

# Monitoramento e Simulação Numérica do Comportamento Dinâmico do Sistema Trem–Ferrovia

---

Prof. Flávio Barbosa

Abril/2026

Universidade Federal de Juiz de Fora

IPR+ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes



Projeto: Desenvolvimento de Estratégias SHM para Ferrovias

## Equipe - por ordem alfabética

Prof. Alexandre Cury - UFJF  
Eng. M.Sc. Bruno Roseno - UFJF  
Eng. M.Sc. Clayton Silva - UnB  
Eng. M.Sc. Daniel Cardoso - UFJF  
Eng. Delvined Souza - RUMO  
Prof. Flávio Barbosa - UFJF  
Eng. Marcos Spinola - UFJF  
Prof. Rafael Silva - UnB  
Eng. M.Sc. Ricardo Vidal - UFJF  
Eng. D.Sc. Rharã Cardoso - UFJF  
Eng. Richard Pereira - UFJF

Introdução

Trecho Nova Odessa

Trecho Limeira

Desafios

# Introdução

---

# Contexto Ferroviário Brasileiro

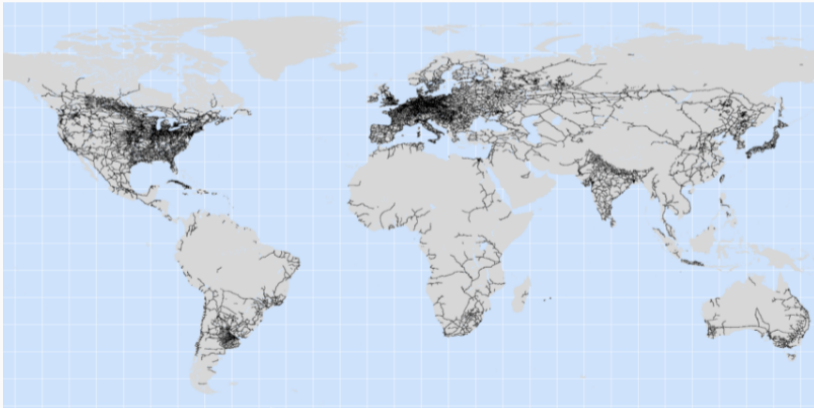
- Malha ferroviária nacional: >30 000 km
  - nono lugar
  - atrás da Argentina e à frente da França

1	 Estados Unidos	293.564
2	 China	124.000
3	 Rússia	87.157
4	 Canadá	77.932
5	 Índia	68.525
6	 Alemanha	43.468
7	 Austrália	36.967
8	 Argentina	36.917
9	 Brasil	30.600
10	 França	29.640

fonte: wikipedia

# Contexto Ferroviário Brasileiro

- Malha ferroviária nacional: >30 000 km
  - nono lugar
  - atrás da Argentina e à frente da França



fonte: [www.massa.ind.br](http://www.massa.ind.br)

## Contexto Ferroviário Brasileiro

- Malha ferroviária nacional: >30 000 km
- Modal ferroviário: apenas 21,5% do transporte de cargas. EUA 80% (vs. 67,6% rodoviário)
- Velocidade média atual: 20–30 km/h
- Meta governamental: elevar para 35% até 2030
- Investimentos 2024: R\$ 14 bilhões (recorde histórico)

# Contexto Ferroviário Brasileiro

- Malha ferroviária nacional: >30 000 km
- Modal ferroviário: apenas 21,5% do transporte de cargas (vs. 67,6% rodoviário)
- Velocidade média atual: 20–30 km/h
- Meta governamental: elevar para 35% até 2030
- Investimentos 2024: R\$ 14 bilhões (recorde histórico)

## Carteira de Projetos - 2026

- 8 leilões ferroviários previstos
  - > 9 000 km de novas linhas
  - R\$ 140 bi em investimentos
  - R\$ 600 bi ao longo dos contratos
- Fonte: Secom - Governo Federal

## O que precisamos ?

- Aumentar a velocidade média  $\Rightarrow$  menos caminhões, menor custo de frete, maior competitividade, melhoria para o meio ambiente.
- Aumentar o volume transportado

