RUBENS MOREIRA VIANA

PERÍCIA FISÍCA DE ACIDENTE DE TRÂNSITO

UNIR - Ji-Paraná/RO
2009

RUBENS MOREIRA VIANA

PERÍCIA FISÍCA DE ACIDENTE DE TRÂNSITO

Orientador: Prof.º Dr. Judes Gonçalves dos Santos.

Ji-Paraná-RO, agosto de 2009.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CAMPUS DE JI-PARANÁ

Por: **RUBENS MOREIRA VIANA**

PERÍCIA FISÍCA DE ACIDENTE DE TRÂNSITO

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Física da Universidade Federal de Rondônia como um dos requisitos para a obtenção do título de graduação em Licenciatura Plena em Física.

Ji-Paraná-RO, agosto de 2009.

PERÍCIA FISÍCA DE ACIDENTE DE TRÂNSITO

RUBENS MOREIRA VIANA

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de graduação no curso de Licenciatura Plena em Física e aprovado em sua forma final, no dia 01/08/2009, pelo programa de graduação do Departamento de Física da Universidade Federal de Rondônia - Campos de Ji-Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Judes Gonçalves dos Santos
Orientador (DEFIJI/UNIR)

Profª. Drª. Luciene Batista da Silveira
Membro (DEFIJI/UNIR)

Prof. Dr. João Batista Diniz
Membro (DEFIJI/UNIR)

Ji-Paraná-RO, 01 de agosto de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico:

Aos meus pais, Levi e Arminda, por sempre estarem ao meu lado me apoiando nos momentos bons e difíceis, onde estes, nunca mediram esforços para possibilitar meus estudos. Dedico ainda a meus irmãos: Débora, Jacó e Melquizedeque, estes, por sempre me apoiarem em meus objetivos tanto nas horas boas quanto ruins, portanto sempre me incentivaram não deixando que jamais desistisse do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e ajudado a superar os obstáculos que durante todo o trabalho me circundava.

A minha nobre família por tudo aquilo que sempre visava ao meu desenvolvimento como um todo e realização pessoal.

Ao meu orientador Prof. Dr. Judes Gonçalves dos santos, e a todos meus professores que foram de uma forma especial para meus estudos.

Agradeço ainda, aos meus amigos de trabalhos, as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para meu progresso dentro e fora da UNIR.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 8

LISTA DE TABELAS 9

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS 10

RESUMO 11

ABSTRACT 12

1. INTRODUÇÃO 13

CAUSAS DETERMINANTES NO ACIDENTE DE TRÂNSITO 15

2. Fatores relacionados ao homem 16
- **2.1. Fatores relacionados ao veículo** 17
- **2.2. Fatores relacionados ao meio** 17

ESTUDO DA VELOCIDADE NOS ACIDENTES 18

3. A origem da força centrípeta. 18
- **3.1. Velocidade do veículo contra um ponto fixo** 23
- **3.2. Cálculo da velocidade inicial do veículo (V_i)** 24
- **3.3. Aplicação do método da velocidade para o salto de veículo** 25
- **3.4. Forças e energias** 26
  - **3.4.1. Análise física do acidente** 27
  - **3.4.2. Orientação dos danos** 28
  - **3.4.3. Conservação do *momentum linear*** 28
  - **3.4.4. Solução analítica da equação** 28
  - **3.4.5. Sobre a conservação da energia** 30
  - **3.4.6. Impulso e força máxima** 30
  - **3.4.7. Sobre a velocidade inicial dos veículos** 31
  - **3.4.8. Avaliação da velocidade pela ruptura do para-brisa** 32

APLICAÇÕES FÍSICAS NA FRENAGEM E SUAS RELAÇÕES 34

4. Frenagem e geometria do veículo 35
4.1. Frenagem com duas rodas 36
4.2. Variações da frenagem em função da geometria e dimensão dos freios 39

ESTUDO DE CASO 41

5. Análise de acidente em rodovia envolnendo caminhonete e moto 41
5.1. Introdução 41
5.2. O acidente 42
5.3. Cálculos 44

6. CONCLUSÃO 46

7. REFERÊNCIA 47

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Veículo deslocando-se numa curva, representações de suas grandezas (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 36).....20

Figura 3.4.1. Veículo deslocando-se perpendicularmente antes da colisão em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 12).....26

Figura 3.4.2. Trajetórias dos veículos após colisão em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 13).....27

Figura 3.4.3.1. A partir do sítio da colisão, calculado os ângulos em relação aos **c.m.** dos veículos em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 12).....28

Figura 3.4.6.1. Representação do impulso resultante, proveniente da figura 3.4.3.1 em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 19).....31

Figura 4.1. Representação do impulso resultante, proveniente da figura 3.4.3.1 em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 19).....35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da velocidade da caminhonete para cada caso 20

Tabela 2. Valores calculados da velocidade da caminhonete em função da velocidade inicial da motocicleta.....26

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

α – Aceleração

AT - Acidente de trânsito

c.m. – Centro gravitacional ou centro de massa

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

CTB - Código de Trânsito Brasileiro

δI – Diferença entre as distâncias do c.m. aos eixos traseiros e dianteiros de um veículo

IDPVAT - Instituto Brasileiro de Defesa das Vítimas de Acidentes de Trânsito

μ - Coeficiente de atrito

ω – Velocidade angular

RESUMO

Neste trabalho foram discutidas as causas de AT e relações físicas imprescindíveis nas perícias. Para isso, foram seguidas etapas, breve relato histórico de AT, tendo em vista o desenvolvimento tecnológico das industrias automobilísticas, rapidamente também, principais causas, a velocidade em diversas situações, energias, impulsos e conservação de energias e os fenômenos relacionados à frenagem. Como destaque, um caso real apresentado no final deste para exemplificar e analisar a utilização destes conhecimentos físicos utilizados em perícias de AT.

ABSTRACT

In this work we discussed the causes of physical relations and AT essential expertise in. For this, steps were followed, a brief historical account of AT, in view of the technological development of auto industry, too quickly, leading causes, the speed in various situations, energy, impulse and conservation of energy and related phenomena frenagem. Como focus, a real case presented at the end of this review to illustrate the use of these skills used in physical skills of AT.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar os pontos de vista físicos utilizados em perícias físicas de AT, envolvendo em geral veículos automotores de pequeno, médio, grande porte e interceptações.

Ao se analisar um acidente num contexto geral devemos ter como base alguns conhecimentos como as leis da mecânica, a inércia, força, massa, aceleração, a velocidade em planos inclinados, velocidades críticas em curva, atrito, deformações, efeitos de frenagem e suas relações com a geometria dos freios e outros elementos físicos.

AT tem sido uma preocupação mundial em razão do seu número considerado elevado a partir do avanço da indústria automobilística. No início do automobilismo, no final do século XIX, devido ao pequeno número de automóveis e às baixas velocidades desenvolvidas, os acidentes de trânsito eram raros, não provocavam danos de monta e sempre eram atribuídos à fatalidade ou à falha do motorista (IDPVAT, 2008).

O desenvolvimento da indústria automobilística permitiu a fabricação de veículos mais velozes e em grande quantidade. Dessa forma, ao longo dos anos os acidentes passaram a acontecer com maior freqüência e violência. O elevado número de AT fez com que a segurança viária passasse a ser uma das grandes preocupações mundiais (IDPVAT, 2008).

Atualmente existem países que possuem as conhecidas auto-estradas como na Alemanha, onde os veículos podem atingir uma velocidade de até 200 Km/h, no Brasil a

velocidade máxima permitida, quando não houver sinalização regulamentadora no local, de acordo com o CTB é de 110Km/h em rodovias para os veículos: automóveis, caminhonetes e camionetas. A velocidade, elemento físico, é um fator preponderante em AT, e tem mudado consideravelmente a realidade dos casos de acidentes atuais, visto que a velocidade pode tornar os veículos e as pessoas mais frágeis (CTB, 1998).

Neste trabalho demonstraremos a parte física e seus processos que compõem toda a trajetória e conseqüências do AT, visto que hoje a análise física destes é que servem de base para ações embargadas no judiciário, através de laudos periciais que abordam este conteúdo para conclusões elucidativas.

CAUSAS DETERMINANTES NO ACIIDENTE DE TRÂNSITO

Antes de introduzir as principais causas dos AT deve ser apresentado alguns conceitos e definições.

