

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA DE VEÍCULOS DE CARGA

por

Luiz Rebelatto Neto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2013.

ANÁLISE COMPARATIVA DE VEÍCULOS DE CARGA

por

Luiz Rebelatto Neto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2013.

REBELATTO, L. N. ANÁLISE COMPARATIVA DE VEÍCULOS DE CARGA, 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O presente trabalho busca analisar comparativamente aspectos de frenagem, tracionamento, legislação e viabilidade econômica de dois tipos de semirreboque tracionados pelo mesmo caminhão, no trajeto entre os estados do Mato Grosso e do Paraná, transportando cargas ligadas ao agronegócio. A justificativa se deve ao fato de que grãos serem um dos itens mais exportados pelo país, sendo que grande parte, nessa rota e pelo modal rodoviário. A análise das duas composições vai se dar de forma comparativa, de modo que as variáveis possam ser verificadas numa análise global do problema. Para a análise econômica serão usados dados históricos de duas transportadoras que operam na rota. Para a análise técnica serão usados dados técnicos dos veículos a fim de verificar sua segurança. Com esse trabalho espera-se mostrar qual composição traz mais benefícios, tanto para os transportadores, quanto para os produtores de grãos e para o país, de modo a tornar mais competitivo a cadeia do agronegócio.

PALAVRAS-CHAVE: transporte; caminhões; bitrem; bitrenção

REBELATTO, L.N. **COMPARATIVE ANALYSIS OF VEHICLES CARGO**. 2013. 15. Monography Work Conclusion Course in Mechanical Engineering - Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This study aims to comparatively analyze safety aspects, legislation and braking, traction, economic feasibility of two types of semi-trailer pulled by the same truck, on the way between states of Mato Grosso e Paraná, carrying cargo related to agribusiness. The reason of this work is due to the fact that beans are one of the most exported items by country, and largely on the route and by road. The analysis of the two compositions will be given on a comparative basis, so that variables can be checked in an overall analysis of the problem. For the economic analysis will be used historical data from two freight companies that operating in the route. For technical analysis will be used technical data of vehicles to check their safety. With this work is expected to show that composition is more beneficial for freight companies and for grain farmers and the country in order to become more competitive agribusiness chain.

KEYWORDS: truck, semi-trailers, transport

AGRADECIMENTOS:

Agradeço principalmente a Marcelo Alves da Silva, o Geléia, pelas informações que foram fundamentais a esse trabalho.

Ao Engenheiro Joel Boaretto, da empresa Guerra, que forneceu dados técnicos as respeito dos veículos, bem como normas.

A minha irmã Érica na estruturação do tema.

Agradecimento a Prof. Adriane Petry pelas idéias para ensaiar os veículos no túnel de vento, bem como a análise dos resultados.

Ao Batista e Sérgio Bartex nas montagens dos ensaios do túnel de vento.

Ao professor Walter Casas.

Ao professor Joyson pelo empenho e compreensão do trabalho.

A bibliotecária Vera Longaray pela ajuda na busca pela bibliografia para este trabalho e durante o curso.

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO: | 1 |
| 2 | OBJETIVOS: | 4 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 3.1 | DADOS DO PERCURSO: | 4 |
| 3.2 | CONFIGURAÇÕES DOS VEÍCULOS: | 4 |
| 3.2.1 | CAVALO TRATOR (CAVALO): | 4 |
| 3.2.2 | BITREM: | 4 |
| 3.2.3 | BITRENZÃO: | 5 |
| 3.3 | A LEGISLAÇÃO SOBRE OS VEÍCULOS DE CARGA: | 5 |
| 3.4 | FATORES QUE INFLUENCIAM NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL: | 6 |
| 3.4.1 | ATRITO DE ROLAMENTO: | 6 |
| 3.4.2 | ARRASTE: | 6 |
| 3.5 | SISTEMA DE FRENAGEM: | 6 |
| 3.6 | SISTEMA DE TRACIONAMENTO: | 7 |
| 3.7 | ESTABILIDADE LATERAL (TOMBAMENTO): | 8 |
| 3.7.1 | CENTRO DE GRAVIDADE: | 8 |
| 4 | METODOLOGIA EMPREGADA: | 8 |
| 4.1 | CONSUMO DE COMBUSTÍVEL: | 9 |
| 4.1.1 | ATRITO DE ROLAMENTO: | 9 |
| 4.1.2 | PESO DA CARGA: | 9 |
| 4.1.3 | ARRASTE - TÚNEL DE VENTO | 9 |
| 4.2 | SISTEMA DE TRACIONAMENTO: | 11 |
| 4.3 | TOMBAMENTO: | 11 |
| 4.4 | VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE FREIOS: | 12 |
| 4.5 | VIABILIDADE ECONÔMICA: | 13 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 14 |
| 6 | CONCLUSÕES: | 14 |
| 7 | REFERÊNCIAS: | 15 |

1 INTRODUÇÃO:

O transporte de produtos a granel respondeu por 18,4% do total de cargas transportadas no Brasil no ano de 2005 (IBGE). Nos últimos três anos, o setor de transporte foi surpreendido mudanças na legislação e assim tiveram sucessivas reduções de eficiência que comprometeram a rentabilidade das empresas de transporte. As mudanças mais impactantes foram a Resolução 373 do Denatran (2010) que passou a exigir uma mudança no tipo de tracionamento dos veículos tratores usados para rebocar um semirreboque conhecido como bitrem, que é composto por duas caixas de carga, unidos por uma articulação. Antes da promulgação da resolução 373, um bitrem podia ser tracionado por um veículo denominado configuração 6X2 (trucado), mais barata e passou a ser exigida o tracionamento 6x4 (traçado), sendo esse cavalo trator cerca de 10% mais caro que o seu antecessor. A figura 1.1 abaixo exemplifica as duas configurações.

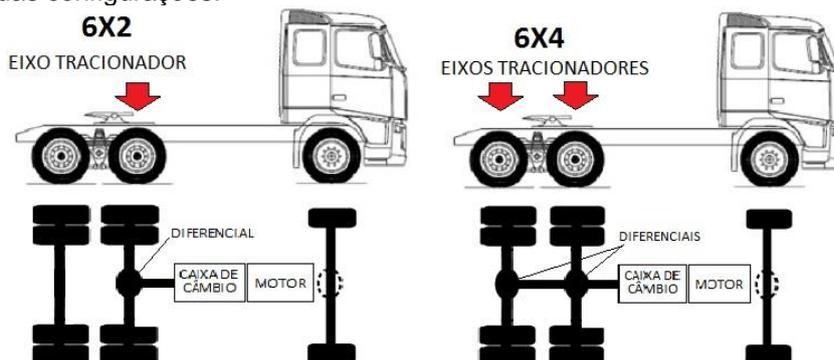


Figura 1.1: Configurações de tracionamento dos cavalos tratores 6X2 e 6X4 (Adaptado pelo autor a partir de VOLVO).

Outro revés foi o endurecimento das leis trabalhistas com a publicação da Lei Motorista Profissional ou Lei do Descanso (Lei 12.619/2012) que passou a obrigar os motoristas a fazer paradas compulsórias de 15 minutos a cada 4 horas de viagem no trajeto até seu destino, além de limitar a jornada máxima em 10 horas diárias de transito. Antes da publicação dessa lei, jornadas de viagem superiores a 12 horas sempre foram comuns no setor. Essas determinações da lei levaram a mais uma redução na eficiência das transportadoras.

Outra grande revés no lado financeiro para essas empresas foi que as empresas embarcadoras não puderam mais carregar os veículos no valor limite máximo de peso sem tolerância. Para exemplificar, um veículo que tinha capacidade nominal de carga estabelecida em 37 toneladas, era carregado no seu limite superior de tolerância de peso que era de perto 40 toneladas. Assim, após essa regulamentação do Contran, os veículos passaram a transportar cerca de 3 toneladas de peso a menos.

O transportador, vendo sua rentabilidade diminuir a cada mudança na legislação, se viu obrigado a aumentar sua eficiência e uma saída encontrada foi aumentar a quantidade de produto transportada em cada viagem da sua frota, visto que no transporte de cargas a granel como grãos, a receita financeira de cada frete é pago proporcionalmente ao número de toneladas transportadas. Uma das possibilidades que surgiram foi criar um semirreboque adaptado a partir de um bitrem, chamado bitrenzão, com dois eixos extras e capacidade de carga superior.

Porém, para transportar mais produtos em uma mesma viagem, o veículo teria que ter outras características físicas de modo a satisfazer a legislação do Código de Transito Brasileiro (CTB) e de modo paralelo não exigir mudanças nos locais os esses veículos são carregados/descarregados. No transporte de cargas a granel sólidas, as duas estruturas mais importantes são a balança rodoviária e o tombador (figura 1.2).

A balança rodoviária é o termo designado para o equipamento usado em todos os locais para pesagem de veículos a fim de determinar quanto produto foi carregado dentro da indústria/fazenda. O método usado é pesar o veículo vazio antes de carregar para determinar sua Tara e pesar o veículo após ser carregado para se obter o seu Peso Bruto Total Combinado (PBTC), assim facilmente determinando-se a quantidade de produto (carga útil) que foi carregado no veículo (figura 1.3).



Figura 1.2: Tombadores de cargas tipo granel (veículos inclinados) e balanças rodoviárias em indústrias (veículos na horizontal) (fonte: banco de imagens Google).

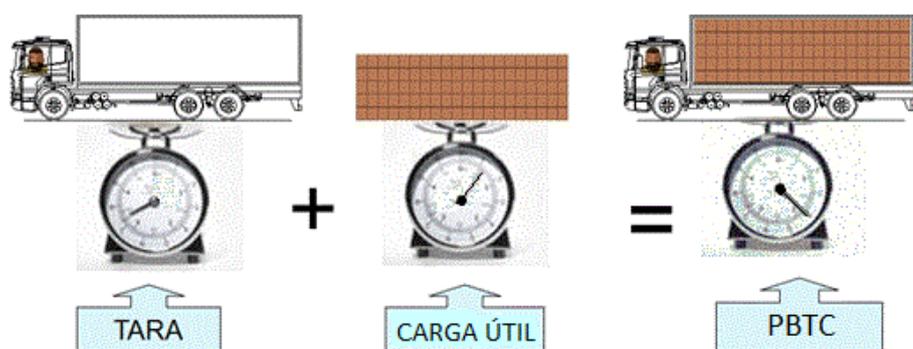


Figura 1.3: esquema de pesagem (adaptado pelo autor a partir de banco de imagens Google).

