

5 Veículos Terrestres

Segundo Wong (2001), veículos terrestres são todos aqueles que trafegam em vias terrestres, podendo ser guiados (trafegam sobre uma trajetória fixa como, por exemplo, uma estrada de ferro) ou não guiados (podendo se locomover em diferentes direções de acordo com a vontade do seu condutor).

Segundo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB-1997), são vias terrestres urbanas e rurais as ruas, as avenidas, os logradouros, os caminhos, as passagens, as estradas e as rodovias. Esse mesmo Código classifica os veículos terrestres da forma mostrada na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Classificação dos veículos terrestres segundo o CTB.

Quanto à tração	a) automotor; b) elétrico; c) de propulsão humana; d) de tração animal; e) reboque ou semi-reboque.
Quanto à espécie	a) de passageiros; b) de carga; c) misto; d) de competição; e) de tração; f) especial; g) de coleção.
Quanto à categoria	a) oficial; b) de representação diplomática, de repartições consulares de carreira ou organismos internacionais acreditados junto ao Governo brasileiro; c) particular; d) de aluguel; e) de aprendizagem.

O interesse neste trabalho é voltado para os veículos automotores de passageiros, de carga e mistos, mais especificamente nos automóveis, caminhões, caminhonetes, camionetas e utilitários. A Tabela 5.2 conceitua de cada um dos tipos de veículos terrestres segundo o CTB (1997).

Tabela 5.2: Conceituação dos veículos terrestres segundo o CTB.

Tipo	Definição
Veículo Automotor	Todo veículo a motor de propulsão que circule por seus próprios meios, e que serve normalmente para o transporte viário de pessoas e coisas, ou para a tração viária de veículos utilizados para o transporte de pessoas e coisas. O termo compreende os veículos conectados a uma linha elétrica e que não circulam sobre trilhos (ônibus elétrico).
Veículo de Passageiros	Veículo destinado ao transporte de pessoas e suas bagagens.
Veículo de Carga	Veículo destinado ao transporte de carga, podendo transportar dois passageiros, exclusive o condutor.
Veículo Misto	Veículo automotor destinado ao transporte simultâneo de carga e passageiro.
Automóvel	Veículo automotor destinado ao transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, exclusive o condutor.
Caminhonete	Veículo destinado ao transporte de carga com peso bruto total de até três mil e quinhentos quilogramas.
Camioneta	Veículo misto destinado ao transporte de passageiros e carga no mesmo compartimento.
Utilitário	Veículo misto caracterizado pela versatilidade do seu uso, inclusive fora de estrada.

5.1.

Características dos veículos terrestres

Segundo o Automotive Handbook (1986), as características dos veículos terrestres são definidas de acordo com os termos definidos abaixo, sendo que cada termo é relacionado a uma das dinâmicas ao longo dos eixos de referência:

- **desempenho:** capacidade do veículo em acelerar e desacelerar, sendo relacionada com a dinâmica longitudinal;
- **dirigibilidade:** é a resposta do veículo aos comandos dados pelo condutor no volante do veículo e a sua estabilidade em relação às excitações externas, sendo relacionada com a dinâmica transversal;
- **deslocamento vertical:** são as respostas do veículo às vibrações existentes no solo, sendo relacionada com a dinâmica vertical.

Os ensaios que serão apresentados neste trabalho referem-se apenas à medição do desempenho do veículo.

5.2. Dinâmica veicular

Como forma de se compreender melhor os vários ensaios veiculares apresentados é necessário que se comente sobre a dinâmica veicular.

Segundo Gillespie (1992), a dinâmica veicular refere-se ao movimento dos veículos terrestres, das forças atuantes sobre eles e suas respostas a elas. O seu entendimento realizado em dois níveis: o empírico (baseado em ensaios experimentais) e o analítico (baseado na modelagem matemática da mecânica de interesse). Wong (2001) comenta que o comportamento de qualquer veículo terrestre é o resultado das interações entre o condutor, o veículo e o meio ao seu redor.

Para que se compreenda melhor tais forças e movimentos, as normas fazem uso de um sistema de coordenadas fixo ao centro de gravidade do veículo. As normas mais empregadas são a SAE J670 (americana), ISO 4130 e DIN 70000 (européias). As normas ISO 4130 e DIN 70000, embora utilizem o mesmo sistema de coordenadas, se diferenciam da norma SAE J670 pelo fato de o eixo vertical z estar apontado para cima. A Figura 5.1 mostra o sistema de coordenadas americano e a Figura 5.2 mostra o sistema de coordenadas europeu.

