

# Acções a considerar no projecto de veículos automóveis. O cálculo estático no dimensionamento da estrutura

JOSÉ A. S. ALMACINHA \*

LÚCIA M. J. S. DINIS \*\*

## RESUMO

*A utilização de análises detalhadas apoiadas em meios computacionais, no projecto de novos veículos automóveis, nomeadamente nas áreas da análise estrutural, dimensionamento de suspensões e estabilidade, teve um grande incremento nos últimos anos. O estudo destes problemas implica uma correcta definição dos vários tipos de acções exteriores actuantes.*

*Neste texto, apresenta-se uma identificação, classificação e quantificação das acções a considerar no projecto de veículos automóveis. Faz-se também uma breve referência à importância do cálculo estático no dimensionamento das estruturas de veículos e à forma como nele são contabilizados os efeitos dinâmicos das diferentes acções.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os conceitos associados ao projecto de veículos automóveis alteraram-se significativamente nos últimos 25 anos. Neste período, a concepção de novos veículos, que até então era baseada fundamentalmente na experiência e em testes pós-fabrico (trial and error method), começou progressivamente a recorrer a métodos de análise numérica, para os quais é por vezes necessário utilizar computadores de grande capacidade de memória.

Um dos factores que a nível mundial mais contribuiu para o aparecimento desta nova atitude da indústria face ao projecto de veículos automóveis, foi a crise do petróleo entretanto ocorrida. As conclusões de estudos tendo em vista a diminuição do consumo de combustível, ao apontarem para a necessidade de redução do peso dos veículos, provocaram um aumento de importância da análise estrutural.

---

\* Engenheiro Mecânico. Assistente do Departamento de Engenharia Mecânica (U. P.)

\*\* Engenheira Civil. Professora Associada do Departamento de Engenharia Mecânica (U. P.)

Presentemente, a enorme evolução dos meios computacionais e dos métodos numéricos postos ao dispor dos projectistas, leva a que nenhum dos grandes fabricantes de veículos do mundo projecte uma nova estrutura, sem determinar a distribuição de tensões e a sua rigidez, efectuando uma análise por elementos finitos, numa das primeiras fases da concepção. O projecto ajudado por computador (CAD) é muito utilizado na concepção de novos veículos, quer como ferramenta de análise estrutural, quer como auxiliar interactivo no desenho.

A análise estrutural, recorrendo a meios informáticos, desenvolveu-se a partir da análise estática de tensões e rigidez da estrutura, passou para a análise dinâmica e está agora a ser aplicada à análise não linear do impacto.

Simultaneamente com a possibilidade de recorrer a métodos de análise estrutural cada vez mais complexos, desenvolveu-se o interesse por análises simples de tensões, em que grandes simplificações do modelo estrutural são possíveis. A secção de estruturas da «School of Automotive Studies», Cranfield (U.K.), defende a possibilidade de obter informação útil a partir de modelos mais pequenos e menos detalhados [1]. Idêntica opinião é partilhada por Pawlowski [2].

Para analisar qualquer estrutura, podem assim ser considerados diferentes modelos matemáticos, com técnicas de solução distintas, conforme a complexidade estrutural e nível de sofisticação requeridos para a análise. A qualidade da análise completa depende da cadeia que vai desde a definição do problema, até à solução do mesmo. O valor dos resultados de qualquer análise estrutural é pois função, das aproximações envolvidas ao estabelecer o modelo matemático para a estrutura, da selecção da técnica de solução e da definição das diferentes acções actuantes.

A normalização respeitante à definição das acções teóricas a que os diferentes veículos automóveis e em particular as estruturas estão sujeitos, não atingiu ainda o desenvolvimento já alcançado pelo mesmo tema em outros meios de transporte. Cada empresa continua a projectar estruturas de veículos, de acordo com as suas normas internas.

A análise das tensões existentes em estruturas de veículos, o dimensionamento de suspensões, o estudo da estabilidade, etc., têm que ter em conta os vários tipos de acções exteriores actuantes.

