

3

Modelos computacionais para o tratamento de colisões veiculares planas

Os tratamentos dados por alguns programas comerciais no estudo do problema de colisões veiculares são apresentados a seguir. Estes modelos têm como princípio a análise do comportamento dinâmico de elementos estruturais discretizados, como nos programas de simulação veicular SMAC (Day – 1999), ou a conservação de quantidade de movimento, como o aquele usado nos programas CRASH (Day – 1987).

3.1.

Determinação dos parâmetros de rigidez de veículos

Um veículo envolvido em uma colisão pode sofrer deformações plásticas e elásticas conjugadas ou somente deformações elásticas, conforme mostrado na Figura 13, de acordo com a velocidade de impacto, a qual age como um fator limitante para que o veículo sofra deformações permanentes decorrentes da colisão.

No estudo das colisões veiculares, diversos parâmetros são extraídos dos ensaios em laboratório com o objetivo de modelar o comportamento do veículo quando submetido aos diversos esforços. Um dos dados mais expressivos é o gráfico de esforço pela deformação sofrida (Figura 14), no qual pode-se distinguir a existência de uma fase inicial de compressão, onde a deformação é crescente com o esforço e onde ocorrem grandes oscilações até determinado instante (ponto B), quando inicia-se uma queda destes dois parâmetros até a anulação do esforço devido à perda de contato (ponto C). O valor da deformação entre os pontos A e B da Figura 14 representa a deformação dinâmica sofrida pelo veículo durante o impacto, enquanto o decréscimo da deformação entre os pontos B e C é a recuperação da parte elástica desta deformação e o valor da deformação no ponto C representa a deformação plástica sofrida pelo veículo. As grandes oscilações presentes durante a compressão do veículo são decorrentes dos vários elementos estruturais dispostos não uniformemente em

sua estrutura, como motor, radiador e outros. Nota-se ainda que a força máxima não ocorre na condição de deformação máxima e, além disso, para cada velocidade de impacto existe um gráfico com forma semelhante ao da Figura 14.

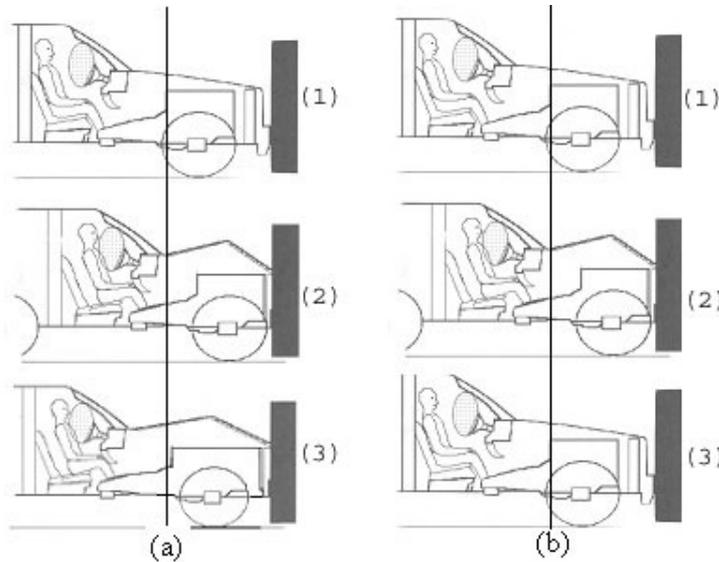


Figura 13: Deformação de um veículo durante um choque frontal (a) - com deformações elástica e plástica conjugadas e (b) - com deformação puramente elástica, nos instantes (1) imediatamente anterior ao choque (sem deformação), (2) velocidade nula (deformação máxima) e (3) Fim do choque (deformação residual).

