

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE VIAS DE TRANSPORTE E TOPOGRAFIA - STT

STT-134 TRANSPORTES I

NOTAS DE AULA SOBRE TECNOLOGIA DOS TRANSPORTES

CAPITULO 3

VEÍCULOS - TIPOS, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS,
MECÂNICA DE LOCOMOÇÃO,
CARACTERÍSTICAS DAS TRAJETÓRIAS,
PREVISÃO DE DESEMPENHO.



JOÃO ALEXANDRE WIDMER

SÃO CARLOS - 1987

Publicação 025/87

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS - Nos termos da Lei que resguarda os Direitos Autorais, é proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho, de qualquer forma ou por qualquer meio - eletrônico ou mecânico, inclusive através de processos xerográficos, de fotocópia e de gravação - sem permissão, por escrito, do(s) autor(es).

3. VEÍCULOS.

3.1. Tipos de Veículos.

Os veículos podem ser classificados segundo o grau de divisibilidade em vários tipos de unidades. Em um extremo tem-se o veículo constituído de uma única unidade que desempenha todas as funções, ou seja, contém os passageiros e/ou a carga, dá mobilidade e da locomoção. Exemplos desse tipo de veículo são os automôveis, ônibus simples, caminhões unitários, furgões, aviões e navios. Um veículo um pouco diferente desse primeiro tipo, é o constituído por um caminhão unitário com um reboque (Romeu e Julieta), o reboque da mobilidade à carga que contém, mas não lhe dá locomoção. Outro tipo de caminhão é o constituído por um cavalo mecânico e uma carreta, que só tem mobilidade quando acoplada ao cavalo mecânico. Um veículo que também se desloca sobre rodas e que é diferente de todos os acima é o trem de carga convencional, onde a unidade de locomoção é completamente separada do restante do veículo, composto por vagões que acomodam a carga e lhe dão mobilidade.

Com exceção dos veículos de transporte de passageiros a maioria dos tipos de veículos de transporte de carga pode também ser classificado quanto à forma em que a carga é acondicionada. Existem basicamente duas formas; a carga é acondicionada no próprio compartimento de carga do veículo (cujas características são função do tipo de carga para o qual foi projetado), ou a carga é acondicionada em dispositivos de unitização de carga que são colocados sobre uma plataforma de carga do veículo.

São muitas as razões porque o homem projetou e construiu tantas alternativas tecnológicas em termos de veículos de transporte. O advento dos dispositivos de unitização de carga destacáveis dos veículos por exemplo, resulta do fato de que é comum o tempo de carregamento e descarregamento de veículos com grande volume de carga para longas viagens, ser relativamente demorado, sendo observados tempos normais de algumas horas até dias de duração para um veículo totalmente carregado. O dispositivo de unitização de cargas, que pode ser descarregado rapidamente, libera o veículo (que constitui a parte cara da tecnologia) para executar outras viagens, enquanto se processa o carregamento/d Descarregamento do(s) disposi-

tivo(s) que transporta. Já um serviço local de entregas de pequenas parcelas de carga para muitos destinatários, onde o carregamento e o descarregamento por destinatário é bastante rápido, não necessita dessa tecnologia, pois ela não traz nenhuma vantagem técnica ou econômica para o processamento da carga.

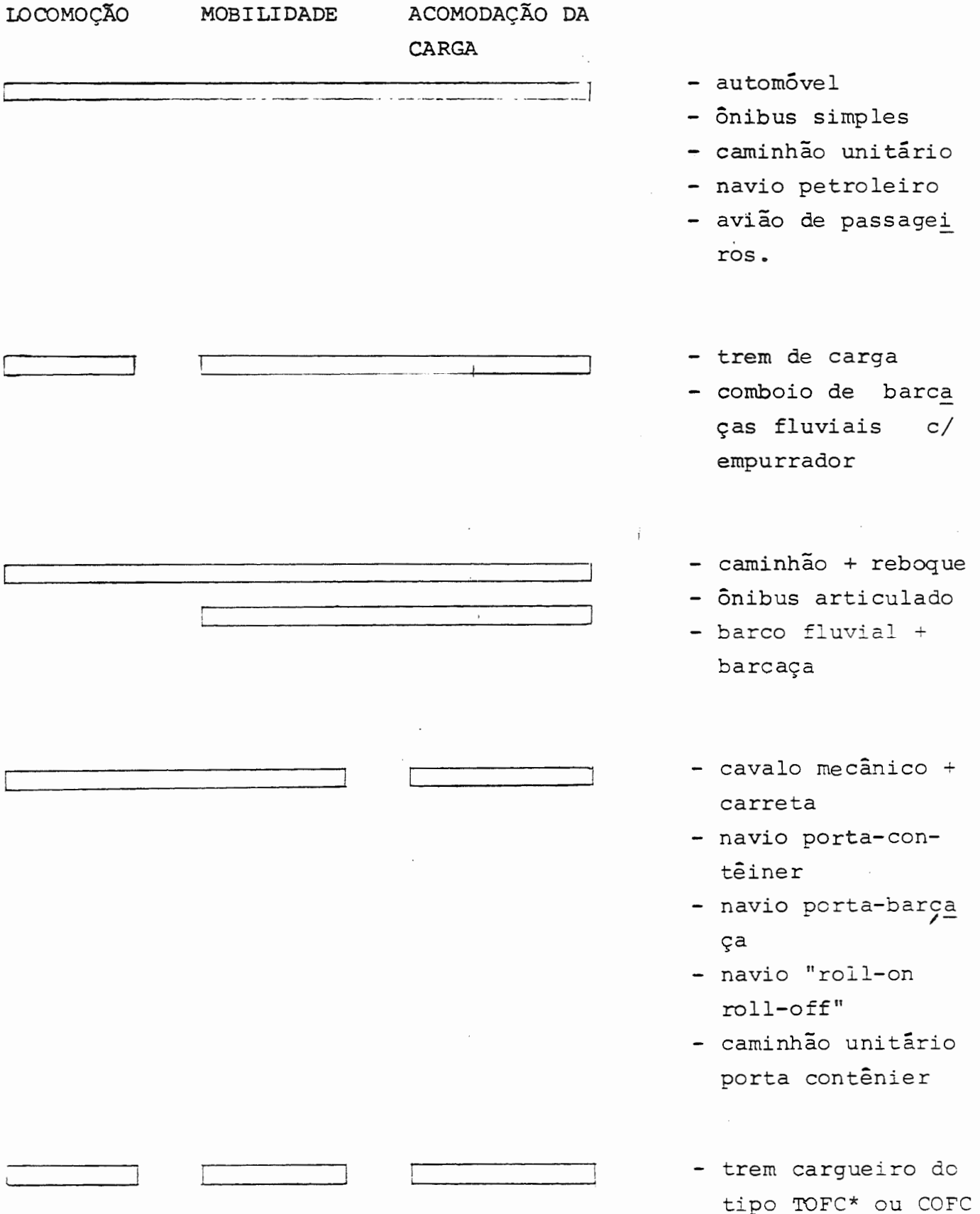
A tecnologia de trens de veículos (e.g. trem ferroviário, caminhão unitário mais reboque) além de oferecer algumas vantagens do tipo descrito acima para o uso de dispositivos de unitização de carga, justifica-se em geral por problemas tecnológicos de dirigibilidade do veículo ao longo da via (e.g. caminhões longos em curvas). Além dessas vantagens, trens de veículos permitem em geral economias em termos de pessoal necessário para operar o veículo por volume de carga transportado, e no caso de ferrovias e barcaças, aumentam de uma forma geral, a capacidade de transporte da via devido à redução de conflitos de tráfego de veículos.

Dependendo da carga transportada, e principalmente no transporte de passageiros, veículos de grande capacidade de carga podem ter a desvantagem de, através do seu emprego, ser oferecido um número menor de viagens, o que no caso de transporte de passageiros por exemplo, pode ser inconveniente. Esse inconveniente é a principal razão da progressiva substituição da modalidade ferroviária, pela modalidade ônibus no transporte interurbano de passageiros no Brasil.

Como se pode notar, a escolha da tecnologia de veículo adequada a um determinado problema de transporte, depende de um grande número de variáveis do sistema e do meio ambiente em que ele funciona, sendo essencial para o sucesso na escolha, a correta identificação do tipo de serviço demandado pelos potenciais usuários do sistema. No transporte urbano de grandes quantidades de pessoas por exemplo, como é o caso em grandes áreas metropolitanas, a tecnologia de trens de veículos é muitas vezes a única solução viável técnica e economicamente.

A figura 3.1 apresenta uma concepção esquemática dos tipos de unidades que constituem um veículo, cuja função como se viu anteriormente, é acomodar o objeto transportado e dar-lhe mobilidade e locomoção.

FIGURA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS SEGUNDO A INTEGRAÇÃO DE SEUS COMPONENTES FUNCIONAIS.



*TOFC - "trailer on flat car"; COFC - "container on flat car"

3.2. Características Físicas de Veículos

3.2.1. Peso de veículos.

No planejamento e projeto de sistemas de transporte vários componentes do peso dos veículos são importantes. Para a análise da produtividade de sistemas e dimensionamento de terminais, é preponderante a capacidade de carga dos veículos, enquanto que para o projeto das vias, o fator importante é em geral o peso global. No caso de aviões, onde o peso do combustível consumido em uma viagem pode atingir da ordem de 1/3 do peso total na decolagem, essa parcela é um importante componente, enquanto em outras modalidades o combustível não é considerado como um componente relevante.

O problema com os componentes de peso de veículos é que cada tecnologia desenvolveu nomenclatura própria para os componentes, dificultando o entendimento do seu significado. Nesse sentido apresenta-se a seguir, uma descrição dos principais componentes com os seus nomes usuais por modalidade e o seu significado.

veículos rodo-ferroviários

PESO ÚTIL - peso da carga transportada pelo veículo

PESO ÚTIL MÁXIMO = LOTAÇÃO - capacidade máxima em peso que o veículo pode transportar em acordo com suas características de projeto e construção.

PESO MORTO = TARA - é o peso do veículo em condições operacionais básicas (não inclui o peso da carga, mas em geral inclui combustível e pessoas necessárias à operação do veículo).

PESO BRUTO = PESO TOTAL = PESO ÚTIL + TARA

PESO BRUTO MÁXIMO = é o peso máximo legal do veículo carregado.

veículos hidroviários

PESO ÚTIL = "DEADWEIGHT" DE CARGA = DWT DE CARGA - é o equivalente ao peso útil de veículos rodo e ferroviários.

PESO DO NAVIO LEVE = PESO OPERACIONAL BÁSICO DA EMBARCAÇÃO - é o peso do veículo em condições operacionais básicas sem carga.

DESLOCAMENTO = PESO BRUTO = PORTE BRUTO = "DEADWEIGHT" = DWT =
= DWT DE CARGA + PESO DO NAVIO LEVE.

veículos aéreos

dadas as suas características tecnológicas complexas, são os veículos que possuem o maior número de componentes relevantes do peso.

CARGA PAGA = PESO ÚTIL - é o peso da carga transportada pelo veículo.

CARGA PAGA MÁXIMA - é o equivalente ao peso útil máximo de veículos rodo e ferroviários.

PESO OPERACIONAL BÁSICO - POB = é o peso do avião equipado sem combustível (problema que o combustível constitui uma parcela ponderável do peso bruto).

PESO BRUTO DE DECOLAGEM = POB + CARGA PAGA + PESO DO COMBUSTÍVEL - onde o peso do combustível é função da distância da via gem. É interessante salientar que o PESO BRUTO MÁXIMO DE DECOLAGEM não corresponde na maioria dos aviões, à somatória de POB com CARGA PAGA MÁXIMA e CAPACIDADE MAX DOS TANQUES DE COMBUSTÍVEL, mas sim a uma condição de limite estrutural do avião.

PESO MÁXIMO ZERO COMBUSTÍVEL - também é uma limitação estrutural, ou seja, mesmo que a capacidade volumétrica dos porões não tenha sido atingida, a somatória de POB + CARGA PAGA não pode exceder esse valor. Em outras palavras, é possível que um aumento de POB implique uma diminuição da CARGA PAGA MÁXIMA.

PESO MÁXIMO DE POUSO - é uma limitação estrutural do trem de pouso que impõe às vezes que uma determinada parcela de combustível precisa ser consumida ou alijada, antes que a aeronave possa pousar em segurança.

OBSERVAÇÃO - quando se analisa a capacidade de transporte de um veículo, é comum ocorrer uma limitação de capacidade volumétrica do compartimento de carga (projetado para uma determinada massa específica média da carga a ser transportada), de forma que essa capacidade seja limitante do PESO ÚTIL. Em outros casos entretanto, pode ocorrer que o peso útil máximo seja atingido antes de se ocupar toda a capacidade volumétrica disponível. Por essa razão, veículos de uma mesma modalidade têm as vezes, características bastante diferenciadas, quer sejam projetados para transporte de cargas de massa específica relativamente elevada (e.g. navios petroleiros, navios graneleiros, caminhões para transporte de areia ou pedra britada), ou cargas de massa específica relativamente baixa (e.g. navios porta contêiner, caminhões para transporte de cana).

3.2.2. Dimensões de veículos.

Assim como os pesos, também algumas dimensões características são fundamentais para o projeto de diversos componentes de sistemas de transporte. Particularmente o projeto de vias, interseções e terminais está intrinsecamente relacionado com as dimensões e as características tecnológicas que determinam as trajetórias viáveis para cada tipo de veículo.

Por outro lado, a partir de um determinado nível de investimento em infraestrutura de determinadas modalidades, as características dessa infraestrutura passam também a constituir fator importante no dimensionamento dos veículos. Por exemplo, o elevado nível de investimento realizado em rodovias e o elevado grau de normalização a nível internacional desse componente de infraestrutura de transporte já na primeira metade do século XX, fez com que todas as novas tecnologias de veículos rodoviários fossem desenvolvidas de forma a permitir que os veículos trafegassem pela infra-

estrutura já existente, o que levou a uma forte semelhança dimensional dos veículos rodoviários. Essa mesma característica não é observada por exemplo, no transporte aéreo e no transporte hidroviário marítimo, onde aspectos econômicos dominantes, conduziram a uma profunda alteração nas características dimensionais dos veículos ao longo do tempo.

Os fatores determinantes das características dimensionais de veículos são:

- limitações tecnológicas de construção (e.g. grandes aviões, superpetroleiros);
- limitações impostas pela infraestrutura existente para cada modalidade;
- condições de estabilidade do veículo;
- condições de controle do veículo;
- eficiência energética do veículo;
- eficiência econômica do veículo.

Em função desses fatores dominantes, os órgãos responsáveis pelo planejamento, financiamento, projeto, construção e operação de sistemas de transporte ou seus componentes, constituem comissões com o objetivo de normalizar as características dimensionais tanto dos veículos, como dos componentes de infraestrutura.

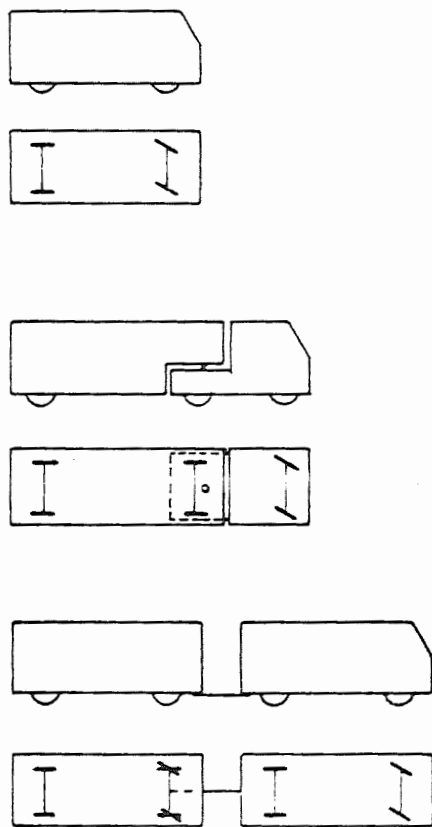
De forma generalizada as características dimensionais dos veículos interferem no projeto da infraestrutura como segue:

- larguras de vias (rodovias, ferrovias, hidrovias, pistas de pouso e de rolamento de aviões no solo);
- curvas horizontais (rodovias, ferrovias, hidrovias, pistas de rolamento de aviões no solo).
- sobrelargura de vias (rodovias, hidrovias, pistas de rolamento de aviões no solo);
- profundidade de canais (hidrovias);
- curvas verticais (valetas e lombadas de rodovias urbanas, rampas de estacionamentos em nível de veículos rodoviários).

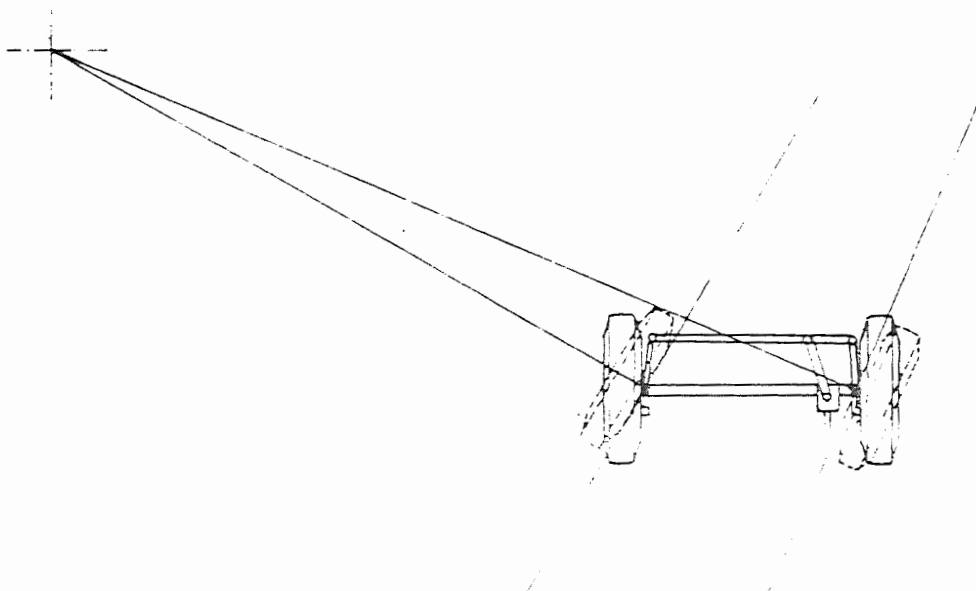
Apresentam-se a seguir as dimensões características de veículos por modalidade de transporte com os nomes usuais adotados para cada dimensão, e uma descrição da influência de cada dimensão ou conjunto de dimensões, no projeto geométrico de vias, interseções e terminais.

3.2.2.1. Veículos rodoviários.

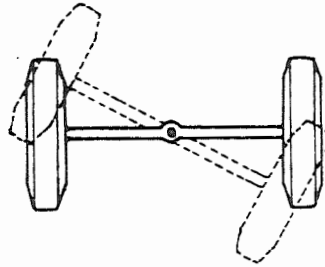
Veículos rodoviários têm genericamente uma das três formas abaixo:



onde os eixos representados por I não tem articulação e os eixos representados por I tem uma articulação que, no veículo trator atua como mostrado na figura abaixo

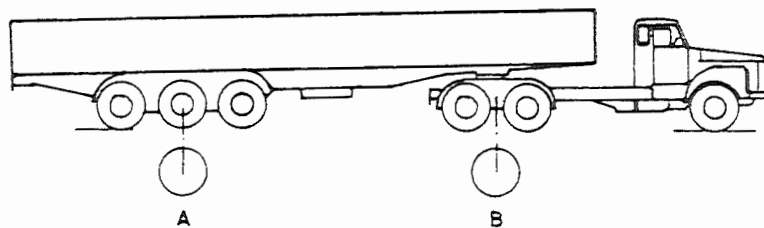


e no veículo rebocado atua, ou como no veículo trator, ou girando o conjunto eixo + rodas em torno de uma articulação central.



Em termos práticos para projeto de obras civis não é necessário fazer distinção entre as formas de articulação, sendo o primeiro tipo o mais adequado para curvas de pequeno raio, dado que existe no sistema de direção de um veículo uma geometria do mecanismo que provoca uma deflexão diferenciada das rodas para compensar a diferença dos raios das trajetórias percorridas. Utilizaremos na nossa explanação apenas esse tipo de articulação.

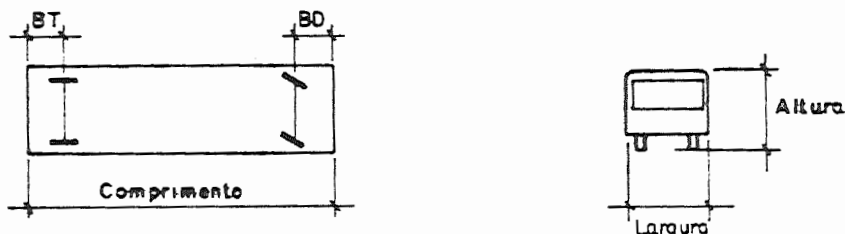
Quanto aos eixos fixos é comum veículos mais pesados possuírem dois ou mais eixos fixos em tandem por razão de distribuição de peso sobre o pavimento das vias.



Em termos de geometria da trajetória esses conjuntos de eixos são substituídos por um eixo equivalente que passa pelo centro geométrico do conjunto. (Pontos A e B).

As seguintes situações precisam ser consideradas em projetos geométricos de vias interseções e terminais:

movimento retilíneo horizontal e/ou veículo estacionado:



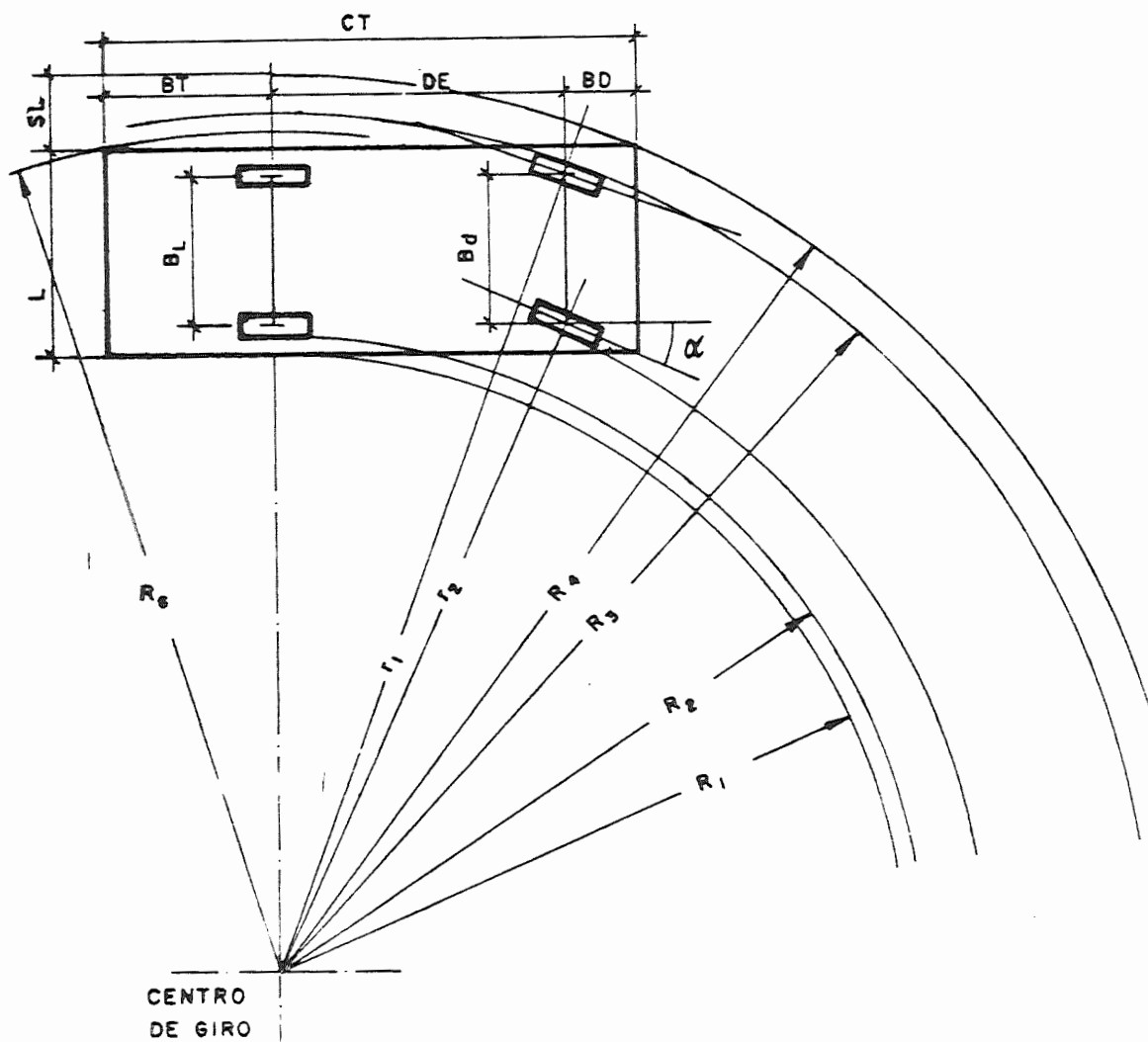
as dimensões relevantes são as três dimensões básicas, que são acrescidas de folgas necessárias para garantir a segurança da operação quando o veículo está em movimento e a possibilidade de entrar e sair de uma posição de estacionamento.

No caso de estacionamento contra anteparos (guias) é necessário considerar também o balanço dianteiro BD ou o balanço trazeiro BT.

movimento curvilíneo horizontal:

este movimento depende da forma do veículo. No caso do veículo unitário a geometria do traçado tem a forma apresentada na figura 3.2.

FIGURA 3.2. - MOVIMENTO CURVILÍNEO HORIZONTAL - VEÍCULO UNITÁRIO



onde

r_1 e r_2 - são respectivamente os raios das trajetórias descritas pela roda externa e interna.

R_1 - raio do ponto extremo interno à curva.

R_2 - raio crítico da roda interna.

R_3 - raio crítico da roda externa.

R_4 - raio do ponto extremo dianteiro.

R_5 - raio do ponto extremo traseiro.

SL - sobre largura da via necessária na curva.

As dimensões relevantes do veículo para permitir o traço dos arcos circulares também são mostradas na figura e são as seguintes:

CT = comprimento total.
BT = balanço traseiro
DE = distância entre eixos (eixos equivalentes no caso de multi-eixos).
BD = balanço dianteiro.
L = largura do veículo.
 B_t = bitola traseira.
 B_d = bitola dianteira.
 α = angulo de deflexão da direção.

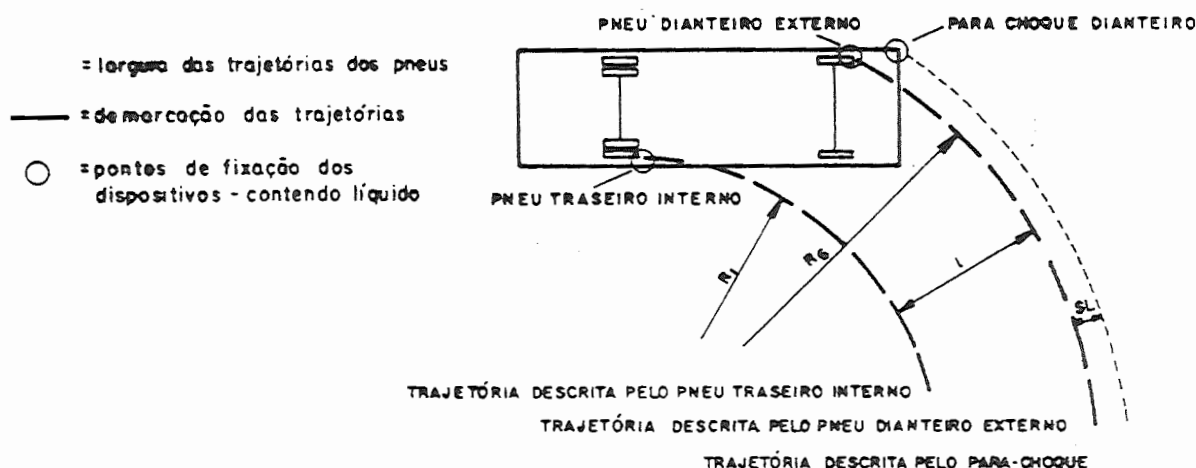
Na determinação de raios mínimos de giro que são relevantes no projeto de vias urbanas, em particular interseções urbanas, e no projeto de terminais (estacionamentos, pátios de manobra), é necessário considerar que precisa haver uma transição do trecho reto para o trecho curvo e que o condutor do veículo não consegue girar a direção instantaneamente (normalmente admite-se uma velocidade angular constante). Também é necessário considerar que em função do coeficiente de atrito pneu/via ocorre um certo escorregamento lateral das rodas. Assim, testes são realizados com veículos típicos para a determinação de correções necessárias para raios de giro mínimo.

Metodologia Utilizada para Execução dos Testes de Raios de Giro Mínimo.

Como pode-se observar na figura abaixo o gabarito de desenvolvimento de curvas horizontais é a capacidade mínima de manobra descrita pelas trajetórias de três pontos básicos do veículo, a saber:

- pneu dianteiro externo que determina o raio de giro externo (R_e), condicionado pelo entre-eixo;
- pneu traseiro interno que determina o raio de giro interno (R_i), depende diretamente da bitola;
- ponto dianteiro (traseiro) externo mais sobressalente, geralmente para-choque, que determina a sobrelargura (SL) definido pelo balanço dianteiro (traseiro). O caso de sobrelargura mais comum do ponto dianteiro externo está apresentado no exemplo.

