UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Instituto de Física – INFIS

“A MECÂNICA NEWTONIANA APLICADA NA DINÂMICA DOS ACIDENTES DE TRÂNSITOS RODOVIÁRIOS - UM SUPORTE PARA DECISÕES FORENSES”

Uberlândia, Agosto/2014

A MECÂNICA NEWTONIANA APLICADA NA DINÂMICA DOS ACIDENTES DE TRÂNSITOS RODOVIÁRIOS - UM SUPORTE PARA DECISÕES FORENSES

Luís Carlos Silva

Trabalho de conclusão de curso submetido e aprovado junto à Coordenação do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a obtenção do grau de licenciatura**.**

Profª. Dra. Silvia Martins dos Santos

Coordenadora do Curso de Licenciatura Plena em Física

Instituto de Física – INFIS

Orientador

Prof. Dr. Ademir Cavalheiro

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Luís Petricelli Castineira

Profª. Dra. Andrea Antunes Pereira

RESUMO

Uma das funções que tem merecido atenção por parte dos órgãos de segurança pública é a atividade de polícia técnico científica, cujo papel é elucidar fatos que interessam à justiça, realizar procedimentos científicos visando dar materialidade a um ato ilícito ocorrido, fornecendo a dinâmica do fenômeno, indicando autoria, elaborando provas técnicas, considerando que por ser científica é mais difícil de ser contestada e norteia as decisões forenses seguras e justas.

Um dos muitos conflitos que vão parar na justiça para mediação refere-se a acidentes de trânsito. Cada dia que passa o número de veículos é cada vez maior em circulação no Brasil, resultado da melhoria das condições econômicas da população de um país emergente. Diante disso, é crescente também o número de acidentes de trânsito, com números cada vez mais impressionantes de vítimas, sejam elas fatais, com lesões graves ou leves, gerando entre as partes envolvidas um conflito. As divergências ou conflitos sociais são cada vez mais crescentes nas mais diversas modalidades. Uma das causas do impasse são os acidentes de trânsito, que quase sempre terminam em litígio, ficando a decisão sobre a culpabilidade a cargo da justiça forense. Nos acidentes de trânsito, uma das causas presumíveis é o excesso de velocidade ou a velocidade inadequada e a imputação da culpa a um condutor tem que se amparar em laudos confiáveis que comporão o devido processo legal. Na elaboração de um laudo técnico é de fundamental importância o estudo das condições do acidente para melhor esclarecer a natureza do fato e dar suporte às decisões forenses.

ABSTRACT

One of those activities that deserves public security institutions attention are the technical-scientific police activities, whose application is make clear facts that concerns the justice, do scientific procedures in order to provide materiality to an occurred illicit, providing the phenomenon’s dynamic, authorship, elaborating technical proofs, considering that being scientific is harder to be objected and heads secure and just forensics decisions.

Traffic accidents represent one of the many conflicts that end up for mediation in court. The number of vehicles in Brazil increases on a daily basis, as a result of both improved economic conditions and the developing status of the country. Thereafter, the number of traffic collisions also rises, as well as the number of victims – casualties or severely or slightly injured people; such accidents cause conflicts between the involved parties. Different modes of said conflicts or disagreements are also experiencing an increase. The aforementioned traffic accidents, for instance, occasionally generate lawsuits, which are settled by Forensic Justice offices. One may assume that the most common cause for such accidents is driving at inappropriate speeds. In order to properly charge drivers with such unlawful acts, prosecutors must resort to reliable reports, which comprise the lawsuit. The analysis of the collision circumstances has a pivotal role during the preparation process of a technical report in order to clarify the accident and to properly support the forensic decisions made.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01 – Colisão lateral de veículos

Figura 02 – Colisão transversal de veículos

Figura 03 – Colisão traseira de veículos

Figura 04 – Colisão frontal de veículos

Figura 05 – Choque de veículos

Figura 06 – Tombamento de veículos

Figura 07 – Capotamento de veículos

Figura 08 – Atropelamento

Figura 09 – Uma força **F** atuando

Figura 10 – Atrito entre duas superfícies

Figura 11 – Componentes tangencial e normal da aceleração

Figura 12 – Componentes tangencial e normal da força

Figura 13 – Raio e curvatura e cálculo

Figura 14 – Veículo em processo de frenagem

Figura 15 – Marcas de frações de frenagem de veículo

Figura 16 – Frenagem em declive

Figura 17 – Frenagem em aclive

Figura 18 – Veículos em colisão unidimensional

Figura 19 – Esquematização de colisão bidimensional de veículo

Figura 20 – Diagrama de um veículo em curva plana

Figura 21 – Diagrama das forças atuando em veículo numa curva inclinada

Figura 22 - Veículo em velocidade crítica de tombamento ou capotamento

Figura 23 – Influência da carga no centro de massa

Figura 24 – Veículo em choque cêntrico traseiro que terminam unidos

Figura 25 – Veículo em choque cêntrico traseiro que terminam separados

Figura 26 – Colisão perpendicular entre dois veículos em movimento

Figura 27 – Choque em obstáculo rígido móvel

Figura 28 – Choque em obstáculo rígido móvel

SUMÁRIO

	Resumo	03
	Introdução	09
Cap 1	O trânsito no Brasil	12
1.1	Malha viária no Estado de Minas Gerais	12
1.2	Malha viária de responsabilidade da 9ª Cia Rodoviária	12
1.3	Frota de veículos no Brasil por região	13
1.4	Frota de veículos novos emplacados por região	13
1.5	Acidentes de trânsito registrados pela 9ª Cia PM Ind MAT	13
1.5.1	Acidentes quanto ao número de envolvidos	14
1.5.2	Número de acidentes ocorridos e veículos envolvidos	14
1.5.3	Perícia criminal em acidentes de trânsito	14
Cap 2	Aspectos jurídicos	15
2.1	Código de Trânsito Brasileiro	15
2.1.1	Trânsito	15
2.1.2	Dos limites de velocidade	15
2.1.3	Vias e normas de circulação	16
2.2	Decisão judicial	16
2.3	Da culpabilidade	16
2.4	Acidentes de trânsito	17
2.5	Tipologias dos acidentes	17
2.5.1	Colisão	17
2.5.1.1	Colisão lateral	17
2.5.1.2	Colisão transversal	18
2.5.1.3	Colisão traseira	18
2.5.1.4	Colisão frontal	18
2.5.2	Choque	18
2.5.3	Tombamento	19
2.5.4	Capotamento	19
2.5.5	Atropelamento	19
2.6	Responsabilidade penal nos crimes de trânsito	19
2.7	Responsabilidade civil em acidentes de trânsito	20
2.8	Da produção de provas	20

2.9	Do laudo técnico pericial	21
2.10	Etilômetro	21
2.11	Tacógrafo	22
2.12	Acidentes de trânsito - classificação	22
2.12.1	Acidente somente com danos materiais	22
2.12.2	Acidentes com vítimas	23
2.12.2.1	Acidentes com vítimas com lesões leves	23
2.12.2.2	Acidentes com vítimas com lesões graves ou gravíssimas	23
2.12.2.3	Acidentes com vítimas fatais	23
2.13	Ações civil, penal e administrativa	23
2.13.1	Ação administrativa	23
2.13.2	Ação cível	23
2.13.3	Ação penal	24
2.14	A velocidade como causa de acidentes	24
2.15	Causas determinantes	24
Cap 3	Definições e conceitos físicos aplicados	25
3.1	Conceito Newtoniano de força	25
3.2	Equilíbrio de uma partícula	25
3.3	As leis de Newton	25
3.3.1	Primeira lei de Newton (e Galileu) – lei da inércia	25
3.3.2	Segunda lei de Newton	26
3.3.3	Terceira lei de Newton	26
3.4	Massa	27
3.5	Força peso	27
3.6	Atrito	27
3.6.1	Atrito estático	28
3.6.2	Atrito cinético	28
3.6.3	Atrito lateral e longitudinal	29
3.6.4	Coeficiente de atrito médio	30
3.7	Trajetórias curvilíneas	30
3.7.1	Característica da aceleração no movimento curvilíneo	31
3.7.2	Força centrípeta	31
3.7.3	Cálculo do raio de curvatura	33

3.8	Ponto de impacto (ponto de colisão)	33
3.9	Adjacências do ponto de impacto	34
3.10	Frenagem e marcas pneumáticas	34
3.12	Velocidade: Cálculo pelas marcas de frenagem	34
3.12.1	Velocidade de frenagens em declives	37
3.12.2	Velocidade de frenagens em aclives	38
3.13	Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento	39
3.13.1	Colisões	39
3.13.2	Impulso (J) e momento linear	39
3.13.3	Conservação do momento linear durante as colisões	39
3.13.4	Classificação das colisões	40
3.13.4.1	Colisão elástica	40
3.13.4.2	Colisão inelástica	40
3.13.5	Colisão em uma dimensão: colisões elásticas e inelásticas	40
3.14	Colisão em duas dimensões	42
Cap 4	Dinâmica dos acidentes de trânsito	45
4.1	Velocidade de danos	45
4.2	Acidentes em curvas	46
4.2.1	Veículo executando uma curva plana horizontal	47
4.2.2	Veículo executando uma curva inclinada	48
4.2.3	Velocidade crítica de tombamento/capotamento em curva plana	49
4.2.3.1	Influência da carga	53
4.2.3.2	Sinalização indicativa de velocidade em curva	54
4.3	Choque cêntrico da dianteira de um veículo na traseira de outro	55
4.4	Choque cêntrico de um veículo na traseira do outro na qual os veículos se imobilizam distanciados um do outro.	56
4.5	Colisão perpendicular entre dois veículos	57
4.6	Choque de veículo em objeto rígido móvel.	63
5.	Conclusão	65
6.	Referências bibliográficas	66

INTRODUÇÃO

"O Homem como cientista é amoral. Só é moral como homem, não se preocupa se o que descobre será usado para o bem ou para o mal. Como toda descoberta científica dá mais poderes sobre a natureza, ela pode aumentar o bem ou o mal"

César Lattes – Físico brasileiro

No universo jurídico, os operadores e aplicadores do direito, sejam eles Juízes, Promotores, Policiais, Desembargadores, Advogados, amparam-se firmemente em laudos técnicos científicos para dar amplo suporte em suas decisões dentro do princípio da justiça. Estabeleceu-se um elo entre ciências jurídicas e o corpo de perícias, que são profissionais com conhecimentos técnico científico em diversas áreas como medicina, física, química, biologia, computação, engenharia, ciências contábeis, bioquímica, genética, enfim, diversas áreas da ciência cuja função é esclarecer fatos de interesse da justiça. Um dos ramos de suporte da justiça é a física forense, na qual o profissional contribuirá através de observação, análise e interpretação dos fenômenos, utilizando-se dos conceitos físicos, formalizando detalhes técnicos que para o Poder Judiciário servirão de provas contundentes nas decisões processuais. Uma das situações cotidianas em que a física forense é muito aplicada corresponde aos acidentes de trânsito, em que o profissional com conhecimento específico, no local, definirá as condições em que o fato ocorreu. Entender a dinâmica do acidente significa definir como e por que ele ocorreu estabelecendo a causa determinante, para que os operadores do direito tenham o elemento ou fator causador do acidente. Geralmente, acidentes de trânsito podem não ser tratados como fato isolado. Devem abranger todos os fatores intervenientes. Para se chegar à causa determinante do acidente, o percurso é pelo método científico. O laudo emitido por profissional competente deve ser coerente e estar em consonância com a lógica formal, tem que ter consistência, com argumentos sólidos, ser objetivo, emitindo a verdade com clareza. Para o entendimento da dinâmica de um acidente, a mecânica Newtoniana construída sob as leis de Newton é uma ferramenta imprescindível na reconstituição do fenômeno.

CAPÍTULO I

O TRÂNSITO NO BRASIL

O Brasil passa por uma transformação econômica no qual o acesso aos bens de consumo tem sido uma realidade para todas as camadas sociais. Dentre esses bens, os veículos tem sido um dos itens mais adquiridos, aumentando consideravelmente a frota em circulação do país, fato confirmado, segundo dados estatísticos do DENATRAN (www.**denatran**.gov.br). A frota de veículos em circulação no país tem números expressivos, pois a política do governo é de incentivo ao consumo facilitando a aquisição desse bem e mantendo metas de vendas por parte das indústrias automobilísticas, sendo este um dos propulsores da economia do país. O avanço da tecnologia tem garantido veículos cada vez mais confortáveis e mais velozes. Mais pessoas dirigindo, aumentam os acidentes de trânsito envolvendo veículos automotores, que colocam o Brasil entre os primeiros no ranking mundial, inclusive em números de vítimas.

Sem entrar no mérito da questão, as indústrias investem em novas tecnologias visando desenvolver veículos mais seguros. No entanto, falta maturidade e consciência aos condutores. Um longo caminho ainda precisa ser percorrido em termos de educação para o trânsito para as pessoas atingirem um amadurecimento e internalizarem que trânsito é coisa séria e que acidentes ocorrem, tendo como causas, próximo da totalidade, a imprudência, negligência e imperícia dos condutores. As vias destinadas a circulação veicular não comportam a explosão do consumo e nem mesmo os avanços tecnológicos das indústrias automobilísticas. O Brasil enfrenta um atraso logístico em infraestrutura em termos de rodovias, ferrovias, hidrovias e aerovias. Por razões históricas e políticas, priorizou-se o transporte em rodovias subutilizando as ferrovias e hidrovias e, como consequência do grande número de veículos em circulação, as cidades que não foram planejadas para suportar o tráfego que hoje existe, já enfrentam graves problemas de congestionamentos. As rodovias, a maioria de pistas simples, e construídas na década de sessenta e setenta, muitas vezes possuem traçados de engenharia que são ultrapassados para os dias atuais, além da notória falta de manutenção.

Os acidentes ocorrem e os números são preocupantes. Quando acontecem podem ter como resultados apenas danos materiais ou danos materiais e vítimas. Em tendo vítimas, estas podem ser com lesões leves, graves ou fatais. De qualquer maneira, ocorrendo o acidente, haverá relações interpessoais, relações estas conflitantes, pois os veículos são conduzidos por pessoas. Essas relações, na grande maioria, acabam em litígio na justiça pelo fato de que os condutores envolvidos, no calor da emoção e sem conhecimentos técnicos, julgam estarem corretos. Na fase processual, um dos fatores que dificultam uma decisão final por parte do Poder Judiciário ou do Ministério Público corresponde a falta de um laudo conclusivo elaborado por um profissional competente, com conhecimento na área, apontando detalhes técnicos de como ocorreu o acidente. Mas afinal se um acidente de trânsito acorre de quem é a culpa? Um motorista que ingere bebida alcoólica e se envolve em acidente, pode ser considerado culpado apenas por ter bebido? O excesso de velocidade por si só é causa de culpabilidade? Laudo pericial indireto, aquele que é confeccionado por quem não esteve no local do acidente, é confiável? Como decidir um procedimento processual se não consta laudo descrevendo a dinâmica do acidente?

A fim de contribuir com o presente estudo, foi delimitado, geograficamente, uma área de atuação da Polícia Militar Rodoviária, na qual realizou-se uma pesquisa em uma amostra de rodovias selecionadas do Estado de Minas Gerais, mais precisamente na região norte do Triângulo Mineiro, quanto ao número de acidentes de trânsito ocorridos nos anos de 2012 e 2013 e em quais situações houve confecção do competente laudo técnico por profissional habilitado, detalhando sobre o acidente de tráfego ocorrido. Diante desta situação, definiu-se como tema do trabalho, **“A mecânica newtoniana aplicada aos eventos dos acidentes de trânsito rodoviários – um suporte para decisões forenses”.** Quanto à metodologia aplicada, trata-se de uma pesquisa descritiva documental que se utilizou de obras que correlacionam teorias do direito no contexto do estado democrático, dos fundamentos da física, levantamentos de dados junto ao sistema de registro informatizado de ocorrências da Polícia Militar. O trânsito de veículos requer constante acompanhamento e evolução das técnicas em sua administração objetivando neutralizar os fenômenos incidentes ou determinantes dos acidentes.

1.1 Malha viária do Estado de Minas Gerais

Minas Gerais é o Estado que possui a maior malha viária do pais sendo assim dividida:

MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS	
FEDERAL	ESTADUAL
8.965 km	26.992 km

Fonte: DER/MG:WWW.der.mg.gov.br

1.2 Malha viária sob-responsabilidade da Nona Companhia de Polícia Militar de Meio Ambiente e Trânsito Rodoviário – 9ª Cia PM Ind MAT

1.082 quilômetros de rodovias nos municípios de Uberlândia, Prata, Ituiutaba, Santa Vitória, Araguari, Canápolis, Capinópolis, Indianópolis, Araporã, Gurinhatã, Cachoeira Dourada, Centralina, Estrela do Sul, Cascalho Rico e Monte Alegre de Minas, rodovias estas sob a responsabilidade administrativa do Departamento de Estrada e Rodagem do Estado de Minas Gerais – DER e Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transporte – DNIT, sendo o policiamento rodoviário a cargo da Nona Companhia de Meio Ambiente e Trânsito Rodoviário com sede em Uberlândia.