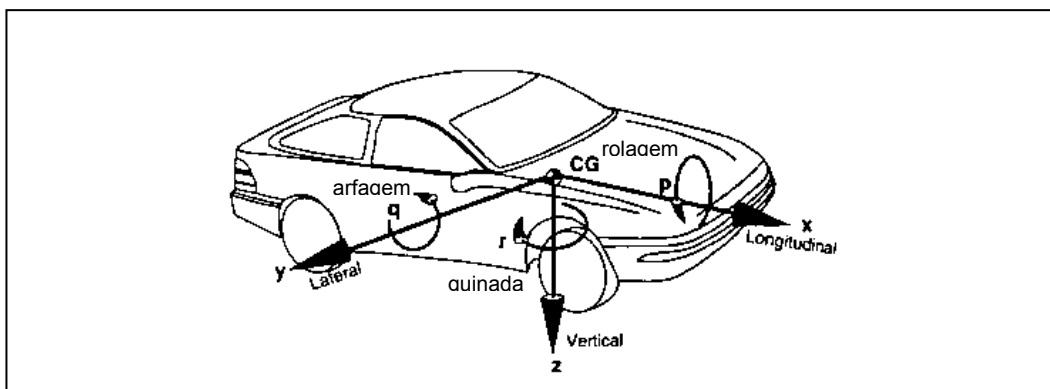


Figura 5.1: Sistema de coordenadas recomendado pela norma SAE J670.

Fonte: Gillespie (1992).

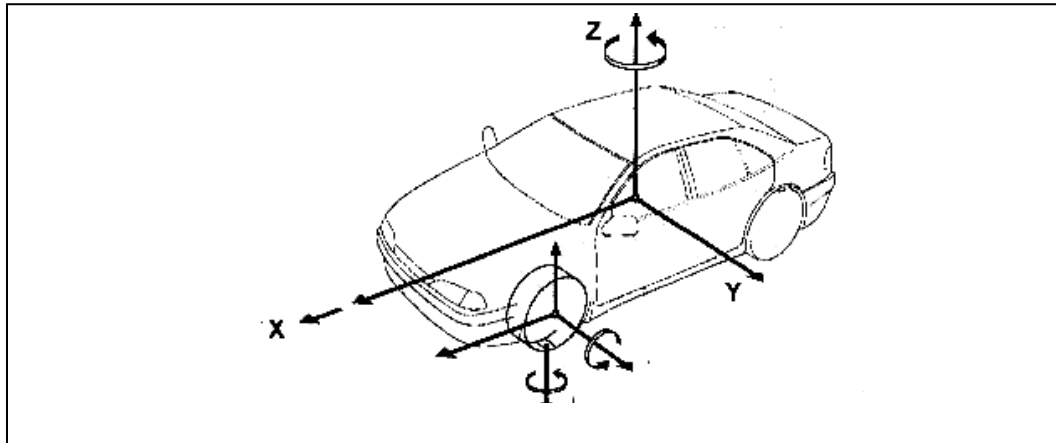


Figura 5.2: Sistema de coordenadas recomendado pelas normas ISO 4130 e DIN 70000.

Segundo Wong (2001) e de acordo com o sistema de coordenadas mostrado acima, pode-se modelar o veículo como sendo um corpo rígido com seis graus de liberdade que possuiu translação ao longo dos eixos x , y e z e rotação ao redor destes mesmos três eixos. A Tabela 5.3 descreve as reações do veículo em cada eixo.

Tabela 5.3: Dinâmicas veiculares – solicitações e reações.

Eixo	Dinâmica	Solicitação Externa	Reação do Veículo
X	Longitudinal	Aceleração e desaceleração	Translação e oscilação (<i>surging</i> em inglês) ao longo do eixo x
		Realização de uma curva	Efeito de rolagem (<i>roll</i> em inglês) que é rotação ao redor do eixo x (plano yz)
Y	Transversal	Realização de uma curva	Translação e oscilação (<i>lurching</i> em inglês) ao longo do eixo y quando o veículo sai de frente ou de traseira (derrapagem)
		Aceleração e desaceleração	Efeito de arfagem (<i>pitch</i> em inglês) que é a rotação ao redor do eixo y (plano xz)
Z	Vertical	Oscilações do terreno	Efeito de cavalgada ou salto (<i>bounce</i> em inglês) que é a oscilação ao longo do eixo z quando o veículo passa por uma oscilação do terreno
		Realização de uma curva	Efeito de guinada (<i>yaw</i> em inglês) que é a rotação ao redor z (plano xy) quando o veículo sai de frente ou de traseira (derrapagem)

Para facilitar a análise, visualização e interpretação das forças atuantes sobre o veículo utiliza-se um modelo de corpo rígido o qual considera que o veículo é simétrico ao longo de um determinado plano, que contém todas as forças.