Tombadores são estruturas do tipo plataformas elevatórias articuladas, de forma a inclinar o veículo a fim de que a carga escoe para fora da sua carroceria, local onde estava armazenada. É o meio mais rápido para retirada de cargas de veículos graneleiros. Na figura 1.2 as estruturas inclinadas são exemplos de tombadores. Tanto as balanças quanto os tombadores são estruturas fixas que atendem diversos veículos, porém a maior limitação dessas estruturas é o comprimento máximo dos veículos que podem ser pesados/descarregados.

Qualquer modificação nos veículos a fim de transportar mais produto em uma mesma viagem tem que estar alinhada com essas limitações de tamanho de balanças e tombadores instalados pelo país. Essa afirmativa se comprova com a pesquisa apresentada na tabela 1.1 feita informalmente com motoristas e esta mostrou que a grande maioria das balanças e tombadores atendem composições de até 20 metros. Foram identificados somente três locais conhecidos pelos entrevistados em todo o país que possuem equipamentos para atender veículos de 20 até 30 metros. Caso a pesquisa fosse ampliada, provavelmente o número de locais que atendem bitrem/bitrenzo e carretas somente seria ampliado.

As principais composições de caminhões utilizadas no transporte de grãos e fertilizantes são o bitrem, o bitrenzo, o rodotrem, bitrenzo longo e a carreta, sendo que suas características técnicas são apresentadas na tabela 1.2. Na figura 1.4 estão apresentadas exemplos das composições bitrem e bitrenzo.

Como conclusão principal a respeito dos dados obtidos pela pesquisa foi de que bitrenzo longo (de 25 ou 30 metros) é inviável na atual estrutura embarcadora/recebedora de cargas a granel do Brasil.

Tabela 1.1: Pesquisa feita sobre os maiores veículos comportados pelas balanças e tombadores de cargas no Brasil (Compilação de dados obtidos pelo autor junto a motoristas, 2013).

| Nº | Empresa - Cidade - UF | Maior Veículo que pode ser atendido | | | | |
|----|----------------------------------|-------------------------------------|--------|-----------|--------------|------------------|
| | | Carreta | Bitrem | Bitrenção | Rodotrem 25m | Bitrem Longo 25m |
| 1 | Minuano - Arroio do Meio - RS | X | | | | |
| 2 | Oleoplan - Veranópolis - RS | X | | | | |
| 3 | Yoki - Nova Prata - RS | X | | | | |
| 4 | Frig. Nova Bassano - RS | X | | | | |
| 5 | Granja - Nova Petropolis - RS | X | | | | |
| 6 | BR Foods - Marau - RS | X | X | X | | |
| 7 | Porto de Rio Grande - RS | X | X | X | | |
| 8 | Porto de Paranaguá - PR | X | X | X | | |
| 9 | Bonanza - Dourados - MS | X | X | X | | |
| 10 | Fabrica de Rações - Xaxim - SC | X | X | X | | |
| 11 | Louis Dreyfus - São Simão - GO | X | X | X | | |
| 12 | Mandacari - São Simão - GO | X | X | X | | |
| 13 | Sadia - Toledo - PR | X | X | X | | |
| 14 | ALL - Term. Alto Taquari - MT | X | X | X | | |
| 15 | ALL - Term. Alto Araguaia - MT | X | X | X | | |
| 16 | Agrogen - Montenegro - RS | X | X | X | | |
| 17 | Bianchini - Canoas - RS | X | X | X | | |
| 18 | ALL - Term. de Rondonópolis - MT | X | X | X | X | X |
| 19 | Porto de Santos | X | X | X | X | X |
| 20 | Vale - Araguari - MG | X | X | X | X | X |



Figura 1.4: Fotos dos veículos analisados: Bitrem e Bitrenção, respectivamente (Catálogo GUERRA / Banco de Imagens Google).

A tabela 1.2 mostra as principais composições usadas no transporte de cargas a granel, sendo que todos os veículos, exceto o número 3, são composições com projeto homologado junto ao Denatran. O veículo número 3 apresenta as características da solução caseira encontrada pelo setor de transporte para atender a necessidade de transportar mais produto em uma mesma viagem.

Tabela 1.2: Dados técnicos das principais composições usadas no transporte de cargas a granel (Compilação de dados do disponíveis junto ao DNIT, 2013).

| VEÍCULO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| | CAVALO + CARRETA | CAVALO + BITREM | CAVALO + BITRENÇÃO | CAVALO + RODOTREM | CAVALO + BITREM LONGO |
| Tara - (kg) | 17.000 | 19.500 | 22.500 | 23.000 | 23.000 |
| Peso da Carga Útil (kg) | 31.500 | 37.500 | 51.500 | 51.000 | 51.000 |
| PBTC (Tara + Carga Útil - kg) | 48.500 | 57.000 | 74.000 | 74.000 | 74.000 |
| Número de eixos | 6 | 7 | 9 | 9 | 9 |
| Comprimento Total (cavalo + semi reboque) - m | 17,5 | 18,6 | 19,8 | 25 ou 30 | 25 ou 30 |
| Necessidade de Autoriz. Especial Transito (AET) | Não | Não | Sim | Sim | Sim |
| Restrição de trafego pela noite | Não | Não | Sim | Sim | Sim |
| Fabricado por Implementadoras | Sim | Sim | Não | Sim | Sim |
| Semirreboque Modificado | Não | Não | Sim | Não | Não |
| Tamanho Mínimo de Balança e Tombador para pesar e descarregar o veículo (m) | 17,5 | 20 | 20 | 25 ou 30 | 25 ou 30 |

A principal rota de cargas a granel é baseada na cadeia do agronegócio, entre os estados de Mato Grosso e o porto de Paranaguá (PR). Nessa rota, caminhões, graneleiros carregam grãos (soja, milho, etc.) produzidos nas fazendas e descarregam nos portos. Para retornar ao Mato Grosso em busca de outras cargas de grãos, as empresas transportadoras utilizam a localização estratégica das fábricas

de fertilizantes agrícolas (cloreto, uréia, compostos) no entorno dos portos e transportam até as fazendas do Centro Oeste brasileiro a fim de fazer correções no solo e aumento de produtividade das mesmas.

De acordo do o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), os quatro produtos agrícolas mais exportados pelo Brasil no ano de 2005 foram a soja, seguido do farelo de soja, milho e arroz, totalizando 38.199 mil toneladas.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a análise comparativa de duas Composições Veiculares de Carga (CVC), tipo bitrem e bitrenzão, apontadas na tabela 1.2 pelos números 2 e 3, compostas cada uma de cavalo trator e semirreboque destinado ao transporte de cargas sólidas a granel, entre os estados do Mato Grosso e o porto de Paranaguá, no estado do Paraná.

Com base nas duas composições da Tabela 2.1, os seguintes objetivos serão buscados para os veículos:

- Avaliar o impacto das variáveis arrasto, rolamento no consumo de potência dos dois veículos.
- Avaliar, de forma comparativa, a capacidade de frenagem para as duas composições.
- Analisar, de forma comparativa, o risco de tombamento dos dois veículos.
- Comparar a viabilidade econômica das duas composições.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DADOS DO PERCURSO:

Do trecho analisado entre Paranaguá e Sorriso que tem 2.343 quilômetros, apenas cerca de 200 quilômetros são percorridos em estradas com duas pistas em cada sentido do transito, principalmente nos contornos de capitais e grandes cidades como Cascavel, PR e Rondonópolis, MT. No trecho existem sete locais de pesagem obrigatória para caminhões distribuídos pelos três estados, sendo que veículos com excesso de peso são retidos até o transbordo de carga excedente, além de multas (CTB).

3.2 CONFIGURAÇÕES DOS VEÍCULOS:

As composições denominadas Bitrem e Bitrenzão são apresentadas nos itens a seguir, sendo que ambas os semirreboques são tracionados pelo mesmo cavalo trator.

3.2.1 CAVALO TRATOR (CAVALO):

O cavalo trator usado é o modelo Volvo FH 6x4 (traçado), Cabine Globetrotter, 540 CV (1450-1900 rpm), Torque 2600 Nm (1050-1450 rpm) ou 265 kgf.m, caixa de cambio i-Shift AT2612D Automática / Manual com relações de redução máxima de 14,94 : 1, redução constante nos diferenciais de 3,4 : 1, sem redução nos cubos, Capacidade Máxima de Tração (CMT) de 78 toneladas, ou seja, o peso do veículo vazio (Tara) + carga útil, pode ser de no máximo útil pode ser de no máximo 78 toneladas (PBTC) Outros detalhes técnicos do veículo estão apresentadas no Anexo 1.

3.2.2 BITREM:

O semirreboque usado no comparativo é um bitrem graneleiro padrão, composto de duas carretinhas ligadas por duas articulações do tipo 5ª roda. A figura 3.1 mostra um exemplo de configuração bastante comum.

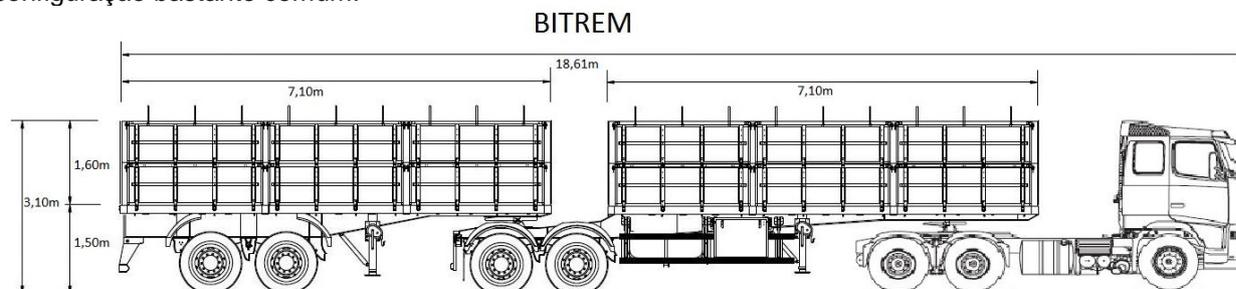


Figura 3.1: Vista lateral da composição veículos tipo bitrem (Desenho adaptado pelo autor a partir de VOLVO, 2013 e GUERRA, 2013).