Neste texto, recorrendo à terminologia do novo Regulamento de Segurança e Acções [3], apresenta-se uma identificação, classificação e quantificação sempre que possível, das acções tidas por alguns investigadores como necessárias para o projecto, bem como as suas possíveis combinações, [2, 4, 5]. No entanto, não existe a preocupação de enumerar exhaustivamente todos os aspectos respeitantes a este tema.

Faz-se também uma breve referência à importância do cálculo estático no dimensionamento das estruturas e à forma como nele são contabilizados os efeitos dinâmicos de algumas acções variáveis.

## 2. CLASSIFICAÇÃO DAS ACCÇÕES

As acções podem ser classificadas em permanentes, variáveis e de acidente [3].

### i) Acções permanentes

São aquelas que assumem valores constantes, ou com pequena variação em torno do seu valor médio, durante toda ou praticamente toda a vida da estrutura.

No caso de estruturas de veículos, consideram-se incluídas neste tipo de acções, os pesos próprios dos elementos estruturais e não estruturais do veículo (peso dos equipamentos fixos — ex: motor, depósito de combustível, etc.).

### ii) Acções variáveis

São aquelas que assumem valores com variação significativa em torno do seu valor médio durante a vida da estrutura.

Neste tipo de estruturas, além da sobrecarga respeitante aos diversos tipos de veículos (passageiros, carga geral, etc.), considera-se também um conjunto de acções resultantes das condições de circulação, sugerido por vários autores, de que são exemplo as ref. [2, 4 e 6] e que será referido no ponto 3.

### iii) Acções de acidente

São aquelas que só com muita fraca probabilidade assumem valores significativos durante a vida da estrutura.

São exemplos deste tipo de acções, as que resultam do capotamento e do choque de veículos. Estas acções não serão objecto de estudo neste trabalho.

Os esforços actuantes na estrutura, resultantes das diferentes acções, estão representados com generalidade na fig. 9. Os valores do Momento  $M_z$  (flexão no plano horizontal), são desprezáveis na maioria dos veículos quando comparados com a respectiva rigidez nesse plano.

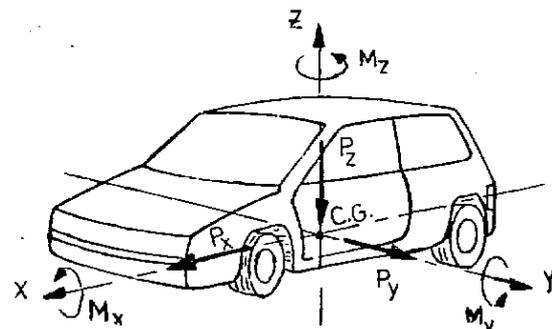


Fig. 9 — Esforços actuantes na estrutura dum veículo

### 3. IDENTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES VARIÁVEIS

Garrett [4] e Pawlowski [2] identificaram as seguintes acções variáveis necessárias para o cálculo dos diversos esforços resultantes:

#### i) Sobrecargas

##### — Automóveis

Passageiros — carga concentrada de 0.89 KN (91 Kg) por pessoa.

Bagagem — carga concentrada, a considerar apenas quando actua desfavoravelmente na parte da estrutura a analisar.

##### — Autocarros

Passageiros — carga concentrada de 0.69 KN (70 Kg) por pessoa.

O número total de passageiros varia com o tamanho do veículo; desde 8 a 15 para mini-autocarros, até um número superior a 80 em grandes autocarros de transportes urbanos (Pawlowski, apresenta um exemplo de cálculo para um veículo deste último tipo com 100 passageiros).

Bagagem — a considerar em autocarros de médio e longo curso.

##### — Furgões e Camiões

Carga transportável — o código da estrada nos artigos 18.º e 19.º define, em função do número de eixos do veículo, o peso bruto do conjunto (veículo+carga), as cargas máximas transmitidas por eixo ao pavimento e as dimensões máximas do veículo. A determinação da carga transportável, faz-se por subtracção ao peso bruto do conjunto, do peso próprio do veículo (TARA).

