

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**PME 3380 - MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS**

**PROPOSTA DE TRABALHO – T0**

**Aluno:**

Caio Shohei Uemura Fujinaka	8040879
Rafael Alves Vicentin	10336316
Tiago Vieira de Campos Krause	9836238

**Docentes:**

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury  
Prof. Dr. Décio Crisol Donha

São Paulo, SP  
2020

# 1. Tema Proposto, Motivações e Objetivos

## 1.1. Tema Proposto

O tema proposto pelo grupo consiste no estudo da modelagem de um trem sobre o efeito de *sloshing* devido aos movimentos da carga fluida em seus vagões.

O efeito de *slosh* é o fenômeno de transferência de carga por movimentação de líquido levando a alteração das diversas condições de operação como por exemplo a localização do centro de gravidade e distribuição das cargas dentro do vagão.

Os principais determinantes da amplitude do efeito de *slosh* são: (i) a amplitude do movimento do recipiente; (ii) a frequência do movimento do recipiente; (iii) a geometria do recipiente; e (iv) as propriedades do fluido.

## 1.2. Motivações

A importância da malha ferroviária no desenvolvimento econômico de um país se mostra como um tema clássico abordado por diversos livros e artigos, tanto para o transporte de cargas como de pessoas devido à redução de custos privados e sociais quando comparados aos custos do transporte rodoviários (VILLAR, 2006). Essa importância se mostra ainda maior em um país como o Brasil, de dimensões continentais, com foco na exportação de *commodities*, e com uma dependência grande da malha rodoviária.

Esses fatores se tornaram mais aparentes durante a greve dos caminhoneiros ocorrida em maio de 2018, deixando claro a importância de se desenvolver alternativas de transporte dentro do país.

Levando em consideração a geografia do país, os fatos históricos, os últimos acontecimentos que expuseram a deficiência do setor ferroviário no país e o foco futuro do governo em realizar investimentos no segmento de transporte ferroviário, alinhado também com o grande fluxo de transporte de grãos líquido que poderiam ser destinados a malha ferroviária torna-se de extrema importância o estudo dos efeitos do fenômeno de *slosh* sobre os vagões de trens e inclusive a modelagem do comportamento destes perante tais fenômenos.

## 1.3. Objetivos

Conforme apresentado nas seções anteriores o objetivo do trabalho consiste na modelagem e estudo do comportamento dos vagões de trem sob o efeito de *sloshing* ao longo de sua trajetória longitudinal, bem como os efeitos adversos gerados pela aceleração e frenagem durante o trajeto.

Com base na modelagem e posteriores simulações de comportamento realizadas será possível identificar pontos de atenção nos projetos de trens para o transporte de fluidos, servindo como uma referência importante para o estímulo ao desenvolvimento do transporte de grãos líquidos através da malha ferroviária.

# 2. Revisão Bibliográfica

Para o estudo da relevância do tema e da correta modelagem do sistema inicial foi realizada uma revisão bibliográfica envolvendo livros e artigos publicados sobre o assunto, os principais são comentados e contextualizados abaixo, sendo eles utilizados como base para elaboração de todo trabalho subsequente:

Em (BARBOSA, 1993) o autor realiza um estudo aprofundado da dinâmica longitudinal do trem, passando por toda contextualização dos componentes e suas funções até a determinação do modelo físico e matemático, culminando na realização de simulações e análise dos resultados obtidos de acordo com os modelos adotados. O trabalho foi fundamental para estabelecer uma fundação sólida sobre a dinâmica longitudinal do trem, e apesar de não abordar o efeito de *slosh* serviu como base para a definição do modelo físico a ser adotado nesse trabalho.

Em (IWNICKI, 2006) é apresentada uma complexa revisão sobre dinâmica longitudinal em trens, na qual são comentados e derivados os principais modelos físicos e considerações matemáticas adotadas para os componentes do modelo, sendo inclusive apresentada a modelagem matemática de um trem com  $n$ -vagões. O autor enfatiza também os efeitos e impactos da aceleração e frenagem, os quais serão levados em consideração no presente trabalho.

