

# Estabilidade Lateral de Conjuntos de Veículos de Carga

Rubem Penteado de Melo

**Transtech Engenharia e Inspeção Ltda.**

**IDT – Instituto de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento Sustentável em Transportes (OSCIP).**

Prof. Dr. Nilson Barbieri

Prof. Dr. Renato Barbieri

**Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR**

## RESUMO

A Resolução CONTRAN 68/98, autorizou a circulação de Combinações de Veículos de Cargas. Representantes de uma evolução no transporte, precisam ser observados sob a ótica de sua dirigibilidade. Devido à quantidade de articulações estão sujeitos a fenômenos que afetam a sua estabilidade. O mais relevante é a "Amplificação Traseira". Trata-se do aumento do deslocamento lateral da última unidade quando comparado com a primeira. Como consequência a unidade traseira é submetida a acelerações laterais maiores, podendo vir a tombar e levar todo o conjunto. Um estudo desse fenômeno é pré-requisito para evolução dos veículos, das rodovias, da sinalização viária e na formação de condutores.

## INTRODUÇÃO

O principal meio de transporte de cargas no Brasil é o rodoviário. Por uma malha rodoviária de aproximadamente 1,6 milhões de quilômetros e por 1,576 milhões de veículos circulam cerca de 63% de toda produção nacional (SETCERGS, 2000b). A participação do transporte rodoviário de cargas não é maior somente no Brasil. Na Europa e nos Estados Unidos o modal rodoviário também supera os demais.

Dados divulgados pela IRU - *International Road Transport Union* e do GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, apontam que a tendência de crescimento e predomínio do transporte rodoviário de cargas sobre os demais modais não constitui, como se costuma afirmar, uma peculiaridade brasileira ou o resultado de uma "política rodoviarista". Na Europa, embora as políticas de investimentos e as regulamentações do transporte

de cargas buscarem sempre favorecer as ferrovias, as tendências são idênticas às constatadas aqui.

No Brasil, analisando-se a distribuição intermodal entre 1980 a 1996, constata-se avanço do rodoviário (de 58,70% para 62,72%) em detrimento da ferrovia (queda de 24,5% para 20,72%) (SETCERGS, 2000a).

Para o transporte de curta e média distâncias, encontram-se nas estradas caminhões com 2 eixos, chamados 4x2 ou com 3 eixos chamados 6x2 ou ainda os 6x4, com duplo diferencial.

Para o transporte de grandes distâncias é mais comum a utilização de conjuntos formados por dois veículos: um veículo-trator e um veículo rebocado chamado semi-reboque. Esses conjuntos estão limitados pela Legislação a um Peso Bruto Total - PBT máximo de 45 toneladas (CONTRAN, 1998b).

## A EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS DE CARGA

Em 1998 a Resolução 68/98 do CONTRAN estabeleceu novos requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVCs, referidos no Código Brasileiro de Trânsito, para combinações com mais de 2 unidades incluída a unidade tratora (CONTRAN, 1998a). Essa Resolução trouxe alterações significativas na matriz do transporte rodoviário de cargas propiciando um rápido crescimento do volume de CVCs em circulação. Posteriormente seu texto foi alterado pela Resolução 184/2005 de 21 de outubro de 2005 (CONTRAN, 2005).

A legislação anterior que tratava dessa matéria, a Resolução 631/84 do CONTRAN, impunha uma

série de restrições adicionais como no art. 3º que limitava o horário para trânsito com conjuntos de veículos entre 6:00h e 18:00h e seu limite de velocidade máxima de 60 km/h (CONTRAN, 1984).

Liberado o trânsito diuturno para combinações com até 19,8 metros e sua velocidade máxima de 80 km/h pela nova Resolução 68/98, muitas transportadoras optaram pelos CVCs pelas vantagens econômicas oferecidas vinculadas a maior capacidade de carga. As principais combinações de veículos, objetos desse estudo, em utilização atualmente no Brasil são:

- Bitrem: trata-se um conjunto formado por 3 veículos sendo um veículo-trator com 3 eixos, um semi-reboque de 2 eixos com uma 5ª roda na traseira de seu chassi e mais um segundo semi-reboque também de 2 eixos. Esse conjunto tem um Peso Bruto Total - PBT de 57 toneladas, duas articulações, capacidade de carga líquida de aproximadamente 37 toneladas e 7 eixos no total.

- Rodotrem: trata-se de um conjunto formado por 4 veículos sendo um veículo-trator com 3 eixos, um semi-reboque de 2 eixos com um engate na traseira de seu chassi, um "dolly" intermediário com 2 eixos e uma 5ª-roda instalada em sua estrutura e mais um segundo semi-reboque também de 2 eixos. Esse conjunto tem um PBT de 74 toneladas, três articulações, capacidade de carga de aproximadamente 52 toneladas e 9 eixos no total.

#### CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE CONJUNTOS DE VEÍCULOS DE CARGA

Devido a quantidade de articulações entre as unidades do conjunto, os CVCs estão sujeitos a fenômenos específicos que afetam significativamente a sua dirigibilidade e a sua segurança. Dentre as características peculiares desses CVCs destaca-se como a mais relevante o fenômeno conhecido como "Amplificação Traseira" (*rearward amplification*).

Típico de veículos com muitas articulações, é chamada de amplificação traseira o aumento do deslocamento lateral da última unidade do conjunto quando comparada com o deslocamento lateral da primeira unidade, durante 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.

#### CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE LATERAL DE VEÍCULOS

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. Muitos automóveis apresentam SRT maior que 1 g enquanto camionetas e vans apresentam SRT entre 0,8 e 1,2 g's. Já veículos pesados de carga apresentaram SRT abaixo de 0,5 g. Tanques criogênicos para o transporte de gases apresentam SRT tão baixo quanto 0,26 g. (Winkler, 2000).

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. Como o motorista, de certa forma, está isolado das unidades traseiras não existe meio para que ele perceba que a última unidade está se aproximando do limiar de tombamento a tempo de evitar o acidente (Sampson e Matthew, 2000).

#### OBJETIVOS

Comprovadamente representantes de uma evolução dos veículos utilizados no transporte de cargas pelo ganho de produtividade que proporcionam, os CVCs também precisam ser observados sob a ótica de suas características de dirigibilidade e segurança. Faz-se necessário que os fabricantes dos caminhões e dos veículos rebocados desenvolvam projetos que prevejam e minimizem o efeito da amplificação traseira. Aspectos importantes como a revisão dos critérios técnicos para construção de rodovias, suas obras de arte e sinalização viária incluindo as necessidades específicas impostas pelos CVCs devem ser feitas pelos órgãos competentes. Também necessário se faz a inclusão de instruções específicas nos Centro de Formação de Condutores, para os motoristas desses conjuntos, visando minimizar a possibilidade de ocorrência de acidentes causados pela amplificação traseira.

Um estudo para a determinação da razão da Amplificação Traseira dos principais tipo de CVCs em circulação no País é pré-requisito para avaliação das necessidades acima. Faz-se necessário conhecer a amplitude do fenômeno para cada modelo de forma a permitir a necessária evolução dos projetos dos

veículos, rodovias, sinalização viária e na formação dos condutores. Este é o objetivo deste trabalho.

## MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS CVCS

Segundo Dugoff (1971) o primeiro documento de pesquisa sobre a dinâmica direcional de veículos articulados foi desenvolvido em 1937 por L. Huber e O. Dietz em Stuttgart na Alemanha. Com o advento de computadores facilitou-se a solução de equações complexas que descrevem o movimento de veículos articulados e muitos outros trabalhos foram desenvolvidos. Dentre eles o elaborado por Hales, Jindra, Ellis, Schmid and Kullberg analisaram a estabilidade dinâmica de veículos articulados com três eixos movendo-se com velocidade longitudinal constante. Esmailzadeh (1996) também desenvolveu trabalho sobre a performance direcional e a estabilidade lateral de veículos articulados, especificamente aqueles com dolly intermediário para o transporte de cargas indivisíveis como, por exemplo, o transporte de toras longas. 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 consistindo de um trator de 2 eixos, um semi-reboque de 1 eixo, um dolly intermediário também de 1 eixo e mais um semi-reboque de 1 eixo, totalizando 4 veículos e 3 articulações. Como esse modelo se aproxima em muito ao do rodotrem, será a base para este trabalho sofrendo as adaptações necessárias para a quantidade de eixos e articulações.

## ANÁLISE CINEMÁTICA

Seja um conjunto de veículos trafegando em velocidade longitudinal constante em uma estrada plana. Considera-se o sistema de referência com origem no centro de gravidade de cada unidade. Para efeito de simplificação dos modelos são consideradas as seguintes características:

- Os veículos são rígidos à torção e com centro de gravidade em uma posição fixa;
- O movimento relativo entre os eixos e o chassi dos veículos é desprezado;
- Assume-se também que o acoplamento entre 5ª-roda e pino-rei e o engate do dolly intermediário possui atrito desprezável;

- São consideradas as forças transmitidas da pista para os pneus como as únicas forças externas aplicadas sobre os veículos;
- O efeito da transferência de carga entre os lados dos veículos em curvas é desprezado;
- Resistência ao rolamento, forças aerodinâmicas e o momento causado pela existência de duplos pneus são desprezados;
- Todos os ângulos são considerados pequenos o suficiente para que se admita que:

$$\sin\phi \cong \phi, \quad \cos\phi \cong 1 \quad \text{e} \quad \tan\phi \cong \phi;$$

- São considerados pequenos os ângulos de deriva - *sideslip*.

## MODELAMENTO DO BITREM

Seja um conjunto do tipo bitrem conforme ilustrado nas Figuras 1, 2 e 3.

Sejam também as seguintes variáveis:

- a** - Vetor aceleração
- $\alpha_j$  - Ângulo de deriva (*slip angle*)
- $\delta$  - Ângulo de esterçamento do pneu (*steer angle*)
- $\phi$  - Ângulo entre os veículos
- $F_i$  - Força lateral no eixo i
- g** - Aceleração da Gravidade
- $I_i$  - Momento de Inércia do veículo i
- $m_i$  - Massa do veículo i
- $N_i$  - Força Vertical no eixo i
- $S_i$  - Força transversal no acoplamento i
- $T_i$  - Força longitudinal no acoplamento i
- $u$  - Velocidade na direção do vetor i
- $V$  - Vetor velocidade
- $v$  - Velocidade na direção do vetor j
- $\omega$  - Velocidade Angular

Equações do Movimento para o veículo-trator:

Aplicando-se as Leis de Newton para o equilíbrio das forças:

$$\sum F_y = m \cdot \mathbf{a} \rightarrow m_0 \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) = -F_1 - F_2 - F_3 + S_1 \quad (1)$$



