



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

# ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SEGURANÇA DE VAGÃO GDE

Guilherme F. M. dos Santos

Denilson Grandó

Álvaro Costa Neto

Roberto Spinola Barbosa



## SUMÁRIO

- Introdução e Objetivos
- Modelagem
- Validação do Modelo
- Análises Dinâmicas
- Análises Paramétricas
- Metamodelo
- Conclusão



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE



## INTRODUÇÃO

- Frota de vagões GDE da Vale: 12000 unidades. Uma das maiores da companhia.
- Certas ocorrências de descarrilamento são fruto da combinação das irregularidades da via permanente e degradação do material rodante.
- Através da modelagem, diversos aspectos do comportamento dinâmico de veículos ferroviários podem ser avaliados, como influência de desgaste ou até mesmo os efeitos das imperfeições na via (veículo/via).
- Possível definir conceitos e estabelecer níveis de desempenho/rentabilidade.
- Obtenção de metamodelo a partir de regressões dos resultados, o qual possibilita estimar instantaneamente a resposta para condições intermediárias às simuladas.

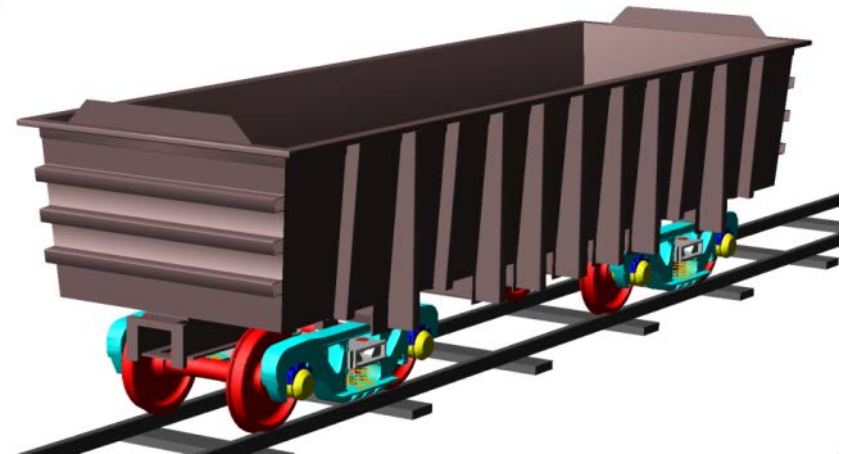
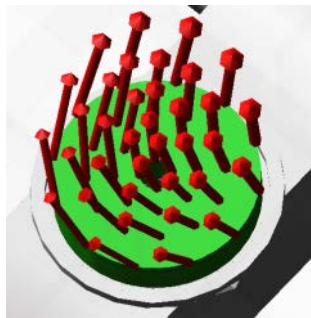
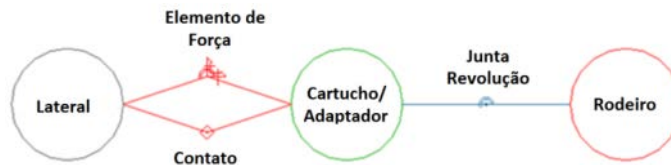
## OBJETIVOS

- Modelagem e Validação do modelo de vagão GDE;
- Estudo do comportamento dinâmico: Norma AAR Cap. XI e Análises Paramétricas;
- Obtenção de Metamodelo.

## MODELAGEM

Modelo dinâmico do vagão GDE confeccionado utilizando a técnica de modelagem de sistemas multicorpos, através do Vi-Rail.