Pawlowski fornece os seguintes valores de carga por unidade de superfície, em função da capacidade de carga do veículo, tendo em vista a determinação da área de transporte de carga:

Capacidade de carga 3 (x10 Kg)	Carregamento superficial -2 (Kg.m <sup>2</sup> )
0.8 a 2.0	190 - 330
2.0 a 4.0	300 - 450
4.0 a 7.0	450 - 650
7.0 a 12.0	450 - 650
> 12.0	600 - 1000

Os valores mais baixos são usados para camiões que transportem cargas de grande peso específico e para furgões, enquanto que os valores mais elevados são empregues em camiões para transporte de cargas normais. A forma como a carga transportável é distribuída pelo veículo tem influência no tipo de acções a considerar na estrutura [6].

#### ii) Acções resultantes das condições de circulação

As estruturas de veículos em movimento estão sujeitas a um conjunto de forças de inércia que são função da massa do veículo, da carga transportável e da aceleração.

As principais acções responsáveis por estas forças são as seguintes:

##### a) Acções verticais simétricas

Acelerações verticais simétricas relativamente ao eixo dos xx do veículo aparecem quando ambas as rodas da frente encontram um obstáculo simultaneamente, fig. 10. As forças verticais provocadas por estas acelerações originam um momento flector  $M_y$  na estrutura do veículo.

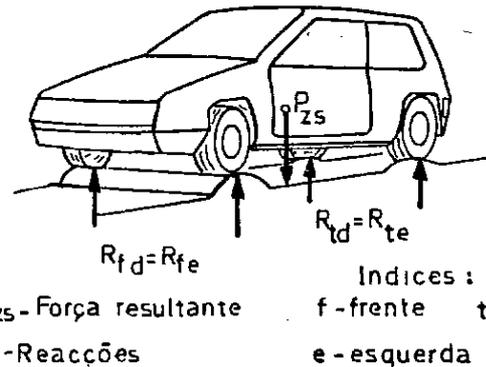


Fig. 10 — Acções verticais simétricas

Estas acções resultam da existência de obstáculos, tais como:

- ondulação do pavimento
- buracos
- lancil do passeio (altura normal  $h = 0.152m$ )

##### b) Acções verticais assimétricas

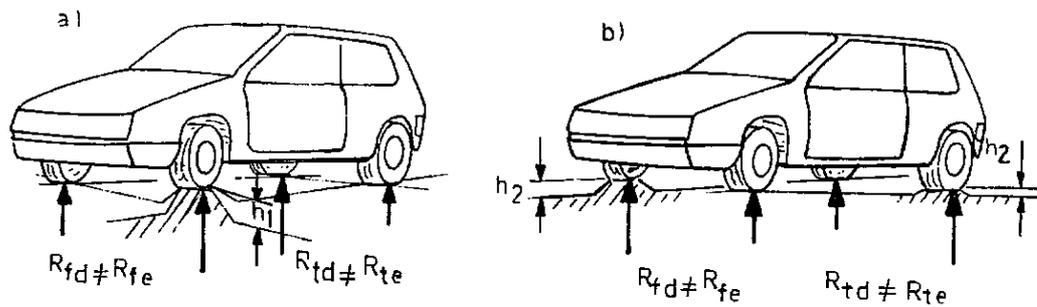
Forças verticais assimétricas relativamente ao eixo do xx do veículo aparecem quando este circula sobre uma superfície desigual; cada roda encontra obstáculos em tempos diferentes fig. 11.

Rodas do mesmo eixo experimentam diferentes acções provocadas pelo pavimento, originando um momento torsor  $M_x$  e um momento flector  $M_y$  na estrutura.

A partir de várias investigações, Pawlowski indica os seguintes valores máximos admissíveis para as dimensões dos possíveis obstáculos a encontrar no pavimento, pelos diferentes tipos de veículos:

	Dimensão do obstáculo — H
automóveis	±0.20m
autocarros	±0.25m
camiões	±0.30m
veículo todo-o-terreno	±0.40 a 50m

Sharman [6] apresenta também casos de acções que provocam torção na estrutura de camiões, devido à disposição assimétrica da carga.



