

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Sistemas e Componentes de Suspensão

Os sistemas de suspensão surgiram na época de veículos com tração animal com o objetivo de proporcionar conforto e absorver as irregularidades dos terrenos. Na indústria automobilística, à medida que os veículos aumentavam as velocidades de trânsito e melhoravam as condições das estradas, intensificaram os estudos para a otimização do comportamento das suspensões. Segundo Gillespie (1992), as suas funções principais são:

- Permitir a movimentação vertical das rodas ao longo do percurso, isolando o chassis das imperfeições do solo;
- Manter as rodas nos seus ângulos característicos previstos, seja estática ou dinamicamente, executando manobras de mudança de direção e curvas;
- Suportar as forças de reação impostas pelos pneus, ou seja, transmitir aceleração e suportar frenagens longitudinais e forças laterais (curvas);
- Suportar os efeitos de rolamento lateral do chassis ou monobloco;
- Manter os pneus em contato com o solo, com as menores variações de cargas possíveis.

Além de permitir a movimentação vertical das rodas, o projeto da geometria da suspensão deve contribuir também para reduzir as movimentações indesejáveis da carroceria em *pitch* e *roll*. Na Figura 2.1 é mostrado o esquema básico de uma suspensão. A mola principal sustenta a massa suspensa, e o amortecedor atua dissipando a energia da mola armazenada durante a movimentação. O pneu também possui uma flexibilidade atuando em série com a mola. Os amortecedores atuam em paralelo. As características básicas da suspensão do veículo de testes estão apresentadas no Apêndice C, juntamente com os cálculos das frequências naturais não amortecidas.

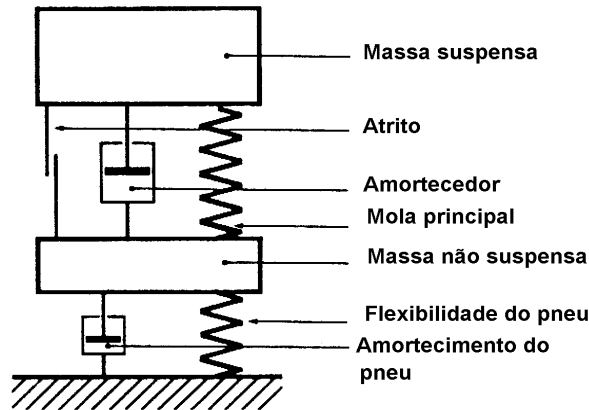


Figura 2.1 – Esquema simplificado de uma suspensão de veículo.

2.1.1 - Suspensão Dianteira McPherson

A suspensão desenvolvida por Earle S. McPherson é constituída por uma estrutura tubular que já incorpora a função de amortecedor, sendo ligada rigidamente na extremidade inferior ao montante da roda; um braço triangular, com dois apoios no chassi, ou monobloco do veículo, e um apoio articulado unindo o braço ao montante. Na parte superior da estrutura, conforme Fig. 2.2, a haste roscada do amortecedor é ligada ao chassi com uma bucha elástica que serve de apoio ao anel de apoio da mola, absorvendo vibrações e permitindo os movimentos de rotação.

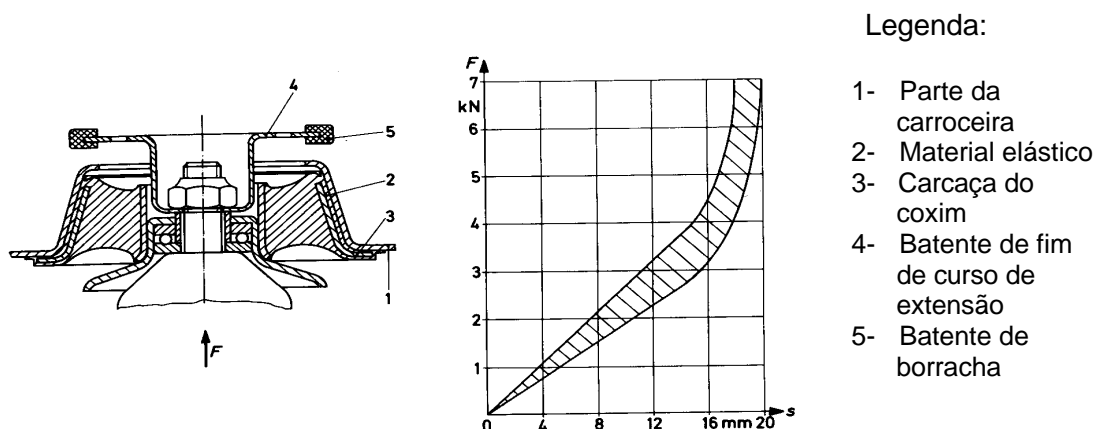


Figura 2.2 - Fixação superior de uma suspensão dianteira McPherson. O rolamento permite o movimento de rotação, enquanto a borracha absorve impactos e filtra vibrações.

O gráfico representa o comportamento de deformação em função da carga aplicada durante a compressão e o retorno para a posição de equilíbrio com a respectiva histerese.