3.2.3 BITRENZÃO:

O semirreboque utilizado no comparativo denominado "bitrenzão", também conhecido em algumas regiões do país como "9 eixos" ou "bitrenzão curto", é uma adaptação a partir de um bitrem usado (equipamento nunca foi fabricado por montadoras) no qual, solicitava-se a inclusão de um eixo adicional em cada carretinha ao órgão competente de regulamentar o trânsito, para elevar a capacidade de carga. A figura 3.2 exemplifica uma configuração final fruto da transformação.

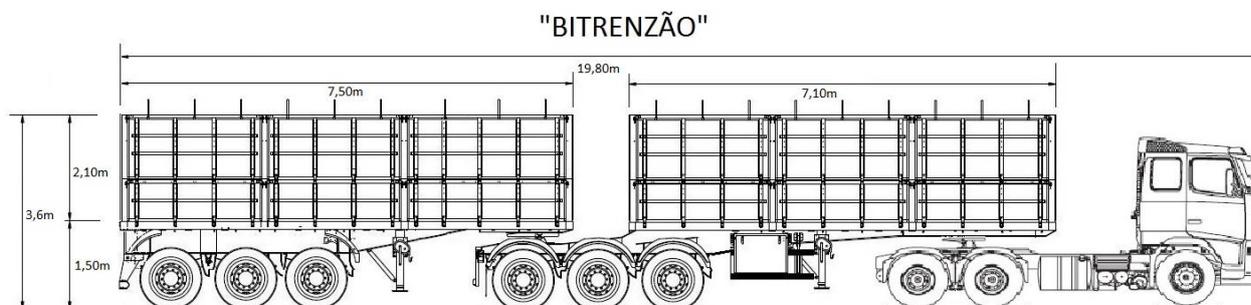


Figura 3.2: Vista lateral da composição veículas tipo bitrenzão (Desenho adaptado pelo autor a partir de VOLVO, 2013 e GUERRA, 2013).

3.2.3.1 PROCEDIMENTO PARA TRANSFORMAÇÃO DE UM BITREM EM "BITRENZÃO" E CIRCULAÇÃO:

Esse procedimento de transformação foi usado legalmente até setembro de 2012, quando foi publicada a resolução 418 e 419 do Contran, que proibiu a inclusão de eixos auxiliares em semirreboques fabricados até fev/06. O procedimento utilizado por transportadores era de solicitar a inclusão do terceiro eixo em cada carretinha ao órgão competente no estado (normalmente Detran); após a liberação, o veículo era desmontado e modificado de modo a aumentar comprimento de chassi (somente na carretinha oposta ao cavalo), altura da caixa de carga, reforços, etc.. conforme figuras 3.1 e 3.2. Após essa etapa, o veículo sofria uma vistoria do Inmetro de modo a garantir que as modificações sejam atestadas as condições de estabilidade e de segurança da Combinação de Veículos de Carga (CVC) mediante uma ART de um Engenheiro Mecânico (Res. 211); no caso de ser aprovado, o Detran expedia um novo documento de trânsito com a capacidade de carga elevada e indicando que cada carretinha passava a contar com três eixos. Para circulação desse bitrenzão ficaram restrições como a necessidade de ser expedida uma Autorização Especial de Trânsito (AET), expedida pela autoridade legal da rodovia.

3.3 A LEGISLAÇÃO SOBRE OS VEÍCULOS DE CARGA:

Por ser um veículo tradicional no mercado e fabricado por montadoras de carrocerias há anos ele se enquadra na categoria de veículo bi-articulado, cujo comprimento total (cavalo trator + semirreboque) não ultrapassa 19,8m e nem ultrapassa o limite de Peso Bruto Total Combinado (PBTC) de 57 toneladas (Resolução 211 Contran). Atualmente para tracionar bitrem, a Resolução 373 do Contran, exige a utilização cavalos tratores com sistema trator 6x4 (traçado), conforme figura 1.1.

Para tracionar um "bitrenzão" com PBTC de 74 toneladas é exigido a mesma configuração de tracionamento 6X4, além do veículo ter sua Capacidade Máxima de Tração (CMT) homologada de mínimo 74 toneladas. A legislação sobre pesos por eixos está disponível no órgão que responsável pela fiscalização nas estradas, sendo que esta apresentada na figura 3.3 de forma resumida.

Outra diferença entre as exigências para os dois veículos é que bitrem não necessita obter junto aos órgãos responsáveis pela conservação da rodovia uma (AET). A AET é uma exigência da resolução 211 do Contran exige que além de plantas dimensionais do conjunto e detalhes, cálculo demonstrativo da unidade tratora vencer rampa com inclinação de 6% e capacidade de frenagem, sendo essa autorização necessita de uma anotação de responsabilidade técnica (ART) feita necessariamente por um Engenheiro Mecânico.

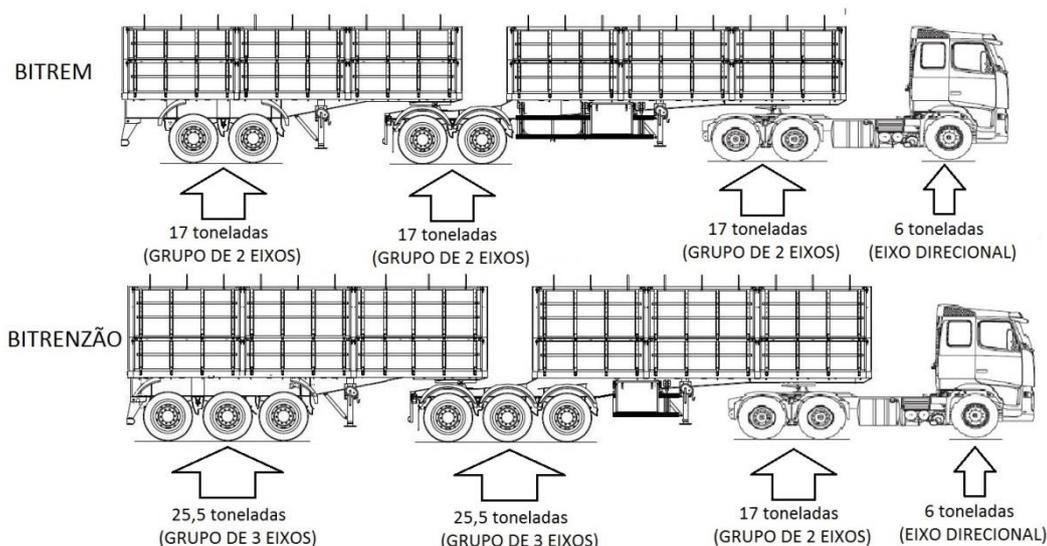


Figura 3.3: Distribuição de pesos por eixos em um veículo carregado e grupo de eixos para os dois veículos (imagem construída a parti de GUERRA, VOLVO e dados das tabelas DNIT de distribuição de peso por eixos).

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.

Dentre os fatores que influenciam o consumo de combustível, o arraste e a resistência ao rolamento são os principais. O arraste se deve basicamente ao formato do veículo e rugosidade superficial e é devido a resistência ao escoamento do ar no entorno do veículo.

3.4.1 ATRITO DE ROLAMENTO:

O atrito de rolamento se deve a resistência na região de contato do pneu com a pista. A força de resistência ao rolamento nos pneus de cada eixo depende principalmente das deformações dos pneus e da via na área comum de contato, pressão do ar no interior dos pneus, da velocidade e do peso do veículo. De acordo com Shames (2002), para manter o movimento uniforme é necessária a aplicação de uma força horizontal descrita pela equação 3.1 (Shames, 2002):

$$P = W \cdot \frac{a}{r} \quad (3.1)$$

Onde W = carga em Newtons por eixo; a = coeficiente. de resistência ao atrito entre pneu e o pavimento = $640\mu\text{m}$ (valor indicado por Shames, 2002); r = raio do pneu

3.4.2 ARRASTE:

De acordo com FOX (1934), o arraste é componente da força sobre um corpo que atua paralelamente a direção do movimento relativo. A consideração feita para cálculo do coeficiente de arraste (C_d) dos veículos é semelhança geométrica a placa plana (FOX, 1934). O coeficiente de arrasto é definido pela equação 3.2:

$$C_d = \frac{F_d}{2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (3.2)$$

onde C_d = Coeficiente de Arrasto, F_d = Força de arrasto; ρ = densidade do ar; V = velocidade do veículo ou do escoamento; A = área frontal (transversal) do veículo.

3.5 SISTEMA DE FRENAGEM:

O sistema de freios, tanto dos cavalos tratores, como dos semirreboques bitrem e bitrenão são do tipo pneumático composto basicamente por tambor e lonas de freio como a da figura 3.4. Deve ser ressaltado que esse sistema é usado em todos os eixos, inclusive no eixo direcional, sendo que somente o cavalo conta com sistema ABS (Antilock Braking System), porém os semirreboques analisados não apresentam esse sistema.



Figura 3.4: Sistema de freios utilizado em todos os eixos dos veículos analisados (Master, 2013)

As normas brasileiras verificadas em relação a frenagem foram a 10966, 10967, 10968, 10969 e 10970, porém a grande maioria estabelece parâmetros de testes (distância percorrida, tipo de piso, tempo de resposta dos sistemas pneumáticos, pressão de ar nas linhas que abastecem os dispositivos acionadores de freios, etc.) para serem aplicados em veículos e normas construtivas, porém não foi encontrado nas normas brasileiras um meio de analisar a frenagem dos veículos.