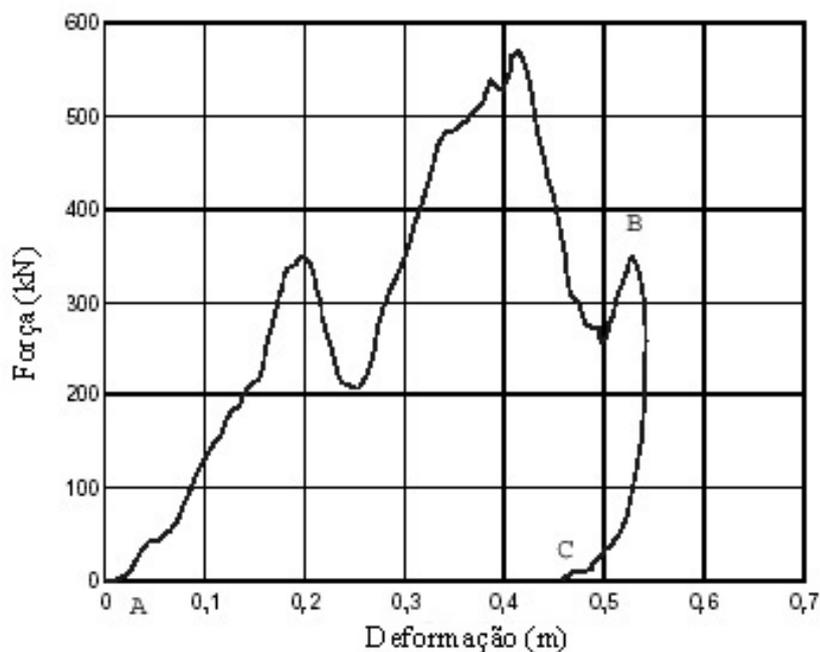


Figura 14: Gráfico Força x Deformação típico, traçado a partir de um teste de impacto frontal contra uma barreira rígida.

Para a abordagem numérica do comportamento de um veículo durante uma colisão se fazem necessárias diversas simplificações dos dados empíricos. Uma das aproximações mais comuns é a linearização do carregamento sofrido pela estrutura em relação à deformação.

Ao se fazer uma análise da deformação em duas dimensões, delimita-se primeiramente uma região de interesse na geometria do veículo (frontal, dianteira ou lateral), tornando-se possível, então, a aproximação da curva de esforço por unidade de largura da região envolvida pela deformação total através de uma reta com coeficiente angular k_f (N/m/m), o coeficiente de rigidez por unidade de largura para a área atingida do veículo, conforme exposto na Figura 15a. Se, ao invés da deformação total, for utilizada no eixo das abscissas a deformação residual, ou seja, a deformação plástica (Figura 15b), o gráfico de deformação é transladado para a esquerda, fazendo com que a reta corte o eixo das ordenadas no ponto f_0 (N/m). A região à esquerda de f_0 , com deformação residual negativa, representa então a parcela elástica, recuperável, da deformação e a região à direita de f_0 representa a parte plástica. O parâmetro f_0 corresponde a força limite na qual não ocorrem deformações plásticas. Nos ensaios de colisão é possível obter os valores destes coeficientes para regiões determinadas envolvidas no choque (lateral, frontal ou traseira), representando-os por unidade de largura da área envolvida.

Assim, tem-se:

$$f = f_0 + k_f \delta_p \quad (23)$$

definindo a relação força x deformação linearizada que ocorre em um veículo durante uma colisão.

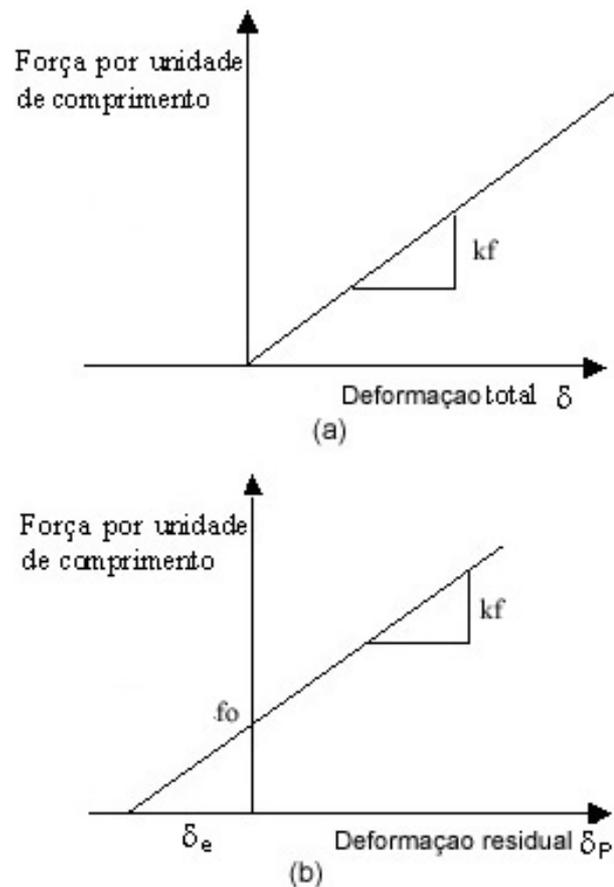


Figura 15: a) Linearização da força em função da deformação total (δ); b) Linearização da força em função da deformação residual (δ_p), onde a parte negativa do eixo das abscissas representa a deformação elástica (δ_e). (Söderberg & Tidborg – 1999)

