

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM COMPRESSORES DE AR TIPO PISTÃO PARA USO EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL, EM FUNÇÃO DO TIPO DE AMORTECIMENTO UTILIZADO *

Valter Florêncio ¹

Fábio dos Santos Silva ¹

José Sérgio Ribeiro Junior ¹

Isadora Coffani dos Santos de Siqueira ²

Willy Ank de Moraes ³

Resumo

Na indústria usa-se ar comprimido em grande escala, em aplicações que necessitam uma faixa de pressão estável e contínua, condições tipicamente atendidas pelo uso de compressores acoplados a reservatórios de controle. A variação nas condições de uso deste equipamento, que ocorre por ciclos variáveis de alimentação e pressurização de ar em seus reservatórios, induz níveis de vibração deletérios que necessitam ser reduzidos. Apesar da normatização existente e das recomendações dos fabricantes de que tais equipamentos devam ser instalados sobre amortecedores elastoméricos padronizados, durante inspeções recomendadas pela NR-13, observa-se que estes são instalados com sistemas de amortecimento de vibração diversos. Neste sentido, este trabalho apresenta uma avaliação das condições reais de instalação e funcionamento de compressores de ar tipo pistão, um tipo vaso de pressão muito comum, apresentando uma quantificação dos efeitos da variação destas condições de funcionamento.

Palavras-chave: Vaso de pressão, ar comprimido industrial, análise de vibração.

VIBRATION ANALYSIS IN PISTON-TYPE AIR COMPRESSORS FOR USE IN INDUSTRIAL MAINTENANCE, BY FUNCTION OF THE TYPE OF DAMPER USED

Abstract

In the industry, compressed air is used on a large scale, in applications that require a stable and continuous pressure range, conditions typically obtained by the use of compressors coupled to control reservoirs. The variation in the usage conditions of this equipment, which occurs through variable cycles of feeding and pressurizing of air in its reservoirs, induces deleterious levels of vibration that need to be reduced. Despite the existing standards and manufacturers' recommendations that such equipment should be installed on standard elastomeric shock absorbers, during inspections recommended by the NR-13, it is noted that these are installed with various vibration damping systems. In this way, this work presents an evaluation of the actual conditions of installation and operation of piston-type air compressors, a very common type of pressure vessel, and presents a quantification of the effects of the variation of these operating conditions.

Keywords: Pressure vessels, industrial compressed air, vibration analysis.

¹ Engenheiro e Mestrando em Engenharia Mecânica, UNISANTA. Santos, SP, Brasil. E-mail: vflorencio2000@yahoo.com.br.

² Graduanda em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Tecnóloga em Logística, Estagiária na Petróleo Brasileiro SA Petrobras, Santos, SP, Brasil. E-mail: isacoffani1@gmail.com.

³ Doutorando, Mestre, Engenheiro e Técnico em Metalurgia e Materiais, Consultor Técnico na INSPEBRAS, Sócio-Diretor da Willy Ank Soluções Metal-Mecânica, Professor Adjunto, UNISANTA, Santos, SP, Brasil. E-mail: willyank@unisanta.br.

1 INTRODUÇÃO

Em momentos de crise econômica, é crescente a preocupação com a vida útil dos ativos pertencentes a um empreendimento, de modo que a aplicação de artifícios que promovem uma maior durabilidade destes ativos se faz extremamente necessária e quando essas medidas impactam em baixos custos de implementação, se tornam ainda mais atrativas aos olhos dos tomadores de decisão. Para Vasconcelos [1], a parada de um componente crítico à um determinado processo pode ocasionar perdas significativas, que vão muito além daquelas facilmente mensuráveis. Por outro lado, muitas vezes essas paradas podem ser evitadas com simples implementações de cunho técnico.

Para Assunção [2], as máquinas alternativas apresentam como característica principal o mecanismo cursor - manivela, capaz de executar movimentos alternativos, que transformam movimentos de translação em movimentos de rotação ou vice-versa. No grupo das máquinas alternativas estão os compressores, as bombas alternativas e os motores a diesel, a vapor e a gasolina. As grandes máquinas alternativas utilizadas na indústria operam com velocidades relativamente baixas, aumentando assim a probabilidade de gerar vibrações nocivas às construções vizinhas. O mecanismo principal de uma máquina alternativa simples, esquematizado na Figura 1, é constituído de um pistão que executa um movimento alternativo ao longo de um eixo ("Z", na Fig. 1), fazendo com que a biela (de comprimento " L ", na Fig. 1), girar em torno de uma manivela ("OC", na Fig. 1). Qualquer um desses elementos pode apresentar forças inerciais que são transmitidas à fundação.