$h_1, h_2$  - dimensões dos obstáculos

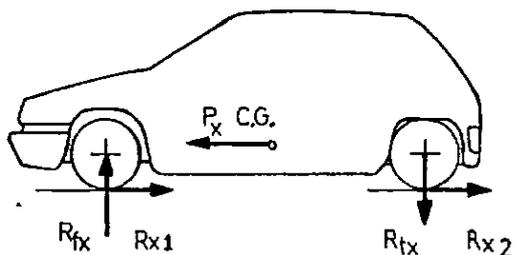
Fig. 11 — Acções verticais assimétricas

- a) Conduzindo uma roda sobre um obstáculo
- b) Conduzindo sobre dois obstáculos dispostos diagonalmente

c) Acções longitudinais

Acções longitudinais são devidas à travagem ou aceleração do veículo, fig. 12, ou ainda resultantes da condução sobre um obstáculo, fig. 13.

A possibilidade de colisão não é considerada neste tipo de acções, por ter características acidentais.



Px - Força resultante

Fig. 12 — Acções longitudinais — mudança de velocidade do veículo

d) Acções laterais

Acções laterais surgem quando o veículo circula numa curva ou colide lateralmente com um obstáculo; por exemplo o lancil dum passeio.

As forças laterais resultantes da movimentação do veículo numa via em curva estão limitadas pela máxima força de atrito lateral que pode ser gerada na superfície de contacto dos pneus exteriores ao movimento, fig. 14.

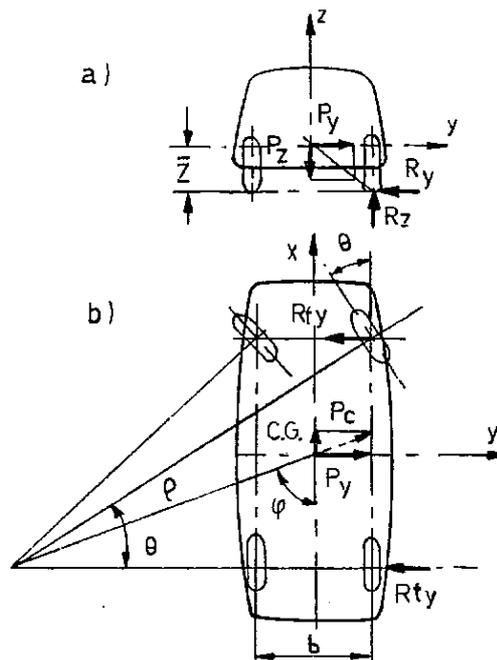


Fig. 14 — Acções laterais — curvar

- a) O valor da componente lateral P da força centrífuga  $P_c$  é limitada pela aderência do veículo ao solo
- b) Distribuição da força centrífuga

4. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES

Em geral, a estrutura dum veículo está sujeita, para além do peso próprio e da sobrecarga, a forças de inércia originadas pelas diferentes acções variáveis resultantes das condições de circulação, referidas em 3.11 (a, d).

