

2.2 - Sistemas de Direção

2.2.1 - Generalidades

O sistema de direção, que na grande maioria dos veículos de passageiros está localizado somente na suspensão dianteira, tem uma construção cinemática particular porque deve permitir o funcionamento normal da suspensão e a realização de manobras de curvas, respondendo aos comandos realizados no volante pelo motorista e transferindo as forças entre o pneu e a superfície da estrada. A geometria básica proposta por Ackerman é apresentada na Fig.2.12, na qual o ângulo da roda dianteira interna é maior que a da roda dianteira externa. Mais detalhes são abordados no sub-ítem 2.5.2 deste capítulo.

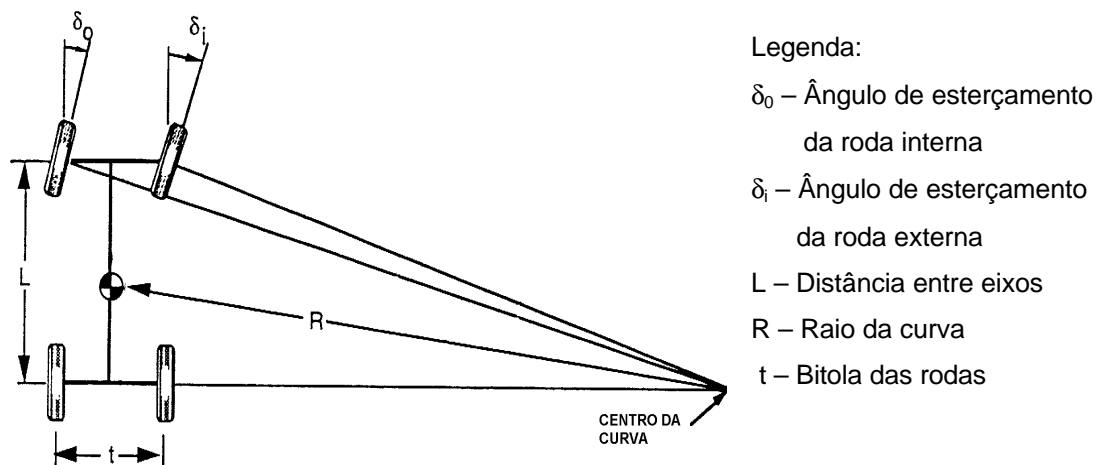


Figura 2.12 - Geometria básica para a realização de curvas proposta por Ackerman.

Em função das movimentações elásticas das articulações de ligação dos componentes, geralmente feitas de borracha e elastômeros, a relação entre o ângulo do volante e os das rodas não são perfeitamente lineares. Durante a movimentação do veículo, o motorista deve continuamente ajustar o ângulo do volante para percorrer a trajetória desejada, em função de sua percepção e comportamento do carro. Entre os fatores que contribuem para estas alterações pode-se citar a inclinação lateral da carroceria, a sensação de aceleração lateral e torque de reação do volante.

O mecanismo mais utilizado para a construção das caixas de direção em veículos de passageiros com suspensão independente é o do tipo pinhão e cremalheira, montada transversalmente em relação ao eixo x do veículo, conforme mostrado na Fig. 2.13. O movimento de rotação do pinhão, que está ligado em sua extremidade à coluna de direção que tem o volante na outra extremidade, é transformado em movimento de translação, e este por sua vez, através dos tirantes e braços, comanda a rotação das rodas.

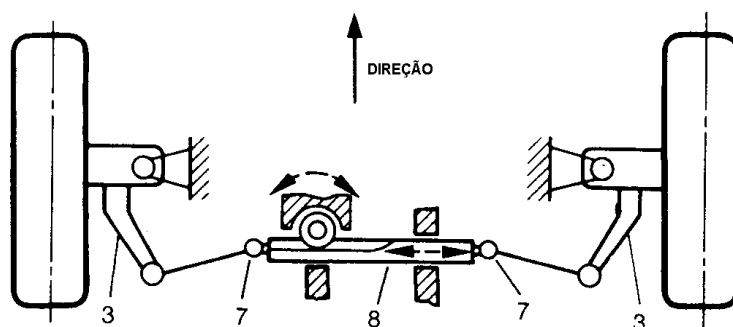


Figura 2.13 - Esquema de funcionamento do sistema de direção. 3- braços da direção esquerdo e direito; 7- terminais esféricos de ligação do tirante da caixa ao braço; 8- caixa de direção do tipo pinhão e cremalheira.