## O que precisa ser feito ?

- Construir mais ferrovias (mais e melhor)
- Melhorar o desempenho das ferrovias atuais

## Em que contexto ?

- Malha continental
- Inspeções tradicionais custosas
- Presença de zonas críticas
- Variabilidade geotécnica e climática
- *heavy haul*: eixos  $> 32,5$  tf
- Velocidades médias baixas

## Quais são as ferramentas disponíveis ?

- Simulação numérica;
- Monitoramento de ferrovias/composições;
- SHM - Structural Health Monitoring
- outras... análise de solo, testes laboratoriais, etc

## Ensaaios em trechos específicos

- Inspeções de zonas críticas
- Detecção de anomalias
- Manutenção preditiva
- Verificação das condições de via
- Verificação das condições de OA

## Ensaaios em trechos específicos

- Inspeções de zonas críticas
- Detecção de anomalias
- Manutenção preditiva
- Verificação das condições de via
- Verificação das condições de OA

## Tecnologia Embarcada - Drive-by

- Sensores embarcados
- Monitoramento contínuos
- Grande volume de dados
- Integração com Inteligência Artificial

## Casos apresentados

- Trecho Nova Odessa - RUMO
- Trecho Limeira - RUMO

## Trecho Nova Odessa

---

# Trecho Nova Odessa



# Trecho Nova Odessa



## Objetivos:

- Avaliação da região de transição e obra de arte

trilho

rigidez do lastro

análise modal → modelagem

fator de amplificação dinâmica

## Número de ensaios:

- 14 composições



### Zona de transição

- 2 Câmeras
- 3 LVDTs
- 3 Célula de pressão total
- 8 Medidores de deformação

# Trecho Nova Odessa

## Zona de transição

- Câmeras (Abrir vídeo)

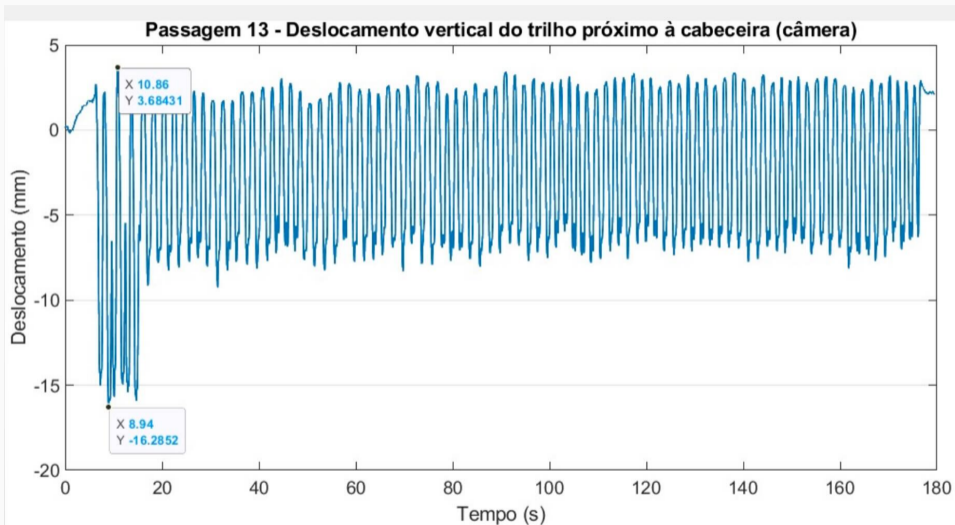


## Zona de transição

- Câmeras
- LVDTs (Abrir vídeo)

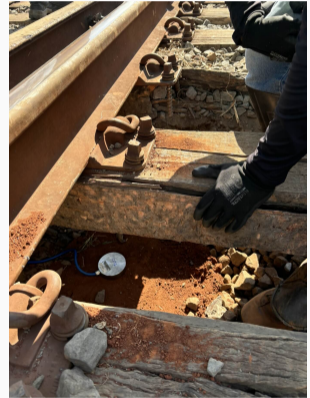


# Trecho Nova Odessa



## Zona de transição

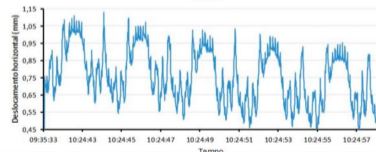
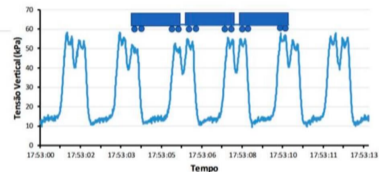
- Câmeras
- LVDTs
- Célula de pressão total