Segundo a legislação de trânsito vigente existem os seguintes tipos de veículos: automotores, ônibus elétrico, reboques, semi-reboques, ciclomotores, motonetas, motocicletas, triciclos, quadriciclos, tratores de rodas e mistos, tratores de esteiras, utilitários, caminhões-trator e caminhões (CONTRAN - Resolução n. 14/98).

São enumeráveis os tipos de AT, entretanto neste trabalho destacaremos os seguintes: colisões veiculares com obstáculo fixo, biveiculares entre veículos semelhantes e diversos, com interceptações dentre outros.

É imprescindível conhecermos o tipo de veículo que irá ser estudado, pois como veremos adiante a geometria do veículo influencia relevantemente nos aspectos do acidente.

Outro fator importante na análise do acidente é quanto ao porte do veículo envolvido, sendo que eles podem ser de pequeno, médio ou grande porte. Os considerados de grande porte são os veículos de carga com peso bruto total (PBT) superior a 10 toneladas e veículos de passageiros com lotação igual ou superior a 20 passageiros (CTB, 1998).

Geralmente a análise de acidente de trânsito tem como principal objetivo encontrar

as Causas Determinantes – segundo o Professor Marcos Henrique dos Santos, define-se causa determinante de AT, a que, se afastada, o acidente não ocorreria (Pantoja, 2004, pág. 65 e Santos, 2001).

Teoricamente as Causas Determinantes que vão indicar os fatores que influenciaram nos AT, podem ser: mediatas ou circunstanciais e imediatas ou diretas.

As causas mediatas ou circunstanciais são de ordem subjetiva, portanto, via de regra, se torna impossível materializá-las. A fadiga, a distração, imperícia, negligência e outros fatores que ocorrem com o motorista e passageiros no interior do veículo e que podem levar a um acidente.

As causas imediatas ou diretas são perfeitamente constatáveis, pois, existindo, ficam materializadas pelos vestígios produzidos. Estas podem estar relacionadas ao homem, a maquina ou ao meio (Pantoja, 2004, pág. 66).

2. Fatores relacionados ao homem

Entre as diversas causas podemos citar: imprudência dos condutores, excesso de velocidade, desrespeito à sinalização, ingestão de bebidas alcoólicas, ultrapassagens indevidas, má visibilidade (chuva, neblina, cerração, noite), falta de atenção, defeitos nas vias, falta de manutenção adequada dos veículos, distração interna do condutor (rádio, passageiro, celular, objetos soltos no interior do veículo), ação evasiva inadequada, frente a um fator adverso (buraco, veículo parado, etc.), técnica inadequada ao dirigir veículo (não observar o retrovisor externo e esquerdo, por exemplo), avaliação errada de distância e velocidade de um outro veículo, tanto no mesmo sentido (andar na "cola") como em sentido contrário, falta de cortesia no trânsito, não obediência das normas de circulação e conduta (tanto para condutores como para pedestres), falta de conhecimento e obediência das leis de trânsito (condutores e pedestres), impunidade dos infratores, sensação de onipotência advinda do comportamento inadequado ao dirigir, falta de educação para o trânsito, travessia em locais perigosos e fora da faixa ou semáforo, sonolência, falta de descanso, drogas (remédios, psicotrópicos, tranquilizantes, etc) e fadiga (Portal do Trânsito, 1998 – 2008).

2.1. Fatores relacionados ao veículo

As causas relacionadas à máquina (falha mecânica) são de difícil detecção em exames realizados no local, requerendo minucioso exame, a maioria das vezes somente possível após exames com desmonte do veículo em oficinas.

A falha do sistema de freios ou pode ser atribuída também a um comportamento perigoso.

Mesmo que comprovada a ruptura de determinada peça do sistema de segurança do veículo, deverá ser verificado se ocorreu antes ou depois do acidente (Pantoja, 2004, pág. 68).

2.2. Fatores relacionados ao meio

Existem diversos fatores dentre os quais podemos destacar: irregularidade da via, situação climática, visibilidade do local, condições de tráfego, entre outros.

A irregularidade na pista poderá facilitar o sinistro, pois poderá diminuir o atrito o que poderá até influenciar nos cálculos físicos, poderá causar muita vibração no veículo, é imprescindível a avaliação para solucionar o caso.

Situação climática, quando diante de chuva é bom atentar para a pista escorregadia, pois teremos outro coeficiente de atrito para formular os cálculos físicos (Pantoja, 2004, pág. 69).

ESTUDO DA VELOCIDADE NO ACIDENTE

A velocidade pode ser um agravante ou a causa determinante do acidente, portanto devemos ao menos analisar os seguintes aspectos:

(a) A geometria do terreno (plano ou inclinado);
(b) A trajetória (retilínea ou curvilínea);
(c) Se a eficiência da frenagem é distribuída em todas as rodas;
(d) O veiculo trafega até total imobilização ou não, sem haver colisão ou não;

Tendo em vista essas observações poderemos começar o desenvolvimento dos conceitos físicos aplicados à velocidade em AT.

3. A origem da força centrípeta

A aceleração corresponde à variação da velocidade em função do tempo:

$$\vec{a} = d\vec{v}/dt = d^2\vec{r} / dt^2 = d/dt\left[d/dt(r\hat{e}_r)\right]$$

Efetuando as derivadas indicadas, obtemos facilmente:

$$\vec{a} = \left[d^2r / dt^2 - \omega.^2 r \right] \hat{e}_r + \left[r.d\omega / dt + 2.\omega\, dr/dt \right] \hat{e}_\theta$$

Observe que a aceleração, como a velocidade, possui uma componente na direção radial (direção do versor radial) e outro na direção transversal, dada pelo versor $\hat{\mathbf{e}}_\theta$.

O termo radial é composto por duas parcelas, uma que depende da variação do módulo do raio da curva, e outra que depende apenas da velocidade angular.

Ainda que o raio da curva seja constante (portanto, o módulo da velocidade será constante), ainda restará uma parcela que acarretará uma componente da aceleração na direção radial, $\boldsymbol{\omega^2 r}$, dirigida para o centro da curvatura. A este componente denominamos aceleração centrípeta. Note que essa componente além do movimento circular uniformemente variado também atua no movimento circular uniforme, ou seja, sem variações no raio da curva ou na velocidade angular, decorrendo, tão-somente, da mudança do referencial cartesiano para o curvilíneo. Aí está a origem da força centrípeta – que nada mais é senão o produto da massa da partícula pela sua aceleração centrípeta. Alguns autores definem essas forças inerciais como *fictícias*, uma vez que não representam, na verdade, uma ação, mas apenas uma propriedade do espaço. Nos casos concretos, esta força deverá ser suprida por um vínculo físico, como a tração de uma corda ou, no caso dos veículos, pela força de atrito dos pneus com o asfalto. Geralmente, exprime-se a força centrípeta, nos movimentos circulares, em função de velocidades tangenciais, que é a mediada do velocímetro, como,

$$\mathbf{F_{cp} = m.v^2/r.} \qquad (3.1)$$

Consideramos agora um veículo de massa **m** descrevendo uma curva circular de raio **r** com velocidade escalar **v**. O veículo tem seu centro de massa posicionado a uma altura **h** do solo e a uma distância **b/2** das rodas de lados opostos, sendo **b** sua bitola, veja as ilustrações das figuras (3.1) e (4.1).

Supomos que o peso de veículo está igualmente distribuído pelas rodas traseiras e dianteiras. Esta situação corresponde a figura a seguir:

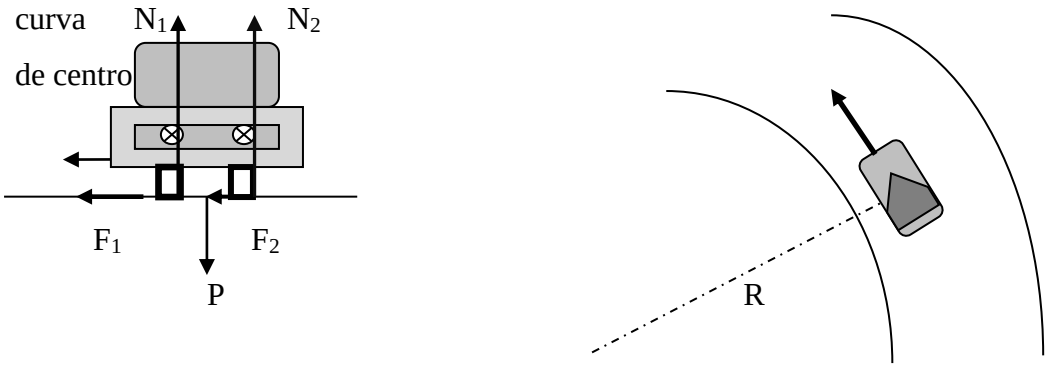

Figura 3.1. Veículo deslocando-se numa curva, representações de suas grandezas (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 36).

