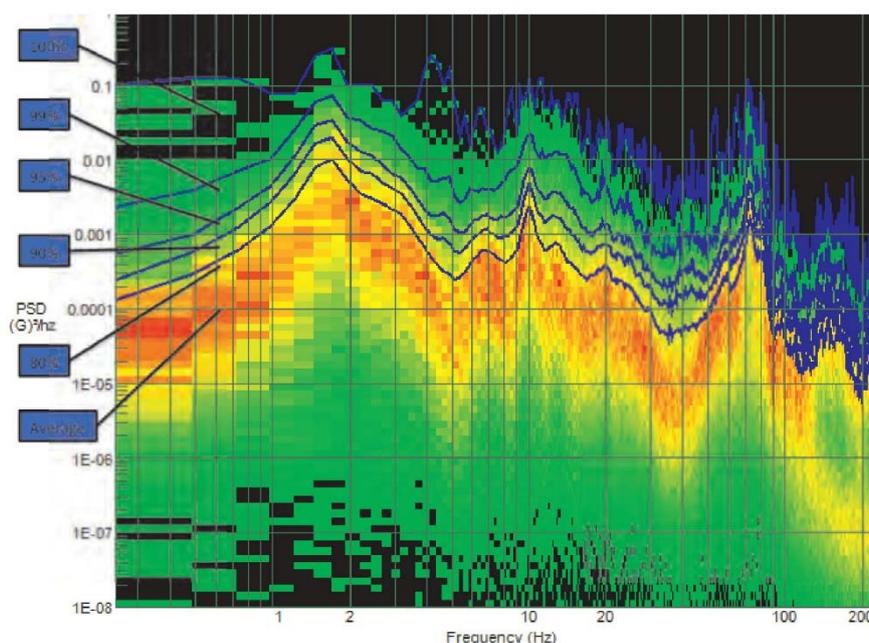
## Análise de Probabilidade

O software *SaverXware* foi usado para construir o relatório utilizado como o protocolo de ensaio. A Tabela 1 mostra os resultados da análise de probabilidade construído pelo software *SaverXware*. Além disso, como parte da análise, foram gerados perfis de PSD separadamente, para cada uma das faixas percentuais. Assim, foram criados os PSD considerando 50% (média), 80%, 90%, 95% e 99% do sinal gravado. A Figura 8 ilustra os perfis de PSD separados e sobrepostos em um único gráfico.

O controlador de vibração foi carregado com os vários perfis de PSD que deveriam ser executados a partir do 50% até o 99% em ordem sequencial. A fim de reduzir o tempo de ensaio, um ou mais perfis de PSD foram eliminados da sequência. Por exemplo, do 50% ao 99% utilizam todo os PSD's e suas durações correspondentes, ao passo que para o ensaio de 80% ao 99%, o 50% (média) não foi utilizado como parte da simulação. Isso permite que o tempo total do ensaio seja reduzido, e eliminando os eventos de menor intensidade de vibração e apenas focando as intensidades de vibração maiores. A Tabela 2 mostra como os ensaios foram conduzidos e informam se o ensaio correlacionou-se ou não com os dados do campo.

**Tabela 1.** Resumo dos resultados da Análise de Probabilidade.

Espectro de probabilidade	Aceleração global (Grms)	Número de eventos	Duração do ensaio (hh:mm)	Deslocamento (pol)
50% (media)	0,195	7062	04:01	1,42
menor ou igual a 80%	0,210	2515	01:26	1,45
menor ou igual a 90%	0,301	4425	02:31	2,56
menor ou igual a 95%	0,397	253	00:09	3,67
menor ou igual a 99%	0,654	59	00:02	3,89



**Figura 8.** Perfis de PSD gerados a partir da Análise de Probabilidade.

**Tabela 2.** Parâmetros e resultados do ensaio usando a Análise de Probabilidade.

Espectro de probabilidade	Duração do ensaio (hh:mm)	Resultados do ensaio
50% → 99%	08:09	Correlacionado
80% → 99%	04:08	Correlacionado
90% → 99%	02:42	Correlacionado
95% → 99%	00:11	Não-Correlacionado
99%	00:02	Não-Correlacionado