## Zona de transição

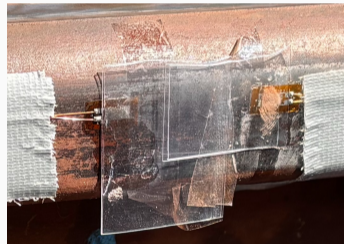
- Câmeras
- LVDTs (Abrir vídeo)
- Célula de pressão total

### Tensões / Deformações



## Zona de transição

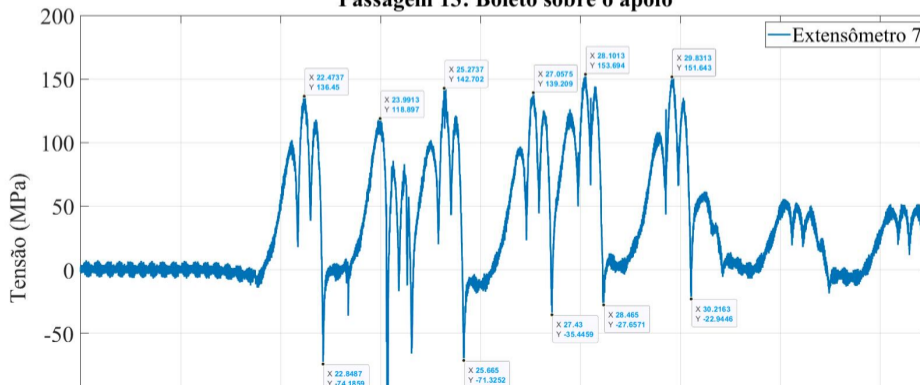
- Câmeras
- LVDTs (Abrir vídeo)
- Célula de pressão total
- Medidores de deformação



## TENSOES NO BOLETO SOBRE O APOIO (MPa)

MAXIMO DAS PASSAGENS DINÂMICAS	MAXIMO DA PASSAGEM 14 (ESTÁTICO)	RAZÃO	TIPO
184,8	174,6	<b>1,06</b>	TRAÇÃO
<b>-144,6</b>	-40,3	<b>3,59</b>	COMPRESSÃO

### Passagem 13: Boleto sobre o apoio



## Viaduto

### TENSOES NA MESA SUPERIOR NO MEIO DO VAO (MPa)

MÉDIA DAS PASSAGENS DINÂMICAS	MÉDIA DA PASSAGEM 14 (ESTÁTICO)	RAZÃO	TIPO
-50,2	-32,5	<b>1,55</b>	COMPRESSÃO

# Trecho Nova Odessa

## Viaduto

- 2 Câmeras
- 6 Acelerômetros uniaxiais  
+ 4 triaxiais
- 8 Medidores de  
deformação