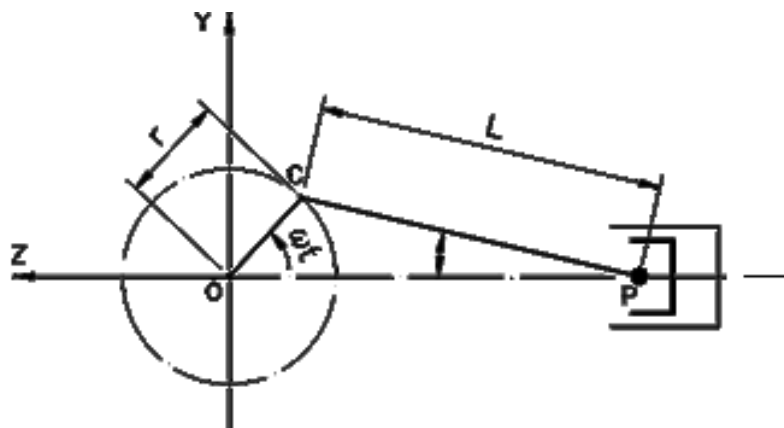


Figura 1. Mecanismo Cursor-manivela.

Os equipamentos vibratórios são projetados para operar com eficiência durante a sua expectativa de vida útil, nas condições pré-estabelecidas de uso. Vibrações não controladas nestes equipamentos provocam desgaste prematuro de componentes, quebras inesperadas, fadiga estrutural do equipamento, desconexão de partes, baixa qualidade dos produtos e aumento de custos de manutenção. Por isso as vibrações dos equipamentos devem ser eliminadas ou, quando não possível, controladas a fim de reduzir a degradação induzida pelos movimentos vibratórios [3].

Um método de grande eficiência para reduzir as vibrações é através do emprego de coxins elastoméricos, que atuam como isoladores minimizando a magnitude da vibração na base de equipamentos oscilatórios. Segundo Barbetti [4], os coxins

podem ser caracterizados pela sua transmissibilidade, definida como a razão entre a força transmitida na parte superior do coxim e a força excitante na sua parte inferior. A transmissibilidade, também conhecida como razão da magnitude transmitida e a magnitude excitante pode ser caracterizada completamente no intervalo de frequências entre 0 a 200 Hz [4].

A norma técnica ISO 2372 [5], apesar de já ter sido substituída pela ISO 20816-1 [6], ainda é muito empregada para especificar os limites de vibração de equipamentos oscilatórios, que operam em frequências na faixa de 10 Hz a 200 Hz. Através desta norma [5] e da sua sucedânea [6], são estabelecidos critérios de severidade para a amplitude de vibração das máquinas, conforme apresentados na Tabela 1. Os valores apresentados na Tabela 1 são empregados como referência na inspeção de equipamentos deste gênero, empregando sensores adequados.

Tabela 1. Critérios de severidade das vibrações de máquinas, adaptado da ISO 2372 [5]

Tabela 11: Escalas de severidade das vibrações de máquinas, adaptada da ISO 2012 [1]				
Velocidade RMS* (mm/s)	Classe das máquinas **			
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	Bom	Bom	Bom	Bom
0,45				
0,71				
1,12	Permissível	Permissível	Permissível	Permissível
1,8				
2,8	Tolerável	Tolerável	Tolerável	Tolerável
4,5				
7,1	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
11,2				
18				
28				
45				

* RMS (root mean square): raiz quadrada da média dos quadrados da velocidade.

** As classificações empregadas são:

- Classe I: máquinas pequenas (até 15 kW) e subconjuntos de máquinas maiores;
- Classe II: máquinas de tamanho médio (15 a 75 kW) sem fundações especiais, ou máquinas até 300 kW montadas rigidamente sobre fundações especiais;
- Classe III: grandes máquinas rotativas montadas rigidamente em fundações rígidas na direção da medição de vibração;
- Classe IV: grandes máquinas rotativas montadas em fundações flexíveis na direção da medição de vibração.

Assim sendo, este trabalho objetivou a avaliação das condições de vibração em compressores de ar tipo pistão, motivado (1) pela relevância das vibrações na vida útil dos equipamentos oscilatórios [3]; (2) pela existência de padrões de controle destes equipamentos [5 e 6] e (3) pelo grande número existente de compressores de ar tipo pistão empregados. Avaliou-se as condições de vibração existentes em instalações de compressores de ar tipo pistão, das quais foram selecionados 4 métodos diferentes de fixação do equipamento, desde a fixação direta no piso até o uso de amortecedores (coxins) elastoméricos. O funcionamento dos equipamentos foi acompanhado durante 2 meses ao longo dos quais foram efetuadas medições de vibração, em pontos específicos destes equipamentos, de modo a avaliar a evolução das condições de vibração e a influência dos métodos de controle selecionados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado durante os meses de outubro e novembro de 2017, na oficina de Conservação e Reparos do Núcleo de Engenharia Hospitalar do Hospital do Servidor Público Estadual – IAMSPE, localizado na cidade de São Paulo. Foram utilizados 2 (dois) compressores de ar tipo pistão de uso contínuo nas atividades de manutenção em geral, classificados como Máquinas Classe I, de acordo com a norma ISO 2372 (vide Tab. 1). Os dois compressores empregados foram designados neste trabalho como ‘C-1’ e ‘C-2’, sendo que o primeiro foi fixado através de amortecedores elásticos e o segundo diretamente no piso. A Tabela 2 apresenta as suas características mais relevantes e as Figuras 2 e 3 ilustram o aspecto destes equipamentos e as indicações dos pontos de medição de vibração avaliados, que foram devidamente sinalizados nos equipamentos para não perder a referência da medição.