Figura 1: Foto de um conjunto bitrem

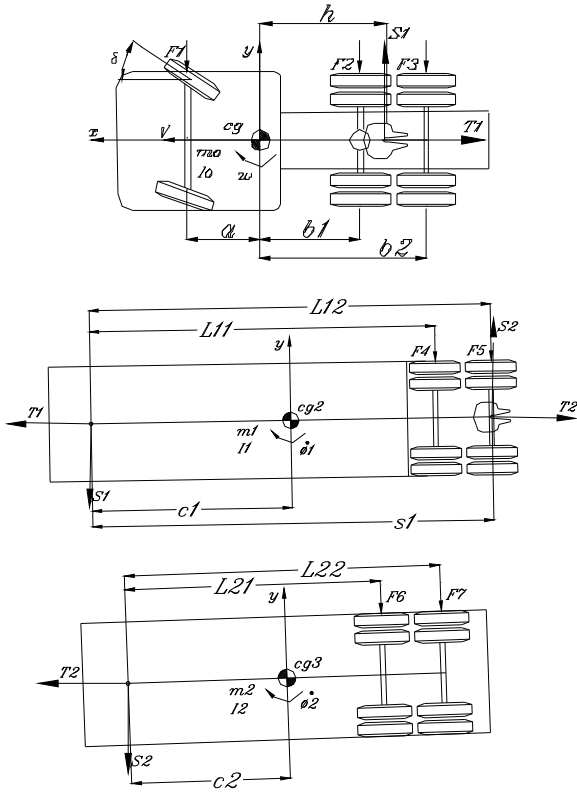


Figura 2: Unidades do bitrem – respectivamente: veículo-tractor, 1º semi-reboque e 2º semi-reboque.

Para o equilíbrio de momentos:

$$I_0 \cdot \dot{\omega} = -a \cdot F_1 + b_1 \cdot F_2 + b_2 \cdot F_3 - h \cdot S_1 \quad (2)$$

Para o primeiro semi-reboque:

$$0 = T_1 - T_2 - (F_4 + F_5) \cdot \phi_1 \quad (3)$$

$$0 = T_1 - T_2 - (F_4 + F_5) \cdot \text{sen} \phi_1 \quad \text{mas } \text{sen} \phi \cong \phi \text{ então, tem-se:}$$

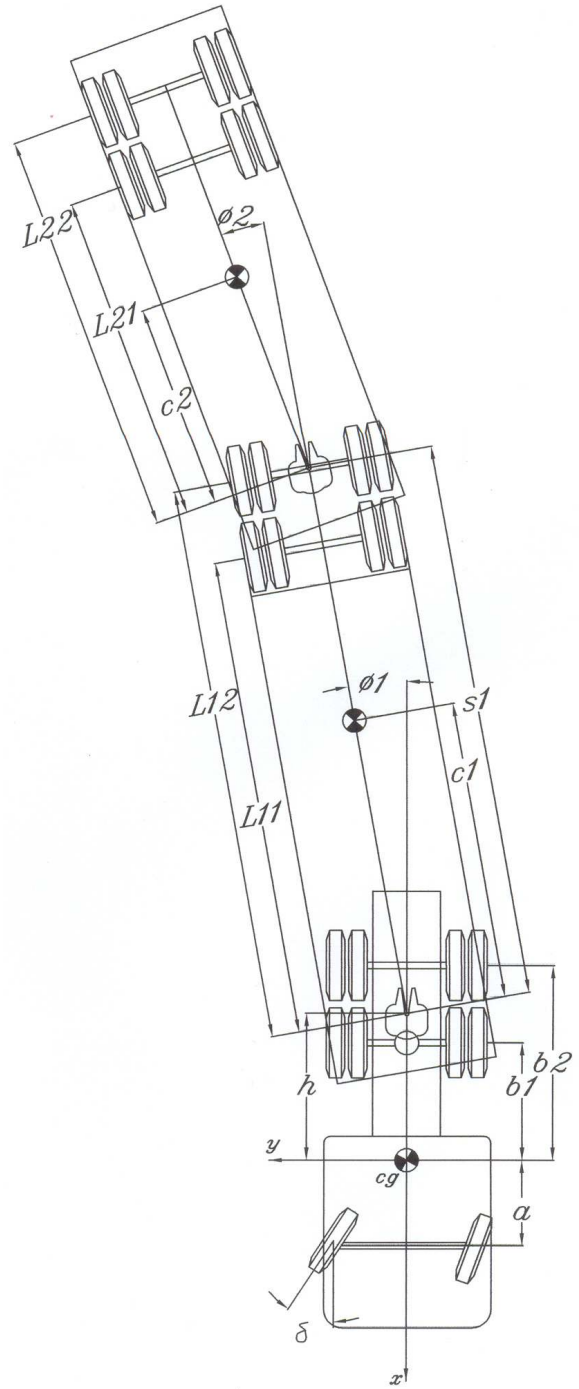


Figura 3: Modelo bitrem – Dimensões principais

$$m_1 \cdot [\dot{v} + V \cdot \omega - (h + c_1) \cdot \dot{\omega} - c_1 \cdot \ddot{\phi}_1] = -(F_4 + F_5) - S_1 + S_2 \quad (4)$$

$$I_1 \cdot (\dot{\omega} + \ddot{\phi}_1) = -c_1 \cdot S_1 - c_1 \cdot T_1 \cdot \phi_1 + (L_{11} - c_1) \cdot F_4 + (L_{12} - c_1) \cdot F_5 - (s_1 - c_1) \cdot S_2 - (s_1 - c_1) \cdot T_2 \cdot \phi_1 \quad (5)$$