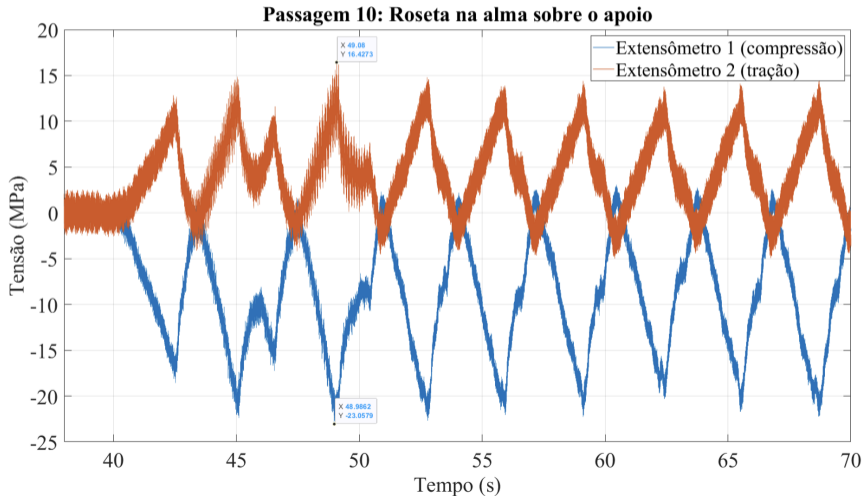


## Viaduto

- Câmeras
- Acelerômetros
- Medidores de deformação

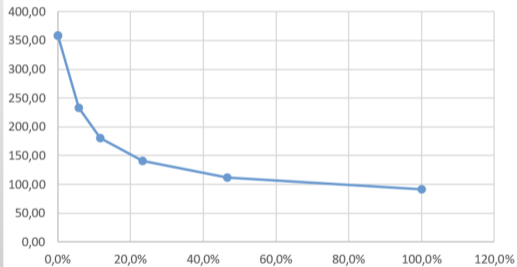


# Tensões Principais na Alma

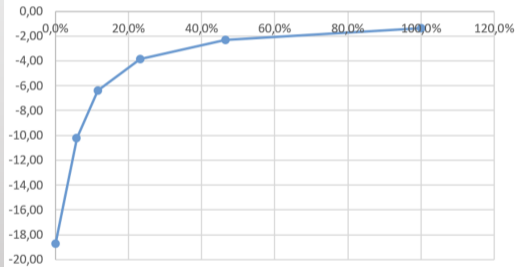


# Trecho Nova Odessa

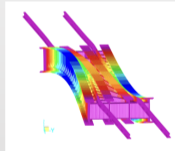
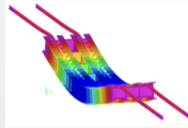
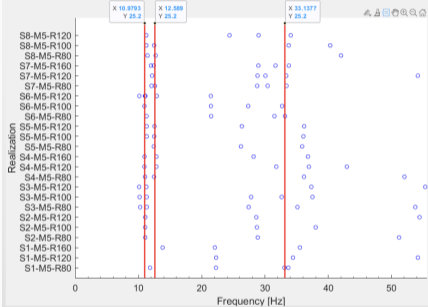
Efeito da Rigidez do Apoio (MPa)



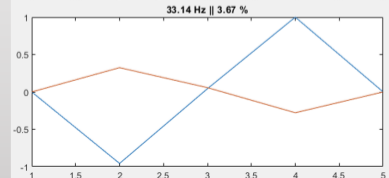
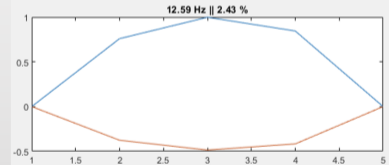
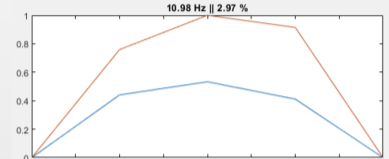
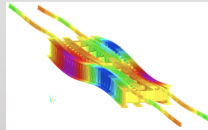
Efeito da Rigidez do Apoio (mm)



## Identificação Modal



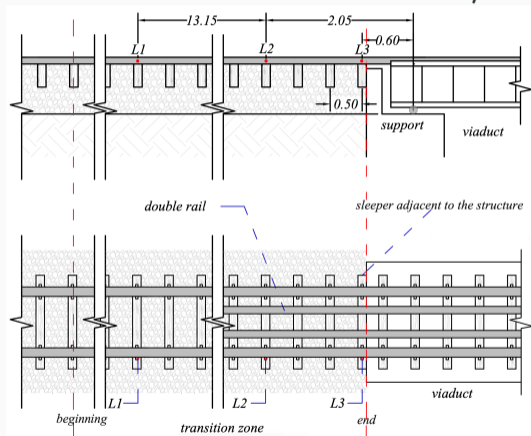
Modo	Frequência Natural (Hz)
1º de flexão	11,0
1º de torção	12,6
2º de torção	33,1