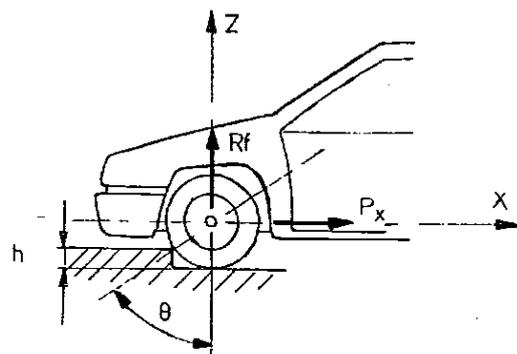


Fig. 13 — Acções longitudinais — condução sobre um obstáculo

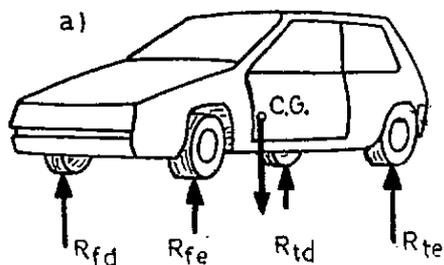
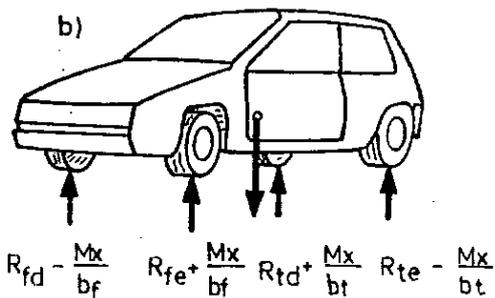
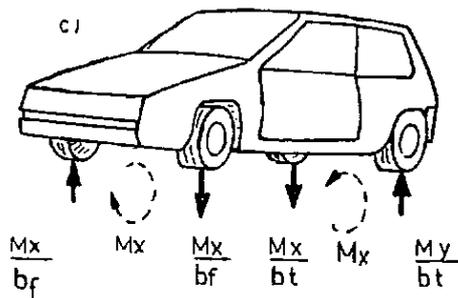


Fig. 15 — Caso geral de combinação de acções verticais  
a) Condições gerais que incluem esforços simétricos e assimétricos



$$a = b + c$$

b) Esforços simétricos (flexão)



b - largura da via

c) Esforços assimétricos (torção)

Pawlowski [2] tendo em conta que as condições normais de uso dum veículo produzem forças assimétricas, fig. 15a) propõe que por conveniência de cálculo, estas sejam representadas pelo princípio de sobreposição de acções como dois casos básicos:

- Acções Verticais Simétricas — produzem forças de inércia verticais fig. 15b) (cargas de flexão).
- Acções de Torção — produzidas por um binário aplicado no eixo dianteiro (cargas de torção), fig. 15c).

Estes dois casos representam os esforços devidos a acções verticais e são considerados fundamentais no dimensionamento da estrutura do veículo.

As acções longitudinais e laterais são tidas em conta em combinações mais complexas. Estas combinações são particularmente importantes nas áreas da estrutura onde actuam directamente os esforços transmitidos pela suspensão. Assim, os pontos de ligação desta, à estrutura, devem ser calculados atendendo, pelo menos, às combinações de acções resultantes dos seguintes casos adicionais:

- Condução contra um passeio com travagem simultânea.
- Uma das rodas atinge um obstáculo quando o veículo vai a curvar.

Por sua vez Garrett [4], para analisar as zonas de ligação da suspensão à estrutura, considera as combinações de acções, resultantes das seguintes condições de circulação:

- Atingir um obstáculo com travagem simultânea.
- Curvar.
- Atingir um obstáculo com aceleração simultânea.
- Atingir um obstáculo quando o veículo vai a curvar.

Constata-se que, as combinações de acções propostas por estes dois autores são equivalentes.

## 5. O CÁLCULO ESTATICO NO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA. CONSIDERAÇÃO DE EFEITOS DINAMICOS

### 5.1. Considerações gerais

Os esforços actuantes na estrutura de um veículo em movimento são geralmente combinações de forças dinâmicas, de amplitude inferior ao seu valor médio, que podem causar o colapso da estrutura por fadiga nas zonas onde actuam. Por outro lado, os valores máximos das forças dinâmicas, causadas, por exemplo, por uma irregularidade da superfície do pavimento, surgem com uma frequência relativamente baixa. Refira-se no entanto que em Portugal, a ocorrência de irregularidades deste tipo é muito superior à dos países do Norte da Europa.

A experiência sugere que uma estrutura projectada para ser resistente aos esforços máximos — que ocorrem esporadicamente — terá também resistência à fadiga [2, 7].

Assim, um cálculo estático, que procure contabilizar os efeitos máximos das diversas acções dinâmicas, é uma importante técnica usada na concepção de veículos, quer na fase de anteprojecto, através de modelos simplificados, quer numa fase mais avançada, recorrendo a programas de elementos finitos para analisar modelos muito complexos, envolvendo por vezes milhares de elementos [1].