Adotando um sistema de eixos cartesiano (x, z) e tomando o sentido positivo do eixo **x** para o centro da curva e **z** perpendicular, teremos:

$$\vec{N}_1 = N_1\vec{k};\ \vec{N}_2 = N_2\vec{k}\ ;\ \ \vec{P} = P(-\vec{k}) = -\ m.g\vec{k},$$

Lembrando que o versor cartesiano do eixo **z** é $\vec{k}$**.** O atrito, como vimos, será o responsável por fornecer a necessária aceleração centrípeta. Matematicamente, teremos:

$$\vec{F}_1 = F_1(-\vec{i})\ ;\ F_2(-\vec{i});\ \vec{F}_{cp} = -\ m.\omega.^2 r\vec{i}$$

Impondo as condições dinâmicas dos problemas, vem:

$$\sum F_z = 0 \ \rightarrow\ (N_1 + N_2 - m.g)\vec{k} = 0 \qquad (3.2a)$$

$$\sum F_x = m.\vec{a}_{cp} \ \rightarrow\ \ m.\ \omega.^2 r\,(-\vec{i}) = m.\vec{a}_{cp} \qquad (3.2b)$$

Essas condições implicam:

$$N_1 + N_2 = m.g \qquad (3.2c)$$

$F_1 + F_2 = m.\omega.^2r$ (3..2d)

A equação (a) expressa o fato de que o veículo não afunda na pista e nem alça voo, ao passo que a (b) mostra que a força centrípeta necessária para manter o veículo em sua trajetória é suprida pelas forças de atrito dos pneus com a pavimentação.

A condição de equilíbrio rotacional (ou seja, o veículo não está tombando) fornece outra equação com base na somatória nula dos momentos das forças em torno do **c.m.** do veículo:

$\mathbf{(N_2 - N_1).b/2 - (F_1 + F_2).h = 0}$ (3.3)

Para resolver o sistema, supomos que as forças de atrito são proporcionais às forças normais em ambos os pares de rodas e que o coeficiente de proporcionalidade (de atrito) é o mesmo em ambos os lados do veículo, o que é bastante razoável. Isso significa:

$F_1 = \mu.N_1$ (3.3a)

$F_2 = \mu.N_2$ (3.3b)

Resolvendo o sistema de equações, obtemos:

$N_1 = m.g/2 + m.\omega.^2r.h/b$ (3.4a)

$N_2 = m.g/2 - m.\omega.^2r.h/b$ (3.4b)

$F_1 = m.\omega.^2r/2 - m.\omega.^4r.^2h/g.b$ (3.4c)

$F_2 = m.\omega.^2r/2 + m.\omega.^4r.^2h/g.b$ (3.4d)

$dN_1/d\omega = (2mrh/b)\omega$

$dN_2/d\omega = - (2.m.r.h/b).\omega$

Observe-se que a reação $\mathbf{N_1}$ descreve com a velocidade angular, enquanto que $\mathbf{N_2}$ cresce.

Logo, haverá um instante AM que $\mathbf{N_2}$ irá se anular. Isso ocorrerá na iminência do capotamento – pois o veículo perderá a força de contato com o solo pelo lado externo da curvatura – para uma velocidade crítica conforme abaixo deduzido:

$$N_1 = 0 \longrightarrow m.g/2 = m.\omega^2.r.h/b \longrightarrow \omega_{crit} = (g.b/2.r.h)^{1/2}$$

Lembrando que, no movimento circular, $\mathbf{v = \omega r}$, a velocidade crítica de capotamento será dada por:

$$\mathbf{v_{cc} = (g.b.r/2.h)^{1/2}} \qquad (3.5)$$

Note-se que, na expressão acima, os fatores geométricos são importantes: veículos com bitola maior, ou com centro de gravidade mais baixo, atingem velocidades críticas mais elevadas para um mesmo raio de curvatura.

Podemos questionar uma velocidade abaixo desta em que o veículo, embora não estando na iminência do capotamento, poderia apenas tangenciar a curva. Para raciocinar sobre isso, vamos considerar que, no tangenciamento – pura derrapagem -, o veículo se comporta como um *caixote*, ou seja, as reações normais em ambos os pares de rodas são iguais. Continua existindo a aceleração centrípeta dirigida para o centro da curva, suprida pela força de atrito, também iguais em ambos os lados do veículo. A condição para a existência da força centrípeta é sua *materialização* através da força de atrito. Como esta força depende da velocidade e do raio da curvatura, conforme equação (3.1) vemos que, para cada curva de raio **r** existe uma velocidade relacionada, acima da qual o veículo não mais ajustará sua trajetória àquela curva. Esta velocidade (crítica de derrapagem) será dada por:

$$\mathbf{v_{cd} = (\mu.g.r)^{1/2}} \qquad (3.6)$$

Como se pode ver facilmente da expressão para a força centrípeta.

Comparando as expressões (4.1.3) e (4.1.4), vemos que, na iminência do capotamento, o coeficiente de atrito **μ** é substituído pelo fator geométrico **b/2h**. Como, em geral, esse último fator é maior do que os coeficientes de atrito normalmente usado nos acidentes com pura derrapagem (sem capotamento), podemos admitir que a velocidade real do veículo etária compreendida na faixa (Negrini Neto, 2003, págs. 33-39).

$$\mathbf{v_{cd} \leq v_{real} \leq v_{cc}} \qquad (3.7)$$

3.1. Velocidade do veículo contra um ponto fixo

Os cálculos tomam por base o seguinte princípio físico:

Trabalho de força de deformação = Variação da energia cinética (do ponto fixo)

$W = \Delta E_c$

Matematicamente, isso corresponde a:

$$\mathbf{Q \cdot d = m_p \cdot (v_p^2 - v_o^2)/2} \qquad (3.1.1)$$

Onde: Q = carga acidental (força cortante) aplicada; d = deslocamento do ponto fixo relativo à base de engaste (0,70 m); m_p = massa parcial deslocada do ponto fixo; v_p = velocidade com que o ponto fixo é impulsionado; v_o = velocidade correspondente ao repouso do ponto fixo (nula).

Assim, nosso esforço se resume a buscar a força necessária para produzir a fratura e o deslocamento do ponto a partir de sua base.

3.2. Cálculo da velocidade inicial do veículo (V_i)

No levantamento de um local, sendo medida a distância de 28,70 m, percorrida pelo veículo do ponto de impacto com o ponto fixo até a sua mobilização. Portanto, através da equação da velocidade de frenagem em pavimento horizontal, temos:

$$v_v = (2 \cdot u \cdot g \cdot x_1)^{1/2} \qquad (3.2.1)$$

Onde:

v_v = velocidade do veículo após o impacto; μ = coeficiente de atrito médio para o asfalto seco (0,70; adimensional); g = aceleração da gravidade (9,81 m/s^2);

x_1 = distância de deslocamento do veículo do impacto com o ponto fixo até a sua parada (28,70 m).

$$v_v = (2 \cdot 0{,}70 \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 \cdot 28{,}70 \text{ m})^{1/2} = 19{,}80 \text{ m/s}$$

A massa total do veículo, por sua vez, é obtida pela soma da massa do veículo, fornecida pelo fabricante, com a massa dos ocupantes. Lembrando que a do ponto fixo pode ser obtida usando a equação da conservação da quantidade de movimento para determinar a velocidade de impacto do veículo contra o ponto fixo:

$$m_v \cdot V_v = m_p \cdot v_p + m_v \cdot v_v \qquad (3.2.2)$$

Onde: m_v = massa total do veículo (1020 + 1.70 = 1300 kg); v_v = velocidade de impacto do veículo contra o ponto fixo.

