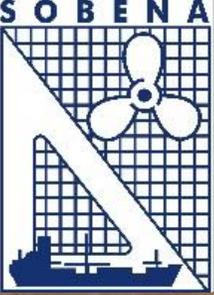


Vibrações em empurradores fluviais: medições, avaliação e minimização e minimização de problemas

Carlos Daher Padovezi
Felipe Santos de Castro
Flávio Silveira

*Palestra apresentada no SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE
TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR, 13.,
2023, Belém. 20 slides*

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. REPRODUÇÃO PORIBIDA



13º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Belém/PA, 30 de outubro a 1º de novembro de 2023



Vibrações em empurradores fluviais – medições, avaliação e minimização de problemas

Carlos Daher Padovezi, Engenheiro Naval, Doutor, IPT, padovezi@ipt.br

Felipe Santos de Castro, Engenheiro Naval, Mestre, IPT, fscastro@ipt.br

Flávio Silveira, Engenheiro Mecânico/Naval, Beconal, flavio@beconal.com.br



VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES FLUVIAIS

Vibração excessiva em uma embarcação?

Alguns indicadores (sintomas):

- Há existência de desconforto a bordo,
- Há aparecimento de trincas em estruturas,
- Há falhas repetidas em equipamentos, por exemplo, componentes eletrônicos de bordo.

Nestes casos, é recomendada a realização de uma análise das vibrações envolvidas, em um processo que deve se iniciar pelas medições das frequências e intensidades das vibrações nos locais com problemas.



FONTES DE VIBRAÇÕES

Para realizar a análise das vibrações, deve ser feito o mapeamento das possíveis fontes de excitação de vibrações a bordo da embarcação.

No caso de empurradores fluviais, por haver potências relativamente grandes em comprimentos totais reduzidos, as fontes de vibrações mais importantes são duas:

- *as fundações dos motores principais e*
- *a interação entre propulsores e estruturas das popas.*

Assim, as frequências prováveis de vibrações que serão encontradas nos vários compartimentos, ou em locais abertos do convés principal, serão frequências iguais ou de algum harmônico das frequências geradas pelos motores, e transmitidas por suas fundações, e das frequências geradas pelos propulsores em ação nas proximidades do casco

Se houver frequências ressonantes com as frequências de uma das duas fontes principais de vibrações, em alguma parte da estrutura do casco, haverá amplificação do nível de vibração.

PRATICAMENTE TODA A VIBRAÇÃO A BORDO É GERADA PELA OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO DOS EMPURRADORES FLUVIAIS

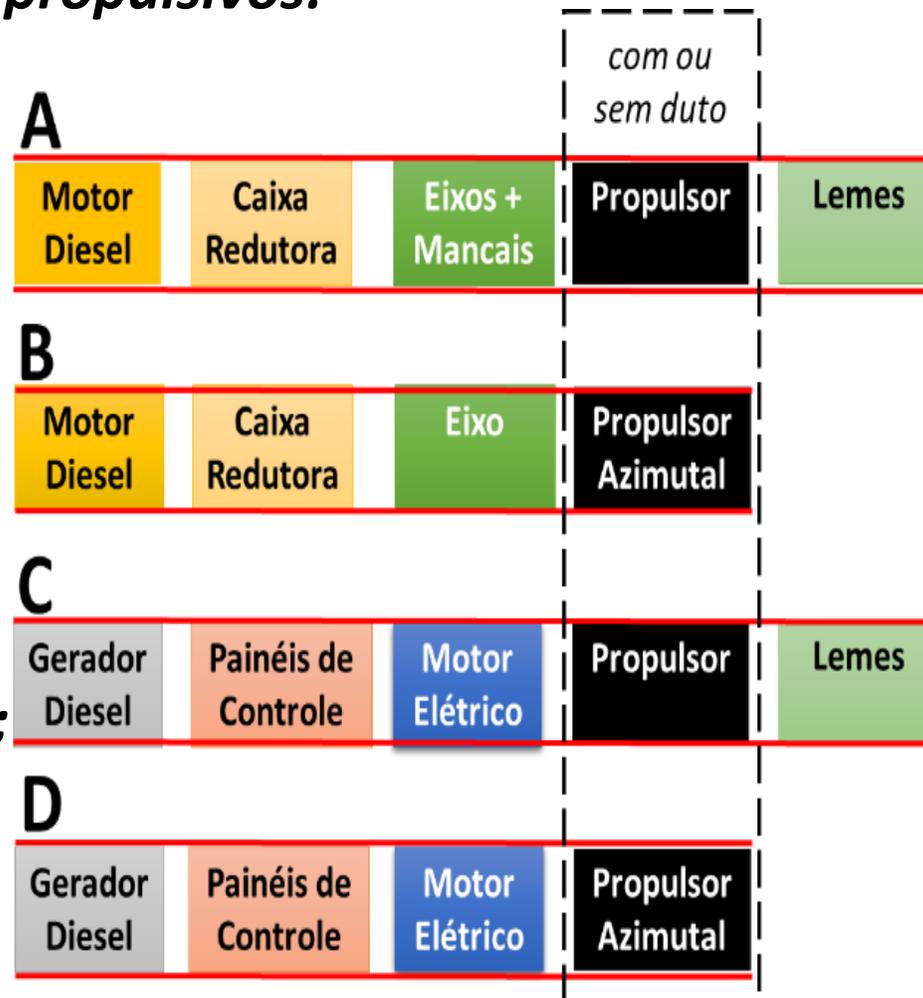
Quatro configurações principais dos sistemas propulsivos:

A. Motor Diesel + Propulsão convencional;

B. Motor Diesel + Propulsão azimutal;

C. Motor Elétrico + Propulsão convencional;

D. Motor Elétrico + Propulsão azimutal.



FREQUÊNCIAS MAIS IMPORTANTES DE EXCITAÇÃO DE VIBRAÇÕES

- a) Frequência das passagens das pás junto ao fundo da popa do casco (= rps x número de pás dos propulsores);***
- b) Frequência resultante do giro dos motores, transmitida pelas fundações ao casco;***
- c) Frequência resultante do giro do eixo propulsor, após a caixa de redutora.***

A frequência de excitação dos hélices (passagem das pás) é dada pela seguinte relação: $f_n = n \cdot z \cdot \Omega$
em que f_n é a frequência de excitação correspondente ao n -ésimo harmônico, n é o harmônico, z é o número de pás e Ω é a rotação do hélice.

A frequência de excitação dos motores é dada pela relação: $f_n = n \cdot \omega / 2$
sendo n o harmônico e ω a rotação do motor.

A frequência de excitação dos eixos é dada pela relação: $f_n = n \cdot \alpha$
onde n é o harmônico, e α é a rotação do eixo.



PROBLEMAS DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

Problemas de vibrações que podem ocorrer no casco de empurradores, na estrutura da popa, dos conveses e na superestrutura. Tabela adaptada de NOONAN et al (1990).

<i>Causa</i>	<i>Frequência</i>	<i>Correção</i>
fluxo deficiente para os propulsores	pás, alguns harmônicos	aumento da clara dos hélices, alterações dos propulsores
cavitação excessiva	pás, harmônicos altos	alterações dos propulsores
ressonância de parte do casco com forças de excitação dos propulsores	eixo ou pás, ou 2 x pás	troca de número de pás, troca de RPM do eixo, reforço da parte do casco
ressonância da superestrutura ou do convés com frequências de excitação dos motores	rotações dos motores e harmônicos	reforço da estrutura, alteração das fundações dos motores, evitar frequências ressonantes
desbalanceamento da massa dos propulsores	eixo ou pás	balanceamento dos propulsores
desbalanceamento dos passos ou cordas dos propulsores	eixo ou 2 x eixo	reparo ou troca dos propulsores



PROBLEMAS DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

A clara do propulsor, definida como a distância mínima entre a ponta das pás e o fundo da popa do casco, deve ter um valor mínimo para evitar forças excessivas no casco, que poderiam gerar vibrações importantes. No caso de empurradores fluviais, onde as restrições de calados são determinantes, há uma tendência de utilizar os maiores diâmetros possíveis, diminuindo as claras em valores próximos dos limites onde as vibrações induzidas pelo propulsor podem tornar-se inconvenientes e danosas.