## Modelos Computacionais

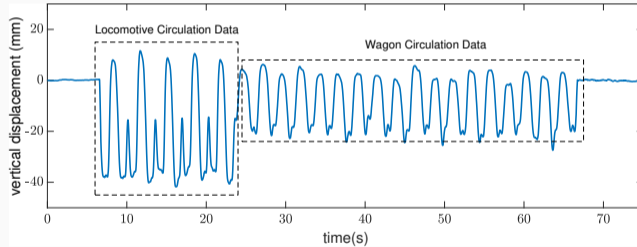
- Deslocamentos no trilho (Abrir vídeo)
- Momentos fletores (Abrir vídeo)

## Modelos Computacionais Desenvolvidos - sistema trem/ferrovia

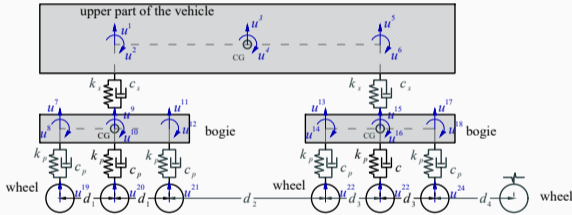


Aceito para publicação: Railway Engineering Science (2026): Model Development and Efficient Calibration of Railway Transition Zones Using

## Resposta típica monitorada

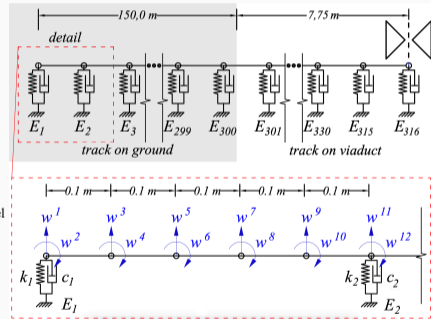


## Modelo da locomotiva



$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{P}(t)$$

## Modelo da via



## Variáveis conhecidas

Parameter	Value
Rail area	86.52 cm <sup>2</sup>
Rail moment of inertia	3921.00 cm <sup>4</sup>
Double rail area	172.04 cm <sup>2</sup>
Double rail moment of inertia	7842.00 cm <sup>4</sup>
Elastic modulus (steel)	210.00 MPa
Density (steel)	7850.00 kg/m <sup>3</sup>
Sleeper spacing	0.50 m
Locomotive dimensions	shown in Figure 5
Distance between locomotives ( $d_4$ )	3.50 m
Damping constants of all railway spring/damper elements	200 kNs/m [30]

## Variáveis desconhecidas

Name	Variable
Spring support stiffness up to the position $x = x_g$ (see Figure 8)	$k_g$
Spring support stiffness on the viaduct (see Figure 8)	$k_v$
Minimum spring support stiffness (see Figure 8)	$k_m$
Transition spring support stiffness (Element $E_{300}$ - see Figure 8)	$k_t$
Primary suspension stiffness	$k_p$
Secondary suspension stiffness	$k_s$
Primary suspension damping	$c_p$
Secondary suspension damping	$c_s$
Start position of the transition zone	$x_g$
First exponent of Equation 3	$exp_1$
Second exponent of Equation 3	$exp_2$

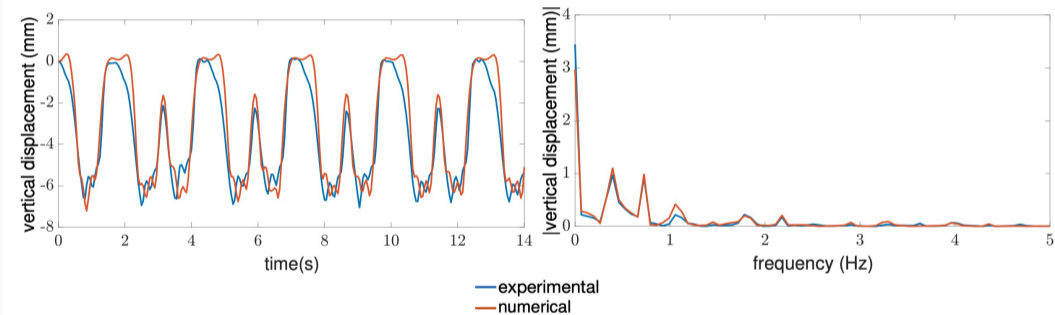
## Otimização

Regressão linear múltipla  
Miminizando a diferença  
entre os deslocamentos  
medidos e os simulados