V_v = (826kg . 21 m/s + 1.300kg . 19,80 m/s)1.300kg = 33 m/s

Sabe-se que, antes do impacto, o veículo deixou impresso 24,20 m de marcas de frenagem. Portanto a velocidade inicial do veículo, a partir do trabalho de frenagem, é dado por:

$$V = (V_v^2 + 2 \cdot u \cdot g \cdot x_2)^{1/2} \qquad (3.2.3)$$

Onde: V = velocidade inicial do veículo; x_2 = distância de frenagem do veículo (24,20 m).

Assim, nossos cálculos permitem afirmar que, ao iniciar a frenagem, o automóvel trafegava a uma velocidade em torno de 137 km/h (Negrini Neto, 2003, págs. 101-107).

3.3. Aplicação do método da velocidade para o salto de veículo

Um dos métodos é calcular a velocidade de um veículo que é lançado da pista ao ar, seja mediante de um choque contra obstáculo (caso em que o lançamento é feito a partir do solo, isto é, **h = 0)** ou por meio de uma precipitação de altura **h.**

Em particular, se o veículo sai do solo e é impulsionado numa rampa de ângulo θ, voltando ao solo a uma distância **x** do ponto de lançamento, então **h** = 0 e a expressão que fornece a velocidade se simplifica para:

$$\mathbf{V = (g.x/sen\ 2\theta)^{1/2}} \qquad (3.3.1)$$

3.4. Forças e energias

Vamos utilizar um modelo de acidente para o estudo completo dos conceitos. Consideramos uma colisão perpendicular entre os veículos 1 e 2, como esquematizado abaixo:

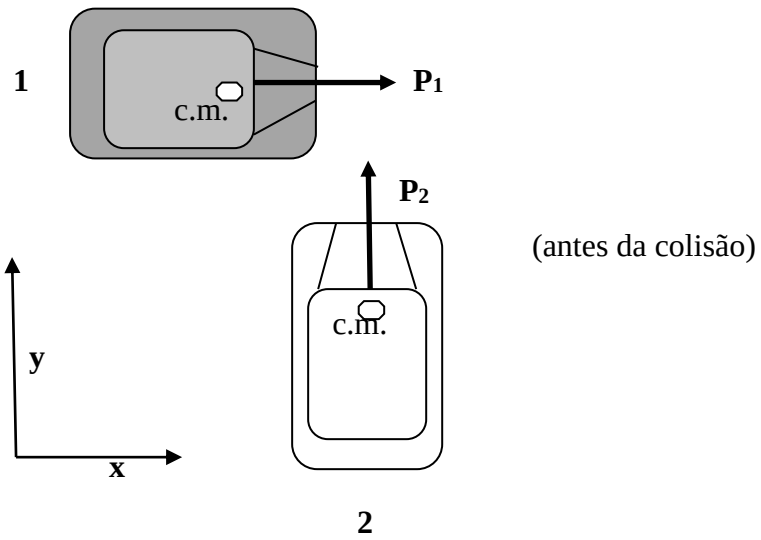

Figura 3.4.1. Veículo deslocando-se perpendicularmente antes da colisão em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 12).

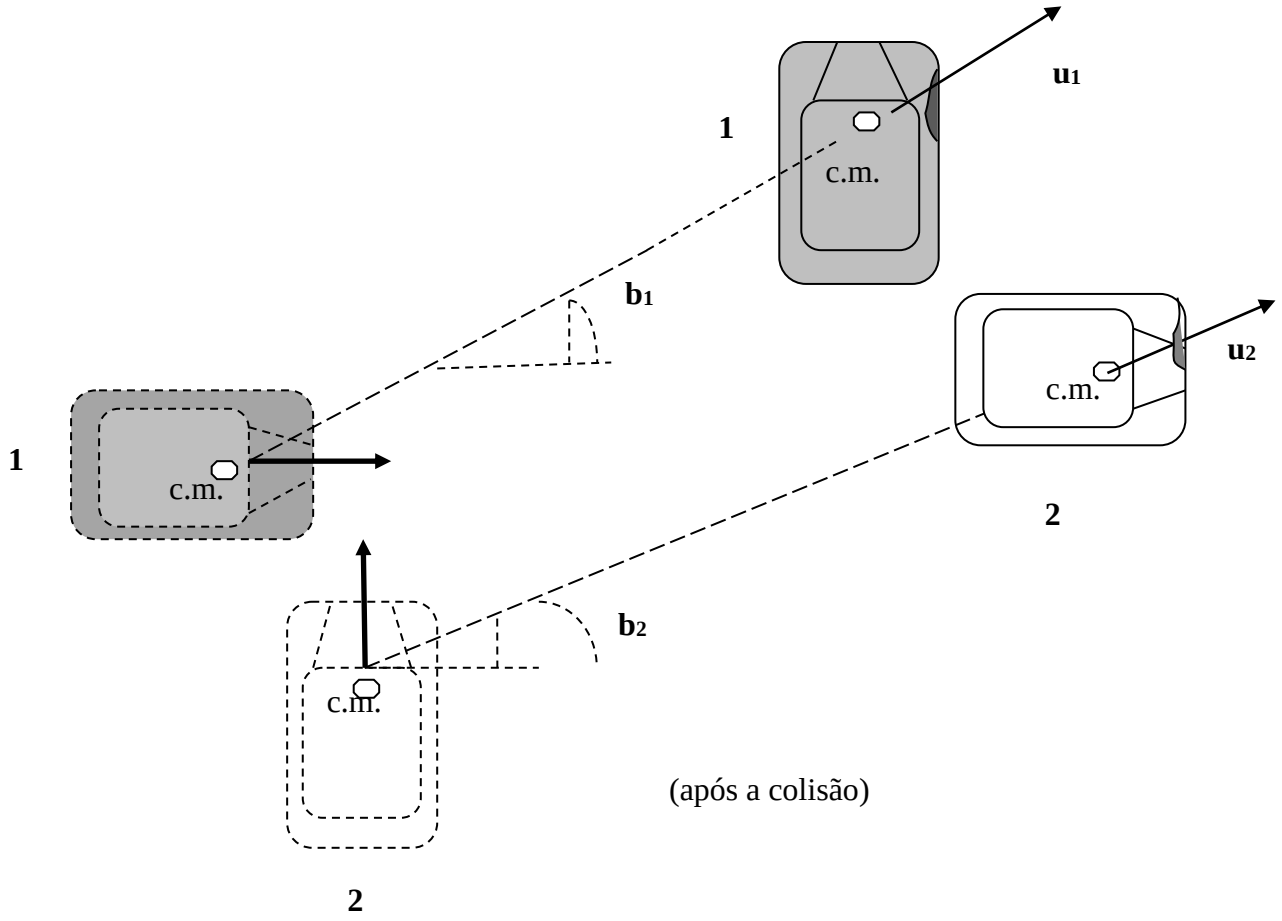

Figura 3.4.2. Trajetórias dos veículos após colisão em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 13).

3.4.1. Análise física do acidente

Vamos admitir que os veículos com massas $\mathbf{m_1}$ **e** $\mathbf{m_2}$ entraram no acidente com ângulos $\mathbf{a_1}$ **e** $\mathbf{a_2}$**,** e que, após o acidente, adquiriram velocidades $\mathbf{u_1}$ e $\mathbf{u_2}$ nas direções dadas pelos ângulos $\mathbf{b_1}$ e $\mathbf{b_2}$, respectivamente, como indica a figura. Estes dados são supostos conhecidos, isto é, foram medidos ou obtidos no local do acidente. Em particular, as velocidades finais **u** podem se calculadas pelo arrastamento de pneus dos veículos após a colisão.