Esta configuração de suspensão tem a grande vantagem de necessitar pouco espaço transversal, sendo muito utilizada na dianteira de veículos pequenos e médios com carroceria tipo monobloco e com motores dianteiros transversais, mas também empregadas nas suspensões traseiras. Outros pontos positivos são a facilidade de instalação, poucos componentes e juntas, baixo peso, e pouca sensibilidade a variações de tolerância dimensional.

Comportamento dinâmico e aspectos construtivos

Observa-se na Fig. 2.3 os detalhes de uma estrutura McPherson onde o suporte da roda ou montante (1) é ligada rigidamente através de parafusos com o tubo estrutural que incorpora internamente o amortecedor. A extremidade externa da haste do amortecedor fixa-se por união roscada a um suporte que serve também de apoio superior para a mola e corpo integrante do rolamento (5), e onde está posicionado o batente que atua como mola suplementar e fim de curso elástico da suspensão. Do lado inferior a mola está apoiada através do prato (3). O coxim de borracha (6) absorve as forças da mola, enquanto as partes macias (7), também de borracha, absorvem as forças geradas pelo amortecimento. Os anéis metálicos (8) e (9) atuam respectivamente como batentes de segurança de compressão e de extensão, na eventualidade de rompimento do coxim de borracha. Na parte inferior do sistema tem-se a junta esférica (12) que une o montante da roda ao braço de apoio (13).

Entre os aspectos negativos estão a variação de *camber* ao longo da excursão da suspensão e a alteração da bitola do veículo, que podem trazer prejuízos para a estabilidade. Verifica-se a existência de uma carga lateral no amortecedor devido a geometria da suspensão e do eixo de atuação da mola. Estas cargas prejudicam o escorregamento da haste do amortecedor, provocando uma perda do nível de conforto (Stensson, Asplund, Karlsson, 1994).

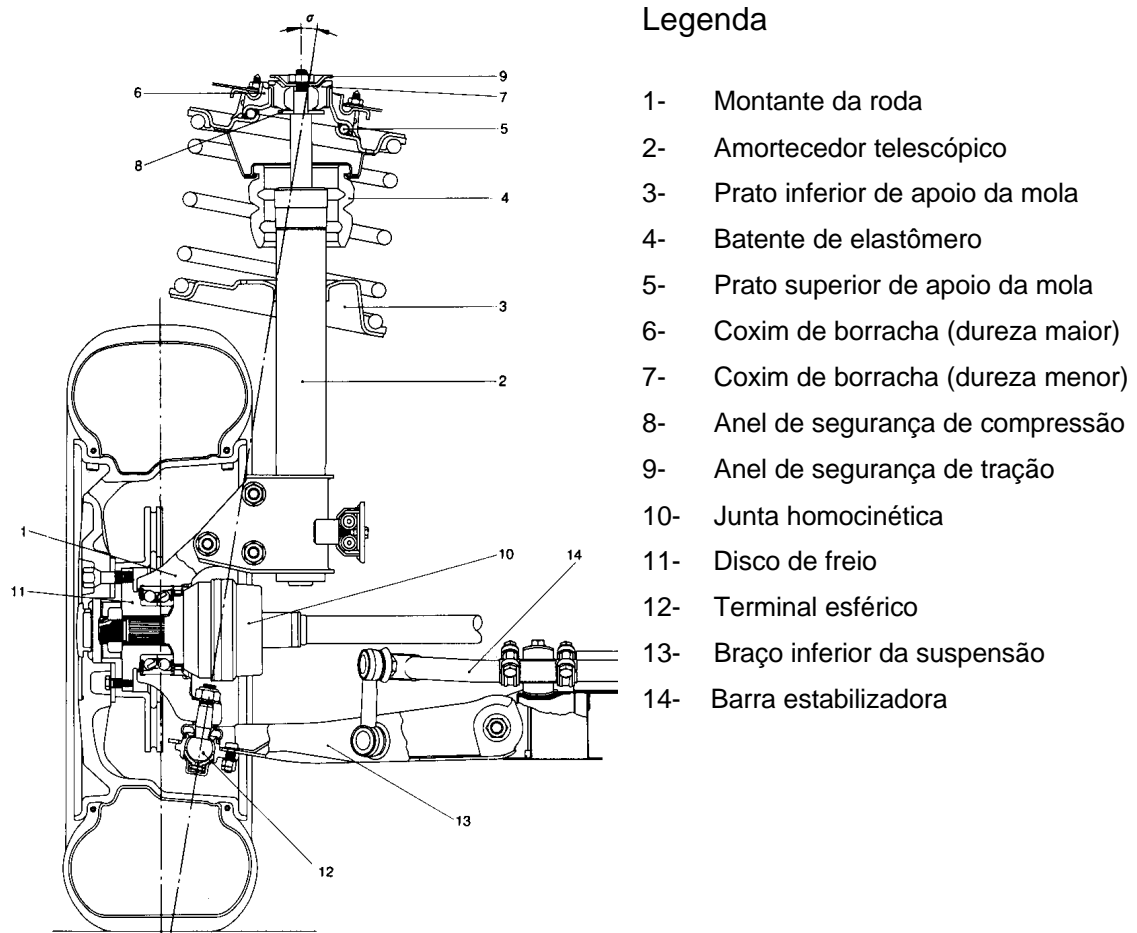


Figura 2.3 - Vista em corte de uma suspensão dianteira McPherson, utilizada em veículo com tração dianteira (Fiat Lancia).

