

# **A Segurança do Tráfego das Combinações Veiculares Pesadas**

**Baseada na Dissertação “Avaliação da Estabilidade  
Lateral de Conjuntos de Veículos de Carga”,  
apresentada como requisito de avaliação no curso de  
Mestrado da PUC-PR**

**Autores:**

**Rubem Penteado de Melo**

**[rubem@transtech.com.br](mailto:rubem@transtech.com.br)**

**41 3033-6753**

**Nilson Barbieri**

**Renato Barbieri**



2006

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Transporte Rodoviário de Cargas

A principal modalidade de transporte de cargas no Brasil é o rodoviário. Por uma malha rodoviária de 1,6 milhões de quilômetros e 1,576 milhões de veículos circulam cerca de 63% de toda produção nacional. O segmento é responsável por 3,4 % do PIB e um faturamento anual de U\$ 23,8 bilhões de dólares.

TABELA 1 - Evolução da Distribuição por Modal no Brasil (1950 a 1995 - %)

ANO	Rodoviário	Ferrovário	Cabotagem	Aéreo	Duto
1950	38	29,2	32,4	0,4	...
1960	60,3	18,8	20,8	0,1	...
1970	70,4	17,2	12,1	0,3	...
1980	58,7	24,5	13,1	0,3	3,4
1990	56,3	21,34	18,37	0,32	3,74
1996	62,72	20,72	11,46	0,31	3,79

## 1.2 Veículos para o Transporte de Cargas



Caminhão do tipo 4x2



Conjunto V-Trator 4x2 + Semi-reboque 3 Eixos



Caminhão do tipo 6x2 ou 6x4



Conjunto V-Trator 6x2 ou 6x4 + Semi-reboque 3 Eixos

### 1.3 A Evolução dos veículos para o Transporte de Cargas

Em 1998 a Resolução 68/98 do CONTRAN estabeleceu os requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVCs, para combinações com mais de 2 unidades incluída a unidade tratora.



**Conjunto do Tipo Bitrem - (3 veículos, 7 eixos e PBT de 57 ton)**

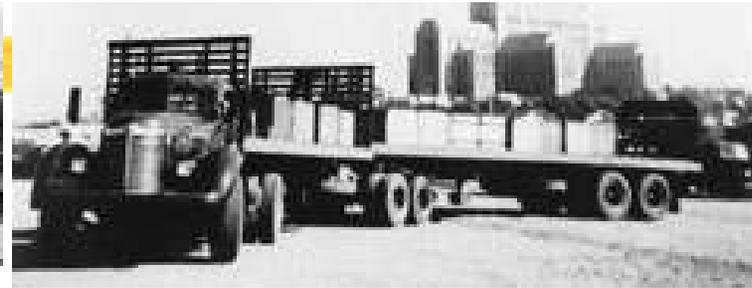


“Dolly”



**Conjunto do Tipo Rodotrem (4 veículos, 9 eixos e PBT de 74 ton)**

## 1.4 A Evolução dos veículos para o Transporte de Cargas em outros países



Principais locais: Austrália, Nova Zelândia, Canada, França, Suécia, África do Sul, México, EUA.

## 1.4.1 A Evolução dos veículos para o Transporte de Cargas – Redução dos Custos de Transporte

Bitrens em Circulação (dados da Anfir)

Em 1999: 3.530

Em 2004: 36.412

Dos implementos produzidos em 2004, **67,4 %** foram para uso em CVCs

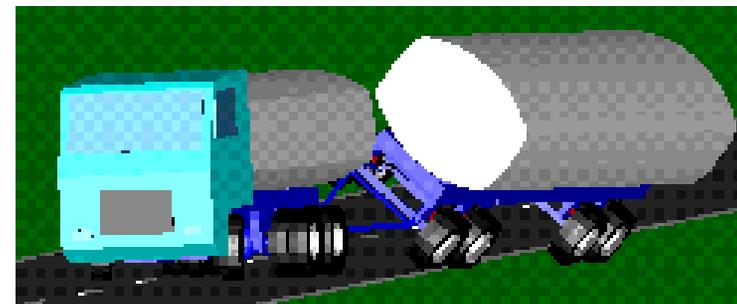
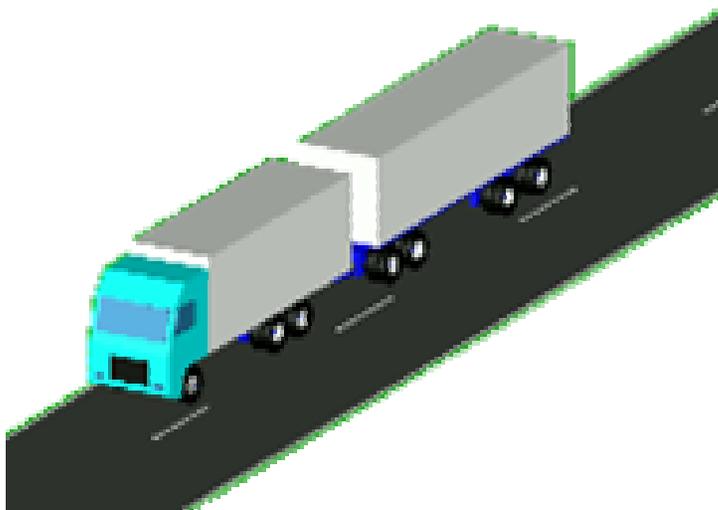
82,9 % dos CS e CG

96,4% dos TQ combustíveis



## 1.5 Características específicas de Conjuntos de Veículos de Carga -CVCs

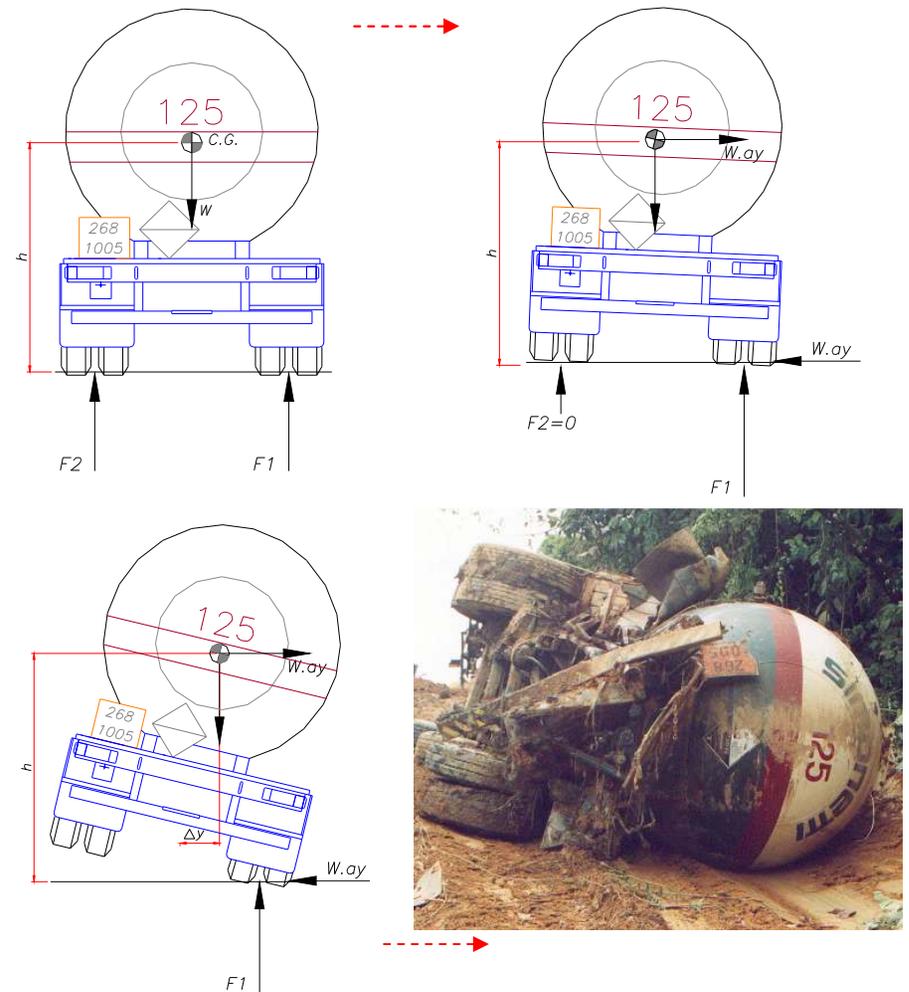
A mais relevante é o fenômeno conhecido como “amplificação traseira” (*rearward amplification*). Trata-se do aumento do deslocamento lateral da última unidade quando comparada com o deslocamento lateral da primeira unidade, em manobras em curvas ou manobras evasivas. Em consequência dessa amplificação do movimento a unidade traseira do conjunto é submetida a acelerações laterais maiores que a unidade tratora.