Para o segundo semi-reboque:

$$0 = T_2 - (F_6 + F_7) \cdot \phi_2 \quad (6)$$

$$m_2 \cdot [\dot{v} + V \cdot \omega - (h + s_1 + c_2) \cdot \dot{\omega} - s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 - c_2 \cdot \ddot{\phi}_2] = -(F_6 + F_7) - S_2 \quad (7)$$

$$I_2 \cdot (\dot{\omega} + \ddot{\phi}_2) = -c_2 \cdot S_2 - c_2 \cdot T_2 \cdot \phi_2 + (L_{21} - c_2) \cdot F_6 + (L_{12} - c_2) \cdot F_7 \quad (8)$$

Eliminando-se as reações de acoplamento através da soma das equações (1), (5) e (7), tem-se:

$$-\sum_{i=1}^{i=7} F_i = (m_0 + m_1 + m_2) \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) - [m_1 \cdot (h + c_1) + m_2 \cdot (h + s_1 + c_2)] \cdot \dot{\omega} - (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) \cdot \ddot{\phi}_1 - m_2 \cdot c_2 \cdot \ddot{\phi}_2 \quad (9)$$

Multiplicando-se a equação (1) por  $h$ , isolando-se o termo  $h \cdot S_1$  e substituindo-se em (2):

$$m_0 \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) + I_0 \cdot \dot{\omega} = -(a + h) \cdot F_1 + (b_1 - h) \cdot F_2 + (b_2 - h) \cdot F_3 \quad (10)$$

Somando-se as equações (3) e (6) obtêm-se a equação:

$$T_1 = (F_4 + F_5) \cdot \phi_1 + (F_6 + F_7) \cdot \phi_2 \quad (11)$$

Da equação (6) tem-se que:

$$T_2 = (F_6 + F_7) \cdot \phi_2 \quad (12)$$

Somando-se as equações (4) e (7) pode-se isolar o valor de  $S_1$ :

$$S_1 = -m_1 \cdot [(\dot{v} + V \cdot \omega) - (h + c_1) \cdot \dot{\omega} - c_1 \cdot \ddot{\phi}_1] - \sum_{i=1}^{i=7} F_i - m_2 \cdot [(\dot{v} + V \cdot \omega) - (h + s_1 + c_2) \cdot \dot{\omega} - s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 - c_2 \cdot \ddot{\phi}_2] \quad (13)$$

Da equação (7) pode-se isolar o valor de  $S_2$

$$S_2 = -m_2 \cdot [(\dot{v} + V \cdot \omega) - (h + s_1 + c_2) \cdot \dot{\omega} - s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 - c_2 \cdot \ddot{\phi}_2] - (F_6 + F_7) \quad (14)$$

Substituindo-se as equações (11), (12), (13) e (14) na equação (5), desprezando-se os termos quadráticos de  $\phi$  e reagrupando os demais termos tem-se:

$$-(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) + [I_1 + m_1 \cdot c_1 \cdot (h + c_1) + m_2 \cdot s_1 \cdot (h + s_1 + c_2)] \cdot \dot{\omega} + (I_1 + m_1 \cdot c_1^2 + m_2 \cdot s_1^2) \cdot \ddot{\phi}_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_2 = L_{11} \cdot F_4 + L_{12} \cdot F_5 + s_1 \cdot (F_6 + F_7) \quad (15)$$

Para o segundo semi-reboque, substituindo-se as equações (14), (12) e (11) na equação (8) tem-se:

$$m_2 \cdot c_2 \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) + [I_2 + m_2 \cdot c_2 \cdot (h + s_1 + c_2)] \cdot \dot{\omega} + m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + (m_2 \cdot c_2^2 + I_2) \cdot \ddot{\phi}_2 = L_{21} \cdot F_6 + L_{22} \cdot F_7 \quad (16)$$

As forças externas são criadas no plano do piso entre o pneu e a pista.

Forças Laterais em Pneus:

Assumindo-se que para pequenos ângulos a Rigidez Lateral (*Cornering Stiffness*) é linear, tem-se a seguinte equação geral:

$$F_j = N_j \cdot \alpha_j \quad (17)$$

Com  $j = 1, 2, \dots, 7$  onde:

$N_j$  = Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) combinado do eixo  $j$

$\alpha_j$  = Ângulo de deriva no eixo  $j$ .

A força lateral em cada pneu dependerá também da força vertical aplicada no eixo em consequência da distribuição de peso do conjunto de veículos.

*Slip angle* – Ângulo de Deriva:

Para o pneu dianteiro do veículo-trator com um ângulo de esterçamento (*steer angle*)  $\delta$ , o ângulo de deriva - *slip angle* pode ser aproximado por (Jindra, 1966):

$$\alpha_1 = (v + a \cdot \omega) / V - \delta \quad (18)$$

O *slip angle* para o 2º e 3º eixo do veículo-trator podem ser aproximados por:

$$\alpha_2 = (v - b_1 \cdot \omega) / V \quad (19)$$

$$\alpha_3 = (v - b_2 \cdot \omega) / V \quad (20)$$

As expressões do *slip angle* dos eixos do semi-reboque podem ser aproximadas por:

$$\alpha_4 = [v - (h + L_{11}) \cdot \omega - L_{11} \cdot \dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (21)$$

$$\alpha_5 = [v - (h + L_{12}) \cdot \omega - L_{12} \cdot \dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (22)$$

$$\alpha_6 = [v - (h + s_1 + L_{21}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - L_{21} \cdot \dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (23)$$

$$\alpha_7 = [v - (h + s_1 + L_{22}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - L_{22} \cdot \dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (24)$$