Os efeitos da força centrífuga, do coeficiente de atrito e da característica do motorista são minimizados pela velocidade baixa e constante com que forem executados os testes de raio de giro mínimo.



A partir desses ensaios com veículos típicos que trafegam na malha viária adota-se normalmente um gabarito único de raio de giro.

A Figura 3.3 ilustra um gabarito para automóveis e utilitários baseado nas características geométricas do Chevrolet-Opala.

Os dados geométricos dos outros veículos analisados são apresentados na tabela 3.1.

FIGURA 3.3 - GABARITO DE CURVA HORIZONTAL COM RAIO MÍNIMO PARA AUTOMÓVEIS E UTILITÁRIOS.

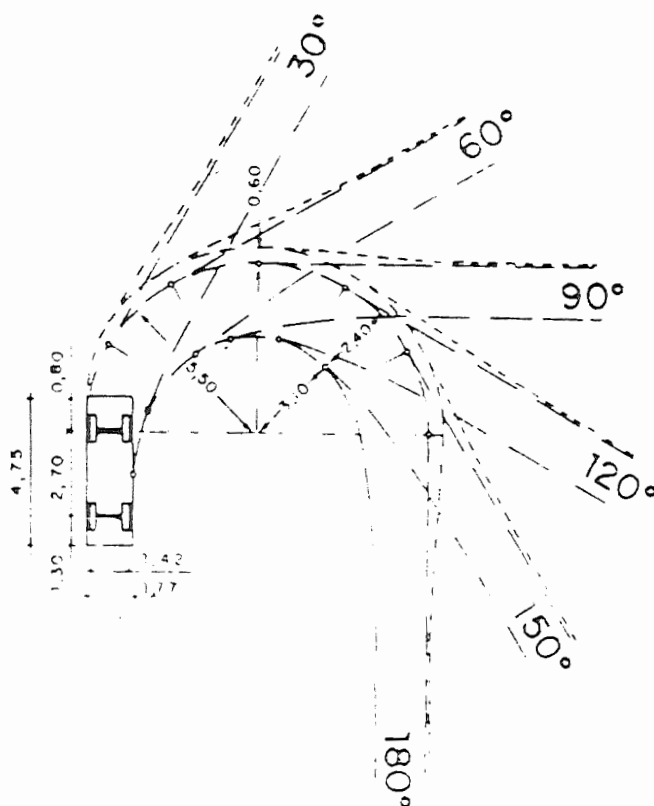


TABELA 3.1 - RAIOS DE GIRO MÍNIMO PARA AUTOMÓVEIS E UTILITÁRIOS

TIPO DE VEÍCULO	COMPRI- MENTO (m)	ENTRE EIXO (m)	BALANÇO		LARG (m)	BITOLA		RAIOS DE GIRO CALCULADOS COM R ₁ = 3,10 m				
			DIANT (m)	TRAS (m)		DIANT (m)	TRAS (m)	(Rp) (m)	(Re) (m)	SOBRE- LARGURA (m) (SL)	LARG DA TRAJET (l)	
PASSEIO-GRANDE												
⊗ Beira II (LDO)	4,522	2,435	0,927	1,157	1,676	1,367	1,333	5,84	5,21	0,69	2,11	
⊗ Caravan	4,675	2,557	0,772	1,257	1,730	1,420	1,410	5,93	5,38	0,55	2,28	
⊗ Alfa Romeo	4,719	2,717	0,820	1,182	1,692	1,397	1,400	5,96	5,38	0,57	2,28	
⊗ Opala (Diplomata)	4,740	2,657	0,772	1,301	1,766	1,432	1,422	5,96	5,40	0,56	2,30	
⊗ Ford Landau	5,413	3,023	0,904	1,504	1,991	1,575	1,575	6,44	5,75	0,69	2,65	
UTILITARIO												
⊗ Kombi	4,397	2,400	1,070	0,927	1,746	1,387	1,432	5,96	5,27	0,69	2,17	
⊗ Kombi (Diesel)	4,437	2,400	1,070	0,957	1,746	1,387	1,420	5,96	5,26	0,70	2,14	

De forma análoga foram produzidos os gabaritos apresenta-
dos nas figuras 3.4 a 3.6.

Como os problemas de projeto mais comuns envolvem veícu-
los do tipo unitário, apresentam-se nas tabelas 3.2 a 3.4 alguns
dados característicos desses tipos de veículos.

O caso de veículos compostos é um pouco mais complexo.

Normalmente o projeto geométrico de movimentos curvilí-
neos é realizado para um veículo crítico para o projeto específi-
co.

O processo é semelhante ao apresentado para o veículo
unitário só que depende adicionalmente do tipo e da localização re-
lativa do(s) ponto(s) de articulação.

As figuras 3.7 e 3.8 ilustram o processo gráfico que per-
mite determinar as trajetórias dos pontos críticos do ponto de
vista do projeto da via e de seus acostamentos.

FIGURA 3.4 - GABARITO DE CURVA HORIZONTAL COM RAIOS MÍNIMO PARA CAMINHÕES UNITÁRIOS LEVES E MICRO-ÔNIBUS (PBT ≤ 8 t).

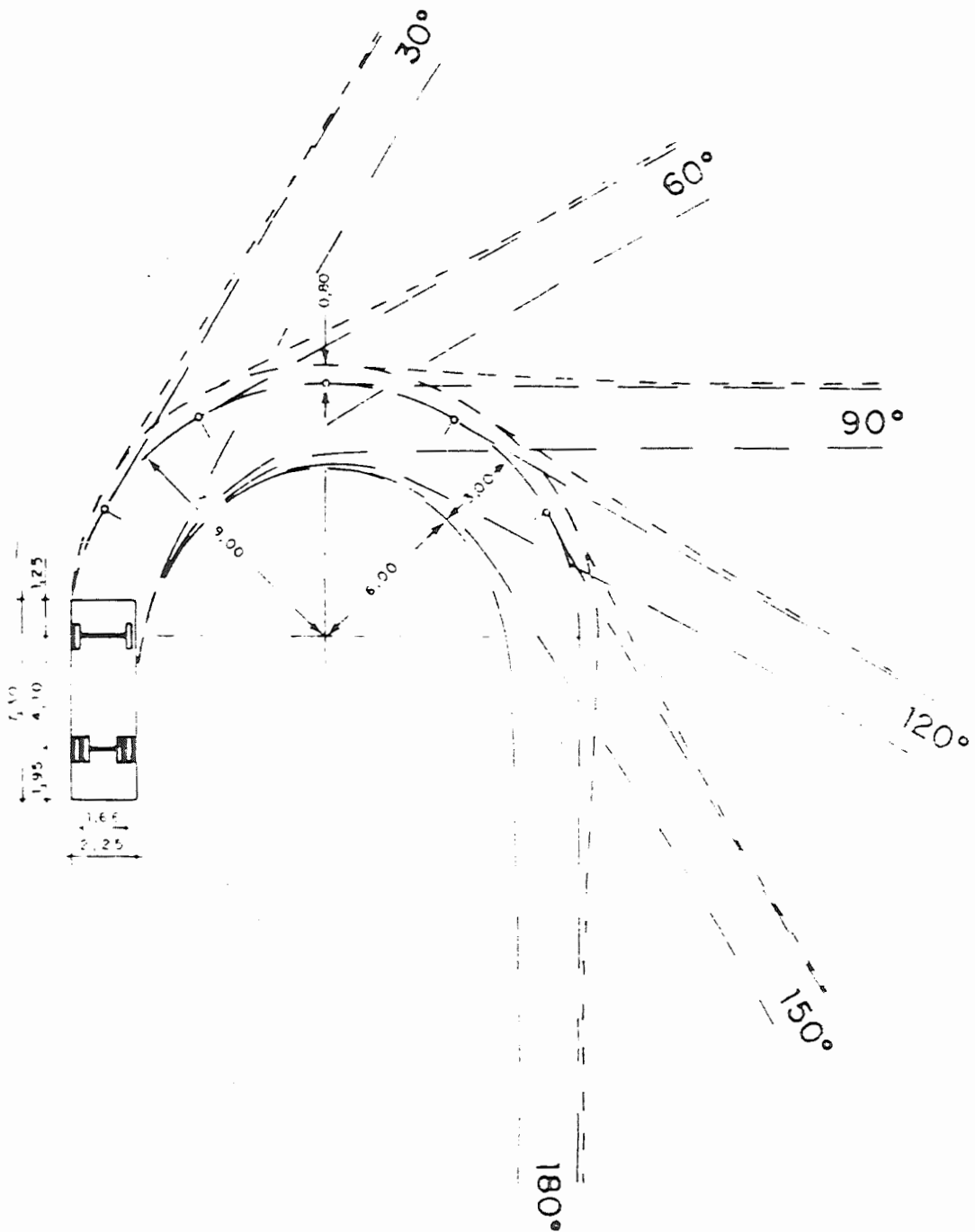


FIGURA 3.5 - GABARITO DE CURVA HORIZONTAL COM RAIOS MÍNIMO PARA CAMINHÕES UNITÁRIOS MÉDIOS ($8 < \text{PBT} \leq 15 \text{ t}$).

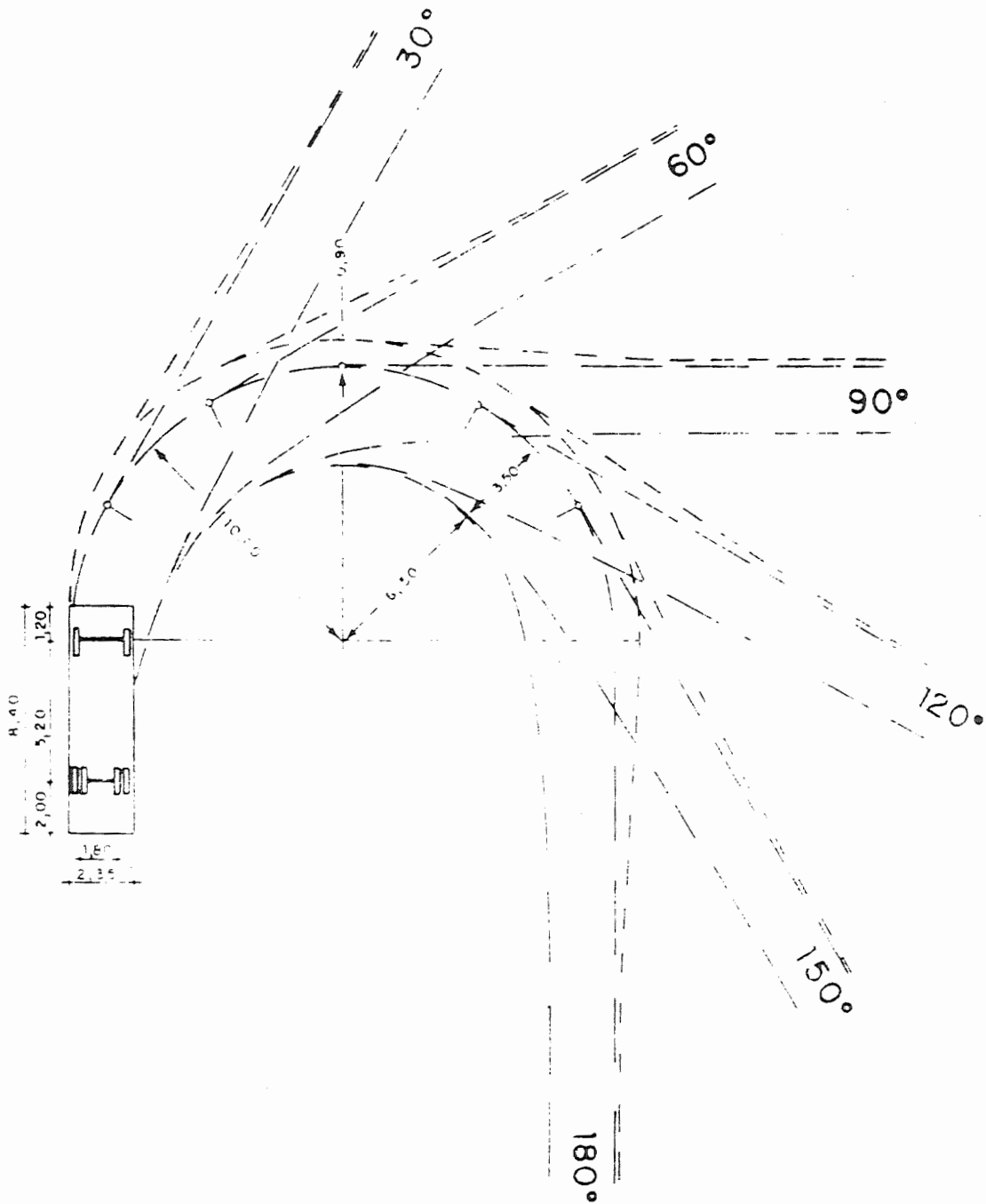


FIGURA 3.6 - GABARITO DE CURVA HORIZONTAL COM RAI0 MÍNIMO PARA ÔNIBUS URBANO SIMPLES.

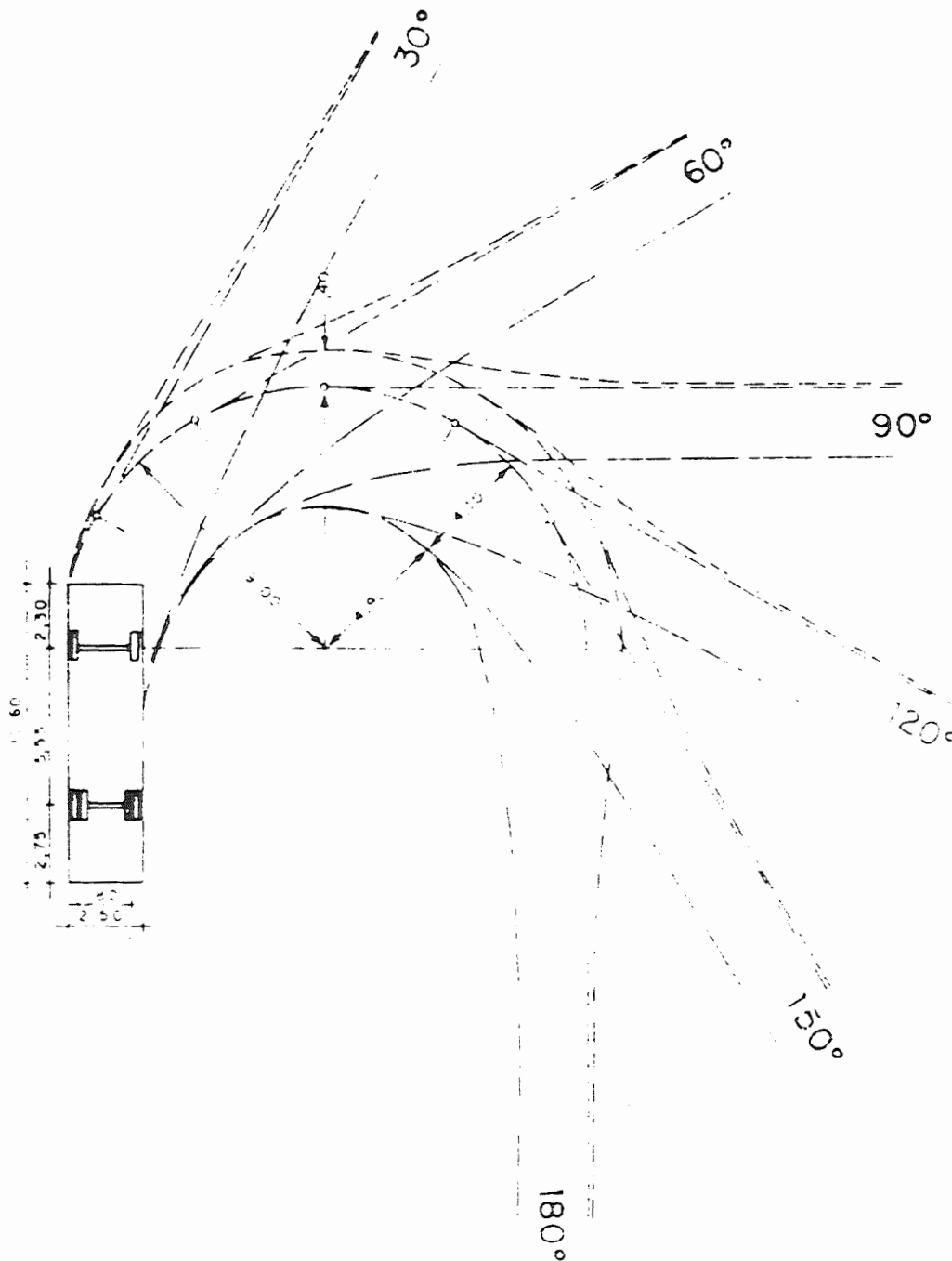
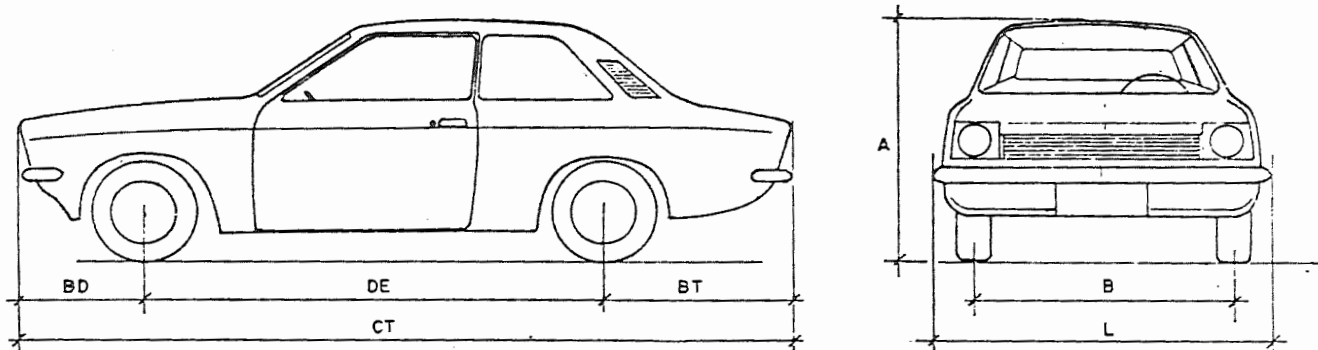


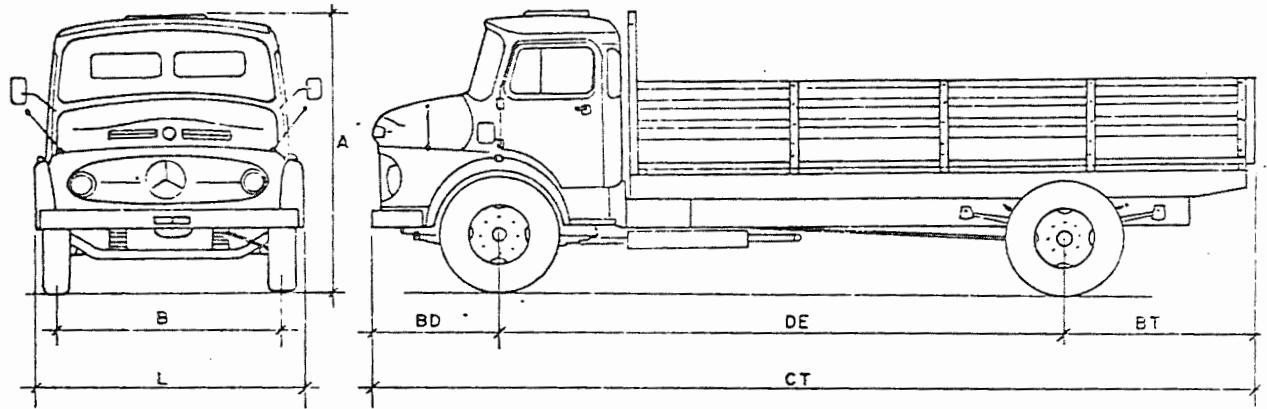
TABELA 3.2 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE VEÍCULOS DE PASSEIO E UTILITÁRIOS



TIPOS DE VEÍCULOS	COMP. (m) CT	ENTRE EIXOS (m)	BALANÇO (m)		LARGURA (m) L	BITOLA (m)		R. DE GIRO P. CHOQUE DIANT. (m)
			DIANTEIRO BD	TRAS. BT		DIANTEIRO B	TRAS. B	
1. AUTOMÓVEL PEQUENO								
● Furgão (147)	3.712	2.225	0.729	0.758	1.545	1.276	1.300	4.80
● Fiat. 147	3.734	2.225	0.725	0.784	1.545	1.276	1.300	4.80
● Fiorino Pick-Up	3.787	2.225	0.637	0.925	1.545	1.284	1.300	4.80
● Gol	3.790	2.358	0.766	0.666	1.601	1.350	1.366	4.85
● Fiat Fianova	3.916	2.225	0.725	0.966	1.545	1.276	1.300	4.80
● Chevette Hatch	3.972	2.438	0.757	0.777	1.570	1.300	1.300	4.90
● Brasília	4.040	2.400	0.772	0.868	1.606	1.326	1.361	5.55
● VW 1300	4.050	2.400	0.685	0.965	1.540	1.310	1.363	5.55
● Voyage	4.063	2.358	0.766	0.939	1.601	1.350	1.370	5.10
2. AUTOMÓVEL MÉDIO								
● Puma GTI	4.000	2.150	0.954	0.896	1.665	1.388	1.400	4.990
● Puma GTC	4.000	2.150	0.954	0.896	1.665	1.388	1.400	4.990
● Chevette	4.193	2.395	0.757	1.041	1.570	1.300	1.300	4.90
● Chevette Marajó	4.208	2.395	0.757	1.056	1.570	1.300	1.300	4.90
● Passat	4.290	2.470	0.804	1.016	1.600	1.340	1.342	5.15
● Corcel II Del Rey	4.498	2.438	0.927	1.133	1.676	1.367	1.333	5.845
3. AUTOMÓVEL GRANDE								
● Puma GTB	4.290	2.420	—	—	1.840	1.410	1.410	5.150
● Belina II	4.522	2.438	0.927	1.157	1.676	1.367	1.333	5.845
● Caravan (Comodoro)	4.676	2.677	0.772	1.237	1.732	1.420	1.410	6.150
● Alfa Romeo	4.719	2.717	0.820	1.182	1.692	1.397	1.400	6.30
● Opala Diplomata	4.740	2.667	0.772	1.301	1.766	1.432	1.422	6.15
● Ford Landau	5.413	3.023	0.904	1.504	1.999	1.575	1.575	6.705
4. UTILITÁRIOS								
● Kombi (gasolina)	4.397	2.400	1.070	0.927	1.746	1.387	1.432	6.00
● Kombi (Diesel)	4.437	2.400	1.070	0.967	1.746	1.387	1.420	6.00

OBS.: Os dados relacionados ao balanço, da linha VW foram medidas in loco

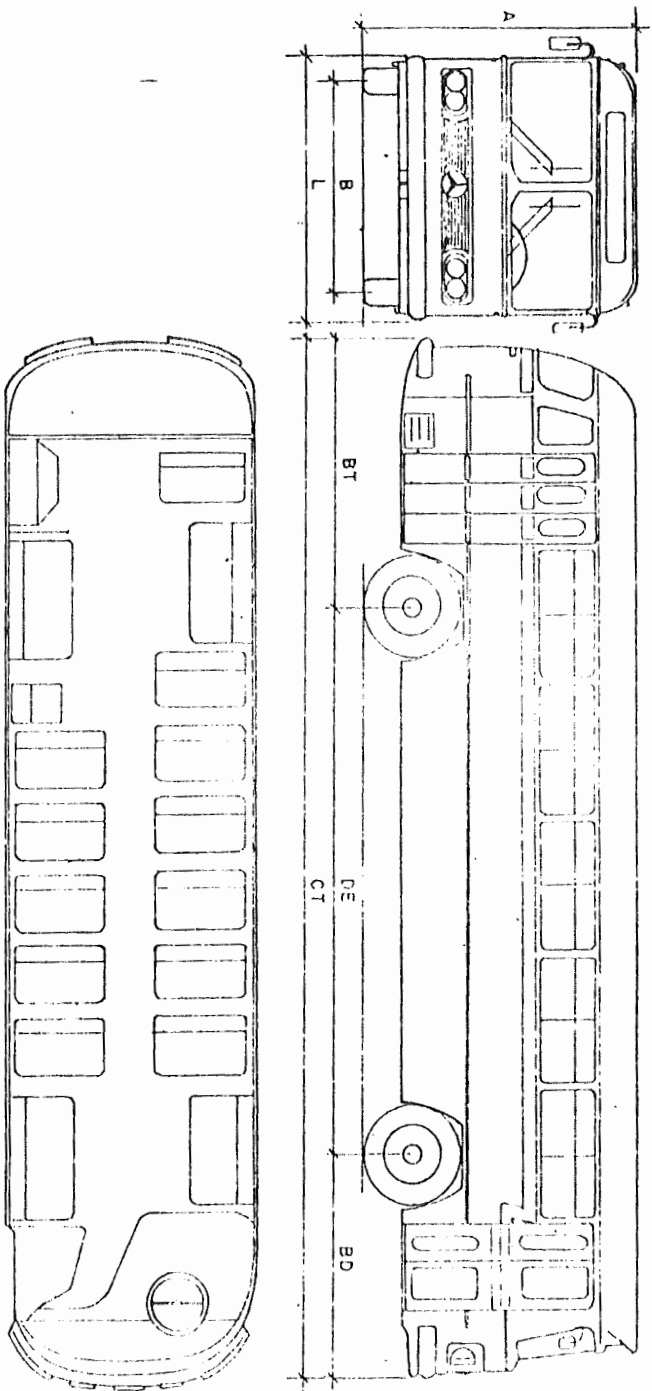
TABELA 3.3 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE CAMINHÕES UNITÁRIOS



VEÍCULO DE CARGA MÉDIO	PBT(t)	COMPRI- MENTO (m) CT	ENTRE- EIXOS (m) DE	BALANÇO (m)		LARGURA (m) L	BITOLA (m)		RAIO DE GIRO
				DIAN BD	TRAS BT		DIAN B	TRAS B	PARA-CHOQUE DIANTEIRO (m)
Dodge D-700 D/DD/E11	10,85	5,96	3,99	0,85	1,12	2,11	1,68	1,73	8,17
	10,85	6,85	4,45	0,85	1,55	2,11	1,68	1,73	8,74
	10,85	7,88	5,00	0,85	2,03	2,11	1,68	1,73	9,40
● Mercedes 1113 LAS/LAL 1113 LA	11,0	5,845	3,60	1,115	0,96	2,35	1,886	1,768	8,15
	11,0	6,67	4,20	1,115	1,03	2,35	1,886	1,768	9,30
● VW 11-130	11,0	7,486	4,83	1,115	1,40	2,35	1,886	1,768	10,40
	11,0	6,137	3,67	1,35	1,117	2,244	1,88	1,7653	7,57
	11,0	7,026	4,127	1,35	1,549	2,244	1,88	1,7653	8,25
● Chevrolet D-60 643 NXA 653 NXA 683 NXA	11,0	6,06	3,98	0,86	1,22	2,12	1,71	2,06	8,1
	11,0	6,82	4,43	0,86	1,52	2,12	1,71	2,06	9,1
	11,0	7,39	5,00	0,86	1,52	2,12	1,71	2,06	10,05
● Ford 11.000 - Perkins	11,0	5,801	3,962	0,848	1,537	2,304	1,862	1,765	8,45
	11,0	6,805	4,42	0,848	1,854	2,304	1,862	1,765	9,05
	11,0	7,630	4,928	0,848	1,854	2,304	1,862	1,765	10,10
	11,0	8,595	5,385	0,848	1,854	2,304	1,862	1,765	10,65
● Ford F-1200C MWM	11,5	5,801	3,962	0,848	0,991	2,304	1,862	1,765	8,45
	11,5	6,805	4,42	0,848	1,537	2,304	1,862	1,765	9,05
	11,5	7,63	4,928	0,848	1,854	2,304	1,862	1,765	10,10
	11,7	5,567	2,926	1,235	1,406	2,25	1,839	1,754	5,00
● Fiat 120 C 120 N 120 L 120 SL	11,7	6,567	3,593	1,235	1,739	2,25	1,839	1,754	6,50
	11,7	7,180	4,000	1,235	1,945	2,25	1,839	1,754	7,00
	11,7	8,50	4,87	1,235	2,395	2,25	1,839	1,754	8,20
	11,7	9,50	5,74	1,235	2,845	2,25	1,839	1,754	9,40
Chevrolet D-70 743 PXA 753 PXA 783 PXA	12,7	6,06	3,98	0,86	1,22	2,12	1,71	2,18	8,25
	12,7	6,82	4,43	0,86	1,52	2,12	1,71	2,18	9,85
	12,7	7,39	5,00	0,86	1,52	2,12	1,71	2,18	10,45
● Mercedes 1313 L	13,0	5,895	3,60	1,115	1,14	2,35	1,95	1,77	8,60
	13,0	5,495	4,20	1,115	1,14	2,35	1,95	1,77	7,50
	13,0	7,375	4,83	1,115	1,39	2,35	1,95	1,77	9,45
● Ford F-13000 Perkins	13,0	5,802	3,962	0,849	0,991	2,418	1,878	1,834	8,45
	13,0	5,806	4,42	0,849	1,537	2,418	1,878	1,834	9,05
	13,0	7,631	4,928	0,849	1,854	2,418	1,878	1,834	10,10
	13,0	8,506	5,385	0,849	2,362	2,418	1,878	1,834	10,65
● VW 13-130	13,0	5,137	3,67	1,35	1,117	2,244	1,880	1,825	7,57
	13,0	7,026	4,127	1,35	1,549	2,244	1,880	1,825	8,25
	13,0	8,068	4,686	1,35	2,032	2,244	1,880	1,825	9,31
● Mercedes 1513L	15,0	5,96	3,99	0,85	1,12	2,240	1,840	1,830	8,60
	15,0	5,945	3,60	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	6,60
	15,0	6,545	4,20	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	7,60
● Mercedes 1513L 1513 LLK 1513 L 1513 L 1516 LLK 1516 LLK 1516 L 1516 L 1516 L 1519 LLS 1519 LLLS 1519 L 1519 L 1519 L	15,0	7,535	4,83	1,115	1,50	2,35	1,946	1,817	9,45
	15,0	8,125	5,17	1,115	1,75	2,35	1,946	1,817	9,80
	15,0	5,945	3,60	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	6,60
	15,0	5,545	4,20	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	7,60
	15,0	7,535	4,83	1,115	1,50	2,35	1,946	1,817	8,45
	15,0	8,125	5,17	1,115	1,75	2,35	1,946	1,817	9,80
	15,0	5,955	3,60	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	6,60
	15,0	6,540	4,20	1,115	1,14	2,35	1,946	1,817	7,60
	15,0	7,545	4,83	1,115	1,50	2,35	1,946	1,817	8,60
	15,0	8,135	5,17	1,115	1,75	2,35	1,946	1,817	9,80

Fonte: Volkswagen Caminhões Ltda. Mercedes-Benz do Brasil S.A. General Motors do Brasil. Ford Brasil S.A.