## 1.6 Critérios para Avaliação da Estabilidade Lateral

A medida básica para avaliação da estabilidade lateral dos veículos é o chamado Limiar de Tombamento Lateral Estático - SRT (Static Rollover Threshold) expresso como a aceleração lateral, em g's, máxima antes de ocorrer o tombamento lateral do veículo.

Automóveis apresentam SRT maior que 1 g enquanto camionetas e vans entre 0,8 e 1,2. Já veículos de carga apresentaram abaixo de 0,5 g. Se a aceleração lateral gerada em uma curva ou manobra de emergência ultrapassar esse limite, o veículo, de forma inevitável, tombará.



## 1.7 Acidentes Típicos

A maior consequência da associação de veículos de carga com SRT baixo em combinações de veículos de carga, sujeitos portanto a amplificação do movimento traseiro, é o tombamento prematuro da unidade traseira.



## 2. MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS CVCs

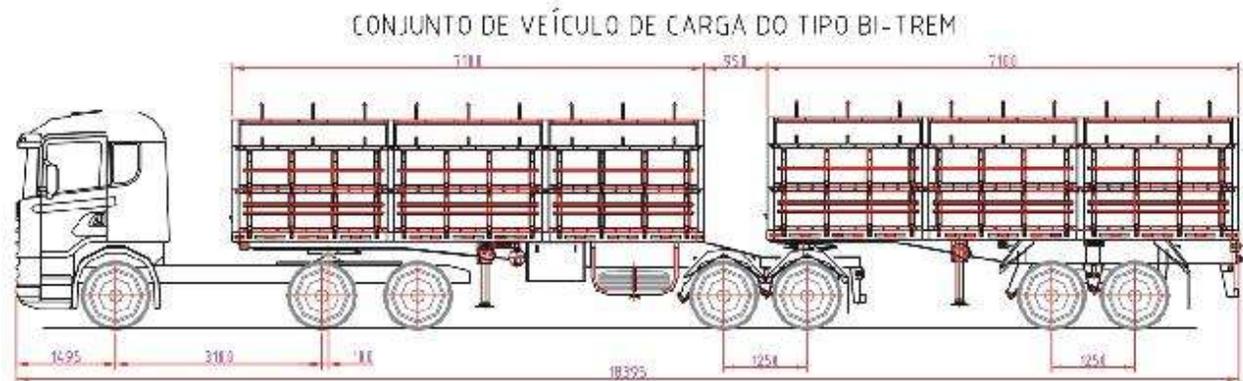
### 2.1 Modelamento

O primeiro documento de pesquisa sobre a dinâmica direcional de veículos articulados foi desenvolvido em 1937 por L. Huber e O. Dietz em Stuttgart.

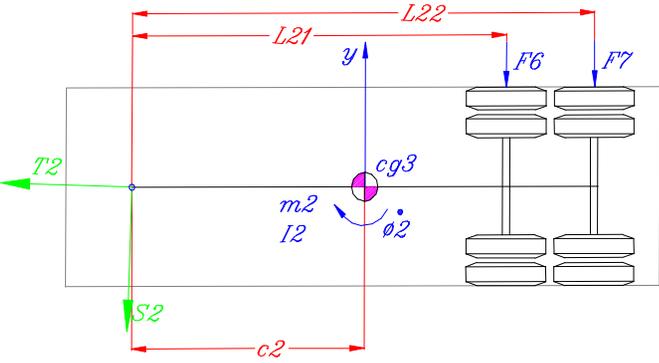
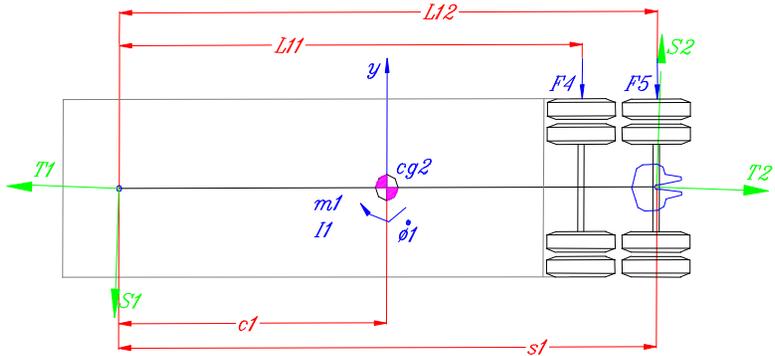
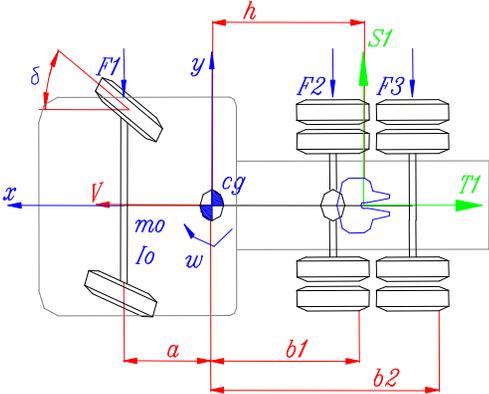
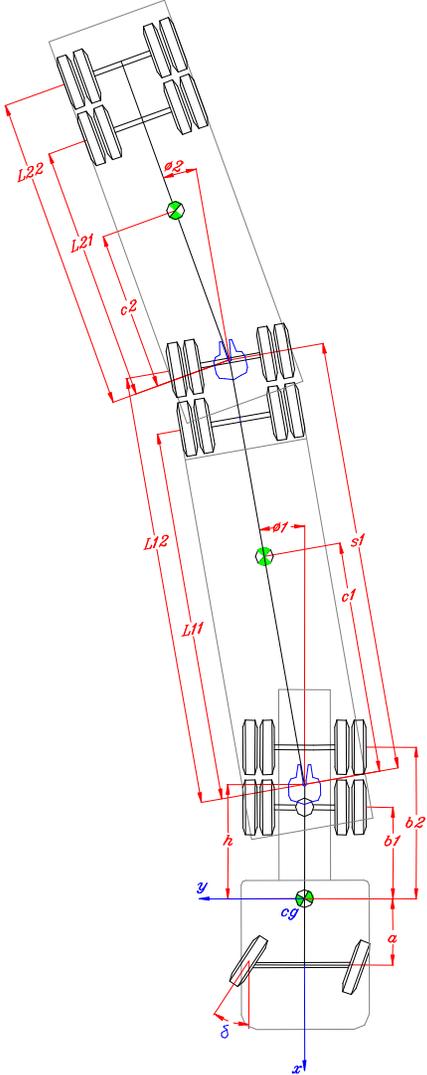
F. Jindra (1966) elaborou trabalho sobre as Características de Dirigibilidade de combinações de trator–semireboque através de um método simplificado de análise linear dos movimentos de um conjunto de veículos.

Similar ao modelo rodotrem será a base para este trabalho sofrendo as adaptações necessárias para a quantidade de eixos e, no caso do Bitrem, do número de veículos e articulações.

### 2.2 Modelamento do Bitrem



# Bitrem - Diagramas



## Bitrem - Equações do Movimento

$$(m_0 + m_1 + m_2).\dot{v} + \left(\sum_{i=1}^{i=7} F_i\right).v/V - (m_1' + m_2').\dot{\omega} + [(m_0 + m_1 + m_2).V^2 - (N_1' + N_2' + N_3' + N_4' + N_5' + N_6' + N_7')].\omega/V - (m_1.c_1 + m_2.s_1).\ddot{\phi}_1 - [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1].\dot{\phi}_1/V - (N_4 + N_5).\phi_1 - m_2.c_2.\ddot{\phi}_2 - (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).\dot{\phi}_2/V - (N_6 + N_7).\phi_2 = N_1.\delta$$