Segundo Reimpell e Stoll(1996), essas cargas indesejáveis podem atingir valores em torno de ± 100 N (em tração ou compressão). Para minimizar este efeito é utilizado o artifício de projeto de colocar a mola descentralizada em relação ao eixo do amortecedor. Analisando o diagrama de forças da Fig. 2.4, a distância b é responsável pela geração da força lateral ($F_{E,y}$), conforme mostrado na Eq. (2.1). É desejável que o ponto b seja deslocado para o plano central da roda para minimizar o efeito de momento (Wunsche et al, 1994).

$$F_{E,y} = F'_{z,W} \frac{b}{c + o} \quad (2.1)$$

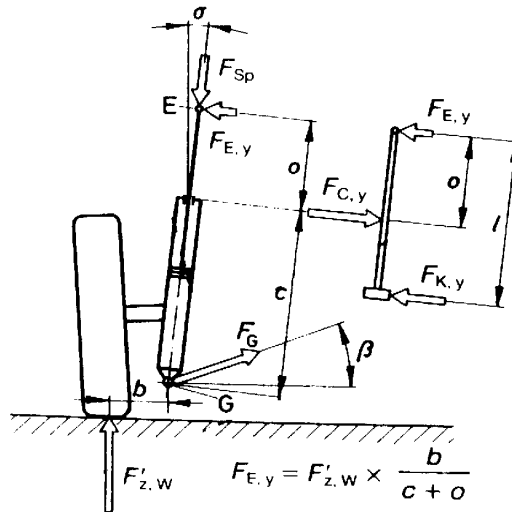


Figura 2.4 - Esquema de forças atuantes na suspensão McPherson.

2.1.2 - Suspensão Traseira

A configuração para a suspensão traseira do veículo utilizado neste trabalho é a denominada “braços combinados e travessa de ligação”, sendo largamente utilizada em veículos pequenos e médios, em decorrência da sua simplicidade. Teve o seu desenvolvimento iniciado na década de 1970, quando foi empregada pela primeira vez no veículo Golf da Volkswagen. Passou a ser utilizada por várias outras montadoras principalmente em virtude da popularização do conceito de tração dianteira nos automóveis de passeio.

É constituída basicamente por dois braços oscilantes que dão suporte aos cubos das rodas em uma de suas extremidades, enquanto são fixados através de articulações na carroceria na outra. Os braços são ligados rigidamente entre si através de um eixo transversal ou simplesmente travessa, geralmente de perfil aberto de aço em forma de “U”. Esta ligação estabelece uma interdependência

nos movimentos oscilatórios entre os braços direito e esquerdo. Nela estão soldados os pontos de fixação inferior dos amortecedores, e eventualmente também o prato de apoio inferior da mola, conforme exemplo da Fig. 2.5.

O conjunto é composto praticamente de uma peça estrutural e duas flanges pivotadas para fixação na carroceria, que proporcionam facilidade de instalação e desmontagem no veículo e cuja forma contribui para uma maior disponibilidade de espaço acima do eixo onde geralmente está o porta-malas para os veículos de tração dianteira. Esta simplicidade construtiva minimiza custos de fabricação e montagem, porém certamente limita o seu desempenho dinâmico se comparada a outros de maior complexidade.

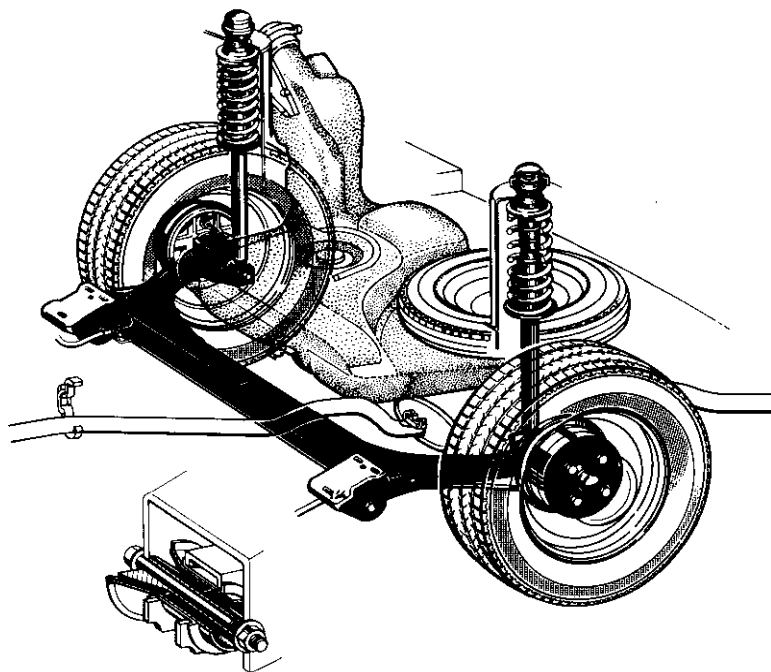


Figura 2.5 - Conjunto da suspensão traseira com braços combinados e barra transversal ou travessa. Detalhe da bucha de borracha montada na articulação de fixação no chassi.