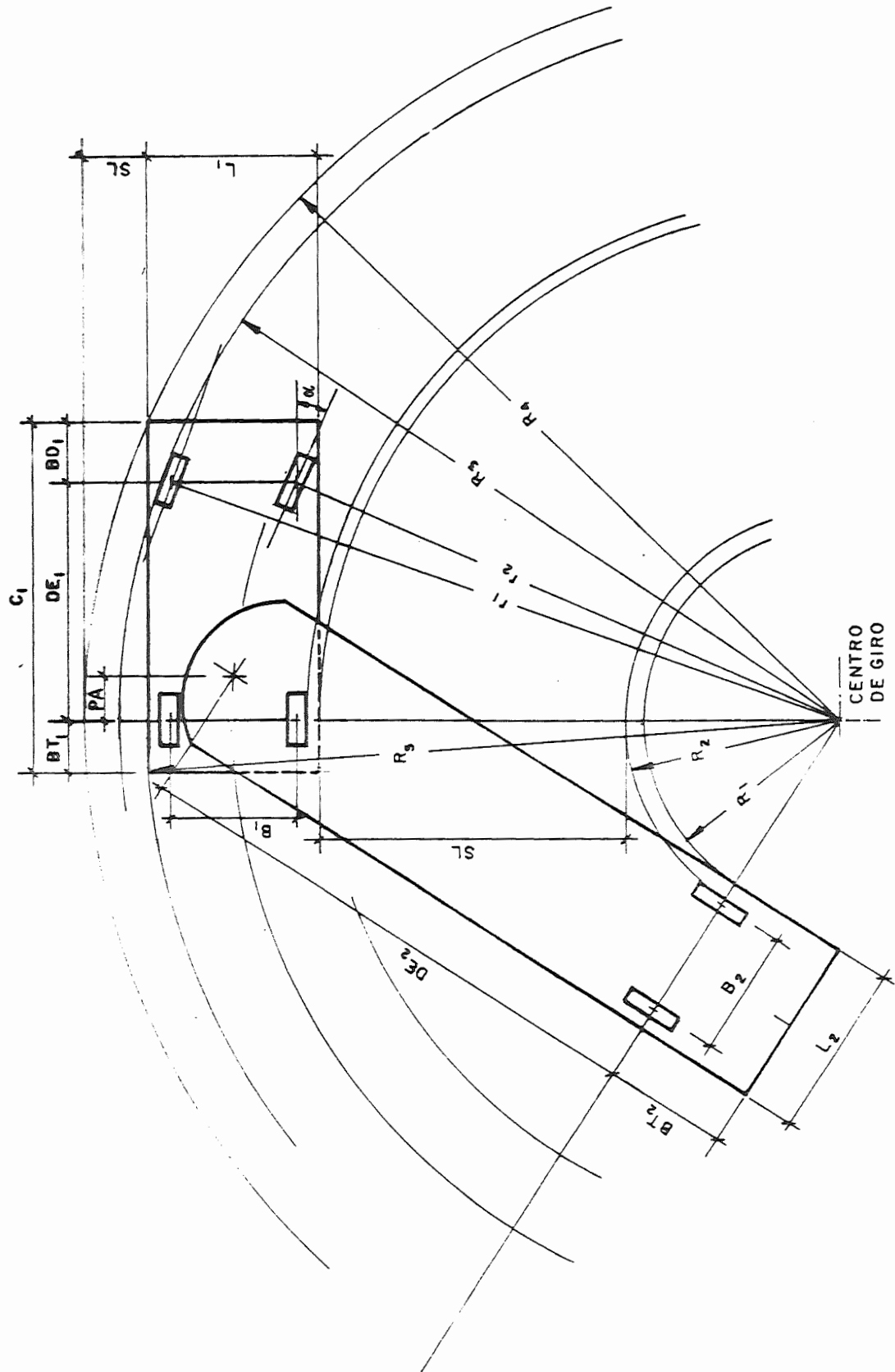
TABELA 3.4 - DIMENSÕES CARROTERIAIS DE ÔNIBUS SIMPLES



TIPO DE ÔNIBUS	COMPRIMENTO (m) CT	ENTRE EIXOS (m) DE	BALANÇO (m)		LARGURA (m) L	BITOLA (m)		RAIO DE GIRE - E-FA-CHOCQUE DIANTEIRO -
			DIANTEIRO B0	TRASEIRO B1		DIANTEIRA B	TRASEIRA S	
1. ÔNIBUS URBANO								
● Mercedes								
0362	10,610	5,55	2,31	2,73	2,50	1,925	1,817	9,90
0364/101	10,540	5,55	2,04	2,95	2,50	1,951	1,817	9,75
0364/111	10,540	5,55	2,04	2,95	2,50	1,925	1,817	9,75
● VOIVO B 58								
	12,00	6,00	2,43	3,53	2,47	2,042	1,820	11,025
2. ÔNIBUS RODOVIÁRIO								
● Mercedes								
0364/12R	10,840	5,55	2,34	4,55	2,50	1,951	1,817	9,90
0364/13R	11,537	2,34	2,34	5,13	2,50	1,925	1,817	10,45
● VOIVO	12,50	2,43	1,43	5,03	2,47	2,042	1,820	11,010

FORNTE: Mercedes-Benz do Brasil, S.A.
 Voivo do Brasil, Motores e Veiculos S.A.
 CMT/C

FIGURA 3.7 - MOVIMENTO CURVILÍNEO HORIZONTAL - VEÍCULO ARTICULADO



onde

r_1 e r_2 - são respectivamente os raios das trajetórias descritas pela roda externa e interna.

R_1 - raio do ponto extremo interno à curva.

R_2 - raio crítico da roda interna.

R_3 - raio crítico da roda externa.

R_4 - raio do ponto extremo dianteiro.

R_5 - raio do ponto extremo traseiro.

SL - sobrelarguras necessárias na curva.

As dimensões relevantes do veículo para permitir o traçado dos arcos similares associadas ao movimento curvilíneo.

C_1 - comprimento total do veículo trator.

BT - balanço traseiro do veículo trator.

DE₁ - distância entre eixos do veículo trator.

BD₁ - balanço dianteiro do veículo trator.

L₁ - largura do veículo trator.

B₁ - bitola do veículo trator.

α - ângulo de deflexão da direção.

PA - distância do ponto de articulação ao eixo traseiro.

BT₂ - balanço traseiro da carreta.

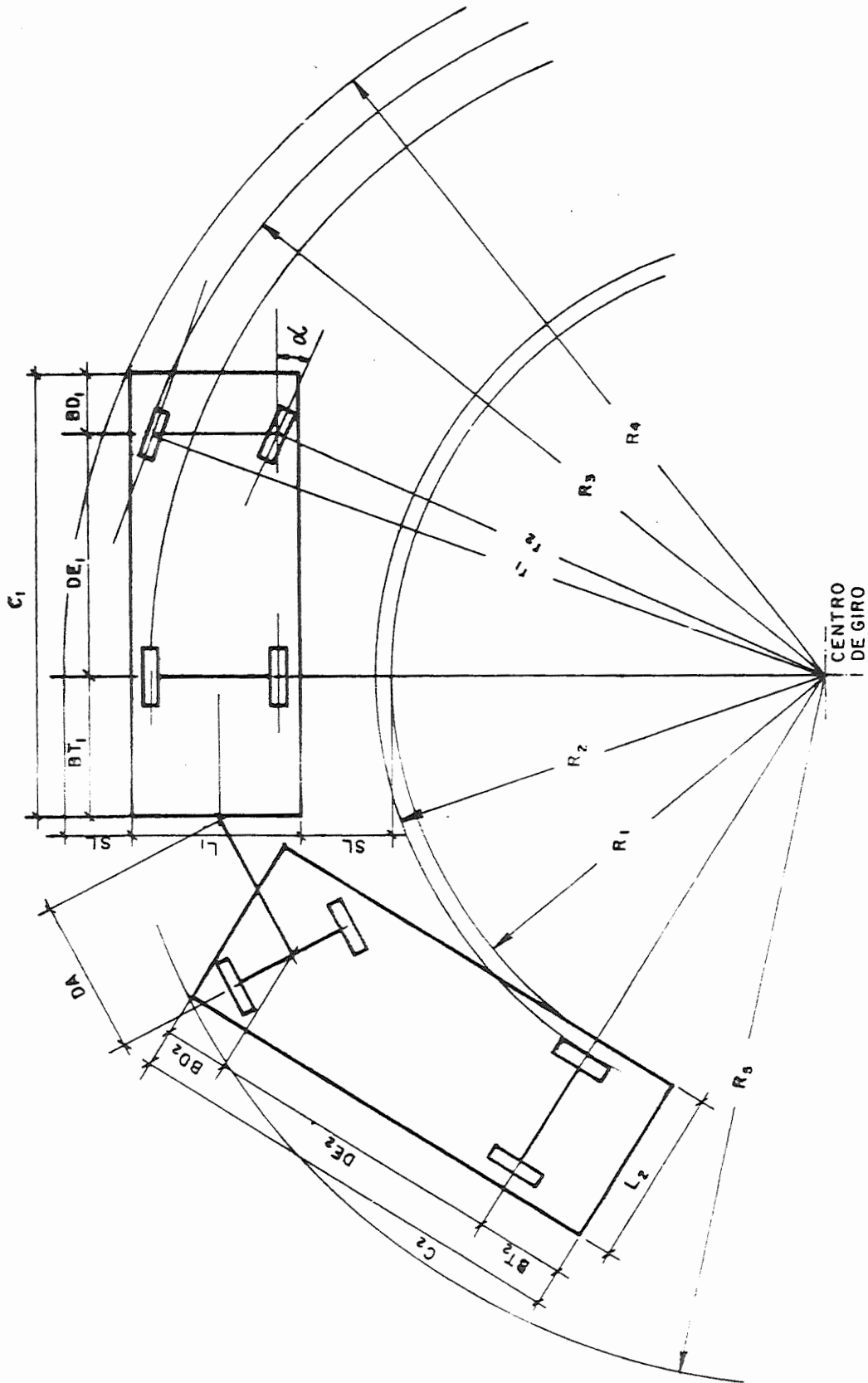
DE₂ - distância entre o eixo da carreta (eixo equivalente no caso de multi-eixos) e o ponto de articulação.

L₂ - largura da carreta.

B₂ - bitola da carreta.

À semelhança dos veículos unitários também neste caso são necessários testes reais para determinar as envoltórias no caso de curvas de raio de giro próximas ao mínimo.

FIGURA 3.8 - MOVIMENTO CURVILÍNEO HORIZONTAL - TRENS DE VEÍCULOS



onde todas as dimensões são como no caso anterior com exceção de:

DA - distância entre o eixo do reboque e o ponto de articulação no veículo trator;

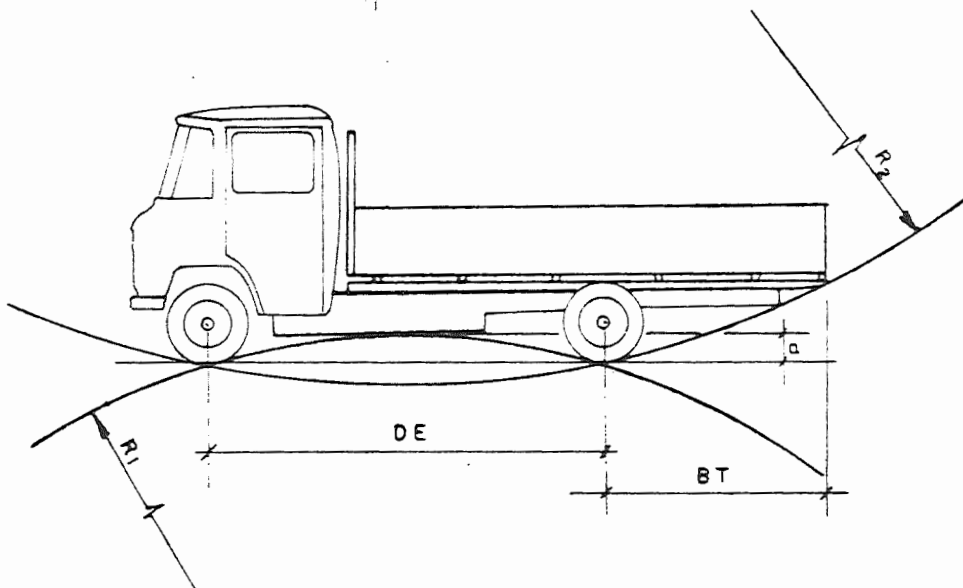
DE₂ - distância entre eixos do reboque.

movimento curvilíneo vertical:

é o tipo de movimento que ocorre na transição de rampas, passagem em valetas e lombadas.

O problema é ilustrado na figura 3.9 abaixo.

FIGURA 3.9 - MOVIMENTO CURVILÍNEO VERTICAL

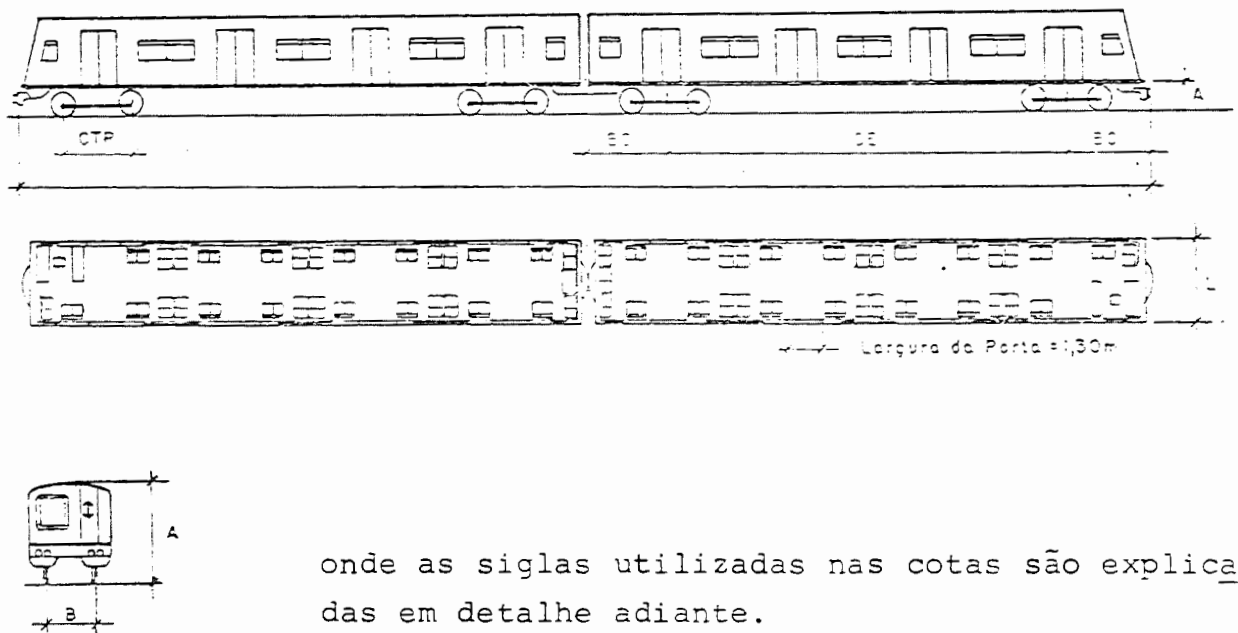


3.2.2.2. - Veículos ferroviários.

Os veículos ferroviários são conhecidos normalmente pelo nome de trens por serem constituídos de vários veículos unitários acoplados. Apesar da semelhança com veículos rodoviários do tipo caminhão mais reboques, existem diferenças geométricas significativas em função da forma de interação do veículo ferroviário com a via.

Nos trechos retos o espaço ocupado por um trem depende da largura e da altura do veículo crítico que compõe o trem, e do comprimento total da composição, que é igual ao somatório das distâncias entre faces de engate dos vagões e locomotivas que compõe o trem. A essas dimensões são adicionadas folgas necessárias para garantir a segurança operacional. A figura 3.10 ilustra as dimensões de uma unidade básica do Metrô de São Paulo composta por dois vagões. Os trens do Metrô são normalmente compostas por três unidades básicas.

FIGURA 3.10- DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DO METRÔ DE SÃO PAULO.

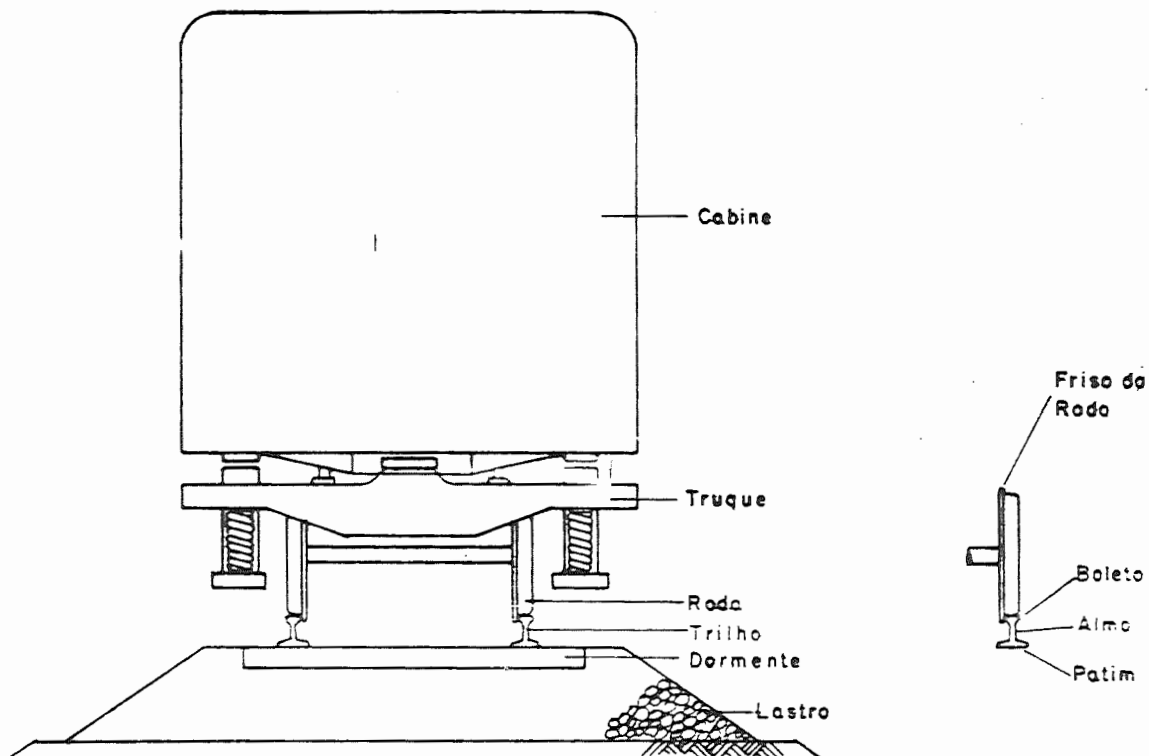


onde as siglas utilizadas nas cotas são explicadas em detalhe adiante.

Nos movimentos curvilíneos é que aparecem as diferenças geométricas mais significativas. Como pode ser observado nas figuras 3.11 e 3.12, a cabine de passageiros ou o compartimento de carga dos veículos, está apoiada sobre dispositivos denominados

truques, que contêm o(s) eixo(s) e que são articulados em relação à cabine em torno de pivots centrais.

FIGURA 3.11- APOIO DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO SOBRE A VIA.



Os eixos associados a um truque, a menos de alguns veículos experimentais mais modernos, são rígidos, o que introduz limitações consideráveis no raio mínimo das curvas de vias férreas conforme ilustra a figura 3.13. Nota-se no caso b que o ângulo de ataque α é excessivo levando os frisos da roda a encostarem no boleto do trilho. Quando esse fenômeno ocorre na prática, tanto os trilhos como as rodas sofrem grande desgaste.

FIGURA 3.12 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO

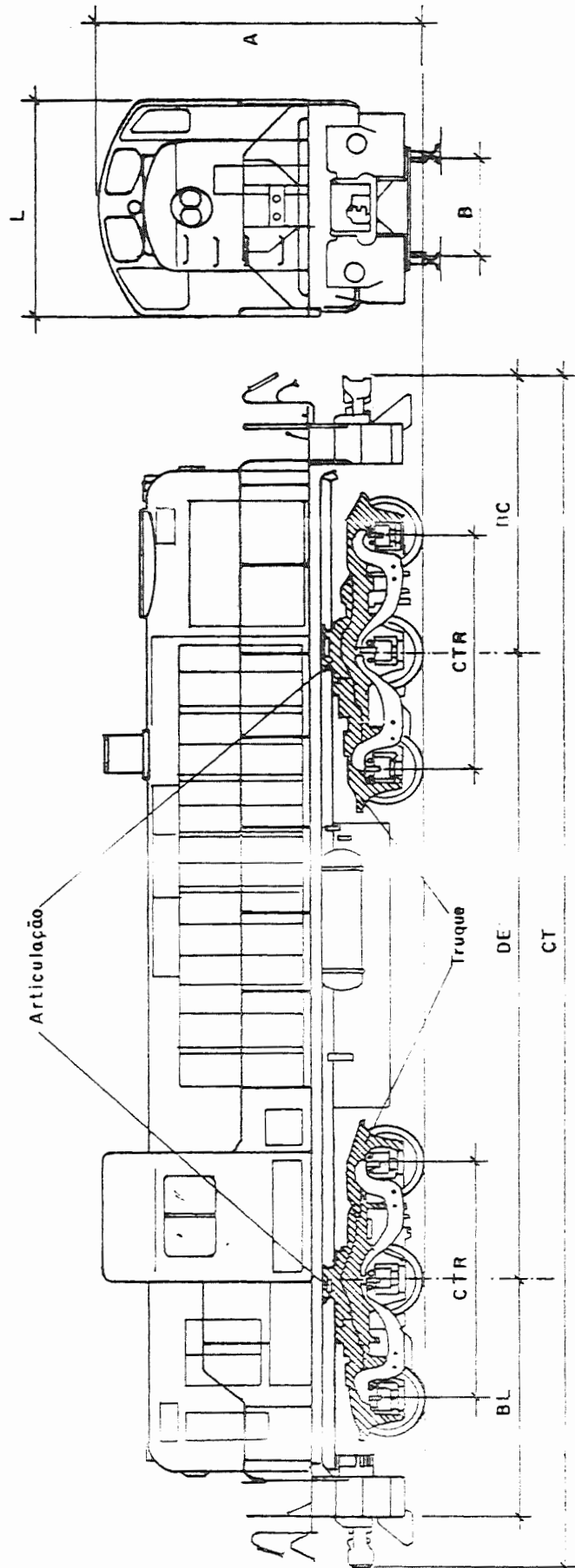
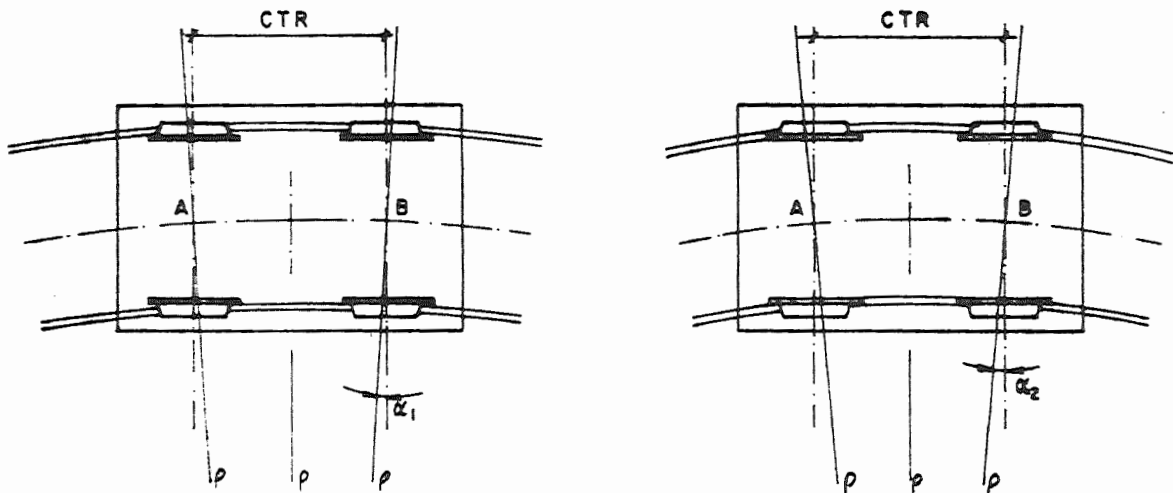


FIGURA 3.13 - LIMITAÇÕES DE RAIOS MÍNIMOS EM VEÍCULOS FERROVIÁRIOS



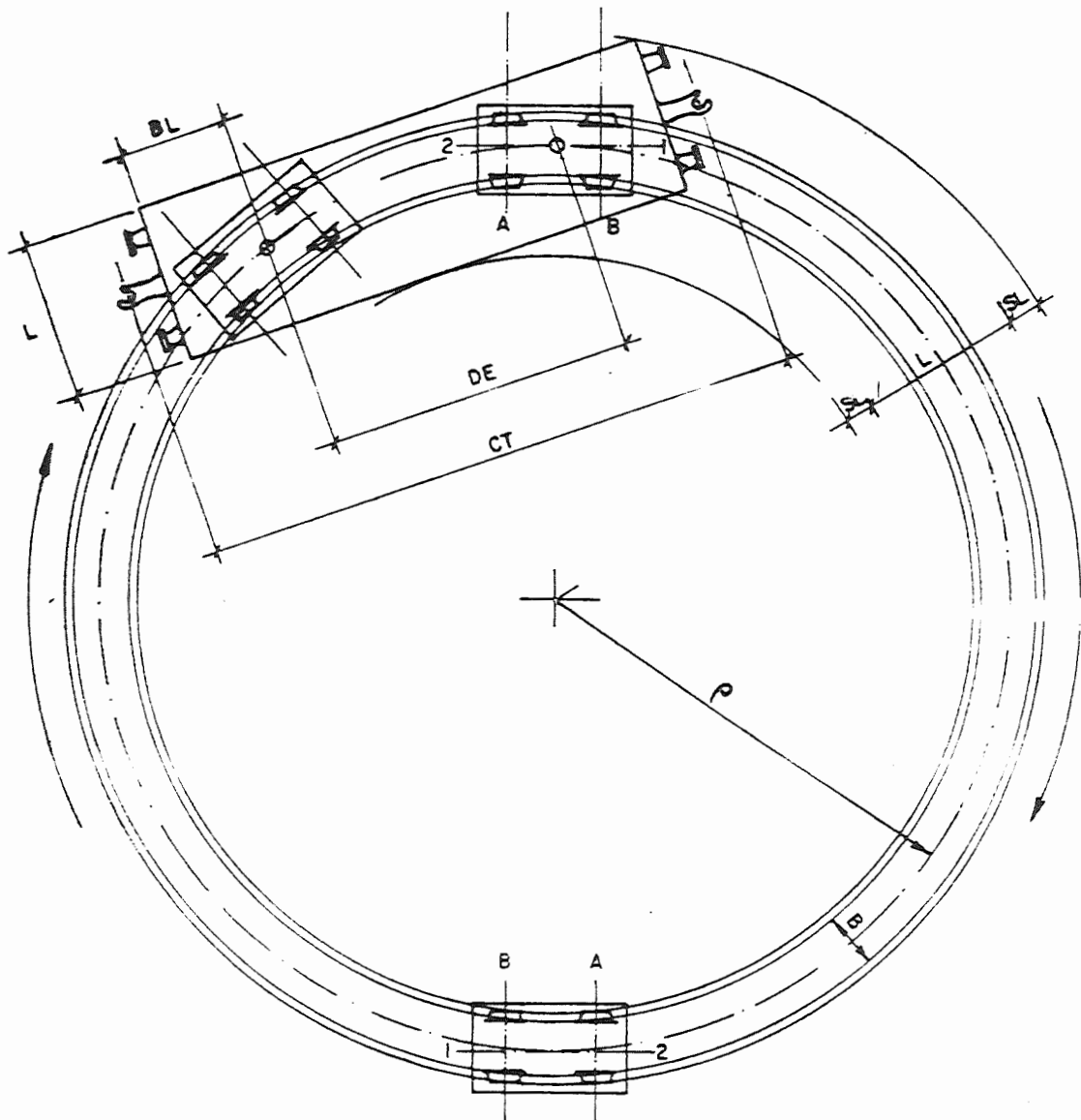
Apesar de a base de apoio do veículo ter bitola fixa, o veículo ferroviário, assim como o rodoviário, requer sobrelargura na seção da via nos trechos curvilíneos. A figura 3.14 apresenta uma situação hipotética para melhor visualização da geometria do movimento e identificação do problema da sobrelargura. Nota-se também nessa figura os problemas de interface veículo/plataforma no caso de projeto de terminais em trechos curvos, que podem dificultar o acesso de pessoas e mercadorias ao veículo.