1.3 Frota de veículos no Brasil por região

Dados até Abril/2014 (segundo o DENATRAN)

TIPO / REGIÃO	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS / CAMINHÕES	TRATORES / OUTROS	MOTOCICLETAS	TOTAL
NORTE	1.824.556	287.563	438	1.936.807	**4.049.364**
NORDESTE	6.787.651	841.002	1.621	5.862.851	**13.493.125**
SUDESTE	30.063.394	2.635.841	17.804	8.586.796	**41.303.835**
SUL	11.810.633	1.461.485	17.675	3.444.239	**16.734.032**
C. OESTE	4.737.804	666.197	1.739	2.262.558	**7.668.298**
T O T A L	**55.224.038**	**5.892.088**	**39.277**	**22.093.251**	**83.248.654**

Por questões práticas e meramente didáticas, os diversos tipos de veículos, classificados de acordo com o CTB, foram agrupados em cinco grupos, sendo:

a) Automóveis (Agrupados os Carros de passeio, caminhoneta, camioneta e utilitários)
b) Ônibus e caminhões (Agrupados os ônibus, caminhão, caminhão trator, chassi plataforma, micro-ônibus, reboque, semi-reboque)
c) Tratores (Agrupados os tratores, tratores rodas, bondes e outros tipos)
d) Motocicletas (agrupados os ciclomotores, motocicletas, motonetas, quadriciclos, sidecar, triciclo)

Fonte: DENATRAN: http://www.denatran.gov.br/consultas_online.htm (frota de veículos por tipo, e com placa, segundo as grandes regiões

1.4 FROTA DE VEÍCULOS NOVOS EMPLACADOS POR REGIÃO

TRI / REGIÃO	Antes de 2009	2009	2010	2011	2012	2013	2014 (Abri)	TOTAL
Norte	2.232.034	302.634	345.933	399.541	358.318	358.850	52.054	4.049.364
Nordeste	7.570.939	982.453	1.169.714	1.308.680	1.167.120	1.130.992	163.227	13.493.125
Sudeste	29.018.370	2.137.685	2.444.400	2.688.469	2.354.314	2.306.747	353.850	41.303.835
Sul	11.940.651	828.280	920.131	1.017.262	935.096	952.951	139.661	16.734.032
C. Oeste	4.869.399	479.700	546.852	595.446	541.956	546.888	88.057	7.668.298
TOTAL	55.631.393	4.730.752	5.427.030	6.009.398	5.356.804	5.296.428	796.849	83.248.654

Fonte: Ministério das Cidades, Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN, Sistema Nacional de Registro de Veículos / RENAVAN http://www.denatran.gov.br/consultas_online.htm

1.5 Acidentes de trânsito registrados pela 9ª Companhia de Meio Ambiente e Trânsito Rodoviário nas rodovias sob sua jurisdição.

1.5.1. Quanto ao número de pessoas envolvidas

Ano	Mês	QUANTO AO NÚMERO DE PESSOAS ENVOLVIDAS						TOTAL
		vítimas fatais	Lesões Ignoradas	lesões graves	lesões leves	Outras lesões	Sem lesões aparentes	
2012	Jan	02	00	18	31	00	82	133
	Fev	02	00	34	142	00	131	309
	Mar	07	01	21	72	00	148	249
	Abr	10	01	29	66	00	96	202
	Mai	12	00	27	81	00	97	217
	Jun	08	01	23	113	01	181	327
	Jul	06	04	24	99	02	163	298
	Ago	11	02	14	74	04	168	273
	Set	12	00	28	110	03	124	277
	Out	09	01	31	63	00	134	238
	Nov	00	00	31	82	00	133	246
	Dez	30	00	75	160	02	151	418
2012 – TOTAL		**109**	**10**	**355**	**1093**	**12**	**1608**	**3187**
2013	Jan	13	00	18	418	00	127	576
	Fev	10	00	19	96	00	133	258
	Mar	05	00	23	145	00	121	294
	Abr	00	01	13	97	19	98	228
	Mai	11	00	28	84	00	128	251
	Jun	09	02	71	108	00	116	306
	Jul	12	07	12	89	04	124	248
	Ago	04	00	21	85	00	122	232
	Set	03	03	43	68	00	98	215
	Out	03	00	31	72	02	97	205
	Nov	05	00	23	72	00	109	209
	Dez	05	00	19	151	01	103	279
2013 – TOTAL		**80**	**13**	**321**	**1485**	**26**	**1376**	**3301**
TOTAL GERAL 2012 + 2013		**189**	**23**	**676**	**2578**	**38**	**2984**	**6488**

1.5.2 Números de acidentes ocorridos (Ocorrências) e quantidade de veículos envolvidos

Ano	Mês	Acidentes Trânsito rodoviários ocorridos			Quantidades de veículos envolvidos nos acidentes		
		Com vítimas	Sem Vítimas	Total	Com vítimas	Sem Vítimas	Total
2012	Jan	20	23	43	23	33	56
	Fev	32	24	56	49	38	87
	Mar	32	38	70	42	54	96
	Abr	40	30	70	51	34	85
	Mai	38	32	70	46	47	93
	Jun	38	38	76	58	56	114
	Jul	44	51	95	64	72	136
	Ago	38	63	101	52	88	140
	Set	43	27	70	63	42	105
	Out	38	39	77	52	51	103
	Nov	38	28	66	53	42	95
	Dez	39	38	77	57	61	118
2012 – TOTAL		**440**	**431**	**871**	**610**	**618**	**1128**
2013	Jan	30	39	69	50	54	104
	Fev	32	34	66	48	49	97
	Mar	28	39	67	41	56	97
	Abr	30	23	53	40	36	76
	Mai	27	36	63	39	51	90
	Jun	36	35	71	54	45	99
	Jul	37	31	68	52	46	98
	Ago	35	28	63	49	43	92
	Set	35	34	69	42	45	87
	Out	30	30	60	40	43	83
	Nov	21	31	52	28	45	73
	Dez	32	31	63	42	50	92
2013 – TOTAL		**373**	**391**	**764**	**525**	**563**	**1088**
TOTAL GERAL 2012 + 2013		**813**	**822**	**1635**	**1135**	**1181**	**2316**

Fonte: Centro de Informação de Defesa Social da Polícia Militar de Minas Gerais – CINDS e Assessoria de Planejamento Operacional / Nona Companhia de Polícia Militar de Meio Ambiente e Trânsito Rodoviário – 9ª Cia PM Ind MAT / Uberlândia/MG

1.5.3 Perícia oficial em acidentes de trânsito.

O Código de Trânsito Brasileiro não faz menção direta à atuação de peritos oficiais em caso de acidentes de trânsito, porém no artigo 279 cita sua incumbência nos casos dos acidentes com vítimas. Nos acidentes ocorridos na região pesquisada, os peritos só comparecem em casos de vítimas fatais, mesmo assim não em sua totalidade. O agente de trânsito quando registra boletim de ocorrência sobre acidente de tráfego, descreve o fato ocorrido segundo as versões dos condutores, das testemunhas se houver e como encontrou o local do acidente e suas ações sem, no entanto, tomar posição ou emitir opinião particular. A falta de

laudo dificulta ações de decisões em procedimentos nas instâncias cível, criminal e administrativa.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS JURÍDICOS

2.1 Código de Trânsito Brasileiro - CTB (Lei 9.503/97)

As regras que disciplinam o trânsito nas vias do território nacional regem-se pela lei 9.503 de 23 de setembro de 1997 que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro.

2.1.1 Trânsito

Considera-se trânsito a utilização das vias por pessoas, veículos, animais, isolados ou em grupos, conduzidos ou não, para fins de circulação, parada, estacionamento e operação de carga e descarga (art. 1º do CTB).

2.1.2 Dos limites de velocidade

Diz o artigo 61 do CTB: "*A velocidade máxima permitida para a via será indicada por meio de sinalização, obedecida as suas características técnicas e as condições do trânsito. Onde não existir sinalização regulamentadora, a velocidade máxima será de:*

i. Nas vias urbanas:

a) oitenta quilômetros por hora, nas vias de trânsito rápido

b) setenta quilômetros por hora, nas vias arteriais

c) quarenta quilômetros por hora, nas vias coletoras

d) trinta quilômetros por hora, nas vias locais

ii. Nas vias rurais

a) Nas rodovias (vias rurais pavimentadas) serão de cento e dez quilômetros por hora para automóveis, camionetas e motocicletas, de noventa quilômetros

por hora para ônibus e micro-ônibus e oitenta quilômetros por hora para os demais veículos.

b) Nas estradas (vias rurais não pavimentadas) de sessenta quilômetros por hora"

2.1.3 Vias e normas de circulação

O CTB juntamente com outras normas de trânsito define ainda conceitos de vias terrestres, faixas de trânsito, normas de segurança na circulação, regras a ser seguidas por pedestres e condutores responsabilidades pela segurança

2.2 Decisão judicial

O mecanismo da decisão judicial não é tarefa fácil. É uma atividade das mais complexas. A autoridade que julga cumpre um dever de estado. A decisão judicial existe justamente onde resta o conflito. Na legislação brasileira uma decisão judicial precisa ser racional e consistente, estar amparada em devido processo legal, dentro de uma regra para sua justificação. A justificação é um princípio metodológico que busca ampliar a racionalidade. A teoria da decisão opera com a colaboração de investigações provenientes de diversas disciplinas, pois as provas que compõe um processo ou procedimento devem ser robustas a fim de subsidiar um raciocínio lógico na compreensão das causas e dar suporte aos magistrados que precisam estar convictos nas suas decisões finais, imputando as devidas e justas sanções de acordo com o ordenamento jurídico. O artigo 155 do Código de Processo Penal diz que o juiz formará sua convicção pela livre apreciação da prova produzida em contraditório judicial, não podendo fundamentar sua decisão exclusivamente nos elementos informativos colhidos nas investigações. Como se pode ver, a justiça para embasar suas decisões precisa estar amparada em provas robustas, laudos e documentos periciais. A decisão precisar ser convicta e segura nos elementos probatórios.

2.3 Da culpabilidade

A Teoria da Culpabilidade é de extrema importância na teoria geral do direito. A culpabilidade é a atribuição que se faz a alguém da responsabilidade de alguma coisa de juízo reprovável, é o conjunto de condições pessoais que dão ao agente

capacidade para lhe ser juridicamente imputada a prática de ato punível por dolo ou culpa. Tanto no aspecto penal como no aspecto civil, a culpabilidade é a primeira circunstância a ser aferida pelo juiz para exercer sua função medidora de uma sanção sobre a conduta praticada pelo agente. O Juiz só decide com base nos elementos existentes no processo, mas os avalia segundo critérios técnicos e racionais.

2.4 Acidentes de trânsito

É qualquer acontecimento inesperado, casual, fortuito, por ação ou omissão, imperícia, imprudência, negligência, caso fortuito ou força maior, e foge ao curso normal, do qual advêm danos à pessoa e/ou patrimônio. É um acontecimento involuntário, inevitável e imprevisível, ou inevitável, mas previsível, ou seja, imprevisível, mas evitável, do qual participa pelo menos um veículo em movimento, pedestres e obstáculos fixos, isoladamente ou em conjunto, ocorrido em via terrestre, e resultando danos ao patrimônio, lesões físicas ou morte (Aragão 2009).

2.5 Tipologias dos acidentes

Existem diversas formas de unidades veiculares que se acidentam nas vias, no entanto com certa regularidade quanto à maneira do acontecimento. A classificação dos tipos de acidente segue a NBR 10.697 de junho de 1.980 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, conforme a seguir:

2.5.1 Colisão

Acidente em que há impacto entre veículos em movimento, podendo ser dividida em:

2.5.1.1 Colisão lateral

Impacto lateral entre veículos que transitam na mesma via, podendo ser no mesmo sentido ou em sentido opostos.

Figura 01: Colisão lateral
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.1.2 Colisão transversal

Impacto entre veículos que transitam em direções ortogonais ou obliquamente (frente de um e lateral de outro)

Figura 02: Colisão transversal
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.1.3 Colisão traseira

Impacto de veículos que trafegam no mesmo sentido na mesma via, tendo um dos veículos atingindo de frente a parte traseira do outro veículo.

Figura 03: Colisão traseira
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.1.4 Colisão frontal

Impacto entre veículos que transitam na mesma via, em sentidos opostos.

Figura 04: Colisão frontal
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.2 Choque

Impacto de um veículo em movimento contra qualquer obstáculo fixo (postes, árvores, muros ou até outro veículo que esteja parado ou estacionado)

Figura 05: Choque
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.3 Tombamento

Acidente em que um dos veículos tomba sobre uma de suas laterais imobilizando-se

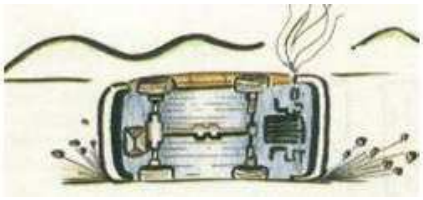


Figura 06: Tombamento
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.4 Capotamento

Acidente em que o veículo gira em torno de si mesmo, em qualquer sentido, chegando a ficar com as rodas para cima, mesmo que momentaneamente, se imobilizando em qualquer posição.

Figura 07: Capotamento
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.5.5 Atropelamento

Acidentes em que pedestres ou animais impactam ou sofrem impactos de veículo motorizada estando pelo menos uma das partes em movimento.

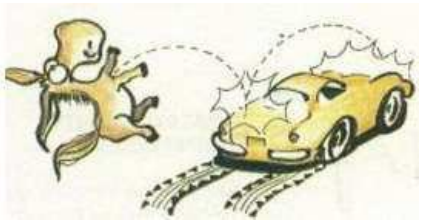


Figura 08: Atropelamento
Imagem retirada da internet
http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp

2.6 A responsabilidade penal nos crimes de trânsito

São condutas humanas provocadas por ação ou omissão que se amoldam perfeitamente aos tipos previstos no Código de Trânsito Brasileiro. Na esfera penal somente responde o sujeito que tiver causado o resultado com dolo ou culpa. São

previstos diversos crimes como homicídio, lesão corporal, omissão de socorro, participar de disputas automobilísticas não autorizadas, conduzir veículo com a capacidade psicomotora alterada em razão da influência do uso de álcool ou de outra substância psicoativa que determine a dependência, violação da suspensão ou do direito de dirigir, gerar perigo de dano na direção, e outros previstos na legislação em vigor.

2.7 A responsabilidade civil em acidentes de trânsito – Natureza Jurídica

Responsabilidade civil significa a obrigação de alguém assumir as consequências jurídicas de sua atividade. No trânsito, alguns valores estão em jogo como a vida, a integridade material, física e moral, estética do acidentado, a produtividade, a capacidade laboral das pessoas envolvidas. Se o acidente de trânsito decorre de um ato ilícito, como consequência tem que haver uma sanção que visa a restaurar ao lesado o seu patrimônio ou compensar danos morais sofridos, ter reparado alguma perda através de indenizações. A base fundamental para a extração dos elementos necessários à responsabilidade está no artigo 186 do Código Civil onde são avaliado a conduta humana, o nexo de causalidade e o dano ou prejuízo. O artigo 927 do Código Civil diz que aquele que causar dano a outrem fica obrigado a repará-lo (teoria da culpa subjetiva). Logo, os acidentes de trânsito podem ter repercussão na esfera criminal, na esfera civil ou em ambas as esferas. Elas são independentes.

2.8 Da produção de provas

Dispõe o artigo 212 do Código Civil Brasileiro

"artigo 212: Salvo o negócio a que se impõe forma especial o fato jurídico pode ser provado mediante:

I – confissão

II – documento

III – testemunhas

IV – presunção

V – perícia"

Quanto maior o número de acidentes de trânsito, maior serão os números de ações na justiça. Quando ocorre, vários são os atores envolvidos a exemplo, os condutores dos veículos, a Polícia que lavra a ocorrência, Bombeiros em caso de socorro a vítimas, Delegado que lavra o Inquérito, Peritos, Advogados, Promotores, Juízes Testemunhas, etc. Mas quem primeiramente chega a um acidente é o policial que toma as primeiras providências no local e narra o ocorrido em Boletim de Ocorrência Policial e envia para os órgãos competentes sendo via de regra a à Polícia Civil que inicia o Inquérito.