Equações gerais do conjunto de veículos:

Substituindo-se as equações de  $F$  e  $\alpha$  e isolando-se os termos das equações (9), (10), (15) e (16) tem-se:

$$\begin{aligned} (m_0 + m_1 + m_2) \cdot \dot{v} + \left( \sum_{i=1}^{i=7} F_i \right) \cdot v / V - (m_1' + m_2') \cdot \dot{\omega} + [(m_0 + m_1 + m_2) \cdot V^2 - (N_1' + N_2' + N_3' + N_4' + N_5' + N_6' + N_7')] \cdot \omega / V \\ - (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) \cdot \ddot{\phi}_1 - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7) \cdot s_1] \cdot \dot{\phi}_1 / V - (N_4 + N_5) \cdot \phi_1 - m_2 \cdot c_2 \cdot \ddot{\phi}_2 - (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot \dot{\phi}_2 / V - (N_6 + N_7) \cdot \phi_2 = N_1 \cdot \delta \end{aligned} \quad (25)$$

Onde:

$$m_1' = m_1 \cdot (h + c_1)$$

$$m_2' = m_2 \cdot (h + s_1 + c_2)$$

$$N_1' = -N_1 \cdot a$$

$$N_2' = N_2 \cdot b_1$$

$$N_3' = N_3 \cdot b_2$$

$$N_4' = N_4 \cdot (h + L_{11})$$

$$N_5' = N_5 \cdot (h + L_{12})$$

$$N_6' = N_6 \cdot (h + s_1 + L_{21})$$

$$N_7' = N_7 \cdot (h + s_1 + L_{22})$$

$$\begin{aligned} m_0 \cdot h \cdot \dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3) \cdot h - N_1' - N_2' - N_3'] \cdot v / V + I_0 \cdot \dot{\omega} \\ + [m_0 \cdot h \cdot V^2 + N_1 \cdot a^2 + N_2 \cdot b_1^2 + N_3 \cdot b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3') \cdot h] \cdot \omega / V = N_1 \cdot (a + h) \cdot \delta \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} -(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) \cdot \dot{v} - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7) \cdot s_1] \cdot v / V \\ + (I_1 + m_1' \cdot c_1 + m_2' \cdot s_1) \cdot \dot{\omega} - [(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) \cdot V^2 - N_4' \cdot L_{11} - N_5' \cdot L_{12} - (N_6 + N_7) \cdot s_1] \cdot \omega / V + (I_1 + m_1 \cdot c_1^2 + m_2 \cdot s_1^2) \cdot \ddot{\phi}_1 + \\ [N_4 \cdot L_{11}^2 + N_5 \cdot L_{12}^2 + (N_6 + N_7) \cdot s_1^2] \cdot \dot{\phi}_1 / V + (N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12}) \cdot \phi_1 + (m_2 \cdot c_2 \cdot s_1) \cdot \ddot{\phi}_2 + (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_2 / V + (N_6 + N_7) \cdot s_1 \cdot \phi_2 = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} -m_2 \cdot c_2 \cdot \dot{v} - (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot v / V + (I_2 + m_2' \cdot c_2) \cdot \dot{\omega} \\ - (m_2 \cdot c_2 \cdot V^2 - N_6' \cdot L_{21} - N_7' \cdot L_{22}) \cdot \omega / V + m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 \\ + (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_1 / V + (I_2 + m_2 \cdot c_2^2) \cdot \ddot{\phi}_2 \\ + (N_6 \cdot L_{21}^2 + N_7 \cdot L_{22}^2) \cdot \dot{\phi}_2 / V + (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot \phi_2 = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

## MODELAMENTO DO RODOTREM



Figura 4: Foto de um conjunto rodotrem

Para o rodotrem, ilustrado na figura 4, do mesmo modo pode-se chegar as seguintes equações do movimento:

$$\begin{aligned} (m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot \dot{v} + \left( \sum_{i=1}^{i=9} F_i \right) \cdot v / V - (m_1' + m_2' + m_3') \cdot \dot{\omega} \\ + [(m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot V^2 - \sum_{i=1}^{i=9} N_i'] \cdot \omega / V - [m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot \ddot{\phi}_1 - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1] \cdot \dot{\phi}_1 / V \\ - (N_4 + N_5) \cdot \phi_1 - (m_2 \cdot c_2 - m_3 \cdot h_2) \cdot \ddot{\phi}_2 - [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot \dot{\phi}_2 / V - (N_6 + N_7) \cdot \phi_2 - m_3 \cdot c_3 \cdot \ddot{\phi}_3 - (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot \dot{\phi}_3 / V - (N_8 + N_9) \cdot \phi_3 = N_1 \cdot \delta \end{aligned} \quad (29)$$

onde:

$$m_1' = m_1 \cdot (h + c_1)$$

$$m_2' = m_2 \cdot (h + s_1 + c_2)$$

$$m_3' = m_3 \cdot (h + s_1 + h_2 + c_3) \quad N_1' = -N_1 \cdot a$$

$$N_2' = N_2 \cdot b_1$$

$$N_3' = N_3 \cdot b_2$$

$$N_4' = N_4 \cdot (h + L_{11})$$

$$N_5' = N_5 \cdot (h + L_{12})$$

$$N_6' = N_6 \cdot (h + s_1 + L_{21})$$

$$N_7' = N_7 \cdot (h + s_1 + L_{22})$$

$$N_8' = N_8 \cdot (h + s_1 + h_2 + L_{31})$$

$$N_9' = N_9 \cdot (h + s_1 + h_2 + L_{32})$$

$$m_0 \cdot h \cdot \dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3) \cdot h - N_1' - N_2' - N_3'] \cdot v / V + I_0 \cdot \dot{\omega} + [m_0 \cdot h \cdot V^2 + N_1 \cdot a_2 + N_2 \cdot b_1^2 + N_3 \cdot b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3') \cdot h] \cdot \omega / V = N_1 \cdot (a + h) \cdot \delta \quad (30)$$

$$-[m_4 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot \dot{v} - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1] \cdot v / V + [I_1 + m_4 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot \dot{\omega} - \{[m_4 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot V^2 - N_4' \cdot L_{11} - N_5' \cdot L_{12} - (N_6' + N_7' + N_8' + N_9') \cdot s_1\} \cdot \omega / V + [I_1 + m_4 \cdot c_1^2 + (m_2 + m_3) \cdot s_1^2] \cdot \ddot{\phi}_1 + [N_4 \cdot L_{11}^2 + N_5 \cdot L_{12}^2 + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1^2] \cdot \dot{\phi}_1 / V + (N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12}) \cdot \dot{\phi}_1 + (m_2 \cdot c_2 + m_3 \cdot h_2) \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_2 + [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_2 / V + (N_6 + N_7) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_2 + m_3 \cdot c_3 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_3 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_3 / V + (N_8 + N_9) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_3 = 0 \quad (31)$$

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

$$-m_3 \cdot c_3 \cdot \dot{v} - (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot v / V + (I_3 + m_3 \cdot c_3) \cdot \dot{\omega} - (m_3 \cdot c_3 \cdot V^2 - N_8' \cdot L_{31} - N_9' \cdot L_{32}) \cdot \omega / V + m_3 \cdot h_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_1 / V + m_3 \cdot c_3 \cdot h_2 \cdot \ddot{\phi}_2 + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot h_2 \cdot \dot{\phi}_2 / V + (I_3 + m_3 \cdot c_3^2) \cdot \ddot{\phi}_3 + (N_8 \cdot L_{31}^2 + N_9 \cdot L_{32}^2) \cdot \dot{\phi}_3 / V + (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot \dot{\phi}_3 = 0 \quad (33)$$

**SIMULAÇÃO DINÂMICA** - Para a simulação dinâmica dos Sistemas de Equações definidos para os conjuntos bitrem e rodotrem, foram considerados os dados de entrada de acordo com as especificações fornecidas pelos fabricantes dos veículos. Os Momentos de Inércia foram calculados com auxílio de software de CAD. Considerou-se que os veículos estão equipados com pneus Michelin XZA, cujos valores de Coeficiente de Curva (*Cornering Coefficient*) foram obtidos do livro *Theory of Ground Vehicles* (Wong, 1993). A Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) de cada eixo foi obtida considerando-se a carga vertical atuando em cada pneu na seguinte condição: Carregado (com carga máxima de acordo com o PBT para o conjunto).

Como condição de entrada do sistema considerou-se um esterçamento em forma senoidal de 1° de amplitude aplicado entre zero e dois segundos. Foram analisados os resultados a uma velocidade de deslocamento longitudinal de 70 km/h e ainda comparados com os mesmos resultados de 20 a 90 km/h.

**VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO** - Para validação dos modelos anteriores foram introduzidos os dados do *Paper Handling Characteristics of Tractor-Trailer Combinations* de Frederick Jindra (1966). Através do software MatLab e Simulink, com os mesmos dados do *Paper*, foram obtidos resultados semelhantes validando o procedimento proposto.

## AVALIAÇÃO DOS CVCS

O sistema desenvolvido baseia-se no mapeamento das acelerações laterais geradas por um veículo ou conjunto de veículos em um determinado percurso através de um sistema de GPS (*Global Position System*) acoplado a módulos de acelerômetros biaxiais, conforme ilustrado na Figura 5. Um software gerenciador registra os dados instantaneamente gerando uma planilha. O sistema é composto por um micro-computador, um controlador de comunicação, um GPS e módulos de acelerômetros.

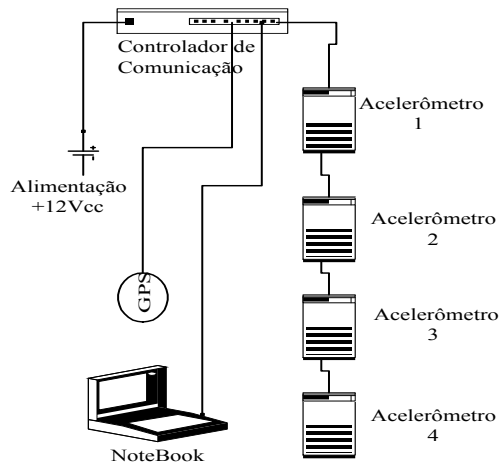


Figura 5: Sistema para mapeamento das acelerações

Os dados registrados, para cada um dos acelerômetros são: Data, Hora, Velocidade em km/h, Longitude, Latitude, Aceleração e Inclinação no eixo "X", Aceleração e Inclinação no eixo "Y".

### RESULTADOS E CONCLUSÕES

RESULTADO DA ANÁLISE MATEMÁTICA - Com auxílio dos Softwares MatLab e Simulink foram simulados os modelos de CVCs: bitrem e rodotrem, tendo sido obtidos os resultados a seguir apresentados nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10.