Apesar desta aproximação ser comumente utilizada, segundo Söderberg & Tidborg – 1999, a obtenção direta dos valores f_0 e k_f a partir do gráfico Força x Deformação advindo de um teste de impacto resulta em prováveis erros, já que os pontos desta curva fogem bastante a uma reta, conforme pôde ser observado no gráfico empírico da Figura 14. Assim, emprega-se um caminho alternativo para a determinação desses coeficientes. Esta linearização é na verdade baseada na dependência, verificada em ensaios, entre a velocidade imediatamente antes do impacto e a deformação residual no choque contra uma barreira rígida, conforme mostrado na Figura 18b e expressa por

$$v_i = v_0 + k_v \delta_p \quad (24)$$

onde v_i é a velocidade inicial de impacto, v_0 é a velocidade máxima na qual não há deformações residuais, k_v é um coeficiente que representa a relação entre a velocidade de impacto e a deformação residual e δ_p é a deformação residual.

Como v_i é a velocidade inicial de impacto, não é possível traçar diretamente um gráfico de velocidade inicial x deformação a partir de um único ensaio, sendo necessária a execução de diversos ensaios com diferentes velocidades. Um gráfico da energia dissipada pela deformação, porém, pode ser confeccionado (Figura 16b), através do cálculo da área do gráfico de esforço (Figura 14) e, então, a partir deste, retira-se os valores para o gráfico de velocidade inicial x deformação (Figura 16b), através da expressão da energia cinética $v_i = \sqrt{2E/m}$, obtendo-se v_0 , e k_v .

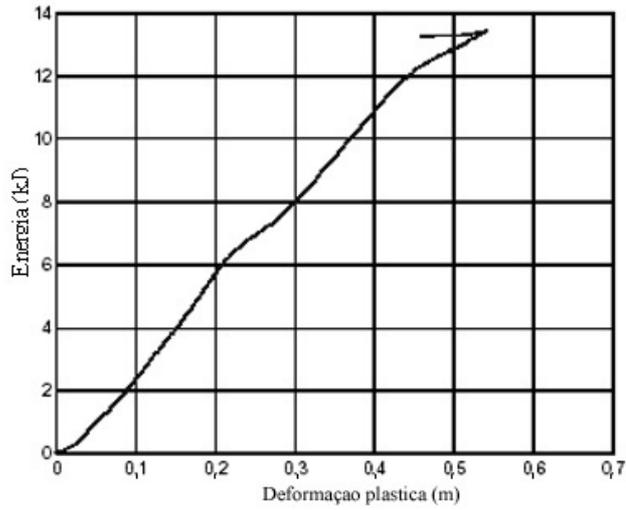
A energia absorvida no impacto é determinada pela integral da força ao longo do perfil deformado, tem-se então:

$$E = \iint f d\delta_p dw + E_e \quad (25)$$

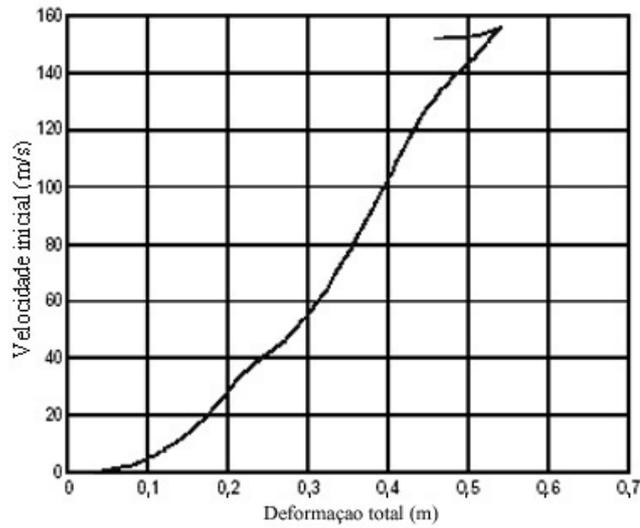
onde f é a força por unidade de comprimento da área atingida (F/w), w a largura do perfil deformado e δ_p a deformação plástica, conforme mostrado na Figura 17. Logo, como a energia antes do choque é transformada em energia de deformação:

$$\begin{aligned} E &= \frac{mv_i^2}{2} = \iint (f_0 + k_f \delta_p) d\delta_p dw + E_e \\ E &= \frac{m(v_0 + k_v \delta_p)^2}{2} = f_0 \delta_p w + \frac{k_f \delta_p^2 w}{2} + E_e \\ \therefore f_0 &= \frac{mv_0 k_v}{w} \quad k_f = \frac{mk_v^2}{w} \quad E_e = \frac{mv_0^2}{2} \end{aligned} \quad (26)$$