Entre as vantagens deste sistema pode-se citar a construção simplificada e de baixo custo de produção, a ligação direta entre os tirantes da caixa e os montantes das rodas e mínima elasticidade de esterçamento. Entre as desvantagens, as principais são: a elevada sensibilidade a impactos com uma elevada transferência das perturbações oriundas das rodas; o fato de não poderem ser empregados em eixos rígidos; e a presença de cargas elevadas em aplicações onde o comprimento dos braços não podem ser aumentados devido ao pouco espaço disponível.

A necessidade de proporcionar conforto e precisão ao motorista tem forçado a adoção cada vez mais frequente dos mecanismos de direção assistidos. O modelo

mais utilizado em veículos pequenos, e também disponível no carro de testes, é a caixa de direção assistida hidraulicamente através de um circuito dotado de bomba, reservatório, mangueiras, polias e correias de ligação com o motor. A característica desejável nestes sistemas é a de possibilitar uma elevada assistência nas manobras de baixa velocidade e de estacionamento com o motor girando abaixo de 1000 rpm e uma redução progressiva da assistência à medida do aumento da velocidade do carro e da imposição de pequenos ângulos de volante. Um exemplo de circuito de direção hidráulica é mostrado na Fig.2.14 com a composição básica dos componentes. Dos componentes principais pode-se citar a bomba de óleo (3), que geralmente é acionada através de polias e correia acoplada ao motor. O óleo é conduzido através de tubos metálicos e flexíveis de alta e baixa pressão (5), passando pela caixa de direção (1).