3.4.2. Orientação dos danos

Aplicando-se a 3ª Lei de Newton, deduz-se imediatamente que o veículo **1** terá seus danos orientados da direita para a esquerda (**F**$_{21}$) e da frente pata trás (**F**'$_{12}$); o veículo terá danos orientados da frente para trás (**F**$_{12}$) e da esquerda para a direita (**F**'$_{21}$). Os pares de ação e reação correspondem, respectivamente, às forças:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \text{ e } \vec{F}'_{21} = -\vec{F}'_{12}$$

3.4.3. Conservação do *momentum* linear

Lembrando do módulo do *momentum* linear é igual à **mv**, com as direções e sentidos na figura, temos o seguinte esquema gráfico:

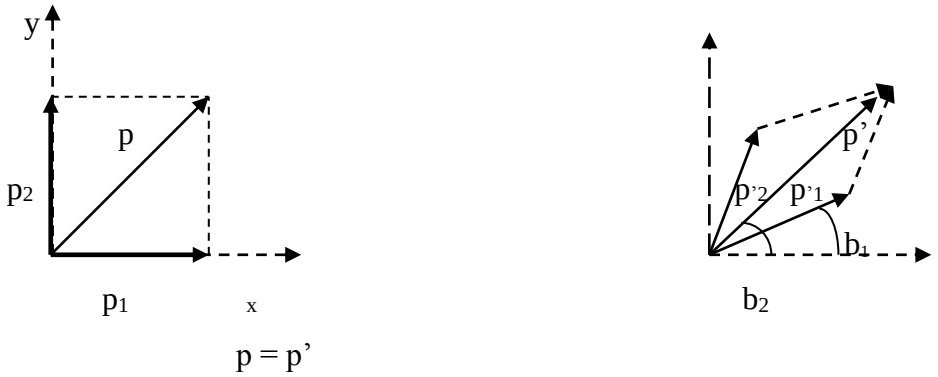

Figura 3.4.3.1. A partir do sítio da colisão, calculado os ângulos em relação aos **c.m.** dos veículos em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 12).

Note-se como devem ser medidos os ângulos com relação ao deslocamento dos **c.m.** dos veículos, a partir do sítio de colisão, não importando os giros descritos individualmente (o método gráfico acima pode ser utilizado para resolver complicados acidentes de trânsito).

3.4.4. Solução analítica da equação

Para facilidade de notação, adotamos como **p** os *momenta* antes da colisão e **q** os *momenta* após a colisão. Temos a seguinte equação:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{q}_1 + \vec{q}_2 \qquad (3.4.4.1)$$

Decompondo-se os vetores no eixo **x** e **y:**

Eixo **x**:

$$p_1.\cos(a_1) + p_2.\cos(a_2) = q_1.\cos(b_1) + q_2.\cos(b_2) \qquad (3.4.4.1a)$$

Eixo **y**:

$$p_1.\text{sen}(a_1) + p_2.\text{sen}(a_2) = q_1.\text{sen}(b_1) + q_2.\text{sen}(b_2) \qquad (3.4.4.1b)$$

As equações (3.4.4.1) acima podem ser resolvidas como um sistema de duas equações a duas incógnitas. Para isso, isolamos $\mathbf{p}_1$ em (**a**) e substituímos em (b). Após um simples exercício algébrico e lembrando que sen**a**.cos**b** – sen**b**.cos**a** = sen (**a-b**), obtemos:

Este resultado, levado de volta na equação acima, fornece, após algum esforço algébrico:

$$p_2 = q_1.\text{sen}(b_1 - a_1) + q_2.\text{sen}(b_2 - a_1)/\text{sen}(a_2 - a_1).$$

Este resultado após algum esforço algébrico nos leva a:

$$p_1 = q_1.\text{sen}(a_2 - b_1) + q_2.\text{sen}(a_2 - b_2)/\text{sen}(a_2 - a_1).$$

Para escrever as expressões em função das velocidades, basta substituir $\mathbf{p_1 = m_1 v_1}$**,** etc., para obter:

$$v_1 = u_1.\text{sen}(a_2 - b_1) + m_2/m_1.\ u_2.\ \text{sen}(a_2 - b_2)/\text{sen}(a_2 - a_1) \qquad (3.4.4.2)$$

$$v_2 = m_1/m_2..u_1.\text{sen}(b_1 - a_1) + u_2.\text{sen}(b_2 - a_1)/\text{sen}(a_2 - a_1) \qquad (3.4.4.2b)$$

De posse dos valores das massas, das velocidades finais e dos ângulos, resolvemos o acidente por completo, encontrando os valores das velocidades iniciais dos veículos. As equações (3.4.4.2) expressam o *Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento* - P_{CQM} (ou Princípio da Conservação do Momentum Linear - P_{CQML}).

È importante notar que as velocidades $\mathbf{v_1}$ e $\mathbf{v_2}$ são funções dos ângulos relativos ($\mathbf{a_i}$ - $\mathbf{b_j}$) e ($\mathbf{a_2} - \mathbf{a_1}$). Nas colisões perpendiculares, $\mathbf{a_1 = 0^o}$ **e** $\mathbf{a_2 = 90^o}$ e as (3.4.4) se reduzem a:

$$v_1 = u_1.\cos b_1 + m_2/m_1.\cos b_2$$

$$v_2 = m_1/m_2.\ u_1.\text{sen}\ b_1 + u_2.\text{sen}\ b_2$$

Observe que as expressões acima fornecem a informação sobre o *quanto* o veículo (1) e (2) foi afastado de sua trajetória inicial pelo impulso recebido no embate contra o veículo (2) e (1).

3.4.5. Sobre a conservação da energia

O P_{CQM} já leva em conta que parte da energia é dissipada na interação entre os corpos, e é justamente esse fato que faz com que suas velocidades sejam diferentes antes e após a colisão. Sendo a energia cinética de um corpo em movimento dada por $\mathbf{1/2mv^2}$, uma alteração no valor de **v** produz uma alteração na energia do corpo. No acidente de trânsito, os veículos entram com velocidade **v** e saem com velocidade **u;** logo, existe uma perda de energia no acidente (esta perda só não ocorrerá nas colisões perfeitamente elásticas, em que não acontecem deformações). A energia dissipada transformou-se no trabalho das forças de deformação dos corpos colidentes, que corresponde ao produto da força média pela distância média da deformação.

3.4.6. Impulso e força máxima

O impulso efetuado por um veículo sobre o outro numa colisão pode ser obtido a partir do $P_{CQM.}$ Por definição o impulso é:

$$\vec{I} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

Com base na figura 3.4.3.1 vem que:

Figura 3.4.6.1. Representação do impulso resultante, proveniente da figura 3.4.3.1 em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 19).

Onde:

$$\vec{I} = \vec{p}'_2 - \vec{p}_2 = - (\vec{p}'_1 - \vec{p}_1)$$

Conforme representado no esquema acima.

3.4.7. Sobre a velocidade inicial dos veículos

O P_{CQM} permite que sejam calculadas as velocidades de impacto dos veículos. Isso não significa que eles estivessem animados com aquelas velocidades momentos antes do acidente. Por exemplo, se um deles freou antes de bater, deve-se utilizar o Teorema Trabalho-Energia Cinética para se obter sua real velocidade, de acordo com a expressão:

$$v_0 = (v_{imp}^2 + 2.\mu.g.x)^2$$

Onde: v_{imp} é a velocidade de impacto, μ é o coeficiente de atrito e x é à distância de frenagem antes do impacto (Negrini Neto, 2003, págs. 11-19).

3.4.8. Avaliação de velocidade pela ruptura do para-brisa

É comum nos atropelamentos, o pedestre chocar-se contra o pára-brisa do veículo, causando sua ruptura. Para ocorrer este fenômeno, é necessário que a pressão exercida contra a superfície do pára-brisa exceda a resistência do vidro. O valor da resistência à pressão que deve ser oferecida é normatizado, no Brasil, por resolução do CONTRAN. Conhecido este valor, bem como a deformação máxima do vidro antes de romper-se, é possível estabelecer a força mínima necessária para a ruptura e, por meio dela, avaliar a energia cinética do veículo. O fundamento da aplicação deste princípio pode ser assim resumido: um vidro pára-brisa de veículo deve resistir à pressão (do vento, impactos etc.) até um certo limite, como estipula a Resolução nº 463/73 do CONTRAN. Pressão é igual à força sobre superfície. Para romper-se, a força aplicada deve superar, no mínimo, a resistência do material à pressão aplicada. O trabalho desta força é igual ao seu produto pelo deslocamento, este entendido como a flecha máxima descrita pelo vidro; este trabalho, por sua vez, corresponde à energia mínima necessária para romper o vidro. De onde vem essa energia? Vem, principalmente, do movimento do veículo. Pode-se demonstrar, com base no Pcqm, que, mesmo com a vítima em movimento, há pouca variação na velocidade do veículo. Esta seria a energia mínima.