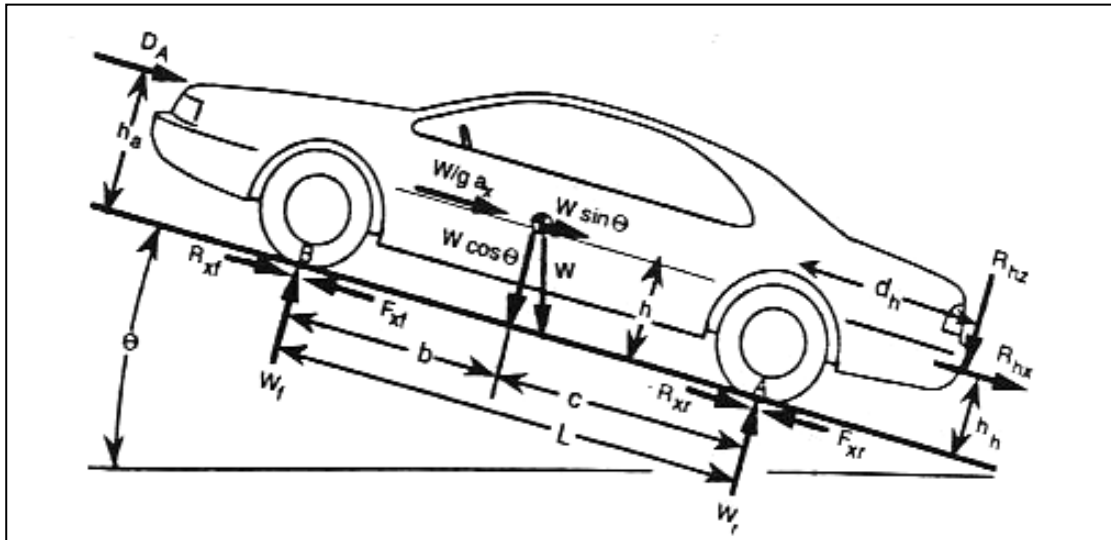


Figura 5.3: Diagrama de corpo livre em relação ao plano xz.

Fonte: Gillespie (1992).

Do diagrama de corpo livre ilustrado na Figura 5.3, podem ser obtidas as equações ao longo dos três eixos de deslocamento. Como exemplo, o deslocamento ao longo do eixo x é dado pela equação diferencial:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{xt} + F_{xr} - D_a - R_{xf} - R_{xr} - R_d \pm m.g. \sin \theta \quad (5.1)$$

nesta expressão:

- m é a massa do veículo;
- $\frac{d^2x}{dt^2} = a$ é a aceleração do veículo;
- F_{xt} e F_{xr} são as forças trativas dianteira e traseira;
- D_a é resistência aerodinâmica;
- R_{xf} e R_{xr} são a resistência ao rolamento nas rodas dianteiras e traseiras;
- R_d é a resistência interna da transmissão veículo.

Este modelo de corpo rígido para um veículo servirá como base para as simulações de ensaios veiculares realizados e que serão comentados mais adiante.

5.3. Dinâmica longitudinal

Segundo Gillespie (1992), existem dois fatores limitantes do desempenho do veículo:

- a força trativa máxima que o contato entre o pneu e o solo pode suportar, dependente das características de aderência de cada um;
- o torque máximo que o motor pode gerar, sendo que o menor destes dois irá determinar o potencial de desempenho.

Conclui-se assim que o motor deve ter potência suficiente para vencer as resistências internas da transmissão, a resistência ao rolamento dos pneus e a resistência aerodinâmica quando o veículo estiver em velocidade máxima. As resistências citadas são denominadas de forças resistentes ao deslocamento. Tais forças são as seguintes: resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento e resistências internas da transmissão.

Segundo constatado na bibliografia especializada, a resistência aerodinâmica é provocada por dois fatores principais: o primeiro é o ar que flui ao redor do veículo e o segundo é o ar que flui através do radiador com o objetivo de refrigeração, arrefecimento e ventilação. Destes dois fatores, o primeiro é o mais dominante e que representa mais de 90% da resistência aerodinâmica total de um veículo terrestre. Cabe observar que quando um veículo se desloca em um fluido (e o ar é um fluido como outro qualquer), em cada instante de tempo ocupa uma posição distinta, posição que antes estava ocupada pelo fluido, portanto o deslocamento do veículo obriga a um deslocamento de fluido tanto maior quanto for o volume e velocidade do primeiro.

Segundo o Automotive Handbook (1986), a resistência ao rolamento ocorre por meio do trabalho de deformação dos pneus sobre o solo, sendo que ela está presente desde o momento que o veículo inicia o seu movimento. Em contrapartida não apresenta nenhuma outra propriedade indesejável, sendo a energia consumida transformada em calor dentro do pneu e este aumento de temperatura reduz a resistência à abrasão do pneu e sua resistência à fadiga.

Segundo Lucas (1997), a inércia das partes móveis age como uma massa equivalente e que, segundo Wong (2001), para se levar em conta os seus efeitos

nas características de desempenho é necessário a introdução de um fator de inércia γ_m na expressão para o cálculo da força trativa.

5.3.1. Força trativa

A força trativa é a força que as rodas efetivamente transmitem ao solo para que o veículo possa se movimentar. Ela é gerada pelo motor do veículo, que pode ser elétrico ou de combustão interna. Na realidade o motor não gera força e sim torque, a força trativa surge porque as rodas recebem o torque do motor, que produz um binário, cujo módulo dos vetores é o valor da força trativa.