Genericamente, as forças a considerar no cálculo estático, apresentadas na fig.9, são expressas da seguinte forma:

$$P_i = m_i \cdot P_{st} \quad (1)$$

em que

$$m_i = a_i / g \quad (2)$$

e

- $i$  — é a direcção de actuação das forças;
- $m_i$  — é o coeficiente dinâmico adimensional;
- $P_{st}$  — são as cargas estáticas (peso próprio + carga)
- $a_i$  — é a aceleração produzida na direcção  $i$ ;
- $g$  — é a aceleração da gravidade.

Destas expressões, conclui-se que a contabilização das forças de inércia, desenvolvidas pelas diversas acções variáveis dinâmicas, é feita, considerando aquelas, proporcionais ao peso próprio do veículo, à carga transportável e à aceleração.

## 5.2. Esforços a considerar no cálculo estático. Coeficientes dinâmicos

A quantificação das acções variáveis resultantes das condições de circulação, no cálculo estático, resume-se pois à multiplicação das cargas estáticas pelos respectivos coeficientes dinâmicos.

A determinação destes coeficientes resulta do registo das acelerações máximas experimentadas pelos diferentes veículos, o que não é fácil e nem sempre conclusivo.

Medições efectuadas em Cranfield [8], com um automóvel ligeiro, indicaram para os coeficientes  $m_i$ , valores de 1.55 na direcção vertical e 1.84 na direcção longitudinal. Erz [9], por outro lado, afirma que as cargas estáticas no máximo duplicam, mas em testes efectuados em empedrado já se registaram valores iguais a 5 na parte traseira de autocarros [7].

No entanto, medições de esforços actuantes nas suspensões e de tensões em estruturas de veículos levadas a cabo pelo M.I.R.A. — Motor Industry Research Association (U.K.), durante vários anos e em diversas condições de estrada, dão credibilidade à utilização de valores de coeficientes dinâmicos  $m_i$ , apontados por vários autores [2, 4], para os diversos tipos de acções a ter em conta neste cálculo e que seguidamente se indicam:

### a) Acções Verticais Simétricas

Os esforços verticais produzidos por este tipo de acções são contabilizados multiplicando os pesos da parte sus-

penha do veículo e da carga pelos seguintes coeficientes dinâmicos  $m_{zs}$ :

	$m_{zs}$
automóveis	2.5
autocarros	2.5
camiões	3.0
veículos todo-o-terreno	3.5 a 4.0

### b) Acções Verticais Assimétricas

Em 3.ii.b), constatou-se que deste tipo de acções resultam forças verticais, responsáveis por torção e flexão na estrutura.

Na torção, Erz [9] sugere que seja usado como solicitação estática, o momento gerado quando uma roda do eixo menos carregado se encontra sobre um obstáculo dum dado tamanho, enquanto as outras rodas permanecem no solo, fig. 16. Valores máximos admissíveis para a dimensão  $h_1$  do obstáculo, em função do tipo de veículo, foram propostos por Pawłowski e estão transcritos em 3.ii.b). Outro caso que pode ser considerado é o apresentado na fig. 17.

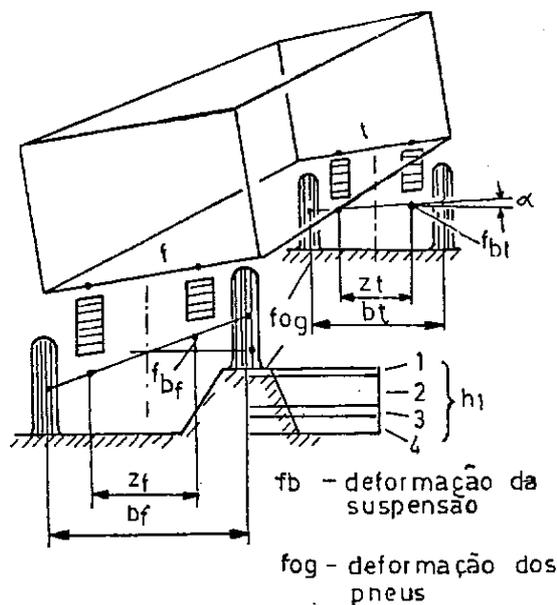


Fig. 16 — Acção assimétrica resultante de uma roda se encontrar sobre um obstáculo de dimensão  $h_1$