2.9 Do laudo técnico pericial

Um dos pontos fundamentais nas ações judiciais de acidentes de trânsito é definir a dinâmica do fato ocorrido e quem deu causa. Nesse mister o laudo pericial é imprescindível, pois pode dirimir dúvidas, definir culpados, inocentes, enfim, auxiliar no trâmite do inquérito e agilizar as decisões a serem tomadas no âmbito forense. O código de processo civil denomina prova pericial o exame e a vistoria. Exame é apreciação de alguma coisa por peritos para auxiliar o juiz a formar sua convicção. Vistoria é também perícia, restrita, porém a inspeção ocular. Reza ainda o artigo 159 do Código de Processo Penal, que na falta de perito oficial, o exame será realizado por duas pessoas idôneas portadores de diploma de curso superior preferencialmente na área específica.

Em caso de infração penal, a autoridade policial deverá dirigir-se ao local, sendo que, se houver vestígios, será indispensável o exame de corpo de delito, não podendo suprir a confissão do acusado.

Já em acidentes em que há apenas danos materiais não há previsão de laudos periciais. Mesmo em acidentes com lesões corporais leves e graves não há o comparecimento de peritos para avaliar os locais de acidentes e lavrar os competentes laudos. Esse fato representa uma grande falha do sistema, pois avaliar o grau de uma lesão não é tarefa fácil.

2.10 Etilômetro

Aparelho que serve para medir a concentração alcoólica em uma pessoa. Atualmente não há a obrigatoriedade do condutor em se submeter a um teste de

alcoolemia quando solicitado pelo agente de trânsito. No entanto, somente o exame como prova, é questionável. Então em um eventual acidente de trânsito ocorrido em que apenas um dos condutores esteja com um nível de teor alcoólico acima do permitido por lei, é suficiente para considerá-lo culpado?

2.11 Tacógrafo

É um registrador instantâneo e inalterável de velocidade e tempo provido de disco diagrama sendo obrigatório somente em veículos de transportes escolares, de transportes de acima de dez passageiros, de cargas perigosas e nos veículos de carga com algumas restrições de acordo com as resoluções do CONTRAN. Então, não são todos os veículos obrigados a utilizar o tacógrafo, além do que, embora proibido, está sujeito a adulteração. Mas podemos questionar se em um eventual acidente de tráfego e que o tacógrafo indique uma velocidade acima do permitido para aquele trecho da via, é suficiente para considerar o condutor culpado? É comum os agentes e autoridades de trânsito, em entrevistas aos meios de comunicação indicar o excesso de velocidade registrado nos tacógrafos ou o uso de bebidas alcoólicas como sendo causas em eventual acidentes. Seguramente vamos mostrar que por si só, nem sempre esses indícios são suficientes para imputar a culpa ao condutor que estava com velocidade acima do permitido ou ao condutor que ingeriu bebida antes de fazer uso da direção.

Os conhecimentos físicos aplicados em conhecer a dinâmica dos acidentes de trânsitos são de relevância, devendo fazer parte da física forense que tem como objetivo somar aos conjuntos probatórios de dados técnicos os quais vão dar suporte para decisões justas por partes dos magistrados.

2.12 Acidentes de trânsito - classificação:

2.12.1 Acidente somente com danos materiais: Nesse tipo de acidente, como o próprio nome especifica, não há vítimas com lesões. Pode ser entre veículos ou entre veículo e um obstáculo (postes, muros, saídas de pista etc). Se não houver um acordo nesse tipo de acidente, a demanda pode ter que ser decidida na justiça pelo condutor que se achar prejudicado por eventual erro do outro condutor, pela sinalização inadequada etc.

2.12.2 Acidentes com vítimas: Quando os acidentes resultam em vítimas. Classificamos os acidentes com vítimas de acordo com as lesões sofridas:

2.12.2.1 Acidentes em que há vítimas com lesões leves: De acordo com o Código Penal em seu artigo 129, as lesões leves são estabelecidas por exclusão, uma vez que o citado artigo trata apenas dos agravantes. Em geral são equimoses, escoriações ou feridas.

2.12.2.2 Acidentes em que há vítimas com lesões graves ou gravíssimas

São os acidentes que resultem em I – Incapacidade para as ocupações habituais por mais de trinta dias, II – perigo de vida (como feridas penetrantes no tórax, hemorragias abundantes, fraturas no crânio e coluna), III – debilidade permanente de membro sentido ou função, IV – aceleração de parto, V – Incapacidade permanente para o trabalho, VI – Perda ou inutilização de membro sentido ou função, VII – deformidade permanente, VIII – aborto

2.12.2.3 Acidentes com vítima fatal: aquele em que ocorre a morte de pessoas.

2.13 Ações civil, penal e administrativa

O arcabouço jurídico brasileiro é bem objetivo e dependendo da natureza do acidente de trânsito pode desencadear as seguintes ações:

2.13.1 Ação administrativa

Sanções previstas no Código de Trânsito Brasileiro – CTB. As infrações administrativas e as penalidades estão previstas nos artigos 161 ao 268.

2.13.2 Ação cível

Ação cujo objetivo é minimizar eventuais danos causados. Obriga o responsável a indenizar a parte prejudicada, estando presente nessa esfera, motoristas, setores da indústria automobilísticos, empregadores, órgãos responsáveis pelas vias, seguradoras, etc. Enfim, para comprovar a culpa basta o nexo causal entre a pessoa (física ou jurídica) e o dano para então surgir a responsabilidade de indenizar. Via de regra, o valor da indenização é medido pela gravidade do dano efetivo

2.13.3 Ação penal

Trata de ação por crimes cometidos no trânsito. Além do Código Penal, no CTB os crimes de trânsito encontram-se tipificados nos artigos 291 ao 312.

2.14 A velocidade como causa de acidentes

A velocidade sob o aspecto físico pode ser analisada quantitativa e qualitativamente sob o aspecto de excessiva ou inadequada para determinado local. O objetivo do legislador em assuntos de trânsito, ao fixar limites de velocidades veiculares é a segurança do trânsito em todo momento. Geralmente a primeira opinião em um acidente é de que o excesso de velocidade seja a causa do evento. Outro fator que conduz a essa análise são os estados de deformações dos veículos colidentes. É errônea essa impressão sem antes estudar a dinâmica do evento. Atualmente os veículos são projetados para, mesmo em baixa energia, apresentarem grandes deformações, uma vez que quanto mais energia for absorvida pelos danos, menos energia sobrará para ser absorvida pelos ocupantes. O excesso de velocidade ou a velocidade inadequada será causa se esta for fator determinante para a ocorrência do evento.

2.15 – Causas determinantes

Uma das condições essenciais para se responsabilizar alguém é estabelecer o nexo de causalidade e o fato ilícito ocorrido. Nesse caso a conduta humana é o elemento primário de todo ato ocorrido. Conhecer a dinâmica do acidente, como ele ocorreu, para se estabelecer a causa determinante. Não é tarefa fácil. Muitos são os fatores envolvidos. Há causas de difícil comprovação pela ausência de vestígios como sonolências, perda de atenção, efeitos de remédios, stress, etc. Há os fatores relacionados ao meio, como falhas do sistema viário que levam o condutor ao erro, fatores ligados a falha mecânica imprevisível e o ser humano quanto ao seu comportamento. O acidente de trânsito é um fenômeno complexo e na teoria da causa para buscar-se a solução é necessário entender o fenômeno como um conjunto de fatores que contribuíram para o evento.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÕES E CONCEITOS FÍSICOS APLICADOS

Os conceitos físicos utilizados são ditados pelas leis da mecânica clássica que compreendem a cinemática, a estática e a dinâmica.

3.1 Conceito Newtoniano de força

Proposto por Isaac Newton, define-se força em termos da aceleração fornecida a um corpo de massa **m**. Se um corpo está submetido a uma aceleração **a** dizemos que existe uma força **F** (em newtons) atuante sobre esse corpo. É a resultante que mede a taxa $d\bar{P}/dt$

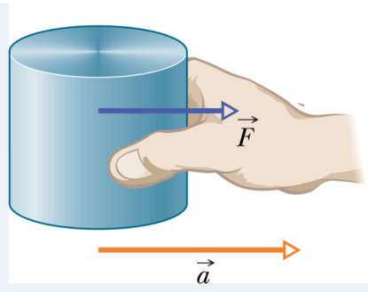


Figura 09: A força **F** atuando sobre um corpo causa uma aceleração **a** nesse corpo

(imagem Hallliday, Resnick e Walker – 4ª edição LTC)

3.2 Equilíbrio de uma partícula

Define-se o equilíbrio de uma partícula em termos de sua aceleração

$\bar{a} = \bar{a}_t + \bar{a}_n$ (se $\bar{a}_{tangencial} = 0$, v = constante e se $\bar{a}_{normal} = 0$, a direção não muda)

Se $\bar{\mathbf{a}} = 0$ implica que:

a) v = constante = 0 (repouso, em equilíbrio estático)

b) v = constante ≠ 0 (equilíbrio dinâmico)

3.3 As leis de Newton

As leis de Newton são a base da mecânica clássica que compreende a cinemática, a estática e dinâmica.

3.3.1 Primeira lei de Newton (e Galileu) – lei da inércia

A primeira lei de Newton carrega a definição de referencial inercial. Um corpo sobre o qual não atue força resultante alguma, se está em repouso permanece em repouso, ou se está em movimento com velocidade constante assim permanecerá

indefinidamente. Inércia é uma propriedade que possuem os corpos de conservarem seu estado de movimento ou repouso, ou seja, é uma resistência que os corpos oferecem às mudanças vetoriais de direção, sentido e intensidade de seu movimento.

3.3.2 Segunda lei de Newton

A velocidade de um corpo num instante qualquer independe das forças que no instante considerado estejam atuando sobre ele. Logo, a velocidade não é função de força, mas a aceleração, esta sim é função de força. A segunda lei de Newton também é referente a um referencial.

$\frac{\bar{F}_1}{\bar{a}_1} = \frac{\bar{F}_2}{\bar{a}_2} = \frac{\bar{F}_3}{\bar{a}_3} = \frac{\bar{F}_n}{\bar{a}_n}$ = constante $\frac{\bar{F}}{\bar{a}} = m$

$\bar{F} = m\bar{a} = \frac{d\bar{p}}{dt}$ (vetorial) = $\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \bar{F}_i$ (considerando que não há variação da massa com o tempo)

$\bar{F} = F_x\imath + F_y\jmath + F_z\hat{k}$ (componentes escalares)

$\bar{a} = a_x\imath + a_y\jmath + a_z\hat{k}$

$F_x\imath + F_y\jmath + F_z\hat{k} = ma_x\imath + ma_y\jmath + ma_z\hat{k}$ (forma escalar)

$F_x\imath = ma_x\imath$ $F_y\jmath = ma_y\jmath$ $F_z\hat{k} = ma_z\hat{k}$

3.3.3 Terceira lei de Newton

Sempre que uma partícula **A** exerce uma força numa partícula **B**, esta reage com uma outra força de mesmo módulo, mesma direção e sentido contrário.

$\bar{F}_{AB} = -\bar{F}_{AB}$ (ação e reação)

Para obedecer a terceira lei de Newton é necessário:

- Forças em corpos distintos.

- Mesmo módulo e direção e com sentidos contrários.

- Não se equilibram, pois atuam em corpos diferentes.

- São de mesma natureza (ou de campo ou de contato).

- A terceira lei não é função do referencial.

3.4 Massa

Massa é um axioma, mas está relacionada com a “resistência à translação”. É uma medida da resistência que o corpo oferece a uma mudança na sua velocidade de translação.

3.5 Força peso

Peso **P** de um corpo é a força que o atrai para o objeto astronômico mais próximo, no nosso caso a Terra. Peso é uma força e essa força é devido à atração gravitacional entre massas de dois corpos. Para corpos de massa **m**, localizado em um ponto sujeito a uma aceleração **g**, próximo à superfície da terra (referencial inercial), o módulo da força vale: $\mathbf{F = \bar{P} = m\bar{g}}$

3.6 Atrito

O atrito é uma força de fricção entre contatos de superfícies rugosas. Pode parecer um paradoxo, mas um veículo se movendo em uma via plana, se deixarmos somente a força de atrito atuar, o veículo certamente parará, mas também pode-se dizer que, quando uma aceleração é aplicada a esse veículo, o atrito é responsável pelo movimento. Atribui-se a existência do atrito à rugosidades nas superfícies.

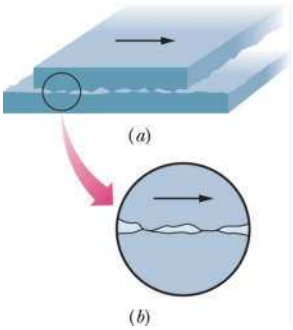


Figura 10: funcionamento do mecanismo de atrito de deslizamento. (a) numa visão macroscópica, a superfície superior está deslizando para a direita sobre a inferior. (b) dois pontos onde a fusão ocorre. É necessária uma força para romper as rugosidades e manter o movimento.

(imagem: Halliday & Resnick – Vol 01 8ª edição - LTC)

O coeficiente de atrito (μ) é uma variável importante no cálculo da velocidade dos veículos. É uma grandeza adimensional que mede a resistência de movimentação de um corpo sobre outro. É uma medida experimental e sempre feita entre duas superfícies de contato para informar a resistência ao movimento entre essas superfícies. É uma constante que define uma propriedade entre duas

superfícies, então o valor considerado é sempre um valor médio, logo, definir o tipo e as condições das superfícies é imprescindível na obtenção do valor correto do coeficiente de atrito.

Conforme cita Resnick, Halliday e Walker quanto ao coeficiente de atrito, seus valores dependem de muitas variáveis, como a natureza dos materiais, o acabamento da superfície, os filmes, a temperatura e a contaminação. O atrito pode ser estático ou cinético.

3.6.1 Atrito estático

$0 \leq f_{at} \leq \mu_e N$ (lei do atrito estático)

$f_{estático} = \mu_e N$ (somente na eminência do deslizamento)

3.6.2 Atrito cinético

$f_{cinético}$ **α** N

$\frac{f_c}{N}$ = constante = μ_c $f_C = \mu_c N$

Existe na literatura tabelas com valores máximos e mínimos para coeficientes de atrito comprovados em estudos que possuem compatibilidade entre si quanto aos valores médios, mas o exame em um local de acidente por parte do profissional responsável para diagnosticar as condições da superfície e escolha do coeficiente de atrito é de fundamental importância. Abaixo, transcrições de tabelas com coeficientes de atritos para aplicação.

coeficientes de atrito		
Superfície	μ – estático	μ – cinético
Madeira X madeira	0,25 – 0,5	0,20
Aço X aço – superfícies limpas	0,60	0,60
Aço X aço – superfícies lubrificadas	0,09	0,05
Borracha no concreto seco	1.00	0,80

Fonte: Resnick, Halliday e Krane – Física – LTC – 2003

VEÍCULOS DE PASSEIO			**CAMINHÕES**	
Superfície pneumática versus	μ – seco	μ – úmido	μ – seco	μ – úmido

Asfalto novo	0,85	0,60	0,60	0,42
Asfalto velho	0,70	0,55	0,49	0,39
Asfalto escorregadio	0,55	0,35	0,39	0,25
Concreto novo	0,85	0,55	0,60	0,39
Concreto velho	0,70	0,55	0,49	0,39
Pedra limpa	0,60	0,40	0,42	0,28
Pedregulho	0,65	0,65	0,46	0,46
Terra dura	0,65	0,70	0,46	0,49
Terra solta	0,50	0,55	0,35	0,39
Pavimento com areia sobre	0,45	0,30	0,32	0,21
Pavimento com barro sobre	0,45	0,30	0,32	0,21

Fonte: Victor A Irureta – Accidentologia vial Y Perícia – Ediciones La Rocca. 1996 (adaptado de Almeida 2011)

Superfície pneumática versus	Passeio	Caminhões
Concreto molhado e muito polido	--	0,25
Concreto seco	0,85	0,65
Concreto molhado	0,70	0,65
Asfalto seco	0,80	0,60
Asfalto molhado	0,50	0,30

Fonte: Traffic Institute – Universidade de Northwestern (adaptado de Almeida 2011)

3.6.3 Atrito lateral e longitudinal

Veículos em movimento, o atrito se desenvolve entre os pneumáticos e o pavimento, desconsiderando a resistência do ar. Na interação dos pneumáticos e pavimento, a força de atrito que atua, são de dois tipos: O atrito longitudinal que atua na partida, deslocamento e frenagem do veículo e o atrito lateral, que evita o deslocamento transversal e permite as mudanças de direção do veículo, possibilitando inclusive que o mesmo descreva a curva. Para efeitos práticos, o coeficiente de atrito longitudinal tem o mesmo valor do coeficiente de atrito lateral.