O procedimento técnico para implementar o acima exposto segue os seguintes passos:

1. Verificar a resistência do vidro do pára-brisa;
2. Avaliar a área atingida no impacto;
3. Calcular a força em Newtons;
4. Verificar a deformação máxima do vidro na iminência da ruptura
5. Aplicar a conservação da energia para avaliar a velocidade do veículo pela energia cinética desenvolvida.

A velocidade é fornecida matematicamente pela expressão deduzida:

$$v = (2.\ R.A.d/m)^{1/2} \qquad (3.4.8.1)$$

Onde: v é a velocidade do veículo, R é a resistência do vidro à compressão, A é a área atingida, d é a deformação e m é a massa do veículo.

Normalmente, a resistência vem expressa em kgf/cm^2 e a deformação em cm. Transformando-as respectivamente em N/cm^2 e m, a velocidade será dada em m/s. A área de impacto pode ser avaliada em cm^2, pois esta unidade é cancelada nos cálculos, como se vê acima (Negrini Neto, 2003, págs. 42-44).

APLICAÇÕES FÍSICAS NA FRENAGEM E SUAS RELAÇÕES

Para o cálculo das velocidades desenvolvidas por veículos na iminência de um acidente de trânsito, são fundamentais os vestígios de frenagem observados na pavimentação. A velocidade inicial de um veículo que, após demarcar uma distância **x** de frenagem e atingir outro veículo com uma velocidade residual (chamada de impacto $\mathbf{v_i}$) $\mathbf{v_0}$ pode ser calculada, com boa aproximação, através da fórmula:

$$v_0 = (v_i + 2.\ \mu.g.x)^{1/2},$$

onde: μ é o coeficiente de atrito dos pneus com a pavimentação, g é a aceleração da gravidade e x é a extensão dos vestígios de frenagem. A velocidade de impacto v_i pode ser avaliada com base na conservação do momento dos veículos ou por meio de métodos aproximados. A expressão acima também é usada para fornecer uma velocidade inicial quando v_i, impossível de ser avaliada, é tornada nula, supondo-se que o veículo parou ao fim dos vestígios.

Neste trabalho, introduziremos um modelo mais real para o veículo, no qual levaremos em conta a posição de seu **c. m.** e estudaremos as modificações assim introduzidas na expressão acima neste caso.

4. Frenagem e geometria do veículo

Consideremos um veículo tipo automóvel, de massa **m,** em movimento no plano horizontal, desacelerado por ações de forças de atrito $\mathbf{F_1}$ e $\mathbf{F_2}$ atuando nas rodas dianteiras e traseiras, respectivamente. Eventuais desequilíbrios laterais provocados por forças externas ou torques são desprezados. A figura abaixo apresenta o esquema das forças atuantes:

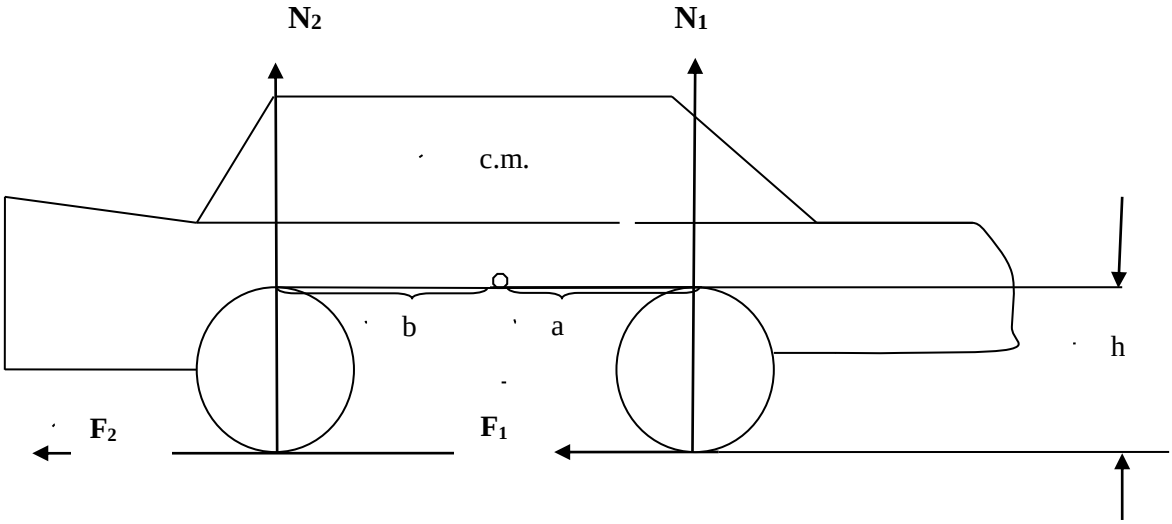

Figura 4.1. Representação do impulso resultante, proveniente da figura 3.4.3.1 em coordenadas x,y (Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções, 2003, pág. 19).

As condições de equilíbrio no eixo vertical e dinâmica no eixo horizontal implicam:

$$N_1 + N_2 = P = mg \tag{4.1}$$

$$F_1 + F_2 = m\alpha \tag{4.2}$$

A condição de equilíbrio rotacional, por sua vez, introduz:

$$N_1.a - N_2.b - (F_1 + F_2).h = 0 \tag{4.3}$$

A expressão empírica para as forças de atrito fornece as condições subsidiárias:

$$F_1 = \mu_1 . N_1 \tag{4.4a}$$

$F_2 = \mu_2 . N_2$ (4.4b)

As equações (4.1**)** e (4.4) formam um sistema que pode ser facilmente resolvido para α, fornecendo:

$\alpha = g(\mu_2.a + \mu_2.b)/a + b - (\mu_1 - \mu_2).h$ (4.5)

Da expressão acima, observa-se claramente que a aceleração $\alpha = \mu.g$, normalmente utilizada como primeira aproximação para o cálculo de velocidades, é obtida ao se impor em (4.5) $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, independentemente do valor do **h.**

O valor de α introduzido pela equação acima depende de diversos fatores. Mesmo no caso em que **a = b,** isto é, para veículos com o peso distribuído homogeneamente entre as rodas dianteiras e traseiras, **a** será função de μ_1 **e** μ_2, $\mu_1 \neq \mu_2$**.** É o caso, por exemplo, de veículos que dispõem de freios a disco nas rodas dianteiras e a tambor nas traseiras, nos quais, em geral, $\mu_1 \geq \mu_2$**,** em decorrência da melhor eficiência dos freios a disco. Outros casos similares ocorrem quando o veículo apresenta pneus gastos na traseira e bons na dianteira ou quando o freios é dimensionado pela engenharia do veículo para melhor desempenho em um dos pares de rodas.

4.1. Frenagem com duas rodas

Nos casos típicos de falhas de frenagem, os veículos modernos introduzem a força de atrito através de duas rodas apenas, em virtude de serem equipados com freios de duplo-circuito, sendo os mais comuns os que funcionam em diagonal (roda dianteira em conjunto com a traseira oposta). Iremos estudar o comportamento de um veículo nas frenagens realizadas por um par de rodas, sendo este:

a) As duas dianteiras;

b) As duas traseiras; e;

c) Uma dianteira e uma traseira. Mesmo conhecendo que os casos (a) e (b) correspondam a um passado na indústria automobilística-atualmente quase todos os veículos

são equipados com duplo-circuito em diagonal, interessa-nos analisar como se distribui a força de frenagem aquém e além do **c. m.** do veículo. Para isso, faremos uma experiência teórica: desligamos matematicamente os freios na dianteira (traseira) fazendo simplesmente $\mu_2 = 0$($\mu_2 = 0$) obtendo, para os casos acima:

a) $\alpha_d = \mu.g.b/a + b - \mu.h$ (4.1.1)

b) $\alpha_t = \mu.g.a/ a + b + \mu.h$ (4.1.2)

Onde: o índice **d**(t) refere-se às rodas dianteiras (traseiras).