Nota-se que a constante de integração E_e , apesar de não ser utilizada nos cálculos, possui significado físico, pois representa a energia de deformação elástica restituída. Logo, para a obtenção dos parâmetros de rigidez f_0 e k_f se faz necessário o conhecimento das constantes v_0 , k_v , m e w .



(a)



(b)

Figura 16: (a) Gráfico de velocidade inicial de impacto x deformação, obtido da integração da curva força x deformação; (b) Gráfico de energia dissipada x deformação, obtido aplicando-se a expressão $v_i = \sqrt{2E/m}$ no gráfico anterior.

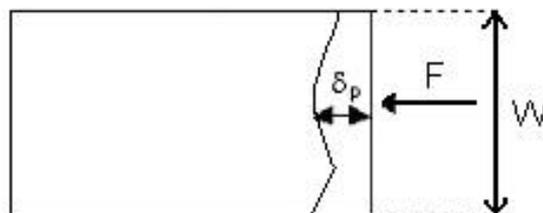


Figura 17: Variáveis associadas à área de choque.

Um problema que aparece neste procedimento é que a deformação considerada é total, enquanto que aquela normalmente obtida de medidas e de maior interesse é a deformação residual, assim, se faz necessário um deslocamento para a esquerda no gráfico, obtendo-se um novo gráfico de velocidade inicial x deformação residual, útil, por exemplo, para uma estimativa da velocidade anterior ao impacto por uma medida da deformação plástica. Este deslocamento é calculado pela diferença entre uma deformação plástica medida em teste com determinada velocidade inicial e a respectiva deformação total obtida pela curva integrada. A Figura 18 mostra as curvas de velocidade inicial x deformação plástica e deformação total, integradas da curva de esforço e linearizadas.

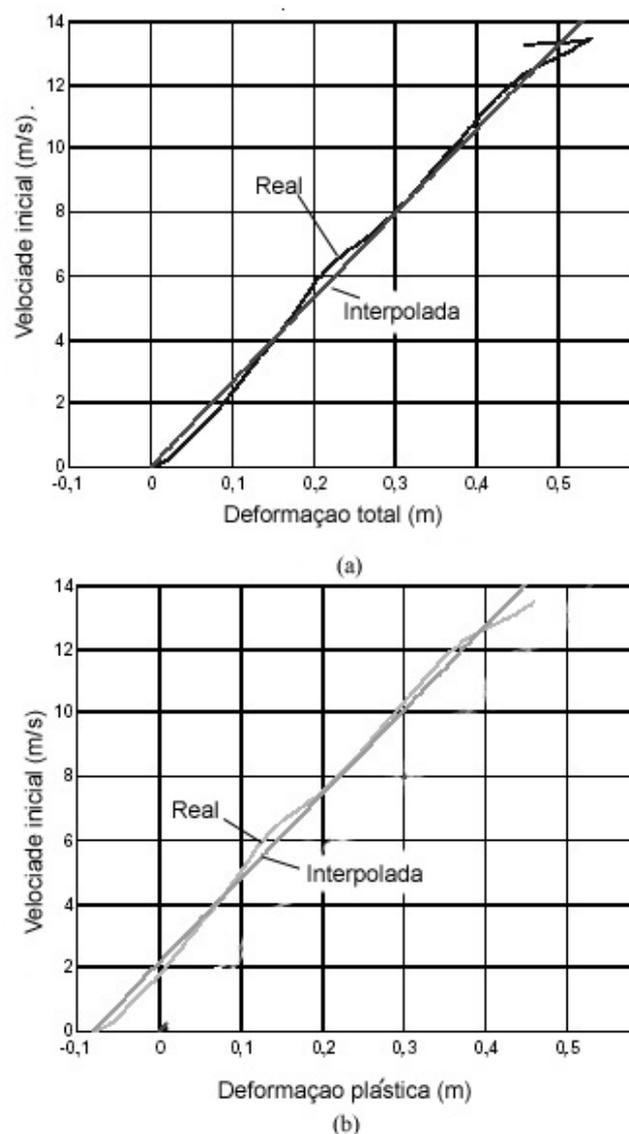


Figura 18: Gráficos de (a) velocidade inicial x deformação total e (b) velocidade inicial x deformação plástica.