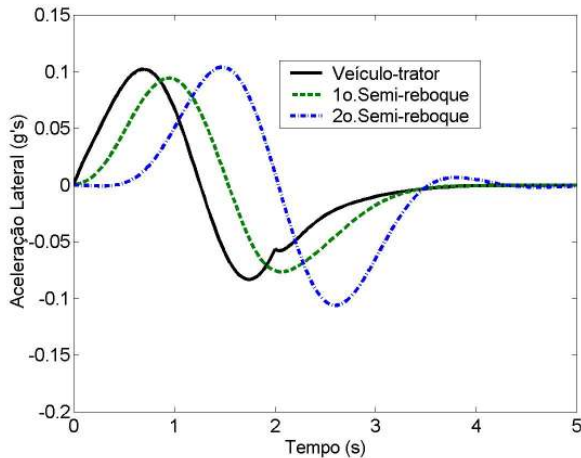


Figura 6: Amplificação Traseira – bitrem carregado.

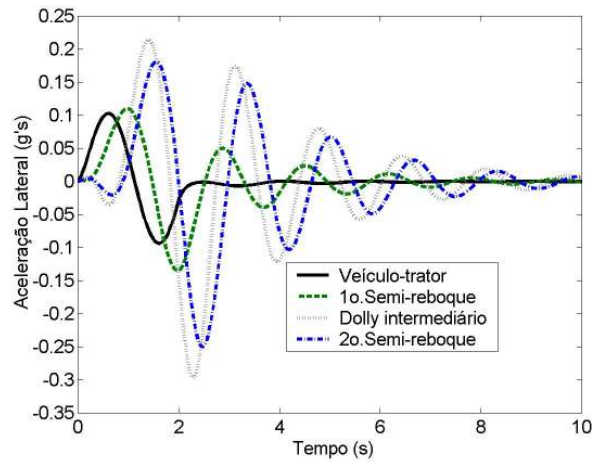


Figura 7: Amplificação Traseira – rodotrem com 19,8 metros, carregado.

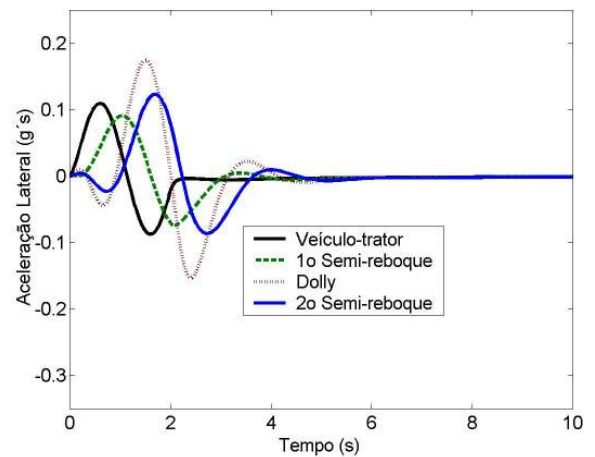


Figura 8: Amplificação Traseira – rodotrem com 30 metros, carregado (de acordo com Res. 184/ 2005).

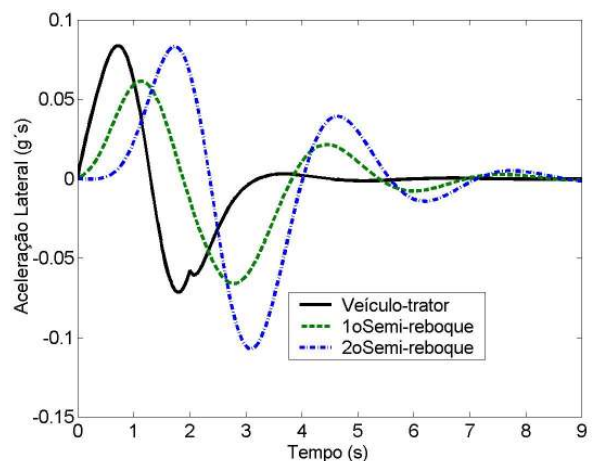


Figura 9: Bitrem – 1ª carreta vazia e 2ª carregada.



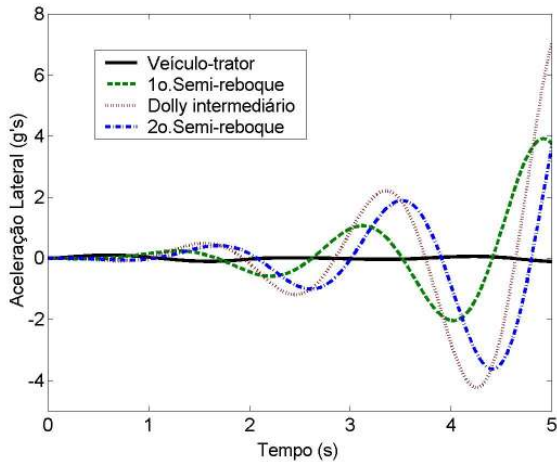


Figura 10: Rodotrem – 1ª vazia carreta e 2ª carreta carregada).