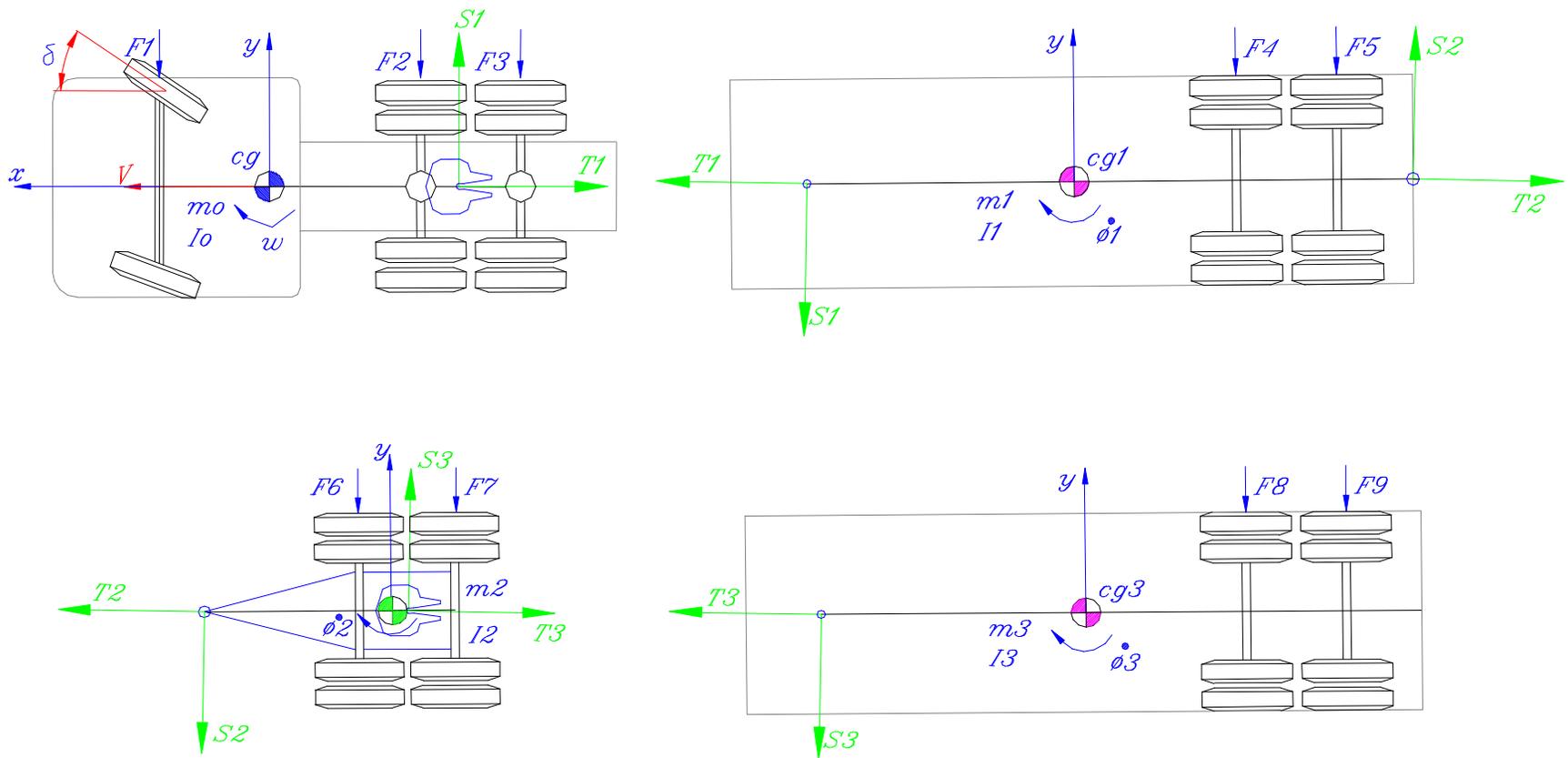
$$m_0.h.\dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3).h - N_1' - N_2' - N_3'].v/V + I_0.\dot{\omega} + [m_0.h.V^2 + N_1.a^2 + N_2.b_1^2 + N_3.b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3').h].\omega/V = N_1.(a + h).\delta$$

$$-(m_1.c_1 + m_2.s_1).\dot{v} - [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1].v/V + (I_1 + m_1'.c_1 + m_2'.s_1).\dot{\omega} - [(m_1.c_1 + m_2.s_1).V^2 - N_4'.L_{11} - N_5'.L_{12} - (N_6' + N_7').s_1].\omega/V + (I_1 + m_1'.c_1^2 + m_2'.s_1^2).\ddot{\phi}_1 + [N_4.L_{11}^2 + N_5.L_{12}^2 + (N_6 + N_7).s_1^2].\dot{\phi}_1/V + (N_4.L_{11} + N_5.L_{12}).\phi_1 + (m_2.c_2.s_1).\ddot{\phi}_2 + (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).s_1.\dot{\phi}_2/V + (N_6 + N_7).s_1.\phi_2 = 0$$

$$-m_2.c_2.\dot{v} - (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).v/V + (I_2 + m_2'.c_2).\dot{\omega} - (m_2.c_2.V^2 - N_6'.L_{21} - N_7'.L_{22}).\omega/V + m_2.c_2.s_1.\ddot{\phi}_1 + (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).s_1.\dot{\phi}_1/V + (I_2 + m_2'.c_2^2).\ddot{\phi}_2 + (N_6.L_{21}^2 + N_7.L_{22}^2).\dot{\phi}_2/V + (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).\phi_2 = 0$$



# Rodotrem - Diagramas



## Rodotrem - Equações do Movimento

$$\begin{aligned}
 & (m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot \dot{v} + \left( \sum_{i=1}^{i=9} F_i \right) \cdot v / V - (m_1' + m_2' + m_3') \cdot \dot{\omega} + [(m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot V^2 - \\
 & \sum_{i=1}^{i=9} N_i'] \cdot \omega / V - [m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \ddot{\phi}_1 - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1] \cdot \dot{\phi}_1 / V - \\
 & (N_4 + N_5) \cdot \phi_1 - (m_2 \cdot c_2 - m_3 \cdot h_2) \cdot \ddot{\phi}_2 - [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot \dot{\phi}_2 / V - (N_6 + \\
 & N_7) \cdot \phi_2 - m_3 \cdot c_3 \cdot \ddot{\phi}_3 - (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot \dot{\phi}_3 / V - (N_8 + N_9) \cdot \phi_3 = N_1 \cdot \delta
 \end{aligned}$$