3.6.4 Coeficiente de atrito médio

As colisões, por sua diversidade e forma, podem apresentar diversas situações. Uma situação corresponde a de dois veículos que após a colisão passam a se deslocar acoplados formando um único corpo. Se os dois veículos de massas m_1 e m_2, sendo $m_1 \neq m_2$, se deslocam sobre uma mesma superfície com os coeficientes de atrito μ_1 e μ_2 diferentes por suas diversidade e formas. No trecho em que percorrem acoplados, os veículos formam um conjunto sujeito à mesma desaceleração. Logo a resultante da soma vetorial das forças de atrito corresponde:

$$f_R = f_{at1} + f_{at2}$$

$$(m_1 + m_2)a = \mu_1 N_1 + \mu_2 N_2$$

$$(m_1 + m_2)\mu_m g = \mu_1 m_1 g + \mu_2 m_2 g$$

$$\mu_m = \frac{\mu_1 m_1 + \mu_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

3.7 Trajetórias curvilíneas.

Os acidentes mais comuns em curvas são os tombamentos, capotamentos, as interações entre veículos, os deslizamentos ou derrapagens, onde o veículo atinge uma velocidade maior do que a velocidade crítica para o limite da curva. Nesse caso, o atrito lateral é superado pela força centrífuga e nesse caso o veículo desliza tangencialmente para o lado externo da curva, todavia sem rotacionar-se verticalmente, ou seja, tombar ou capotar. Há outras causas originadas por erros operacionais, tais como ultrapassagens indevidas ou a inflexão do veículo na contramão. O veículo que trafega na parte interna da curva pode simplesmente derrapar para a contramão em consequência da velocidade. Para veículos em movimentos e descrevendo trajetórias curvilíneas é necessário conhecer os componentes físicos que atuam sobre esses veículos para uma melhor compreensão quantitativa e qualitativa do evento ocorrido. A correta aplicação dos métodos científicos possibilita mensurar algumas variáveis do evento, facilitando a confecção de um relatório que pode subsidiar decisões por parte do poder judiciário. Classicamente, para os fins que se destina, o conhecimento necessário pode se restringir à dinâmica formulada por Isaac Newton, a saber:

3.7.1 Aceleração no movimento curvilíneo – Característica do vetor aceleração

Componentes tangencial e normal da aceleração

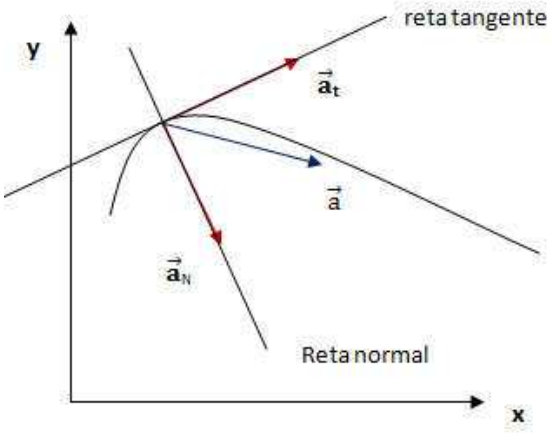


Figura 11: Detalhe das componentes normal e tangencial da aceleração
$\bar{a}_t$ (componente aceleração tangencial)
$\bar{a}_N$(componente aceleração normal)

$$\bar{a} = \bar{a}_t + \bar{a}_N = \frac{dv}{dt}\hat{u}_t + \frac{v^2}{R}\hat{u}_N$$

$\hat{u}_N$ = vetor unitário na direção normal

$\hat{u}_t$ = vetor unitário na direção tangente

Em cada ponto da trajetória há um raio de curvatura (**R**). Quando **R** for constante, a trajetória é circular. Não faz parte do nosso propósito, provar matematicamente que $\bar{a} = \bar{a}_t + \bar{a}_N = \frac{dv}{dt}\bar{u}_t + \frac{v^2}{R}\hat{u}_N$, mas sim explicar os significados físicos para aplicação na finalidade que se destina o presente estudo.

3.7.2 Força centrípeta

Nos movimentos de trajetória curvilínea de um móvel, haverá sempre a aceleração centrípeta normal à trajetória do móvel, apontando para o centro da curva. Na dinâmica do movimento curvilíneo:

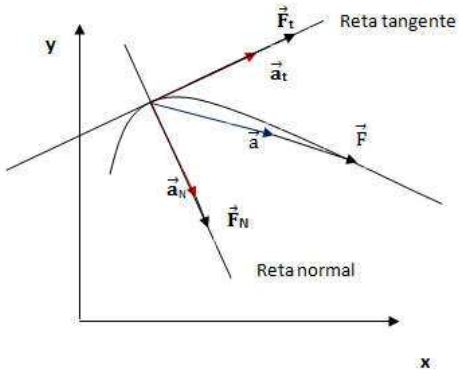


Figura 12: Componentes tangencial e normal da força

$\mathbf{F_t}$ (componente força tangencial)

$\mathbf{F_N}$ (componente força normal)

$\bar{a} = \bar{a}_t + \bar{a}_N$

$\bar{F} = \bar{F}_t + \bar{F}_N$

$\bar{F} = m\bar{a} = m\bar{a}_t + m\bar{a}_N = m\frac{dV}{dt}\hat{u}_t + m\frac{V^2}{R}\hat{u}_N$

$\bar{F}_t = m\frac{dV}{dt}\hat{u}_t$ (2ª lei de Newton na direção tangencial do movimento)

$\bar{F}_N = m\frac{V^2}{R}\hat{u}_N$ (2ª lei de Newton na direção normal do movimento)

Em módulo:

$F = \sqrt{F_t^2 + F_N^2}$

Então:

$F_t = ma_t = m\frac{\mathbf{dv}}{\mathbf{dt}}$

Se $F_t = 0$, $a_t = 0$, logo, $\frac{dv}{dt} = 0$, o módulo de ***v*** não varia.

Se $F_t \neq 0$, $a_t \neq 0$, logo , $\frac{dv}{dt} \neq 0$, o módulo de ***v*** é variável

$F_N = F_{cp} = ma_N = m\frac{v^2}{R}$ $(F_{cp} = \text{força centrípeta})$

Se a $F_{cp} = 0$, $a_N = 0$, $m\frac{v^2}{R} = 0$, (só que $m \neq 0$ e $v^2 \neq 0$), então R = infinito (trajetória retilínea – a direção da velocidade não varia)

Se a F_{cp} existe, $F_{cp} \neq 0$, $ma_{cp} \neq 0$, $m\frac{v^2}{R} \neq 0$ ($m \neq 0$ e $v^2 \neq 0$), implica que **R** é finito (implica que a trajetória é curvilínea, ou seja, a direção da velocidade varia)

3.7.3 Cálculo do raio de curvatura no movimento curvilíneo

Nem sempre medir o raio de uma curva em local de acidente é tarefa fácil. Isso porque em uma curva o relevo em seu entorno pode não ser favorável, dificultando a obtenção da medição por parte do agente. Existem equipamentos tecnológicos que facilitam essas medidas e vários métodos dos quais vamos apresentar apenas um, conhecido por método das cordas, que pode ser útil para o cálculo do raio de curvatura de uma pista de rolamento com artifícios matemáticos.

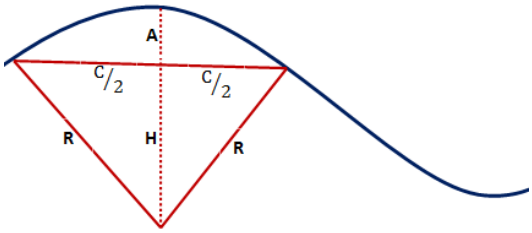


Figura 13: Cálculo do raio de curvatura

Pelo teorema de Pitágoras:

$R^2 = H^2 + (\frac{C}{2})^2$ mas, R = H + A

$R^2 = (R - A)^2 + (\frac{C}{2})^2$

$R^2 = R^2 - 2RA + A^2 + \frac{C^2}{4}$

$R = \frac{A^2}{2A} + \frac{C^2}{8A} = \frac{A}{2} + \frac{C^2}{8A}$

3.8 Ponto de impacto (Instante da colisão)

Deve ser um dos primeiros diagnósticos a ser levantado no local do acidente. O termo indica o início do evento que pode se arrastar para outros locais, ou seja, verificar o início da interação entre veículos em casos de colisões, ou interação entre veículos e outros obstáculos, ou o local de início de um deslizamento, tombamento ou capotamento. Essa localização é de suma importância, pois fornece os primeiros dados para uma análise e descrição do evento ocorrido. Um exemplo seria uma colisão em que um veículo invadiu a sua contramão de direção, vindo a colidir com outro veículo que estava em sentido contrário. Note que a princípio, a sequência do erro humano do motorista de invadir a pista contrária foi à causa principal do acidente, não importando inicialmente em que condições trafegava o outro veículo,

se em alta velocidade ou se o condutor havia ingerido bebida alcoólica, pois se não houvesse a invasão da mão de direção do outro veículo, em tese o acidente não ocorreria naquele ato.

3.9 Adjacências do ponto de impacto

É a área circunvizinha ao ponto de impacto. Trata-se de toda a região onde o fenômeno se inicia até o término, região que de alguma forma possa ter contribuído para que esse evento ocorresse. Exemplo seria a presença de óleo, areia, água na pista de rolamento, via defeituosa, presença de animais, sinalização defeituosa e outros.

3.10 Frenagem e marcas pneumáticas

Na discussão das causas de acidentes de trânsito é de fundamental importância descrever o movimento dos veículos participantes. Nesse caso, a trajetória e a velocidade podem ser fatores importantes para análise dessas causas. Outros fatores devem ser considerados na reconstrução dos acidentes como freios defeituosos. As marcas pneumáticas são vestígios impressos com uma fina camada de borracha e sua extensão é diretamente proporcional à velocidade. A velocidade só será causa do acidente de trânsito quando for comprovado de fato, ser inadequada ou excessiva, pelo que sem o excesso ou sendo adequada, não haveria o acidente. Na busca da descrição da dinâmica da frenagem, é fundamental conhecer conceitos físicos de tempo, referencial, posição, trajetória, aceleração, velocidade, movimento uniforme e uniformemente variado, além dos conceitos newtoniano de força. Na operação de redução da velocidade, os veículos são dotados de sistemas de freios. Outros meios influem na redução da velocidade como redução de marchas, atritos e resistência do ar em caso de veículos desengatados, e redução na alimentação de combustível.

3.12 Velocidade: Cálculo pelas marcas de frenagem

A aplicação de uma força em um corpo pode produzir uma variação em sua velocidade podendo esta diminuir ou aumentar. Sobre energia cinética e o teorema do trabalho-energia:

Da segunda lei de Newton:

F = ma

F.dr = ma.dr

$W_{A\rightarrow B} = \int_A^B \bar{F}.\,dr = \int_A^B m\bar{a}.\,dr$ mas $\bar{a} = \frac{d\bar{v}}{dt}$, substituindo fica: $\int_A^B m\,\frac{d\bar{v}}{dt}dr = \int_A^B m\bar{v}d\bar{v}$, logo, $W_{(força\ resultante)} = m\int_{v_0}^{v} \bar{v}d\bar{v} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$

$W_{(total)} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$. A quantidade $\frac{1}{2}mv^2$ é chamada de energia cinética (E_c).

$W_{(total)} = W_1 + W_2 + \ldots + W_n = \int_A^B \bar{F}.\,dr = E_{cf} \quad E_{ci} = \Delta E_c$ (variação da energia cinética – $\mathbf{E_{cf}}$ a energia cinética final e $\mathbf{E_{ci}}$ a energia cinética inicial)

Um veículo em processo de frenagem quando para, a velocidade final é nula, de forma que a equação da variação da energia cinética fica:

$\Delta E_c = -\frac{1}{2}mv_0^2$ onde **m** é a massa do veículo com seus ocupantes e $\mathbf{v_0}$ a velocidade inicial imposta ao veículo no momento em que os freios foram acionados. O trabalho **W** da força **F** na distância de frenagem é dado por:

W = F. x (considerando a frenagem unidimensional), sendo **F** o módulo da força e **x** a variação das posições inicial e final da frenagem. Enquanto o veículo estiver em processo de frenagem, a força que atua é o atrito que obedece a lei:

$f_{at} = \mu N$

Sendo o pavimento plano, a força peso é igual à reação normal:

$N = mg$, que substituindo fica:

$f_{at} = \mu.m.g$

igualando as equações:

$-\mu.m.g.(x - x_0) = -\frac{1}{2}mv_0^2$

$v_0 = \sqrt{2\mu g(x \quad x_0)}$

que pode ser resolvido também pelo princípio da dinâmica para uma frenagem unidimensional:

F = ma

Pela equação de Torricelli definimos a aceleração:

$v^2 = v_0^2 - 2a\ x$ sendo a velocidade final de frenagem igual a zero vem:

$0 = v_0^2 - 2a\ x \qquad a = \frac{v_0^2}{2\ x}$

Como é um processo de frenagem, assegura-se que a única força que age para parar o veículo é a força de atrito:

$\mu.m.g = m\frac{v_0^2}{2\ x}$, que reordenando os termos têm-se: $v_0 = \sqrt{2\mu g(x \quad x_0)}$

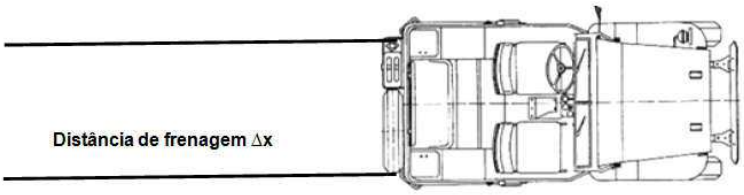


Figura 14: Veículo em processo de frenagem

É comum veículos percorrerem trechos intermitentes em frenagem no mesmo pavimento ou em pavimentos diferentes. Se acontecer, basta somar as diversas frações de frenagem e aplicar na equação, ficando:

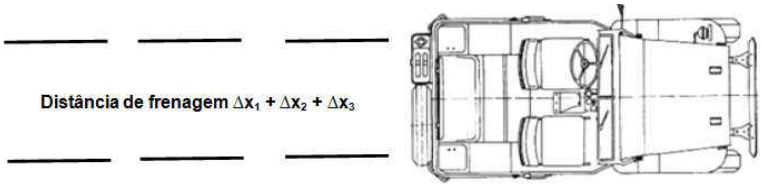


Figura 15: Marcas de diversas frações de frenagem

$$\mathbf{V_0} = \sqrt{2\mu g(\ x_1 + \quad x_2 + \quad x_3)}$$

A aplicação do principio da conservação da energia em um corpo isolado que se encontra em velocidade de frenagem por diversos trechos como asfalto, terra, grama, pode ser aplicado com facilidade, pois a energia cinética inicial, conforme o veículo se deslocava, deve ser a mesma energia resultante da soma das parcelas de energia quando o veículo estiver em processo de diminuição de velocidade. Pode-se ainda incluir nessa soma quadrática a velocidade do dano, se não houve perda significativa de massa do veículo durante o processo de frenagem, caso no

final ele venha a colidir com um obstáculo. O princípio da conservação da energia pode ser também aplicado nos casos em que há dois veículos envolvidos, quando há uma grande desproporção entre suas massas, não se esquecendo de que para cada tipo de pavimento existe o coeficiente de atrito correspondente.

$E_{ci} = E_{cf}$

$$\frac{mv_i^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} + \ldots + \frac{mv_n^2}{2}$$

$$\mathbf{V_i} = \sqrt{\boldsymbol{v_1^2} + \boldsymbol{v_2^2} + \ldots \boldsymbol{v_n^2}}$$

Cada parcela da velocidade pode ser calculada de forma independente pela equação de Torricelli, adotando o valor de **g** igual a 9,8 m/s^2. $v_n = \sqrt{2\mu g(x \quad x_0)}$

3.12.1 Velocidade de frenagens em declives

Um veículo em movimento em uma pista de declividade com um ângulo α em relação a um plano, quando passa então a deslocar-se em processo de frenagem por uma distância x.

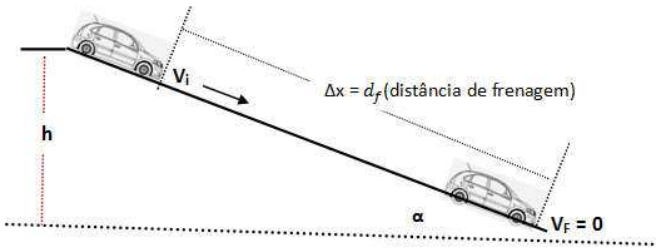


Figura 16: Processo de frenagem em declive

No ponto mais alto o veículo possui energia potencial gravitacional devido a sua altura **h** com o plano inferior e energia cinética devido a sua velocidade. No processo de frenagem, toda essa energia será dissipada se considerarmos que ao final o veículo para, logo, a energia cinética mais a energia potencial gravitacional será igual a energia dissipada na frenagem.