Modelagem detalhada das características elásticas e dissipativas dos elementos de força: pacotes de molas, contato das cunhas de atrito, contato prato e pião, contato ampara balanço, contato dos adaptadores e lateral e o roda-trilho.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

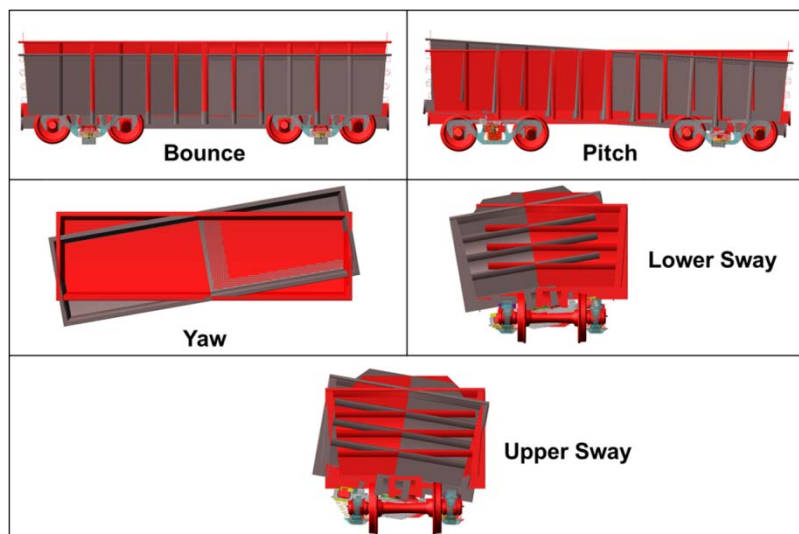
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE



## VALIDAÇÃO DO MODELO

Identificação dos principais modos e respectivas frequências de vibração do sistema modelado e comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Os dados experimentais utilizados foram extraídos de ensaios modais já realizados pela Vale.



Modo	Frequência [Hz]		Desvio [%]
	Modelo	Medição	
<i>Bounce</i>	2,55	2,60	-1,9
<i>Pitch</i>	2,87	2,94	-2,4
<i>Yaw</i>	2,27	2,25	+0,9
<i>Lower Sway</i>	1,09	1,10	-0,9
<i>Upper Sway</i>	4,12	4,17	-1,2

Os resultados obtidos indicam boa correlação do modelo matemático com os dados experimentais. Diferenças inferiores a 3%. Comportamento modal validado!

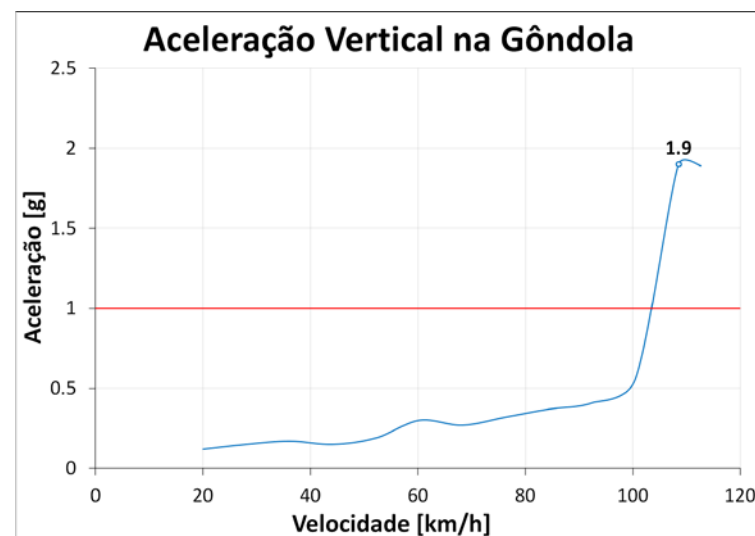
## ANÁLISES DINÂMICAS

O capítulo XI da norma AAR sugere condições virtuais para investigar o comportamento dinâmico de um vagão de carga:

- *hunting*
- *constant curve*
- *spiral*
- *twist and roll*
- *yaw and sway*
- *pitch and bounce*
- *dynamic curving*