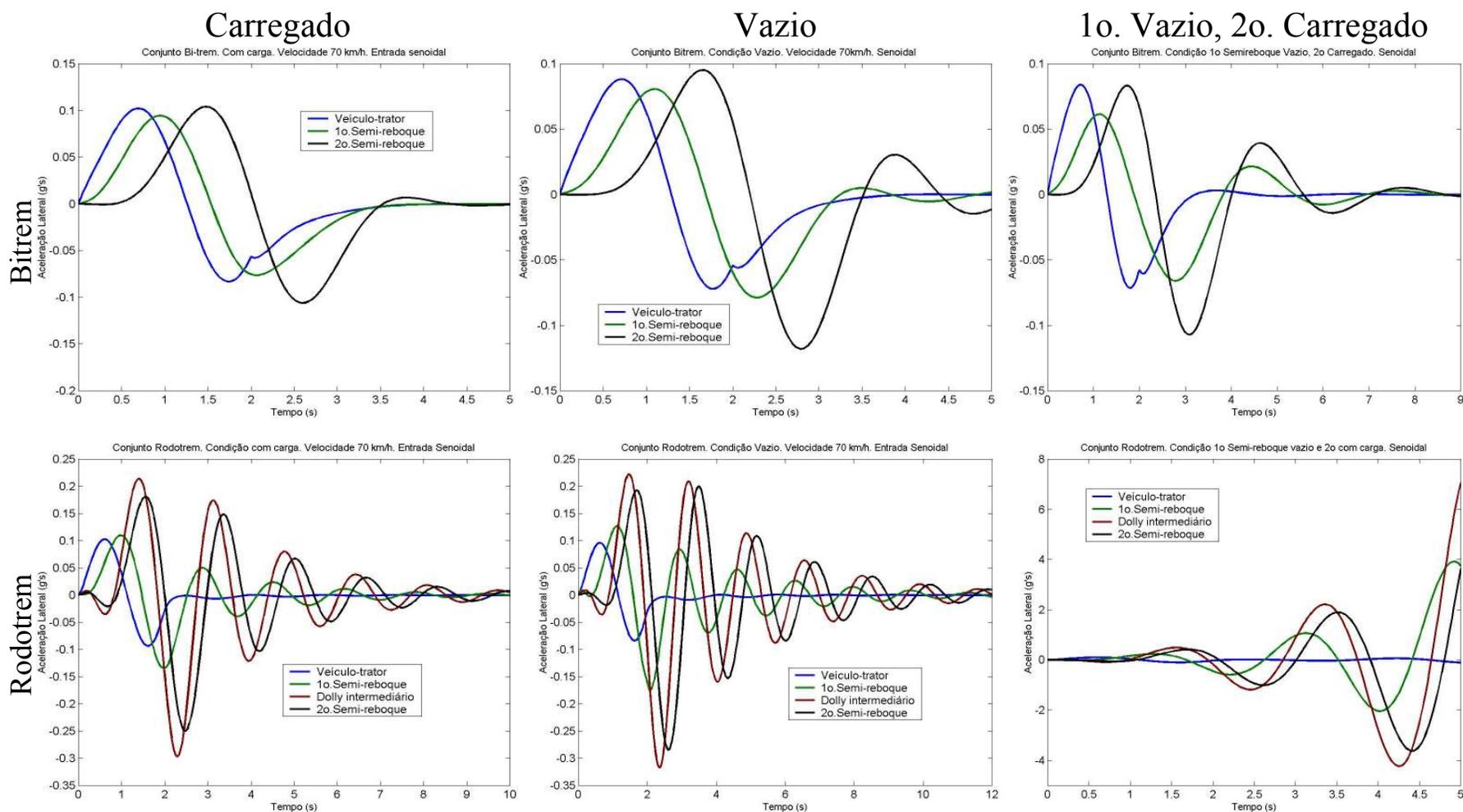
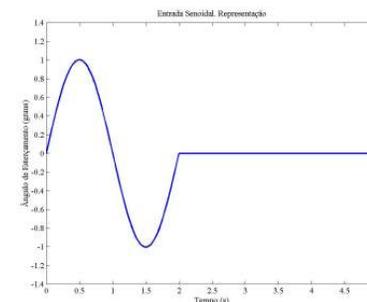
$$\begin{aligned}
 & m_0 \cdot h \cdot \dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3) \cdot h - N_1' - N_2' - N_3'] \cdot v / V + I_0 \cdot \dot{\omega} + [m_0 \cdot h \cdot V^2 + N_1 \cdot a_2 + N_2 \cdot b_1^2 + \\
 & N_3 \cdot b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3') \cdot h] \cdot \omega / V = N_1 \cdot (a + h) \cdot \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -(m_2 \cdot c_2 - m_3 \cdot h_2) \cdot \dot{v} - [N_6 \cdot L_{21} + N_6 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot v / V + (I_2 + m_2' \cdot c_2 + m_3' \cdot h_2) \cdot \dot{\omega} - \\
 & [(m_2 \cdot c_2 + m_3 \cdot h_2) \cdot V^2 - N_6' \cdot L_{21} - N_7' \cdot L_{22} - (N_8' + N_9') \cdot h_2] \cdot \omega / V + (m_2 \cdot c_2 + m_3 \cdot h_2) \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + \\
 & [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_1 / V + (I_2 + m_2 \cdot c_2^2 + m_3 \cdot h_2^2) \cdot \ddot{\phi}_2 + [(N_6 \cdot L_{21}^2 + \\
 & N_7 \cdot L_{22}^2 + (N_8 + N_9) \cdot h_2^2] \cdot \dot{\phi}_2 / V + (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot \phi_2 + m_3 \cdot c_3 \cdot h_2 \cdot \ddot{\phi}_3 + (N_8 \cdot L_{31} + \\
 & N_9 \cdot L_{32}) \cdot h_2 \cdot \dot{\phi}_3 / V + (N_8 + N_9) \cdot h_2 \cdot \phi_3 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -[m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot \dot{v} - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1] \cdot v / V + [I_1 + m_1' \cdot c_1 + \\
 & (m_2' + m_3') \cdot s_1] \cdot \dot{\omega} - \{ [m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot V^2 - N_4' \cdot L_{11} - N_5' \cdot L_{12} - (N_6' + N_7' + N_8' + N_9') \cdot s_1 \} \cdot \omega / V + \\
 & [I_1 + m_1 \cdot c_1^2 + (m_2 + m_3) \cdot s_1^2] \cdot \ddot{\phi}_1 + [N_4 \cdot L_{11}^2 + N_5 \cdot L_{12}^2 + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1^2] \cdot \dot{\phi}_1 / V + \\
 & (N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12}) \cdot \phi_1 + (m_2 \cdot c_2 + m_3 \cdot h_2) \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_2 + [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_2 / V + \\
 & (N_6 + N_7) \cdot s_1 \cdot \phi_2 + m_3 \cdot c_3 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_3 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_3 / V + (N_8 + N_9) \cdot s_1 \cdot \phi_3 = 0
 \end{aligned}$$

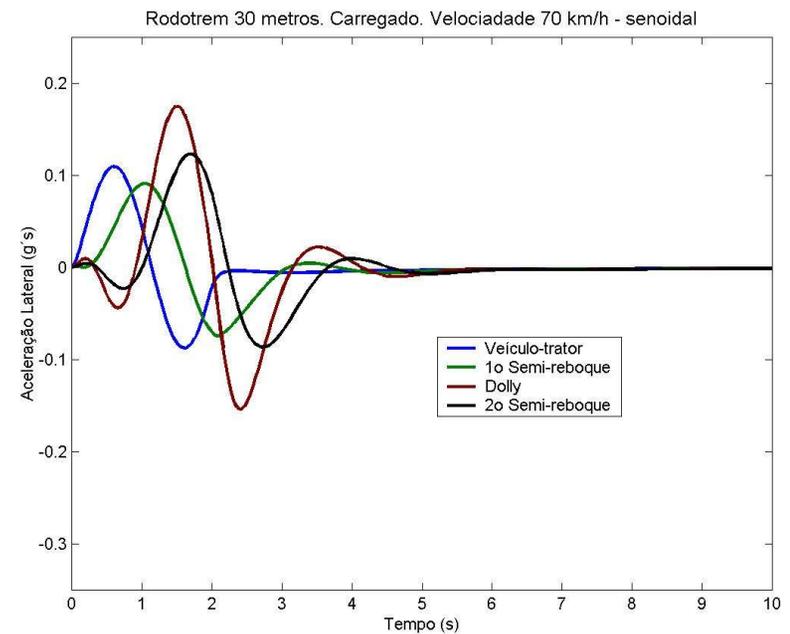
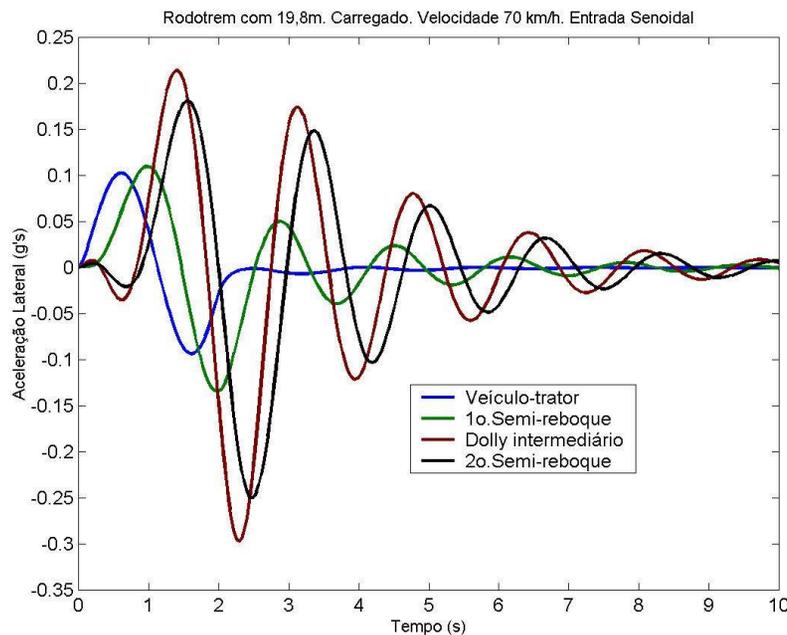
$$\begin{aligned}
 & -m_3 \cdot c_3 \cdot \dot{v} - (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot v / V + (I_3 + m_3' \cdot c_3) \cdot \dot{\omega} - (m_3 \cdot c_3 \cdot V^2 - N_8' \cdot L_{31} - N_9' \cdot L_{32}) \cdot \omega / V + \\
 & m_3 \cdot h_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_1 / V + m_3 \cdot c_3 \cdot h_2 \cdot \ddot{\phi}_2 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot h_2 \cdot \dot{\phi}_2 / V + \\
 & (I_3 + m_3 \cdot c_3^2) \cdot \ddot{\phi}_3 + (N_8 \cdot L_{31}^2 + N_9 \cdot L_{32}^2) \cdot \dot{\phi}_3 / V + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot \phi_3 = 0
 \end{aligned}$$