O método a ser utilizado é analisar a necessidade de frenagem pela força que o veículo exerce (devido a inclinação), pela razão 'R', conforme equação 3.3.

$$R = \frac{F_{\text{atrito total}}}{F_{\text{veículo}}} = \frac{\mu \cdot N_x \cdot \text{N}^{\circ} \text{ de eixos}}{PBTC \cdot g \cdot \text{sen}(\text{incli. pista máx em graus.})} \quad (3.3)$$

Onde μ = coeficiente de atrito, N_x = Força normal no eixo, g = gravidade

3.6 SISTEMA DE TRACIONAMENTO:

De acordo com a Resolução 290 do Denatran que estabelece que a Capacidade Máxima de Tração (CMT) é o máximo de peso que a unidade de tração é capaz de tracionar, indicado pelo fabricante e baseado em condições sobre suas limitações de geração e multiplicação de momento de força e resistência dos elementos que compõem a transmissão.

A resolução 211 do Denatran estabelece que para obtenção da AET, o transportador deve apresentar o cálculo da capacidade da Composição Veicular Carga (CVC) vencer rampas com inclinação de 6%. As equações indicadas pela resolução 211 do Contrans para o cálculo da rampa máxima são as equações 3.4, 3.5 e 3.6.

$$i = \frac{Ft}{10 \cdot G} - \frac{Rr}{10} \quad (3.4)$$

sendo que:

i é a inclinação da rampa (pista) máxima que a CVC pode desenvolver em %;

G é o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) do veículo em toneladas;

Rr é a resistência ao rolamento admitido pela resolução 211 como 11 kgf/tonelada;

Ft é a força de tração em kgf.

$$Fr = \frac{Tm \cdot ic \cdot id \cdot 0,9}{Rd} \quad (3.5)$$

se $Fr < Fad$ então $Ft = Fr$

Fr = força na roda (kgf)

Tm = Torque máximo do motor (kgf.m)

ic = maior relação de redução da caixa de cambio

id = relação de redução no eixo traseiro (diferencial + cubos)

Rd = raio dinâmico do pneu do eixo de tração (m)

se $Fr > Fad$ então $Ft = Fad$

$$Fad = \mu \cdot P \quad (3.6)$$

Fad = Força de aderência (kgf)

P = somatório dos pesos incidentes nos eixos de tração (kgf)

$$\mu = \text{coeficiente de atrito pneu x solo (0,45)}$$

3.7 ESTABILIDADE LATERAL (TOMBAMENTO):

O diagrama de corpo livre é um método no qual se fazem considerações estáticas em relação a um corpo (Shames, 2002). O somatório de forças e momentos em relação ao centro de gravidade (CG) das composições é um dos métodos usados para comparar a possibilidade de tombamento entre as duas composições. Para essa análise é necessário o levantamento de dados referente as dimensões dos veículos, bem como os dados das cargas transportadas a fim de determinar a localização das reações, bem como o centro de gravidade.

Para analisar as diversas situações limite de tombamento é necessário o conhecimento das taxas de superelevação (e) os raios (R) admitidos para construção de rodovias. De acordo com o Manual de Projeto de Travessias Urbanas do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), a taxa de superelevação em rodovias (e) consiste em um percentual (adimensional) que representa o quanto a pista é inclinada, conforme pode ser visto na figura 3.5.

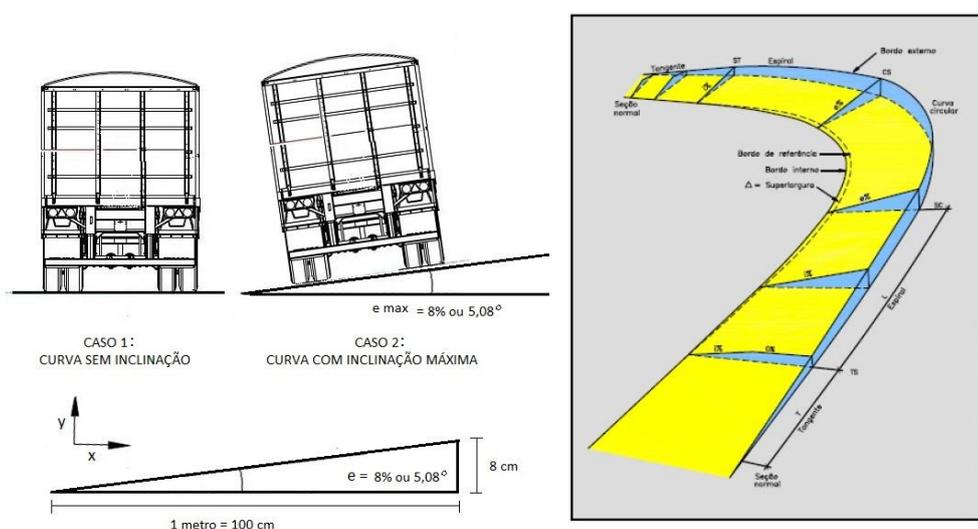


Figura 3.5: Inclinação da pista de rolamento em uma curva, sendo o Caso 1, a situação sem inclinação e o caso 2 com inclinação. (Figura adaptada pelo autor a partir de GUERRA, 2013 e DNIT, Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas, 2010).

A tabela 3.1 estabelece os valores de raio para curvas de rodovias em função da velocidade de trânsito dos veículos.

Tabela 3.1: Valores mínimos de raio para curvas em rodovias, em função das taxas máximas de superelevação. (DNIT - Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas, 2010).

| Valores mínimos de raios para curvas de rodovias em função da taxa máxima de elevação | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Velocidade diretriz da via (km/h) | | | | | | | |
| e máx (%) | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| 4 | 100 | 150 | 205 | 280 | 355 | 465 | 595 |
| 6 | 90 | 135 | 185 | 250 | 320 | 415 | 530 |
| 8 | 80 | 125 | 170 | 230 | 290 | 375 | 475 |

3.7.1 CENTRO DE GRAVIDADE:

De acordo com Shames (2002), pela análise de corpo rígido, todo peso do corpo está concentrado no centro de gravidade. De acordo com o fabricante Guerra (2013), a localização padrão do centro de gravidade dos semi-reboques descarregados fica localizado a 1,43m a partir do solo, usando-se pneus com raio de 0,572m (22,5 polegadas).

A localização do centro de gravidade de uma material uniforme pode ser aproximada pelo centro geométrico do volume ocupado pela carga uniforme.

4 METODOLOGIA EMPREGADA:

4.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL:

Em virtude das diferenças geométricas dos veículos, será feita uma análise comparativa do arrasto para verificar qual a sua real importância no consumo de combustível, no que refere a vencer o escoamento do ar em movimento relativo ao veículo. Para comparar os efeitos, foram construídos dois modelos analisados no túnel de vento da UFRGS. O peso da carga é item fundamental no consumo de combustível e será abordado no item abaixo.

4.1.1 ATRITO DE ROLAMENTO:

No cálculo do atrito de rolamento, a partir da equação 3.1, foi adotado o mesmo valor de peso por eixo e não os valores determinados pela legislação como é mostrado na figura 3.3, dessa forma assim podemos calcular a quantidade de força necessária para vencer a resistência ao rolamento dos veículos.

Tabela 4.1: Comparativo de potência para vencer a resistência ao rolamento na pista (compilação dos dados obtidos pelo autor).

| BITREM | | | BITRENZÃO | | |
|--|---------|--------|--|---------|--------|
| | Unidade | Valor | | Unidade | Valor |
| Coefficiente de Atrito ao Rolamento entre Pneu-Pavimento | μ m | 640 | Coefficiente de Atrito ao Rolamento entre Pneu-Pavimento | μ m | 640 |
| Carga por eixo | N | 83.385 | Carga por eixo | N | 83.385 |
| Número total de Eixos | unid. | 7 | Número total de Eixos | unid. | 9 |
| Raio do Pneu (22,5") | m | 0,572 | Raio do Pneu (22,5") | m | 0,572 |
| Força de Resistência ao Rolamento - 1 eixo | N | 93 | Força de Resistência ao Rolamento - 1 eixo | N | 93 |
| Força de Resistência ao Rolamento - 7 eixos | N | 654 | Força de Resistência ao Rolamento - 9 eixos | N | 840 |
| Velocidade do Veículo Real | m/s | 17 | Velocidade do Veículo Real | m/s | 17 |
| Potência para vencer o rolamento | W | 10.894 | Potência para vencer o rolamento | W | 14.007 |
| Potência para vencer o rolamento | hp | 15 | Potência para vencer o rolamento | hp | 19 |

4.1.2 PESO DA CARGA:

O peso da carga é ponto fundamental da análise do consumo de combustível, uma vez que os veículos analisados nas transportadoras têm um consumo vazio e um consumo carregado. Para valores de carga intermediários, existe uma certa linearidade, porém são raras as viagens em que o veículo não transporta o limite máximo estabelecido pela composição/rodovia. Assim o método usado será levantar e adotar os dados de consumo de combustível coletados junto às duas transportadoras num certo número de viagens completas no trecho analisado. Os dados estão no apêndice 2. Os dados de consumo de combustível apresentados das duas transportadoras se mostraram bastante parecidos foi adotada a média aritmética simples dos dados coletados. Outra motivação para adotar esse método foi que motivos como o tráfego da pista, bem como o meio de conduzir de cada motorista são variáveis que não podem ser mapeadas facilmente ou são uma questão comportamental, então esse levantamento junto às empresas se torna mais confiável.

4.1.3 ARRASTE - TÚNEL DE VENTO

Foi feita uma análise comparativa dos dois modelos em escala reduzida em um túnel de vento a fim de determinar o coeficiente de atrito do escoamento e após determinar a diferença entre a força necessária para vencer o atrito com o ar nos dois modelos. Para determinação da influência do arraste no consumo de combustível, foi feito um modelo em escala 1:32 das duas CVC e essas foram submetidas a escoamento de ar variando a velocidade do ar no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS, medindo diferença de força aplicada ao modelo por meio de uma balança de precisão, conforme figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.1: Foto do modelo e do experimento realizado no túnel de vento para determinar o Coeficiente de Atrito (C_d).