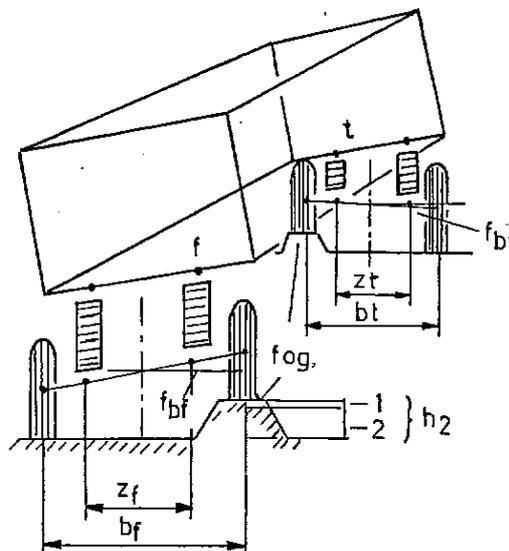


Fig. 17 — Acção assimétrica — veículo sobre dois obstáculos de dimensão  $h_2$  dispostos diagonalmente

A determinação do momento  $M_x$ , representado na fig. 18, resultante da situação descrita por Erz, pode ser determinado a partir das seguintes expressões, [5, 71]:

$$M_x = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \cdot \frac{h}{b} \quad (3)$$

ou

$$M_x = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{K_1 \cdot K_2 + K_1 \cdot K_3 + K_2 \cdot K_3} \cdot \frac{h}{b} \quad (4)$$

em que  $K_1$  e  $K_2$  são respectivamente a rigidez de torção da suspensão dianteira e traseira,  $K_3$  é a rigidez de torção da estrutura,  $h$  é a dimensão do obstáculo e  $b$  é a via. A primeira das expressões usa-se quando o valor da rigidez da estrutura pode ser considerado infinito, comparativamente ao valor de idênticas características da suspensão. A expressão [4] utiliza-se quando a rigidez de torção da estrutura é baixa na zona entre apoios.

O momento  $M_x$  máximo obtém-se quando uma das rodas deixa de contactar com o solo, e tem o seguinte valor:

$$M_x = 1/2 \cdot R_f \cdot b \quad (5)$$

em que  $R_f$  é a carga no eixo menos carregado.

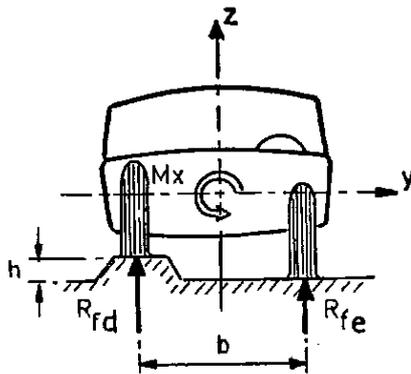


Fig. 18 — Momento torsor provocado por um obstáculo.

Atendendo às expressões anteriores, constata-se que para cada veículo, conhecidas as suas características de rigidez, é possível determinar a dimensão do obstáculo, a partir da qual uma das rodas do eixo deixa de contactar com o pavimento. Na referência [2], são feitas considerações semelhantes às atrás expostas, para os casos ilustrados nas figuras 16 e 17.

Pawlowski sugere que o binário de forças  $M_x$  e as cargas que representam o peso bruto suspenso, sejam majoradas pelos seguintes coeficientes  $m_{zns}$ :

	$m_{zns}$
automóveis	1.3
autocarros	1.3
camiões	1.5
veículos todo-o-terreno	1.8

A utilização destes coeficientes leva a um sobredimensionamento da estrutura, mas deve ser empregue sempre que o veículo for utilizado em más condições de estrada durante grande parte da sua vida.