Segundo Wong (2001), a característica ideal de um motor relaciona-se à quantidade constante de potência fornecida, qualquer que seja a rotação. Com isso o torque fornecido variaria inversamente com a rotação do motor, de modo que em baixas rotações, situação em que o veículo necessita de maior torque (como iniciando o seu movimento ou na subida de um aclive), o motor teria condições de suprir essa exigência. Já em rotações elevadas, como em altas velocidades, o torque fornecido seria baixo. Estas características podem ser encontradas em motores elétricos de tração empregados em trens e ônibus.

Porém, como é de conhecimento geral, a maioria dos veículos terrestres é movida por motores de combustão interna que podem ser de dois tipos: o primeiro em que o combustível é inflamado por compressão (ciclo Diesel) e o segundo em que o combustível é inflamado por centelha (ciclo Otto e ciclo Wankle). O primeiro tipo utiliza óleo combustível e o segundo utiliza gasolina, álcool ou gás natural.

Os motores de combustão interna possuem características de funcionamento diferentes dos motores elétricos, pois iniciam sua operação em uma rotação baixa (marcha lenta) onde o torque fornecido é muito pequeno. Com o aumento da rotação o torque também aumenta até um valor máximo e com o aumento da rotação o torque passa a decair até que o motor alcance a sua velocidade de rotação máxima.

Comportamento similar ocorre com a potência que se inicia num valor baixo chegando ao valor máximo em uma determinada rotação e depois decai

rapidamente. Normalmente a rotação de torque máximo é mais baixa que a rotação de potência máxima, com a rotação máxima do motor situando-se um pouco acima da rotação de potência máxima.

Já nos motores Diesel o torque em baixa rotação é extremamente alto quando comparado a motor a gasolina e com o aumento da rotação não há grandes quedas de torque a curva de torque é mais linear, ou seja, se mantém mais constante com a variação de rotação, com o mesmo ocorrendo para a potência. Um dado importante sobre o motor Diesel é que ele possui um regime de rotação inferior ao que se obtém em um motor a gasolina. Por este motivo, motores Diesel são mais indicados para trabalhos que exigem maior força (torque) sem necessidade de grandes velocidades. A Figura 5.4 mostra as curvas de torque e potência de um motor a gasolina e de um motor Diesel.