Tabela 2. Descrição dos equipamentos empregados neste trabalho

Eq.	Fabricante	Modelo	PMTA (kgf/cm ²)	Vol. (L)	Peso (kg)	Motor	Cabeçote	
						Potência (HP)	Rotação (RPM)	Rotação (RPM)
C-1	WAYNE DRESSER	W84010H	12,3	427	352	10	1.755	710
C-2	SCHULZ	CSL-10BR/ 100L BRAVO	10,34	100	74	2	3.430	410

PMTA - Pressão máxima de trabalho admissível

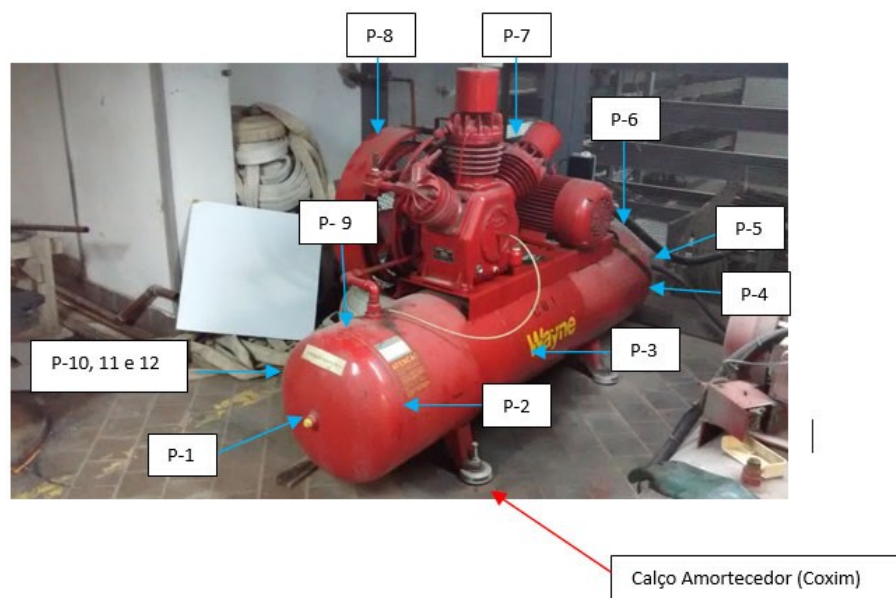


Figura 2. Compressor “C-1”, fixado com amortecedores elásticos para conter a vibração. Os pontos P10, P11 e P12 (não observáveis nesta foto) são simétricos aos pontos P2, P3 e P4.

Para acompanhar e quantificar o nível de vibrações, empregou-se um medidor de vibração, marca WINTACT, modelo WT63A. Este equipamento é dotado de um sensor piezoelétrico de cerâmica polarizada artificial que quantifica não só a frequência, mas também a aceleração, a velocidade e o deslocamento do componente inspecionado. Suas principais características estão ilustradas no Quadro 1. Os equipamentos permaneceram ligados durante as medições dos níveis de vibração nos pontos pré-determinados (vide Fig. 2 e Fig. 3) conforme detalhado no Quadro 2.

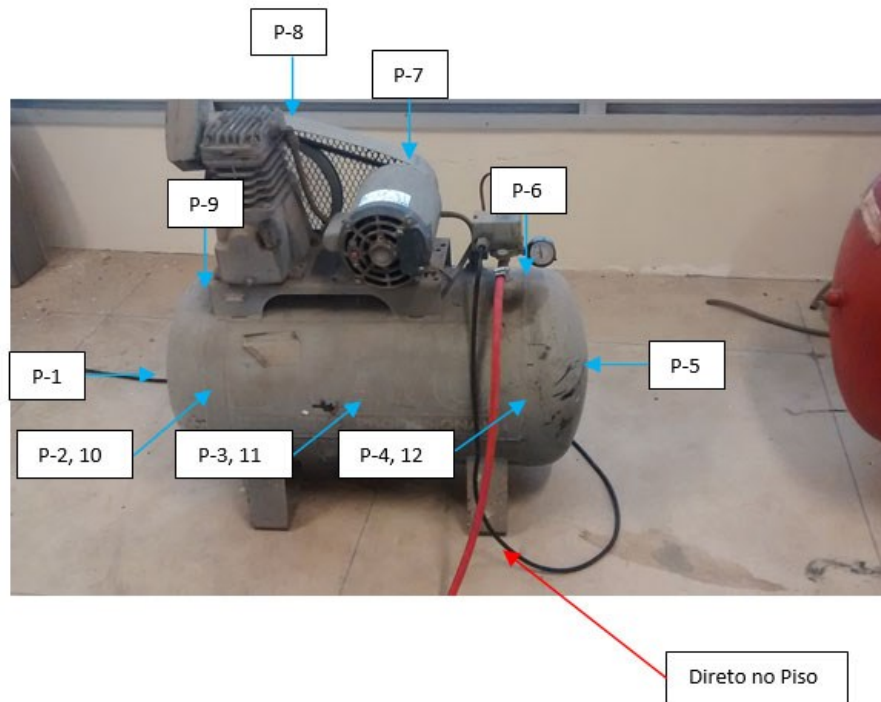
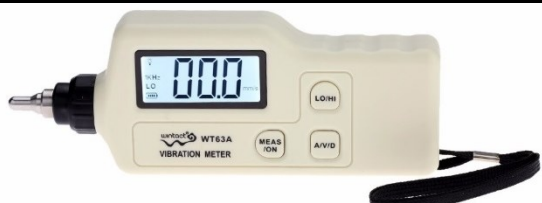