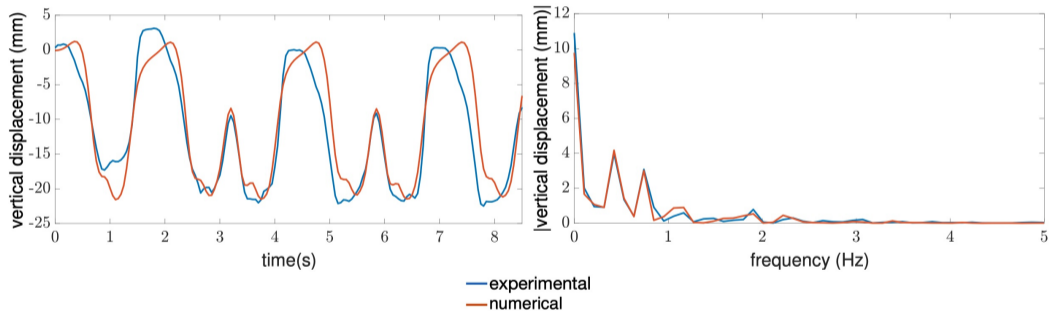
## Variáveis otimizadas

Variable	Optimized value
$k_g$	19.53 MN/m
$k_v$	1060.00 MN/m
$k_m$	306.30 kN/m
$k_t$	490.00 MN/m
$k_p$	7.73 MN/m
$k_s$	30.45 MN/m
$c_p$	59.86 kNs/m
$c_s$	80.62 kNs/m
$x_g$	125.00 m
exp <sub>1</sub>	2.12
exp <sub>2</sub>	2.83

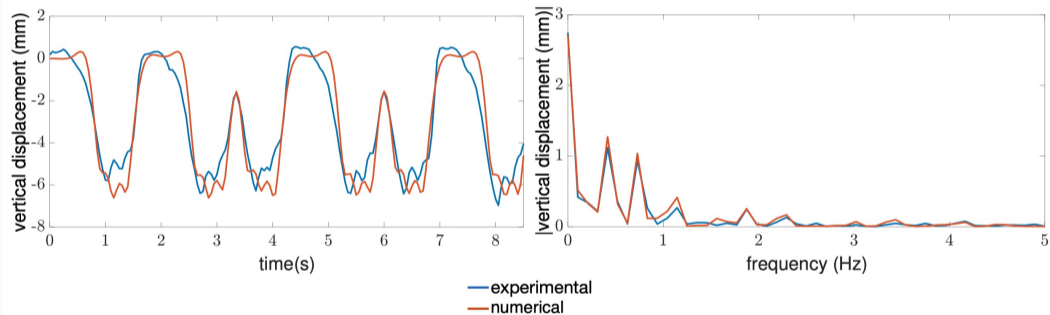
## Passagem 1



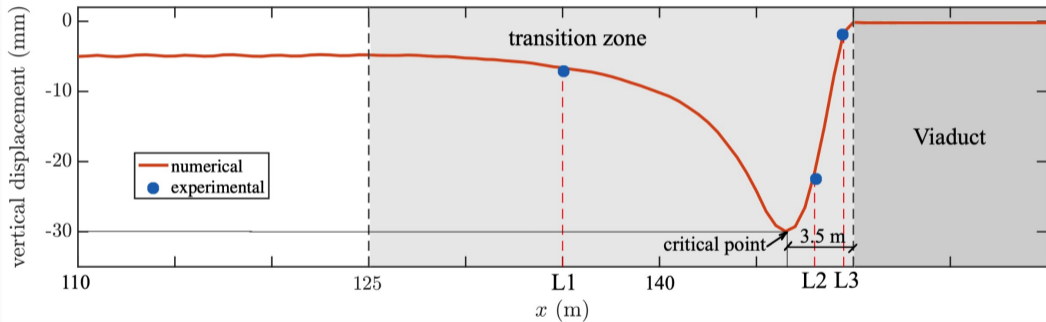
## Passagem 2



## Passagem 3



## Deslocamentos



## Trecho Limeira

---



## Trecho Limeira



## Objetivos:

- Avaliação da região de transição, obra de arte e instrumentação embarcada
- trilho  
rigidez do lastro  
análise modal → modelagem