Determinados os valores das constantes f_0 e k_f , torna-se possível traçar a curva de força por unidade de largura durante a deformação pela relação:

$$f = f_0 + k_f \delta_p \quad (27)$$

onde δ_p é a deformação residual.

Então, para o veículo exemplificado no gráfico da Figura 18, pode-se obter os seguintes valores: $v_0 = 2,2\text{m/s}$ e $k_v = 26,7\text{s}^{-1}$. Logo, da Equação 26, para um veículo de massa $m=1500\text{kg}$ e largura $w=1,7\text{m}$, tem-se: $f_0 = 51,2\text{kN/m}$ e $k_f = 621,8\text{kN/m}^2$.

3.1.1.

Generalização dos parâmetros de rigidez

Segundo Siddall & Day, 1996, devido à dificuldade e ao custo na obtenção prática de parâmetros individuais e à enorme variedade de modelos existentes, a modelagem numérica geralmente emprega dados generalizados por classes veiculares.

Essa divisão dos veículos existentes em classes, de acordo com parâmetros pré-definidos, como distância entre eixos e tipo de veículo, é exemplificada na Tabela 1.

Classe	Distância entre eixos (m)	f_0 (kN/m)	k_f (kN/m ²)
1	2,05 – 2,4	31,6	497,4
2	2,4 – 2,58	32,3	451,0
3	2,58 – 2,8	36,2	482,7
4	2,8 – 2,98	37,7	460,1
5	>2,98	50,6	782,6

Tabela 3: Divisão dos veículos em classes. (Siddall & Day - 1996)

Depois de divididos os veículos analisados em classes, identificam-se os parâmetros desejados, como os coeficientes f_0 e k_f , que, aferidos em ensaios, compõem uma média para cada classe de veículo.

3.2.

Modelos empregados em programas comerciais

Diversos modelos são propostos pela literatura para a simulação de choques envolvendo veículos, variando desde complexas representações através técnicas de elementos finitos até modelos simplificados baseados em conservação da quantidade de movimento.

A modelagem detalhada da estrutura de um veículo através de elementos finitos, apesar da elevada representatividade, requer recursos computacionais consideráveis e possui aplicação bastante restrita a um respectivo veículo, uma grande desvantagem frente à diversidade de marcas e tipos existentes no mercado. Por estes motivos, modelos mais simples, como os baseados em massas discretizadas e parâmetros concentrados e em conservação da quantidade de movimento são mais comuns.

Apresenta-se a seguir os modelos empregados em quatro programas comerciais de relativo destaque no mercado: SMAC (Day – 1999), M-SMAC (Mc Henry & Mc Henry –1997), CRASH (Mc Henry – 2001) e SINRAT (Lozano et al. – 1998).

3.2.1.

Modelo deformável com uso de vetores radiais (programa SMAC)

O primeiro modelo a ser estudado é o utilizado no programa SMAC (Simulation Model of Automobile Collisions), desenvolvido em 1970 e que após diversas atualizações, se dividiu em versões de diferentes empresas, como EDSMAC (Day – 1999) e MSMAC (Mc Henry & Mc Henry –1997). O modelo analisa os impactos de uma forma dinâmica (análise dos esforços a cada incremento temporal), fazendo uso de um algoritmo complexo para a determinação das deformações envolvidas, podendo trabalhar em conjunto com um simulador de dinâmica veicular utilizado em grande escala, como o HVE (Day –1999), e fazendo uso direto dos parâmetros de rigidez previamente comentados.

Entre as diversas rotinas utilizadas na versão EDSMAC 4 e descritas por Day-1999, destaca-se aquela para o cálculo das interações existentes nos choques. Conhecendo-se a geometria dos veículos envolvidos e as condições

imediatamente anteriores ao choque, as seguintes operações são realizadas a cada incremento de tempo:

1 - Um sistema local de coordenadas é estabelecido, localizado no centro de massa de um dos veículos, identificado pelo índice i e com posição atualizada a cada incremento de tempo;

2 - A partir da origem deste sistema local de coordenadas, traçam-se duas retas até os limites do outro veículo envolvido no choque, identificado pelo índice j , de forma a definir os ângulos φ_i e φ_f que delimitam a “área de ataque”, passível de ser afetada pelo choque;