$E_{cinética} + E_{potencial\ gravitacional} = E_{dissipada}$

$$\frac{mv_i^2}{2} + mg = \frac{mv_f^2}{2}$$

$\frac{v_i^2}{2}$ + g = $\frac{v_f^2}{2}$

v_i^2 + $2g$ = v_f^2

v_i = $\sqrt{v_f^2 \quad 2g}$

Sendo **x** a distância de frenagem $\boldsymbol{d_f}$ e a velocidade de frenagem determinada pela equação:

v_f^2 = $2.\mu.g.d_f$

A altura **h** será determinada pela equação $= d_f sen\alpha$ e α o ângulo de inclinação da pista, que substituindo na equação da velocidade inicial fica:

v_i = $\sqrt{v_f^2 \quad 2g}$

v_i = $\sqrt{2.\mu.g.d_f \quad 2.g.d_f.sen\alpha}$

v_i = $\sqrt{2.g.d_f(\mu \quad sen\alpha)}$

3.12.2 Velocidade de frenagens em aclives

O mesmo cálculo é adotado para veículos em processo de frenagem se deslocando sentido aclive ficando:

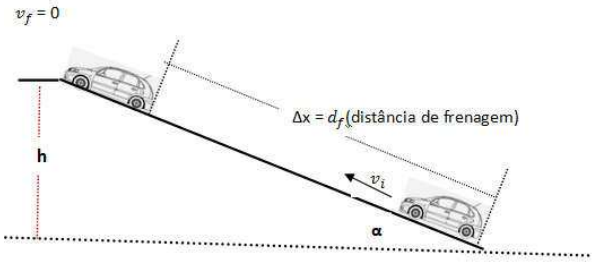


Figura 17: Veículo em processo de frenagem em aclive

$E_{cinética}$ = $E_{dissipada}$ + $E_{potencial\ gravitacional}$

Na mesma linha do raciocínio anterior chega-se a equação:

v_i = $\sqrt{2.g.d_f(\mu + sen\alpha)}$

3.13 Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento – Cálculo da velocidade de impacto

3.13.1 Colisões

Para que haja colisão é necessária a interação num intervalo de tempo desprezível de mais de uma partícula.

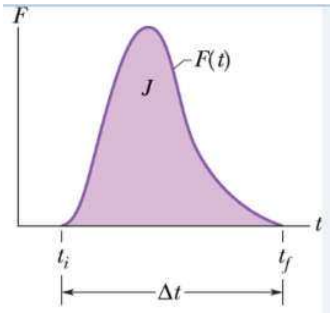


Imagem Halliday e Resnick e Walker, 4ª edição LTC

Não tem como medir a força durante a variação de movimento. Acha-se o valor médio

3.13.2 Impulso (J) e momento linear

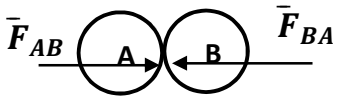
$\bar{F} = \frac{d\bar{P}}{dt}$ Durante o tempo dt, a F provoca um $d\bar{P}$ (2ª lei de Newton)

$d\bar{P} = \bar{F}(t)dt = dJ$, onde F(t) dá a variação da força com o tempo.

$\int_{P_i}^{P_f} d\bar{P} = \int_{t_i}^{t_f} F dt = J$ (impulso)

$\bar{P}_f - \bar{P}_i = J$ (teorema do impulso – momento linear)

3.13.3 Conservação do momento linear durante as colisões



$\bar{F}_{BA} = \frac{d\bar{P}_A}{dt}$ $\bar{F}_{AB} = \frac{d\bar{P}_B}{dt}$ **2ª Lei de Newton**

$\bar{F}_{AB} = -F_{BA}$ 3ª lei de Newton

$\frac{d\bar{P}_B}{dt}$ = - $\frac{d\bar{P}_A}{dt}$ como dt é o mesmo,

$d\bar{P}_B$ = - $d\bar{P}_A$ $d\bar{P}_B + d\bar{P}_A = 0$ $d(\bar{P}_B + \bar{P}_A) = 0$ $\bar{P}_B + \bar{P}_A$ = constante

$\sum F_{ext} = \frac{d\bar{P}}{dt}$ mas $\bar{P} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 + \ldots \bar{P}_n = MV_{CM}$

3.13.4 Classificação das colisões

Elas são classificadas de acordo com a variação da energia.

3.13.4.1 Colisão elástica: É a conservação da energia cinética que permanece constante durante a colisão.

3.13.4.2 Colisão inelástica: Não há conservação de energia cinética do sistema de corpos que colide. Pode ser dissipativo ou conservativo, neste caso, a energia mecânica possui uma parcela de outra forma de energia. Quem dá o nome de elástica ou inelástica, é a conservação da energia cinética.

3.13.5 Colisão em uma dimensão: colisões elásticas e inelásticas

Figura 18: Representação de dois veículos antes da colisão

Para haver choque

$m_1v_{1i} > m_2v_{2i}$

Na análise do acidente, verificar qual a situação após o choque. Embora as velocidades iniciais tenham apenas componentes *x*, as componentes y da velocidade poderão surgir durante a colisão, e o problema será essencialmente bidimensional. As componentes iniciais da velocidade ao longo da direção **x** serão $\mathbf{u_1}$ e $\mathbf{u_2}$ e as velocidades finais depois da colisão de $\mathbf{v_1}$ e $\mathbf{v_2}$. As massas são conhecidas e as velocidades serão procuradas. Logo é evidente que alguma outra consideração, além da conservação da quantidade de movimento, deve ser efetuada, já que a conservação da quantidade de movimento proporciona apenas uma equação relacionando essas quantidades. É certo que a quantidade de movimento será conservada durante a colisão, mas não é certo que a energia cinética será conservada, já que alguma energia cinética pode ser dissipada como calor se as forças que atuam durante a colisão não forem conservativas. No entanto, supõe-se que a colisão seja tal que a energia cinética e a quantidade de movimento serão

conservadas. A colisão então é denominada perfeitamente elástica. Sob essas circunstâncias, a conservação da quantidade de movimento durante o choque:

$\bar{P}_{total\ imediatamente\ antes} = \bar{P}_{total\ imediatamente\ após\ o\ choque}$

$\bar{P}_{1i} + \bar{P}_{2i} = \bar{P}_{1f} + \bar{P}_{2f}$

$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2$

$m_1(u_1 - v_1) = m_2(v_2 - u_2)$ (equação i)

Durante a colisão elástica, a energia cinética **E** fica:

$E_{total\ imediatamente\ antes} = E_{total\ imediatamente\ após\ o\ choque}$

$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 \ldots E_n$

Mas o sistema tem dois veículos

$E_{1i} + E_{2i} = E_{1f} + E_{2f}$

$\frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$

$m_1(u_1^2 - v_1^2) = m_2(v_2^2 - u_2^2)$, ou

$m_1(u_1 \quad v_1)(u_1 + v_1) = m_2(v_2 \quad u_2)(v_2 + u_2)$ (equação ii)

Dividindo a equação ii pela equação i fica:

$u_1 + v_1 = v_2 + u_2$, ou

$v_2 - v_1 = -(u_2 - u_1)$

$(u_2 - u_1)$ representa a velocidade do corpo dois relativa ao corpo um, antes da colisão, e $v_2 - v_1$ representa a velocidade relativa de afastamento depois da colisão. Uma colisão perfeitamente elástica preserva o módulo desta velocidade relativa, mas troca seu sinal.

Numa colisão onde um total máximo de energia cinética é dissipado e os objetos permanecem juntos e se movem depois da colisão com a mesma velocidade. Esse tipo de colisão pode ser chamado de colisão perfeitamente inelástica. Em acidentes automobilísticos há casos em que os veículos envolvidos permanecem juntos e derrapam por um período ao longo da via com a mesma velocidade escalar depois do impacto. Então v_2 e v_1 serão iguais:

$v_2 - v_1 = 0$

Em geral as colisões nem são perfeitamente elásticas nem completamente inelásticas, mas enquadram-se entre estes extremos. Após o embate, os veículos poderão permanecer juntos ou não depois da colisão. A energia cinética perdida durante o processo é especificada em termos matemáticos por um número ***"e"*** chamado de coeficiente de restituição.

$$e = \frac{v_2 - v_1}{u_1 - u_2}$$

$$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2$$

$$v_2 - v_1 = e(u_1 - u_2)$$

Resolvendo esse sistema de equações, achando o valor de $\mathbf{v_1}$ e $\mathbf{v_2}$ em função de $\mathbf{u_1}$ e $\mathbf{u_2}$, as massas e o coeficiente de restituição:

$$v_1 = \frac{m_1 - em_2}{m_1 + m_2} u_1 + \frac{(1+e)m_2}{m_1 + m_2} u_2$$

$$v_2 = \frac{(1+e)m_1}{m_1 + m_2} u_1 + \frac{m_2 - em_1}{m_1 + m_2} u_2$$

Para uma colisão completamente inelástica, e = 0 e os resultados se reduzem a:

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} u_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} u_2$$

No caso de uma colisão perfeitamente elástica, *e* = 1

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} u_1 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} u_2$$

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} u_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} u_2$$

3.14. Colisões em duas dimensões

Como explicitado, quantidade de movimento é uma grandeza física que relaciona a massa e a velocidade e nos informa que a resultante da soma vetorial da quantidade de movimento de dois veículos imediatamente após a colisão é igual a quantidade de movimento imediatamente antes da colisão. O método de calcular a velocidade de dois veículos consiste em reconstruir a dinâmica do acidente em sua sequencia de passos e em etapas, nos instantes anteriores e após a colisão. Problemas de colisão bidimensional ilustram de modo mais geral a conservação da

quantidade de movimento como um vetor. Se a quantidade de movimento vetorial for conservada, então, para uma colisão de dois corpos tem-se:

Vamos chamar de $\bar{P}$ o momento antes e $\bar{Q}$ o momento depois da colisão.

$\bar{P}_1 + \bar{P}_2 = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2$

$m_1U_1 + m_2U_2 = m_1v_1 + m_2v_2$

Onde $\boldsymbol{U_1}$ e $\boldsymbol{U_2}$ são as velocidades iniciais dos veículos de massa $\boldsymbol{m_1}$ e $\boldsymbol{m_2}$, $\boldsymbol{v_1}$ e $\boldsymbol{v_2}$ as velocidades finais. Isso pode ser escrito como um conjunto de duas equações expressando o fato de que se a quantidade de movimento vetorial se conserva, cada componente será conservada.

$m_1U_{1x} + m_2U_{2x} = m_1v_{1x} + m_2v_{2x}$

$m_1U_{1y} + m_2U_{2y} = m_1v_{1y} + m_2v_{2y}$

Um método prático é a reconstrução gráfica da dinâmica da colisão pela quantidade de movimento na forma vetorial (módulo, direção e sentido), onde consideram-se os intervalos de tempos imediatamente antes e após a colisão, iniciando as etapas de reconstrução pelo tempo imediatamente após a colisão.

Na primeira etapa calcula-se as velocidades dos dois veículos colidentes imediatamente após a colisão, desde sua posição final de repouso até o ponto de impacto, utilizando as equações:

$$V_{\text{final veículo 1}} = \sqrt{2\mu g \Delta r_{v1}} \text{ e } V_{\text{final veículo 2}} = \sqrt{2\mu g \Delta r_{v2}}$$

Na qual Δr_{v1} é a distância percorrida pelo veículo 1 do inicio do impacto até a posição final (repouso) e Δr_{v2}, a distância percorrida pelo veículo 2 do inicio do impacto até a posição final.

Na segunda etapa, calculadas as velocidades de cada veículo após a colisão, calcula-se a quantidade de movimento de cada veículo e também a quantidade de movimento final resultante utilizando o método vetorial. Nessa etapa deve-se conhecer a direção e sentido que cada veículo tomou logo após a colisão e também o ângulo de saída de ambos. Para esse cálculo usa-se a expressão:

$$\bar{P}_{final\ veículo1} = m_1 v_{final\ veículo1} \quad \text{e} \quad \bar{P}_{final\ veículo\ 2} = m_2 v_{final\ veículo2}$$

A terceira etapa é o espaço de tempo imediatamente antes da colisão, logo o vetor quantidade de movimento resultante final será igual ao vetor quantidade de movimento inicial, representado sua direção e sentido antes da colisão.

Na quarta etapa, determinada a velocidade no instante da colisão, no ponto de impacto, verifica se houve por parte dos veículos colidentes trechos percorridos onde seria possível calcular a velocidade anterior à colisão, como marcas de frenagens, fricções, para finalmente então calcular a velocidade do veículo no início do processo de colisão.

Em alguns casos, pelo princípio da conservação da energia é possível fazer uma análise. A soma das energias antes da colisão será divergente da soma de energia após a colisão se não levar em consideração que parte dessa energia foi transformada em danos, enquanto que a quantidade de movimento se conserva. Por isso, ao final de cada cálculo, é de bom alvitre fazer uma análise da energia para os dois veículos, para ao final, averiguar a energia perdida devido aos danos, bem como o valor da velocidade de danos.

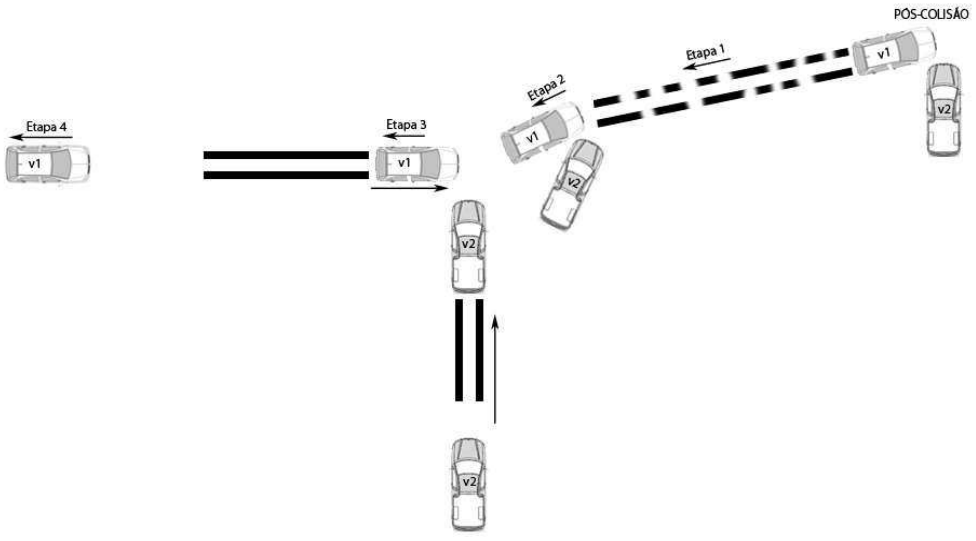


Figura 19: Esquematização de uma colisão bidimensional

DINÂMICA DOS ACIDENTES DE TRÂNSITO

4.1 Velocidade de danos

Velocidades de danos são as velocidades obtidas através de uma avaliação de teste de impacto onde os danos causados nos veículos correspondem à energia dissipada durante o processo de colisão. Serve como um instrumento complementar em alguns casos, onde se avalia a velocidade do veículo pelo princípio da conservação da energia e princípio da conservação da quantidade de movimento no cálculo da velocidade no instante da colisão. O site europeu www.euroncap.com e o site sul americano www.laitnncap.com disponibilizam imagens e vídeos de colisões de vários veículos de montadoras diversas em testes e avaliando os danos em várias velocidades. Outro site, o Insurance Institute for Highways safety – www.iihs.org, também disponibiliza imagens de testes realizados com análise de danos, determinando a velocidade mínima e máxima para determinado tipos de avarias em veículos. Nessas análises, pode se concluir que as avarias são equivalentes a determinadas velocidades. Em um trabalho sobre investigação em locais de acidentes de tráfego, Silvio Kyoji Endo, Perito Criminal em Brasilia, avalia os danos segundo a intensidade de acordo com as avarias:

Imagem: http://www.euroncap.com/player_Mediacenter.aspx?nk=3b3bd847-e4f1-4415-80f9-2829b7f616cf

Intensidade das avarias	Velocidade de danos (km/h)
Leve	Até 20

Média	20 à 40
Grave	40 à 60
Gravíssima	Acima de 60

Fonte: Endo, Silvio Kyoji. Investigação em locais de acidentes de tráfego – Capacitação da Área de Segurança Pública

Tipo de Avaria	Vel. dano (km/h)
Entortar pára-choque	05
Quebrar pára-choque	10
Quebrar pára-choque e grade do radiador	15/20
Quebrar pára-choque, faróis, afundar grade, amassar capô, deformar lataria anterior	20/30
Quebrar pára-choque, faróis, afundar grade, deformar lataria anterior até encostar-se ao motor sem deslocá-lo	30/40
Quebrar pára-choque, faróis, afundar grade, deformar lataria anterior até encostar-se ao motor sem deslocá-lo, deformar suspensão	40/50
Afundar grade do radiador mais colmeia	40/45
Arrancar suspensão	40/45
Arrancar roda diretriz	40/45
Partir longarina	50/60
Arrancar motor dos calços / deslocar motor	60/70
Arrancar roda motriz	50/60

Fonte: Almeida, Lino Leite de. Manual de perícias em acidentes de trânsito

Essa parcela de energia de deformação é bastante útil no cálculo de velocidades, quando os veículos são tratados de forma isolada.