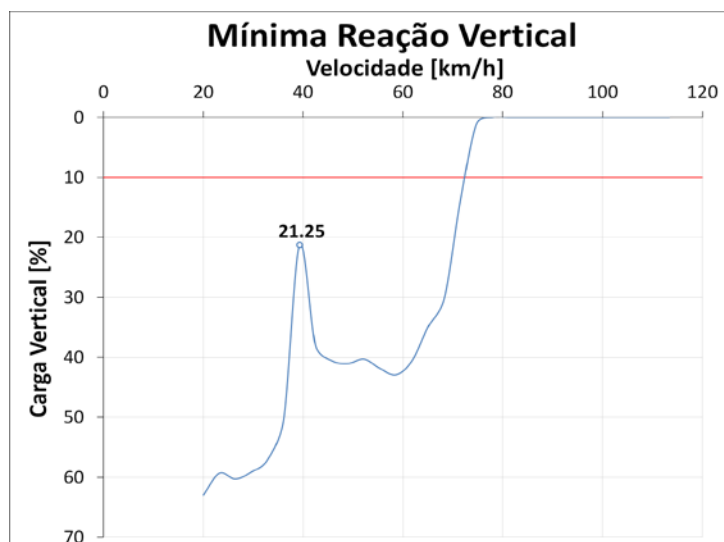
Obs.: » de 12,0 m

***Pitch and bounce***: maior alívio nas rodas para velocidade acima de 100 km/h, devido excitação do *modo de bounce*.

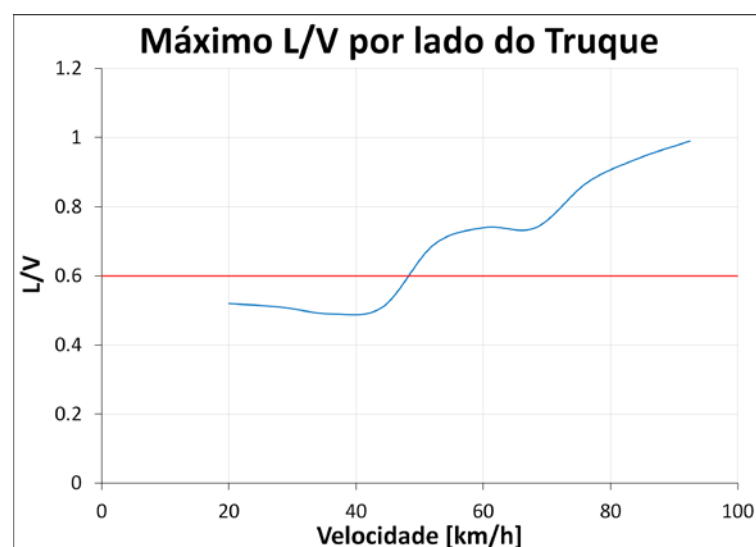


## ANÁLISES DINÂMICAS

**Twist and roll:** amplificação do movimento de rolagem, maior alívio nas rodas para velocidades por volta de 40 km/h.



**Yaw and sway:** Máximo valor de L/V por lado do truque supera a referência da norma para velocidades acima de 50 km/h.



Demais casos que ultrapassaram o limite da norma se enquadraram dentro da exceção de 50 msec de duração da ocorrência.

ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

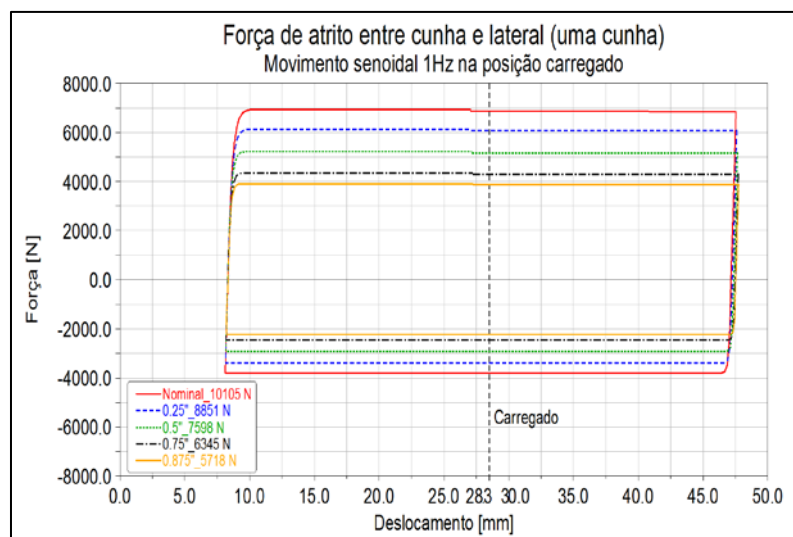
Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE



## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

### Definição dos parâmetros:

- **Folga do ampara-balanço:** 4,00, 5,20, **6,35**, 7,50, 8,70 e 10,0 mm;
- **Pré-carga nas cunhas em função do desgaste (altura):** nominal e desgaste de 0,25", 0,50", 0,75", 0,875" e 1,0";
- **Rigidez das molas:** 100%, 90%, 80% e 70% do valor nominal de molas AAR D3;
- **Velocidade de tráfego:** nominal de 60 km/h, com variação de +/- 5 km/h.





## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

**Definição das Vias (» crítico para velocidade operacional de 60 km/h):**

- **Pitch and bounce** – » = 6,5 m, amplitude de 13,4 mm, 70% do nominal AAR;
- **Yaw and sway** – » = 12,0 m, amplitude de 8 mm, 25% do nominal AAR;
- **Twist and roll** – » = 18,7 m, amplitude de 7,1 mm, 37,5% do nominal AAR;
- **Yaw and sway** – » = 18,7 m, amplitude de 12 mm, 37,5% do nominal AAR.

**Espaço amostral:** Elaboração do espaço amostral para cada via anterior realizada com auxílio do algoritmo de Monte Carlo. Gerados 4 espaços amostrais com respectivamente 97, 35, 61 e 63 casos de diferentes combinações de valores.

**Métricas avaliadas:** Conforme norma AAR, por exemplo:

- Mínima Reação Vertical na Roda [%];
- Máxima Carga na Mola [%];
- Máxima soma L/V no Rodeiro, etc...



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

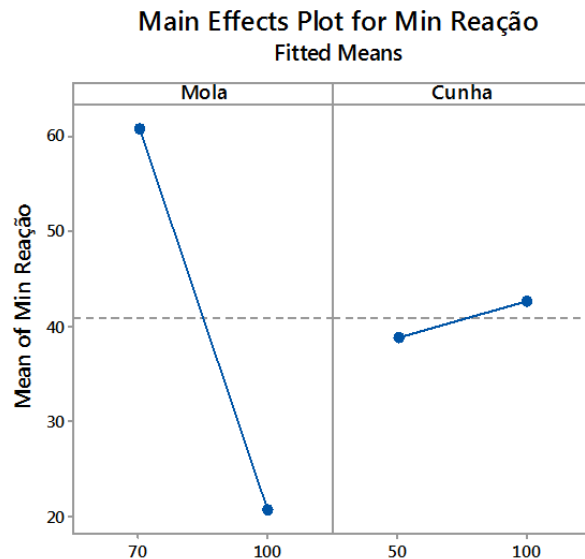
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE

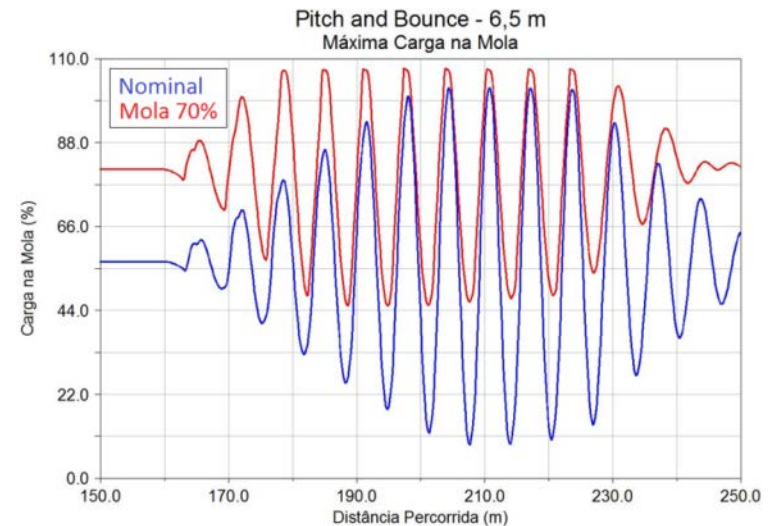


## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

**Pitch and bounce:** associação entre cunhas novas e molas menos rígidas proporcionou bom comportamento para a mínima reação vertical no contato roda/trilho.