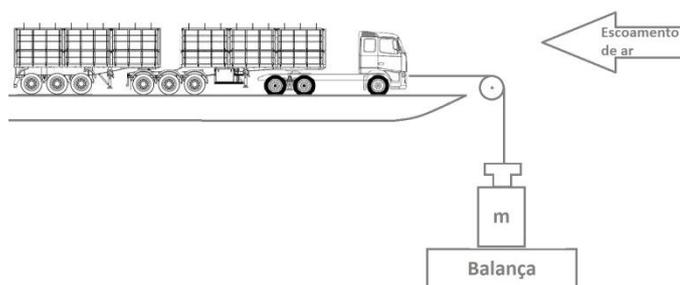


Figura 4.2: Esquema do método usado para determinar o coeficiente de arrasto (C_d) no túnel de vento

Os resultados obtidos no túnel de vento e calculados pela equação 3.2, estão mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados obtidos com modelos em escala 1:32 no túnel de vento com as velocidades disponíveis do equipamento.

| | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vel. do Escoamento [m/s] | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Número de Reynolds [-] | 22.939 | 27.527 | 32.114 | 36.702 | 41.290 |
| Coef. De Arrasto Bitrenção - C_d [-] - Ensaio 1 | 1,91 | 1,37 | 1,11 | 0,89 | 0,78 |
| Coef. De Arrasto Bitrenção - C_d [-] - Ensaio 2 | 1,90 | 1,39 | 1,10 | 0,91 | 0,77 |
| Número de Reynolds [-] | 22.939 | 27.527 | 32.114 | 36.702 | 41.290 |
| Coef. De Arrasto Bitrem - C_d [-] - Ensaio 1 | 0,50 | 0,52 | 0,45 | 0,50 | 0,51 |
| Coef. De Arrasto Bitrem - C_d [-] - Ensaio 2 | 0,69 | 0,60 | 0,61 | 0,54 | 0,50 |

Dessa forma verificou-se que velocidades a partir de 8 m/s, o coeficiente de arrasto (C_d) mostra uma tendência de estabilização, conforme figura 4.3.

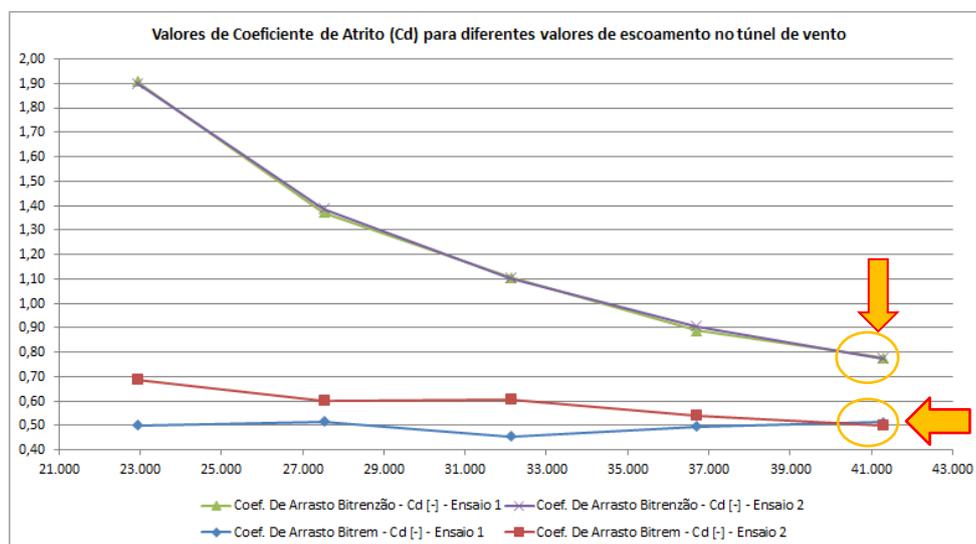


Figura 4.3: Evolução do Coeficiente de arrasto variando a velocidade de escoamento no túnel de vento obtido no experimento, com base nos valores apresentados na tabela 4.2.

A partir dos dados obtidos ensaiando os modelos em escala no túnel de vento, foi adotado o valor médio (aritmético) dos coeficientes de atrito para a maior velocidade ensaiada no túnel de vento (9 m/s), pois os veículos trafegam com velocidade média de 60 km/h ou 17m/s. O valor do coeficiente de atrito adotado foi 0,51 para o bitrem e 0,78 para o bitrenção. A partir dos valores de coeficientes de atrito, C_d , e usando a equação 3.2, foi calculado a força necessária para vencer o atrito com o ar de um veículo em tamanho real. Os resultados foram estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados calculados, a partir da equação 3.2, para vencer o atrito com o ar de um veículo real em deslocamento pela estrada.

| BITREM | | | BITRENZÃO | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------|-------------------------------------|-------------------|--------|
| Coefficiente de Atrito | - | 0,51 | Coefficiente de Atrito | - | 0,78 |
| Velocidade do Veículo Real | m/s | 17 | Velocidade do Veículo REAL | m/s | 17 |
| Área Frontal do Veículo REAL | m ² | 8,64 | Área Frontal do Veículo REAL | m ² | 8,64 |
| Densidade do Ar (35°C) | kg/m ³ | 1,15 | Densidade do Ar (35°C) | kg/m ³ | 1,15 |
| Força de atrito - Fd - VEÍCULO REAL | N | 701 | Força de atrito - Fd - VEÍCULO REAL | N | 1.070 |
| Potência - Real | W | 11.684 | Potência - Real | W | 17.828 |
| Potência - Real | cv | 16 | Potência - Real | cv | 24 |

4.2 SISTEMA DE TRACIONAMENTO:

O cálculo da rampa máxima admitida pelos cavalos tratores, feita a partir das equações 3.4, 3.5 e 3.6, está resumido na tabela 4.4. Os dados técnicos principais dos veículos são apresentados no capítulo 3.2.1 e também no Anexo 1.

Tabela 4.4: Cálculo da rampa máxima admitida para tracionar um bitrem e um bitrenzão, respectivamente.

| | BITREM | BITRENZÃO | Unidades |
|---|---------------------------|---------------------------|----------|
| Fr = Força na roda | 21.217 | 21.217 | kgf |
| Tm = Torque máximo | 265 | 265 | kgf . M |
| ic = relação de redução da caixa de cambio | 14,94 | 14,94 | - |
| ic = relação de redução no diferencial | 3,4 | 3,4 | - |
| Rd = raio dinâmico da roda | 0,571 | 0,571 | m |
| Fad = força de aderência | 7.650 | 7.650 | kgf |
| P = pesos aplicados nos eixos tracionados | 17.000 | 17.000 | kgf |
| u = coeficiente de atrito (Res. 211) | 0,45 | 0,45 | adim. |
| Condição de cálculo conforme Resolução. 211 do Denatran | Fr > Fad logo Ft = Fad | Fr > Fad logo Ft = Fad | |
| Inclinação máxima da rampa ou pista | 12,3 | 9,2 | % |
| Ft = Força de Tração | 7.650 | 7.650 | kgf |
| G = Peso Bruto Total Combinado (PBTC) | 57 | 74 | t |
| Rr = Resistência ao rolamento (Res. 211) | 11 | 11 | kgf |

A partir dos resultados mostra-se que os cavalos tratores tem capacidade de tracionamento em uma rampa de 12,3% para o bitrem e 9,2% para o bitrenzão, ambos superiores a 6%, que é o valor exigido pela resolução 211 do Contran/Denatran.

4.3 TOMBAMENTO:

O método do balanço de forças e momentos em relação ao centro de gravidade (CG) será usado para determinar, comparativamente, a possibilidade de tombamento das duas CVC. A análise não visa um estudo aprofundado do comportamento lateral das CVC, pois esse comportamento é bastante complexo devido ao fato dos veículos serem biarticulados e tanto pelas quantidades de variáveis, como imperfeições na pista de rolamento, suspensão, pressão dos pneus, tipo da carga, condições de trafego, etc. Os equacionamentos completos dos esforços relativos a estabilidade lateral estão descritos no apêndice 2.

Em virtude de uma das CVC ser uma modificações "artesanal" e o bitrem não, foi adotado que o cálculo da localização dos CG seria baseado simplificando o cálculo pelo centro geométrico das caixas de cargas, como a carga analisada é do tipo granel homogêneo, uma vez que elas representam 65% do peso total no bitrem e 69% no bitrenzão, conforme tabela 1.2, e desprezando o peso adicional referente aos reforços no chassi e os dois eixos extras no bitrenzão, em relação ao bitrem. Outra motivação para essa simplificação é que a grande maioria dos acidentes com tombamento é que a última composição (2ª carretinha) tomba primeiro, seguido após pela 1ª carretinha e somente após o cavalo tomba, de modo que o peso do cavalo representa 13% do peso total. A localização da posição do centro de gravidade na direção do comprimento dos conjuntos (maior dimensão) ficou no vão entre as caixas de carga e seus valores são indicados na tabela 4.5, tomando como coordenadas aquelas apresentadas esquematicamente na figura 4.4..

Tabela 4.5: Dados geométricos do centro de gravidade das CVC, conforme orientação dos eixos da figura 4.4.

| CENTRO DE GRAVIDADE | | | |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| BITREM | POSIÇÃO (m) | BITRENZÃO | POSIÇÃO (m) |
| COMPRIMENTO | 10,94 | COMPRIMENTO | 12,06 |
| ALTURA | 2,23 | ALTURA | 2,48 |
| LARGURA | 1,20 | LARGURA | 1,20 |

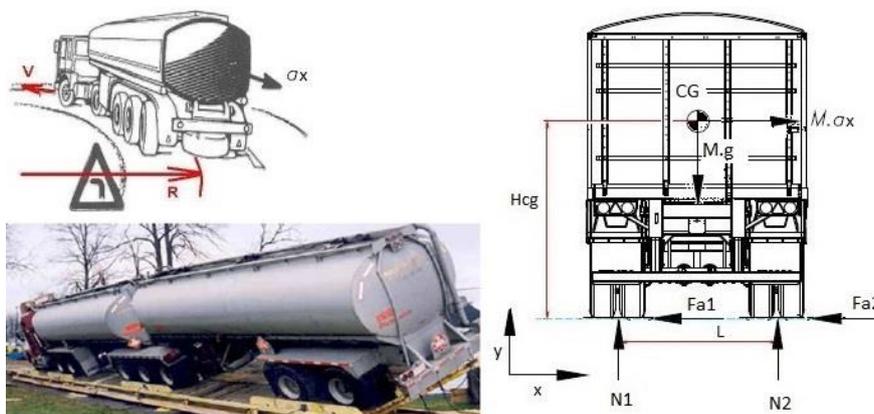


Figura 4.4: Diagrama de corpo livre do Caso 1 e esforços no movimento circular uniforme e foto de ensaio a fim de determinar o limite de tombamento (Adaptado a partir de GTRC, 2012, e de Guerra).