Em (ABRAMSON, 1996) observa-se as primeiras tentativas de simulação do efeito de *slosh* utilizando analogia a componentes mecânicos com parâmetros simples e complexos para tanques cilíndricos e retangulares. Essas analogias foram também documentadas e apresentadas em (IBRAHIM, 2005) de forma generalizada para qualquer formato de recipiente. A abordagem de analogia mecânica, apresentada nas duas referências acima é inclusive a que será utilizada para o presente trabalho, no qual as partes móveis do fluido são modeladas por séries de sistemas massa-mola-amortecedor, conforme será melhor detalhado nas seções subsequentes.

Em (TSUKAMOTO, 2010) utiliza-se e compara-se dois métodos para a modelagem analítica do efeito de *sloshing*, uma usando campo de velocidades e outra utilizando a analogia de sistema mecânico previamente mencionada, obtendo-se forças equivalentes às obtidas no modelo de campo de velocidades e chegando a um sistema equivalente simplificado.

Em (KOLAEI, 2014) foca-se na revisão da literatura sobre o efeito de *slosh* em caminhões tanque e a aplicabilidade dos modelos mais comumente adotados para simulação, bem como as limitações dos métodos adotados. Apesar do escopo diferenciar do objetivo deste trabalho serviu como forma de contextualizar sobre as premissas e limitações importante de cada método adotado.

Além das bibliografias teóricas apresentadas acima foram também consultados os sites da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) a fim de levantar informações sobre a legislação específica do setor, bem como sites de operadores logísticos e de fabricantes de equipamentos para o levantamento das especificações técnicas necessárias.

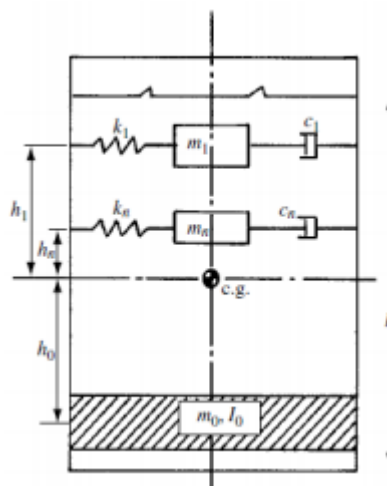


Figura 1: Modelo de analogia a componentes mecânicos. (Fonte: IBRAHIM, 2005)

### 3. Modelos Físico

O modelo físico irá considerar as seguintes variáveis de interesse: (i) efeitos do fenômeno de *sloshing* no deslocamento linear longitudinal dos vagões do trem; e (ii) influência de frenagem e aceleração dos vagões sobre ele. Além disso, para a aplicação da analogia a componentes mecânicos adotam-se as seguintes hipóteses simplificadoras.

Em relação ao fluido:

Para que o sistema de campo de velocidades possa ser substituído pela analogia mecânica, o fluido deve ser considerado incompressível, invíscido e irrotacional. Além disso, o fluido é puro, monofásico e sua disposição respeita às condições de superfície livre, ou seja, existe um espaço não preenchido pelo fluido entre sua superfície superior e a superfície superior interna do tanque. Desconsidera-se efeitos que não o de *sloshing* agindo sobre o fluido.

Em relação ao vagão:

Seguindo as referências, admite-se um tanque retangular bidimensional de massa  $M_0$  sujeito à forças devido ao *sloshing* calculadas em função de sua largura  $B$ , seu nível de preenchimento  $H$ , além da frequência e amplitude de excitação à qual o tanque está sujeito.

Para simplificar a análise do modelo, será desconsiderado o efeito das suspensões primárias e secundários entre o truque e os vagões. Dessa forma, o movimento de arfagem e suas implicações não será considerado nesse trabalho.

Em relação às influências externas:

Considera-se o movimento dos vagões como unidirecional, não havendo inclinação, perturbações ou curvaturas no trajeto. Desprezam-se escorregamentos no contato entre o trilho e as rodas do vagão, estando ele sujeito apenas às forças de resistência, de frenagem e de aceleração.