Comportamento dinâmico e aspectos construtivos

Um efeito que deve ser observado no comportamento dinâmico do veículo com esta suspensão é a tendência de sobre-esterço durante a aplicação de esforços

laterais, conforme visualizado na Fig. 2.6, em função da flexibilidade dos coxins elásticos de borracha utilizados nos pontos de fixação do eixo à carroceria (Reimpell e Stoll, 1996). Para minimizar estes efeitos negativos recorrem-se a soluções como o uso de buchas com deformação controlada sob carregamento lateral, ou através da utilização um recurso de projeto onde o rolamento da carroceria provoca uma tendência sub-esterçante no conjunto (Dixon, 1996).

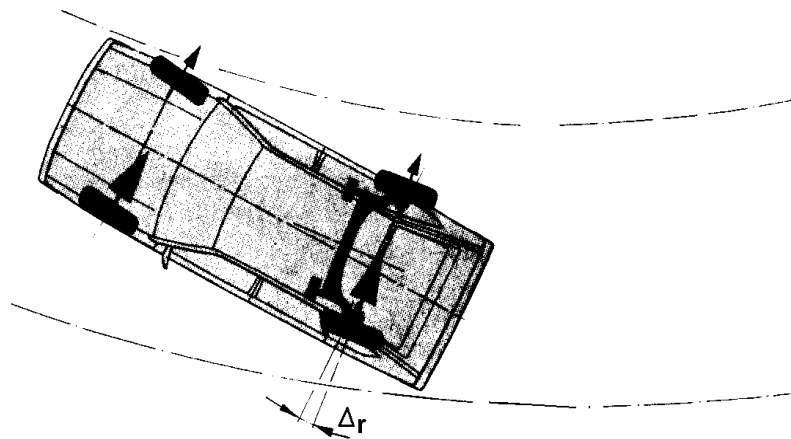


Figura 2.6 - Sob influência de esforços laterais, o eixo traseiro pode assumir um ângulo Δr , provocando sobre-esterço.

Do ponto de vista cinemático, a tendência de ocorrerem alterações de convergência, da distância entre as rodas (bitola), e de *camber* durante a ocorrência de movimento paralelo ou relativo entre os braços são desprezíveis se comparados a outros sistemas. Outros efeitos negativos são os elevados níveis de tensão atuantes nas soldas dos componentes (travessa, braços longitudinais e pratos de apoio das molas), elevada carga de torção e a limitação da carga no eixo em função do comprimento do braço. A travessa de ligação, além de fazer a função de estruturação do sistema, atua também como barra estabilizadora. No caso da necessidade do aumento do efeito estabilizante, a forma em “U” permite

que a barra seja colocada em seu interior, não aumentando o espaço ocupado pela suspensão. A posição longitudinal do eixo transversal ou travessa em relação ao eixo de pivotamento do conjunto é a principal variável do projeto deste sistema, conforme mostrado na Fig. 2.7, resultando em inúmeras possibilidades de ajuste que afetam o seu comportamento (Milliken e Milliken, 1995 e Satchell, 1994).

Quando a travessa é posicionada no mesmo alinhamento do eixo de pivotamento, ela atua somente como barra estabilizadora convencional quando a carroceria é submetida ao rolamento, e a suspensão apresenta características iguais às de braços paralelos independentes.

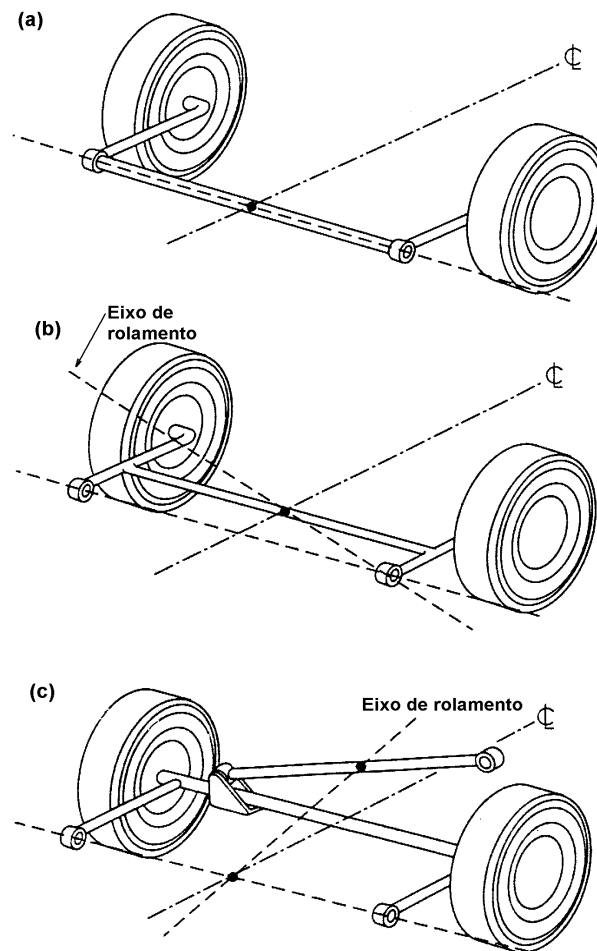


Figura 2.7 – Configurações de posicionamento da travessa na suspensão traseira.