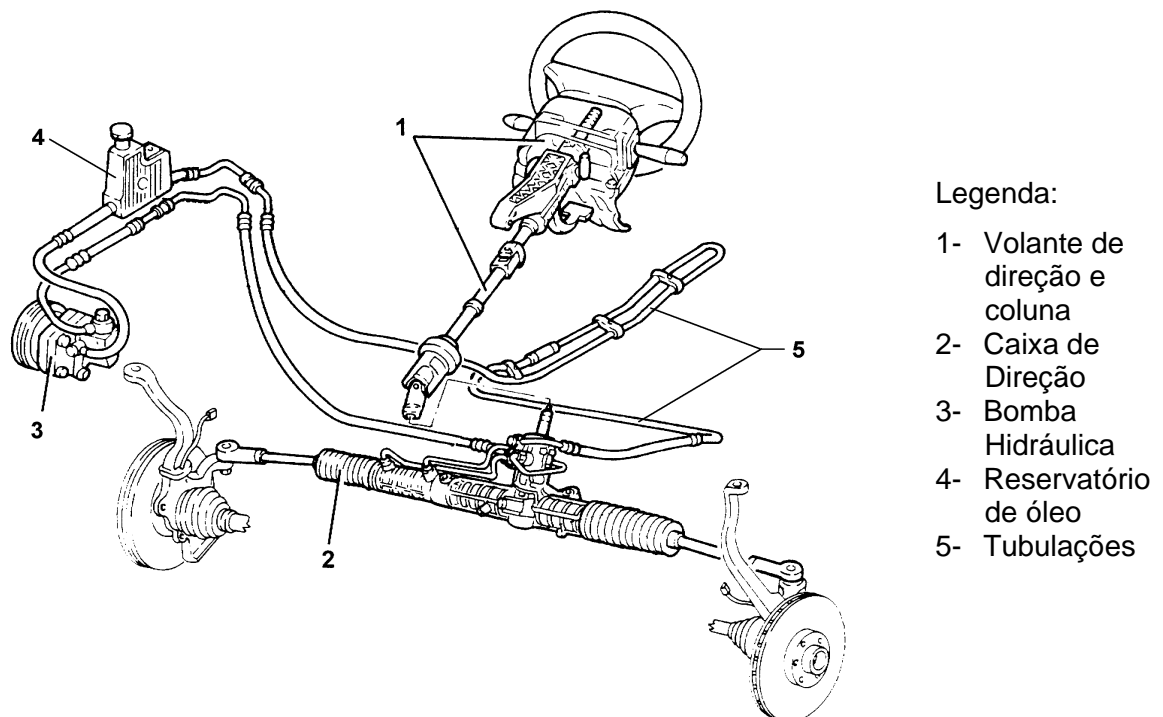


Figura 2.14 - Esquema dos componentes do sistema de direção hidráulica.

2.3 - Pneus

2.3.1 - Introdução

Os pneus desempenham uma importante função no comportamento dinâmico do veículo, sendo os elementos de ligação entre o piso e o conjunto da suspensão e carroceria.

Segundo Gillespie (1992), o pneu deve cumprir basicamente três funções:

- 1) Suportar a carga vertical enquanto absorve os impactos recebidos da estrada;
- 2) Desenvolver as forças longitudinais para transmitir aceleração e frenagem;
- 3) Desenvolver as forças laterais para a realização de desvios e curvas.

Além das funções básicas citadas, os pneus utilizados em veículos de passageiros e de carga, devem ainda possuir características positivas e compatíveis de durabilidade, economia, conforto, baixo nível de ruído de rolamento, atender às necessidades de *handling*, e manter estáveis seu rendimento em diferentes condições de piso seco ou molhado, com temperaturas e níveis de solicitação de cargas variadas.

Os dois tipos de construção mais largamente empregados em pneus são o diagonal e o radial. A denominação deve-se ao posicionamento da cordoalha de reforço da carcaça de borracha, de modo que nos diagonais são dispostos em ângulos que variam de 30° a 45°, e nos radiais estão dispostos em duas camadas, uma transversal a 90° e outra longitudinal em relação ao eixo de rotação, conforme Fig. 2.15.

A partir da década de 80, os pneus radiais praticamente substituíram os diagonais nas aplicações em automóveis de passeio. As principais vantagens dos radiais destacadas por Reimpell e Stoll (1996) são: a maior durabilidade, maior capacidade de carga, menor resistência ao rolamento, melhores propriedades de aquaplanagem, melhor comportamento em frenagens sobre pistas molhadas, transferência de maiores forças laterais para as mesmas pressões, e melhores características de conforto a altas velocidades. Entre as poucas desvantagens

pode-se citar a sua pouca estabilidade direcional, sendo que para melhorar este desempenho são utilizadas cintas geralmente de aço, que formam uma malha em torno da circunferência do pneu entre a carcaça de borracha e a banda de rodagem. A cordoalha desta cinta está normalmente montada formando um ângulo de 20° em relação ao sentido de rodagem (Figura 2.18). Uma segunda desvantagem é a pouca resistência mecânica da lateral do pneus se comparada com a dos diagonais.