4.2 Acidentes em curvas

Os acidentes mais comuns em curvas são os deslizamentos (tangenciamento), tombamento e capotamentos. Freqüentemente são resultados de excesso de velocidade.

Foto: Tombamento de caminhão após executar uma curva na BR 365. Nesse acidente o motorista relata que perdeu o controle após uma ultrapassagem. (Fonte: Jornal da Vitoriosa)

4.2.1 Veículo executando uma curva plana e horizontal (não compensada) ou seja de inclinação zero: Cálculo da velocidade

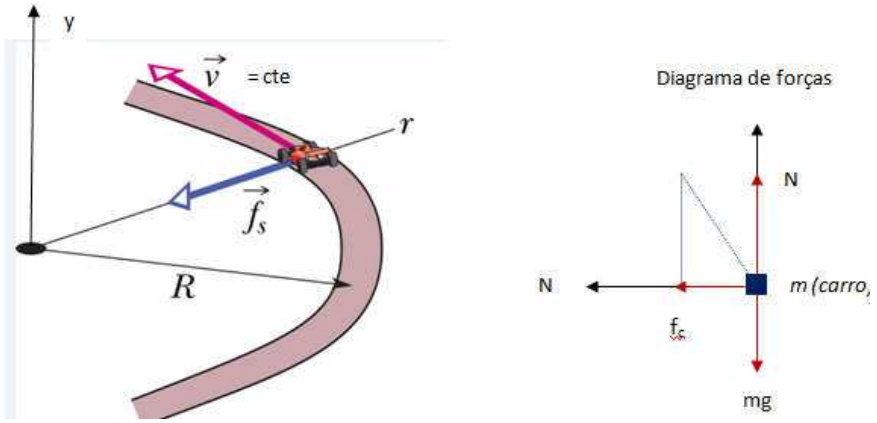


Figura 20: Diagrama de um veículo realizando uma curva

Pela 2ª lei de Newton:

$\sum F_y = ma_y = 0$ $\quad N - mg = 0 \quad N = mg$

$\sum F_x = ma_x$ $\quad f_{centrípeta} = \frac{mv^2}{R}$

Determinando o coeficiente de atrito mínimo entre os pneus e o pavimento:

$F_C \leq \mu_c N$ (o atrito obedece esta lei e o coeficiente de atrito é cinético porque há velocidade relativa entre os pneus e a pista de rolamento dissipando energia).

$\frac{mv^2}{R} \leq \mu_c N$ $\quad \frac{mv^2}{R} \leq \mu_c mg$ $\quad v = \sqrt{\mu_c Rg}$ (velocidade máxima sem o veículo derrapar).

Através desses cálculos, podemos estabelecer a velocidade mínima com que o carro então começa a derrapar em uma curva saindo da pista pela sua tangente.

Foto Acidente na rodovia BR 452. Segundo a Polícia Rodoviária, o motorista perdeu o controle da direção com a pista escorregadia e colidiu com um caminhão que seguia em sentido contrário (Fonte: Jornal Vitoriosa)

4.2.2 Veículo executando uma curva compensada, ou seja, de inclinação maior que zero. Cálculo da velocidade de segurança

A velocidade de segurança de um veículo em uma curva compensada com inclinação de um ângulo Θ é a máxima velocidade com que o veículo consegue fazer a curva sem depender do atrito lateral entre os pneus e o pavimento.

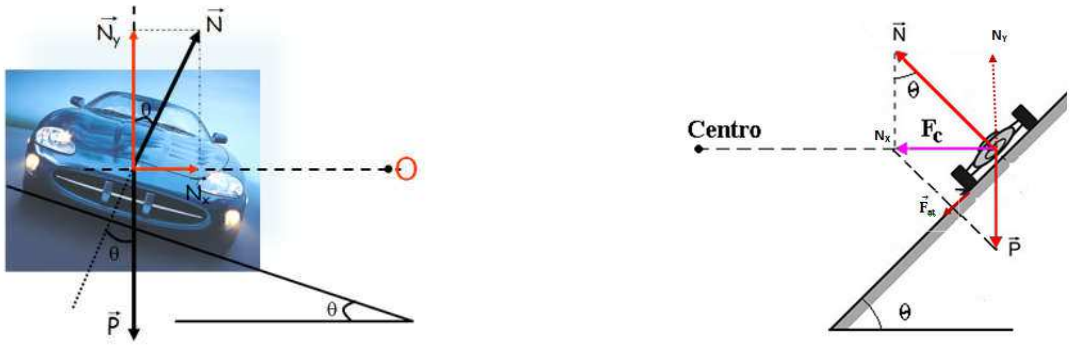


Figura 21: Diagrama das forças atuando num veículo realizando uma curva compensada

Supomos sem atrito e nesse caso, quem garante a curva, é a componente N_x da normal.

$$N\cos\Theta = mg \qquad \text{(equação I)}$$

$$N\,sen\Theta = m\frac{v^2}{R} \qquad \text{(equação ii - F na direção radial)}$$

Dividindo a equação II pela equação I

$tg\Theta = \frac{v^2}{Rg}$ (valor crítico)

Mas se o carro derrapa em uma curva inclinada o atrito tem que ser levado em consideração, pois o valor crítico foi superado. Nesse caso, as equações que governam o movimento possibilitam obter a velocidade mínima que o veículo estava ao realizar a curva imediatamente antes de derrapar.

Equilíbrio na vertical:

$$N_y = f_{a(y)} + mg$$

$$N\cos\Theta = \mu N\text{sen}\Theta + mg$$

$$N(\cos\Theta \quad \mu\text{sen}\Theta) = mg$$

$$N = \frac{mg}{\cos\Theta - \mu\text{sen}\Theta}$$

No instante da derrapagem, estando o carro em movimento circular na iminência de escorregar rampa acima:

$$N_x + f_{a(x)} = F_{\text{centrípeta}}$$

$$N\text{sen}\Theta + \mu N\cos\Theta = F_{\text{centrípeta}}$$

$$N(\text{sen}\Theta + \mu\cos\Theta) = m\frac{v^2}{R}$$ *(sendo v a máxima velocidade na iminência de derrapagem)*

$\frac{mg}{\cos\Theta - \mu\text{sen}\Theta}$ (senΘ + μcosΘ) = m$\frac{v^2}{R}$ *(isolando v)*

$$v_{máx} = \sqrt{\frac{Rg(\text{sen}\,\Theta + \mu\cos\Theta)}{\cos\Theta - \mu\text{sen}\Theta}}$$

Se ocorre o deslizamento do veículo rampa acima, é possível então calcular a velocidade mínima com que o veículo tangenciou a curva.

4.2.3 Velocidade crítica de tombamento ou capotamento em curva plana.

Nesse caso a geometria do veículo tem que ser considerada. Junto com as explicações do método, analisemos um exemplo.

Um automóvel, de massa **m**, fazendo uma curva circular de raio **R**, com velocidade escalar **v**. Supondo que seu centro de massa coincida com o centro de gravidade e está a uma altura **H** acima da estrada e localizado transversalmente a meio caminho das rodas, como mostra a figura. A distância entre as rodas é **d** e supondo que o coeficiente de atrito entre os pneus e a estrada seja suficientemente grande para evitar que o carro deslize para o lado externo da pista.

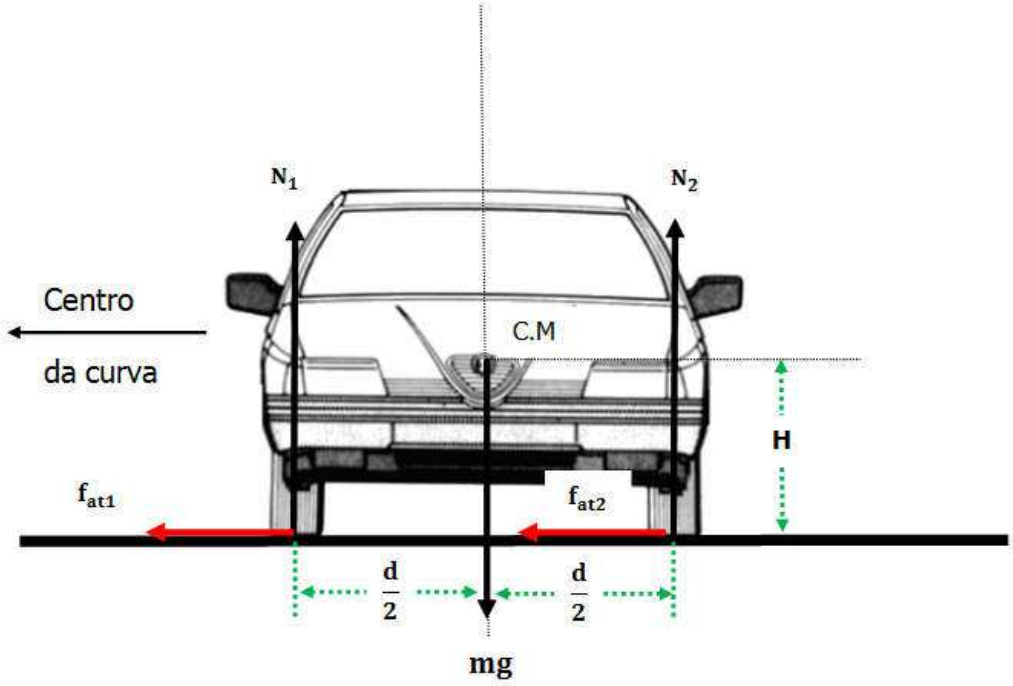


Figura 22: Diagrama para veículo em velocidade crítica de tombamento ou capotamento em uma curva plana

As forças que atuam são mostradas na figura acima. As forças normais $\mathbf{N_1}$ e $\mathbf{N_2}$ e as de atrito $\mathbf{F_{at1}}$ e $\mathbf{F_{at2}}$ representam a soma das respectivas forças atuando nos pares das rodas laterais esquerda e direita do veículo.

Adotando um sistema de eixos cartesianos (x,z) e tomando o sentido positivo do eixo **x** para o centro da curva e **z** perpendicular, lembrando que o versor cartesiano do eixo **z** é $\hat{k}$, teremos:

$$\bar{N}_1 = N_1\hat{k}$$

$$\bar{N}_2 = N_2\hat{k}$$

$P(\ \hat{k}) = \quad mg(\hat{k})$

Como o carro está numa situação de movimento circular uniforme, deve experimentar uma força centrípeta ao longo da direção **x**, cujo módulo é $mr\omega^2$. O atrito será responsável por fornecer a necessária aceleração centrípeta e das condições dinâmicas do problema:

$f_{at1} = f_{at1}(\ \imath); \qquad f_{at2} = f_{at2}(\ \imath); \qquad F_{cp} = ma_{cp} = \quad mr\omega^2$

$\sum F_z = 0 \ \Rightarrow (N_1 + N_2 \quad mg)\hat{k} = 0$ ***(equação 4.2.3.a)***

$\sum F_x = ma_{cp} \Rightarrow \quad (f_{at1} + f_{at2}) = \quad mr\omega^2$ ***(equação 4.2.3.b)***

$N_1 + N_2 = mg$ ***(equação 4.2.3.c)***

$f_{at1} + f_{at2} = mr\omega^2$

A equação expressa o fato de que a força centrípeta total necessária para conservar o carro na sua trajetória circular é suprida pelas forças de atrito entre os pneus e a estrada. Os quatro valores $\mathbf{N_1}$, $\mathbf{N_2}$, $\mathbf{f_{at1}}$ **e** $\mathbf{f_{at2}}$ são desconhecidos. Precisamos de quatro equações para determiná-los. Outra equação pode ser obtida tomando os momentos das forças em torno de algum ponto conveniente. No entanto é muito mais simples tomar os momentos em torno do centro de massa.

$N_2\frac{d}{2} - N_1\frac{d}{2} - (f_{at1} + f_{at2})H = 0$

A soma dos momentos é zero, já que o carro não tem qualquer aceleração angular em torno do eixo que passa pelo centro de massa. como $\mathbf{f_{at1}} + \mathbf{f_{at2}} = mr\omega^2$, substituindo na equação anterior, fica:

$(N_2 - N_1)\frac{d}{2} - mr\omega^2 H = 0$ ***(equação 4.2.3.d)***

Para resolver o sistema do exemplo, supomos que as forças de atrito são proporcionais às forças normais em ambos os pares de roda e que seja o mesmo em ambos os lados dos veículos, o que é fisicamente razoável.

$f_{at1} = \mu N_1$

$f_{at2} = \mu N_2$

Logo, $\frac{f_{at1}}{N_1} = \frac{f_{at2}}{N_2}$ ***(equação 4.2.3.e)***

Esta equação completa o conjunto de quatro equações necessárias para que as quatro incógnitas sejam determinadas. Resolvendo o sistema de equações, obtemos:

da equação 4.2.3.c, resolvendo para N_1

$N_1 + N_2 = mg \Rightarrow N_2 = mg - N_1$ *(Substitui na equação 4.2.3.d)*

$(mg - N_1 - N_1)\frac{d}{2} - mr\omega^2 H = 0 \Rightarrow mg - 2N_1 = \frac{2mr\omega^2 H}{d} \Rightarrow 2N_1 = mg + \frac{2mr\omega^2 H}{d}$

$N_1 = \frac{mg}{2} - \frac{2mr\omega^2 H}{2d} = \frac{mg}{2} - \frac{mr\omega^2 H}{d} \Rightarrow \mathbf{N_1 = mg(\frac{1}{2} - \frac{r\omega^2}{g}\frac{H}{d})}$ ***(Equação 4.2.3.f)***

Resolvendo **N_2**

$N_1 + N_2 = mg \Rightarrow N_1 = mg - N_2$ *(substitui na equação 4.2.3.d)*

$(N_2 - mg + N_2)\frac{d}{2} - mr\omega^2 H = 0 \Rightarrow 2N_2 - mg = \frac{2mr\omega^2 H}{d} \Rightarrow 2N_2 = mg + \frac{2mr\omega^2 H}{d}$

$N_2 = \frac{mg}{2} + \frac{2mr\omega^2 H}{2d} = \frac{mg}{2} + \frac{mr\omega^2 H}{d} \Rightarrow \mathbf{N_2 = mg(\frac{1}{2} + \frac{r\omega^2}{g}\frac{H}{d})}$ ***(Equação 4.2.3.g)***

Derivando N_1 e N_2 em relação a ω

$\frac{DN_1}{D\omega} = -\frac{2mr\omega H}{d}$

$\frac{DN_2}{D\omega} = \frac{2mr\omega H}{d}$

O resultado diz que N_1 decresce com a velocidade angular, enquanto que N_2 cresce. Logo haverá um instante em que N_1 irá se anular. Isso ocorrerá na iminência do capotamento, pois o veículo perderá força de contato com o solo.