Os casos críticos apresentados na figura 3.5 (Caso 1 e 2) foram equacionados no apêndice 2, pelas equações 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4, e são apresentados de forma resumida na tabela 4.6, assim explicitando quais os valores críticos de velocidade de início do tombamento dos veículos em uma situação de curva.

Tabela 4.6: Velocidades limites de tombamento para o caso 1 (pista sem superelevação) e caso 2 (pista com superelevação máxima admitida), para o bitrem e o bitrenzão.

| SEMIRREBOQUE | VELOCIDADE LIMITE DE TOMBAMENTO | |
|--------------|---------------------------------|--------|
| | CASO 1 | CASO 2 |
| BITREM | 87 | 115 |
| BITRENZÃO | 83 | 98 |

4.4 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE FREIOS:

Devido a dificuldade de encontrar um método para avaliar os veículos em estudo sem que seja necessário ensaios em campo de provas, a metodologia usada para avaliar comparativamente os mesmos será feita analisando os esforços pelo somatório de forças em relação as coordenadas locais, eixo a eixo, de modo a obter uma análise comparativa. Para analisar a frenagem será usado o trecho mais crítico que é descida da serra do mar, entre as cidades de Curitiba e a cidade de Paranaguá, sendo esse o trecho que os veículos encontram maior dificuldade na rota entre as cidades de Sorriso, estado de Mato Grosso, e Paranaguá, estado do Paraná.

A figura 4.5 mostra o perfil de elevação obtido pelo software Google Earth para o trecho crítico percorrendo a BR 277, rodovia de ligação entre as duas cidades. Nessa figura verifica-se que a inclinação média da pista é de 2,4% e a máxima é de 15,5%. Como estamos analisando a frenagem, o trecho crítico se mostra mais adequado, pois é uma situação extrema.



Figura 4.5: Perfil de elevação topográfica do trecho da rodovia BR277 entre Curitiba, PR, e Paranaguá, PR (Perfil obtido pelo autor pelo software Google Earth, 2013).

A metodologia usada será analisar uma relação “R” entre as ‘forças de atrito totais’ que ocorrem em todos os eixos (F_a) e a ‘força geradora do movimento do veículo’ ($P \cdot \sin \theta$), que se deve a inclinação da pista, conforme figura 4.6.



Figura 4.6: Apresentação da ampliação da figura 3.3 mostrando o diagrama de esforços envolvido na frenagem (imagem adaptada pelo autor)

Equacionamento para o caso do Bitrem:

$$F_{normal \text{ em cada eixo}} = \frac{PBTC \cdot g}{\text{número de eixos}} = \frac{57000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{7} = 79881 \text{ N}$$

$$F_{atrito \text{ em 1 eixo}} = \mu \cdot N_x = 0,45 \cdot 79881 = 35946 \text{ N}$$

$$F_{atrito \text{ total}} = F_{atrito \text{ em 1 eixo}} \cdot \text{N}^{\circ} \text{ de eixos} = 35946 \cdot 7 = 251626 \text{ N}$$

$$F_{veículo} = PBTC \cdot g \cdot \text{sen}(\text{incli. pista máx.}) = 57000 \cdot 9,81 \cdot \text{sen}(9,78^{\circ}) = 94983 \text{ N}$$

$$R = \frac{F_{atrito \text{ total}}}{F_{veículo}} = \frac{251626}{94983} = 2,65 \text{ (adim)}$$

Equacionamento para o caso do Bitrenzão:

$$F_{normal \text{ em cada eixo}} = \frac{PBTC \cdot g}{\text{número de eixos}} = \frac{74000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{9} = 80660 \text{ N}$$

$$F_{atrito \text{ em 1 eixo}} = \mu \cdot N_x = 0,45 \cdot 80660 = 36297 \text{ N}$$

$$F_{atrito \text{ total}} = F_{atrito \text{ em 1 eixo}} \cdot \text{Numero de eixos} = 36297 \cdot 9 = 326673 \text{ N}$$

$$F_{veículo} = PBTC \cdot g \cdot \text{sen}(\text{incli. pista máx.}) = 74000 \cdot 9,81 \cdot \text{sen}(9,78^{\circ}) = 123312 \text{ N}$$

$$R = \frac{F_{atrito \text{ total}}}{F_{veículo}} = \frac{326673}{123312} = 2,64 \text{ (adim)}$$

A força normal N_x em cada eixo é simplificada, admitindo que o peso em cada eixo é mesma, apesar da carga no eixo direcional (primeiro eixo) ser menor, conforme verificado no referencial teórico sobre a legislação de transporte de cargas (DNIT). Para o estudo comparativo foi adotado o coeficiente de atrito entre a pista e o pneu de 0,45, para ambas as composições, visto que é o valor adotado na resolução 211 do Contran.

4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA:

O método usado para estudar a viabilidade econômica foi a coleta de dados em duas empresas de transportes que utilizem as duas CVC's nesse trajeto (Transp. RGL e Veratur Transportes) a fim de comparar dados operacionais.

Os dados de consumo de combustível de uma viagem são bastante variados, pois são afetados pelas condições de tráfego, tipo de condução do motorista, etc. Já os custos de manutenção de pneus são dados históricos buscados junto as empresa. Os custos de manutenção preventiva e corretiva dos veículos não serão abordados neste trabalho, pois os dados coletados na empresa são bastante variados, não obedecendo a uma tendência. Os custos fixos operacionais do bitrenzão são maiores devido à necessidade de se obter a AET junto ao DNIT (rodovias federais) e nas rodovias estaduais do estado do Paraná (por exemplo) que só é obtida por meios jurídicos (liminar).

A compilação dos dados relativos a três viagens completas coletadas junto as transportadoras estão apresentados no Apêndice 1, pela Tabela 8.1, a partir das equações 8.1 e 8.2, no qual verifica-se que percorrendo a mesma distância, o bitrenzão transporta 36% a mais de carga, proporciona um

retorno líquido 86% maior (já descontado os custos fixos, seguros, impostos, licenças) e retornando o investimento inicial em 33 meses, enquanto que o bitrem retorna em 51 meses.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados nesse estudo comparativo mostraram que a composição bitrenção necessita de um valor de potência 52% maior que o bitrem para vencer o arraste contra o ar (24 cv para o bitrenção e 16 cv para o bitrem). Já a análise do atrito de rolamento mostrou que, por ter mais eixos, o bitrenção consome 26% a mais de potência do motor (19 cv para o bitrenção e 15 cv para o bitrem).

Em relação a frenagem, a análise feita demonstrou, pelos cálculos, que tanto o bitrem quanto o bitrenção tem capacidades de frenagem praticamente iguais, valor esse verificado pela razão "R" obtida pela razão entre a força de atrito que o veículo deve imprimir e a força geradora do movimento. Em outras palavras, após a modificação de inclusão de 2 novos eixos ao bitrenção (a partir do bitrem) foi acrescentado um peso extra de 17 toneladas, porém foram acrescentados 2 eixos extras com capacidade de frenagem igual aos dos eixos já existentes antes da modificação, então foi acrescentada uma capacidade de frenagem proporcional ao peso extra. Cabe ressaltar que é necessário uma modificação nas válvulas de distribuição de ar comprimido para os freios dos semireboques, de modo que o compressor do cavalo trator libere mais ar, pois existem dois eixos extras que vão "consumir" mais ar comprimido para serem acionados.

Do ponto de vista da conservação das estradas, o bitrenção não provoca diferenças aparentes, pois está dentro do limite de peso, tanto pelo PBTC, quanto pelo peso por eixo. A única diferença até agora apontada são possíveis danos as pontes de classes 24, 30 e 36 toneladas, de laje contínua ou não, segundo estudo da USP de São Carlos (*apud* Revista Carga Pesada, 2011). Do ponto de vista da segurança em trânsito, o bitrenção apresenta maior chance de tombamento que um bitrem, pelo fato de tombar com velocidades 5% menores para uma mesma situação de curva. Entretanto pelo fato de transportar cerca de 35% a mais carga por viagem, o bitrenção permanece na estrada menos tempo que o bitrem para transportar a mesma quantidade de carga, o que diminui os riscos de acidentes com outros veículos. Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que para as empresas transportadoras de cargas, o bitrenção é uma alternativa interessante, pois alia enquadramento de legislação trabalhista e ao fato de o investimento ter retorno em um tempo 34% menor que no bitrem (33 meses para o bitrenção e 51 meses para o bitrem). Do ponto de vista da cadeia do agronegócio, o bitrenção também se apresenta interessante, pois necessita de menos caminhões para transportar a mesma quantidade de produto e não necessita trocar ou instalar novas balanças rodoviárias para composições de 25 ou 30 metros. Cabe ainda mencionar que não foram encontrados na literatura dados sobre um projeto detalhado do semirreboque chamado bitrenção, pois se trata de uma modificação e não um projeto homologado por alguma indústria fabricante. Essa dificuldade em obter dados confiáveis foi encontrada e parcialmente contornada por simplificações de projetos conhecidos.

6 CONCLUSÕES:

Conforme análises realizadas e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- ✓ O bitrenção tomba com velocidades 5% menores que um bitrem, levando a maiores chances de acidentes com outros veículos;
- ✓ O bitrenção transporta 35% mais carga que um bitrem, consumindo cerca de 19% a mais combustível;
- ✓ A necessidade e capacidade de frenagem são equivalentes nos dois veículos, pois o peso por eixo se mantém constante para os dois veículos;
- ✓ O atrito de rolamento do bitrenção "consome" 26% a mais de potência em relação ao bitrem, levando a um aumento do consumo de combustível;
- ✓ O bitrenção necessita cerca de 50% mais potência para vencer o arraste com o ar, levando a um aumento do consumo de combustível;
- ✓ O cavalo trator é adequado para tracionar os semirreboques, podendo vencer inclinações de 12,3% no bitrem e 9,2% no bitrenção, as duas superiores ao exigido pela legislação que é de 6%;
- ✓ O tempo de retorno do investimento do bitrenção é de 33 meses e do bitrem fica em 51 meses, 34% a menos;

Assim, de acordo com a análise comparativa, pode-se concluir que o bitrenção é o melhor meio de transporte rodoviário de cargas a granel do que o bitrem.