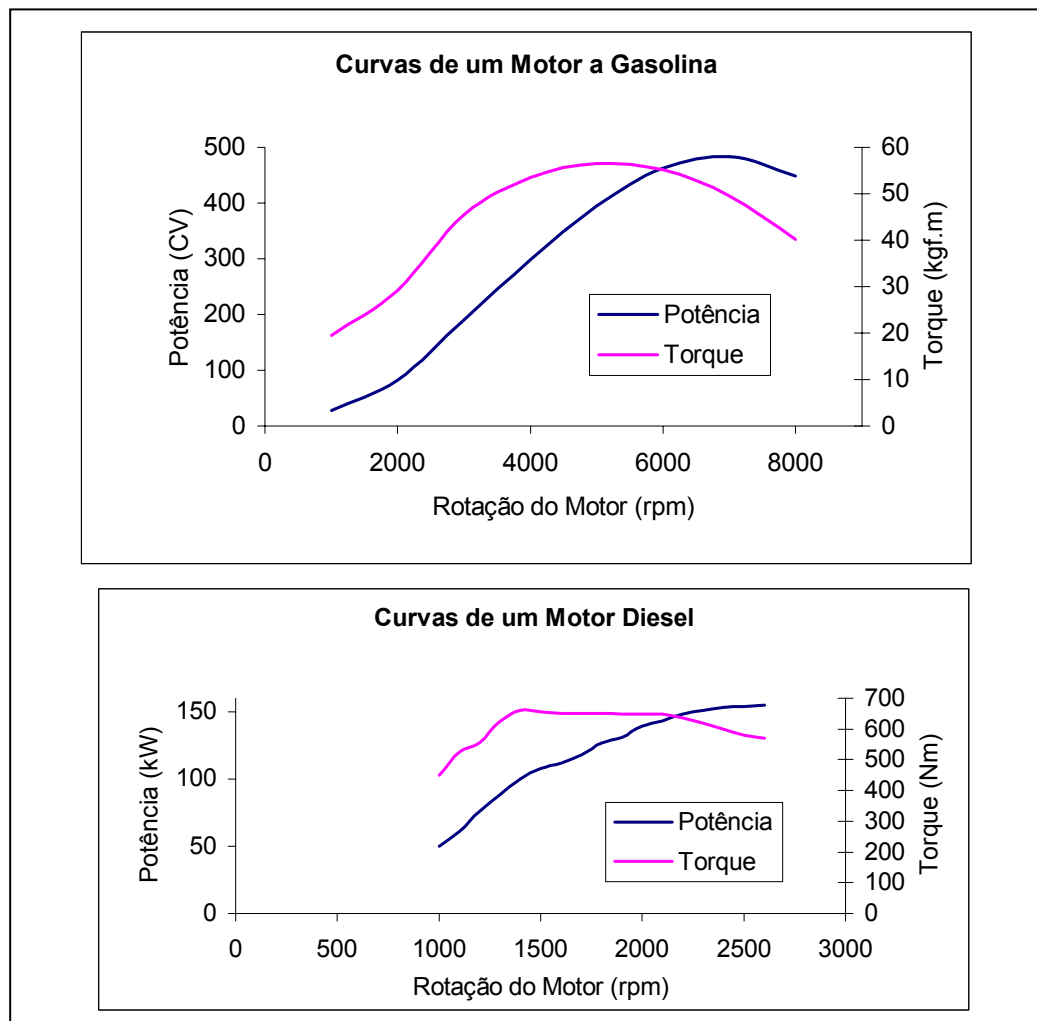


Figura 5.4: Curvas de torque, potência e consumo específico.

Segundo o Quadro Geral de Unidades de Medidas (1989), são as seguintes as unidades adotadas: rotação em rpm, torque em Nm e potência em W (no caso de veículos utiliza-se o kW, devido a ordem de grandeza do parâmetro).

Na Figura 5.4 aparece também a curva de consumo específico, a qual é muito interessante para os usuários de veículos equipados com motores Diesel, principalmente veículos de carga. Pela análise desta curva constata-se que em baixas rotações o consumo é maior. Com o aumento da rotação o consumo diminui até um valor mínimo a partir do qual passa a aumentar novamente até que o motor alcance a rotação máxima. As velocidades ditas econômicas são correspondentes às rotações que apresentam os menores valores de consumo específico. Este comportamento é análogo para motores Diesel e a gasolina.

Dependendo da forma em que as curvas de potência e torque se apresentam, constata-se outra importante propriedade do motor: sua elasticidade. Um motor elástico é aquele capaz de fornecer potência e torque suficientes num amplo intervalo de rotação.

Pelos fatores descritos acima os motores de ciclo Diesel são normalmente empregados em veículo de transporte de carga e de tração onde se necessita de muita força trativa e pouca velocidade em faixas de rotação muito baixas, ou seja, necessita-se de muito torque e pouca potência.

Por sua vez, os motores ciclo Otto tem como principal vantagem uma maior potência por litro de cilindrada, o que lhes permite acelerações mais eficientes e, em geral, uma maior agilidade de marcha.

5.3.1.1. Sistema de transmissão

Como forma de se aproveitar da melhor forma possível o torque e a potência do motor há a necessidade da utilização de um conjunto mecânico denominado de sistema de transmissão. A Figura 5.5 mostra os componentes de um sistema de transmissão clássico (motor dianteiro e tração traseira).

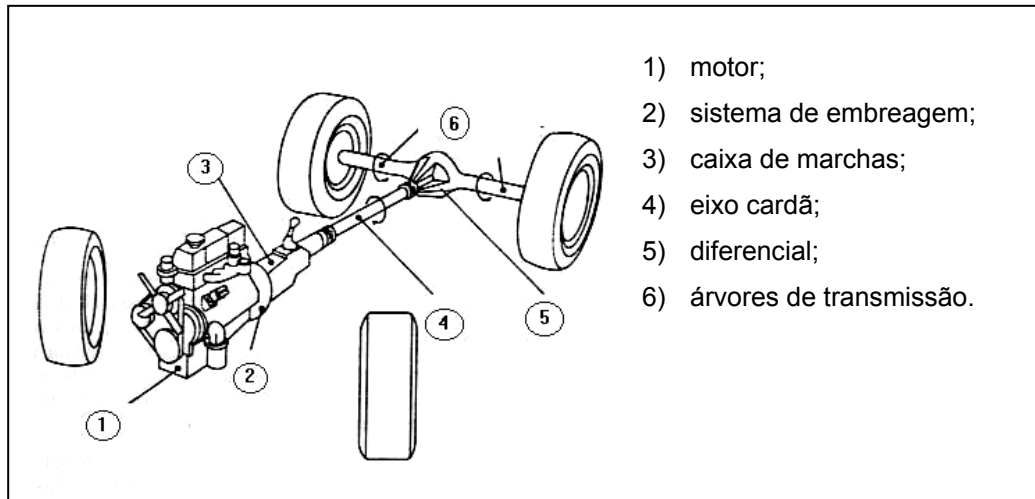


Figura 5.5: Esquema de um sistema de transmissão.
Fonte: Grande Enciclopédia Prática (1988).

O trabalho do sistema de transmissão consiste em atuar como uma espécie de transformador entre o motor e as rodas, permitindo, a todo momento, que o regime de giro do motor se encontre dentro de seus próprios limites de utilização, independentemente da velocidade do veículo. Este objetivo é alcançado mediante o emprego de trens de engrenagens de diferentes números de dentes engrenados entre si. Conforme se encaixam, a relação entre a velocidade de rotação do eixo de entrada na caixa e a do eixo de saída, vai variar, obtendo-se, dessa forma, as diversas velocidades.