3 - Novamente a partir da origem O_i , são traçados vetores, denominados de ρ_i , de forma a dividir o ângulo gerado em intervalos iguais, se estendendo até os limites do veículo, representando os possíveis pontos de contato (Figura 19);

4 - Verifica-se, então, se ocorre interação, analisando se cada extremidade de vetor ρ_i criado está ou não dentro dos limites do outro veículo;

5 - Uma vez verificada a interação em determinado ρ_i , é traçado, partindo do centro de massa do outro veículo até este ponto um vetor ρ_j . A distância do limite original do veículo à nova posição determina os deslocamentos dn_i e dn_j sofridos pelas extremidades dos vetores ρ_i e ρ_j ;

6 - Estes valores são utilizados para o cálculo da força em cada ponto de interação segundo a equação:

$$f_n = f_{0,n} \xi_n + k_{f,n} \delta_n \quad (28)$$

onde F_n é a força em cada $\rho_{i,n}$, e ξ é um fator entre a deformação sofrida e o limite para a ocorrência de deformações permanentes, quando ainda na zona elástica, conforme mostra a Figura 20. Quando $\xi=1$ indicará o término da zona puramente elástica. Como a deformação puramente elástica é considerada pequena, faz-se δ igual à deformação total e $\xi=1$ reduzindo-se o modelo a forma linear vista anteriormente com dois parâmetros de rigidez obtidos de testes de impacto, f_0 e k_f ;

Com os dados de cada veículo, calcula-se a força exercida pelo veículo base ($F_{i,n}$) e a força exercida pelo outro veículo ($F_{j,n}$). O equilíbrio de forças deve ser estabelecido em cada ponto ρ_n , em cada instante, dentro de uma tolerância λ , normalmente entre 2700 e 3600 N/m, ou seja $F_{I,n} = F_{J,n} \pm \lambda$.

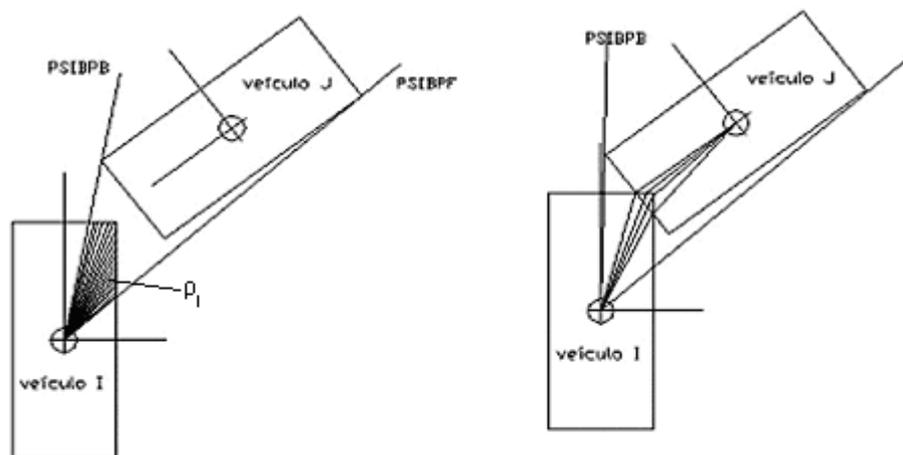


Figura 19: Vetores ρ_i traçados para monitorar o contato entre os veículos envolvidos, na área definida pelos ângulos φ_i e φ_f .

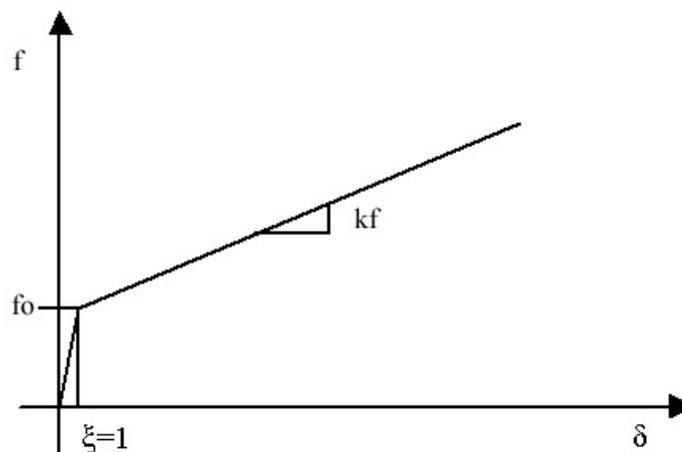


Figura 20: Curva de Força x Deformação total durante a compressão em um choque, segundo a modelagem do programa EDSMAC.