7 REFERÊNCIAS:

ANEC – **Associação Nacional dos Exportadores de Cereais** – Dados históricos disponíveis no site da associação acessados pelo site <http://www.anec.com.br> no dia 29/10/13.

CONTRAN, **Resoluções 211** (publicação dia 13/11/06), **298** (publicação dia 29/08/08), **373** (publicação dia 18/03/11), **418** (publicação dia 12/09/12), **419** (publicação dia 12/09/12), todas disponíveis no site <http://www.denatran.gov.br/resolucoes.htm> e acessadas dias 27/08/13, 31/10/13, 28/08/13, 27/08/13 e 27/08/13, respectivamente.

CTB, **Código de Transito Brasileiro** - LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO DE 1997, disponível ao público pelo site "www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503.htm" e acessado dia 15/10/13.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – **Limites Legais para Peso Bruto Total, Dimensões e peso por eixo** - GUIA PRÁTICO INSTRUÇÕES OPERACIONAIS - Disponível no site http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/sis_sgpv/manual_instrucao_arquivos/GUIA%20PRATICO%20OFICIAL.pdf acessado dia 29/10/13.

DNIT - **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**, DNIT, 2010, página 246 documento disponível no site do DNIT www.dnit.gov.br e acessado dia 26/10/13.

FOX, Robert W. – 1934 - **Introdução a Mecânica dos Fluidos** – 7ª Edição.

IBGE, **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Economia informal urbana – 2003. Rio de Janeiro, 2005. - Pesquisa anual de serviço – 2005. Rio de Janeiro, v. 7, 2005.

Gillespie, T. D., **Fundamentals of vehicle dynamics**, 1ª edição, 1992.

GUERRA, **Guerra Implementos Rodoviários** – Fabricante de Implementos Rodoviários - Catálogo do fabricante – Caxias do Sul, RS, 2013.

GTRC – Guia do Transp. Rodoviário. de carga – Apresentação de tombamento, 2009.

Lei do Descanso ou Lei do Motorista Profissional ou do Descanso, 2012, acessada pelo site http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12619.htm no dia 04/11/13.

MASTER – **Freios Master** – Grupo Randon - Catálogo do fabricante – 2013.

REVISTA CARGA PESADA, edição online, disponível pelo site <http://cargapesada.com.br/revista/category/bitrem-ou-bitrencao-edicao-157/> e acessada dia 30/08/13.

SHAMES, Irving H – Estática: **Mecânica para Engenharia**, 4ª edição, 2002.

Transportadora RGL Ltda, Veranópolis, RS – Dados coletados pelo acesso o banco de dados da empresa em 25/08/13.

Veratur Transportes, Céu Azul, PR – Dados coletados via telefone no dia 01/11/13 com o administrador da frota Sr Marciano.

VOLVO, Folheto explicativo do fabricante disponível no site http://www.volvotrucks.com/trucks/brazil-market/pt-br/Documents/Trucks/Euro5/AF_LaminaFH6x4t.pdf e acessado dia 01/04/13.

ANEXOS:

Anexo 1: Folheto do Fabricante com detalhes técnicos do cavalo tractor Volvo FH 6x4 usado no estudo comparativo (Volvo, 2013).

Folhas
Circuito duplo de feio a ar comprimida, com ajuste automático de pastilhas de lonas, feio de estacionamento tipo moias acumuladoras, feio a tambor tipo Z-CAM ou feio a disco (opcional).

| | |
|------|------|
| 3200 | 3600 |
| 805 | 805 |
| 1015 | 1015 |
| 1370 | 1370 |
| 1317 | 1317 |
| 1037 | 1037 |
| 475 | 475 |
| 7650 | 8300 |

peso semifeixas, cabine feio, carga no máx. peso 50V e suspensão parabólica, 200 mm na altura.

| | |
|------|------|
| 5060 | 5570 |
| 3640 | 3660 |
| 8900 | 9170 |
| 380 | 720 |

o e sem motorista, pneus 285/80R22,5. Tolerância de 3% (Ref. NBR ISO 1179).
e por feio.

| 420 cv | 460 cv | 500 cv | 540 cv |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Injeção direta com unidades injetoras e gerenciamento eletrônico | | | |
| 420 cv - 309 kW (1400-1900 rpm) | 460 cv - 338 kW (1400-1900 rpm) | 500 cv - 363 kW (1400-1900 rpm) | 540 cv - 397 kW (1450-1900 rpm) |
| 2100 Nm - 214 kgfm (1000-1400 rpm) | 2300 Nm - 235 kgfm (1000-1400 rpm) | 2500 Nm - 255 kgfm (1060-1400 rpm) | 2600 Nm - 265 kgfm (1050-1450 rpm) |
| 410 ou 500cv | 410 ou 500cv | 500cv | 500cv |
| 6 | 6 | 6 | 6 |
| 128 dm³ (litros) | 128 dm³ (litros) | 128 dm³ (litros) | 128 dm³ (litros) |
| 131 x 158 mm | 131 x 158 mm | 131 x 158 mm | 131 x 158 mm |
| Euro V / Proconve P7 | Euro V / Proconve P7 | Euro V / Proconve P7 | Euro V / Proconve P7 |
| 33 litros | 33 litros | 33 litros | 33 litros |
| 38 litros | 38 litros | 38 litros | 38 litros |

| | |
|-----------------------------|--|
| Sincronizada | Automatizada |
| Manual / por cabos | Manual e Automática / Eletropneumática |
| 14 (12 + 2 super-reduzidas) | 12 |
| 4 | 4 |
| 135 | 13 |

ml, 0,01 litro.

| | |
|-------------|---------|
| aco / alum. | aco |
| 8,25x22,5 | 8,0x22 |
| 285/80R22,5 | 11,0R22 |

aco de fricção a seco tipo push-type (momento para caixa T-Shift) | Hidropneumático (baixo esforço de acionamento) | Hidropneumático (baixo esforço de acionamento)

Eixo Traseiro

| | | |
|------------------------|-----------------------------|---|
| Tipo | Simplex velocidade não | Simplex velocidade sim |
| Redução nos cubos | 78 | 100 |
| CMT (t) | 3,09;1/3,40;1/3,78;1/4,50;1 | 3,33;1/3,46;1/3,61;1/3,76;1/3,97;1/4,12;1 |
| Relações de redução | 20 + 14 | 26,5 + 24 |
| Capacidade de óleo (l) | sim | sim |
| Escapo de diferencial | sim | sim |

Eixo Dianteiro

| | | |
|------|---|--|
| Tipo | Eixos de aço forjado em perfil "I", tratado termicamente. Cubos lubrificatos a graxa, livres de manutenção. | |
|------|---|--|

Suspensão

| | | |
|----------------------|-----------------|--|
| Tipo | Parabólica | |
| Amortecedores | Pneumática (A) | |
| Barra estabilizadora | 4 de dupla ação | |
| Suspensão Dianteira | nã | |
| Tipo | Parabólica | |
| Amortecedores | 2 de dupla ação | |
| Barra estabilizadora | sim | |

Capacidade de Carga (kg)

| Eixo sem redução Suspensão Parabólica ou Ar | Eixo com redução Suspensão Parabólica | Eixo com redução Suspensão Semielíptica | Eixo com redução Suspensão Semielíptica |
|---|---------------------------------------|---|---|
| 7100 | 7100 | 7100 | 8000 |
| 21000 | 26000 | 26000 | 26000 |
| 28100 | 33100 | 33100 | 34000 |
| PBT - Legal | 23000 | 23000 | 23000 |
| CMT - feítico | 78000 | 100000 | 100000 |

feio e feio com feio.

Chassi

| | | | |
|-----------------------------|--|--------|--------|
| Material | LINE60 | LINE60 | LINE60 |
| Etela (mm) | 850 | 850 | 850 |
| Altura da alma (mm) | 300 | 300 | 300 |
| Altura da aba (mm) | 90 | 90 | 90 |
| Espessura da largarina (mm) | 7 | 8 | 8 |
| Aplicação | P/ eixo sem redução - susp. ar P/ eixo com redução | | |

Cabine

| Tipo | Cabine fabricada em aço de alta resistência, com chapas galvanizadas, isolamento anticorrosivo eletrolítico (eletrodeposição). | |
|-----------------------------|--|---------------------------------|
| Altura interna (mm) | Estendida | Leto |
| Comprimento interno (mm) | 1810 | 2280 |
| Largura interna (mm) | 2430 | 2430 |
| Tipo de suspensão dianteira | Mola/Pneumática com amortecedor | Mola/Pneumática com amortecedor |
| Tipo de suspensão traseira | Mola/Pneumática com amortecedor | Mola/Pneumática com amortecedor |

Tanque de Combustível

| | | |
|-----------------|------------|------------|
| Material | Plástico | Alumínio |
| Forma | Retangular | Cilíndrico |
| Capacidade (l)* | 200 litros | 190 litros |
| | 345 litros | 310 litros |
| | 420 litros | 360 litros |
| | | 450 litros |
| | | 530 litros |

Tanque de Aditivo

| | | |
|-----------------|-----------|----------------|
| Material | Plástico | Aço inoxidável |
| Capacidade (l)* | 40 litros | 125 litros |

Equipamentos Eléctricos

| | |
|------------------|---------------------------|
| Tensão nominal | 24V |
| Alternador | 100A / 24V |
| Bateria | 2x170 Ah / 12V (em série) |
| Motor de partida | Méico 5,5 kW |
| Fardis | 2x70W |

*As configurações podem variar em alguns países, consulte o manual de referência para mais detalhes.