Os resultados da Análise de Probabilidade mostram que é possível reduzir o tempo de ensaio de vibração, e ainda assim continuar se correlacionando com os resultados de campo. Os ensaios de 50% a 99%, 80% a 99%, e 90% ao 99% mostraram correlação com os resultados de campo. Para este estudo mostrou que era possível replicar a viagem de 15 horas por meio de ensaios durante 2 horas e 42 minutos usando o espectro 90% a 99% e suas respectivas durações. As Figuras 9 e 10 ilustram os resultados do trilho e das prateleiras para o ensaio de 90% a 99%.

Os ensaios usando o perfil de 95% a 99% e apenas o perfil de 99% não se correlacionaram com as amostras de campo. Nenhum dano foi observado e por isso não foi possível comparar com os resultados de campo. Isto provavelmente aconteceu devido à pequena duração destes ensaios.

### Síntese de não-estacionário e não-Gaussiano

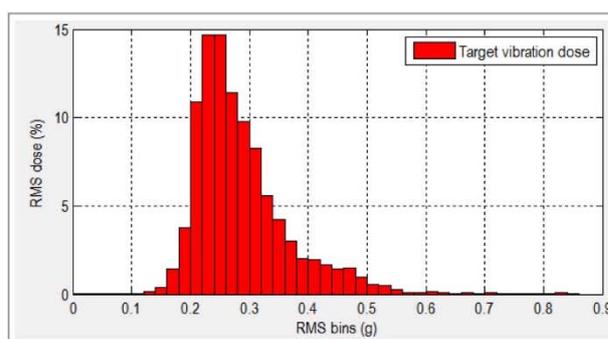
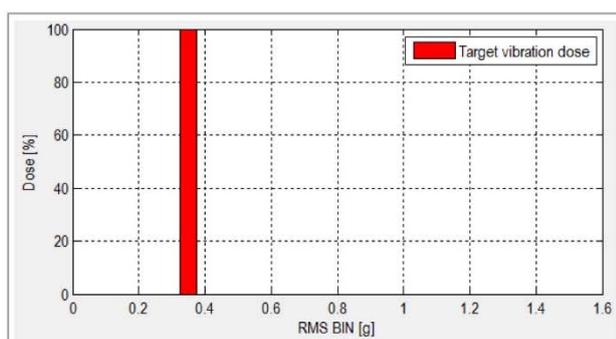
A fim de analisar os dados de vibração por este método, um equipamento Statistical Vibration Synthesizer (SVS) foi obtido junto a empresa Real Vibrations. Os eventos de vibração individuais gravados em campo foram carregados para o SVS e o software gerou a distribuição RMS. Para os ensaios de vibração tradicional, os perfis PSD são gaussianos e operam no nível Grms especificado durante a totalidade do tempo. A maior diferença entre este método e os perfis PSD tradicionais é que o SVS gera a distribuição RMS que deve ser seguida. Esta é uma grande simplificação do método, mas a SVS analisa os eventos de vibração e os agrupa por níveis RMS. Cada grupo é também recebe um percentual em que ele irá operar ao longo do ensaio. Estes grupos caixas são então utilizados em conjunto para operar a mesa de vibração a 100%. Portanto, o ensaio de vibração não é mais executado em um único nível Grms como com os ensaios de PSD tradicional, mas operam em diferentes níveis de RMS (Figura 11).



**FIGURA 9.** Exemplo de dano no trilho interno ao final do ensaio 90% → 99%.



**FIGURA 10.** Exemplo de dano na prateleira ao final do ensaio 90% → 99%.



**FIGURA 11.** Comparação entre a distribuição de vibração alvo: método tradicional (esquerda) e método SVS (direita).

Depois de os dados serem analisados pelo SVS, o perfil resultante PSD e PDF foram usados para controlar a mesa de vibração. Ajustando quais grupos RMS são usados pelo SVS para gerar a simulação pode-se reduzir o tempo de ensaio. Isso pode ser feito através da exclusão dos grupos RMS utilizados para a simulação. Por exemplo, excluindo-se todos os grupos de RMS inferior a 0,21 permite que apenas os dados maiores do que estes sejam usados na simulação. Tabela 3 exibe os níveis Grms e durações utilizadas para estas simulações, bem como os resultados do ensaio.