7 - Caso a diferença entre os esforços seja maior que λ , o ponto de interação é movido ao longo de $\rho_{i,n}$ de um incremento ajustável. Os esforços são então recalculados, repetindo-se o processo até que se atinja a tolerância λ desejada. A quantidade de vezes que o ponto de interação é movido é limitada de forma a, em caso de erro, não deixar o programa em um “loop” infinito;

8 - Após o estabelecimento do equilíbrio de esforços para um determinado $\rho_{i,n}$ inicia-se o cálculo para o próximo, pelo mesmo processo;

9 - Ao final destes cálculos o procedimento é repetido, ainda dentro do mesmo intervalo de tempo, com o outro veículo servindo como base.

3.2.1.1. Restituição

Conforme comentado, em uma colisão a máxima deformação de um veículo é sempre maior que a deformação residual, devido ao caráter elástico de parte desta deformação (Figura 13). Os esforços envolvidos nesta restituição adquirem importante papel em reconstituições de choques, pois, se abandonados, chegar-se-ia a maiores deformações e menores variações de velocidade.

O modelo utilizado na versão EDSMAC faz com que, ao final de cada interação, o vetor ρ respectivo cresça segundo uma equação polinomial de segundo grau, com coeficientes C_0 , C_1 e C_2 , definidos pelo usuário. Este acréscimo é função do módulo inicial do vetor e da deformação sofrida. O resultado deste deslocamento é uma força que tende a separar os veículos. Esta recuperação de parte do deslocamento dos ρ_n após cada interação causa um deslocamento sobre a curva $F \times d$, mostrado no gráfico da Figura 21.

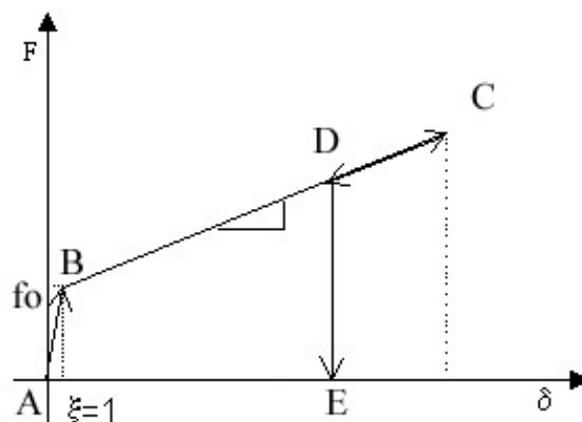


Figura 21: Modelo de restituição do EDSMAC, onde o vetor ρ segue a trajetória A-B-C, durante o carregamento e C-D-E, na restituição.

A forma de representação da restituição do choque empregada no SMAC foi criada baseada em uma aproximação experimental, sem levar em conta os

fenômenos físicos envolvidos, já que se baseia no simples deslocamento do ponto de contato, sendo, portanto, um modelo de difícil interpretação.

3.2.2.

Modelo deformável com uso de vetores radiais (programa M-SMAC)

Outra forma de cálculo das forças envolvidas é apresentada por Mc Henry & Mc Henry - 1997 em sua versão do SMAC, na qual assume-se que qualquer colisão já se encontra em uma zona inelástica, proporcionando um perfil de carregamento e restituição, segundo as constantes K_1 e K_2 , como mostrado na Figura 22, onde δ_f é a deformação residual e δ_m a deformação máxima.

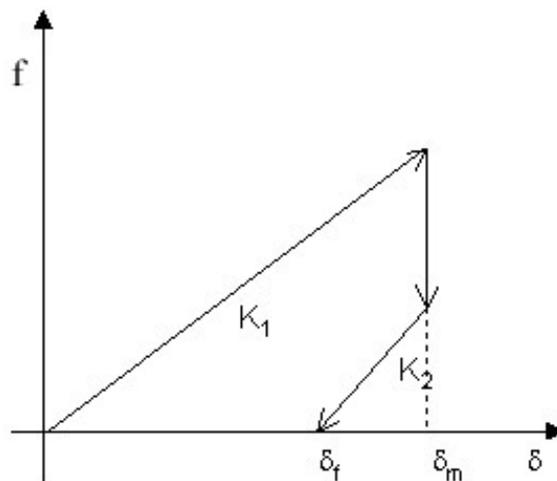


Figura 22: Modelo de Esforço x Deformação utilizado no M-SMAC.