Os dois tipos de sistemas de transmissão mais comumente empregados são: a transmissão manual e a transmissão automática com conversor de torque. Pode-se citar ainda outros tipos de transmissão como a CVT (*Countinously Variable Transmission*) e a hidrostática.

A transmissão manual é a mais comum de ser encontrada sendo basicamente composta por uma embreagem manual, caixa de transmissão, eixo cardã e diferencial. Nos veículos com motorização dianteira e tração dianteira e com motorização traseira e tração traseira, a caixa de transmissão e o diferencial formam um só conjunto.

Normalmente as caixas de transmissão manual são constituídas por eixos paralelos que contém as engrenagens, normalmente, helicoidais, sendo que o número de relações de transmissão pode variar de cinco em automóveis de passeio a até mais de dez em veículos como caminhões.

Os sistemas de transmissão automática são basicamente compostos por uma embreagem hidráulica, um conversor de torque, caixa de transmissão, eixo cardã e diferencial. Da mesma forma que na transmissão manual, nos veículos com motorização dianteira e tração dianteira e com motorização traseira e tração traseira, a caixa de transmissão e o diferencial formam um só conjunto.

Os veículos com transmissão automática são distinguidos por duas características fundamentais:

- não possuem o pedal de embreagem, por serem dotados de um dispositivo de acoplamento hidráulico que faz o papel de embreagem convencional e não precisa do clássico pedal de comando por ser de funcionamento automático em função dos giros do motor;
- possuem uma caixa de câmbio de funcionamento automático, isto é, capaz de efetuar por si mesma as mudanças de velocidade que são indicadas pelas necessidades do transporte.

Segundo Lucas (1997), o acoplamento hidráulico é feito por meio de um dispositivo hidrocínético, também chamado de hidrodinâmico, sendo que o seu princípio de funcionamento se baseia na transmissão de energia de um fluido em alta velocidade (óleo) entre dois elementos rotativos de uma bomba ou turbina.

O sistema de transmissão CVT é, como o seu nome indica, uma transmissão de variação contínua de sua relação ou de número infinito de relações entre dois limites: um inferior e outro superior. O princípio de funcionamento deste dispositivo é baseado na transmissão do movimento entre dois eixos paralelos mediante uma correia metálica de seção trapezoidal e duas roldanas de diâmetro variável.

As principais vantagens desta transmissão são centralizadas sobretudo em alguns benefícios comparáveis aos que são oferecidos pelas caixas manuais: câmbio contínuo entre as diferentes relações (realmente infinitas) e ausência de arranques violentos ou sacudidas nas mudanças de marchas e um consumo bem ajustado. Existem ainda as transmissões hidrostáticas que são empregadas em alguns tipos de veículo, principalmente fora-de-estrada.

5.3.2. Força frenante

Todos os veículos terrestres contam com um dispositivo de frenagem capaz de absorver a energia de movimento, ou energia cinética, que o automóvel tenha no momento da frenagem, de modo a reduzir sua marcha do veículo ou pará-lo.

Os dispositivos de frenagem normalmente empregados no automóvel efetuam a absorção da energia cinética do veículo em movimento recorrendo ao atrito entre materiais de fricção especiais sobre as superfícies de tambores ou discos solidários às rodas. O atrito absorve a energia cinética transformando-a em calor que é dissipado no ambiente.

Os sistemas de freio de serviço utilizados nos automóveis atuais respondem a uma estrutura e a um desenho que é basicamente igual, ou muito similar, em todas as marcas e modelos. A Figura 5.6 mostra os principais elementos.