O limite inferior de clara seria 25% do diâmetro, para qualquer tipo de embarcação com hélices sem dutos. Mas, é extremamente difícil adotar tal clara em embarcações fluviais de calados restritos.

Há vários casos de empurradores fluviais em operação que têm clara da ordem de 10% do diâmetro do hélice, sem relato de vibrações importantes no casco.

Em alguns outros empurradores, claras menores que 10% do diâmetro têm causado problemas sérios de vibrações.



PASSOS PARA ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE VIBRAÇÕES

Em resumo, em embarcações fluviais em operação que apresentam problemas de vibrações:

- a) verificar possíveis causas (clara hélice-casco insuficiente, cavitação excessiva, arranjo da popa da embarcação, desbalanceamentos de eixos e de propulsores);***
- b) verificar a possibilidade de ressonância de alguma parte da estrutura com frequências de excitação, ou seus harmônicos;***
- c) estudar a proposição de ações para minimização das vibrações locais, por exemplo, enrijecendo a estrutura.***



EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

Possibilidade de Ressonância em Antepara

Verificação por modelo em Elementos Finitos e Medições

Habitabilidade a Bordo

Medições de vibrações em compartimentos do empurrador, segundo a norma ISO 20283-5:2016(E)

Vibrações Torcionais

Medições completas no sistema propulsor: torques nos eixos, temperaturas dos mancais; vibrações nas bases dos mancais e demais pontos importantes.

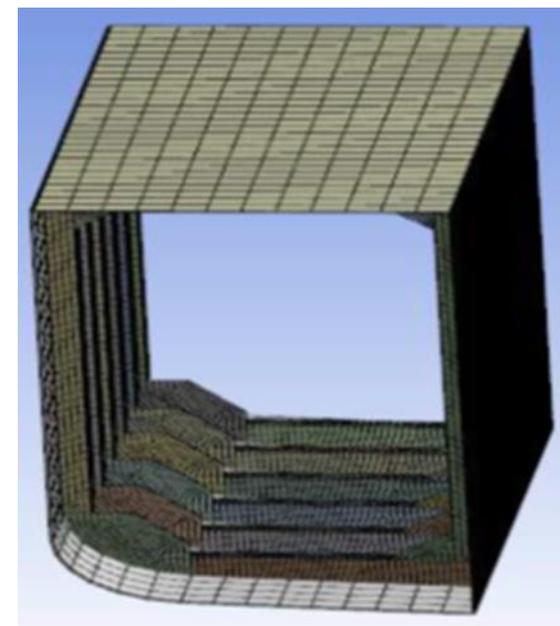
EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

Possibilidade de Ressonância em Antepara

Foi realizada, por meio de acelerômetros, a medição da frequência natural da antepara longitudinal de um tanque de óleo da embarcação, assim como foram feitas medições das frequências de excitação de vibrações. Também foi elaborado um modelo em Elementos Finitos

Como resultado principal, verificou-se que o terceiro harmônico da frequência do hélice, ou passagem das pás (58,8 Hz), era muito próximo da frequência natural do primeiro modo de vibrar da antepara do tanque (60,94 Hz).

Recomendou-se, assim, que a frequência natural da antepara fosse elevada por meio do enrijecimento do painel, acrescentando-se reforçadores à estrutura.



EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

Habitabilidade a Bordo

Medições de vibrações em um empurrador tri-hélices, com potência total de 3.500 hp e rotação nominal dos motores de 1.450 RPM. Propulsores livres (sem dutos), com 4 pás. Foram medidas vibrações, seguindo a norma ISO 20283 (2016), nos seguintes aposentos: refeitório, sala de descanso e passadiço.