# Resultados da Simulação Dinâmica -Amplificação Traseira - Aceleração Lateral - Entrada Senoidal - Velocidade 70 km/h



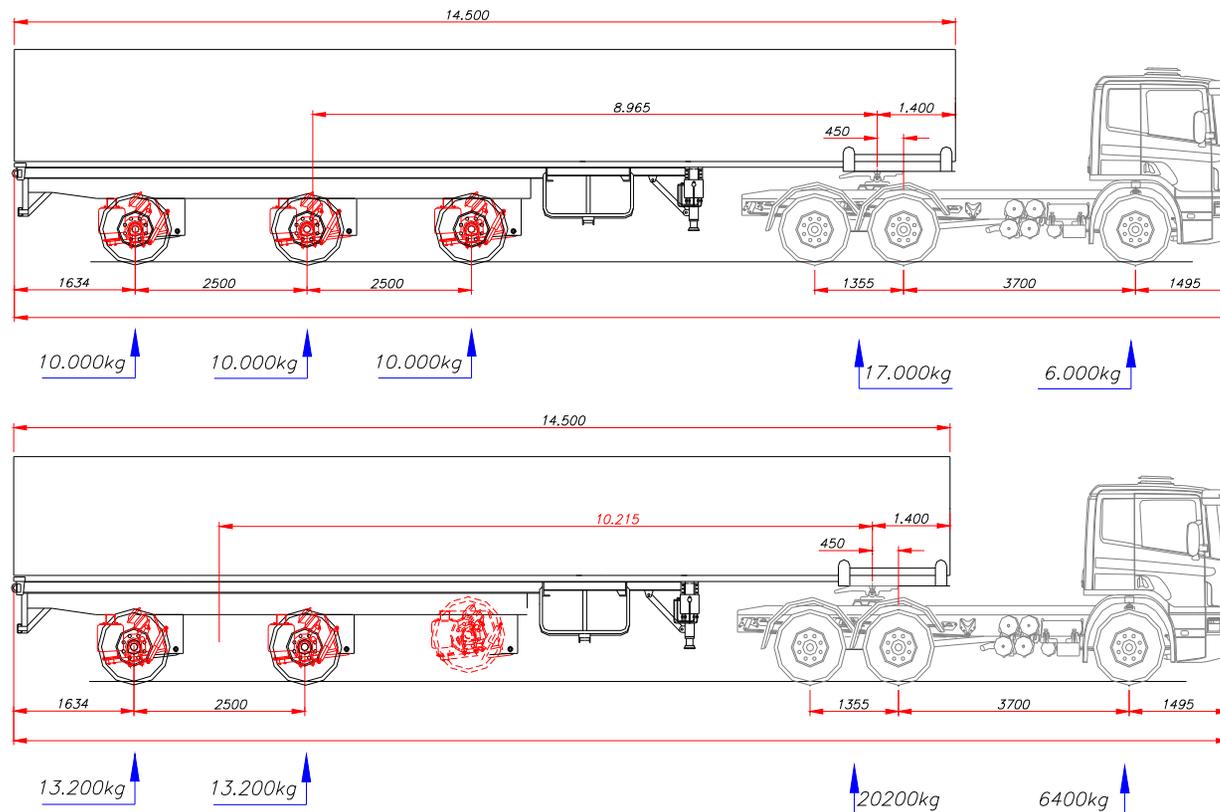
## COMPARAÇÃO COM O AUMENTO DO COMPRIMENTO (Res. 184/2005) -Amplificação Traseira - Aceleração Lateral - Entrada Senoidal - Velocidade 70 km/h

- Amplificação traseira considerando o aumento de comprimento dos conjuntos exigido pela Resolução 184/2005 do Contran



**(Resolução 184/2005. Conseqüências e o provável “novo conjunto da vez”):**

Alterando de “*Com mais de duas unidades*” para “*Com duas ou mais unidades*” temos: PBT máx de 45 para 57 toneladas. Novo conjunto: Caminhão 3 eixos + Carreta 3 eixos Distanciados e PBT= 53 ton:

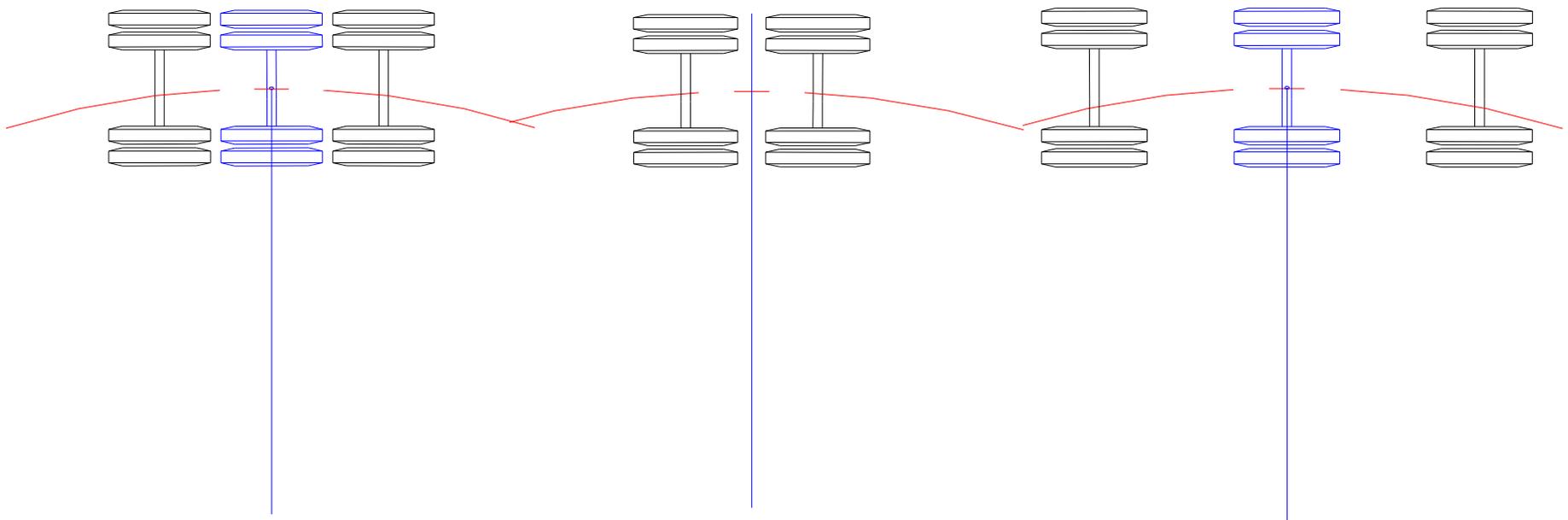


**Problema:** “Rigidez Direcional”x “Demanda de atrito”: Eixo *esterçante* **ou** levantar o 1º eixo (condição carregado) para evitar o arraste dos pneus!!

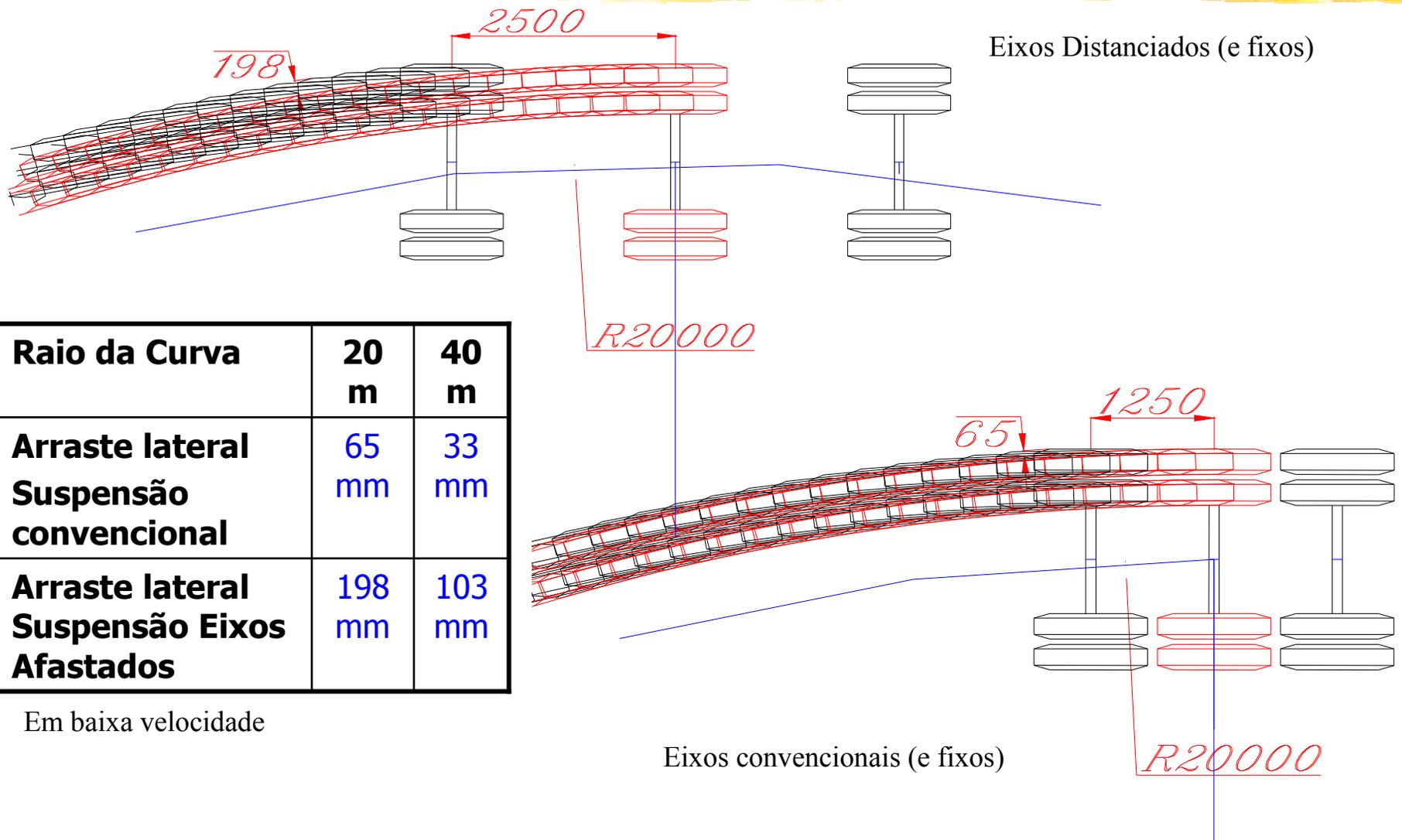
## Resolução 184/2005: Traçado de Suspensões – Convencionais X Eixos Afastados

Quando afastamos os eixos (fixos) para obter o benefício das 10 toneladas, incorremos no problema do arraste lateral excessivo nas manobras e curvas (*carga horizontal no pavimento*), que danifica a suspensão e seus pneus, e pode acelerar os danos nas vias.