Assim, o projeto geométrico das vias e terminais onde trafegam veículos ferroviários depende das seguintes dimensões características desses veículos:

- CT - comprimento total entra faces de engate.
- DE - distância entre pivots dos truques.
- BC - balanço central dos veículos que é a distância entre o pivot de um truque e a face de engate correspondente.
- BL - balanço lateral dos veículos.
- L - largura total dos veículos.
- B - bitola dos veículos = bitola da via férrea.
- A - altura total dos veículos.
- CTR- comprimento entre eixos extremos dos truques.
- AP - altura da soleira da porta

dimensões estas apresentadas na figura 3.12 para o caso de uma locomotiva.

FIGURA 3.14 - MOVIMENTO CURVILÍNEO HORIZONTAL DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS.



3.2.2.3. Veículos hidroviários.

O veículo hidroviário por deslocar-se dentro de um meio fluido constitui uma tecnologia totalmente diferente das tecnologias rodoviária e ferroviária.

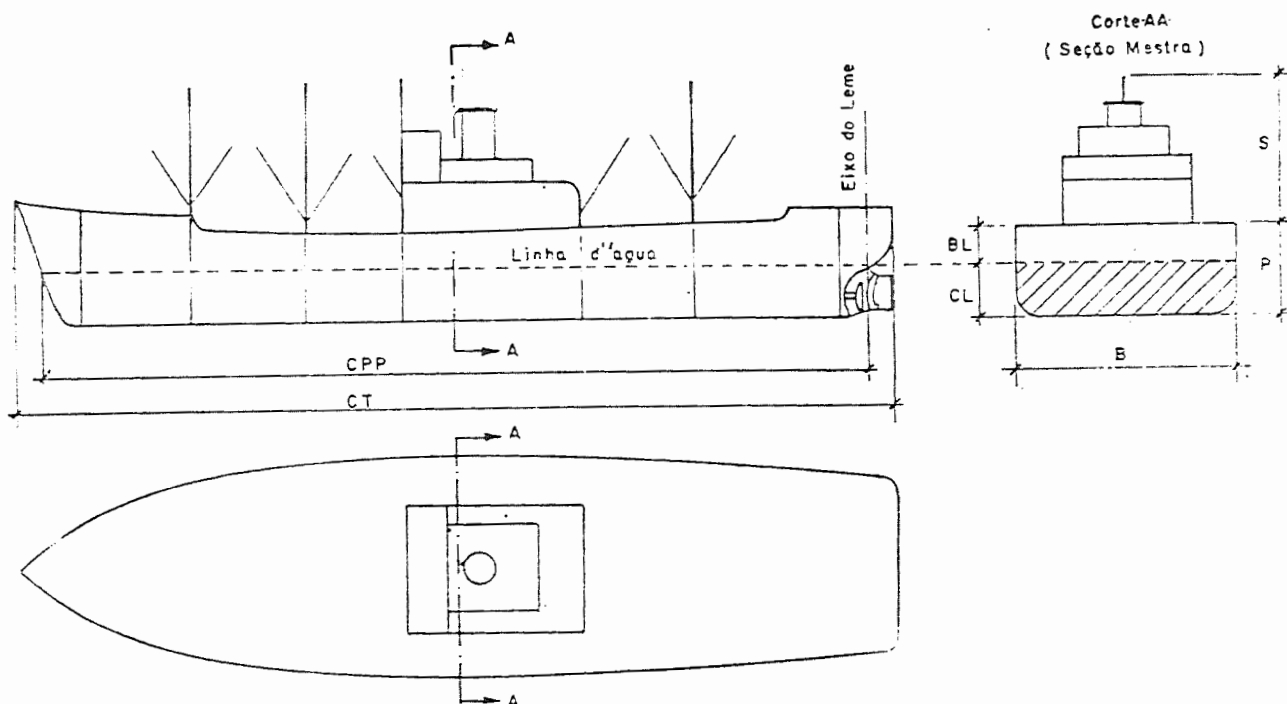
Assim, também as características geométricas que afetam a construção de vias, interseções e terminais são diferentes.

Trataremos neste texto apenas do caso de embarcações convencionais excluindo-se portanto aerobarcos hidrofólios e "hovercrafts".

As embarcações convencionais podem ser divididas em dois conjuntos:

- embarcações unitárias, incluindo navios e outros barcos autônomos, tais como os automotores fluviais, barcos pesqueiros e pequenos barcos fluviais.

FIGURA 3.15 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE NAVIOS



onde:

CT - comprimento total.

CPP- comprimento entre perpendiculares.

B - boca = largura da seção mestra.

CL - calado = distância do apêndice mais profundo à linha d'água.

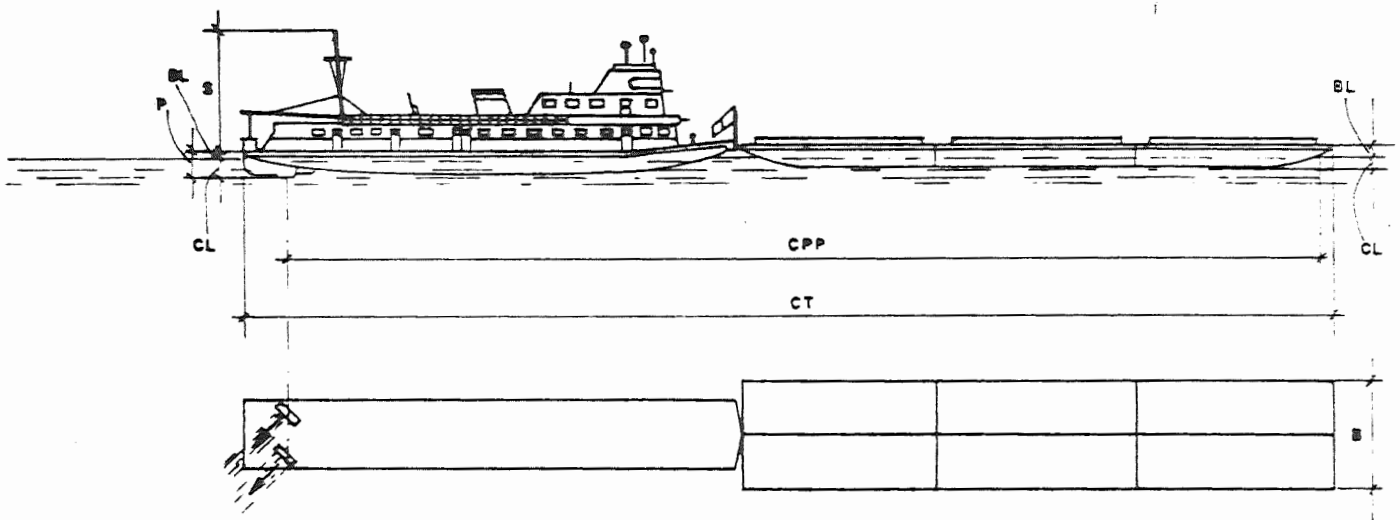
BL - borda livre = distância da linha d'água ao convés principal.

P - pontal = calado + borda livre.

S - altura da superestrutura = altura da superestrutura construída sobre o convés principal.

- embarcações compostas, que são ou comboios fluviais de barcos com dirigibilidade mas sem capacidade de locomoção própria que são tracionadas por um rebocador, ou o caso mais comum hoje em dia, de comboios fluviais de chatas sem dirigibilidade e locomoção próprias, que são unidas rigidamente através de cabos de amarração e impulsionados por rebocador(es) de empurra.

FIGURA 3.16 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE COMBOIOS DE EMPURRA



onde:

CT - comprimento total do comboio.

CPP- comprimento entre perpendiculares do comboio

B - boca = maior largura do comboio

CL - calado = maior calado do comboio.

BL - borda livre.

P - pontal

S - altura da superestrutura.

Em ambos os casos as dimensões características relevantes para o projeto geométrico de vias e terminais no caso de embarcação estacionária ou movimento linear são as seguintes:

- o comprimento total que é o comprimento de uma extremidade à outra;
- a maior largura que é denominada boca;
- a altura crítica da parte imersa na água que é denominada calado e que tem influência sobre a compatibilidade da embarcação com a profundidade da via em que ela se desloca ou na qual está parada. Cabe notar que enquanto a boca e o comprimento total são valores fixos, o calado varia com o carregamento da embarcação;
- assim também varia com o carregamento a parte não imersa da embarcação que é a soma da borda livre com a maior altura da superestrutura, dimensão esta que é relevante, para o projeto de obras civis sobre a hidrovia, tais como pontes, linhas de transmissão, dutovias, etc.

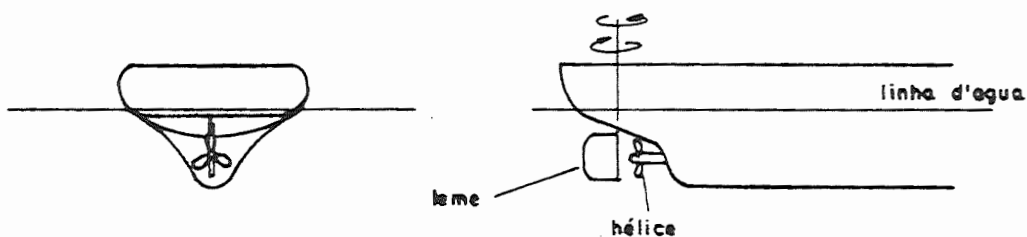
É importante notar que o deslocamento das embarcações é influenciado por correntezas e oscilações do meio fluido em que se desloca, sendo um veículo de controle relativamente difícil.

Assim projetos de hidrovias e terminais devem considerar folgas adequadas a cada caso específico.

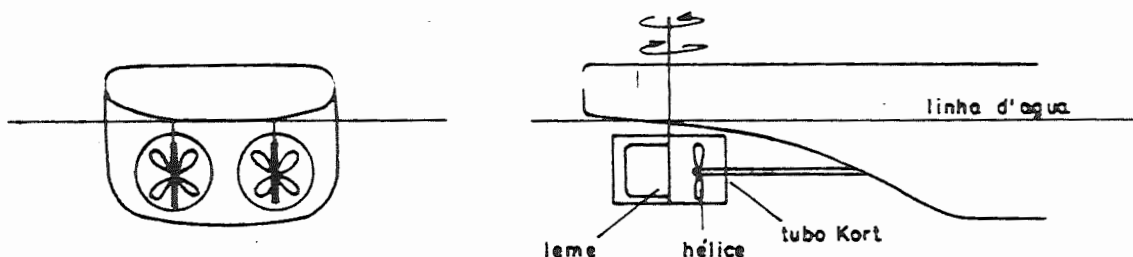
O movimento curvilíneo e as sobrelarguras necessárias - nas vias não podem ser determinados de forma simples como no caso de veículos terrestres.

O comprimento entre perpendiculares e a forma empregada para dar dirigibilidade à embarcação são os fatores determinantes dos seus raios mínimos de curvatura.

Existem basicamente duas formas de dar dirigibilidade e tração a uma embarcação: a primeira tradicional, em que a embarcação é impulsionada por um ou mais hélices e dirigida pela reação de um leme que se desloca no meio fluido. Esse leme portanto só funciona a partir de uma velocidade mínima do escoamento no seu entorno, limitando assim, no caso de grandes embarcações, a capacidade de curvas de pequeno raio. Por essa razão grandes navios são auxiliados por rebocadores nas manobras nos portos. A segun



da forma, normalmente utilizada em rebocadores de empurra de grandes comboios fluviais, onde meandros de rios impõe uma condição de maior manobrabilidade é o sistema Kort onde o(s) hélice(s)

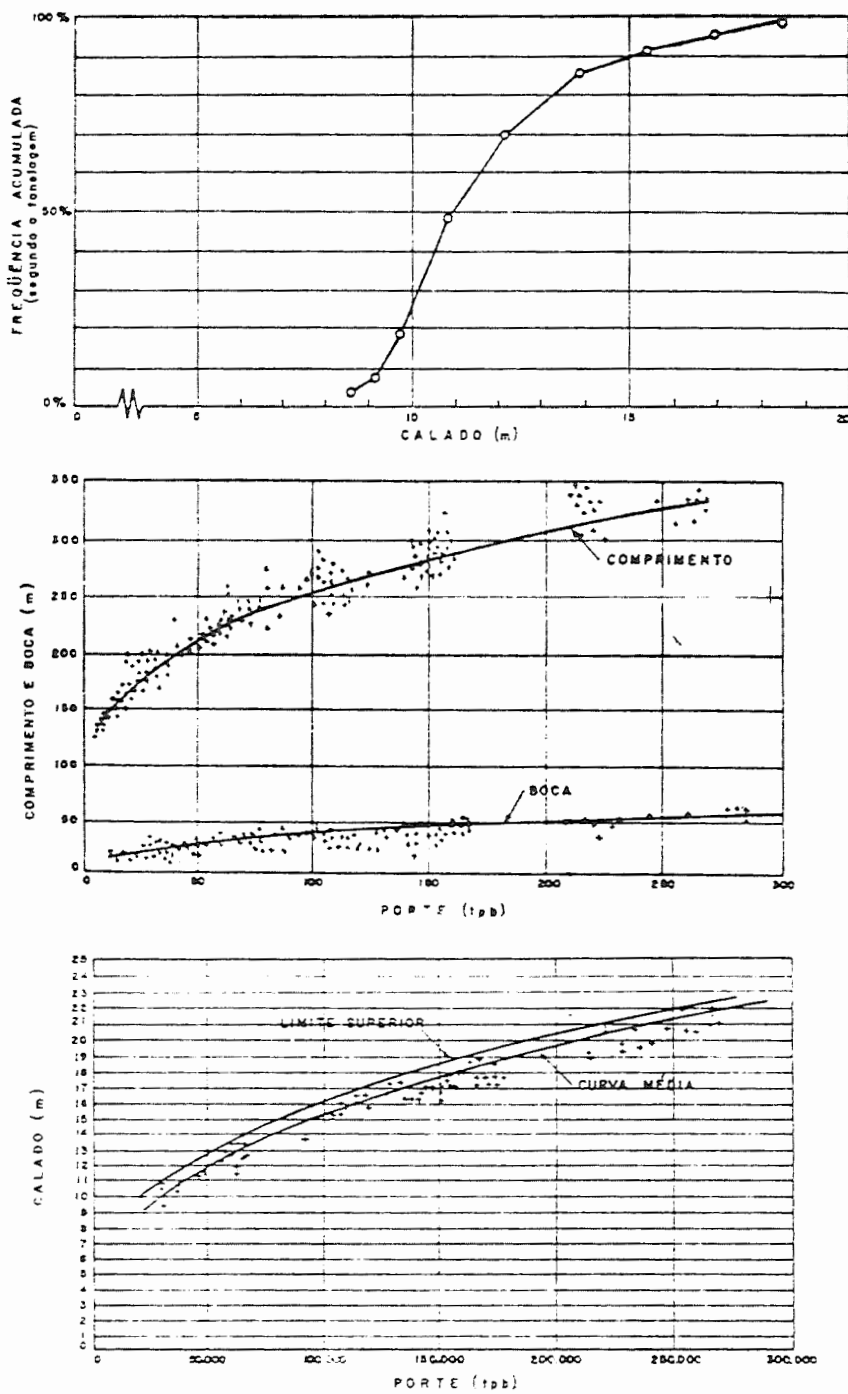


joga(m) um jato de água sobre o(s) leme(s) que desvia(m) esse jato para o lado gerando uma força lateral mesmo estando a embarcação parada.

Como a determinação teórica das trajetórias é imprecisa, testes em modelos e testes com a embarcação pronta são conduzidos para determinar sua capacidade de manobra. Um órgão que realiza testes de modelos no Brasil é a Divisão de Engenharia Naval do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

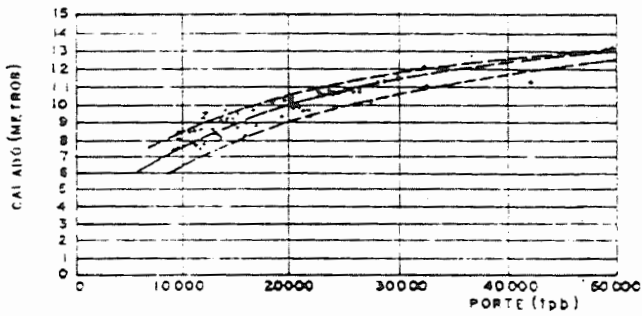
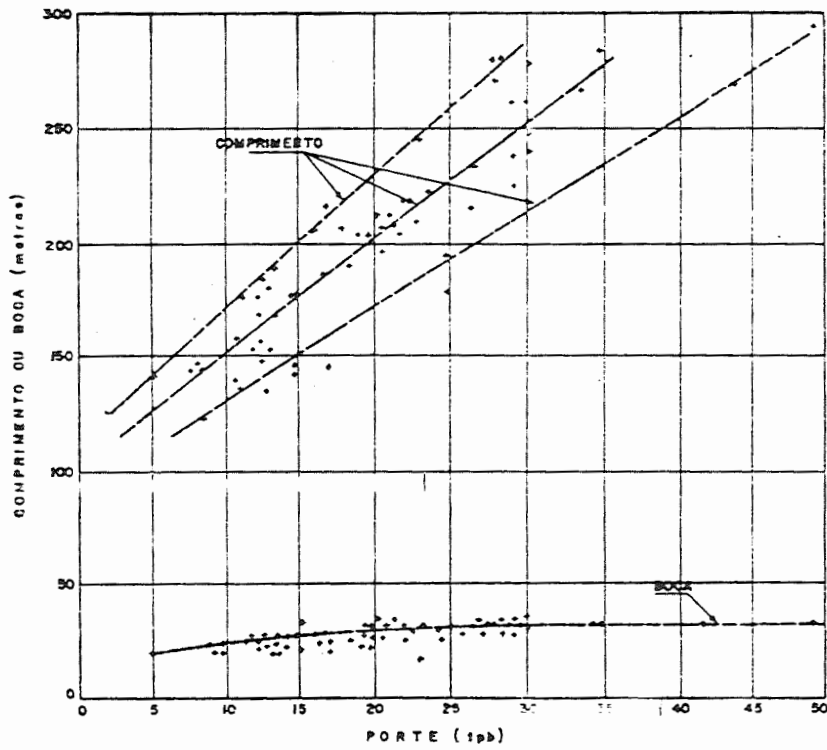
As Figuras 3.19 e 3.20 apresentam variações das dimensões de navios em função do seu porte bruto.

FIGURA 3.19 - DIMENSÕES TÍPICAS DE NAVIOS GRANELEIROS



Fonte: Novaes (1976) Fig. 4.4

FIGURA 3.20 - DIMENSÕES TÍPICAS DE NAVIOS PORTA CONTÊINER



Fonte: Novaes (1976) Fig. 5.6 e
Fig. 5.7

3.2.2.4. Veículos aéreos.

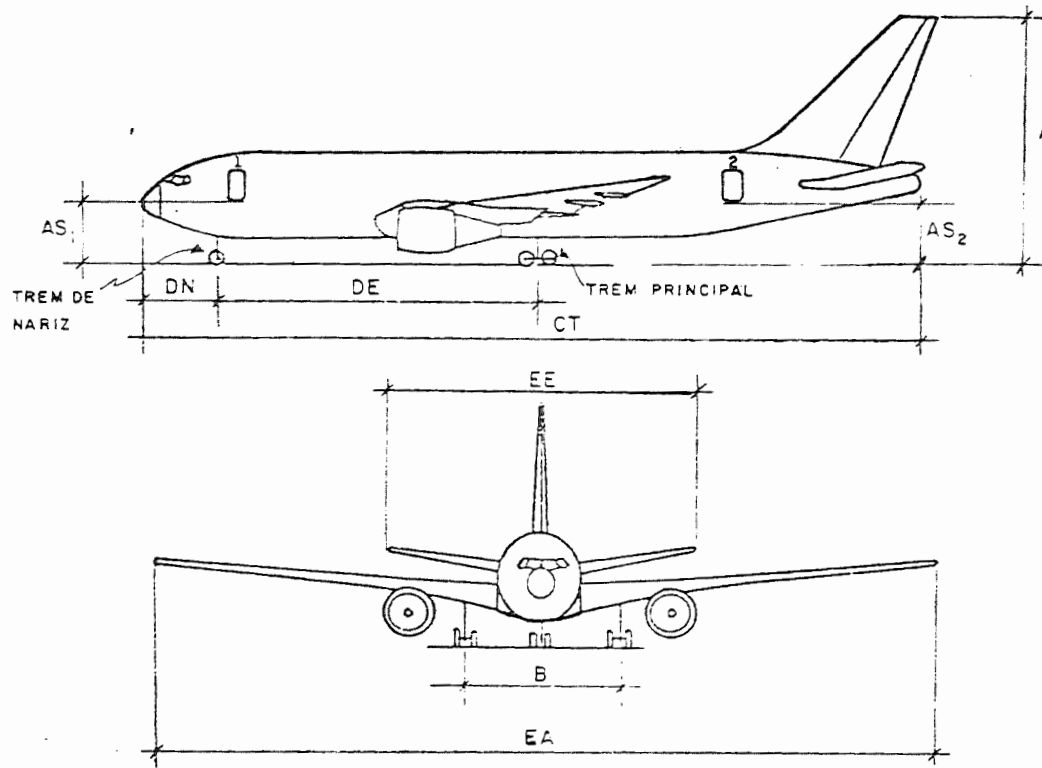
Em termos de projeto de obras civis (aeródromos ou aeroportos) são de interesse as características dimensionais do avião quando o mesmo está parado ou deslocando-se no solo.

Apesar de sua forma bastante diferente de veículos terrestres rodoviários e da nomenclatura diferente utilizada para algumas das suas dimensões, conceitualmente o problema geométrico é muito parecido com o do veículo rodoviário unitário.

Devido ao problema de distribuição do peso sobre o pavimento das pistas de pouso, pistas de rolamento e pátios de estacionamento os aviões maiores possuem trens de rodas (à semelhança de um caminhão com terceiro eixo) que são tratados de forma análoga como mostrado para um caminhão na figura 3.2.

A Figura 3.17 apresenta as dimensões importantes no projeto de obras civis quando o avião está parado (terminais de passageiros e carga, hangares, etc).

FIGURA 3.17 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE UM AVIÃO.



- nde: CT - comprimento total
EA - envergadura da asa
EE - envergadura da empenagem horizontal
B - bitola do trem principal
DE - distância entre eixos do trem do nariz e do trem principal = comprimento da base de rodas.

DN - distância entre o eixo do trem de nariz e o nariz do avião.

A - altura (varia com o peso e a posição do CG).

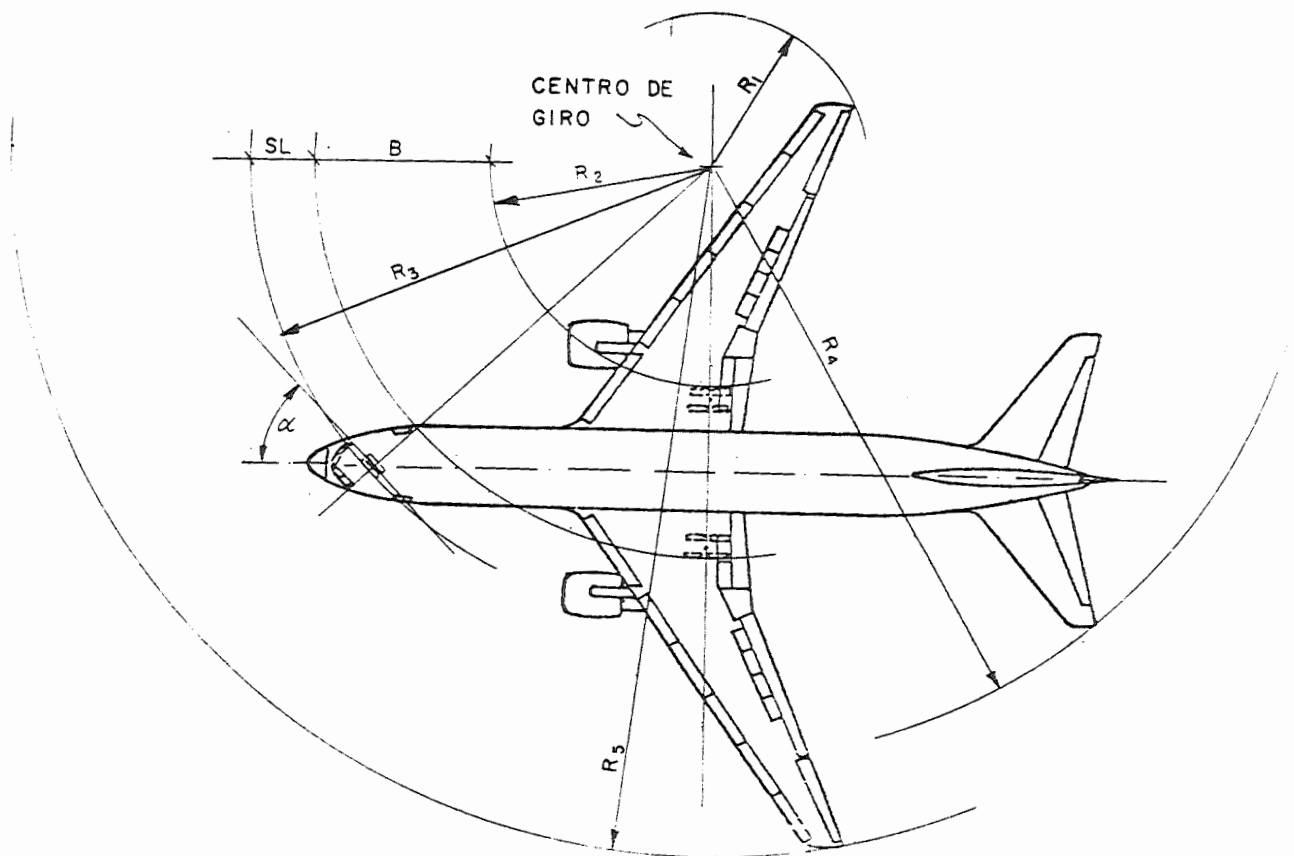
AS₁ - altura da soleira da porta 1 (variável).

AS₂ - altura da soleira da porta 2 (variável).

Cabe notar que a altura do avião varia em função do peso e da posição do centro de gravidade o que faz com que as interfaces para carregamento e descarregamento de aviões precisam ter altura regulável.

No movimento curvilíneo, o avião tem um comportamento idêntico ao de um veículo unitário rodoviário com três pontos principais de apoio, conforme pode ser visto na figura 3.18. O ângulo α máximo que corresponde ao mínimo raio de giro, varia de avião para avião e deve ser obtido a partir de consultas a manuais fornecidos pelos fabricantes.

FIGURA 3.18 - MOVIMENTO CURVILÍNEO DE UM AVIÃO NO SOLO.



As dimensões relevantes para o movimento curvilíneo são:

- CT - comprimento total
- EA - envergadura da asa
- EE - envergadura da empenagem horizontal
- E - bitola do trem principal
- DE - distância entre eixos do trem de nariz e do eixo equivalente do conjunto de rodas do trem principal.
- DN - distância entre o eixo do trem de nariz e o nariz do avião.
- α - ângulo de deflexão da(s) roda(s) do trem de nariz.

Nota-se na Figura 3.18 que a sobrelargura refere-se a penas à área necessária para o trem de rodas uma vez que ao contrário dos veículos rodoviários não é necessário pavimentar toda a superfície sobre a qual circula o veículo, mas apenas a faixa ocupada pelo trem de rodas mais folgas estabelecidas para garantir a segurança das operações.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo das principais dimensões características e pesos de aviões de transporte típicos.