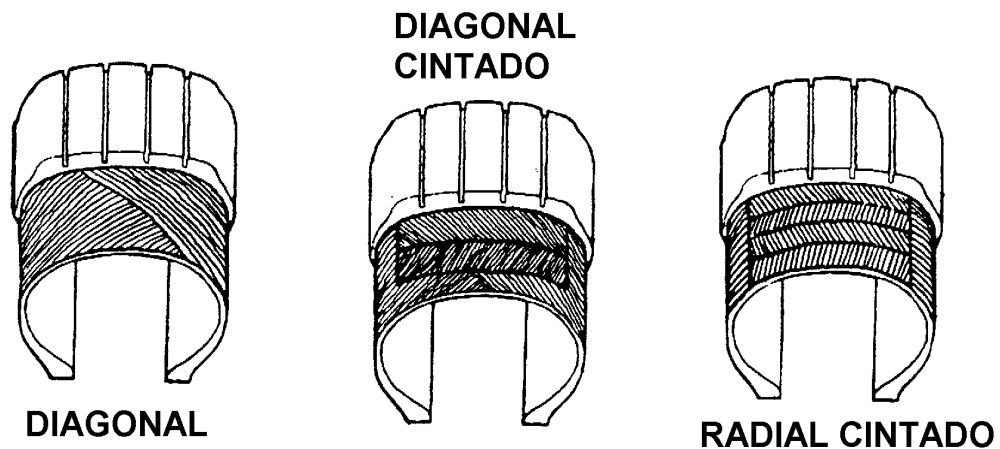


Figura 2.15 - Construção dos três principais tipos de pneus empregados atualmente.

Para transmitir as forças de tração, sejam elas durante acelerações ou frenagens, o coeficiente de atrito dos pneus é um fator fundamental. Para a transmissão destas forças a banda de rodagem do pneu é solicitada e durante a sua deformação é desenvolvida a força de atrito. A Figura 2.16 ilustra o mecanismo de deformação na região de contato com o solo durante uma frenagem.

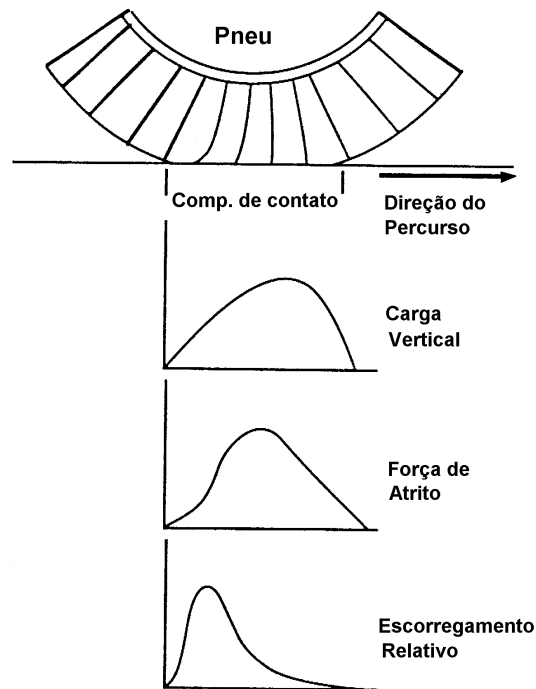


Figura 2.16 – Deformação na região de contato durante uma frenagem.

Da análise deste mecanismo de deformação da banda de rodagem durante a transmissão de forças de aceleração e frenagem, verifica-se uma diferença entre as velocidades tangenciais do pneu e do percurso. Como consequência, tem-se a geração de um deslizamento na área de contato. Gillespie (1992) define este escorregamento (*slip*) como uma grandeza não dimensional, sendo uma porcentagem da velocidade de deslocamento, representada pela Eq. (2.4):

$$\text{Esorregamento (\%)} = (1 - r_{\text{din}}\omega/V) \times 100 \quad (2.4)$$

Onde:

r_{din} = raio dinâmico do pneu (m)

ω = Velocidade angular do pneu (rad/s)

V = Velocidade longitudinal do veículo (m/s)

Como descrito inicialmente, outra importante função desempenhada pelo pneu é a geração de forças laterais para o controle direcional do veículo durante curvas, mudanças de direção e para suportar forças externas como vento e inclinações da pista. Quando o pneu é submetido a uma força lateral tende a desviar para este lado. Um ângulo definido como “ângulo de escorregamento α ” é criado entre a direção do eixo assumido pelo pneu e a direção de percurso. Este mecanismo é representado esquematicamente através da Fig. 2.17.