Figura 3. Compressor “C-2”, fixado diretamente no piso, sem contenção da vibração. Os pontos P10, P11 e P12 (não observáveis nesta foto) são simétricos aos pontos P2, P3 e P4.

Quadro 1. Características relevantes do equipamento de medição de vibração empregado

 Faixa de medição para: • aceleração: de 0,1 a 199,9 m/s² (pico); • velocidade: 0,1 a 199,9 m/s (RMS); • deslocamento: 0,001 a 1,999 mm (pico a pico).	Fabricante: WINTACT Modelo: WT63A Temperatura de operação: 0 a 40°C Umidade relativa de operação: 30 a 90% Precisão: ± 5% + 2 dígitos Taxa de atualização do mostrador: 1 s Frequência de medição para: • aceleração: ○ 10 Hz a 1 kHz (faixa LO); ○ 1 kHz a 15 kHz (faixa HI); • velocidade: 10 Hz a 1 kHz (faixa LO); • deslocamento: 10 Hz a 1 kHz.
---	--

Quadro 2. Descrição dos pontos de medição nos equipamentos analisados neste trabalho

Identificação dos pontos de medição	Direção da medição
P1 - Centro da calota frontal, P2 - Lateral esquerda do frontal do costado, P3 - Ponto central do costado, P4 - Lateral direita do posterior do costado P5 - Centro da calota traseira, P6 - Superior direito do costado, P7 - Protetor de polia na região do motor, P8 - Protetor de polia na região do compressor, P9 - Superior esquerdo do costado, P10 - Lateral direita do frontal do costado, P11 - Ponto central do costado, P12 - Lateral direita do posterior do costado	H - Horizontal V - Vertical A - Axial
	Grandeza medida
	V - Velocidade de vibração –(m/s) A - Aceleração (mm/s ²) D - Deslocamento (mm)

Como método de fixação dos equipamentos no solo, foram selecionados 4 tipos:

1. piso: fixação direta no piso;
2. madeira: uso de apoios de madeira com 100 mm de espessura;
3. madeira-Buna: uso conjugado de apoios de madeira com chapas de borracha de nitrilo (NBR), ou Buna N, com 12,7mm de espessura;
4. coxins: coxins elastoméricos comerciais do fabricante Vibra-Stop, modelos:
 - 4.1. STD, empregado no equipamento C-1 (maior),
 - 4.2. MAC, empregado no equipamento C-2 (menor).

Tais métodos de fixação foram empregados neste trabalho para gerar variados graus de severidade nas vibrações dos equipamentos avaliados. Destes métodos, apenas os três últimos empregaram materiais entre a base de fixação e o piso.

As fotos da Figura 4 ilustra os 3 métodos de fixação que foram empregados com a utilização de material de apoio (madeira ou elastômero) na base dos equipamentos. A Tabela 3 apresenta as principais características dos dois coxins elastoméricos empregados nos compressores C-1 e C-2. Salienta-se que este é o método recomendado normativamente [5 e 6] para ser empregado como forma de controlar os níveis de vibração em equipamentos como os avaliados.

Tabela 3. Características relevantes dos amortecedores (coxins) elastoméricos empregados

Tipo (modelo)	STD	MAC
Carga Estática (kg)	500 a 1.500	500 a 200
Carga Dinâmica (kg)	2.000 a 6.000	200 a 500
Diâmetro Externo (mm)	115	62
Diâmetro Borracha (mm)	100	50
Altura regulável (mm)	45 a 60	25 a 30
Freq. Natural (Hz)	20 a 25	12 a 18
Equipamento empregado	C-1	C-2

Observação: coxins da marca Vibra-Stop.



(a) somente madeira



(b) com madeira e buna N



(c) com coxins

Figura 4. Ilustração dos 3 métodos de fixação que foram empregados com a utilização de material de apoio (madeira ou elastômero) na base dos equipamentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fotos da Figura 5 ilustram a operação de quantificação do nível de vibrações nos equipamentos C-1 e C-2 nos pontos P1, P2 e P8. Nota-se que a aferição é simples e

rápida, bastando tocar a ponta do equipamento de medição de vibração no ponto demarcado (sinalizado) no equipamento.