AVIÃO*	FABRICANTE	ENVER GADURÁ	COMPRI MENTO	BASE	BITO- LA	PESO MÁX DECOL.	PESO MÁX POUSO	PESO VA ZIO OP.	PESO ZE RO COMB.	Nº E TIPO MOTOR	Nº DE PASSAG.	COMPR.*** PISTA
		m	m	m	m	kg	kg	kg**	kg			
DC-9-32	MC DONNEL-DOUGLAS	28,45	36,37	16,21	4,88	48.988	44.906	27.789	39.463	2TF	115-127	2280
DC-9-50	MC DONNEL-DOUGLAS	28,45	40,23	18,59	4,88	54.432	49.896	28.726	44.453	2TF	130	2160
DC-9-80	MC DONNEL-DOUGLAS	32,86	41,30	22,07	5,08	63.500	58.060	35.290	53.520	2TF	155-172	3350
DC-8-61	MC DONNEL-DOUGLAS	45,24	57,12	18,52	6,35	147.420	108.864	68.990	101.606	4TF	196-259	3350
DC-8-63	MC DONNEL-DOUGLAS	45,24	57,12	23,62	6,35	161.028	117.029	72.004	104.328	4TF	196-259	3630
DC-10-10	MC DONNEL-DOUGLAS	47,35	55,55	22,07	10,67	195.048	164.884	106.444	151.956	3TF	270-345	2740
DC-10-30	MC DONNEL-DOUGLAS	49,17	55,35	22,07	10,67	251.748	182.801	118.432	166.925	3TF	270-345	3350
B-737-200	BOEING	28,35	30,48	11,38	5,23	45.586	44.453	27.197	38.556	2TF	86-125	1710
B-727-200	BOEING	32,92	46,69	19,28	5,72	76.658	68.040	44.181	62.597	3TF	134-163	2620
B-720B	BOEING	39,38	41,68	15,44	6,68	106.278	79.380	52.164	70.762	4TF	131-149	1860
B-707-120B	BOEING	39,38	44,22	15,95	6,73	116.729	86.184	57.834	77.112	4TF	137-174	2290
B-707-320B	BOEING	43,41	46,61	17,98	6,73	151.371	87.133	67.496	88.452	4TF	141-189	3500
B-757-200	BOEING	37,94	46,88	18,29	7,31	99.800	89.810	59.285	83.462	2TF	178-196	2100
B-767-200	BOEING	47,65	47,24	19,52	9,29	136.080	122.470	80.836	112.490	2TF	211-230	2040
B-747-200-B	BOEING	59,66	69,85	25,60	11,00	351.540	255.830	179.535	238.594	4TF	362-490	3350
B-747SP	BOEING	59,66	53,82	20,52	11,00	294.840	204.120	139.890	185.976	4TF	288-364	2440
L-1011-100	LOCKHEED	47,35	54,15	21,34	10,97	211.370	166.920	110.280	145.150	3TF	256-400	3290
L-1011-500	LOCKHEED	47,35	49,98	18,79	10,97	224.980	166.920	108.92	153.310	3TF	246-400	2830
CARAVELLE B	Aerospatale	34,29	32,99	12,50	5,18	55.001	49.501	30.056	39.499	2TF	86-104	2090
TRIDENT 2E	Hawker Siddeley	29,87	34,98	13,41	5,82	65.092	51.257	33.204	45.360	3TF	82-115	2290
BAC 111-200	BAC	26,97	28,19	10,08	4,34	35.834	31.298	21.049	29.030	2TF	65-79	2090
SUPER VC-10	BAC	42,67	52,32	22,00	6,53	151.956	107.503	66.679	97.524	4TF	100-163	2500
A-300	Airbus Industrie	44,83	53,62	18,62	9,60	136.987	127.507	84.737	116.478	2TF	225-345	1980
A-310	Airbus Industrie	43,89	46,65	12,47	9,60	132.000	118.500	76.610	108.500	2TF	205-265	1860
CONCORDE	BAC-AEROSPATIALE	25,55	61,65	18,19	7,72	176.450	108.864	79.380	90.720	4TJ	108-128	3430
MERCURE	Dassault	30,53	33,99	11,91	6,20	52.000	49.000	25.865	44.997	2TF	124-134	1980
ILYUSHINE-62	U.S.S.R.	43,21	53,11	24,49	6,78	161.935	105.235	69.401	93.442	4TF	168-186	3250
ILYUSHINE-86	U.S.S.R.	48,05	60,20	21,33	11,15	206.000	174.000	-	-	-	-	-
TUPOLEV-154	U.S.S.R.	37,54	47,90	18,92	11,51	90.000	84.000	43.500	63.501	3TF	128-158	2100
BAND.EMB-110	EMBRAER	15,32	13,74	4,56	4,94	5.670	5.670	3.817	5.450	2TP	18	1320
BRAS.EMB-120	EMBRAER	19,78	20,00	6,97	6,58	9.600	9.600	5.580	8.600	2TP	30	1220

Adaptado de Horonjeff, Airport Planning and Design, 3^a Ed. LEGENDA: TF = TURBO FAN; TJ = TURBOJATO; TP = TURBO HÉLICE.

* Alguns modelos de avião podem ser disponíveis em várias versões e, alguns, equipados com diferentes turbinas. Nesse caso os dados da tabela são apenas representativos de uma determinada versão e turbina.

** Dados aproximados; depende da configuração dos assentos.

*** Ao nível do mar, dia padrão, sem vento, pista em nível.

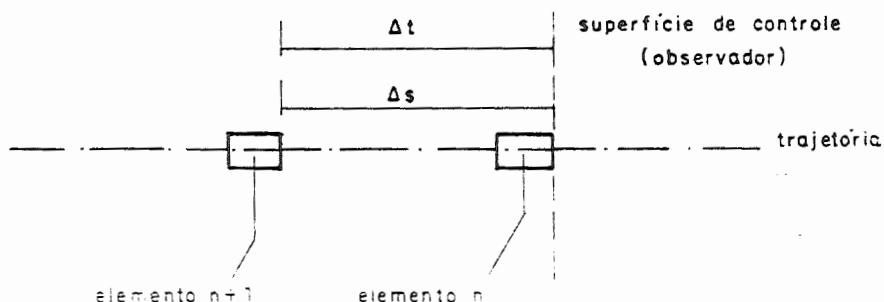
3.3. MECÂNICA DE LOCOMOÇÃO DE VEÍCULOS.

As características dinâmicas de um sistema de transporte tais como, propulsão, frenagem e forças inerentes ao movimento de um veículo, são fundamentais para se determinar sua velocidade, aceleração, desaceleração e consumo energético.

A capacidade do sistema e o custo de transporte de uma unidade de carga são fortemente dependentes dessas características.

Para efeito de análise de movimento vimos que a tecnologia de transportes pode ser dividida em sistemas de fluxo discreto e sistemas de fluxo contínuo.

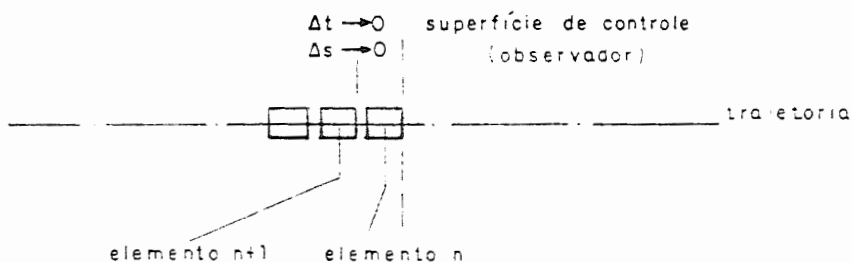
a) sistemas de fluxo discreto



entre a passagem de dois elementos sucessivos existe um espaço Δs comumente conhecido como espaçamento - "space headway" ou "spacing", que é percorrido num intervalo Δt , comumente conhecido como intervalo entre elementos sucessivos - "time headway" ou simplesmente "headway".

Incluem-se nesse grupo todas as tecnologias em que o objeto a ser transportado está acondicionado em um contêiner e/ou veículo. Exemplos: automóveis percorrendo uma rodovia, trens percorrendo uma ferrovia, aviões percorrendo uma aviação, elevadores em um edifício.

b) sistemas de fluxo contínuo



entre a passagem de dois elementos sucessivos inexistente um espaço ΔS , ou ΔS é muito pequeno.

Incluem-se nesse grupo as tecnologias em que a via se locomove ou induz a locomoção do próprio objeto. Exemplos: esteiras de transporte de minério, escadas rolantes, esteiras de transporte de pessoas, dutovias de uma forma geral.

As distribuições entre esses dois grupos tecnológicos do ponto de vista de análise de movimento, são de tal ordem que se justifica tratá-los em separado. O caso particular de transporte de fluidos em dutos é tratado nos cursos de engenharia dentro da disciplina Fenômenos de Transporte.

Abordamos neste capítulo e no próximo os sistemas de fluxo discreto, voltando ao problema dos sistemas de fluxo contínuo no capítulo 7.

Para a análise do movimento de um veículo partiremos da hipótese de que o veículo se desloca sozinho sobre a via, não sendo portanto o seu movimento influenciado pelas características tecnológicas de outros veículos.

Os princípios básicos que governam o movimento de um corpo são as leis de Newton, descritos em PRINCIPIA, 1687, que estabelecem:

1. Todo corpo permanece em repouso ou em movimento uniforme ao longo de uma trajetória linear a menos que a ação de uma força modifique esse estado.
2. Uma força causa uma variação de quantidade de movimento na direção e sentido de aplicação dessa força.
3. A toda ação entre dois corpos corresponde simultaneamente uma reação igual em módulo e de sentido contrário.

TABELA 3.1 - TABELA DE CONVERSÕES DE UNIDADES

Quantidade	Unidade SI	Símbolo	Multiplicar por	Unidade Inglesa	Símbolo
Comprimento	metro	m	$3,048 \times 10^{-1}$	pé	ft
	quilômetro	km	$6,214 \times 10^{-1}$	milha	mi
	quilômetro	km	$5,396 \times 10^{-1}$	milha náutica	m.n.
Tempo	segundo	s	-	segundo	s
Velocidade	m/s	m/s	$3,048 \times 10^{-1}$	ft/s	ft/s
	km/h	km/h	$6,214 \times 10^{-1}$	m.p.h.	mi/h
	km/h	km/h	$5,396 \times 10^{-1}$	nós	m.n./h
Massa	quilograma	kg	2,205	libra massa	lb
	quilograma	kg	$6,853 \times 10^{-2}$	"slug"	$\frac{\text{lb} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}}$
Força	newton	N	$2,247 \times 10^{-1}$	libra força	lbf*
Energia	joule	J=Nxm	$7,376 \times 10^{-1}$	libra-pé	lbf·ft
Trabalho	joule	J	$3,725 \times 10^{-7}$	HP-hora	HP·h
	joule	J	$9,480 \times 10^{-4}$	BTU	BTU
Potência	watt	W=J/s	$1,341 \times 10^{-3}$	HP (inglês)	HP
			$1,360 \times 10^{-3}$	CV (Cavalo vapor)	CV
			$1,360 \times 10^{-3}$	HP (métrico)	HP
			1055	BTU/segundo	BTU/s
			1,356	libra-pé/segundo	lbf·ft/s
			(1)	graus Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}$

$$(1) \text{ } ^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (\text{ } ^{\circ}\text{F} - 32) \text{ ou } ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \text{ } ^{\circ}\text{C} + 32$$

OUTRAS CONVERSÕES

Quantidade	Unidade métrica	Símbolo	Multiplicar por	Unidade Inglesa	Símbolo
Força	quilograma força	kgf	2,205	libra/força	lbf
	quilograma força	kgf	igual	quilo pond	kp
	quilograma força	kgf	9,807	newton	N
Área	metro quadrado	m ²	$2,471 \times 10^{-4}$	acres	acres

A quantidade de movimento de um corpo é igual ao produto da sua massa (m) pela sua velocidade (\vec{v}): $\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{Q}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \frac{dm}{dt}$$

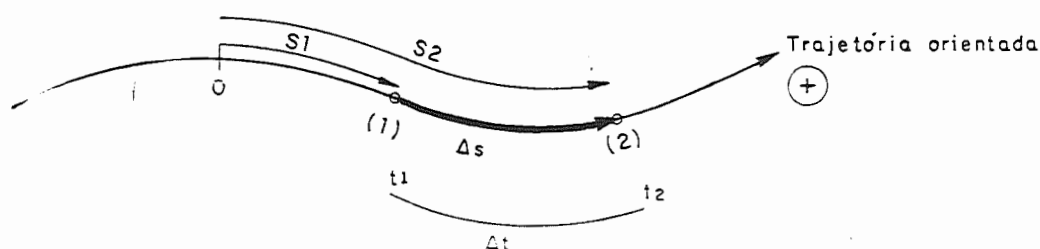
admitindo-se a massa constante resulta:

$$F = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}, \quad \text{onde: } m = \frac{P}{g} \text{ - peso}$$

g - aceleração da gravidade.

2.3.1.1. Definição de Velocidade e Aceleração.

a) Escalar



S : espaço (distância da origem sobre a trajetória orientada, à qual é atribuída um sinal dependendo da posição em relação à origem).

definição: Velocidade escalar média

$$\bar{v} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$$

velocidade escalar instantânea

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}$$

definição: Aceleração escalar média

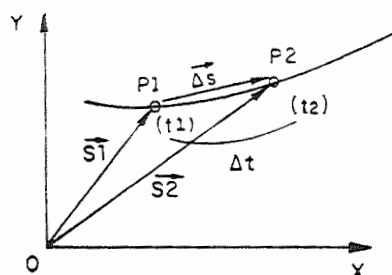
$$\bar{a} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}$$

Aceleração escalar instantânea

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt}$$

a) Vetorial

Na realidade a velocidade e a aceleração são grandezas vetoriais (somente ficam perfeitamente caracterizadas através da magnitude (módulo), direção e sentido).



\vec{S}_1 e \vec{S}_2 vetores de localização em relação a um referencial.

vetor deslocamento: $\Delta \vec{S} = \vec{S}_2 - \vec{S}_1$

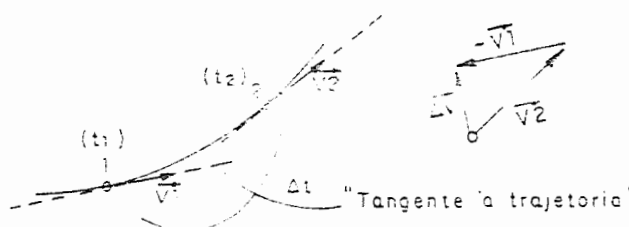
definição: vetor velocidade média (velocidade vetorial média):

$$\bar{V} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} = \frac{\vec{S}_2 - \vec{S}_1}{t_2 - t_1}$$

definição: vetor velocidade instantânea (velocidade vetorial instantânea):

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} = \frac{d\vec{S}}{dt}$$

definição: vetor aceleração média (aceleração vetorial média):



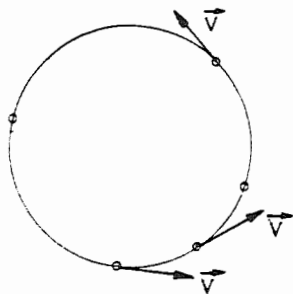
$$\Delta \vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$$

$$\bar{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{\vec{V}_2 - \vec{V}_1}{t_2 - t_1}$$

definição: vetor aceleração instantânea (aceleração vetorial instantânea):

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{a}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{d\vec{V}}{dt}$$

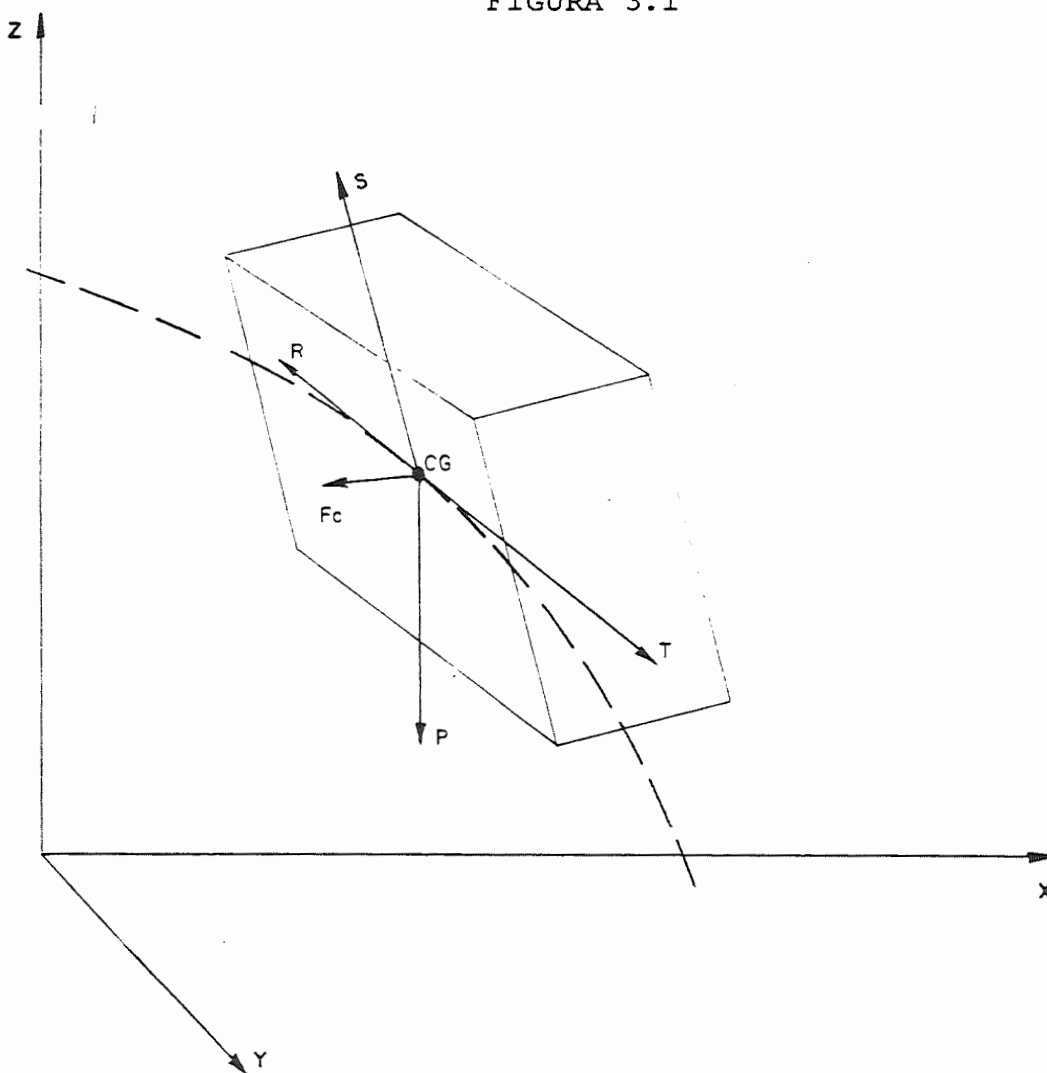
OBS: A existência do vetor aceleração não implica obrigatoriamente em variação do módulo do vetor velocidade. Se os dois vetores forem perpendiculares, haverá apenas variação na direção do vetor velocidade. Um exemplo disso é o movimento circular uniforme, no qual o módulo do vetor velocidade permanece constante, havendo apenas variação na sua direção, provocado pelo vetor aceleração centrípeta.



MCU $\rightarrow |V| = cte$

3.3.1.2. Forças Produzindo Movimento em Transportes.

FIGURA 3.1



As forças que agem sôbre um veículo que se move ao longo de uma trajetória pré-definida podem ser sumarizadas na forma que segue:

1. forças de resistência inerentes ao movimento;
2. forças necessárias para guiar o veículo ao longo da trajetória;
3. forças necessárias para variar a elevação;
4. forças de tração que contrabalançam as forças que se opõe ao movimento e providenciem a aceleração e desaceleração do veículo.

Passaremos a seguir a analisar as fôrças que opõe resistência ao movimento dos veículos para então analisarmos a propulsão necessária para contrabalançar essas forças e acelerar e desacelerar o veículo segundo um plano operacional pré-estabelecido.

RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

- . Resistência inerente ao movimento = resistência normal = resistência básica: resistência que existe mesmo quando o veículo está se deslocando ao longo de uma trajetória reta-horizantal a velocidade constante, ou seja, é uma resistência oriunda do movimento em si independente da trajetória.
- . Resistência de variação de elevação = resistência de rampa em sistemas de transporte terrestres.
- . Resistência de curvatura = resistência de curva: resistência devida a curvas horizontais na trajetória de um veículo.

3.3.1.3. Resistência Inerente ao Movimento.

A resistência inerente ao movimento dos veículos depende essencialmente dos seguintes fatores:

- peso = afeta a resistência de rolamento de veículos terrestres, o volume imerso de embarcações e a sustentação necessária em aviões.
- velocidade = afeta a resistência da massa de ar ou água que se opõe ao movimento do veículo.
- forma do veículo = afeta a resistência de rolamento de veículos terrestres e principalmente da massa de ar ou água que se opõe ao movimento de veículos terrestres, hidroviários e aéreos.
- características da via = tipo de pavimento em rodovias, condições dos trilhos em ferrovias, ondas e seção do canal navegável em hidrovias.

As resistências inerentes ao movimento são estimadas a partir de fórmulas desenvolvidas a partir de numerosos testes com veículos reais, modelos de ensaio e teorias sobre a origem e a natureza das forças de atrito e de fluxo ao redor do veículo.

Para o cálculo de resistência inerente ao movimento de veículos das várias modalidades de transporte pode-se dividi-las em três grandes categorias:

veículos sobre rodas (esteiras).

para veículos sobre rodas a resistência inerente ao movimento também denominada resistência normal, é a soma das resistências de rolamento e do ar.

resistência de rolamento.

aparece devido ao contato da roda com a superfície de rolamento. Quatro fatores contribuem essencialmente para a

resistência de rolamento: (1) deformação da roda (2) deformação da via (3) efeito de sucção causado pela subpressão na área de separação da roda da superfície de rolamento (4) escorregamento da roda sobre a superfície de rolamento. A magnitude dessa resistência é basicamente função da dureza da roda, da superfície de rolamento e da carga sobre a roda.

Assim a combinação roda/superfície de rolamento mais dura, roda de aço sobre trilho de aço, possui a resistência de rolamento mais baixa; o coeficiente de resistência dessa combinação é aproximadamente 10 vezes menor que o da combinação pneu sobre pista de concreto.

A resistência de deformação da via que inclui (2) e (3) depende principalmente das características da via e da composição e condição do pavimento.

Resistências individuais em geral não são medidas com precisão, mas são baseadas em estudos experimentais. Os mais conhecidos são os da SAE - Society of Automotive Engineers dos EUA para veículos rodoviários e os estudos desenvolvidos por Davis⁽¹⁾ para veículos ferroviários.

Esses estudos indicam que uma pequena parte dessa resistência depende da velocidade e que a maior parcela depende apenas do peso do veículo e de características técnicas da roda e da superfície de rolamento.

A expressão geral utilizada para veículos rodoviários tem a forma:

$$R_r = (c_1 + c_2 \cdot V) \cdot P$$

R_r	c_1	c_2	V	P
N	N/kN	N.h /kN.km	km/h	kN

- com R_r - resistência de rolamento
- c_1 e c_2 - coeficientes de resistência
- V - velocidade
- P - peso

(1) Davis, Willian J. (1925) - "Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars" - General Electric Review, vol. 29 pp. 685-708.

Para pistas pavimentadas os valores típicos de c_1 e c_2 recomendados pela SAE são $c_1 = 7,6$ e $c_2 = 0,056$.

Para pistas não pavimentadas a tabela abaixo ilustra alguns valores de referência.

TABELA 3.2. - TIPO DE SUPERFÍCIE

VALORES TÍPICOS DE c_1 EM N/kN PARA SUPERFÍCIES NÃO REVESTIDAS	
terra firme seca	30
terra solta seca	40
areia solta seca	100
terra mole úmida	160

A expressão geral utilizada para veículos ferroviários devida a Davis inclui um coeficiente a mais que depende do número de eixos do veículo ferroviário e tem a forma:

$$R_r = (c_1 + c_2 \cdot V + c_3 \frac{1}{p}) P$$

R_r	c_1	c_2	c_3	V	P	p
N	N/kN	N.h /kN.km	N	km/h	kN	kN

- com
- R_r - resistência de rolamento
 - c_1, c_2 e c_3 - coeficientes de resistência
 - V - velocidade
 - P - peso
 - p - carga por eixo

Os estudos experimentais de Davis apresentaram os seguintes valores típicos para veículos ferroviários: $c_1 = 0,65$ a $0,70$ $c_2 = 0,009$ $c_3 = 120$ a 130 .

resistência aerodinâmica.

aparece devido ao deslocamento do veículo dentro do meio fluido ar. Como essa componente depende basicamente da forma do veículo, uma mesma formulação é utilizada para veículos rodoviários e ferroviários, variando apenas os coeficientes de resistência dos veículos.

A resistência depende de:

- área frontal ou seção transversal máxima composta do veículo A.
- comprimento e forma do corpo do veículo e rugosidade de sua superfície (esses fatores são incluídos no coeficiente de resistência aerodinâmica do veículo c'_a).
- massa específica do ar ρ .
- velocidade do veículo em movimento em relação ao ar - velocidade aerodinâmica V_a .

A expressão geral da resistência aerodinâmica é dada por:

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c'_a \cdot A \cdot \left(\frac{V_a}{3,6}\right)^2$$

R_a	c'_a	A	V_a
N	-	m^2	km/h

com R_a - resistência aerodinâmica

ρ - massa específica do ar

c'_a - coeficiente aerodinâmico do veículo

A - área frontal do veículo

V_a - velocidade aerodinâmica do veículo

3,6 - fator de conversão de unidades de V_a em km/h para m/s

Como ρ em condições normais de temperatura e pressão ao nível do mar é igual a $1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ e ρ não varia apreciavelmente para altitudes de até 1000 metros ($\frac{\rho}{\rho_0} = 0,91$ a 1000 m) é comum encontrar-se a componente da resistência aerodinâmica para veículos sobre rodas escrita na forma:

$$R_a = c_a \cdot A \cdot V_a^2$$

$$\left| \begin{array}{c} R_a \\ N \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} c_a \\ \text{N.h}^2/\text{m}^2 \cdot \text{km}^2 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} A \\ \text{m}^2 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} V_a^2 \\ \text{km/h} \end{array} \right|$$

com $c_a = 0,0473 \cdot c_a'$ já incorporando ρ e o fator $(3.6)^2$.

Ensaio de veículos em túneis aerodinâmicos apresentam os seguintes valores típicos para c_a :

veículo	c_a	$c_a \cdot A^*$
automóvel	0,020 a 0,025	
ônibus	0,011 a 0,025	
caminhões	0,020 a 0,025	
1. ^a locomotiva	0,016 a 0,024	
outras locomotivas		0,059
carro frontal de metrô	0,013	
vagão de carga		0,096
carro plataforma com 2 reboques = "piggy back"		0,35
vagão de passageiros		0,071

Do exposto, tem-se que a equação geral da resistência inerente ao movimento para veículos sobre rodas tem a forma:

$$R = (c_1 + c_2 \cdot V) \cdot P + c_a \cdot A \cdot V_a^2$$

(*) Valores recomendados pela Association of American Railroads levando em consideração que os carros estão atrás da área frontal da locomotiva.

para veículos rodoviários

$$e \quad R = (c_1 + c_2 \cdot V + c_3 \frac{1}{p}) \cdot P + c_a \cdot A \cdot V_a^2$$

para veículos ferroviários.

Cabe salientar nas formulações apresentadas, a limitação de sua aplicação direta a alguns problemas específicos, dado o grande grau de variação possível para c_1 em função da superfície de rolamento e c_a em função da forma do veículo.

Nos equipamentos de terraplenagem c_1 passa a ter grande influência sobre o cálculo da resistência inerente e é necessário consultar os manuais dos fabricantes dos equipamentos que em geral fornecem esse parâmetro para diversas superfícies de rolamento.

Para outros veículos sobre rodas a componente dominante da resistência inerente é em geral o arrasto aerodinâmico, para o cálculo do qual os fabricantes fornecem valores de c_a em manuais ou folhetos ilustrativos.

Em síntese, apesar da existência de fórmulas de aplicação de amplo uso prático, é desejável estabelecerem-se formulações específicas para cada frota individual de veículos através de medidas experimentais.

A título de exemplo, algumas formulações específicas são apresentadas abaixo:

1) fórmula usada no cálculo de R para o trem Shinkansen no Japão:

$$R = 1,60 \cdot P + 0,035 \cdot P \cdot V + (0,193 + 0,0236 \cdot N_c) V^2$$

e N_c = número de carros

R	P	V
N	kN	km/h

2) fórmula usada no metrô de Londres

$$R = 2,7 \cdot P + 0,88 \cdot V_a^2$$

R	P	V _a
N	kN	km/h

fonte: Vuchic (1981) pg. 125

3) fórmula usada no metrô de Leningrado - Sistema com trens com 3 carros.

$$R = 3,2 \cdot P + 0,034 \cdot V \cdot P + 0,0005 \cdot V_a^2 \cdot P$$

R	P	V	V _a
N	kN	km/h	km/h

fonte: Vuchic (1981) pg. 125

4) fórmula usada para bondes em Moscou

$$R = 5,0 \cdot P + 0,005 \cdot V_a^2 \cdot P$$

R	P	V _a
N	kN	km/h

fonte: Vuchic (1981) pg. 125

veículos hidroviários (embarcações convencionais).