Para estudar o último caso (circuito **x**), vamos considerar que cada par de rodas contribuem com metade da força total de frenagem. Neste caso, que restringimos para $\mu_1 = \mu_2$, obtemos:

$$\alpha_x = 1/2.(\mu.g.b/a + b - \mu.h) + 1/2. (\mu.g.a/ a + b + \mu.h)$$

$$= \mu/g\{(a + b)^2 + \mu.h.(b – a)/(a + b)^2 - \mu.^2h^2\}$$

$$= \mu.g/2(1^2 + \mu.h.\delta I/1^2 - \mu.^2h^2). \quad (4.1.3)$$

Onde: $a + b = 1$ e $(b-a) = \delta I$

Analisemos os três casos separadamente: as expressões (4.1.1) e (4.1.2) demonstram que, para um mesmo coeficiente de atrito, um veículo com **a = b** apresenta uma força de frenagem maior nas rodas dianteiras, em virtude de se levar em conta à altura **h** de seu **c. m.** Pode-se então, adiantar que, quando veículos de tipos distintos, com peso homogeneamente distribuído entre as rodas, apresentam extensões bem diferentes de vestígios de frenagem,

este fato se deve a fatores ligados à engenharia do veículo, e não à sua geometria. Isso será mais bem discutido na próxima seção. Por ora, interessa-nos verificar se a aproximação normalmente que: **a = μ.g/2** é válida dentro de certa precisão. Para veículos com duplo-circuito diagonal, é fácil observar-se que esta aproximação funciona bem, uma vez que o segundo termo do produto (4.1.3) é bem próxima de 1 para os automóveis comuns. Nesse caso, o erro no cálculo da velocidade não supera cerca de 2%. O problema está nos dois primeiros casos. Para melhor fixação, imaginemos um veículo com **a = b = 1,2 m e h = 0,5 m. Para μ = 0,7, teremos α_d = 4,2 m/s^2 e a_t = 2,99 m/s^2**. A aproximação α **= μ.g/2** forneceria um valor 3,5 m/s^2 para a mesma aceleração, longe dos valores acima, e , portanto, não deve ser usada nestes casos. Já para os veículos com duplo circuito em **x**, expressão (4.1.3), obteríamos um valor bem próximo de 3,5 m/s^2 para a aceleração, perfeitamente compatível com a medida usada.

Outro ponto importante a se notar é que, de acordo com os resultados (4.1.1) e (4.1.2) acima, o mesmo veículo, freando apenas com as rodas traseiras, deixará marcas de frenagens cerca de 35% mais extensas caso utilizasse apenas os freios dianteiros. Isto se pode ver se compararmos as expressões para o cálculo de velocidades nos dois casos. Para frenagem apenas com as rodas dianteiras, temos:

$$v_d = \{[\mu.g.(I + \delta I)/I - \mu.h].x_d\}1/2 \qquad (4.1.4a)$$

e, com as rodas traseiras,

$$v_t = \{[\mu.g.(I - \delta I)/I + \mu.h].x_t\}1/2 \qquad (4.1.4\ b)$$

Para uma mesma velocidade inicial,

$$v_d = v_t \rightarrow x_d/ x_t = (I - \mu.h/ I + \mu.h).\ (I - \delta I/ I + \delta I) = (1 - \mu.h/ 1 + \mu.h).a/b \qquad (4.1.5)$$

Inserindo os dados numéricos a = b =1,2 m, μ = 0,8 e h = 0,5 m, vem que x_d = 0,714 x_t. Assim, por exemplo, para uma velocidade inicial de 50 km/h, o mesmo veículo demarcaria 20,5 m de frenagem atuando somente as rodas dianteiras e 28,7 m se atuassem apenas as traseiras. Ou, analogamente, para uma distância de frenagem de 50 m, corresponderiam 21,7 m de marcas se freasse somente com as rodas dianteiras e 18,3 m se atuassem apenas as traseiras. Em qualquer dos casos, o erro pela utilização da fórmula aproximada a = μ.g/2 seria considerável no cálculo da velocidade para mais ou para menos. Portanto, para veículos com circuitos independentes para as rodas dianteiras e traseiras, deve-se sempre considerar a altura do c.m. ou, pelo menos, utilizar uma média h ≈ 0,5 m para veículos tipo automóvel.

No caso de circuito diagonal, como vimos, a aproximação aludida é boa e a fórmula pode ser usada com bom resultado.

As equações (4.1.1) e (4.1.3) permitem definir coeficientes de atrito efetivos, que denominaremos fatores de arreste, para cada um dos casos, na forma das expressões a seguir:

$$\mu_d = \mu.(I + \delta I)/I - \mu.h \qquad (4.1.6a)$$

$$\mu_t = \mu.(I - \delta I)/I + \mu.h \qquad (4.1.6b)$$

$$\mu_x = \mu/2.(1^2 + \mu.h.\delta I/I^2 - \mu.^2h^2) \qquad (4.1.6c)$$

4.2. Variações da frenagem em função da geometria e do dimensionamento dos freios

Para uma mesma velocidade inicial, veículos diferentes apresentam grandes variações nos comprimentos dos vestígios de frenagem. Isso significa que a utilização de um mesmo coeficiente de atrito para veículos distintos pode conduzir a erros que chegam a 20%

nos cálculos de velocidade. Nesta seção, vamos mostrar que, se os fatores geométricos e tecnológicos – isto é, o dimensionamento dos freios – forem convenientemente considerados, estas discrepâncias podem ser contornadas e o cálculo de velocidade é feito com boa aproximação. Os dados apresentados na seção anterior sugerem que, para qualquer veículo, a distribuição das forças de frenagem entre as rodas dianteiras e traseiras depende: dos fatores de arraste (4.1.6) acima definidos, que trazem informações sobre a geometria do veículo; da diferença entre os coeficientes de atrito na dianteira e na traseira do veículo que, por sua vez, dependem do estado dos pneus e do dimensionamento tecnológico dos freios.

Utilizando a expressão geral (4.5), vamos admitir que a relação entre os coeficientes de atrito μ_1 e μ_2 seja dada por um parâmetro γ, tal que $\mu_1 = y.\mu_2$. Substituindo em (4.5), vem:

$$\alpha = \mu.g/2.1(1 + y) – (1 – y).\delta I/I + (1 – y).\mu.h \qquad (4.2.1a)$$

Onde: $\mu_2 = \mu$

A expressão acima pode ser simplificada fazendo-se $\gamma = 1 – \lambda$ (Negrini neto, 2003, págs. 55-62).

$$\alpha = \mu.g/2.1(2 - \lambda) – \lambda.\delta I/I + \lambda.\mu.h \qquad (4.2.1b)$$

ESTUDO DE CASO

5. Análise de acidente em rodovia envolnendo caminhonete e moto

5.1. Introdução

O acidente a seguir é bastante instrutivo como aplicação de conceitos físicos. Trata-se de um caso relativamente simples, do ponto de vista físico, uma vez que o acidente ocorreu praticamente numa reta, com a caminhonete colidindo sua dianteira contra a traseira de uma moto. Portanto o Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento se simplifica, pois usamos uma única equação. Por outro lado, essa equação, por ter duas incógnitas – as velocidades iniciais em ambos os veículos – não apresenta solução analítica. Para isso, teremos que atribuir valores *ad hoc* para a velocidade inicial de um dos veículos para podermos calcular a do outro. Como a nossa intenção é calcular apenas a velocidade do veículo colidente, no caso, a caminhonete, construímos uma planilha com variações razoáveis para a velocidade inicial da moto e mostramos que, dentro dessa faixa de variação, a velocidade da caminhonete não varia significativamente. Mais ainda: atribuindo velocidades iniciais da moto entre 30 e 70 km/h, a velocidade da caminhonete permanece na faixa das *velocidades excessivas,* entre 147 e 125km/h. Isso resolve o problema, mesmo sem todos os dados iniciais.

5.2. O acidente

Numa rodovia em reta e nível, uma caminhonete da marca Toyota colide sua dianteira contra a traseira de uma moto e a conduz, em acoplamento, por uma distancia de 69 metros, enquanto freia. Antes do impacto, a caminhonete já vinha usando os freios, deixando marcados 29 metros de frenagem, antes do embate, na pavimentação de asfalto seco e em bom estado.

Pelo Pcqm, é fácil ver que, para conhecer a velocidade da caminhonete antes do impacto, é necessário conhecer a velocidade inicial da moto, pois o acidente é unidimensional (um só eixo referencial). A equação do Pcqm é a seguinte:

$$\mathbf{m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_1u_2} \qquad (5.2.1)$$

Onde: m são as massas, v as velocidades iniciais (antes de colisão, ou velocidades de impacto) e u as velocidades finais (após o acidente). A fórmula 5.2.1 refere-se à caminhonete. Neste caso, as velocidades são grandezas escalares, pois temos só um eixo a considerar, o da reta do acidente.