Substituindo os valores N_1 e N_2 na *equação 4.2.3.e*:

$\frac{f_{at1}}{N_1} = \frac{f_{at2}}{N_2}$ $\quad f_{at1} = N_1\frac{f_{at2}}{N_2}$; substituindo na *equação 4.2.3.b:*

$f_{at1} + f_{at2} = mr\omega^2 \Rightarrow f_{at2}\frac{N_1}{N_2} + f_{at2} = mr\omega^2 \Rightarrow f_{at2}\left(1 + \frac{N_1}{N_2}\right) = mr\omega^2$

$$f_{at2} = \frac{mr\omega^2}{1+\frac{N_1}{N_2}} = \frac{mr\omega^2}{1+\frac{mg(\frac{1}{2}-\frac{r\omega^2 H}{dg})}{mg(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{dg})}} = \frac{mr\omega^2}{\frac{\left(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{dg}\right)+(\frac{1}{2}-\frac{r\omega^2 H}{dg})}{(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{dg})}} = \frac{\left(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{dg}\right)mr\omega^2}{\left(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{dg}\right)+(\frac{1}{2}-\frac{r\omega^2 H}{dg})}$$

$$\mathbf{f_{at2}} = \frac{m\omega^2 R}{2} + \frac{m\omega^4 r^2 H}{gd} = m\omega^2 R(\frac{1}{2} + \frac{R\omega^2 H}{gd})$$

resolvendo para f_{at1} obtemos:

$$f_{at1} = N_1\frac{F_{at2}}{N_2} = \frac{mg\left(\frac{1}{2}-\frac{r\omega^2 H}{dg}\right)m\omega^2 R(\frac{1}{2}+\frac{R\omega^2 H}{gd})}{mg\,(\frac{1}{2}+\frac{r\omega^2 H}{gd})} = \frac{m\omega^2 R}{2} - \frac{m\omega^4 r^2 H}{gd} = m\omega^2 R(\frac{1}{2} - \frac{R\omega^2 H}{gd})$$

Das equações, vê-se que quando ω = 0, no caso do carro estar em repouso, $N_1 + N_2 = mg$ e $f_{at1} = f_{at2} = 0$. Se a velocidade **ω** do carro aumenta, a força normal N_2 e a força de atrito f_{at2} das rodas do lado direito aumentam, enquanto que as forças correspondentes N_1 e f_{at1} do lado esquerdo decrescem. Se ω for suficientemente grande, a força N_1, dada pela equação dada *(4.2.3.f)* tende à zero. Nesse ponto, as rodas do lado esquerdo do carro podem sair da estrada, desaparecendo agora a força exercida por aquelas rodas na estrada e a força de reação igual e oposta N_1, e então o carro tombará ou capotará. O valor de ω para o qual N_1 torna-se nulo é obtido igualando N_1 a zero, ou seja, para uma velocidade angular crítica fica:

$$N_1 = 0 = \frac{mg}{2} - \frac{mr\omega^2 H}{d} \qquad \frac{mg}{2} = \frac{mr\omega^2 H}{d} \qquad \omega_{critico} = \frac{v}{R} = \sqrt{\frac{gd}{2HR}} \qquad v = \sqrt{\frac{gdR}{2H}}$$

No caso, essa velocidade é a velocidade máxima que poderá ser atingida antes do veículo capotar. Logo os fatores geométricos são importantes, pois conforme esse resultado, para que v seja maior possível, o carro seria projetado de tal modo que a distância **d** entre as rodas fosse a máxima possível e a altura **H** do centro de massa o menor possível.

4.2.3.1 Influência da carga

Conforme cálculos anteriores, a distribuição das cargas nos veículos, principalmente caminhões, pode ter relação direta com a causa determinante do acidente. Ela influenciará na dirigibilidade do veículo, no sistema de freios, na visibilidade e principalmente no deslocamento do centro de gravidade para cima, para trás ou para os lados, sobrecarregando os eixos e tornando o veículo instável.

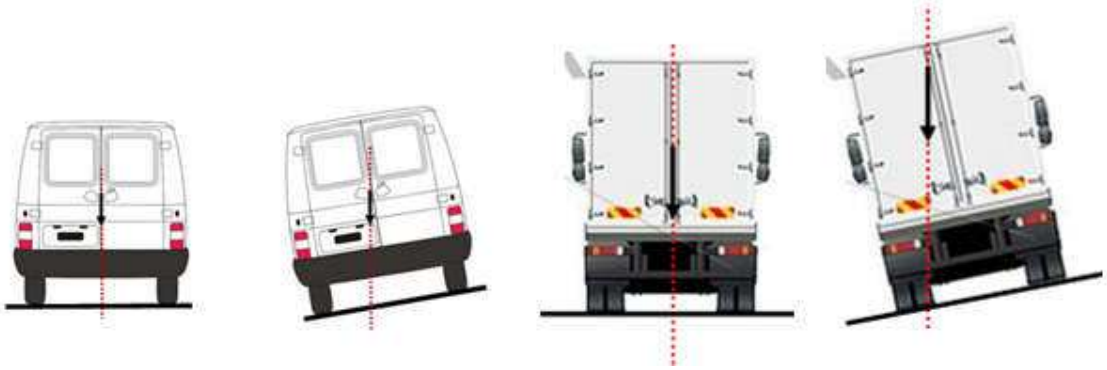


Figura 23: *A disposição das cargas em um veículo bem como sua geometria, tem influência no centro de gravidade*

4.2.3.2 Sinalização indicativa de velocidade em curvas

Imagem: Placa indicativa de velocidade em uma curva. A placa não indica para quais veículos essa velocidade é segura

Cálculos anteriores mostraram as velocidades críticas em curvas em diversas situações. Fatores como a distribuição de cargas, a geometria do veículo, curvas mal projetadas, sinalização ineficiente poderão contribuir ainda mais para a ocorrência de acidentes. São comuns, placas indicativas de velocidade máxima em curvas, que nem sempre representa uma velocidade segura para determinados tipos de veículos.

Detalhe da BR 050, divisa entre os municípios de Uberlândia e Araguari. O local é conhecido com "*curva da morte"* pelo grande número de acidentes que ocorrem no local, fato que tem gerado audiências públicas para consertar o traçado e intervenção da justiça e Ministério Público Federal.

Foto: Curva da rodovia BR 050 entre Uberlândia e Araguari – local com grandes índices de acidentes, principalmente com veículos de carga.

4.3 Choque cêntrico da dianteira de um veículo na traseira de outro

Exemplo prático e realístico de um veículo que colide de forma cêntrica contra a traseira de outro veículo que se acha parado. Após o choque os veículos se imobilizaram juntos ou bem próximos, como sugere a figura.

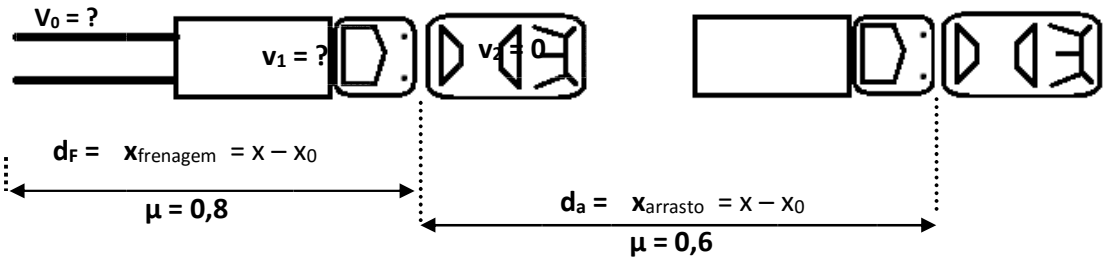


Figura 24: Diagrama de choque cêntrico entre dois veículos

Supondo a massa do veículo 01 (v_1) 1500 kg e do veículo 2 (v_2) 1000 kg. A distância de frenagem (d_F) que foi submetido o veículo 01 até o local de impacto, medido no local foi de 08 metros (d_F = 8 m), e a distância de arrasto, também medido no local, entre o local de impacto até a posição final de imobilização foi de 10 metros. O pavimento, como na maioria dos casos, é de asfalto seco.

m_1 = 1500kg m_2 = 1000 kg d_F = 8 metros d_a = 10 metros

Primeiramente acha-se a velocidade **U** dos veículos <u>imediatamente após a colisão</u> partindo da equação de Torricelli.

$$U^2 = U_0^2 \quad \mu . g . d_a$$

U é a velocidade final do conjunto (m_1 + m_2) que ficam imobilizados no final e $\mathbf{U_0}$ a velocidade inicial de saída do conjunto (m_1 + m_2) logo após a colisão. Para o conjunto, a média do coeficiente de atrito é 0,7.

$$0 = U_0^2 \quad 2\mu g d_a \Rightarrow U_0 = \sqrt{2\mu g d_a} = \sqrt{2.0{,}7.10.10} = 11{,}83\frac{m}{s}$$

De posse desses dados, determina-se a velocidade v_1 de impacto com que o veículo 01 atingiu o veículo 02.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) U_0$$

No impacto a velocidade v_2 do veículo 2 é zero

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2) U_0}{m_1} = \frac{(1500 + 1000) 11{,}8}{1500} = 19{,}66\frac{m}{s}$$

Como o primeiro veículo (que colidiu na traseira do veículo 02 que estava parado) foi freado antes, pode-se agora determinar sua velocidade no momento em que os freios foram acionados.

$$v_0 = \sqrt{2\mu g d_f + v_1^2} = \sqrt{2 \text{ x } 0{,}7 \text{x} 10 \text{x} 8 + (19{,}66)^2} = \sqrt{112 + 386{,}52} = 22{,}33\frac{m}{s}$$

4.4 Choque cêntrico da dianteira de um veículo na traseira do outro na qual os veículos se imobilizam distanciados um do outro.

Num exemplo literal, em que há marcas de frenagem (poderia também ser um acidente sem frenagem), deseja-se achar:

v_0? Velocidade do veículo 01 no início da frenagem (velocidade de marcha)

v_1? Velocidade de impacto do veículo 01 no veículo 02

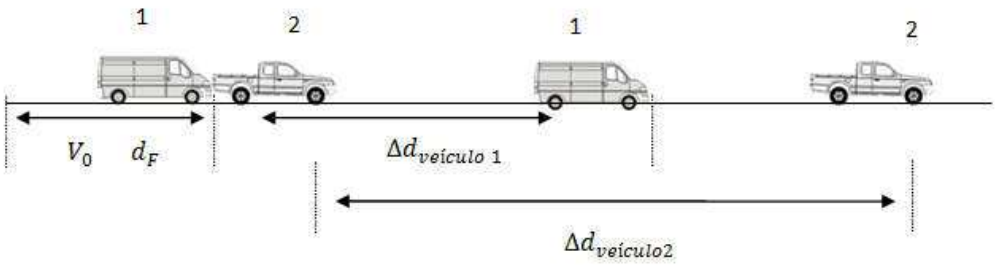


Fig: 25

No local foram determinados as massas **m_1** para o veículo 1 e **m_2** para o veículo 2, **μ_1** o coeficiente de atrito para o veículo 1 e **μ_2** o coeficiente de atrito para o veículo 2

Utilizando as velocidades imediatamente após o choque de **U**, que são:

$\boldsymbol{U_1} = \sqrt{2\mu_1 g d_1}$ e $\boldsymbol{U_2} = \sqrt{2\mu_2 g d_2}$

Então a velocidade de impacto com que o veículo 1 atinge o veículo 2 será de:

$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2$

Como o veículo 2 estava parado, v_2 é zero, logo:

$\boldsymbol{v_1} = \frac{m_1 U_1 + m_2 U_2}{m_1}$

Calculada a velocidade de impacto, calcula-se a velocidade do veículo 1 no início da frenagem, chamada de velocidade de marcha, pela equação:

$v_0 = \sqrt{2\mu_1 g d_f + v_1^2}$

4.5 Colisão perpendicular entre dois veículos.

Dois veículos (V1 e V2) colidem em trajetórias perpendiculares e a seguir passam a se deslocar separadamente, cada um com trajetória independente. O profissional que esteve no local reconstruindo a dinâmica do acidente descreveu a trajetória do V1 direcionada 45 graus acima do eixo x e do V2, em 30 graus, também acima do eixo x. Foi medido também no local que o percurso pós-colisão foram de

06 metros para o V1 e de 04 metros para o V2 em processo de frenagem. Para ambos, o coeficiente de atrito é μ = 0,8 no trecho pós-colisão. No trecho antes do ponto de impacto, V1 percorreu 05 metros em processo de frenagem e V2 12 metros, ambos com coeficiente de atrito 0,8. As massas foram determinadas no local como sendo m_1 = 800 kg e m_2= 1000 kg. Determinar as velocidades iniciais de cada veículo.

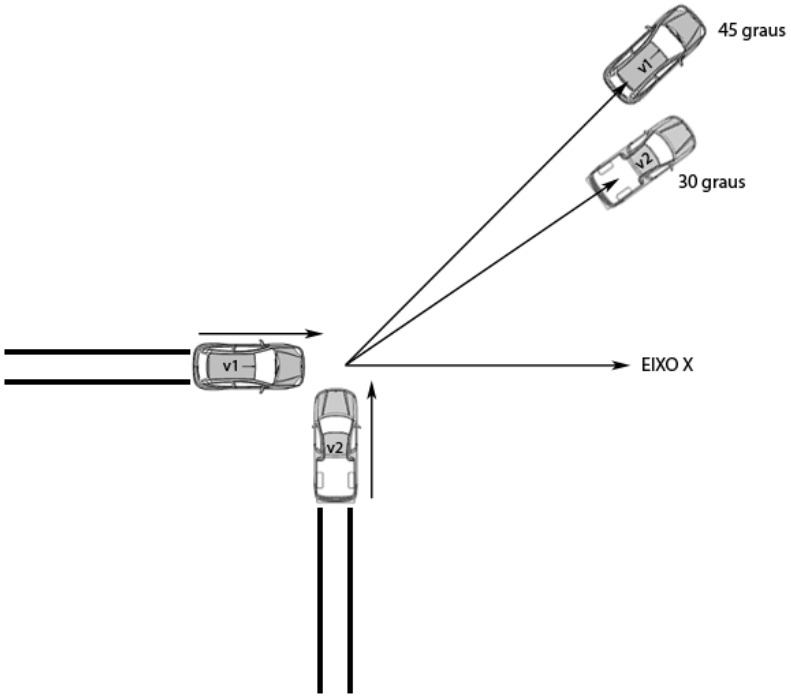


Figura 26:
Colisão perpendicular

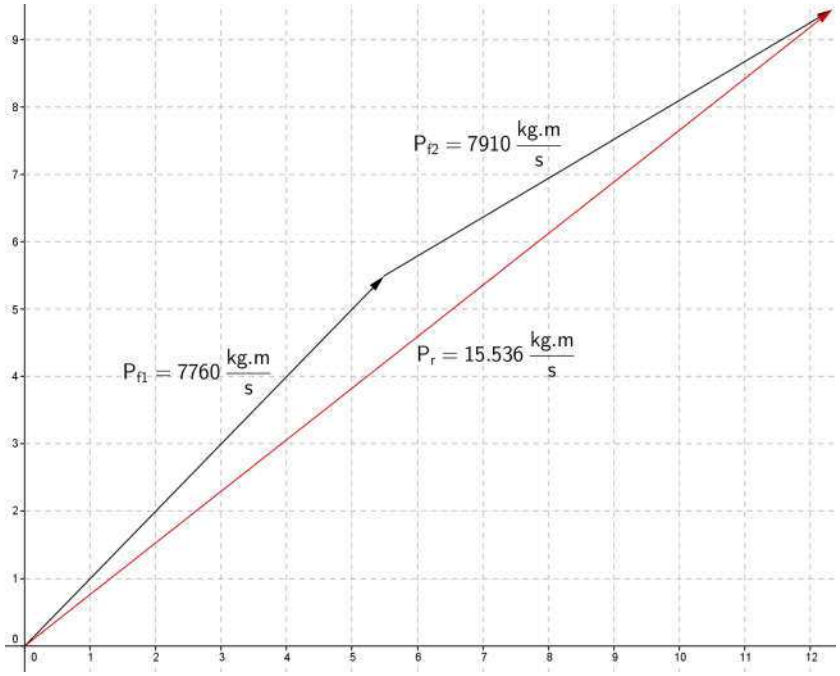
Passo 01: Velocidade dos veículos V1 e V2, no trecho após a colisão.

Veículo 01	**Veículo 02**
$V_{f1} = \sqrt{2.\mu.g.d_{frenagem}}$	$V_{f2} = \sqrt{2.\mu.g.d_{frenagem}}$
$V_{f1} = \sqrt{2.0,8.9,8.6}$	$V_{f2} = \sqrt{2.0,8.9,8.4}$
$V_{f1} = 9,7\frac{m}{s}$	$V_{f2} = 7,91\frac{m}{s}$
$V_{f1} = 34,92\frac{km}{}$	$V_{f2} = 28,50\frac{km}{h}$

Passo 02: A quantidade de movimento dos veículos V1 e V2 imediatamente após a colisão.