### c) Acções Longitudinais

As forças de inércia longitudinais resultantes da mudança de velocidade do veículo são consideradas majorando o peso bruto suspenso pelos seguintes coeficientes  $m_x$ :

	$m_x$
automóveis	1.0
autocarros	0.7 a 1.0
camiões	0.7 a 1.0

Por outro lado, a condução do veículo sobre um obstáculo, fig. 5, dá também origem a forças longitudinais, expressas por:

$$P_x = m_z \cdot R_f \cdot \tan \phi \quad (6)$$

em que,  $m_z$  é o coeficiente dinâmico que contabiliza as forças verticais e  $R_f$  é a carga estática no eixo dianteiro ou apenas numa das rodas, conforme se trate de uma acção vertical simétrica ou assimétrica.

### d) Acções Laterais

As forças laterais resultantes dum impacto lateral contra um obstáculo são consideradas majorando o peso bruto do conjunto pelo coeficiente  $m_y$ :

	$m_y$
todos os tipos de veículos	0.7 a 1.0

Relativamente à movimentação do veículo numa via em curva fig. 14, a componente lateral máxima admissível para a força centrífuga, que não origina o capotamento do veículo, está limitada pela geometria deste, através da expressão:

$$P_y = m_{zs} \cdot P_z \cdot b/2\bar{z} \quad (7)$$

em que  $P_z$  é o peso bruto do conjunto e  $\bar{z}$  é a distância do centro de gravidade ao solo.

Por outro lado, como foi anteriormente afirmado, esta força está limitada pelo valor da máxima força de atrito lateral gerada na superfície de contacto das rodas exteriores ao movimento, ou seja:

$$P_y \leq \mu \cdot m_{zs} \cdot P_z \quad (8)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de atrito.

Pawlowski para evitar que a estrutura sofra uma deformação permanente, se os esforços actuantes atingirem os valores máximos, propõe um coeficiente de segurança  $n = 1.4$  a  $1.6$  na maior parte da estrutura e um valor de  $n = 1.5$  a  $2.0$  em zonas de concentração de tensões. Para o mesmo efeito, Garrett propõe um único valor de  $n = 1.5$ .

O critério segurança apresentado por Pawlowski é mais conservativo e por isso é o que melhor se deve adaptar à realidade da rede viária nacional.

As referências [2, 4, 5] apresentam mais detalhadamente expressões para o cálculo dos esforços atrás citados e de outros com eles relacionados.

As combinações de acções a considerar são as referidas no ponto 4.

## 6. REFERÊNCIAS

1. G. H. TIDBURY  
Vehicle Structural Analysis: a Survey  
Int. J. of Vehicle Design, Vol. 1, n.º 2, pp. 165-172, U. K., 1980
2. J. PAWLOWSKI  
Vehicle Body Engineering.  
Business Books Ltd., London, 1969
3. Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. — D.L. 235/83  
I.N.C.M., Lisboa, 1984
4. K. GARRETT  
Automobile Dynamic Loads.  
Automobile Engineer, Fev. 1953
5. J. FENTON  
Vehicle Body Layout and Analysis.  
Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1980
6. P. W. SHARMAN  
Torsion of Chassis Frames.  
Automotive Engineer, 7, Vol. 1, 58-62 Out/Nov.  
Mechanical Engineering Publication Ltd., London, 1976
7. G. H. TIDBURY  
Basic Vehicle Structural Analysis. — textos  
Curso sobre a Concepção de Estruturas de Veículos, 16 a 20 Fev., DEMec — FEUP, Porto, 1981
8. G. H. TIDBURY  
Measurement of Loads Between the Suspension and the Body Structure of a Small Car.  
Conference on Stresses in Service  
Institution of Civil Engineers, March 1966
9. K. ERZ  
Torsion in Road Vehicles Caused by Road Surface Irregularities  
A.T.Z., n.º 4, 6, 11, 12, 1957 (em Alemão)