Porém, molas menos rígidas aumentam a probabilidade de incidência de mola sólida. Mola com 70 % da rigidez nominal trabalha com 80 % da sua capacidade, enquanto que a nominal apenas 50 %.



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

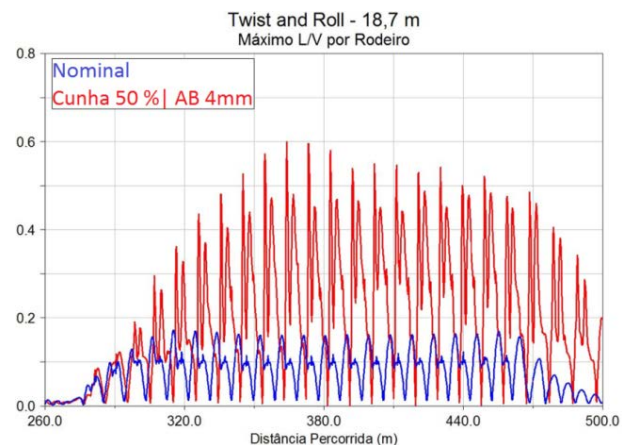
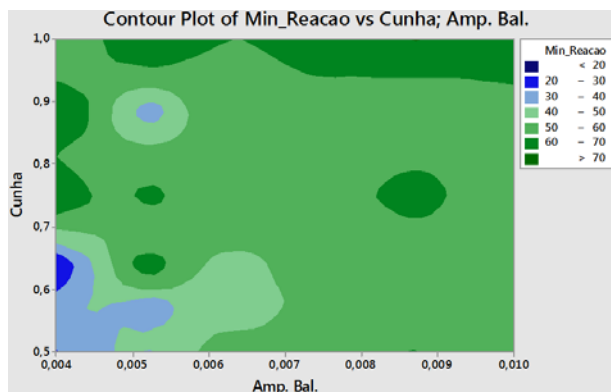
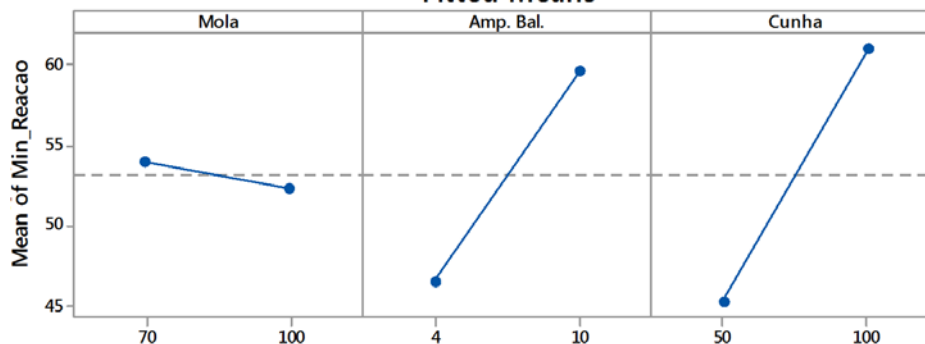
Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE



## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

**Twist and roll:** Casos mais críticos para excitações de desnivelamento transversal ocorrem nas situações de cunhas degradadas e folgas menores no ampara-balanço.