Veículo 01	Veículo 02
$P_{f1} = m_1 v_1$	$P_{f2} = m_2 v_2$
$P_{f1} = 800.9{,}7$	$P_{f2} = 1000.7{,}91$
$P_{f1} = 7760\ kg.\frac{m}{s}$	$P_{f2} = 7910\ kg.\frac{m}{s}$

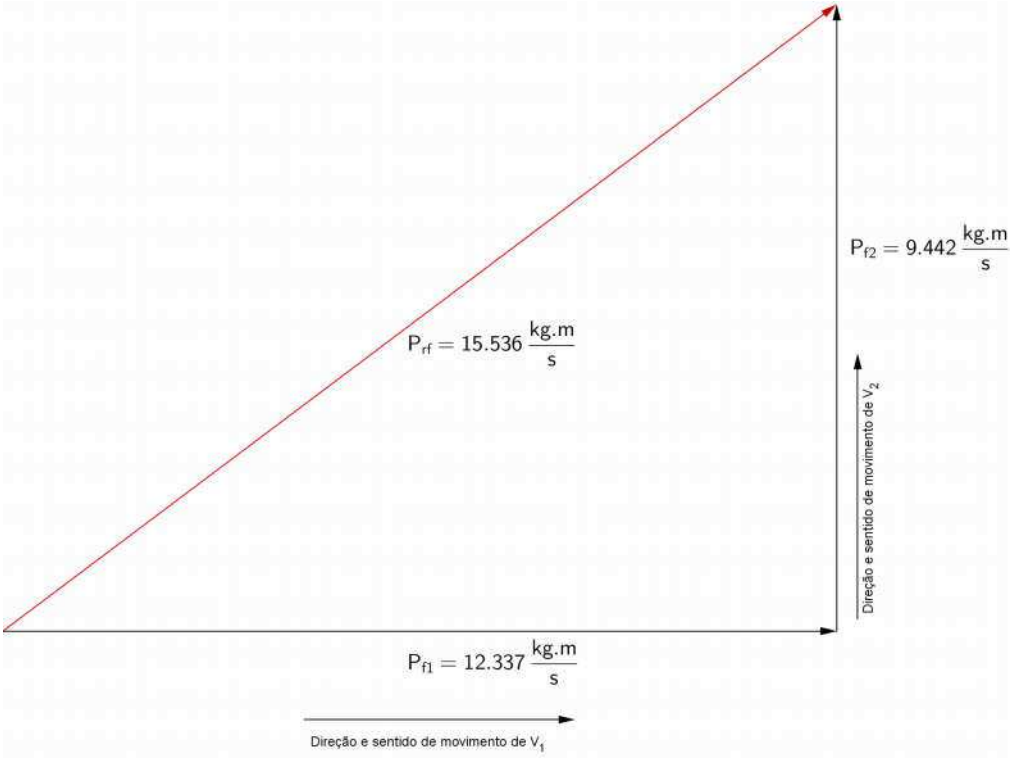
Passo 03: Representação gráfica da soma dos vetores quantidades de movimentos de ambos os veículos, conforme suas dimensões (intensidade, direção e sentido). Nesse exemplo, foi utilizado o geogebra, programa de matemática dinâmica que junta aritmética, álgebra, geometria e cálculo, possibilitando desenhar pontos, vetores e a alterar a dinâmica depois de terminados.



Passo 4: Calculado o vetor quantidade de movimento resultante imediatamente após colisão, inicia-se a análise do momento da colisão. Tomando-se o vetor quantidade de movimento resultante (módulo, direção e sentido), admite-se que, pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, esse vetor encontrado

tem as mesmas características do vetor quantidade de movimento anterior ao momento da colisão.

Traçando a direção e sentido de movimento dos dois veículos traça-se então os vetores quantidade de movimento dos veículos V1 e V2 iniciando na origem do vetor resultante da quantidade de movimento e se realiza a medida de cada uma das componentes da quantidade de movimento inicial de V1 e quantidade de movimento inicial de V2 antes da colisão.



Passo 5: Determina-se então a velocidade no instante da colisão (V_{ic}) para ambos os veículos, a partir da equação .

Veículo 01	**Veículo 02**
$P_{1i(ic)} = m_1 v_{1ic}$	$P_{2i(ic)} = m_2 v_{2(ic)}$
$v_{1ic} = \frac{P_{1i(ic)}}{m_1}$	$v_{i2} = \frac{P_{2i(ic)}}{m_2}$
$v_{1ic} = \frac{12337}{800} \frac{kg.m}{kg.s}$	$v_{i1} = \frac{9442}{1000} \frac{kg.m}{kg.s}$
$v_{i1} = 15{,}42 \frac{m}{s} = 55{,}50 \frac{km}{}$	$v_{i2} = 9{,}44 \frac{m}{s} = 33{,}9 \frac{km}{}$

Passo 6: Como ambos os veículos possuem marcas de frenagem no trecho anterior à colisão, passa-se o incremento dessa parcela de energia à velocidade no instante da colisão determinada no passo anterior, para determinar a velocidade total de cada veículo quando no início.

Veículo 01	**Veículo 02**
$v_{total\,V1} = \sqrt{v_{1ic}^2 + 2\mu g d_{frenagem}}$	$v_{total\,V2} = \sqrt{v_{2ic}^2 + 2\mu g d_{frenagem}}$
$v_{total\,V1} = \sqrt{(15{,}42)^2 + 2.0{,}8.9{,}8.5}$	$v_{total\,V2} = \sqrt{(9{,}44)^2 + 2.0{,}8.9{,}8.12}$
$v_{total\,V1} = 17{,}78\frac{m}{s} = 64{,}00\frac{km}{}$	$v_{total\,V2} = 16{,}65\frac{m}{s} = 60\frac{km}{}$

Passo 7: Calcula-se a energia dissipada devido aos danos decorrentes imediatamente antes da colisão e a seguir calcula-se a energia de cada veículo imediatamente após a colisão. A diferença das energias inicial e final corresponde à energia de dano, o que possibilita a determinação da velocidade de dano de cada veículo, conforme o quadro.

Energia imediatamente antes da colisão	$E_i = \frac{1}{2}mv_{ic}^2$	Verifica a energia de cada veículo imediatamente antes da colisão. É necessário conhecer a velocidade de cada veículo e suas massas
Energia imediatamente após a colisão	$E_f = \frac{1}{2}mv_f^2$	Verifica a energia de cada veículo imediatamente após a colisão, sabendo a velocidade e as massas.
Diferença de energia	$E_d = E_i - E_f$	Decorre dos danos e pode ser calculada para cada veículo
Velocidade de danos	$v_d = \sqrt{\frac{2E_d}{m}}$	É uma referência para avaliar as condições do veículo e sua velocidade e se o método corresponde à realidade

Trecho percorrido	Equação	Veículo V1	Veículo V2
Energia imediatamente antes da colisão	$E_i = \frac{1}{2}mv_{ic}^2$	$E_i = \frac{800 .(15{,}42)^2}{2}$ $E_i = 95.110J$	$E_i = \frac{1000 .(9{,}44)^2}{2}$ $E_i = 44.556J$
Energia imediatamente após a colisão	$E_f = \frac{1}{2}mv_f^2$	$E_f = \frac{800 .(9{,}7)^2}{2}$ $E_i = 37.636J$	$E_f = \frac{1000 .(7{,}91)^2}{2}$ $E_f = 31.284J$
Diferença da Energia decorrente dos danos	$\Delta E = E_i \quad E_f$	$\Delta E = 95110 \quad 37636$ $\Delta E = 57.474J$	$\Delta E = 44.556 \quad 31284$ $\Delta E = 13.272\boldsymbol{J}$
Velocidade do dano equivalente	$v_d = \sqrt{\frac{2E_d}{m}}$	$v_d = \sqrt{\frac{2.57474}{800}}$ $v_d = 11{,}98\frac{m}{s} = 43{,}15\frac{km}{h}$	$v_d = \sqrt{\frac{2.13272}{1000}}$ $v_d = 5{,}15\ \frac{m}{s} = 18{,}55\frac{km}{h}$

Resultado final da análise da velocidade obtida pelo princípio da conservação da quantidade de movimento:

Trajetória analisada	Veículo 1	Veículo 2
Velocidade de tráfego imediatamente antes do processo de frenagem - ($v_{tráfego}$)	64,00 km/h	60 km/h
Velocidade no instante da colisão ($v_{instante\ da\ colisão}$)	55,50 km/h	33,90 km/h
Velocidade de danos (v_{danos})	43,15 km/h	18,55 km/h
Velocidade após a colisão v_{final})	34,92 km/h	28,50km/h

Resultado final da análise da energia nos instantes imediatamente antes da colisão e imediatamente após a colisão.

Trajetória analisada		Veículo 1	Veículo 2	Total
Antes da colisão	E_i	95.110J	44.556J	139.666J
Após a colisão	$E_{danos} + E_f$	(57.408+37.636)J = 95.044J	(13.261+31.284)J = 44.545J	139.589J

4.6 Cálculo da velocidade de veículo após choque mecânico em objeto rígido móvel.

Suponha uma colisão de um veículo contra um obstáculo rígido sendo que, após o impacto, verifica-se que o obstáculo permaneceu imóvel durante o choque (o impacto não foi suficiente para romper a força de atrito entre o obstáculo e a superfície). Qual seria a velocidade de impacto desse veículo?

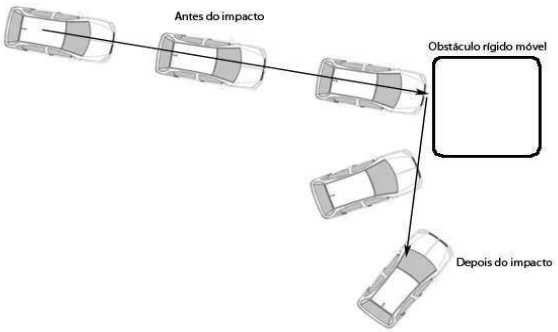


Figura 27: Choque em obstáculo rígido móvel

Para esse tipo de acidente muito comum, a velocidade pode ser determinada pela soma das parcelas de energia representadas pela velocidade em cada trecho analisado. Como o obstáculo ficou imóvel, a melhor opção para se determinar cada parcela da velocidade é pela equação:

$$v = \sqrt{2\mu g d_{frenagem})}$$

Acrescenta-se a velocidade de danos, conforme a avaria sofrida pelo veículo

$$\mathbf{V_i} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \ldots v_d^2}$$

Mas se após a colisão, a força de atrito estática é superada e o objeto sofre um deslocamento em razão do embate, como sugere a figura abaixo. Nesse caso, a velocidade pode ser calculada com a determinação da energia necessária para romper a força de atrito estática, devido a força aplicada pelo veículo colidente. Conforme definição matemática das leis newtoniana:

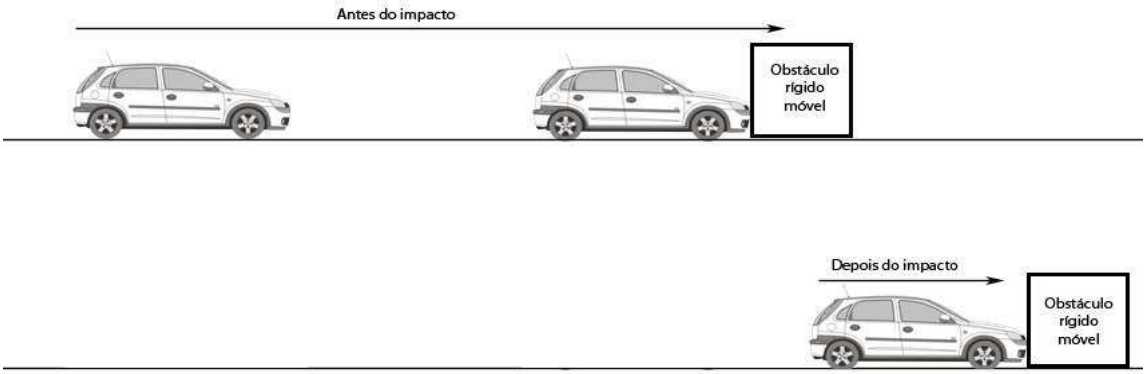
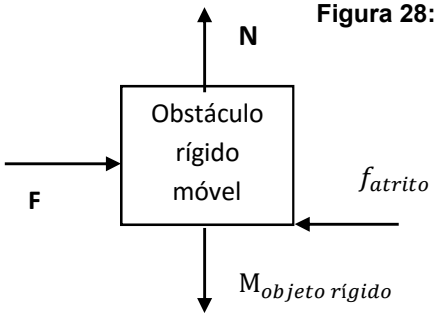


Figura 28: Choque em obstáculo rígido móvel



Considerando o plano horizontal.

Em relação ao obstáculo:

$N = P = Mg$ (M = massa o objeto rígido)

$f_{at} = \mu.\mathrm{N} = \mu.\mathrm{M}.g$

O trabalho necessário para fazer com que o objeto se deslocasse foi em virtude da força aplicada, sendo que, para o objeto rígido se mover, foi necessário uma energia mínima para romper a força de atrito estática.

$W = \boldsymbol{F}.\Delta r$

Então a força F passa a ser representada pela força de atrito.

$W = f_{at}.\Delta r$

$W = \mu.M.g.\Delta r$

A energia necessária para mover o obstáculo depende então da força de atrito, que é uma característica da superfície do material do objeto rígido e da superfície de contato. Logo, o trabalho realizado para deslocar o objeto em questão foi em virtude da velocidade do veículo colidente, logo todo o trabalho realizado foi proveniente da energia cinética.

$E_c = \mu.M.g.\Delta r$

$\frac{1}{2}m_v V^2 = \mu.M.g.\Delta r$ (m_v = massa do veículo colidente e V a sua velocidade no momento da colisão)

$V = \sqrt{\frac{2.\mu.M.g.\Delta r}{m_v}}$ (m/s)

Essa equação relaciona a parcela da velocidade do veículo com o deslocamento do objeto rígido móvel. Se houver outras parcelas de velocidade, como de frenagem, esta deve ser acrescentada.

5. Conclusão

O fenômeno trânsito, mais precisamente os acidentes, é assunto para se discutir diuturnamente. Dentre os exemplos mostrados de acidentes, outros tipos poderiam ser analisados sob os aspectos físicos como atropelamentos, quedas de veículos em depressões, acidentes com motociclistas em que há o arremesso do piloto sobre o capô do veículo pela inércia, enfim, cada acidente possui uma dinâmica a ser analisada. Os números estatísticos mostram uma tendência no aumento dos acidentes envolvendo veículos. Na maioria deles não há o comparecimento de profissional para fazer a análise do evento ocorrido. A essência do trabalho foi mostrar que a mecânica newtoniana é ferramenta fundamental para análise da dinâmica dos acidentes e na identificação de suas causas. Quanto maior o número de acidentes maior também o número de ações no judiciário e um dos pontos fundamentais nessas ações é definir quem deu causa ao acidente. A falta de um laudo pericial sobre as causas de um acidente influenciará no tempo de tramitação dos procedimentos judiciais, pois os operadores do direito ficam sem elementos probatórios importantes para a formação de uma decisão final. Dado as

características, nem sempre laudos indiretos ou declarações testemunhais são suficientes para a formação de convicção de Juízes ou Promotores. A realidade mostra que os números de acidentes são preocupantes e ações educativas em todos os setores são imprescindíveis. O ideal é que o acidente não aconteça, mas em acontecendo, todos os esforços para a sua solução por completo começa logo, imediatamente após o fato. A física forense é uma realidade, pois se utiliza dos métodos científicos para contribuir na solução de conflitos. A tecnologia de imagem com o uso de câmeras fixadas ao longo das vias é um importante instrumento que contribui na elaboração de laudos, podendo constituir-se em mais uma prova importante na composição de um processo judicial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Lino Leite. *Manual de pericias em acidentes de trânsito* – Campinas, SP, Millenium editora, 2011

ALONSO, M.S. e FINN, E. J. *Física* – Edgard Buucher editora, 1972

ARAGÃO, Ranvier Feitosa. *Acidentes de trânsito* – 3ª Ed. Campinas, SP; Millenium editora 2003.

RIZZARDO, Arnaldo. *A reparação nos acidentes de trânsito.* 10ª Ed. São Paulo

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, j. *Fundamentos da Física* vol.1 4ª ed. Rio de Janeiro, LTC 1996

ARAGÃO, Ranvier Feitosa. *Acidentes de trânsito – Aspectos técnicos e jurídicos*. 3ª Ed. Campinas: Millennium Editora, 2003

CAPEZ, Fernando. *Curso de Direito Penal* – parte geral. São Paulo: Saraiva 2010

GONÇALVES, Carlos Roberto. *Direito Civil esquematizado* v.1, 2ª Ed. São Paulo, Saraiva 2012

GRECO, Rogério. *Curso de Direito Penal* – 14ª Ed. Rio de Janeiro: Impetus, 2012

MCKELVEY, J.; GROTCH, H. Física, São Paulo, editor Haper e How do Brasil, 1979

INTERNET - Sitio do Departamento Estadual de Estradas e Rodagem do Estado de Minas Gerais – DER/MG - http://*www.der.mg.gov.br*

INTERNET - Sítio do Ministério das Cidades, Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN, Sistema Nacional de Registro de Veículos / RENAVAN - *http://www.denatran.gov.br/consultas_online.htm*

INTERNET - Sítio da Polícia Militar do Estado de São Paulo

http://www.polmil.sp.gov.br/unidades/cprv/acidente.asp