(a) Ponto P1, C-1



(b) Ponto P8, C-1



(c) Ponto P2, C-2

Figura 5. Ilustração das operações de medição do nível de vibrações nos equipamentos avaliados.

A Tabela 4 apresenta os valores médios RMS (*root mean square*), raiz quadrada da média dos quadrados, para os valores de deslocamento (mm), velocidade (mm/s) e de aceleração (mm/s^2) obtidos com o equipamento C-1 em três condições de fixação. Neste equipamento por questões práticas, não foi possível fixá-lo diretamente no piso, ao contrário do que pode ser feito no equipamento C-2, cujos valores obtidos, das mesmas medições feitas para o equipamento C-1, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4. Resultados das medições de vibrações do equipamento C-1

PONTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
APOIO	Deslocamento RMS (mm)											
Piso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira	1,00	0,11	0,11	0,11	0,95	0,43	0,57	0,42	0,39	0,09	0,09	0,15
Madeira-Buna	0,58	0,07	0,05	0,06	0,49	0,16	0,24	0,11	0,18	0,08	0,05	0,06
Coxim STD	0,79	0,19	0,28	0,18	0,76	0,52	0,36	0,46	0,46	0,19	0,23	0,24
Coxim MAC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Velocidade RMS (mm/s) – valores em vermelho inaceitáveis [5]												
Piso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira	25,8	5,2	4,9	6,5	24,2	13,3	12,8	18,5	12,5	4,7	3,8	5,2
Madeira-Buna	15,1	2,3	2,4	2,3	12,3	5,1	6,6	7,2	4,7	2,6	2,2	2,2
Coxim STD	20,8	6,4	8,1	7,3	19,3	13,4	11,2	23,0	13,7	6,1	5,9	6,7
Coxim MAC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aceleração RMS (m/s^2)												
Piso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira	7,9	10,9	10,3	10,5	9,6	10,2	4,0	6,5	14,2	11,4	12,3	10,2
Madeira-Buna	3,8	5,9	6,7	5,4	4,6	4,4	3,9	5,6	6,3	5,4	6,6	4,9
Coxim STD	8,2	9,2	9,7	7,4	7,7	7,5	13,4	19,5	12,9	6,3	7,5	7,2
Coxim MAC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* RMS (*root mean square*): raiz quadrada da média dos quadrados das medições.

O Quadro 3 apresenta uma comparação relativa entre os dados obtidos nos dois equipamentos com os quatro métodos de fixação. Os valores numéricos apresentados no Quadro 3 foram associados a cores de forma que as cores mais próximas do azul

são valores próximos ao mínimo do deslocamento (0,03 mm), velocidade (0,05 mm/s) e aceleração (3,10 mm/s²), as cores vermelhas próximas aos valores máximos de deslocamento (1,00 mm), velocidade (17,4 mm/s) e aceleração (19,5 mm/s²) e as cores amarelas associadas aos valores intermediários.

Tabela 5. Resultados das medições de vibrações do equipamento C-2

PONTO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
APOIO	Deslocamento RMS (mm)											
Piso	0,07	0,14	0,18	0,19	0,09	0,12	0,17	0,21	0,08	0,11	0,11	0,16
Madeira	0,13	0,08	0,05	0,06	0,15	0,12	0,11	0,13	0,09	0,10	0,03	0,08
Madeira-Buna	0,09	0,08	0,06	0,07	0,09	0,10	0,10	0,08	0,04	0,07	0,04	0,06
Coxim STD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coxim MAC	0,09	0,17	0,12	0,21	0,12	0,09	0,09	0,10	0,08	0,16	0,12	0,20
Velocidade RMS (mm/s) – valores em vermelho inaceitáveis [5]												
Piso	4,50	5,70	5,60	8,60	4,70	9,50	13,6	17,4	6,70	4,60	4,30	8,60
Madeira	7,40	4,90	3,40	5,50	7,70	11,7	12,9	15,2	11,2	6,30	3,00	5,60
Madeira-Buna	4,00	4,10	3,60	5,10	4,20	6,70	7,50	7,80	4,50	3,80	3,20	5,50
Coxim STD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coxim MAC	3,80	6,50	4,50	8,30	5,10	9,20	8,80	7,90	5,70	6,40	4,30	8,70
Aceleração RMS (m/s ²)												
Piso	5,4	5,4	6,2	6,0	3,9	5,2	11,4	12,8	4,9	5,4	6,1	5,9
Madeira	5,3	5,6	7,3	6,8	4,5	5,4	12,7	9,7	6,8	5,6	7,1	4,8
Madeira-Buna	3,1	5,5	4,1	6,8	3,8	4,4	11,5	7,7	4,2	4,7	7,1	5,2
Coxim STD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coxim MAC	3,3	6,2	7,9	6,1	3,3	4,9	9,8	7,1	4,4	5,1	6,5	5,2

* RMS (root mean square): raiz quadrada da média dos quadrados das medições.