Main Effects Plot for Min\_Reacao  
Fitted Means



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

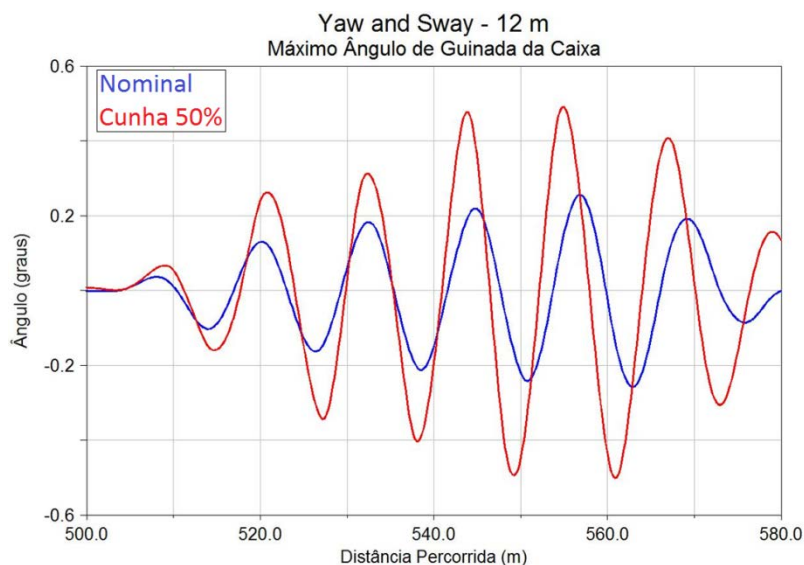
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE

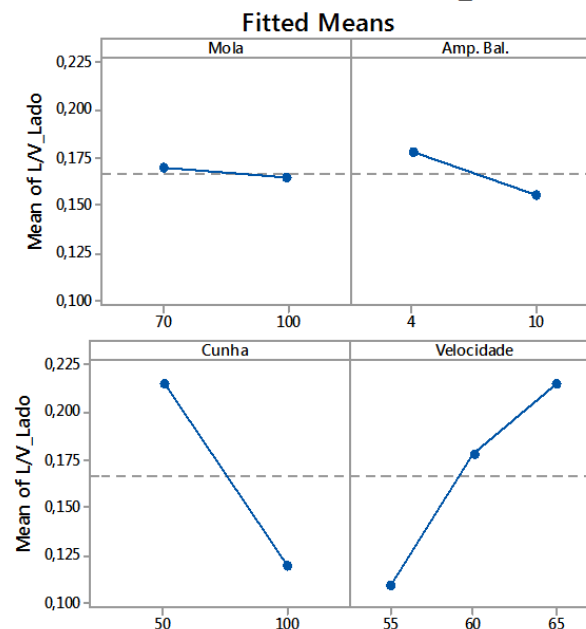


## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

**Yaw and sway 12,0 m:** Maior influência da pré-carga nas cunhas e velocidade. Em certos casos de cunha degradada, o máximo ângulo de yaw é atingido, ocorrendo contato dos batentes laterais internos lateral/travessa. Este efeito causa picos de força lateral no contato roda/trilho, aumentando assim a razão L/V por lado do truque.



### Main Effects Plot for L/V\_Lado



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

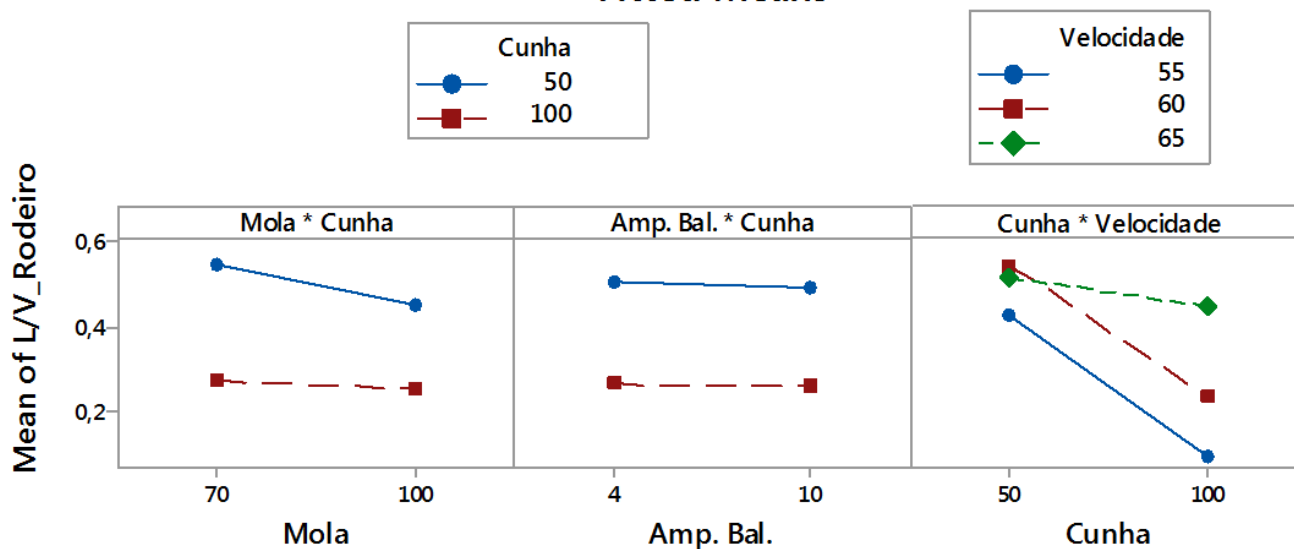
Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE



## ANÁLISES PARAMÉTRICAS

**Yaw and sway 18,7 m:** maior influência das molas e cunha. O efeito individual do desgaste das cunhas provocou aumento de 100 % na média das razões L/V do rodeiro. O efeito da redução de rigidez das molas no aumento do L/V do rodeiro é amplificado quando associado com cunhas degradadas.

### Interaction Plot for L/V\_Rodeiro Fitted Means



## METAMODELO

Resultados das análises paramétricas utilizados na elaboração de metamodelos. Através de regressões polinomiais, foram construídas superfícies de resposta as quais possibilitam estimar o desempenho de configurações intermediárias às simuladas com o modelo complexo.

Vagao GDE - 127 ton.  
Análise de Pitch and Bounce - Irregularidade de 6.5 m / Amplitude de 13.4 mm / 70.0% do nominal AAR



Factor	Units	Current	Min	Nominal	Max	Description
PreCarga_Cunhas	%	<input type="text" value="1.0000"/>	5.0000e-01	1.0000	1.0000	Variacao percentual da pre-carga das molas das cunhas de friccao, todas em conjunto.
Velocidade	km/h	<input type="text" value="6.0000e+01"/>	5.5000e+01	6.0000e+01	6.5000e+01	Variacao da velocidade operacional. O veiculo percorre o trecho de via irregular periodica com velocidade entre 55km/h e 65km/h.
Folga_Ampara_Balanco	"meter"	<input type="text" value="6.3500e-03"/>	4.0000e-03	6.3500e-03	1.0000e-02	Variacao da folga de todos os ampara balanços em conjunto.
Rigidez_Molas_Pacote	%	<input type="text" value="1.0000"/>	7.0000e-01	1.0000	1.0000	Variacao percentual da rigidez das molas dos pacotes de molas, todas em conjunto.

Stats  Effects

Response	Units	Current	Description
Max_Reacao	%	2.2791e+02	Maxima reacao vertical na roda.
Min_Reacao	%	1.6512e+01	Minima reacao vertical na roda.
Carga_Mola	%	1.0275e+02	Reacao nas molas dos truques.

Interface amigável

Created by Mulicorpos Engenharia Ltda. with Adams/Insight Adams 2013 (MSC Software)

## CONCLUSÃO

- Necessidade de planos preventivos de manutenção para os elementos de suspensão, em especial às cunhas de atrito.
- Relação causa/efeito entre o tipo de irregularidade da via e degradação de componentes da suspensão, na velocidade operacional na EFVM.
- Elaboração do metamodelo – estimar rapidamente e aproximadamente as respostas nas situações de degradação dos componentes em diferentes irregularidades da via.
- Impacto econômico – operação com maior segurança, definição mais precisa de intervalos de manutenção do veículo e da via permanente etc...

## AGRADECIMENTOS

- Vale S.A., pelo apoio na viabilização da elaboração deste estudo.
- Ao time de colaboradores da Multicorpos Engenharia, pela dedicação e contribuição.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise Paramétrica de  
Segurança de Vagão GDE





**ANTF**

Associação Nacional dos  
Transportadores Ferroviários



**VALE**

**WWW.ANTF.ORG.BR**