Quando o eixo transversal ou travessa está em uma posição intermediária entre a articulação e as rodas, os esforços atuantes são mais severos e combinados em flexo-torção. Durante o rolamento encontram-se movimentos cônicos e axiais dos braços da suspensão, que são característicos de um sistema de semi-braços oblíquos. Posicionando-se o eixo transversal alinhado com o centro das rodas, verifica-se a necessidade de um componente adicional para suportar os esforços transversais que o sistema original não é mais capaz de absorver. Os braços devem ter necessariamente baixa rigidez à torção e à flexão.

2.1.3 - Molas

As molas são corpos elásticos de união entre as partes móveis dos componentes da suspensão. Em particular as molas da suspensão fazem a ligação entre a massa suspensa e a não suspensa do veículo. Têm como função primária sofrer flexões e deformações quando submetida à aplicação de cargas, devendo retornar a sua condição inicial no momento em que o carregamento é removido. O seu funcionamento correto no veículo visa dar flexibilidade de funcionamento às suspensões de modo a filtrar as irregularidades do solo, proporcionando um nível adequado de conforto aos ocupantes. As suas características devem ser combinadas com a atuação dos amortecedores, barra estabilizadora e sistema de direção para garantir o controle da estabilidade.

É desejável nas molas um funcionamento progressivo de modo que as deformações sejam proporcionais aos esforços aplicados. A energia potencial armazenada quando da aplicação da carga é liberada em forma de energia cinética. Os amortecedores, que trabalham em conjunto, devem absorver parte desta energia e liberá-la em forma de calor (Spring Design Manual, 1996).

Segundo Dixon (1996), os materiais utilizados na construção de molas para automóveis podem ser de origem sólida, líquida ou gasosa. O aço é o principal material empregado na fabricação de molas. As molas helicoidais e barras de torção, são submetidas as esforços de torção, enquanto que nas do tipo lâminas, os esforços são de flexão. Atualmente as molas helicoidais são as mais utilizadas em função do bom desempenho, custo, domínio do processo, facilidade de fixação

e pouco espaço utilizado no grupo da suspensão. Normalmente elas trabalham à compressão e obedecem à lei de Hooke, de tal modo que dentro do limite elástico as deformações são proporcionais ao esforço aplicado.

A forma construtiva pode gerar um comportamento de rigidez constante ou variável. A rigidez variável é conseguida de modo relativamente fácil, como por exemplo, fazendo o passo da espira variável, de modo que em compressão as espiras da extremidade comecem a tocar entre si, reduzindo o número total e aumentando a rigidez. A rigidez K_s pode ser calculada através da relação entre o diâmetro do arame, diâmetro e número de espiras e as características do material. A Equação (2.2) aplicável para molas helicoidais retas, mostra a relação para o cálculo da rigidez:

$$K_s = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_e^3 \cdot N_e} \quad (2.2)$$

onde:

G = Módulo de cisalhamento do aço (N/mm^2)

K_s = Rigidez da mola (N/mm)

D_e = Diâmetro médio da espira (mm)

N_e = Número de espiras ativas

d = Diâmetro do arame da mola (mm)

Uma vez definidas as características da mola, pode-se calcular as deflexões sofridas em função da carga aplicada. A Equação (2.3) mostra esta relação.

$$x_m = \frac{8FD_e^3 N_e}{Gd^4} \quad (2.3)$$

onde:

F = magnitude da força (N)

Por sua vez, a escolha da rigidez das molas varia em função da missão do veículo, sendo basicamente menor para veículos de passeio e maior à medida que se exige um maior desempenho em manobras, como por exemplo, em veículos esportivos.

No veículo de testes, as molas dianteiras e traseiras são do tipo helicoidal, com as dianteiras de flexibilidade constante, enquanto que as traseiras, de dupla flexibilidade.

No acerto final são observados os aspectos de conforto e absorção de irregularidades em marcha, movimentações excessivas durante manobras e curvas, e a estabilidade e segurança em situações de emergência (desvio de trajetória, frenagens e acelerações).

2.1.4 - Amortecedores

Os amortecedores dos veículos são colocados como elementos de ligação entre a massa suspensa e a não suspensa visando reduzir e limitar as velocidades e amplitudes das movimentações da carroceria em seus vários graus de liberdade. A movimentação por sua vez está associada às manobras realizadas pelo motorista em virtude das necessidades do percurso e em função da excitação proveniente das irregularidades das estradas. As movimentações excessivas e não desejadas do veículo, que pode ser analisado como um sistema vibrante com várias massas e molas, podem comprometer a estabilidade ou provocar sensação de desconforto e insegurança ao motorista e passageiros.