Na suspensão 3 eixos a raio de giro passa pelo eixo central. Na suspensão 2 eixos pela linha central entre os 2 eixos



## Resolução 184/2005: Arraste lateral de pneus em Curvas – Susp. Convenc. X Eixos Afastados



# INVESTIGACIÓN DEL EFECTO VIAL DE LOS EJES VIRABLES EN VEHÍCULOS ARTICULADOS : REVISIÓN DE LA LITERATURA

Instituto Mexicano del Transporte  
Publicación Técnica N° 263 - 2004

....

*Para enfrentar esa situación de **rigidez direccional**, se han diseñado diferentes esquemas, como son el empleo de ejes que tengan la capacidad de virar por efecto del avance del vehículo en una trayectoria curva, o mediante incorporar mecanismos **que “elean” a los ejes que dificultan la maniobra direccional.***

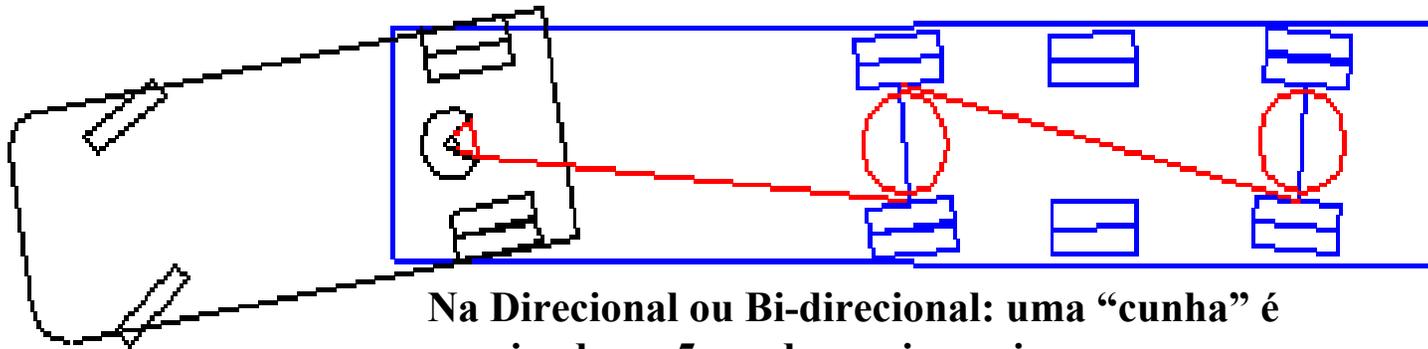
.....

*De entre estas soluciones, la más conveniente es la de emplear ejes que puedan ser reorientados en alguna cantidad, ya que **la retractibilidad de los ejes significa que el peso bruto vehicular es soportado con menos apoyos, lo que aumenta el efecto nocivo en las infraestructuras, sean pavimentos o puentes.***

.....

*La motivación para este estudio provino de la necesidad de introducir **ejes direccionales** en las combinaciones vehiculares, **a fin de evitar totalmente el uso de ejes retractiles o “levantables” (liftable axles), así como obtener combinaciones “amigables” con la infraestructura.***

## Soluções Técnicas para o arraste lateral dos pneus: eixos direcionais e eixos auto-esterçantes



Na Direcional ou Bi-direcional: uma “cunha” é encaixada na 5a-roda e guia os eixos.

Na Austrália:

*Pavement Horizontal Loading (Prescriptive Requirement):*

*(a) Steerable axles*

*(i) at least one axle of any two axles joined by a load sharing suspension system and greater than 2 meters apart must be steerable; and*

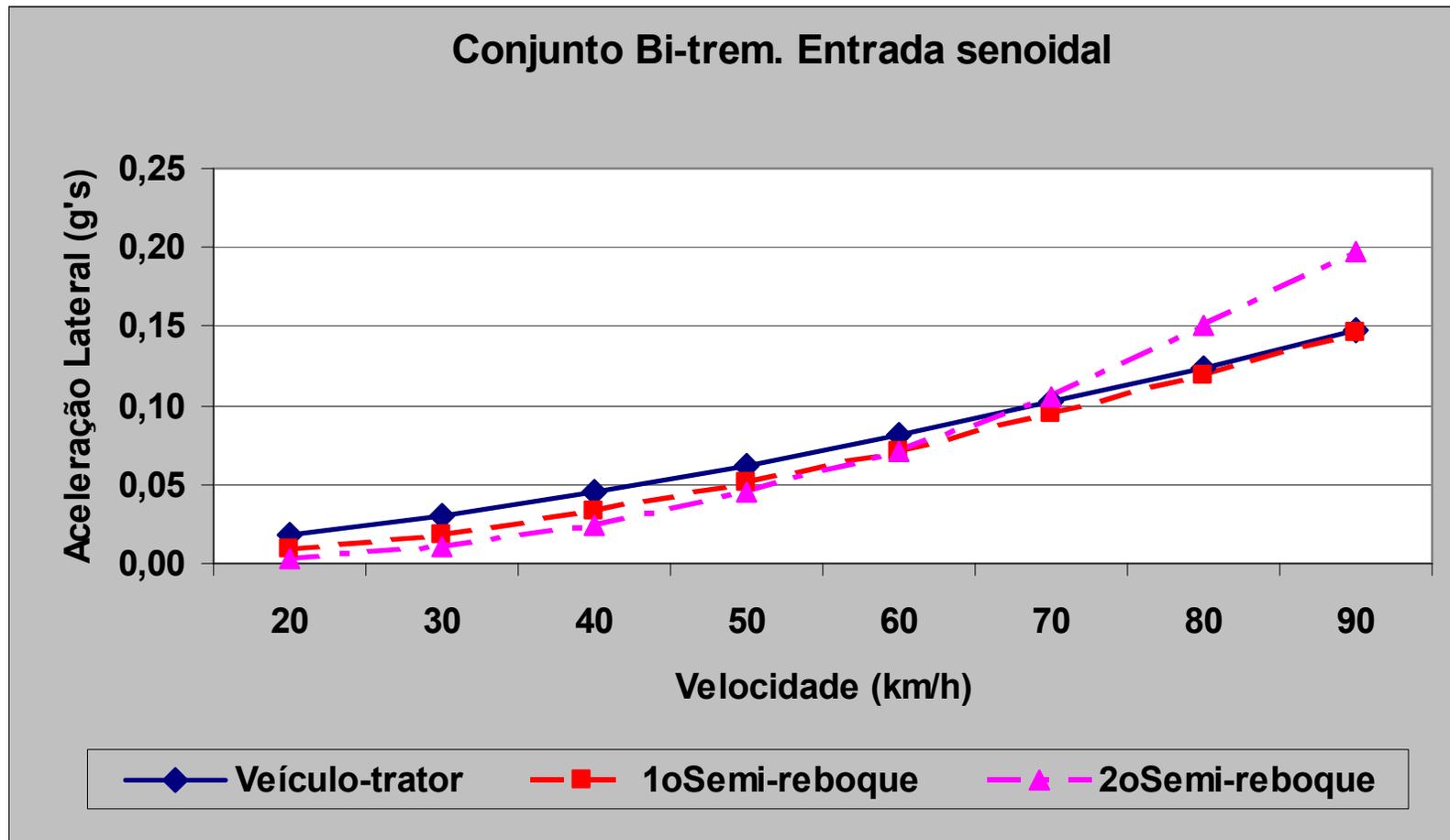
*(ii) with all other groups of axles joined by a load sharing suspension system with a spread of greater than 3.05 meters, all axles beyond the 3.05 meter spread must be steerable.*