As forças de resistência são provenientes do atrito advindo do contato entre os frisos da roda e o trilho, da resistência ao rolamento causada pela deformação da roda e pelos atritos nos mancais da roda. As forças de aceleração e de frenagem são representadas pela  $F_{motora}$  na *Figura 2*, sendo ela variável ao longo do tempo e de magnitude definida ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Além disso, considera-se que tanto as forças de resistência quanto as forças de aceleração e de frenagem podem ser aplicadas diretamente nos respectivos tanques como ilustrado na *Figura 2*.

A analogia fluido-mecânica aplicada define as forças e momentos geradas pelo efeito de *sloshing* em um tanque equivalente às forças geradas por uma massa de *sloshing* fixa e um conjunto infinito de massas-mola-amortecedor como visto na *Figura 1*. A fim de analisar a junção entre os vagões transportados no trem, por considerar-se um ponto de atenção no projeto, serão considerados dois vagões sob o efeito de *sloshing* conectados um ao outro, obtendo-se o seguinte modelo físico.

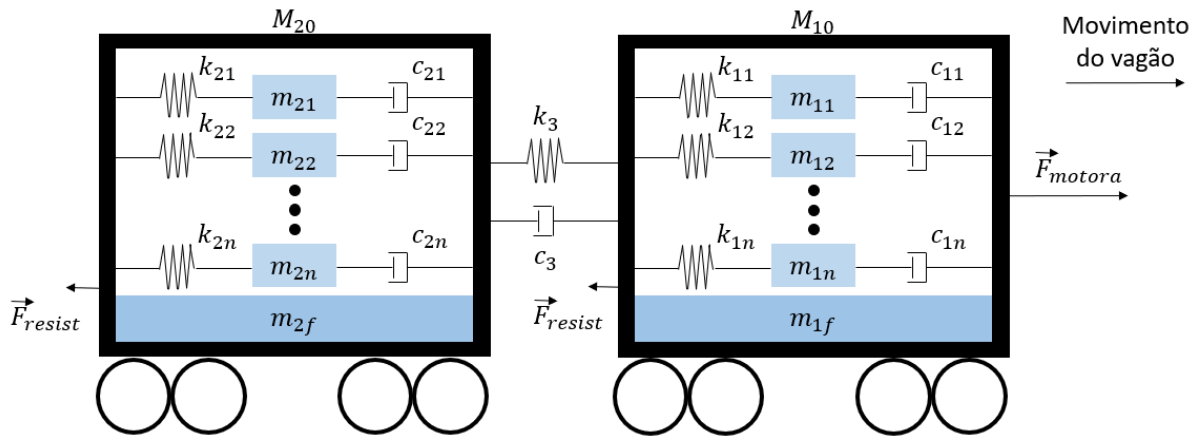


Figura 2: Modelo físico usando analogia fluido-mecânica a ser analisado. (Fonte: Autor)

As massas, constantes de elasticidade e constantes de amortecimento dentro de cada tanque são determinadas, seguindo o modelo aplicado de acordo com IBRAHIM, a partir da frequência natural de modo  $i$  do fluido ( $\omega_i$ ), a respectiva massa distribuída em cada modo ( $m_i$ ), representadas na Figura 2 por  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ , ...,  $m_{1n}$  e  $m_{21}$ ,  $m_{22}$ , ...,  $m_{2n}$  e da razão entre altura total de fluido no tanque e a largura do tanque ( $\frac{H}{B}$ ).

Os parâmetros das forças de resistência, assim como a magnitude da força motora serão definidos futuramente.

#### 4. Referências Bibliográficas

- VILLAR, L. B. Dimensionamento do Potencial de Desenvolvimento do Setor Ferroviário – BNDES – 2006.
- IWICKI, Simon; Handbook of Railway Vehicle Dynamics – Taylor & Francis Group, LLC – 2006.
- BARBOSA, Roberto Spinola; Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem – Unicamp – 1993.
- IBRAHIM, Raouf. A.; Liquid Sloshing Dynamics – Cambridge University Press – 2005.
- ABRAMSON, H. Norman, The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, with applications to space vehicle technology – Southwest Research Institute – 1996.
- KOLAEI, Amir, Dynamic Liquid Slopsh in Moving Containers – Concordia University – 2014.
- TSUKAMOTO, Marcio Michiharu; Modelagem analítica e simulação numérica de um sistema móvel de supressão de sloshing – Universidade de São Paulo – 2010.