**AVALIAÇÃO DE UM CVC COM ACELERÔMETROS** - Foi monitorado um conjunto do tipo bitrem tanque, na condição carregado. As manobras foram realizadas em um circuito fechado com curvas à direita e manobras evasivas aleatórias, de maneira a comparar o desempenho do veículo-trator com o segundo semi-reboque, na questão da amplificação da aceleração lateral. Os ensaios foram executados em baixa velocidade, tendo em vista que os veículos não eram dotados de nenhum sistema anti-tombamento. Um dos gráficos obtidos está representado na Figura 11, onde se observa a defasagem dos movimentos e o início da amplificação lateral nas velocidades superiores.

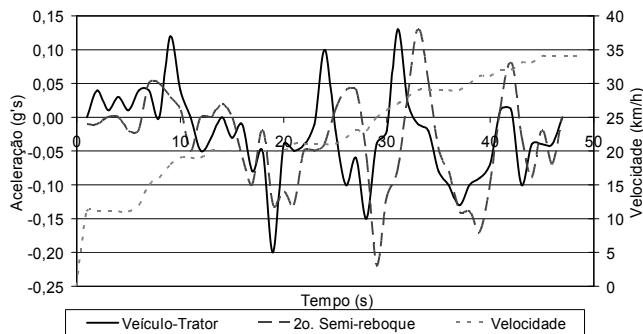


Figura 11: Gráfico de Acelerações laterais de um bitrem

## CONCLUSÕES DO TRABALHO:

1. De modo geral, o conjunto do tipo bitrem mantem-se relativamente estável nas manobras avaliadas, com uma amplificação traseira pequena comparada com a apresentada pelo rodotrem.
2. Na condição com o 1º Semi-reboque vazio e 2º carregado, as acelerações laterais e o tempo de estabilização são maiores em ambos os conjuntos, sendo que o rodotrem torna-se instável na manobra avaliada, levando ao tombamento lateral.
3. O conjunto rodotrem com comprimento maior (30 metros), de acordo com a Resolução 184/2005 do CONTRAN, apresenta amplificações traseiras menores que o rodotrem anterior (19,8 metros), sendo, portanto, mais seguro nesse requisito.
4. Na avaliação de um bitrem observou-se amplificação lateral de 0,07 g's da última unidade em relação ao veículo-trator e defasagem no tempo entre os valores de pico das unidades. Chegou-se a um máximo de 0,23 g's na última unidade em manobra do tipo senoidal.
5. Devido a maior instabilidade do conjunto do tipo rodotrem é recomendável uma redução de sua velocidade máxima permitida para 60 km/h.
6. Devido ao fenômeno da amplificação traseira do movimento é recomendável que os motoristas desses conjuntos recebam treinamento específico para evitar as manobras que tornam esse fenômeno significativo. Assim como as transportadoras devem ser orientadas de modo a não utilizar os conjuntos com carga somente na última unidade.
7. Pelo mesmo motivo é recomendável que as autoridades de trânsito ou concessionárias de rodovias analisem os projetos das vias existentes e as normas de construções das novas identificando os pontos críticos para os CVCs, afim de sinalizá-las adequadamente, reduzindo a possibilidade de acidentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (1998a). *Resolução Nº. 68 de 23 de setembro de 1998*. Estabelece os requisitos necessários para a circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC. Publicado no Diário Oficial da União de 25 de setembro de 1998, Seção 1, páginas 20 e 21.
- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (1998b). *Resolução Nº. 12 de 06 de fevereiro de 1998*. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Publicado no Diário Oficial da União de 12 de fevereiro de 1998, Seção 1, páginas 88 e 89.
- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (1984). *Resolução Nº. 631/84*. Estabelece os requisitos segurança à circulação de combinações de veículos. Publicado no Diário Oficial da União de 01 de junho de 1984.
- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (2005). *Resolução Nº. 184/05*. Altera as Resoluções 12/98 e 68/98 do CONTRAN e revoga a Resolução 76/98 do CONTRAN. Publicado no Diário Oficial da União de 04 de novembro de 2005.
- DUGOFF, H.; MURPHY, R. W (1971). *The Dynamic Performance of Articulated Highway Vehicles – A Review of the State-of-the-Art*. SAE Paper 710223.
- ESMAILZADEH, E (1996). *Directional Performance and Yaw Stability of Articulated Combination Trucks*. SAE Paper 962154.
- JINDRA, FREDERICK (1966). *Handling Characteristics of Tractor-Trailer Combinations*. SAE Paper 650720.
- SAMPSON, DAVID JOHN MATTHEW (2000). *Active Roll Control of Articulated Heavy Vehicles*. 78 f. Tese (Doutorado) – Cambridge University Engineering Department.
- SETCERGS (2000a). *Modal Rodoviário, sua Evolução e Tendências*. Revista Transnotícias, Edição No. 154 de junho/2000. Disponível em <www.abti.com.br> Acesso em 20 de dezembro de 2003.
- SETCERGS (2000b). *O Transporte Rodoviário de Cargas em Dados no Brasil*. Disponível em <www.setcergs.com.br/trc/brasilTRC.htm.> Acesso em 20 de dezembro de 2003.
- WINKLER, CHRIS (2000). *Rollover of Heavy Commercial Vehicles*. University of Michigan – UMTRI, Vol. 31, No.4.
- WONG, J.Y (1993). *Theory of Ground Vehicles*. Wiley-Interscience Publication. Ottawa-Canada.

### Endereço do autor:

Eng<sup>o</sup> Rubem Penteadado de Melo, MSc.  
Transtech Engenharia e Inspeção Ltda.  
E-mail: rubem@transtech.com.br  
Rua Wanda dos Santos Mullmann, 1035;  
Pinhais-PR. CEP. 83323-400  
41 3033-6753 / 3557-6050