Para embarcações de forma clássica (excluem-se aerobarcos, hidrofólios e hovercrafts) a principal força de resistência é a resistência hidrodinâmica. Apenas para embarcações pequenas e/ou de alta velocidade, a componente de resistência aerodinâmica torna-se um componente relevante.

A resistência hidrodinâmica pode ser dividida em dois componentes básicos:

- resistência de fricção
- resistência residual.

resistência de fricção

Quando um barco se desloca na água o atrito entre a parte imersa do casco (carena) e a água gera um cinturão de vórtices ao longo do casco que vai se deslocando da proa para a popa, numa velocidade menor que a do escoamento da água no entorno do casco.

Essa resistência de fricção do barco depende:

- a) da velocidade do barco (V)
- b) da área molhada do casco (M)
- c) do comprimento do barco (L)
- d) da rugosidade do casco
- e) da massa específica da água (ρ)

Baseado em pesquisas em tanques de ensaio iniciadas no final do século XIX com o apoio do almirantado inglês, William Froude desenvolveu a seguinte fórmula empírica para a resistência de fricção, também conhecida por resistência de Froude.

$$R_f = C_f \cdot M \cdot V^{1,825}$$

R_f	M	V	C_f
N	m^2	m/s	$kg/m^{2,825} \cdot s^{0,175}$

onde C_f depende do comprimento do barco, da rugosidade do casco e da densidade da água.

A título de exemplo, para um casco liso de aço, ensaios de laboratório apresentaram a seguinte fórmula empírica para C_f :

$$C_f = \left(0,417 + \frac{0,773}{L + 2,862} \right) \times \frac{3.35}{\text{cte de ajuste de unidades de velocidade.}}$$

Tem-se portanto que C_f se reduz quando o comprimento do barco aumenta. Para navios de baixa ou média velocidade, a resistência de fricção constitui a maior parcela da resistência total, e pode atingir valores da ordem de 75%. Já em embarcações fluviais, essa componente pode ser suplantada pela resistência residual dependendo da forma da embarcação e da seção do canal de navegação.

Resistência residual

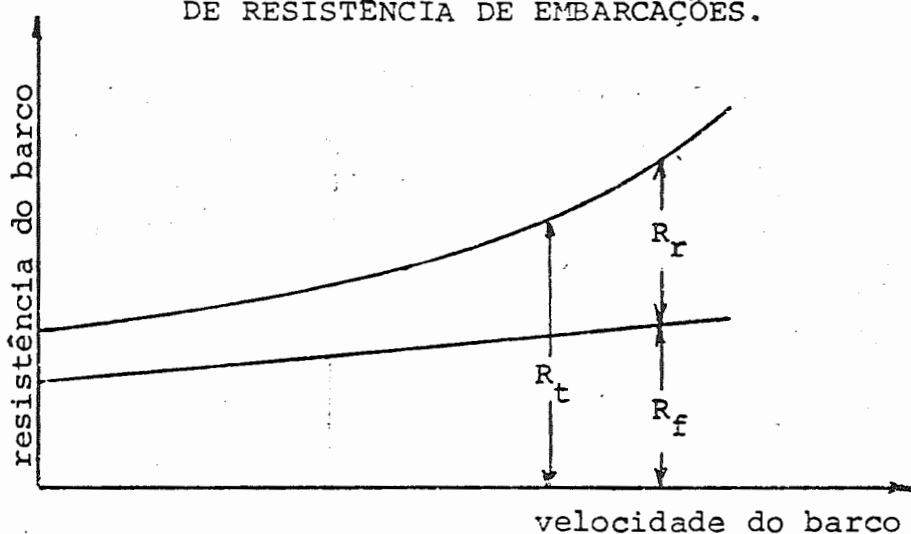
O componente de resistência residual pode ser dividido em:

- a) resistência de forma, que é a resistência gerada pela mudança de direção das linhas de corrente do fluido quando escoam no entorno da carena. Se a água muda de direção abruptamente, como é o caso em algumas barcas de proa chata (e.g. "lash-container"), essa resistência pode ser considerável; em barcos com proa afilada entretanto, essa parcela é geralmente pequena. Também os vórtices gerados na popa da embarcação, onde as linhas de corrente do fluido voltam a se unir, contribuem para a resistência de forma.

- b) resistência de formação de ondas que é a resistência gerada pela formação de ondas na interface do meio fluido água com o meio fluido ar. Em embarcações de baixa e média velocidade navegando em canal largo (não há interferência das ondas com as margens), a resistência de onda é pequena em comparação à resistência de fricção. Em altas velocidades entretanto, a resistência de onda aumenta consideravelmente, podendo constituir 50 a 60% da resistência total.

A relação entre resistência de fricção e resistência residual de embarcações convencionais é ilustrada na Figura 3.22.

FIGURA 3.2.2 - ILUSTRAÇÃO DA IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS COMPONENTES DE RESISTÊNCIA DE EMBARCAÇÕES.



As resistências residuais de embarcações seguem a Lei da Comparação de Froude:

As resistências residuais de duas embarcações semelhantes estão na razão do valor do cubo de suas dimensões lineares, se as suas velocidades estão na razão da raiz quadrada das suas dimensões lineares.

Portanto,

$$\frac{R_{r1}}{R_{r2}} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^3 \quad \text{se} \quad \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

ou

$$\frac{R_{r1}}{R_{r2}} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad \text{se} \quad \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)^{1/6}$$

onde Δ = deslocamento, V = velocidade, L = comprimento e V_1 e V_2 são denominadas velocidades correspondentes.

$$\text{Assim em velocidades correspondentes} \quad \frac{V_1}{\sqrt{L_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{L_2}}$$

sendo $\frac{V}{\sqrt{L}}$ conhecido como a razão velocidade-comprimento.

Pode-se observar dessa formulação que em velocidades correspondentes as características de formação de ondas de barcos semelhantes são as mesmas. Em altas velocidades a razão velocidade-comprimento é elevada e a resistência de formação de ondas é grande. Para fornecer as mesmas características de formação de ondas a velocidade correspondente de uma embarcação muito menor mas semelhante na forma, será muito reduzida e poderá gerar confusão na compreensão do que é uma embarcação de baixa e de alta velocidade. Um barco é portanto considerado veloz ou lento em relação à sua razão velocidade-comprimento.

Se $\frac{V}{\sqrt{L}}$ é menor que 1.0 (V em kts e L em m) o barco é tido como lento.

Se $\frac{V}{\sqrt{L}}$ é maior que 1.5 o barco é tido como veloz.

Assim, um barco de 225 m de comprimento à 15 nós é considerado lento, enquanto que um barco de 100 m à mesma velocidade é considerado veloz.

Apesar da existência de fórmulas empíricas para o cálculo da resistência residual tal como a fórmula de Taylor,

$$R_r = C_r C_B \cdot \Delta \cdot (V/\sqrt{L})^4$$

R_r	C_B	Δ	V	L	C_r
N	-	t	m/s	M	kg.s ² /t.m ³

com R_r - resistência residual

C_f - coeficiente de resistência residual

C_B - coeficiente de bloco = $\frac{\Delta}{L \cdot B \cdot H}$

Δ - deslocamento

V - velocidade

L - comprimento

B - boca

H - calado

ρ - massa específica da água

o cálculo da resistência residual é usualmente baseado em resultados de experiências com modelos reduzidos em tanque. Um modelo em escala é rebocado na velocidade correspondente de operação normal e é medida a resistência total do modelo. A resistência de fricção do modelo é calculada através da fórmula empírica de Froude e subtraída da resistência total. Esse valor de resistência residual do modelo, é então transformado através da Lei de Comparação de Froude no valor da resistência residual da embarcação.

Como o problema básico da locomoção de embarcações é o da tração necessária para manter a velocidade operacional de projeto, o valor da resistência total assim determinado, serve de base para o dimensionamento da potência da máquina a ser instalada.

É comum ser necessário uma primeira estimativa grosseira da potência de máquina necessária, sem que se utilize a metodologia do ensaio de um modelo específico.

Um dos métodos mais conhecidos é o da Equação do Almirantado para estimativa de potência. A Equação do Almirantado é baseada na hipótese de que para pequenas variações da velocidade a resistência total pode ser expressa na forma:

$$R_t \propto \rho \cdot M \cdot V^n$$

é proporcional a

$$M \propto L^2$$

$$\Delta \propto L^3$$

e portanto $M \propto L^{2/3}$

onde \propto = símbolo de proporcionalidade

ρ = massa específica da água

M = área molhada

V = velocidade

L = comprimento

para $\rho = \text{cte}$ tem-se então $R_t \propto \Delta^{2/3} \cdot V^n$

para velocidade uniforme

$$\text{tração} = R_t = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^n}{K}$$

$$\text{ou potência} = \text{tração} \times \text{velocidade} = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^{n+1}}{K}$$

sendo esse coeficiente K conhecido como coeficiente do Almirantado.

Para a maioria das embarcações convencionais n é assumido igual a 2 e K é determinado por semelhança da embarcação com outra de K conhecido. A título de exemplificação, para navios de mar com Δ em toneladas, V em nós e potência em quilowatts, K varia aproximadamente entre 350 e 600, sendo os valores mais altos de K indicativos de navios energeticamente mais eficientes.

veículos aéreos (aviões).

Para veículos aéreos convencionais (excluem-se helicópteros e aeróstatos) não há interesse prático em analisar apenas a resistência ao movimento, uma vez que a sustentação do veículo também depende da velocidade e de parâmetros de forma, o que vincula a resistência à sustentação.

Para uma apresentação introdutória da mecânica de locomoção de aviões recomenda-se a leitura da apostila do Prof. Manoel H.A. Sória - INTRODUÇÃO À MECÂNICA DE LOCOMOÇÃO DO AVIÃO. Publicação EESC/USP AGOSTO/83.

3.3.1.4. A Relação Sustentação/Arrasto.

O interesse da relação

$$\frac{\text{sustentação}}{\text{arrasto}} = \frac{L}{D} \quad \text{onde}$$

sustentação = força normal = peso (p/movimento horizontal linear)

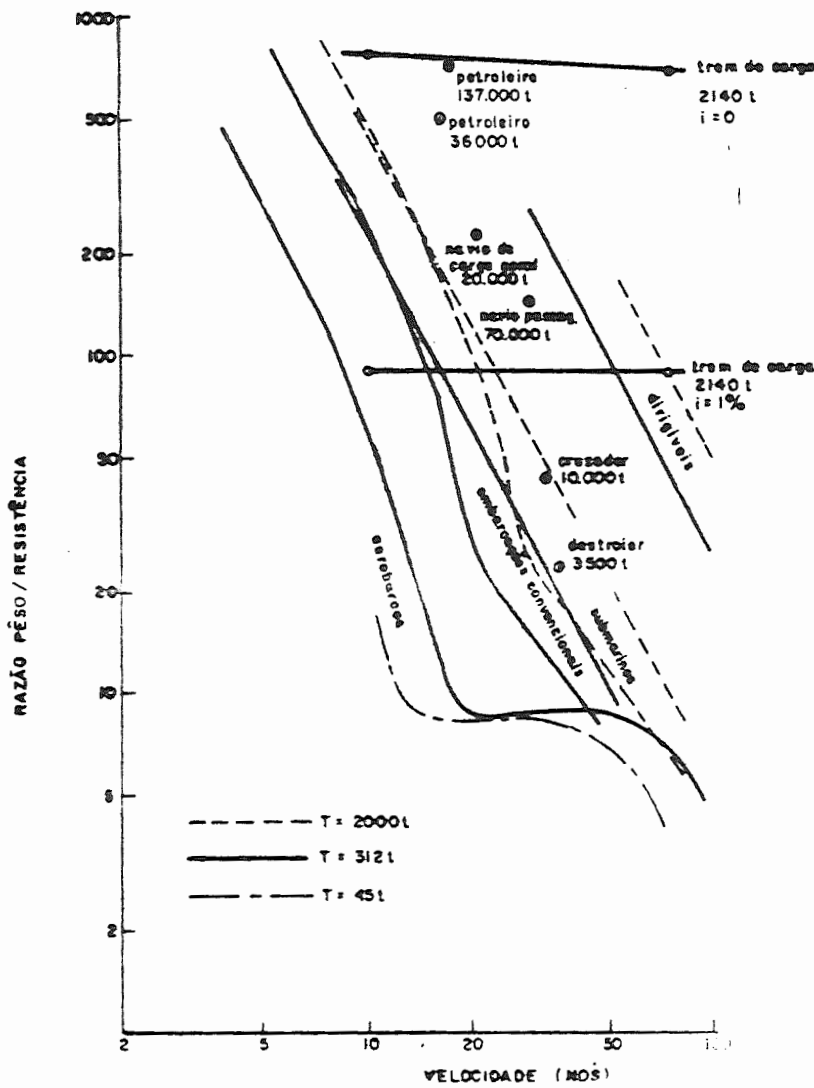
arrasto = resistência inerente ao movimento,

não se limita entretanto aos aviões.

Dado que a eficiência energética de um sistema de transporte está associada à relação de força de tração versus peso bruto transportado, a relação L/D para a condição de movimento retilíneo uniforme em trajetória horizontal (sustentação L = peso P), contém quantidade de informações importantes a respeito da eficiência energética desse sistema.

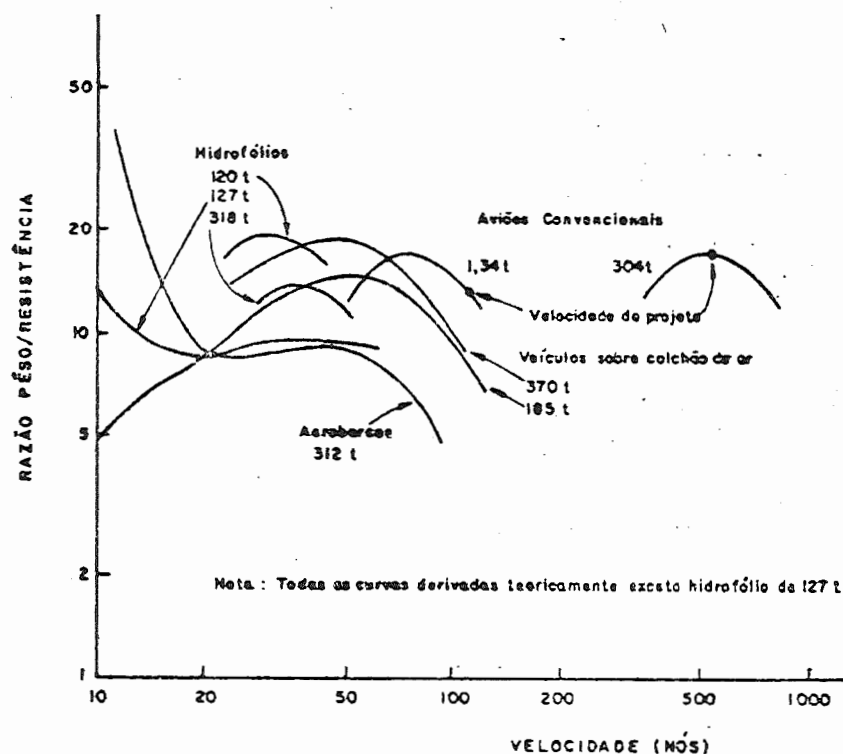
Assim é comum a apresentação da resistência inerente ao movimento de veículos em função da sua velocidade na forma ilustrada pelas figuras 3.2 a 3.4.

FIGURA 3.2 - RAZÕES DE PÊSO/RESISTÊNCIA PARA DIRIGÍVEIS, SUBMARI-
NOS, NAVIOS CONVENCIONAIS, AEROBARCOS.



Fonte: Morlok (1978) Fig. 4.4 pag. 128 exceto trem de carga

FIGURA 3.3 - RAZÕES DE PÊSO/RESISTÊNCIA PARA AVIÕES, VEÍCULOS SOBRE COLCHÃO DE AR, HIDROFÓLIOS E AEROBARCOS.



Fonte: Morlok (1978) Fig. 4.5 pag. 130

A partir da análise dessas figuras nota-se as profundas diferenças entre tecnologias alternativas.

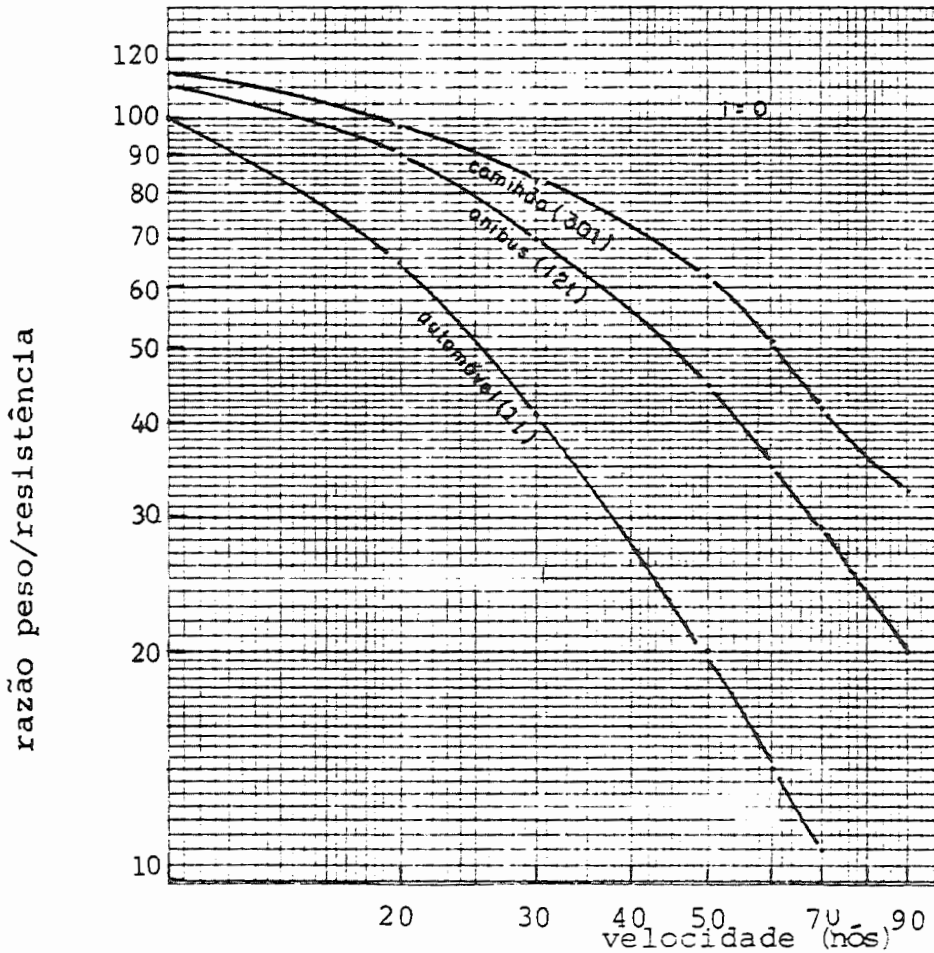
Enquanto um petroleiro de 137000 toneladas a 20 nós atinge L/D da ordem de 700 a tecnologia de transporte rodoviário (caminhão de 30 t) atinge um L/D da ordem de 100 na mesma velocidade.

Já aviões que são projetadas para transporte a alta velocidade, atingem valores de L/D máximo da ordem de 15 a 20 para velocidades na faixa de 500 nós, valores estes atingidos pelo transporte rodoviário de ônibus para velocidades da ordem de 90 nós..

Interessante também é notar os elevados valores de L/D de trens mesmo para velocidades altas, e a grande influência das rampas da via sobre o rendimento dessa tecnologia.

FIGURA 3.4 - RAZÕES DE PESO/RESISTÊNCIA PARA AUTOMÓVEIS, CAMINHÕES, ÔNIBUS.

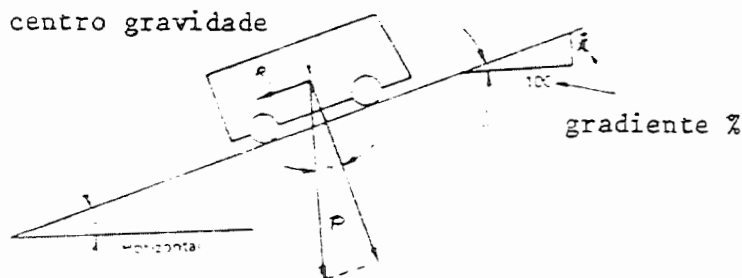
Fonte: Cálculos teóricos do autor.



3.3.1.5. Resistência de Gradiente (rampa)

A resistência de gradiente ou de variação da elevação de um veículo depende apenas do peso do veículo e pode ser determinada a partir de um simples diagrama de forças.

FIGURA 3.5 - RESISTÊNCIA DE GRADIENTE



Se o veículo estiver subindo a resistência de gradiente ou resistência de rampa é contrária ao movimento (resistência propriamente dita), se estiver descendo essa componente atua como uma componente de tração do veículo e portanto $R_g < 0$

3.3.1.6. Resistência de Curvas Horizontais.

Entre as modalidades analisadas, os únicos veículos cuja resistência de curva é relevante para projeto de obras civis, são os veículos ferroviários.

A componente principal da resistência de curva de um veículo ferroviário advem do fato de as rodas não girarem livremente sobre o eixo como em veículos rodoviários, ocorrendo pois um arrastamento das rodas externas nas curvas. Uma parcela menor ocorre devido ao encosto do friso das rodas externas/internas no trilho externo/interno nas curvas cuja sobrelevação é menor/menor do que a sobrelevação ideal para uma determinada velocidade operacional.

Admitindo-se uma condição de sobrelevação ideal, pode-se estimar a resistência de curvas horizontais para veículos ferroviários a partir de fórmulas empíricas obtidas a partir de ensaios.

Uma das expressões comumente empregadas é a fórmula de Bricka.

$$R_c = 500 \frac{B \cdot P}{r}$$

$$\left| \begin{array}{c|c|c|c} R_c & B & P & r \\ \hline N & m & kN & m \end{array} \right|$$

com R_c - resistência de curva
B - bitola
P - peso
r - raio da curva

Uma forma mais elaborada de cálculo de resistência de curvatura é a desenvolvida pela Hamburger Hochbahn A.G. apresentada por Vuchic (1981) pg. 128-129 e transcrita abaixo:

$$R_c = \frac{650}{r - 55} \cdot P \quad \text{para } r > 272 \text{ m}$$

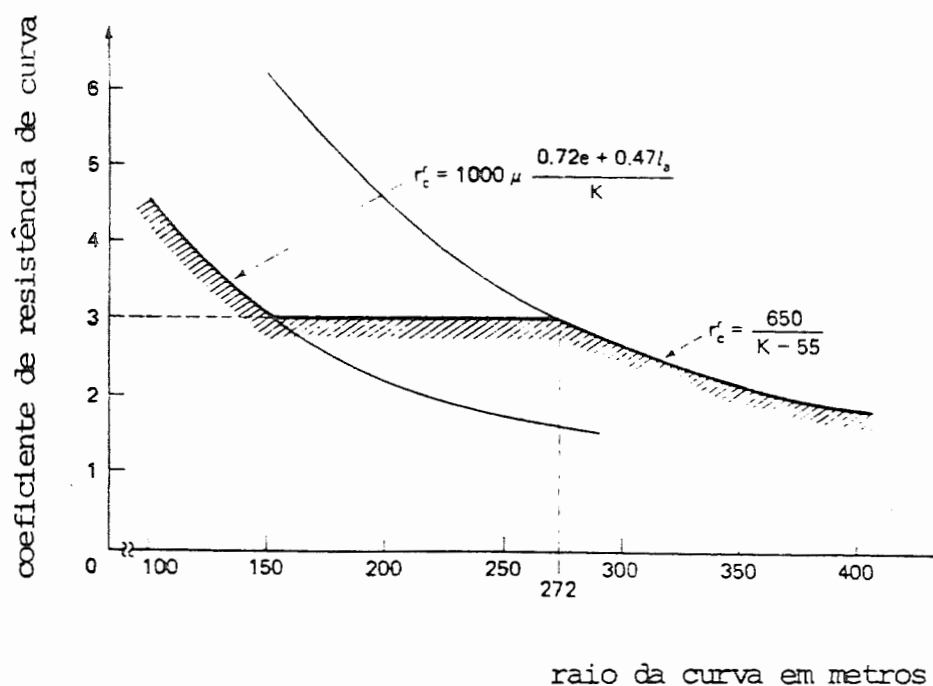
R_c	P	r
N	kN	m

para $r \leq 272$

$$R_c = r_c^r \cdot P \quad \text{onde } r_c^r \text{ é calculado a partir do gráfico}$$

FIGURA 3.6 - COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA DE CURVA PARA VEÍCULOS FERROVIÁRIOS.

Fonte: Vuchic (1981) Fig. 3.4 pag. 129



- onde,
- $K = r - \text{raio da curva,}$
 - $\mu = \text{coeficiente de atrito}$
 - $e = \text{bitola}$
 - $l_a = \text{distância entre eixos de um truque}$

3.3.1.7. Exemplos de Cálculo de Resistência e de Relações Pêso/Resistência.

veículos rodoviários.

$$R_t = (c_1 + c_2 \cdot V) \cdot P + c_a \cdot A \cdot V_r^2$$

admitindo-se:

veículo	Pêso		Área m ²	C ₁	C ₂	C _a
	t	kN				
automóvel	1	10	1,80	7,6	0,056	0,025
caminhão	30	294	7,00	7,6	0,056	0,020
ônibus	12	118	7,00	7,6	0,056	0,020

tem-se para rampa $i = 0$.

VELOCIDADE		RESISTÊNCIA TOTAL = RESISTÊNCIA BÁSICA (N)			L/D = P/R _t		
(nós)	km/h	automóvel	caminhão	ônibus	automóvel	caminhão	ônibus
10	18	101	2576	1051	99	114	111
20	36	154	3008	1316	65	98	90
30	55	243	3563	1684	41	83	70
50	90	491	4850	2626	20	61	45
60	111	693	5787	3355	14	51	35
70	130	909	6721	4122	11	44	29

Para esses mesmos veículos tem-se os seguintes valores de resistência de gradiente R_g .

rampa i	RESISTÊNCIA DE GRADIENTE (N)				
	1%	2%	3%	4%	5%
automóvel	100	200	300	400	500
caminhão	2940	5880	8820	11760	14700
ônibus	1180	2360	3540	4720	5900

Portanto, para uma rampa média $i = 3\%$, o quadro de resistência total e L/D versus velocidade passa a ser o seguinte:

VELOCIDADE		RESISTÊNCIA TOTAL (N)			$L/D = P/R_t$		
(nós)	km/h	automóvel	caminhão	ônibus	automóvel	caminhão	ônibus
10	18	401	11339	4601	25	26	26
20	36	454	11828	4856	22	25	24
30	55	543	12383	5224	18	24	23
50	90	791	13670	6166	13	22	19
60	111	993	14607	6895	10	20	17
70	130	1209	15541	7662	8	19	15

veículos ferroviários.

$$R_t = c_1 \cdot P + c_2 \cdot V + c_3 \cdot E + c_a \cdot A \cdot V^2$$

admitindo-se um trem com as seguintes características

2 locomotivas diesel elétricas (faixa 3000 HP) +

20 vagões de carga geral

veículo	Peso		Área m^2	Eixos	c_1	c_2	c_3	$c_a \cdot A$
	l	kN						
1. ^a locomotiva	140	1372	11	4	0,65	0,009	129	0,176
2. ^a locomotiva	140	1372	-	4	0,65	0,009	129	0,059
vagão	100	980	-	4	0,65	0,009	120	0,096

tem-se para rampa $i = 0$.

VELOCIDADE		RESISTÊNCIA TOTAL = RESISTÊNCIA BÁSICA (N)				L/D
(nós)	km/h	loco I	loco II	vagões	trem	
10	18	1465	1427	23091	25983	860
20	36	1636	1485	23185	26306	850
30	55	1941	1586	23351	26878	831
50	90	2834	1887	23838	28559	782
60	111	3577	2136	24244	29957	746
70	130	4383	2406	24684	31473	710

Para esse trem tem-se os seguintes valores de resistência de gradiente - R_g .

Resistência de Gradiente

rampa i	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1,0%	1,2%
R_g (N)	44688	89376	134064	178752	223344	268128

Portanto, para uma rampa média de $i = 1\%$ o quadro de resistência total e L/D versus velocidade passa a ser o seguinte:

VELOCIDADE		RESISTÊNCIA TOTAL DO TREM (N)	L/D
(nós)	km/h		
10	18	249327	90
20	36	249650	90
30	55	250222	89
50	90	251903	89
60	111	253301	88
70	130	254817	88

3.3.1.8. Fôrças Propulsoras.

Transformadores Primários de Energia.

São mecanismos que transformam energia química (óleo diesel, gasolina, álcool, carvão, gás metano, gás propano, etc), energia potencial da água, energia nuclear, energia solar ou energia eólica, diretamente em energia mecânica, ou em energia elétrica, posteriormente convertida em energia mecânica em transformadores secundários de energia (motores elétricos).

Tipos de Transformadores Primários de Energia.

motores de combustão externa - motores alternativos a vapor.
- turbinas a vapor

motores de combustão interna - motores alternativos de ciclo Otto e ciclo diesel.
- turbinas a gás (inclui todas as turbinas aeronáuticas).

motores de foguetes

turbinas de geração de energia elétrica

baterias solares

velas e cataventos

Esses transformadores primários de energia ou são instalados diretamente no veículo (e.g. motor de combustão interna de um caminhão), ou geram energia elétrica que é transmitida ao veículo por linhas de transmissão de eletricidade (e.g. eletricidade utilizada nos motores elétricos do metrô de S.P.). Em alguns casos o próprio veículo é dotado de um transformador primário de energia que gera eletricidade para uso em um ou mais transformadores secundários (motores elétricos) os quais transmitem a energia mecânica para os eixos motrizes (e.g. locomotiva diesel-elétrica).