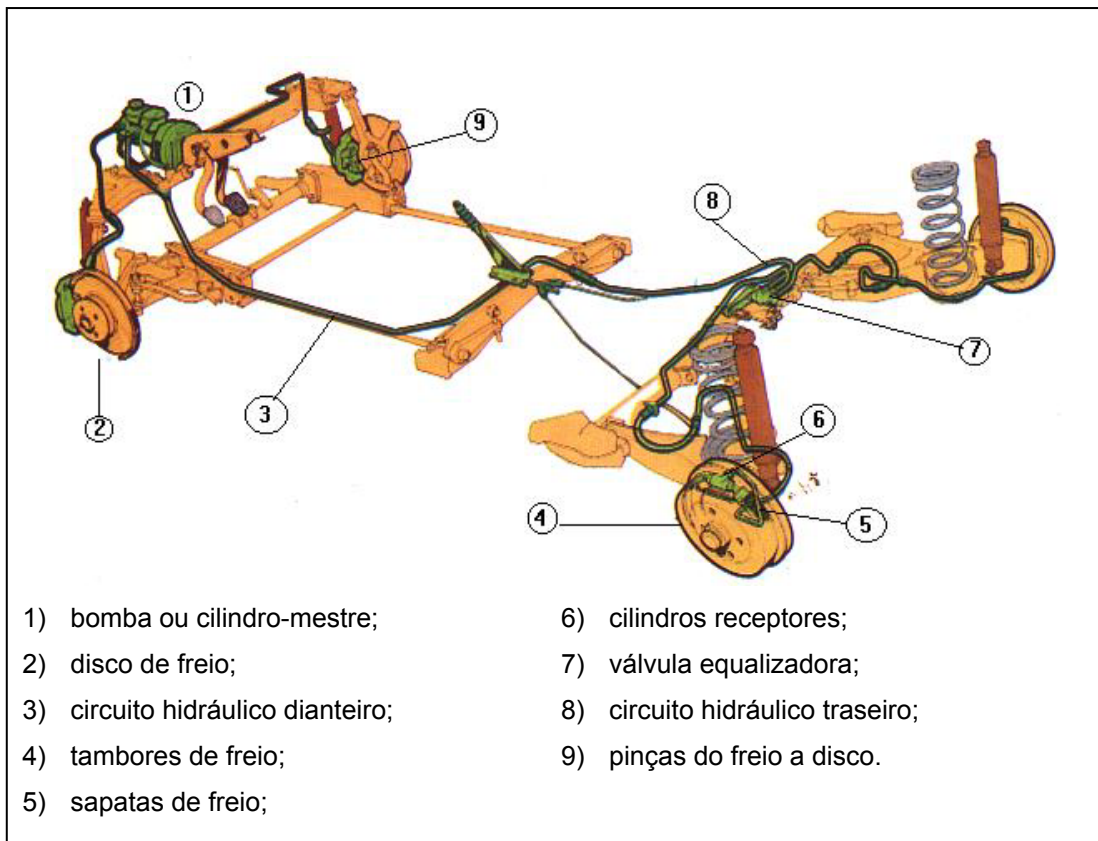


Figura 5.6: Sistema de frenagem de um veículo.

Fonte: Grande Enciclopédia Prática (1988).

A bomba, ou cilindro-mestre, é o elemento que aciona as unidades de frenagem das rodas quando o motorista pressiona o pedal, sendo composta de um êmbolo, que comprime o fluido, conectado ao pedal do freio. Quando se pisa neste pedal o êmbolo se desloca e comprime o fluido gerando uma pressão. Esta pressão é transmitida de imediato a todos os pontos da rede de tubos hidráulicos, chegando a outros cilindros menores situados nas rodas do carro.

Estes cilindros possuem em seu interior êmbolos que são conectados aos elementos frenantes. Quando os êmbolos recebem a pressão do fluido se deslocam levando consigo os elementos que comprimem o disco ou o tambor, gerando atrito entre eles e fazendo com que o veículo diminua a velocidade.

Cessando-se a força sobre o pedal do freio, o êmbolo do cilindro-mestre retorna a sua posição de repouso e deixa de exercer pressão sobre o fluido, com isso desaparece a pressão sobre os elementos frenantes que também retornam a sua posição de repouso pela ação de molas recuperadoras.

5.4. Dinâmica transversal

Segundo Genta (1997), duas funções básicas podem ser identificadas em todos os tipos de veículos: propulsão e controle de trajetória. Dentro desta segunda função todos os veículos podem ser divididos em duas categorias:

- veículos guiados cinematicamente, onde a trajetória é fixada por restrições cinemáticas;
- veículos pilotados, onde a trajetória, uma curva planar ou tridimensional, é determinada pelo sistema de direção, controlado pelo elemento humano ou por um dispositivo, normalmente, eletro-mecânico. O sistema de direção atua através de forças que são capazes de alterar a trajetória do veículo.

Segundo o Automotive Handbook (1986) e Gillespie (1992), o sistema de direção converte o movimento de rotação aplicado ao volante em movimento de esterçamento das rodas de forma que o veículo possa seguir a trajetória comandada. Atualmente utilizam-se dois tipos básicos de mecanismos de direção:

por rosca sem-fim (com numerosas variantes, como rosca sem-fim e rolete, rosca sem-fim e setor, circulação de esferas, entre outras) e por cremalheira.

A Figura 5.7 mostra os principais componentes de um sistema de direção por rosca sem-fim, incluindo todo o conjunto de bielhas de direção e articulações.