## Número de ensaios:

- 39 composições

## Zona de transição

- 3 Câmeras
- 3 LVDTs
- 3 Célula de pressão total
- 8 Medidores de deformação

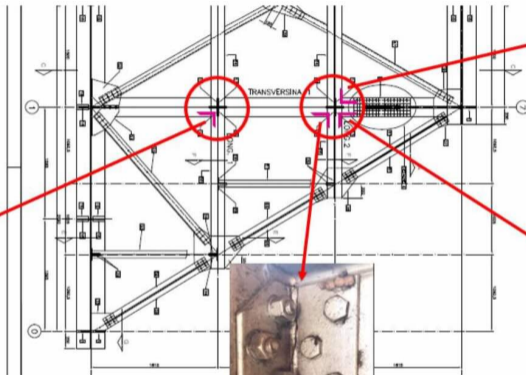
## Viaduto

- Câmeras
- +16 Acelerômetros
- +10 Medidores de deformação

## Locomotiva

- 6 Acelerômetros triaxiais na caixa
- 2 Acelerômetros triaxiais no truque

# Trecho Limeira



## Medições experimentais

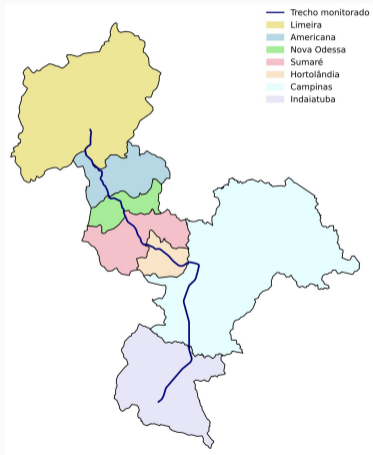
- **Dormente na transição** (Abrir vídeo)
- **Zona de transição** (Abrir vídeo)
- **Trecho de boa qualidade** (Abrir vídeo)



## Modelo computacional do viaduto

- [Tensões normais](#) (Abrir vídeo)
- [Tensões cisalhantes](#) (Abrir vídeo)