**TABELA 3**

Nível Global (Grms)	Duração do ensaio (hh:mm)	Resultados do ensaio
> 0,195	08:09	Correlacionado
> 0,210	04:08	Correlacionado
> 0,301	02:42	Correlacionado
> 0,397	00:11	Não-Correlacionado
> 0,654	00:02	Não-Correlacionado

Da mesma forma que para a Análise de Probabilidade, os resultados do método Não-estacionário e Não-Gaussiano mostraram que era possível reduzir o tempo de ensaio de vibração, mantendo a correlação com os dados de campo. As Figuras 12 e 13 ilustram os resultados do ensaio com os grupos superiores a 0,301 Grms, e que se correlacionaram com os dados de campo.



**FIGURA 12.** Exemplo de dano no trilho interno ao final do ensaio > 0,301.



**FIGURA 13.** Exemplo de dano na prateleira ao final do ensaio > 0,301.

A gravação de todos os eventos de vibração com o veículo "em movimento" apresenta os desafios de resultar em grandes arquivos de dados e da captura da duração total da viagem escolhida. Com base no gravador de dados e método utilizado para este estudo, o tempo total de gravação possível de ser realizado foi de 8 horas e 9 minutos. A duração da viagem real para este estudo foi de 15 horas. Reduzindo-se a taxa de amostragem e tamanho da amostra, pode-se realizar gravações de vibração dos veículos em viagens de maior duração. Além disso, com base no recurso de 'Max Overwrite' no qual eventos de maior intensidade são sobrepostos aos eventos de menor intensidade, pode-se assumir que todos os eventos de importância foram capturados, uma vez que o valor de disparo foi estabelecido em 0,1 G, significando que, para este estudo, as outras 7 horas não capturadas foram igual ou inferior a 0,1 G.

## Conclusões

A equipe de trabalho analisou três técnicas utilizadas para reduzir o tempo de ensaio de vibração. Os resultados indicam que tanto a Análise de Probabilidade quanto o método não-estacionário e não-gaussiano podem, de fato, reduzir o tempo de ensaio, mantendo uma boa correlação com os transportes reais de refrigeradores. O método de Compressão de Tempo para redução na duração do ensaio aumentou a quantidade de danos e não reproduziu os resultados dos danos encontrados no transporte real de refrigeradores. Foram encontrados desafios na implementação dos diferentes métodos, incluindo uma mudança de metodologia de aquisição de dados que resultou em tempos de gravação reduzidos, com base nas configurações do gravador de dados disponível.

Os autores incentivam a aplicação dessas técnicas propostas de simulação de vibração com tempo reduzido para mais produtos, a fim de melhor compreender a correlação entre os ensaios de laboratório e os resultados reais do campo.

## Referências

ASTM International (2009) ASTM D4169 – Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems: ASTM: West Conshohocken, PA, 2009.

Dunno, K. and Batt, G. (2013) “Experimental Comparison of Vibration Simulation Techniques” Presented at ISTA Transpack Forum, March 2013.

ISTA Resource Book (2014) ISTA: East Lansing, MI, 2014.

Kipp, W. (2008) ISTA Field Data Requirements. International Safe Transit Association. Revised November 2008.

McKinley, A.H. (2004) Transport Packaging. 2nd Ed. Institute of Packaging Professionals.

Root, D. (2010) “Constructed Probability, Applying Analysis Results in the Lab in Pursuit of Improved Damage Correlation” Presented at ISTA International Transport Packaging Forum.

Rouillard, V. (2007) “Decomposing Non-Stationary Random Vibration Data into Gaussian Elements” Presented at Dimensions.07.

Young, D (2007) Random Vibration Worksheet. Retrieved from [www.ista.org](http://www.ista.org).