A energia absorvida pelo amortecedor é dissipada em forma de calor para o ambiente. Atualmente, nas suspensões passivas são empregados quase que exclusivamente os amortecedores hidráulicos telescópicos do tipo simples ou duplo tubo. Pode-se utilizar também gás inerte (Nitrogênio) pressurizado em seu interior. Podem ser encontradas velocidades de funcionamento de 1,7 m/s a 5 m/s nas aplicações em veículos de passeio (Bastow, 1997). Em estradas com pavimentação irregular e com oscilações podem surgir picos de aceleração de até 30 g em condições esporádicas (considerando $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

Nos amortecedores pressurizados a gás atualmente empregados, onde a pressão do gás injetado varia normalmente entre 0,4 a 0,5 MPa, podem ser atingidas temperaturas de até 200 °C durante a realização de testes ou rodagem constante em pavimentações acidentadas (Reimpell e Stoll, 1996).

A base matemática para o comportamento do amortecimento viscoso é a proporcionalidade entre a velocidade e a força de amortecimento, que é conseguida através de artifícios construtivos dos componentes internos. Pode-se mencionar que os amortecedores do tipo “atrito seco” foram praticamente abandonados nas aplicações em suspensões de automóveis, principalmente pelo fato de que, o atrito não é desejável para o funcionamento da suspensão (Bastow, 1997). Caso a força perturbadora não seja suficiente para vencer a força de atrito, toda a excitação é transmitida diretamente para a massa suspensa, ou seja, também para o habitáculo dos ocupantes do veículo.

Segundo Dixon (1999) e Gillespie (1992), as razões de amortecimento médio para veículos de passageiros estão entre 0,2 e 0,4. Para carros esportivos ou de competição pode-se estar na faixa de 0,4 a 1,0. A relação básica entre as cargas de compressão e extensão é de 30 / 70, podendo ainda variar de acordo com o modelo e perfil de utilização, entre as proporções de 20 / 80 e 50 / 50. Na Figura 2.8 visualizam-se duas maneiras de se representar genericamente uma curva de amortecedor para veículos de passageiros.

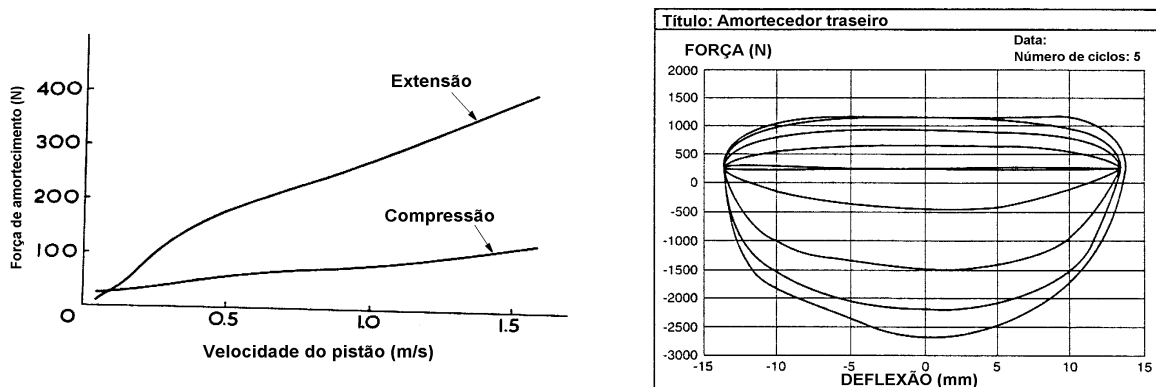


Figura 2.8 - Exemplos de curvas de amortecedores.

Forma construtiva e Descrição do funcionamento

Os amortecedores telescópicos de tubo duplo, como o mostrado no esquema da Fig. 2.9, são constituídos por uma câmara principal (A), de uma câmara de equalização (C), pelo pistão (1) fixado à haste de acionamento (6), por uma válvula inferior (4), e uma guia para a haste (8) e seu selo de vedação de óleo e pressão (5). O reservatório C é geralmente preenchido até a metade de seu volume com óleo e o restante é ocupado pelo gás sob uma pressão que varia de 0,4 a 0,5 Mpa. Recomenda-se que a inclinação de instalação no veículo na condição de toda compressão não supere 45°, para evitar a sucção de gás pelo pistão (ou ar nos não pressurizados).

Quando a roda do veículo se desloca para cima, a distância entre as extremidades do amortecedor diminui, induzindo o movimento do pistão (1) para baixo em compressão. Ocorre então uma transferência de óleo através da válvula II da parte inferior da câmara principal (A) para a parte superior da mesma câmara. Nesta condição, o papel principal na geração da força de amortecimento ocorre quando o volume de óleo deslocado pela haste do pistão flui através da válvula IV para a câmara de equalização (C).