Na sequência serão analisadas as características básicas das formas de propulsão usuais dos veículos considerados neste capítulo.

Veículos rodoviários e máquinas de terraplenagem.

Usualmente são propulsionados por motores de combustão interna acoplados a uma caixa de engrenagem (câmbio + diferencial) que transmite a energia do motor às rodas motrizes. A Potência = Trabalho/Unidade de Tempo que um motor de combustão interna oferece, é em geral medida em HP, ou mais recentemente também em KW, e pode ser definida de várias formas:

potência indicada - potência medida nos cilindros como resultado da combustão.

potência de eixo - potência medida no eixo do motor que transmite a energia para a caixa de engrenagens.

potência efetiva - potência que efetivamente chega ao perímetro das rodas motrizes.

A potência indicada, que é a potência total que o motor produz, é a mais alta. Subtraindo-se dela as perdas internas do motor, atritos nos pistões e nos mancais, obtém-se a potência de eixo que representa a potência líquida produzida pelo motor. Essa potência é por sua vez reduzida pelas resistências existentes no sistema de transmissão, tais como, embreagem, engrenagens e mancais do câmbio, engrenagens e mancais do diferencial, e mancais das rodas.

Assim a tração efetiva que se obtém no perímetro das rodas é dada por:

$$T_e = \frac{P_i \times \eta_t}{V} \times k \quad (I)$$

T_e	P_i	V	η_t	k
N	kW	km/h	-	3600

com $P_i \times \eta_t = P_e$ e

T_e = tração efetiva

P_i = potência indicada

η_t = rendimento total = $\eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{transmissão}}$

V = velocidade

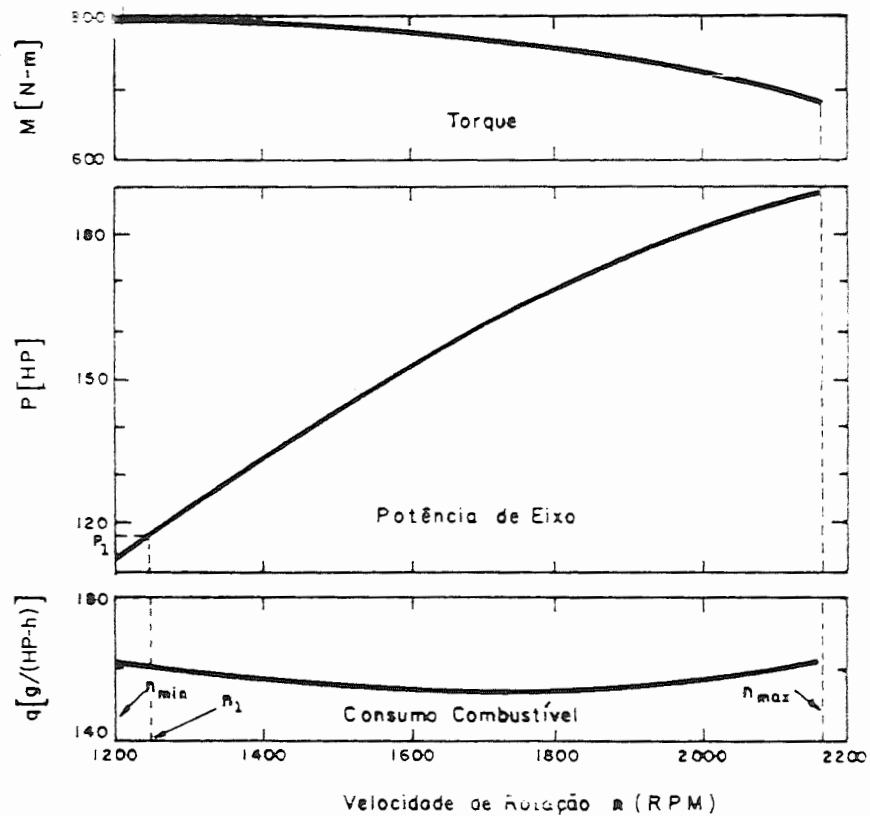
P_e = potência efetiva

k = constante de ajuste de unidades

Conforme mostra a figura 3.7, a potência de eixo e o torque fornecido por um motor de combustão são função da sua velocidade de rotação n (rotações por minuto).

FIGURA 3.7 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.

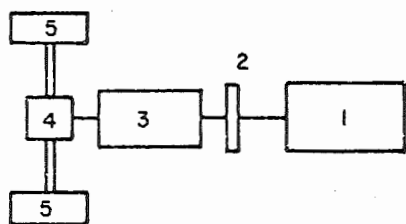
Fonte: Vuchic (1981) Fig. 3.5 pag. 132



Como a velocidade de rotação do motor é em geral bem maior que a velocidade das rodas motrizes, é necessário transmitir a rotação através de uma caixa de engrenagens.

Para permitir o início do movimento e a troca de marchas faz-se necessário, também um sistema de embreagem entre o eixo do motor e o câmbio.

Esquemáticamente tem-se então:



- 1 - motor
- 2 - embreagem
- 3 - caixa de cambio
- 4 - diferencial
- 5 - rodas motrizes

A velocidade do perímetro da roda que é igual a velocidade do veículo, relaciona-se com a velocidade de rotação do motor através da expressão:

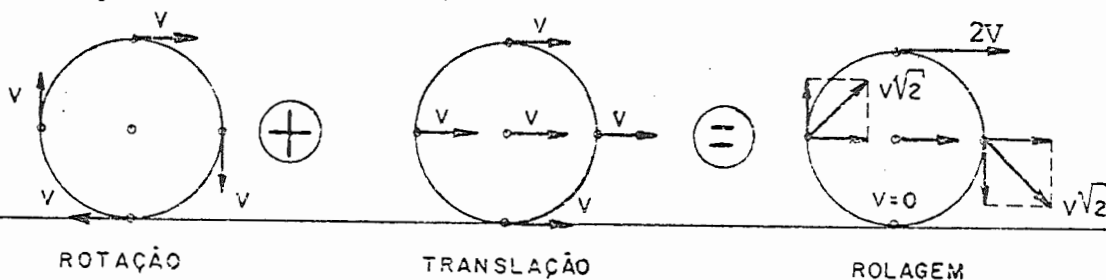
$$V = \frac{2\pi r \cdot n \cdot 60}{u_j \cdot w \cdot 1000} \quad (II)$$

V	r	n	u _j	w
km/h	m	r.p.m.	-	-

- com
- V = velocidade
 - r = raio do perimetro da roda
 - n = rotações do motor
 - u_j = relação de marcha - diferente para cada marcha j.
 - w = relação de diferencial - constante

velocidade de uma roda rolando (recordação).

uma roda rolando tem dois movimentos simultâneos: rotação em torno do eixo mais translação.

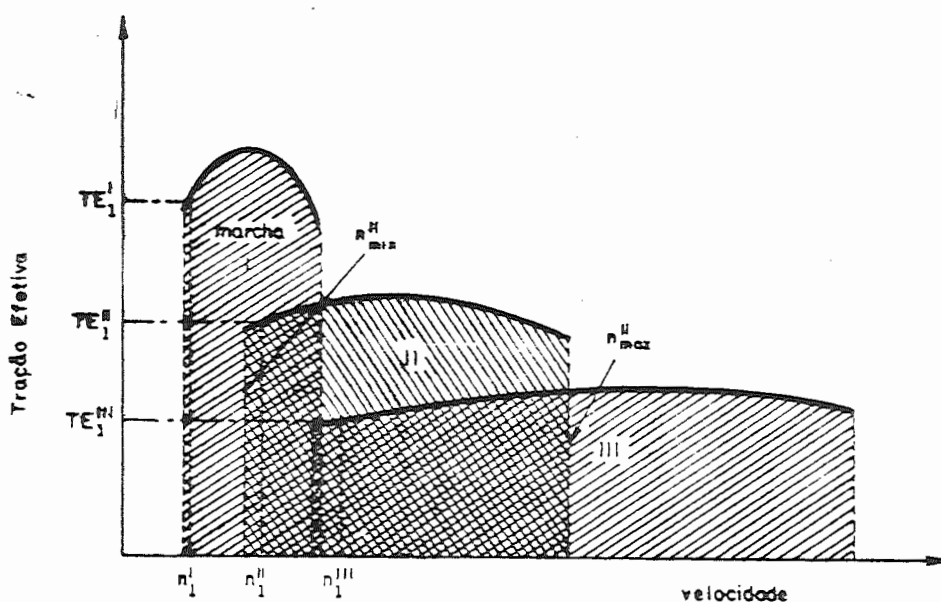


Importante: O ponto de contacto da roda com a superfície de rolamento tem velocidade nula em relação à superfície (não existe deslizamento relativo).

A partir de um diagrama como o apresentado na figura 3.7 pode-se portanto desenvolver a partir das expressões (I) e (II), um diagrama de tração efetiva T_e em função da velocidade V para as diversas marchas existentes no sistema de transmissão - conforme a figura 3.8.

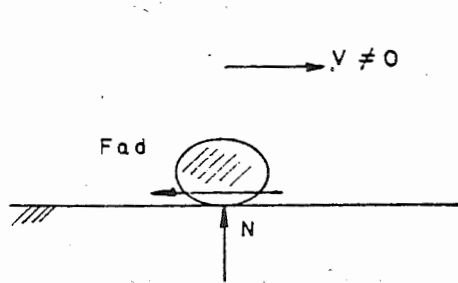
FIGURA 3.8 - DIAGRAMA DE TRAÇÃO EFETIVA x VELOCIDADE

fonte: Vuchic (1981) Fig. 3.6 pag. 133



Há de se considerar entretanto que nem sempre a força de atrito entre o pneu ou esteira e a superfície da via é suficiente para oferecer uma reação igual à tração efetiva, ocorrendo portanto uma restrição da força tratora devido à aderência.

atrito estático e dinâmico (recordação).

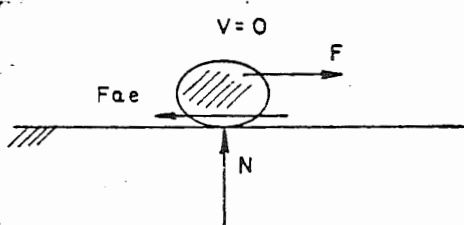


Fad: força de atrito dinâmico (cinético) contrária ao movimento.

$$F_{ad} = \mu_d \cdot N$$

fôrça normal

coeficiente de atrito dinâmico.



Fae: força de atrito estático contrária à tendência de movimento aumentando (F) aumenta (Fae) → Fae = F (para haver equilíbrio).

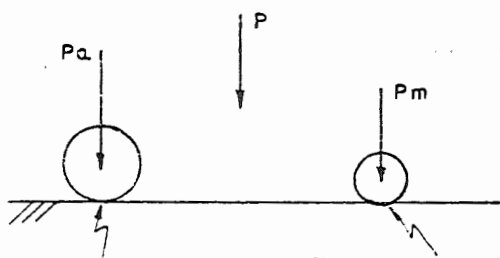
$$0 < F_{ae} \leq F_{ae_{m\acute{a}x}} = \mu_e \cdot N$$

coeficiente de atrito estático.

Como $\mu_e > \mu_d$ → é mais difícil iniciar o movimento do que mantê-lo.

Como para a condição de transmissão sem derrapagem da roda a velocidade de contato é igual a zero somente a força de atrito estático é relevante. A fôrça de atrito estático máxima é dada por $F_{ae_{m\acute{a}x}} = \mu_e \cdot P_a$ onde P_a = peso aderente ou peso sôbre as rodas motrizes.

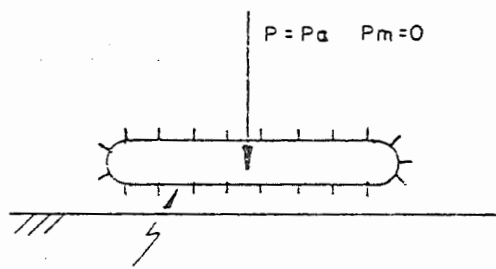
VEÍCULOS SÔBRE RODAS



Rodas acopladas não acopladas ao motor → motoras motor → rodas livres

P: peso total P_a = peso aderente

VEÍCULOS SÔBRE ESTEIRA



esteira sempre acoplada ao motor.

P_m = peso morto

O fabricante fornece o valor do peso aderente ou a fração do peso total incidente nas rodas motoras → $\alpha = \frac{P_a}{P}$ ($P_a = \alpha \cdot P$)

É comum encontrar-se a expressão aderência $A = F_a e_{\text{máx}}$ com $f_a = \mu_e$ (fator de aderência) onde f_a depende do tipo e condições das superfícies de contato (tabela 3.3) e da velocidade de rolamento da roda (figura 3.9). Ao contrário do conceito físico de atrito estático, no caso de aderência de rodas sobre a via, apesar de a velocidade de contato ser zero, existe o deslocamen-

TABELA 3.3 - VARIAÇÃO DE μ_e EM FUNÇÃO DO TIPO DE SUPERFÍCIE DE CONTATO.

VALORES TÍPICOS DO FATOR DE ADERÊNCIA		
NATUREZA DA SUPERFÍCIE	PNEU DE BORRACHA	ESTEIRA
pavimento seco	0,90	0,45
pavimento úmido	0,45	0,25
terra firme seca	0,55	0,90
terra solta seca	0,45	0,60
terra firme úmida	0,45	0,70
areia seca	0,20	0,30
areia úmida	0,40	0,50

to da roda sobre a superfície empurrando uma cunha de ar ou água a sua frente, o que faz com que f_a varie em função da velocidade do veículo conforme exemplificado na figura 3.9.

Veículos ferroviários

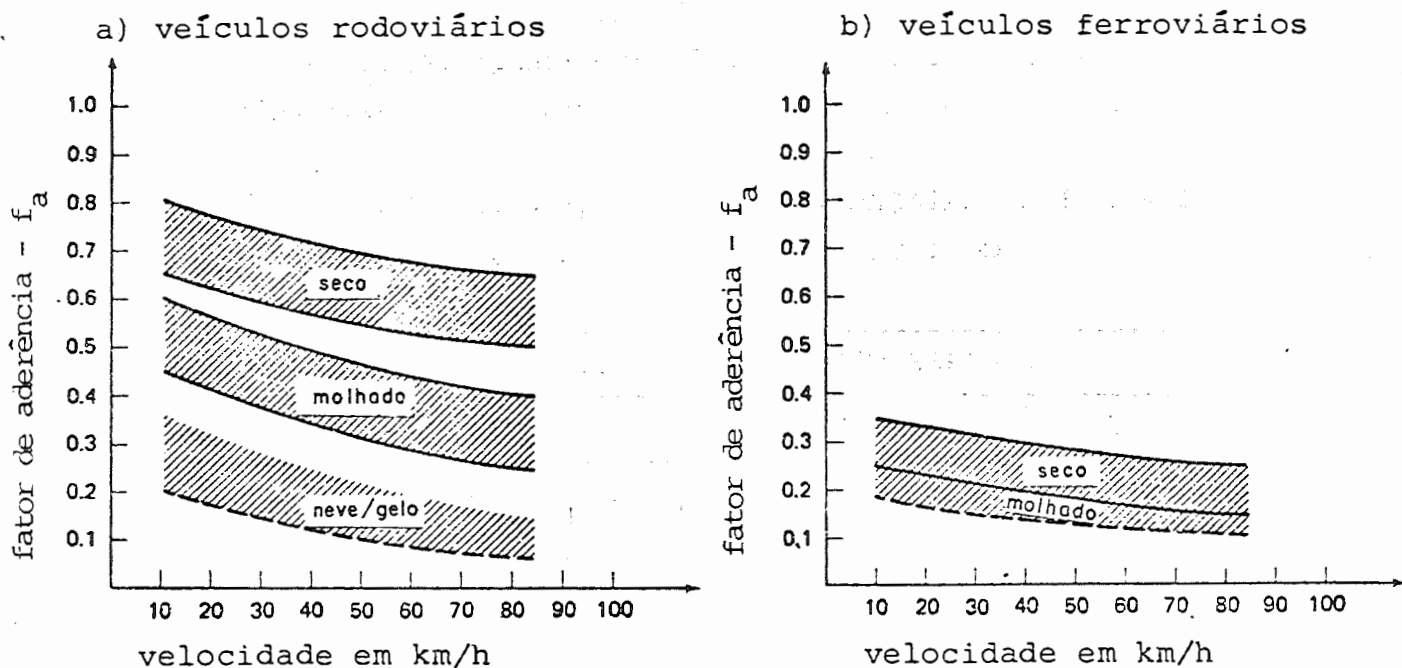
Usualmente são propulsionados por motores elétricos que, ou recebem energia elétrica de transformadores primários instalados no próprio veículo [(motor(es) diesel acoplado(s) a gerador(es) elétrico(s)] , ou recebem energia elétrica diretamente de uma rede de transmissão.

Dada a dificuldade de controle da rotação e do torque de motores de corrente alternada a quase totalidade dos motores elétricos instalados em veículos são do tipo corrente contínua.

As elevadas perdas associadas à transmissão de corrente contínua fazem com que as linhas de transmissão de eletricidade sejam projetadas de forma a minimizar as distâncias de transmissão em corrente contínua conforme mostra a Figura 3.10, o que demanda a construção de uma série de subestações de transformação ao longo da rede de distribuição no caso de alimentação direta.

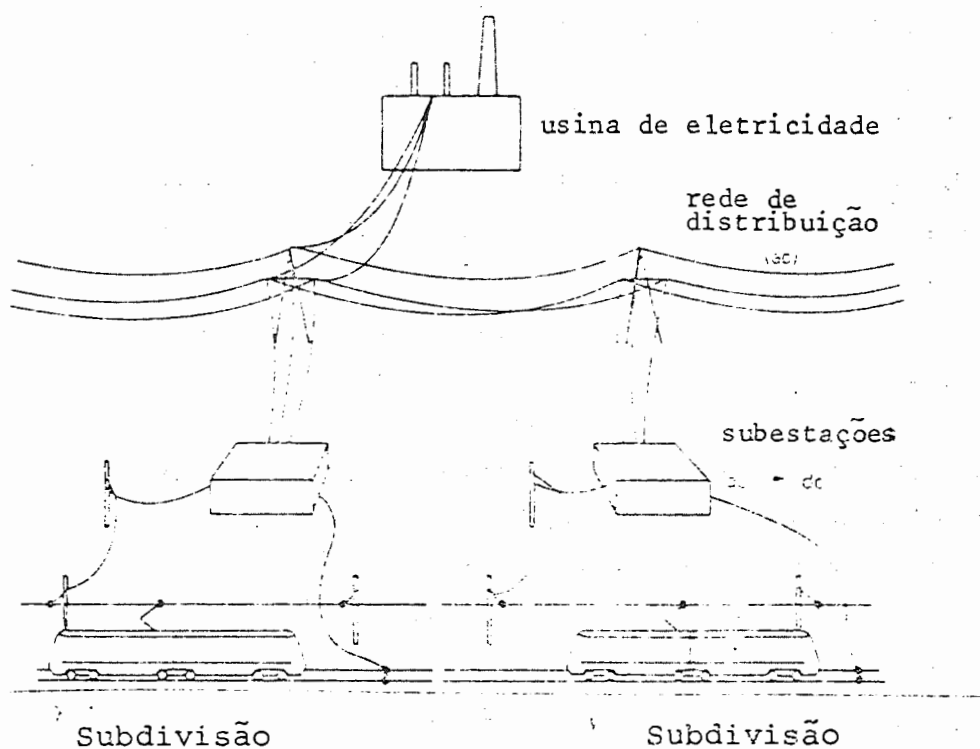
FIGURA 3.9 - VARIAÇÃO DE f_a EM FUNÇÃO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE E DA VELOCIDADE.

Fonte: Vuchic (1981) Fig. 3.22b pag. 155.



Nota: alguns tipos de pavimentos tais como concreto e asfalto têm grande influência sobre f_a e podem conduzir a valores fora dos limites plotados.

FIGURA 3.10 - SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA



Fonte: Vuchic (1981) Fig. 3.9 pag. 135

No caso de grupos motrizes diesel-elétricos o motor diesel move um gerador de corrente contínua a qual é utilizada em motores elétricos acoplados aos eixos motrizes.

Variando-se a voltagem e a corrente dos motores através de chaves e resistores que permitem variar a configuração do circuito elétrico de ligação dos diversos motores que acionam os eixos motrizes, é possível manter o transformador primário de energia (motor diesel) operando em condições de rotação e potência constantes - potência máxima contínua se necessário - em toda a gama de velocidades do conjunto trator.

Enquanto a locomotiva está operando na condição de potência máxima do motor diesel o esforço trator é dado por:

$$T_e = \frac{3600 \cdot P_x \cdot \eta}{v}$$

T_e	P_x	v	η
N	KW	km/h	

com T_e = tração efetiva

P_x = potência máxima de eixo do motor diesel

v = velocidade

η = eficiência do sistema de transmissão em geral 83%

A tração efetiva correspondente a essa condição de potência máxima corresponde à porção hiperbólica da curva apresentada na Figura 3.11 para uma locomotiva GT-22 CUM-1 de 2475HP.

Como se pode observar entretanto, a curva de tração efetiva para potência máxima está limitada superiormente por um valor de tração efetiva máxima e inferiormente por uma condição de velocidade máxima, ou rotação máxima dos eixos motrizes.

A condição de tração efetiva máxima é imposta pela aderência entre os eixos motrizes e os trilhos e pela parte horizontal da curva onde:

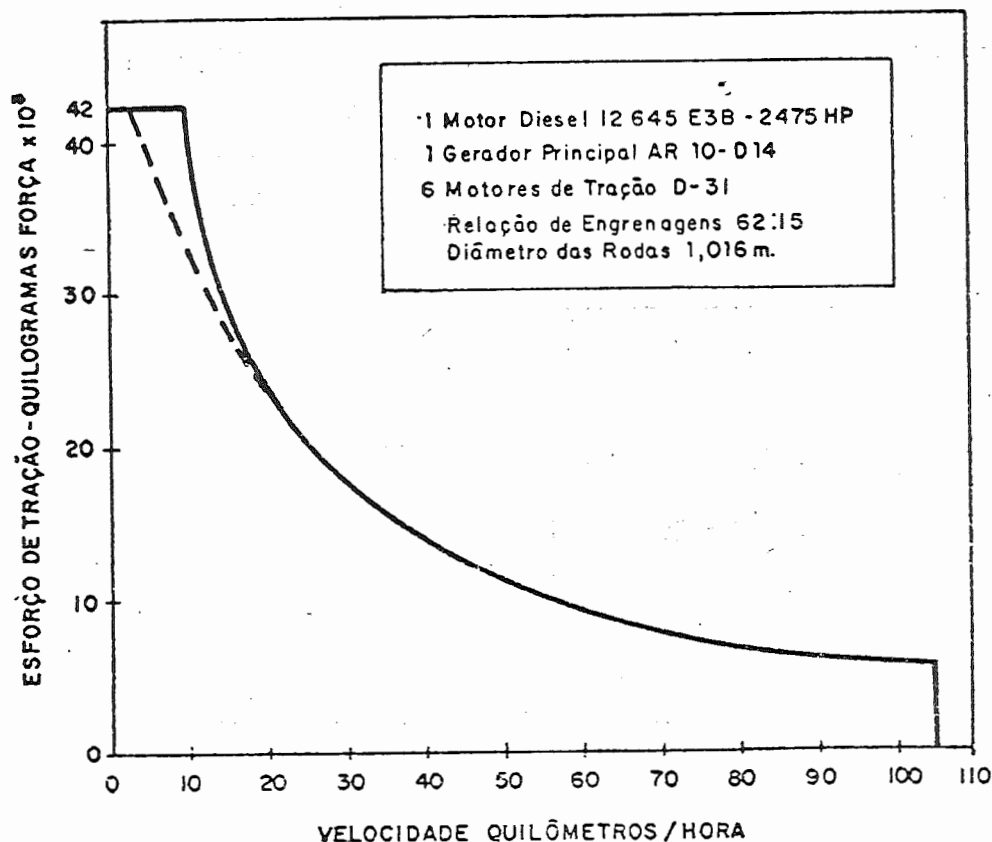
$$T_e \leq f_a \cdot P_a \quad \text{com}$$

T_e = tração efetiva

f_a = fator de aderência

P_a = peso aderente.

FIG. 3.11 - CURVA DE TRAÇÃO x VELOCIDADE DA LOCOMOTIVA GT22 CUM-1



Fonte: Folheto do Fabricante Villares S.A.

Em vários sistemas de transmissão diesel elétrico existem também limites de tempo em que se pode operar com potências máximas em baixas velocidades, por problemas de superaquecimento.

Nesses casos as curvas dos fabricantes são compostas por segmentos intermediários como exemplificado com o segmento tracejado na Figura 3.11.

5.3.1.9. Frenagem

Para desacelerar os veículos com o objetivo de reduzir sua velocidade de operação ou pará-las empregam-se freios.

Veículos sôbre rodas possuem freios que agem diretamente sôbre as rodas (motrizes ou não) e utilizam-se normalmente também de sistemas de freio motor (sô nas rodas motrizes).

Veículos hidroviários utilizam-se de freios hidrodinâmicos, normalmente reversão do empuxo das hélices, e veículos aéreos utilizam-se de freios aerodinâmicos (placas sôbre as asas, reversão do empuxo dos motores) e de freios nas rodas quando no solo.

A Tabela 3.3 e a Figura 3.9.a ilustram as limitações típicas de aderência para veículos rodoviários e a Figura 3.9.b ilustra as limitações típicas para veículos ferroviários onde a gama de variação depende não só do trilho seco ou molhado mas também de ferrugem e outros fatores de interação roda via.

Dessa forma a força máxima de frenagem, da mesma forma como a tração efetiva máxima é limitada superiormente por:

$$F_f \leq f_a \cdot P_a \quad \text{com } F_f = \text{força de frenagem}$$

3.4. CARACTERÍSTICAS DAS TRAJETÓRIAS DE VEÍCULOS.

Uma vez conhecidas as características de locomoção de um veículo é importante considerar que nem sempre o veículo pode se locomover em função dessas características. É comum que o desempenho de veículos ao longo de uma trajetória (via) seja limitado por características dessa trajetória.

Tem-se assim:

- limitações de exclusão;
 - limitações de peso;
 - limitações de dimensões;
 - limitações de velocidade;
 - limitações impostas pelo meio ambiente
- | |
|--------------------------|
| condições meteorológicas |
| ruído |
| poluição do ar. |

- limitações de exclusão - a limitação mais drástica é naturalmente a de exclusão, ou seja, de a via ser incompatível com as características do veículo em termos de mobilidade e locomoção. Obviamente um veículo rodoviário não pode usar um canal, por outro lado trens com bitola de 1 m não podem utilizar vias projetadas para trens de bitola de 1.60 e vice-versa (problema importante do sistema ferroviário brasileiro), ou locomotivas elétricas não podem ser usadas em vias não eletrificadas. No transporte aéreo, alguns tipos de aeronaves não têm autonomia suficiente para seguir uma trajetória direta sobre grandes extensões de mar (e.g. Recife-Lisboa, Los Angeles-Tokio). Certos aeroportos, dadas as suas características dimensionais, não permitem a operação de pouso e decolagem de determinados tipos de aeronaves. No transporte marítimo é comum que navios além de um determinado valor de calado, não conseguem entrar em portos cujos canais de acesso não sejam compatíveis com esse valor.

- limitações de peso - é comum que determinados trechos de uma via ofereçam limitações em termos de peso máximo dos veículos que nela podem trafegar em condições normais de operação. O caso mais comum no transporte rodoviário é o limite de peso imposto por estruturas de pontes. Por outro lado, no transporte rodoviário, ferroviário e aéreo observam-se limitações de peso associadas à distribuição do peso total do veículo sobre a estrutura da via (distribuição que depende naturalmente da configuração das rodas dos veículos), que muitas vezes não são limitações de exclusão acima de um certo limite, mas valores que evitam o desgaste excessivo e portanto a redução da vida útil de rodovias, ferrovias e pistas de pouso de aviões.