Quadro 3. Comparação entre os valores relativos RMS de deslocamento, velocidade e aceleração apresentados pelos dois equipamentos

PONTO	C-1												C-2											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
TIPO DE APOIO	Deslocamento RMS (mm)												Deslocamento RMS (mm)											
Piso																								
Madeira																								
Madeira-Buna																								
Coxim STD/MAC																								
	Velocidade RMS (mm/s)												Velocidade RMS (mm/s)											
Piso																								
Madeira																								
Madeira-Buna																								
Coxim STD/MAC																								
	Aceleração RMS (m/s ²)												Aceleração RMS (m/s ²)											
Piso																								
Madeira																								
Madeira-Buna																								
Coxim STD/MAC																								
	Deslocamento												Velocidade											
Min.:	0,03 mm												2,2 mm/s											
Máx.:	1,00 mm												25,8 mm/s											
	Aceleração												3,10 m/s ²											
													19,5 m/s ²											

Pelo que pode ser percebido no Quadro 3, o equipamento C-1 apresentou os maiores níveis de vibração, seja pelo deslocamento, velocidade ou aceleração. Os maiores valores de deslocamento e velocidade ocorreram nos pontos P1 e P5, respectivamente os centros das duas calotas. Esse é um resultado razoável,

considerando as maiores dimensões do equipamento C1. Também é interessante observar que o ponto P8 (protetor de polia na região do compressor) foi o ponto que apresentou maior aceleração dos equipamentos ($19,5 \text{ mm/s}^2$), e também uma das maiores velocidades, justamente com o uso do coxim STD, o que não deveria ocorrer.

O Quadro 4 apresenta uma comparação relativa entre os dados obtidos em cada um dos equipamentos e uma média para cada metodologia de fixação por equipamento. Este Quadro foi elaborado para permitir uma melhor comparação dos efeitos dos métodos de fixação dos equipamentos. No caso do equipamento C-1, o uso de madeira e do coxim Vibra-stop STD levou a praticamente os mesmos resultados de vibração, bem acima dos obtidos com o emprego do conjunto madeira-Buna, o que não seria esperado, mas que é justificado pela não adequação do tipo de coxim escolhido para este equipamento.

No caso do equipamento C-2, como era esperado, a fixação no piso levou aos piores resultados na geração de vibração em termos de deslocamento e um pouco melhores do que a fixação com madeira. Neste caso, mais uma vez a montagem do equipamento com o conjunto madeira-Buna também ofereceu os melhores resultados em termos de vibração, porém mais parecidos com os resultados alcançados pelo uso do coxim Vibra-stop MAC.

Quadro 4. Comparação entre os valores relativos RMS de deslocamento, velocidade e aceleração apresentados em cada um dos equipamentos

PONTO	Méd.	C-1												Méd.	C-2											
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
TIPO DE APOIO		Deslocamento RMS (mm)													Deslocamento RMS (mm)											
Piso														0,14												
Madeira	0,37													0,09												
Madeira-Buna	0,18													0,07												
Coxim STD/MAC	0,39													0,13												
		Velocidade RMS (mm/s)													Velocidade RMS (mm/s)											
Piso														7,82												
Madeira	11,45													7,90												
Madeira-Buna	5,42													5,00												
Coxim STD/MAC	11,83													6,60												
		Aceleração RMS (m/s^2)													Aceleração RMS (m/s^2)											
Piso														6,55												
Madeira	9,83													6,80												
Madeira-Buna	5,29													5,68												
Coxim STD/MAC	9,71													5,82												
		Deslocamento		Velocidade		Aceleração																				
		C-1 C-2		C-1 C-2		C-1 C-2																				
		Mín.: 0,05 0,03 mm		Mín.: 2,2 3,00 mm/s		Mín.: 3,80 3,10 m/s^2																				
		Máx.: 1,00 0,21 mm		Máx.: 25,8 17,4 mm/s		Máx.: 19,5 12,8 m/s^2																				

Os mesmos resultados extraídos do Quadro 2, podem ser melhor visualizados na Figura 6, que apresenta as médias dos valores obtidos das medições feitas nos equipamentos, em uma forma adimensionalizada. A adimensionalização feita pela Equação (1) permite uma melhor comparação dos resultados obtidos entre os dois equipamentos, nas quatro formas de fixação:

$$\%x_i = \frac{x_i - x_{\text{Mín}}}{x_{\text{Máx}} - x_{\text{Mín}}} \times (100\%) \quad (1)$$

Sendo:

x_i – valor da variável medida (deslocamento, velocidade ou aceleração);

$x_{\text{Mín}}$, $x_{\text{Máx}}$ – valores mínimos e máximos da variável medida;

$\%x_i$ – valor adimensionalizado relativo da variável medida.