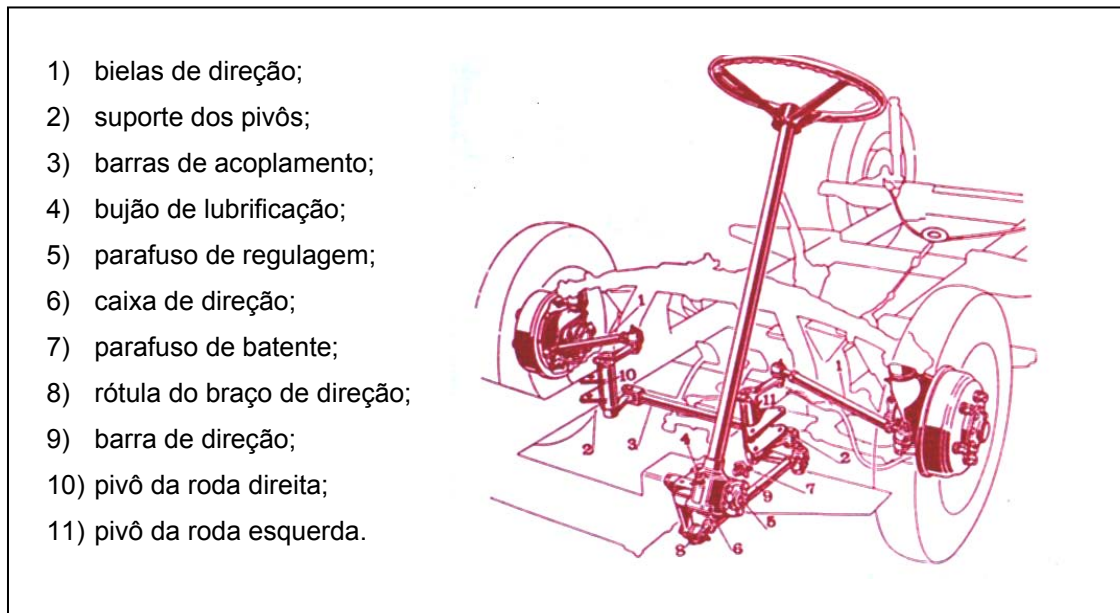


Figura 5.7: Sistema de direção por rosca sem-fim.

Fonte: Grande Enciclopédia Prática (1988).

5.5. Dinâmica vertical

A dinâmica vertical está intimamente relacionada ao sistema de suspensão que é sua a peça fundamental, o qual é um conjunto de elementos que servem de união entre as rodas e a própria estrutura do automóvel (Figura 5.8).

Como a superfície do terreno por onde o veículo circula nem sempre é perfeitamente plana e regular, todo veículo deve ser projetado de forma que, em primeiro lugar, suas quatro rodas posam se adaptar à superfície da estrada mesmo que esta apresente certas irregularidades. Além disso, é necessário também que durante a marcha do veículo as rodas sejam capazes de oscilar elasticamente e absorver as irregularidades do terreno, a fim de evitar, na medida do possível, que as sacudidas e vibrações correspondentes sejam transmitidas à estrutura do veículo e conseqüentemente transmitidas aos passageiros e/ou cargas. Dessa forma promove-se um aumento do conforto interno do veículo e da segurança.

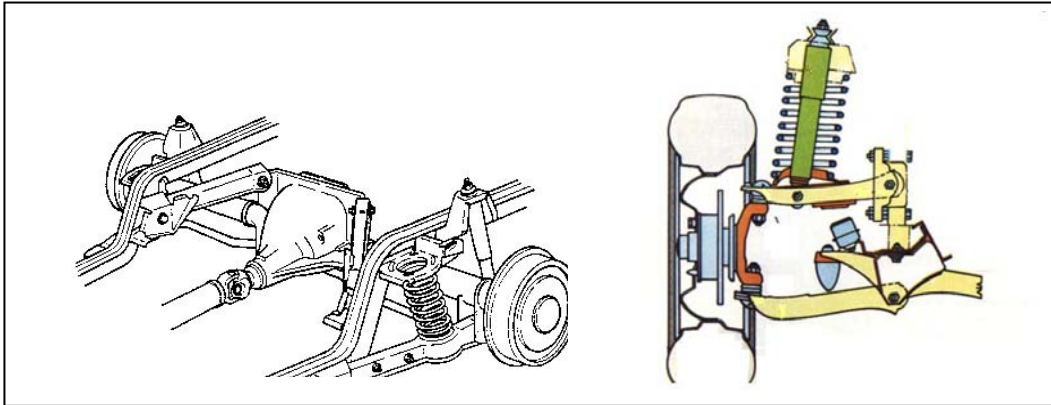


Figura 5.8: Exemplos de modelo de suspensão traseira e dianteira.
Fonte: Grande Enciclopédia Prática (1988).

Para conseguir esses objetivos essenciais a união das rodas ao conjunto da carroceria e chassi do veículo não é rígida, sendo feita por meio de dispositivos mecânicos de diversas concepções que permitem a oscilação das rodas ao rodar sobre as irregularidades do terreno e por sua vez, a absorção e o amortecimento das referidas oscilações.

De acordo com o descrito acima e segundo Genta (1997), esse sistema persegue, pois, dois objetivos principais:

- assegurar permanentemente o contato das quatro rodas com o chão, condição importante para se obter uma boa aderência e a partir daí um nível aceitável de estabilidade e segurança de marcha, de forma a haver uma boa distribuição do peso do veículo sobre o solo;
- afastar o condutor, os passageiros e a carga transportada das irregularidades do terreno e permitir, desse modo, um máximo de conforto.