*Performance-Based Standards – Standards & Measures  
National Road Transport Commission - Austrália*

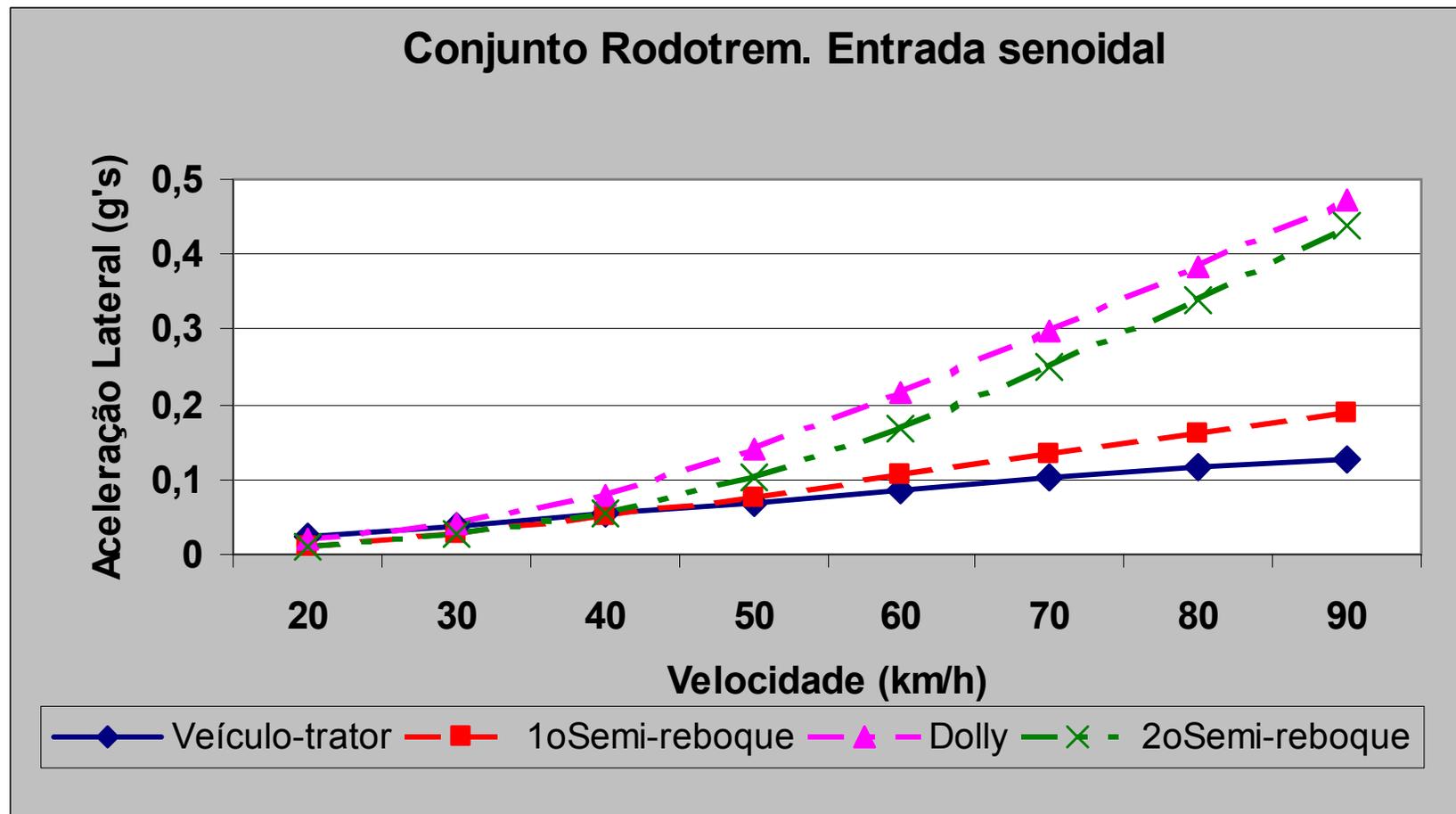


Na auto-esterçante: é independente do cavalo e o eixo possui ponteira móvel.

**Resultados da Simulação Dinâmica -Comparativo entre Bitrem em velocidades de 20 km/h à 90 km/h. Entrada Senoidal - Aceleração lateral por unidade do conjunto.**

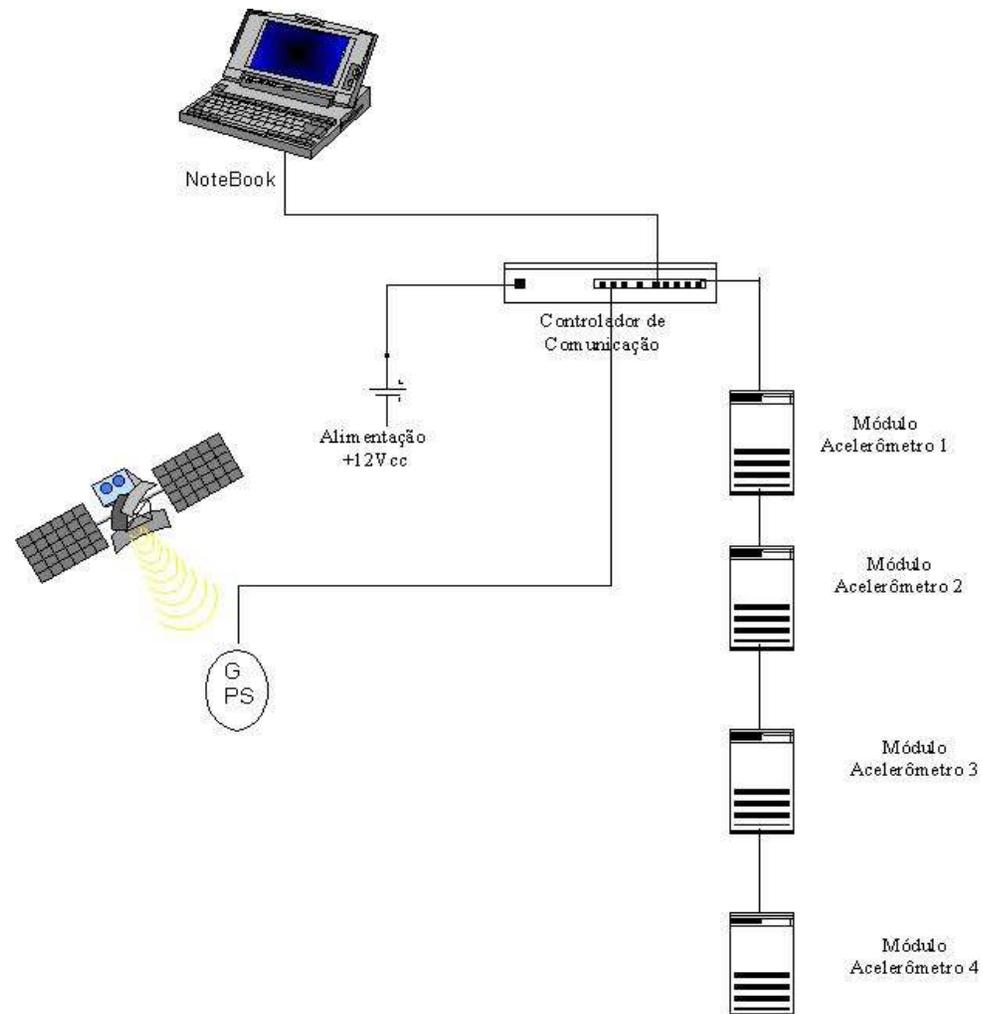


**Resultados da Simulação Dinâmica -Comparativo entre Rodotrem em velocidades de 20 km/h à 90 km/h. Entrada Senoidal - Aceleração lateral por unidade do conjunto.**



## Equipamento para avaliação dos Conjuntos de Veículos

O Sistema *SkySafe Cargo*<sup>®</sup> baseia-se no mapeamento das acelerações laterais geradas em um determinado percurso através de um sistema de GPS acoplado a módulos de acelerômetros. Um software gerenciador registra os dados instantaneamente gerando uma planilha eletrônica.