## Instrumentação embarcada



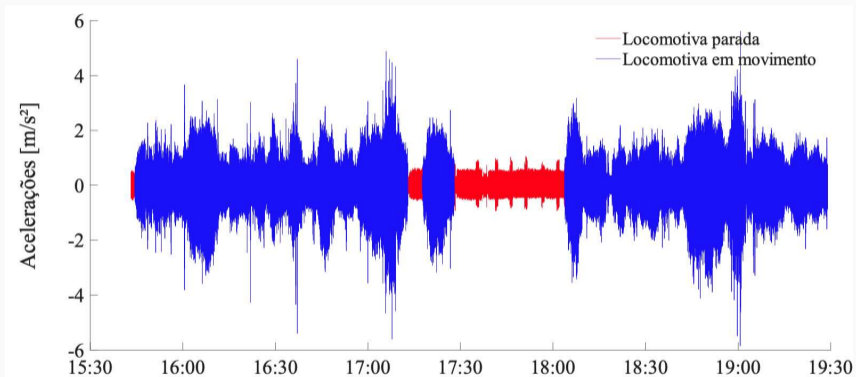
# Trecho Limeira



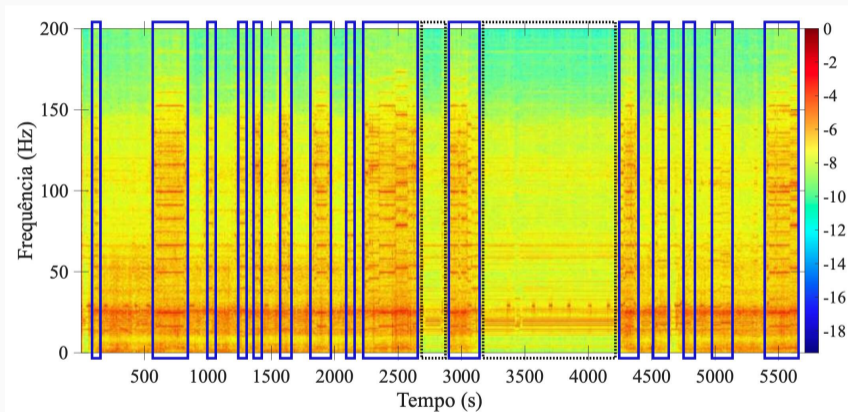
## Trecho Limeira



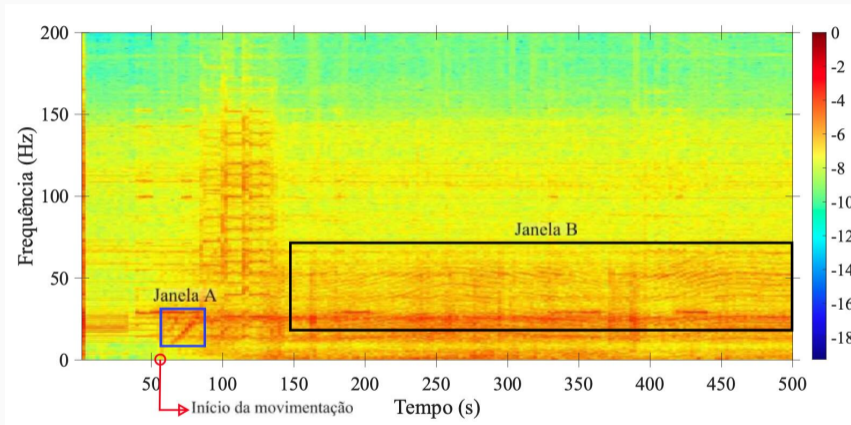
# Trecho Limeira



# Trecho Limeira



# Trecho Limeira



## Desafios

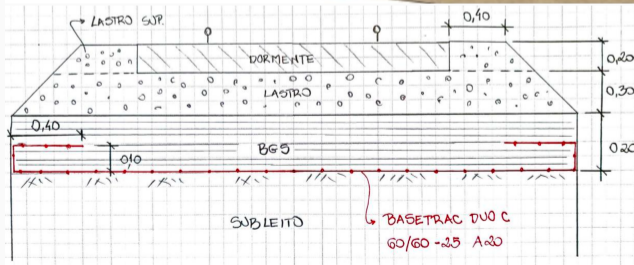
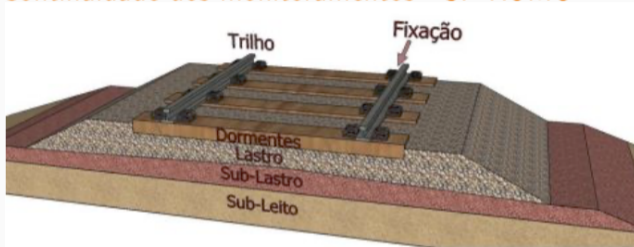
---

# Desafios

- Inferir sobre a qualidade do pavimento a partir de leituras de acelerações do trem
- Uso de IA para identificar áreas degradadas
- Criar modelos computacionais para simulação do sistema trem-ferrovia
- Contribuir com diretrizes para o dimensionamento de pavimento ferroviário
- TED - DNIT/UFJF/IME/U<sub>n</sub>B



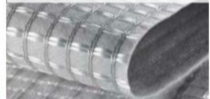
- Continuidade dos monitoramentos - SP-RUMO



## Basetrac Duo-C



## Basetrac Duo



Bidirecional até 75 kN/m  
sem revestimento

- Continuidade dos monitoramentos - SP-RUMO



**Muito obrigado**  
**flavio.barbosa@ufjf.br**

---