Na condição de extensão do amortecedor, a pressão na porção superior da câmara principal aumenta e um fluxo através da válvula I em direção à parte inferior da câmara tem início, sendo esta a principal responsável pela geração de força na descompressão do sistema. À medida em que a haste do pistão se desloca para fora do amortecedor, o volume útil da câmara principal aumenta e o óleo necessário ao seu preenchimento é sugado da câmara de equalização através da válvula III. O aumento de pressão na parte superior do amortecedor provoca um aumento na pressão sobre o selo da guia da haste (A) para a parte superior da mesma câmara. O volume de óleo deslocado pela haste do pistão flui através da válvula IV para a câmara de equalização (8) onde os furos de retorno (9) possibilitam a recuperação do óleo que se deposita entre a haste e sua guia.

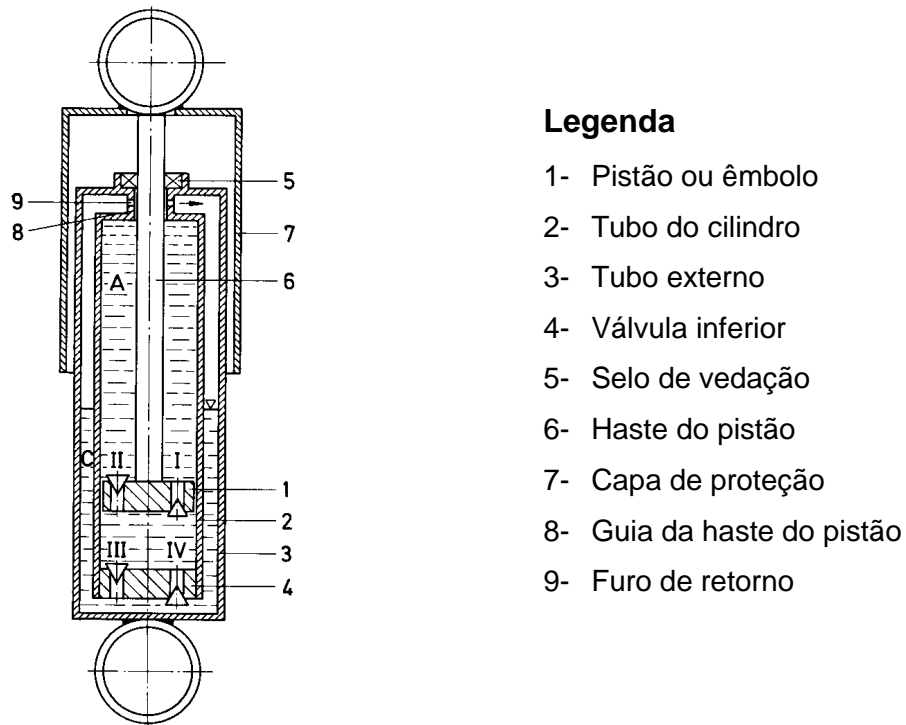


Figura 2.9 – Desenho esquemático do princípio de funcionamento do amortecedor de duplo tubo.

2.1.5 - Barras Estabilizadoras

As barras estabilizadoras são componentes que podem ser adicionados nas suspensões dianteira, traseira ou ambas. Elas podem ser feitas de barras circulares de aço maciço ou tubular, ou perfis em forma de “U”, com a finalidade principal de diminuir os ângulos de inclinação da carroceria e também a velocidade em que o fenômeno acontece (Bosch Handbook, 1996). Pelo fato de estar ligada entre os lados esquerdo e direito do veículo, não interfere nas movimentações simétricas da suspensão quando a mesma é bem projetada, passando a atuar quando acontecem deflexões laterais.

Além desta função primária, as barras estabilizadoras influenciam as características de comportamento em curvas e respostas ao esterçamento do volante, fazendo com que o veículo aumente ou diminua o sobre-esterço e sub-esterço, melhorando a segurança de direção e controle do veículo. Conforme Reimpell e Stoll (1996), o incremento de barra no eixo dianteiro proporciona um aumento da tendência ao sub-esterço e melhora o comportamento em manobras de mudança de direção. A maior estabilização do eixo traseiro produz um comportamento mais neutro nos veículos de tração dianteira e maior sobre-esterço nos de tração traseira. Na Figura 2.10 é apresentada uma suspensão dianteira com barra estabilizadora, onde a barra está fixada nas extremidades aos braços oscilantes e apoiada através de dois coxins presos à carroceria.