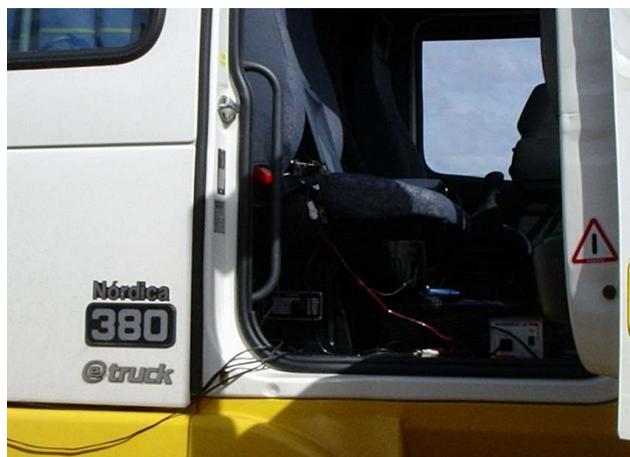
## Avaliação de um Conjunto de Veículos

Monitorado um conjunto do tipo Bitrem de propriedade da empresa TIC Transportes Ltda, em 24/042004, constituídos pelos seguintes veículos:

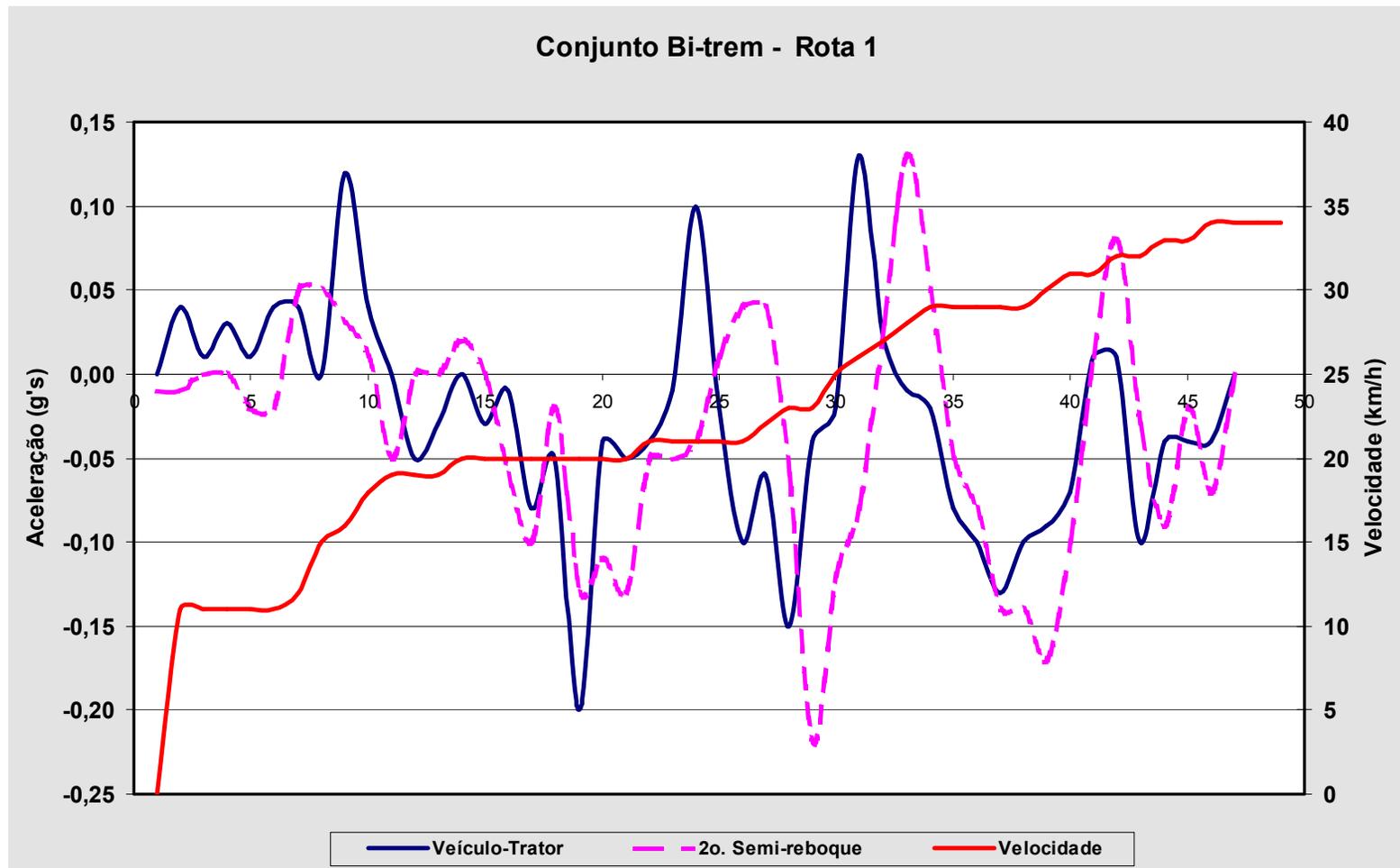
- Veículo-Trator marca Volvo FH12 380;
- Semi-reboques tanque 2 eixos, marca Randon;
- Condição: Carregado – Produto químico. Peso Bruto Total: 57 toneladas.



## Avaliação de um Conjunto de Veículos



## Avaliação de um Conjunto de Veículos - Resultados Obtidos



## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- ✓ O Bitrem apresenta amplificação menor comparado com o Rodotrem;
- ✓ Sem carga, embora as acelerações laterais e o tempo de estabilização sejam maiores, os riscos de tombamento lateral são menores porque o SRT é maior;
- ✓ Na condição com o 1° Semi-reboque vazio e 2° carregado, as acelerações laterais são significativamente maiores em ambos os conjuntos. Rodotrem torna-se instável;
- ✓ O Rodotrem, sob determinadas condições de carregamento e velocidade, pode apresentar características de instabilidade, com oscilações crescentes durante as manobras;
- ✓ Quanto maior os semi-reboques menor é a amplificação traseira;
- ✓ Manobra do tipo senoidal impõe amplificações traseiras mais elevadas o tipo rampa. O Rodotrem alcança valores de acelerações laterais próximos a 0,30 g's podendo ocorrer o tombamento lateral;
- ✓ Com velocidades de 20 a 90 km/h o Bi-trem passa ter amplificação da traseira, a partir de 70 km/h enquanto no Rodotrem a partir de 40 km/h;
- ✓ Na avaliação de um bitrem com acelerômetros verificou-se a defasagem no tempo entre os valores de pico e chegou-se a um máximo de 0,23 g's na última unidade;

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- ✓ Devido a maior instabilidade do Rodotrem é recomendável uma redução de sua velocidade máxima permitida para 60 km/h.
- ✓ É recomendável que as autoridades de trânsito ou concessionárias identifiquem os pontos críticos para os CVCs afim de sinalizá-los adequadamente reduzindo a possibilidade de acidentes. Nem sempre uma velocidade segura para um conjunto convencional será segura para um CVC;
- ✓ É recomendável que os fabricantes dos CVCs informem sobre o fenômeno nos seus Manuais;
- ✓ É recomendável que os motoristas desses conjuntos recebam treinamento específico para evitar as manobras que tornam esse fenômeno significativo. As transportadoras devem ser orientadas de modo a não utilizar os conjuntos com carga somente na última unidade;
- ✓ As principais recomendações aos motoristas são:
- ✓ Reduzir a velocidade para entrar nas curvas e trevos;
- ✓ Virar o volante sempre de forma suave e gentil;
- ✓ Evitar manobras bruscas no caminhão-trator;
- ✓ Procurar sempre “enxergar mais longe” para se antecipar as necessidades de manobras e freiadas;
- ✓ Se tiver com cargas de pesos diferentes, coloque a mais pesada sempre da 1a. carreta. **Jamais** ande com a 1a. carreta vazia e a 2a. carregada;
- ✓ Quando sair com um rodado no acostamento **não tente retornar rápido**. Reduza a velocidade, alinhe o conjunto e retorne a pista devagar, com o menor ângulo de entrada possível pois só assim será evitado o tombamento.



## ÁREAS DE ATUAÇÃO:

### ➤ **TRANSPORTES E TRÂNSITO**

- Inspeção de Veículos e Equipamentos que Transportam Produtos Perigosos
- Inspeção de Segurança Veicular em Veículos Recuperados de Sinistros / Alterações de Características

### ➤ **EMPRESAS DE SEGURO**

- Inspeção de Segurança Veicular Prévia para contratação de seguro
- Perícia de Engenharia em veículos/Reconstituição de acidentes

### • **QUALIDADE E GESTÃO AMBIENTAL**

- Auditoria Independente em Sistemas da Qualidade e de Gestão Ambiental
- Monitoramento do nível de emissões de gases e ruídos de veículos e motores

### ➤ **INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

- Ensaio de Desempenho de veículos e componentes
- Homologação de Fabricantes / Transformadores de veículos
- Avaliação de falhas em componentes

### ➤ **INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

- Inspeção e Avaliação de Integridade de Vasos de Pressão
- Ensaio Não Destrutivos e Testes de Estanqueidade

### ➤ **SEGURANÇA NO TRABALHO**

- Inspeção de Segurança em Vasos de Pressão e Caldeiras, conforme Norma Regulamentadora NR-13

### ➤ **TREINAMENTO**

Treinamento Institucional e Operacional na área de Transporte