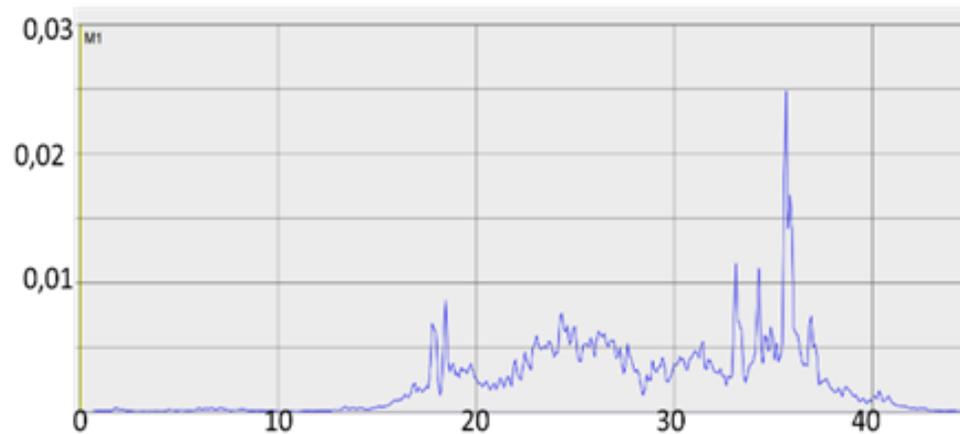
As frequências de vibrações medidas foram iguais às frequências de passagens de pás, nas direções longitudinal e transversal na sala de descanso e foram iguais ao dobro das frequências de passagens de pás na direção vertical no refeitório e no passadiço

No passadiço, os valores obtidos de acelerações foram abaixo do valor limite recomendado pela norma ISO, de 179 mm/s^2 . Nos compartimentos refeitório e sala de descanso, os valores medidos de acelerações r.m.s foram acima daqueles indicados como limite superior na norma ISO: no refeitório, obteve-se 197 mm/s^2 e, na sala de descanso, mediu-se 188 mm/s^2 (a norma ISO indica, como limite máximo para habitabilidade em aposentos com tripulantes, 125 mm/s^2). A providência adotada foi enrijecer a estrutura dos dois compartimentos, a fim de reduzir os níveis locais de vibrações



VIBRAÇÕES MEDIDAS EM REFEITÓRIO DE EMPURRADOR FLUVIAL

Habitabilidade a Bordo



Análise da vibração medida no piso do refeitório, direção vertical. O pico coincide com o segundo harmônico da frequência de passagem das pás (36,3 Hz). Abscissa em Hz e ordenadas em g ($1\text{ g} = 9.870\text{ mm/s}^2$).



Reforço estrutural em instalação no refeitório do empurrador.

EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES EM EMPURRADORES

Vibrações Torcionais

Em um empurrador fluvial com três propulsores azimutais, foram realizadas medições completas no sistema propulsivo. Foram instalados torquímetros com *strain-gages* nos eixos propulsores, a fim de medir potências nos eixos Cardan e possíveis vibrações torcionais, e foram instalados acelerômetros e medidores de temperaturas em todos os mancais

As medições, em várias condições operacionais, indicaram que não ocorriam grandes forças nos mancais, mas que ocorriam níveis de vibrações altos devido a vibrações auto excitadas por conta da existência de eixos Cardan e de possíveis desalinhamentos dos mancais. Ocorriam também vibrações indiretas relacionadas com as fundações dos mancais das linhas de eixos. Neste caso, havia indicação de baixa rigidez estrutural, que deveria ser reparada.

Ao final, recomendou-se que, para evitar tanto vibrações excessivas como superaquecimento dos mancais, deveriam ser providenciados reforços estruturais nos painéis das bases dos mancais das três linhas de eixos, assim como deveria ser realizado um realinhamento dos mancais das linhas de eixos.



Obrigado!

- Carlos Daher Padovezi
- padovezi@ipt.br

 [linkedin.com/school/iptsp/](https://www.linkedin.com/school/iptsp/)

 [instagram.com/ipt_oficial/](https://www.instagram.com/ipt_oficial/)

 [youtube.com/@IPTbr/](https://www.youtube.com/@IPTbr/)

www.ipt.br

 **ipt**
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

 **SÃO
PAULO**
GOVERNO
DO ESTADO