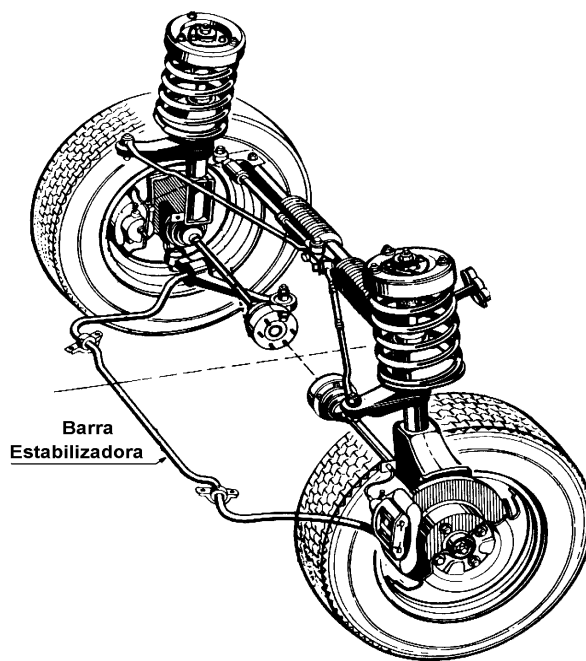


Figura 2.10 - Barra estabilizadora montada sobre uma suspensão dianteira McPherson.

O efeito estabilizante da barra está associado às características de rigidez da peça, definidas através da sua forma, dimensões e materiais empregados. A sua

utilização visando melhorar as características de comportamento provoca alguns efeitos indesejáveis para o conforto, entre eles o aumento da rigidez das suspensões e a vibração da carroceria em função do atrito causado por seus pontos de apoio, inclusive com maior excitação do grupo moto-propulsor. Outro ponto negativo é o aumento da oscilação da carroceria, quando o veículo trafega em linha reta em estradas ou pavimentações irregulares e com buracos. Estas oscilações provocam um deslocamento relativo entre as rodas do lado esquerdo e direito, quando uma é comprimida e outra estendida. Estando estas ligadas entre si através da barra, o habitáculo do veículo que está no conjunto da massa suspensa sofre também estas perturbações.

2.1.6 - Batentes de Fim de Curso

O movimento da suspensão deve ser limitado em seus finais de curso de extensão e compressão, para prevenir o contato metal-metal e evitar valores de aceleração elevados, que podem causar danos estruturais aos componentes e à carroceria. O controle da movimentação das rodas é também necessário para garantir o funcionamento nos ângulos máximos previstos para os braços da direção e articulações das barras estabilizadoras, buchas da suspensão e juntas esféricas dos semi-eixos. Os batentes são empregados para estas finalidades e ainda contribuem para uma passagem gradual da movimentação da suspensão em função das características das molas e amortecedores, para a carga final de fim de curso. Deste modo, atuam como molas complementares e melhoram o comportamento, controlando a velocidade e ângulo total de rolamento da carroceria durante manobras de curvas e desvio de trajetória em médias e altas velocidades, proporcionando ao veículo uma melhor progressividade de resposta.

Com poucas exceções, os batentes de extensão estão instalados internamente nos amortecedores, como no caso da construção McPherson. Os de compressão podem ser vazados e inseridos nas hastes dos amortecedores, no interior das molas e fixados nas longarinas do pavimento, ou ainda posicionados nos eixos.

Os materiais atualmente mais utilizados nos veículos de passeio são a borracha e elastômeros à base de poliuretano. Estes últimos têm tido o seu emprego aumentado em função de suas boas propriedades mecânicas, pouca sensibilidade às variações de temperatura, leveza e capacidade de suportar cargas relativamente elevadas (Reimpell e Stoll, 1996). As características de amortecimento desejadas são alcançadas trabalhando na otimização da forma, densidade e comprimento. Um exemplo de curva particular de carga e deformação de um batente e mola suplementar, e seu desenho esquemático, é apresentado na Fig. 2.11.

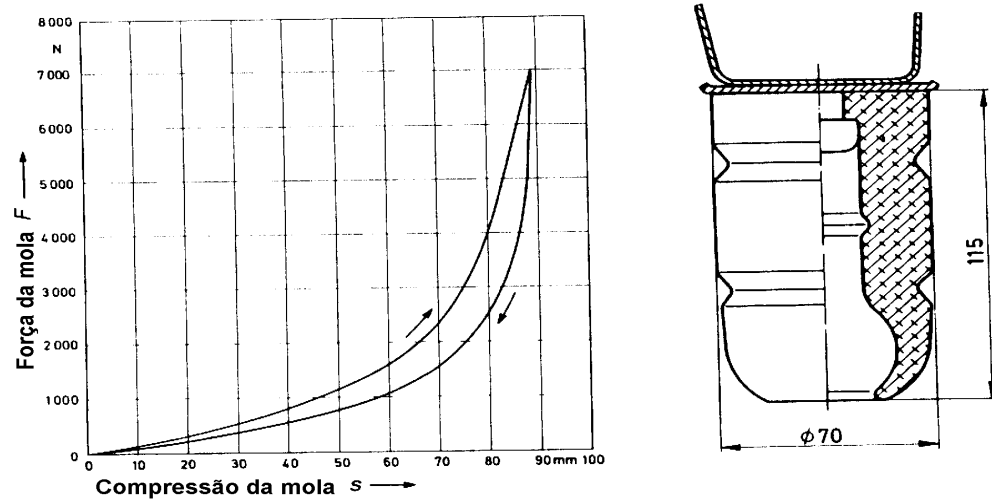


Figura 2.11 - Curva e detalhe construtivo de um batente de elastômero com função de mola suplementar.