Resolvendo a equação para v_1, temos:

$$\mathbf{v_1 = u_1 + m_2/m_1(u_2-v_2)} \qquad (5.2.2)$$

Note-se que, para achar v_1, necessitamos de um valor para v_2. As velocidades finais são calculadas pelo teorema da transformação de energia cinética em trabalho da força de atrito, como já sabemos:

$$\mathbf{u = (2.\ \mu.g.d)^{1/2}} \qquad (5.2.3)$$

Neste caso, os valores das velocidades finais são iguais, pois à distância de frenagem d é a mesma (69 metros).

Como não sabemos a velocidade inicial da moto, podemos fazer diversos cálculos dentro de uma faixa razoável e informar os correspondentes valores da velocidade da caminhonete para cada caso. Numa tabela de cálculos, essa operação fica bastante simples (veja tabela).

Mas o problema não está ainda resolvido: calculamos, com auxílio da tabela, uma faixa de velocidades, entre uma mínima e uma máxima, para a caminhonete no momento do impacto. Entretanto, como antes do acidente ela já vinha freando, devemos calcular a velocidade de tráfego da caminhonete. Usualmente, denominamos esta velocidade de inicial, enquanto que as velocidades calculadas pelo Pcqm são denominadas de velocidades de impacto. Para isto, usamos novamente o teorema para calcular v_{in}.

$$\mathbf{v_{in} = (v_1^2 + 2.\ \mu.g.x)^{1/2}} \qquad (5.2.4)$$

Onde: x é à distância de frenagem antes da colisão.

Tabela 1. Valores da velocidade da caminhonete para cada caso.

m_1	m_2	x_1	x_2	u_1	u_2	v_2	v_1	**Fren.**	**v**(impac).	$v_{1\ INIC.}$
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	8,33	33,86	29,00	121,9	141,48
Kg	kg	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	km/h	km/h
$\mathbf{V_1 = u_1 + (m_2/m_1).(u_2 - v_2)}$										

FONTE: Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções.

Vamos mostrar que, uma vez de posse da velocidade de impacto, podemos deduzir uma série de elementos importantes para avaliar a causa do acidente, ou as concausas, pois nem sempre a velocidade é a única causa de um acidente. Um parâmetro importante que podemos definir é a velocidade máxima que a Toyota poderia estar desenvolvendo para evitar o acidente. Para responder esta questão, vamos raciocinar da seguinta forma:

Partindo dos dados oferecidos pela tabela, fixando, para efeito didático, a velocidade inicial da moto em 30 km/h (8,33 m/s), usamos inicialmente o tempo de reação de 1,8 segundos e concluímos que havia uma distância de 54 metros entre a Toyota e a moto quando esta foi percebida pelo condutor da Toyota. Entretanto, a moto estava animada de uma velocidade de 30 km/h (8,3 m/s), o que significa que a distância aumenta de 8,3 m/s x 1,8s =

15 metros durante o tempo de reação do condutor da Toyota. A distância passa a ser então 54 + 15 = 69 metros. Após percorrer essa distância, a Toyota inicia sua frenagem, mas a moto vai percorrer mais uma distância durante essa frenagem. Não ocorrerá o acidente se essa distância for suficiente para a Toyota parar antes de bater. Essa distância será dada por: vel. da moto x tempo necessário para a Toyota frear até parar nos 29 metros disponíveis, ou seja; 8,3 x (velocidade inicial para 29 metros de frenagem total da toyota)/(μ.g) = 8,3 x 3,14 = 26,16 metros. A velocidade de parada da Toyota em 29 metros se calcula pela expressão usual (usaremos um coeficiente de atrito de 0,6 apenas para efeito de cálculo. No acidente real, esta valor foi usado porque os pneus da Toyota estavam gastos):

$$v = (2 \times 0{,}6 \times 9{,}8 \times 2{,}9)^{1/2}$$

Assim, a distância total que a Toyota teria disponível para evitar o acidente (isto é, parar antes de bater) seria de 69 + 26,16 = 95,16 metros. Com esta informação, calculamos então qual seria a velocidade máxima que a Toyota poderia estar desenvolvendo, nas condições do acidente, para que esta não ocorresse:

5.3. Cálculos

Distância total disponível de 95,16; coeficiente de atrito de 0,6, tempo de reação de 1,8 segundos e a aceleração da gravidade de 9,81 m/s^2.

A condição é que a distância total disponível seja igual à soma da distância de reação + distância de frenagem, ou seja:

$$v_{máx}.\ t_r + v_{máx}^2/2.\ \mu.g = 95{,}16 \qquad (5.3.1)$$

Resolvendo esta equação do segundo grau, obtemos a velocidade máxima que a Toyota poderia estar desenvolvendo para evitar o acidente. Qualquer valor acima deste tornaria o acidente inevitável. Esta seria tanto mais grave quanto maior fosse a velocidade. Portanto: a velocidade da toyota era bem superior a esta, pois não apenas não pode evitar o acidente, como ainda houve sérios danos, indicando que aquele veículo chegou ao sítio da colisão com velocidade bem maior que a acima calculada. No caso, para coeficientes de atrito

0,7, teríamos $v_{máx}$ = 93,6 km/h.

Tabela 2. Valores calculados da velocidade da caminhonete em função da velocidade inicial da motocicleta.

m_1	**m_2**	**x_1**	**x_2**	**u_1**	**u_2**	**v_2**	**v_1**	**Fren.**	**V**(imp).	**$v_{1\ INIC}$**
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	8,33	33,86	29,00	121,9	141,48
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	9,72	33,69	29,00	121,29	140,95
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	11,11	33,52	29,00	120,68	140,43
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	12,50	33,35	29,00	120,07	139,90
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	13,89	33,18	29,00	119,45	139,38
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	15,28	33,01	29,00	118,84	138,85
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	16,67	32,84	29,00	118,23	138,33
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	18,06	32,67	29,00	117,62	137,81
1800	220	69,00	69,00	31,08	31,08	19,44	32,50	29,00	117,01	137,29

FONTE: Dinâmica dos acidentes de trânsito: Análises e reconstruções.

Na tabela acima estão os valores calculados da velocidade da caminhonete em função da velocidade inicial da moto. Como esta é desconhecida (informada, mas na medida), podemos testar diversas situações variando aquela velocidade inicial a partir de 30 km/h até quase 72 km/h. Observe que, quanto maior a velocidade inicial da moto, maior é a da Toyota, com se pode ver analisando a equação 5.2.2 **(**Negrini Neto, 2003, págs. 173-177).

6. CONCLUSÃO

A evolução histórica tem demonstrado a necessidade dos conhecimentos físicos relacionados com os AT, este vem se tornando cada vez mais complexo, desta forma, exigindo uma crescente especialização nesta área para soluções deste emergente problema.

Os conhecimentos analisados deste trabalho mostraram de forma geral que cada AT exige um alto conhecimento de perícia física e cada caso específico depende de diversos fatores, entretanto existem algumas propriedades físicas que são comuns a todos. Este trabalho ainda demonstrou as principais características dos acidentes e mostrou um pouco de como são realizados os cálculos periciais nos AT.

7. REFERÊNCIA

[1] CONTRAN, Conselho Nacional de Trânsito, **resoluções,** Brasília, 1998. Disponível em: < http://www.denatran.org.br/resoluçõescontran >. Acesso em: abril 2009

[2] CTB, Código de Trânsito Brasileiro, Brasília 1998.

[3] IDPVAT, Instituto Brasileiro de Defesa das Vítimas de Acidentes de Trânsito, **Acidentes de Trânsito,** 2008. Disponível em: < http://www.idpvat.org.br/ >. Acesso em: julho 2009.

[4] NEGRINI NETO, Osvaldo. **Dinâmica dos acidentes de trânsito**: **Análises e reconstruções.** Campinas, SP: Editora Millenium, 2003.

[5] PANTOJA, Helvio de Oliveira. **Acidentes de Tráfego.** Curso de formação de Perito Criminal, DPTC/PCRO, 2004.

[6] PORTAL DO TRÂNSITO, **Causas de Acidente**, 1998 – 2008. Disponível em: < http://www.transitobr.com.br/causas.htm > . Acesso em: Abril 2009.

[7] SANTOS, Marcos Henrique. **Investigação em locais de acidente de tráfego**. Seção de delitos de Transito, IC/PCDF, 2001.