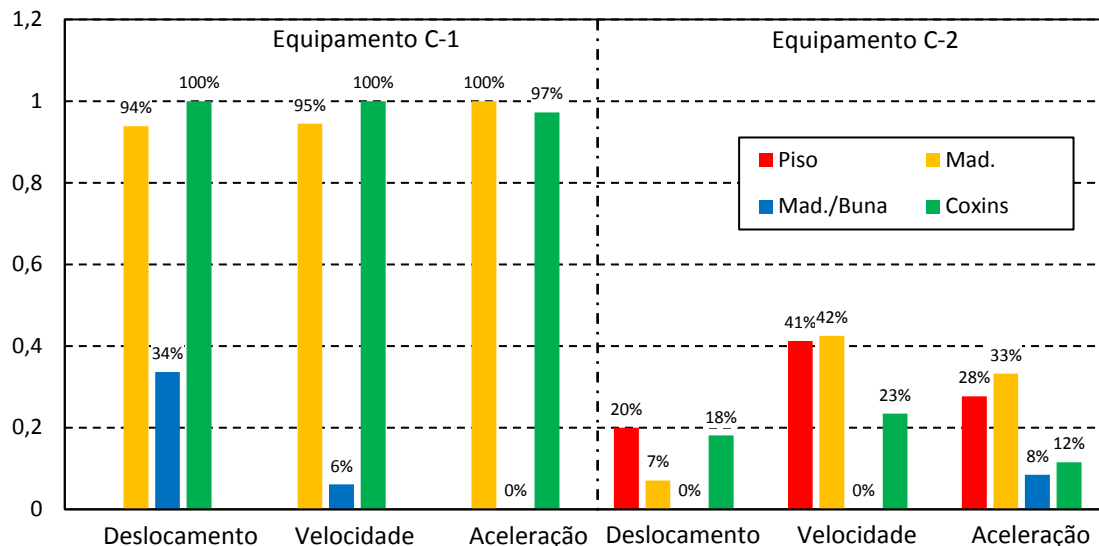


Figura 6. Resultados adimensionalizados da medição da vibração nos dois equipamentos (C-1 e C-2), obtidos nos quatro métodos de fixação (piso, madeira, madeira/Buna e coxins).

A Figura 7 apresenta todos os valores apresentados nas Tabelas 4 e 5 na forma gráfica. Através destes gráficos é possível perceber melhor as considerações feitas anteriormente para a tendência dos resultados, tanto em termos da eficiência do método de fixação dos equipamentos, quanto nas diferenças entre os equipamentos em si. É possível perceber que o desempenho médio da fixação conjugada madeira-Buna realmente se destacou em todos os parâmetros de vibração mensurados em todos os pontos no equipamento C-1 (gráficos da Fig. 7.a, 7.c e 7.e) e na maioria dos pontos para os parâmetros deslocamento e velocidade no equipamento C-2 (gráficos da Fig. 7.b e 7.d). Apenas no caso da aceleração do equipamento C-2 houve um resultado similar dos métodos de fixação (gráfico da Fig. 7.f).

Os dados obtidos nas medições de velocidade podem ser diretamente comparados com os dados da Tabela 1, considerando ambos os equipamentos (C-1 e C-2) como classificados na Classe I, estabelecida na Norma ISO 2372 [5]. Todos os equipamentos apresentaram algum ponto mensurado fora das condições normativas [5], conforme descrito pelas Tabelas 4 e 5. O equipamento C-1 apresentou um resultado ligeiramente pior (17 pontos na Tabela 4) que o equipamento C-2 (13 pontos fora da norma na Tabela 5), sendo que a principal diferença foi na fixação por meio dos coxins, como já havia sido descrito quantitativamente pelos maiores valores de aceleração no ponto P8 do equipamento C-1.

3 CONCLUSÃO

A manutenção preditiva é largamente utilizada na indústria para observância de vibrações em equipamentos, de modo que essa análise visa melhorar a disponibilidade física dos equipamentos e também aumentar consideravelmente a vida útil do ativo em questão.

Embora os resultados obtidos nos experimentos possam nos dar a falsa orientação da ineficácia do uso do coxim amortecedor de vibração para este tipo de equipamento, faz-se necessário fazer uma análise mais detalhada da sua forma de especificação e da relação custo x benefício, tendo em vista o baixo investimento na aquisição dos

coxins. O fundamental é a sua rigorosa especificação e seleção, levando-se sempre em conta as dimensões e o peso do equipamento, o que contribuirá para minimizar as intervenções de manutenção para reapertos de parafusos e conexões e reposicionamento dos equipamentos. A grande limitação prática nesta solução é a facilidade de implementar soluções simples e aparentemente aceitáveis, como o uso da combinação madeira Buna (de borracha de nitrilo - NBR), que apresentou resultados razoáveis nas medições feitas e que devem, certamente, serem percebidas na prática de uso destes equipamentos.