Desenvolvido pelos Departamentos de Engenharia de Produtos e Equipamentos e Comunicação de Marketing. Fotos meramente ilustrativas. A Volvo do Brasil reserva-se o direito de alterar as especificações técnicas dos produtos sem prévio aviso. Alguns equipamentos são opcionais. P-V-PORT 01/03/12 - www.volvo.com.br

APÊNDICES:

Apêndice 1: Compilação dos dados operacionais na Tabela 8.1 dos dados levantados junto a empresas de Transporte (Transportadora RGL Ltda e Veratur Transportes).

| BITREM | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------|-------|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| Cidade que carregou | Cidade que descarregou | Peso da Carga (t) | Carga | Distância | R\$/TON (cheio) | Receita viaç. CHEIO | Comiss. Motorista | Custo Diesel + Adia / km | Total Diesel + Adia | Total Pedálios | Manut. de Pneus | Resultado Viaç. em |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 37,06 | Milho | 2.376 | 240 | R\$ 8.893 | R\$ 889 | R\$ 1,34 | R\$ 3.189 | R\$ 442 | R\$ 236 | R\$ 4.138 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 37,00 | Adubo | 2.360 | 135 | R\$ 4.995 | R\$ 500 | R\$ 1,34 | R\$ 3.167 | R\$ 442 | R\$ 234 | R\$ 652 |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 37,38 | Milho | 2.351 | 240 | R\$ 8.971 | R\$ 897 | R\$ 1,34 | R\$ 3.155 | R\$ 442 | R\$ 233 | R\$ 4.244 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 37,00 | Adubo | 2.441 | 125 | R\$ 4.625 | R\$ 463 | R\$ 1,34 | R\$ 3.276 | R\$ 442 | R\$ 242 | R\$ 202 |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 38,00 | Milho | 2.395 | 245 | R\$ 9.310 | R\$ 931 | R\$ 1,34 | R\$ 3.214 | R\$ 442 | R\$ 238 | R\$ 4.485 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 37,00 | Adubo | 2.383 | 120 | R\$ 4.440 | R\$ 444 | R\$ 1,34 | R\$ 3.198 | R\$ 442 | R\$ 237 | R\$ 119 |

| BITRENÇÃO | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------|-------|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| Cidade que carregou | Cidade que descarregou | Peso da Carga (t) | Carga | Distância | R\$/TON (cheio) | Receita viaç. CHEIO | Comiss. Motorista | Custo Diesel + Adia / km | Total Diesel + Adia | Total Pedálios | Manut. de Pneus | Resultado Viaç. em |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 51,20 | Milho | 2.376 | 240 | R\$ 12.288 | R\$ 1.229 | R\$ 1,59 | R\$ 3.787 | R\$ 568 | R\$ 309 | R\$ 6.396 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 50,00 | Adubo | 2.360 | 135 | R\$ 6.750 | R\$ 675 | R\$ 1,59 | R\$ 3.761 | R\$ 568 | R\$ 306 | R\$ 1.439 |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 51,90 | Milho | 2.351 | 240 | R\$ 12.456 | R\$ 1.246 | R\$ 1,59 | R\$ 3.747 | R\$ 568 | R\$ 305 | R\$ 6.590 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 50,00 | Adubo | 2.441 | 125 | R\$ 6.250 | R\$ 625 | R\$ 1,59 | R\$ 3.890 | R\$ 568 | R\$ 317 | R\$ 850 |
| Sorriso - MT | Paranaguá - PR | 50,80 | Milho | 2.395 | 245 | R\$ 12.446 | R\$ 1.245 | R\$ 1,59 | R\$ 3.817 | R\$ 568 | R\$ 311 | R\$ 6.505 |
| Paranaguá - PR | Sorriso - MT | 50,00 | Adubo | 2.383 | 120 | R\$ 6.000 | R\$ 600 | R\$ 1,59 | R\$ 3.798 | R\$ 568 | R\$ 309 | R\$ 725 |

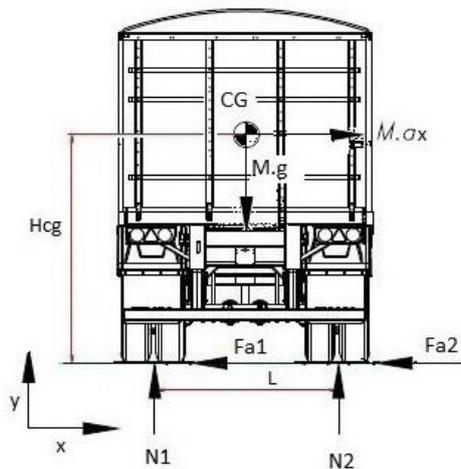
| Composição de Veículos | Investimento Inicial | Toneladas Transport. | Custos Fixos Mensais | Retorno Mensal Líquido | Distância Percorrida | Retorno / Tonelada Transportada | | Retorno / Distância Percorrida | Prazo de Retorno (meses) |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------|----------|--------------------------------|--------------------------|
| | | | | | | R\$ | % | | |
| Cavalo + Bitrem | R\$ 437.600 | 223 | R\$ 5.180 | R\$ 8.660 | 14.306 | R\$ 39 | R\$ 0,61 | 51 | -34% |
| Cavalo + Bitrenção | R\$ 537.400 | 304 | R\$ 6.375 | R\$ 16.131 | 14.306 | R\$ 53 | R\$ 1,13 | 33 | |
| | | | 36% | 23% | 86% | 37% | 86% | | |

| Consumo de Combustível | Veratur |
|------------------------|---------|
| Bitrem [km/l] | 1,90 |
| Bitrenção [km/l] | 1,55 |

$$\text{PRAZO DE RETORNO [nm.de meses]} = \frac{\text{INVEST. INICIAL}}{\text{RETORNO MENSAL LÍQUIDO}} \quad (8.1)$$

$$\text{CONSUMO DE COMBUST.} \left[\frac{\text{km}}{\text{l}} \right] = \frac{\text{DISTÂNCIA}}{\text{LITROS}} \quad (8.2)$$

Apêndice 2: Equacionamento da estabilidade lateral (tombamento) das duas CVC



CASO 1

Caso 1 – Dedução das equações:

$$\sum_x F = 0 \rightarrow -Fa1 - Fa2 + M.ax = 0 \quad (9.1)$$

$$-\mu.N1 - \mu.N2 + M.ax = 0$$

$$\sum_y F = 0 \rightarrow +N1 + N2 - M.g = 0 \quad (9.2)$$

$$\sum_{CG} M = 0 \rightarrow +N1.\left(\frac{L}{2}\right) - N2.\left(\frac{L}{2}\right) + Fa1.Hcg + Fa2.Hcg = 0 \quad (9.3)$$

$$+N1.\left(\frac{L}{2}\right) - N2.\left(\frac{L}{2}\right) + \mu.N1.Hcg + \mu.N2.Hcg = 0$$

O tombamento começa a ocorrer quando $N1 = 0$

Assim as

$$-\mu.N2 + M.ax = 0$$

$$+N2 - M.g = 0$$

$$-N2.\left(\frac{L}{2}\right) + \mu.N2.Hcg = 0$$

Análise do caso 1 para bitrem:

Hcg (altura do Centro de gravidade) = 2,23m; L (entre pneus) = 1,8m; R (raio da curva em análise) = 150m

$$-\mu.(57000.9,81) + 57000.ax = 0$$

$$+559170 - 57000.9,81 = 0$$

$$-559170.\left(\frac{1,8}{2}\right) + \mu.(559.170).2,23 = 0$$

$$\mu=0,403, ax=3,96m/s^2,$$

Pela fórmula

$$ax = \frac{v^2}{R} \quad (9.4)$$

leva a velocidade limite de tombamento $v = 24,4m/s$

Análise do caso 1 para o bitrenção:

Hcg = 2,48m e L=1,8m

$$-\mu.(74000.9,81) + 74000.ax = 0$$

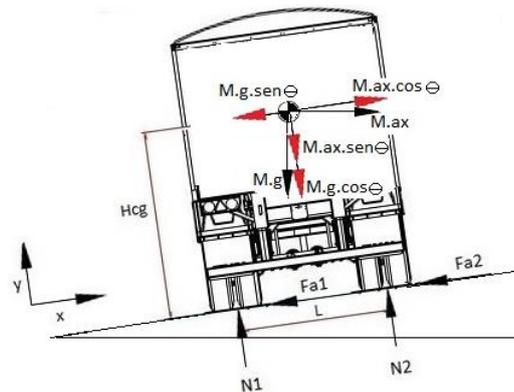
$$+725940 - 74000.9,81 = 0$$

$$-725940. \left(\frac{1,8}{2}\right) + \mu. 725940.2,48 = 0$$

Adotando curva com raio de 150 metros $F_c = 1835\text{N}$, $\mu=0,363$, $a_x=3,56\text{m/s}^2$,

Pela fórmula equação 9.4 leva a velocidade limite de tombamento $v = 23,11\text{m/s}$

CASO 2: Dedução das equações



CASO 2

Caso 2 – Dedução das equações:

$$\sum_x F = 0 \rightarrow -Fa1 - Fa2 - M.g.sen\theta + M.ax.cos\theta = 0$$

$$-\mu.N1 - \mu.N2 - M.g.sen\theta + M.ax.cos\theta = 0$$

$$\sum_y F = 0 \rightarrow +N1 + N2 - M.g.cos\theta - M.ax.sen\theta = 0$$

$$\sum_{cg} M = 0 \rightarrow +N1.\left(\frac{L}{2}\right) - N2.\left(\frac{L}{2}\right) + Fa1.Hcg + Fa2.Hcg = 0$$

$$+N1.\left(\frac{L}{2}\right) - N2.\left(\frac{L}{2}\right) + \mu.N1.Hcg + \mu.N2.Hcg = 0$$

O tombamento começa a ocorrer quando $N1 = 0$

$$-\mu.N2 - M.g.sen\theta + M.ax.cos\theta = 0$$

$$+N2 - M.g.cos\theta - M.ax.sen\theta = 0$$

$$-N2.\left(\frac{L}{2}\right) + \mu.N2.Hcg = 0$$

Análise do caso 1 para bitrem com curva :

$$a_x = 4,98 \frac{m}{s^2} e \mu = 0,403 e v = 27 \text{ m/s}$$

Análise do caso 1 para o bitrenzão:

$$a_x = 6,91 \frac{m}{s^2} e \mu = 0,362 e v = 32 \text{ m/s}$$