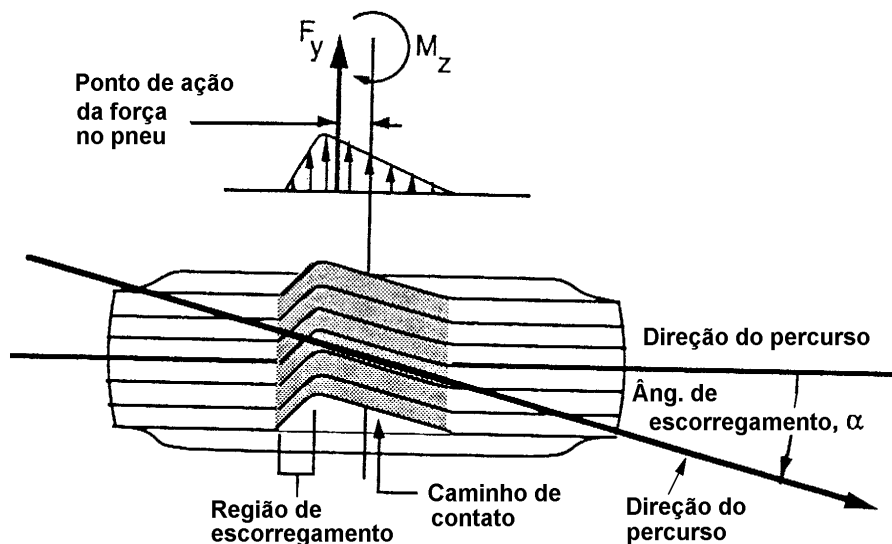


Figura 2.17 – Deformação do pneu sob atuação de força lateral.

O desvio de trajetória não é um mecanismo instantâneo, mas apresenta um retardo entre a imposição de um novo ângulo do pneu e o início de sua resposta. Este tempo de atraso ocorre até que as laterais do pneus sejam deformadas. Em média este retardo está relacionado entre meia e uma revolução completa do pneu (Ellis, 1996).

Os pneus diagonais disponíveis até o momento têm tido seu emprego reduzido principalmente em função do seu comportamento dinâmico inferior nas manobras. A sua construção possibilita uma maior deformação da banda de rodagem na região de contato com o solo, tanto na rodagem em retilíneo como durante a realização de curvas ou solicitações de esforços laterais mais elevados, quando as laterais ou ombros dos pneu passam a ser utilizados.

Ao longo do desenvolvimento dos pneus, a borracha foi o material de base que mais se mostrou adequado, em virtude de suas qualidades sobre o controle do veículo, confiabilidade e durabilidade em condições adversas. Para determinado conjunto de pneu e superfície, a força lateral produzida pelo contato com a estrada depende de vários fatores, mas principalmente da posição relativa entre pneu e a direção de percurso, ângulo de *camber*, força vertical, pressão de enchimento e a velocidade angular de rodagem. A velocidade linear do veículo pode ser considerada um fator secundário.

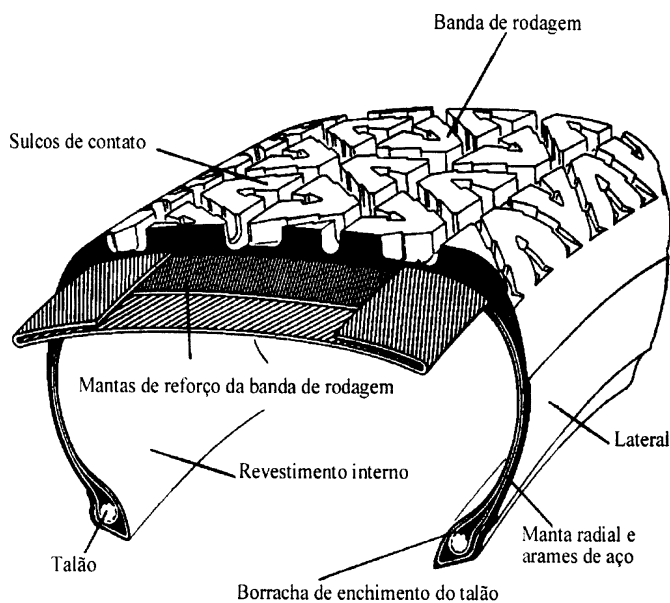


Figura 2.18 - Pneu radial e principais componentes.