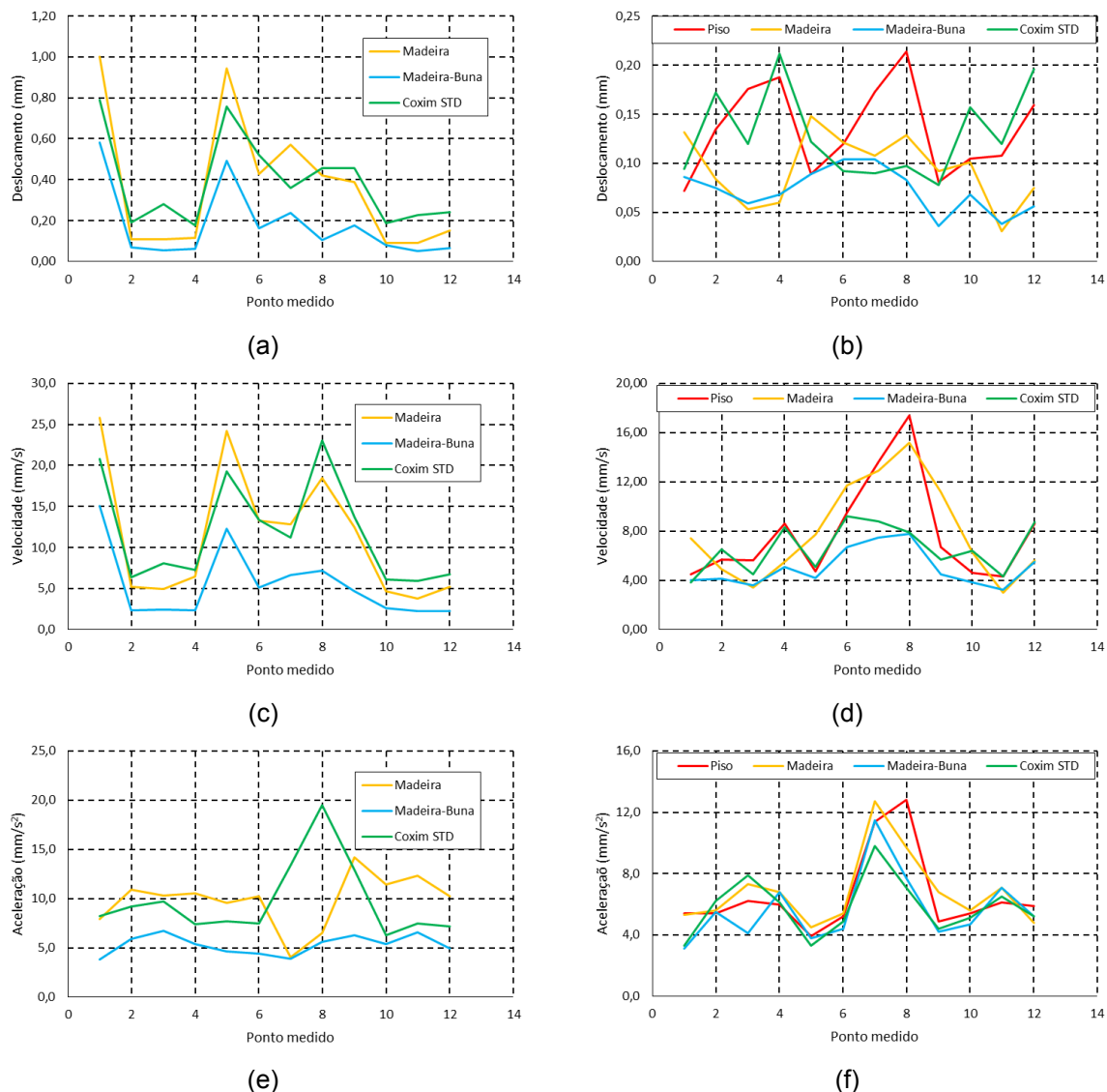


Figura 7. Resultados adimensionais da medição da vibração nos dois equipamentos (C-1 e C-2), obtidos nos quatro métodos de fixação (piso, madeira, madeira/Buna e coxins).

REFERÊNCIAS

- 1 VASCONCELOS, D. C. LEAN E GREEN: A contribuição da produção enxuta e da gestão ambiental para a redução de desperdícios. Dissertação (Mestrado): Programa de Pós-Graduação em Administração e Controladoria Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

- 2 ASSUNÇÃO, T. M. R. C. Considerações sobre Efeitos Dinâmicos e Carregamentos Induzidos por Fonte de Excitação em Estruturas Industriais. Dissertação (Mestrado): Programa de pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- 3 ARATO JÚNIOR, A. Manutenção Preditiva - Usando Análises de Vibrações. São Paulo: Manole. 2003.
- 4 BARBETTI, M. R. S. Estudo comparativo entre coxim hidráulico e coxim elastomérico aplicados ao sistema de apoio do motor automotivo. Dissertação (Mestrado): Programa de pós-graduação Profissionalizante em Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.
- 5 ISO 2372. Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards. ISO - International Organization for Standardization, ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures. 1974.
- 6 ISO 20816-1. Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines. ISO - International Organization for Standardization. ISO/TC 108 Mechanical vibration, shock and condition monitoring. 2016.