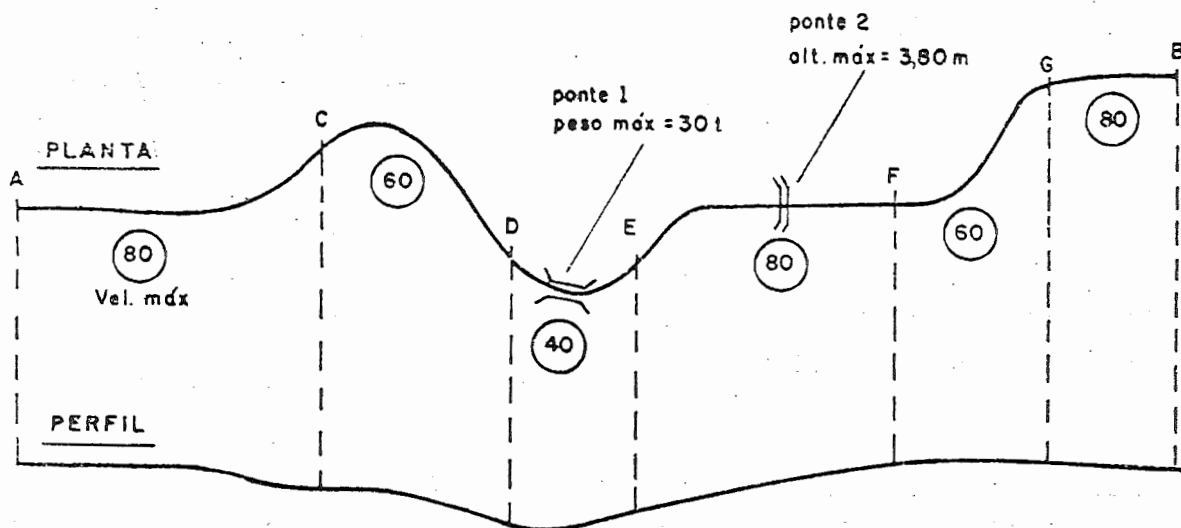
- limitações de dimensões - à semelhança do peso, as vias são projetadas para determinados veículos cuja operação é dominante na operação normal. Veículos de dimensões acima das dimensões normais de projeto, ou são obrigados a trafegar em outras vias, como é o caso de trechos onde alturas de pontes sobre a via ou túneis excluem veículos acima de determinadas alturas, ou são obrigados a operar em períodos fora do período normal de utilização da via (e.g. de madrugada).

- limitações de velocidade - é comum a velocidade de deslocamento de veículos ao longo das vias não ser condicionada apenas à velocidade atingível em cada trecho em função das características de locomoção do veículo. Razões de segurança do veículo individual (capotagem em curvas, perda de direção) e de interferência entre veículos que se deslocam na mesma via (abalroamentos), demandam que em determinados trechos da via, ou ao longo da via como um todo, sejam impostos limites de velocidade.

- limitações impostas pelo meio ambiente - a limitação mais comum é a perda de aderência de veículos sobre rodas deslocando-se sobre pistas molhadas. Por outro lado condições meteorológicas também podem impor redução de visibilidade do condutor do veículo e portanto reduzir a velocidade de deslocamento. No transporte aéreo condições meteorológicas podem interferir nas operações de pouso e decolagem, até mesmo paralisá-las. A temperatura e a densidade do ar interferem no desempenho de sistemas de propulsão limitando as operações em função de sua variação (e.g. níveis de vôo de aeronaves com propulsão a jato). O ruído gerado por sistemas de propulsão (e.g. aeronaves com motores a jato) também conduz em alguns casos à redução da operacionalidade de determinadas trajetórias (e.g. fechamento do Aeroporto de Congonhas em São Paulo no período das 23:00 às 06:00 horas).

Para que se possa representar e analisar o desempenho de veículos ao longo de trajetórias é portanto necessário incluir essas limitações no processo de representação. Esta inclusão se efetua através de diagramas de representação das características da trajetória. Várias são as formas existentes de diagramas de representação, variando de modalidade para modalidade e em função do problema específico de limitações de desempenho que se quer analisar.

O exemplo abaixo para um trecho rodoviário, visa a ilustrar um diagrama de características da trajetória para analisar a velocidade média de percurso do trecho A-B e os limites de peso e dimensões dos veículos.



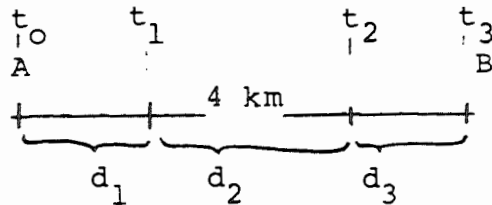
De forma semelhante pode-se estabelecer um diagrama característico da trajetória para ferrovias e hidrovias. No transporte aéreo o problema de análise de desempenho em função da trajetória é diferente, uma vez que existem em princípio infinitas trajetórias disponíveis em planta e perfil. Os dois casos principais de limites impostos pelas características da trajetória são referentes a vôos que seguem por aerovias controladas e os problemas de obstáculos existentes no entorno dos aeródromos, limitando os perfis de subida e de aproximação.

3.5. PREVISÃO DE DESEMPENHO DE VEÍCULOS.

A partir das informações da trajetória e das características das forças propulsivas e de resistência ao movimento do veículo apresentadas em 3.3, é possível prever o desempenho de um veículo individual (assume-se que não ocorrem interferências no movimento do veículo provocadas por outros veículos que se utilizam da mesma via) ao longo dessa trajetória.

3.5.1. Um exemplo simples.

Para exposição da concepção básica, partamos de uma condição idealizada de locomoção do veículo:



trajetória linear sem gradientes.

velocidade limite 100 km/h

veículo projetado para aceleração máx = 1,5 m/s²
(conforto dos passageiros).

desaceleração máxima = 1,5 m/s²

veículo parte do repouso em A e chega em B com $V = 0$.

$$v = \int_{t_0}^t a \cdot dx = ax \quad \int = a(t-t_0)$$

$$v = 1,5 (t-t_0)$$

portanto admitindo t_1 instante em que $V = V_c = 100$ km/h, tempo gasto para acelerar do repouso até velocidade de cruzeiro V_c é dado por

$$t_1 - t_0 = \frac{V_c}{a} = \frac{100}{3600} \cdot \frac{1000}{15} = 18,5s$$

distância d_1 percorrida do repouso até t_1

$$d_1 = \int_{t_0}^{t_1} v \, dx = \int_{t_0}^{t_1} a \cdot x \cdot dx = \frac{1}{2} \cdot a \cdot x^2 \Big|_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{V_c}{a}\right)^2$$

ou

$$d = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_c^2}{a}$$

$$d_1 = 256.7 \text{ m}$$

se a aceleração é igual a desaceleração então

$$d_3 = 256.7 \text{ m}$$

$$t_3 - t_2 = 18,5 \text{ s}$$

$$d_2 = 4000 \text{ m}$$

$$t_2 - t_1 = 144 \text{ s}$$

$$t_{\text{total}} = 162,5$$

$$V_{\text{média}} = 24,9 \text{ m/s} = 89,8 \text{ km/h}$$

3.5.2. Simulação do movimento de um veículo.

Enquanto o exemplo simplificado ilustra algumas das relações entre a trajetória, o veículo e sua propulsão e resistência, ele é como dissemos, idealizado. Veículos na realidade raramente aceleram a uma razão constante por grandes amplitudes de velocidade, a resistência inerente varia com a velocidade, bem como a força propulsiva de um veículo. Também a presença de gradientes e curvas afetam o desempenho de veículos.

Assim é necessário um método mais refinado para a determinação do desempenho realista de veículos ao longo da trajetória.

A partir de um gráfico de força propulsiva e resistências ao movimento como o apresentado a seguir, é possível determinar uma família de curvas de desempenho de veículos como as apresentadas na Figura 3.3.2.

FIGURA 3.3.1 - FORÇA PROPULSIVA E RESISTÊNCIAS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

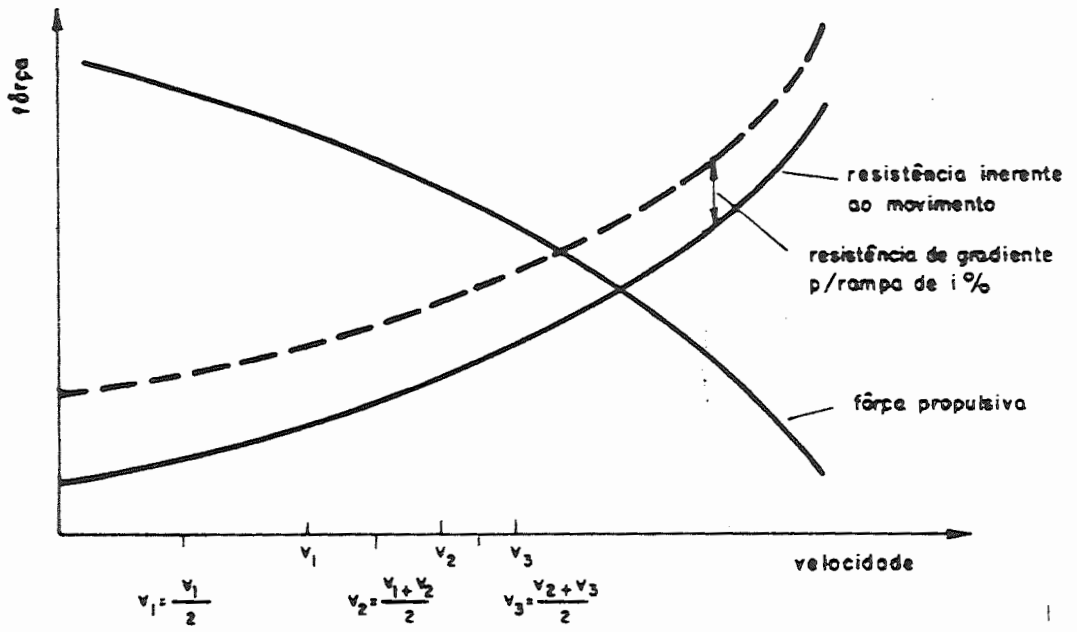


FIGURA 3.3.2 - CURVAS DE DESEMPENHO DOS VEÍCULOS

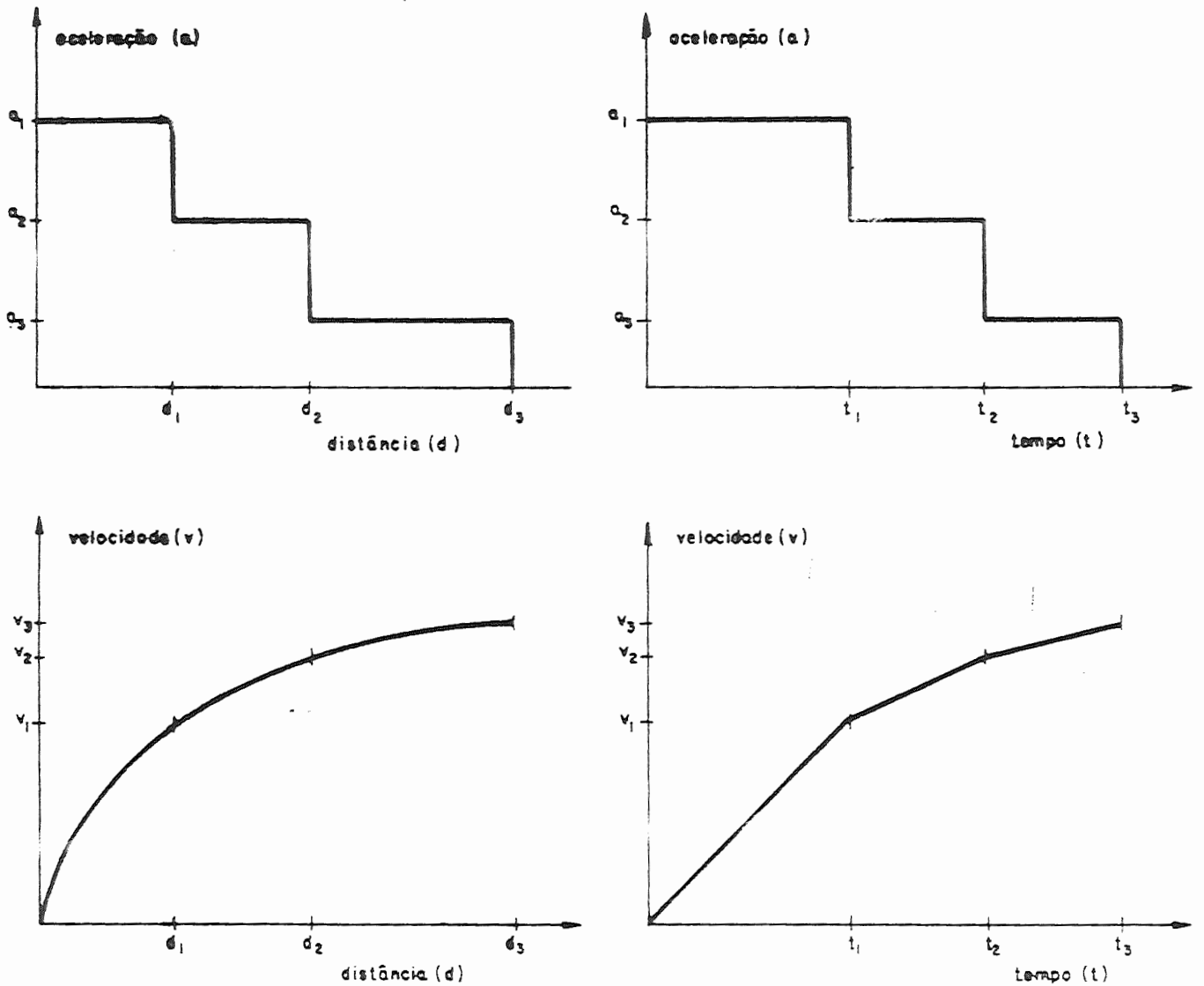
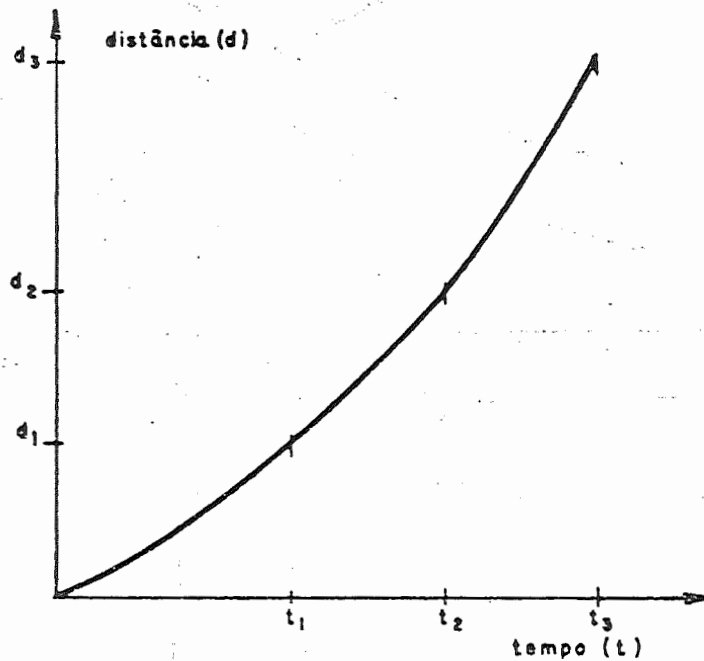


FIGURA 3.3.2 - continuação



3.6. RELAÇÕES GERAIS DE DESEMPENHO DE VEÍCULOS.

3.6.1. Produtividade de sistemas de transporte.

Uma vez sendo possível determinar o tempo que um veículo leva para percorrer uma trajetória pré definida é possível, conhecendo-se também sua carga útil ou capacidade de carga útil, determinar a produtividade desse veículo, ou de um sistema de transporte composto de uma quantidade determinada de veículos.

1 veículo faz n viagens durante um período por exemplo 1 ano.

peso útil - K ton ou P passageiros

produtividade = $n \times K$ ton/ano

ou em passageiros = $n \times P$ pass/ano

pode-se também expressar alternativamente a produtividade na forma que segue: o veículo segue uma trajetória à velocidade média V_m , então, produtividade = $V_m \times K \times U$ = ton.km/ano

onde V_m - velocidade média e U - é a utilização anual em horas.

ou em passageiros = $V_m \times P \times \frac{\text{horas}}{\text{ano}}$ = pass.km/ano.

logo: um veículo tende a ser mais produtivo quando:

1. aumenta a sua carga útil.
2. aumenta a sua velocidade média operacional
3. aumenta a sua utilização em horas/ano

1. é um problema tecnológico.

2 e 3: são problemas tecnológicos e operacionais

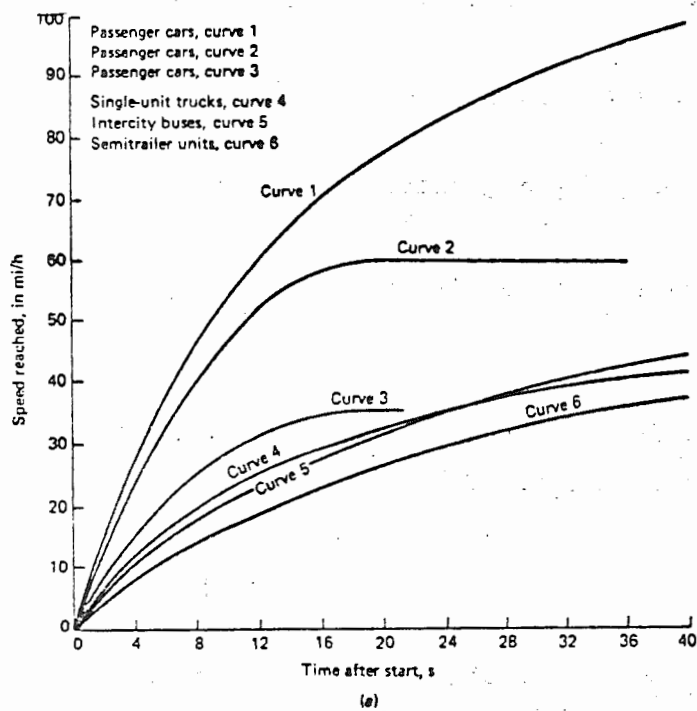
3.6.2. Outras relações de desempenho.

Além da produtividade global do veículo operando dentro de um sistema, é comum serem necessários dados de desempenho gerais a respeito de uma modalidade de transporte.

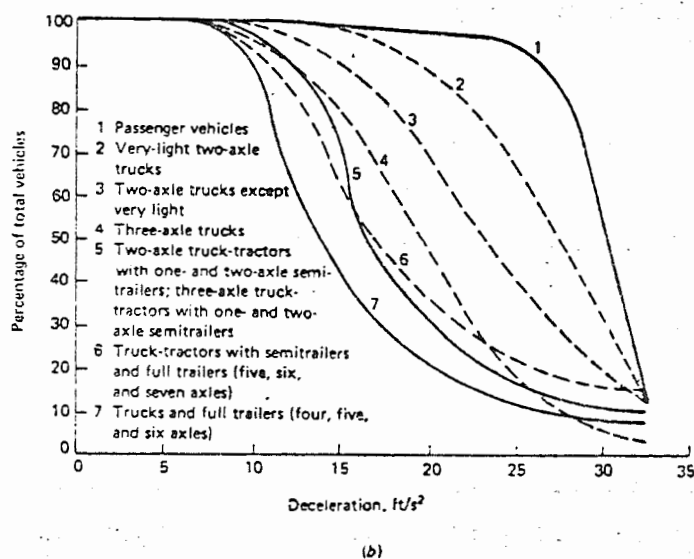
Assim, por exemplo, uma primeira estimativa de desempenho de veículos rodoviários ao longo de uma trajetória de características conhecidas, pode ser obtida a partir de curvas como as apresentadas na figura 3.33. A figura ilustra o desempenho genérico estimado para veículos rodoviários nos EUA, mas curvas semelhantes podem ser estabelecidas para os veículos típicos e condições operacionais típicas brasileiras.

FIGURA 3.33 - CURVAS GENERALIZADAS DE DESEMPENHO PARA VEÍCULOS RODOVIÁRIOS.

a) Aceleração de veículos rodoviários. Fonte: Baerwald (1965) pag. 27



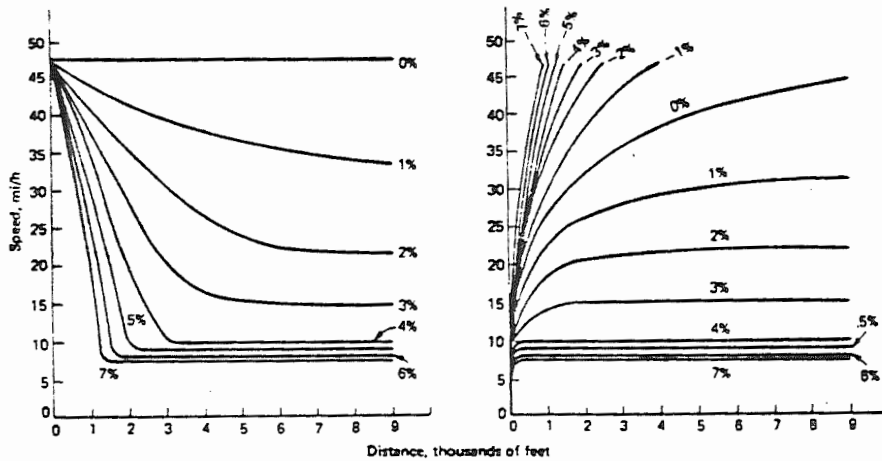
b) Desaceleração de veículos rodoviários: Fonte: Baerwald (1965) pag. 29



c) Curvas de velocidade de caminhões pesados em gradientes.

c_1 desaceleração em aclives

c_2 aceleração em aclives e declives.



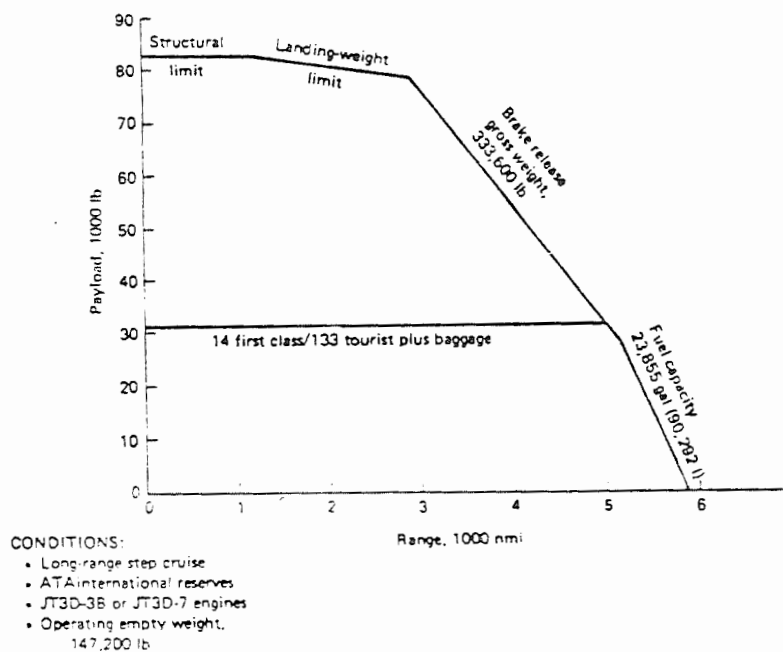
Fonte: Baerwald (1965) pag. 197

Já para aviões as relações de desempenho relevantes para o projeto de sistemas de transporte são diferentes.

Como em veículos aéreos o combustível necessário para a viagem é um fator limitante do desempenho, os fabricantes fornecem curvas do tipo apresentado na figura 3.34. A figura mostra o alcance em função da carga útil (carga paga) para um avião de transporte de passageiros e/ou carga.

FIGURA 3.34 - CURVA DE CARGA PAGA x ALCANCE PARA BOEING 707-320C

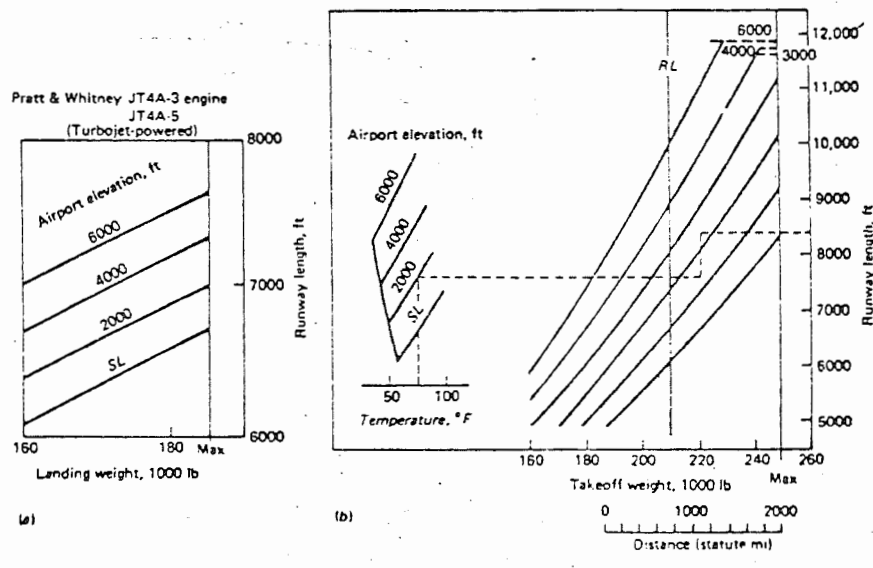
Fonte: Boeing Commercial Airplane (1975), pag. 61



O projeto das pistas de pouso e decolagem dos terminais de sistemas aviários (aeroporos) depende naturalmente do desempenho das aeronaves críticas de projeto.

A figura 3.35 apresenta curvas de desempenho de pouso e decolagem para uma aeronave típica.

FIGURA 3.35 - CURVAS DE DESEMPENHO DE POUSO E DECOLAGEM PARA BOEING 707-320C. Fonte: FAA AC-150/5325-4 (1965) Ap 3 pag.4



Perfis típicos de subida e de descida e estimativas de desempenho em cruzeiro também são dados fornecidos normalmente pelos fabricantes.

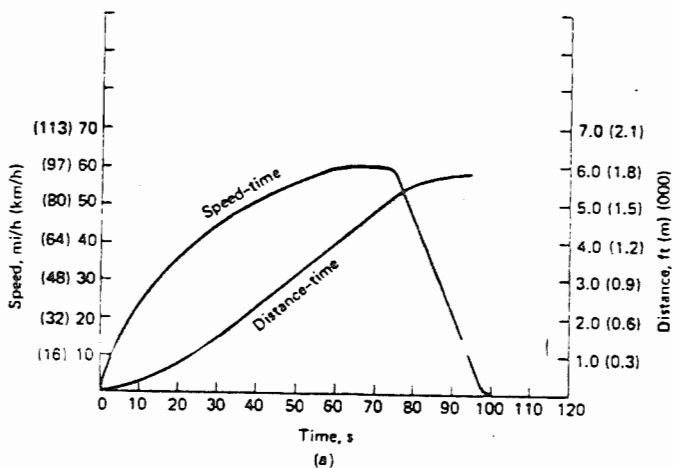
Por outro lado, para o desempenho de trens e embarcações não se encontram publicadas curvas generalizadas de desempenho como as apresentadas, uma vez que, a composição de trens interurbanos e os navios empregados em determinado sistema de transportes são na maioria das vezes, projetados especificamente para um determinado serviço.

Já no transporte urbano, quando se observa um certo grau de determinação do sistema, encontram-se na literatura curvas de desempenho como as apresentadas na figura 3.36.

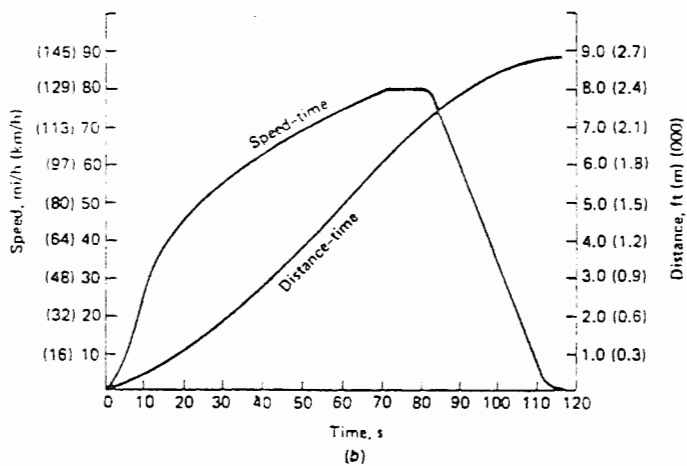
FIGURA 3.36 - CURVAS DE DESEMPENHO DE VEÍCULOS DE TRANSPORTE URBANO (exemplo norte-americano)

Fonte: Morlok (1978) pag. 162.

a) Ônibus urbano com lotação completa de passageiros sentados



b) metrô típico com dez carros com lotação completa de passageiros sentados.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Morlok, Edward K. (1978) - "Introduction to Transportation Engineering and Planning". Mc Graw-Hill, N.Y. Capítulo 4.
2. Vuchic, Vucan (1981) - "Urban Public Transportation. Systems and Technology". Prentice Hall. N.Y. Capítulo 3.
3. CET - Companhia de Engenharia de Tráfego - "Boletim Técnico nº 33 ". São Paulo-SP.
4. Hay, William W. (1982) - "Railroad Engineering", 2nd Edition, Wiley N.Y. - Capítulos 6 e 7.
5. Novaes, Antonio G.N. (1976) - "Economia e Tecnologia de Transporte Marítimo", Almeida Neves, Rio de Janeiro-RJ, Capítulos 3, 4 e 5.
6. Rawson, J. and Tupper, E.C. (1976) - "Basic Ship Theory Vol. 2", Longman. Capítulo 10.
7. Stokoe, E.A. - "Reed's Naval Architecture for Marine Engineers", Thomas Reed Publ. Ltd., London, 1973 - Capítulo 2.
8. Sória, Manoel H.A. (1983) - "Introdução à Mecânica de Locomoção do Avião". Publicação nº 060/83 - EESC-USP.
9. Baerwald, J.E. (1968) - "Traffic Engineering Handbook". Institute of Traffic Engineers. Prentice Hall, N.J.