2.3.2 - Construção

Os pneus atuais têm sua base na construção da carcaça. Esta é moldada em borracha macia para evitar fadiga ao longo da utilização e é reforçada com cordoneis e telas dispostos em camadas. A carcaça proporciona também o contato e a sua fixação solidária com a roda, evitando deslizamentos radial e transversal. As pressões usuais para veículos de passeio variam de 1,6 a 3,0 bar. No emprego em caminhões podem chegar a 9,0 bar. Os cordoneis atualmente empregados são geralmente *nylon*, *Rayon*, *terylene*, aço, fibras de poliéster, de vidro ou de carbono. Estes possuem um elevado módulo de elasticidade, sendo responsáveis por suportar as tensões, enquanto a borracha serve de suporte e elemento de vedação para o gás de enchimento. Os materiais são escolhidos em função das características mecânicas desejadas e tipos de veículos. A densidade destes materiais varia consideravelmente, variando de 1100 Kg/m³ para o *nylon*, 2500 Kg/m³ para a fibra de vidro e 7800 Kg/m³ do aço. No lado exterior da carcaça, revestindo todo o perímetro do pneu está a banda de rodagem, que é a parte de borracha que mantém contato com a estrada. Ela é composta por gomos e canais de desenho específico, com altura típica de 8 mm quando nova (12 a 14 mm para caminhões), que proporcionam as condições de aderência, refrigeração e drenagem de água. À medida em que aumentam as velocidades e acelerações, o mesmo ocorre com a responsabilidade da banda de rodagem. A borracha deve atender às necessidades de pouco desgaste e aderência nas várias situações de uso.

As dimensões dos pneus são basicamente definidas em função do diâmetro da roda, a largura da banda de rodagem e a sua altura ou perfil, que é definida em porcentagem da sua largura. As relações normais para veículos de passeio variam normalmente entre 60, 70 e 80%; veículos esportivos entre 30 a 55. As características de conforto e *handling* são diretamente afetadas pelo perfil.

Normalmente reduzindo-se a altura do perfil, perde-se no conforto e melhora-se o desempenho e a velocidade de resposta nas mudanças de direção. A densidade da borracha empregada na construção de pneus está em torno de 1200 Kg/m^3 , possuindo em sua composição carvão preto e óleo, entre os principais.

A dureza da borracha geralmente é diferente nos vários componentes constituintes como carcaça, talão, banda de rodagem e flanco. Uma dureza típica para a banda de rodagem está em torno de $60 \text{ Shore A}^{(1)}$.

Por outro lado, a borracha, seja ela natural ou sintética, é um material visco-elástico. Isto significa que quando uma peça de borracha é deformada, ela reage à aplicação desta força por um determinado momento, em seguida relaxa em função de seu comportamento viscoso, e em consequência a força aplicada diminui. Um modelo simplificado deste comportamento proposto por Dixon (1996)

é apresentado na Fig.2.19, sendo dependente da frequência e composto por duas molas dispostas em série, com rigidezes k_{t1} e k_{t2} e um amortecedor c_t em paralelo com a mola k_{t2} . Em baixas frequências, o amortecedor praticamente não afeta o sistema e a rigidez do modelo é simplesmente a das duas molas em série. Em altas frequências, o amortecedor passa a exercer sua influência bloqueando a ação da mola k_{t2} , o que leva a rigidez do sistema a ser representada pela atuação única de k_{t1} . Durante estas duas condições extremas, o sistema dissipa pequenas quantidades de energia. Em condições intermediárias de frequências, o sistema atinge seu máximo de dissipação de energia.

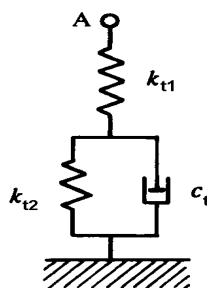


Figura 2.19 - Modelo mecânico do comportamento da borracha do pneu dependente da frequência.

(1) Shore A é uma unidade de um método de medição de dureza empregado para borrachas e plásticos macios, onde um pino cônico de aço é pressionado contra a peça por uma mola de constante de rigidez $17,8 \text{ N/mm}$. Cada $0,025 \text{ mm}$ de deformação da mola correspondem a 100 Shore.