Segundo o autor, ao se realizar ajustes na posição de cada ponto de contato p_n , ao final de cada interação para representar a restituição relativa ao choque, torna-se a simulação excessivamente sensível ao incremento de tempo, além de não permitir uma representação física do fenômeno da restituição. O M-SMAC modela a restituição diretamente no cálculo dos esforços, utilizando para isso a mesma relação linear entre a deformação residual e a velocidade. Ainda segundo Mc Henry, esta linearização é feita pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\Gamma}{\delta_m} + \rho \quad (29)$$

onde δ_m é a deformação dinâmica (total = elástica + plástica) máxima, ε é o coeficiente de restituição (velocidade de afastamento/ velocidade de aproximação), Γ e ρ são chamados constantes de restituição.

Para a determinação das constantes de rigidez K_1 e K_2 a serem utilizadas na compressão e na restituição, conforme mostrado na Figura 22, extrai-se de ensaios, além das constantes f_0 e k_f previamente comentadas, a deformação máxima $(\delta_m)_1$, a razão entre a deformação final, a deformação máxima $(\delta_f / \delta_m)_1$ e o coeficiente de restituição $(\varepsilon)_1$, onde os índices indicam os veículos.

Com o conhecimento destas constantes, faz-se o equilíbrio de forças de forma semelhante à versão anteriormente analisada, fazendo $F=K_1 \cdot \delta_f$, sem utilização do polinômio empregado para simular a restituição até a velocidade de aproximação se anular, quando então o equilíbrio é feito por $F= -K_2 \cdot (\delta_f - \delta_m)$, conforme mostra a Figura 22.

Este modelo representa a restituição de modo mais realista, mas de forma também baseada em modelo matemático experimental, sem embasamento teórico físico.

3.2.3. Modelo baseado em conservação de quantidade de movimento (programa CRASH)

Outro grupo de programas de largo uso na Europa e nos Estados Unidos é formado pelas versões CRASH (Computer Reconstruction of Automobile Speeds on the Highway), dentre as que podem ser destacados o EDCRASH, PC-CRASH e WinCrash (Mc Henry – 2001). Criado inicialmente para fazer aproximações prévias ao uso do SMAC, este tipo de programa é específico para reconstituições de acidentes, possuindo como entradas as posições de impacto e pós-impacto ou medidas das deformações sofridas pelos veículos e, como saída principal, a variação de velocidade sofrida pelos veículos. Esta medida, segundo Day-1987, adquire extrema importância para análise da severidade do impacto, pois é aproximadamente igual à velocidade em que ocorre o choque dos ocupantes com as partes internas do veículo.

O modelo faz cinco considerações para sua aplicação:

- O condutor perde totalmente o controle do veículo após uma colisão;
- Existe um instante de tempo em que as velocidades dos pontos de contato entre os veículos são iguais, o que, segundo Mc Henry-2001, torna

o modelo não aplicável a impactos com grande deslizamento entre os veículos envolvidos;

- O atrito entre os veículos é o mesmo;
- Divisão dos veículos em categorias;
- Rigidez uniforme, dividindo-se em três áreas: frontal, lateral e traseira.

Este tipo de programa, ao contrário dos anteriormente analisados, que fazem um estudo das forças atuantes em cada incremento de tempo, considera o impacto entre veículos como um fenômeno instantâneo, utilizando-se do princípio da conservação de quantidade de movimento para extrair a variação de velocidade ΔV .

Dois tipos de análises são possíveis, de acordo com os dados disponíveis:

- Simulação de trajetória: Conhecidas as posições inicial e final dos veículos através de perícias e medidas de marcas de frenagem, extrai-se a velocidade imediatamente após o impacto por meio das equações de dinâmica para corpos rígidos e, a partir da mesma, a velocidade inicial e variação de velocidade sofrida, pela conservação de quantidade de movimento.
- Simulação por perfil de deformação: baseado em medidas tomadas do veículo deformado, faz-se o cálculo do impulso atuante no choque, por conservação de quantidade de movimento, a variação de velocidade é obtida.

Como o modelo baseado na trajetória não leva em consideração as deformações envolvidas, analisa-se a seguir o tratamento empregado pelo CRASH a partir das medidas de deformação, o qual leva em consideração a mesma relação linear anteriormente exposta entre esforço e deformação baseada nos parâmetros f_0 e k_f :

$$f = f_0 + k_f \delta_p \text{ ou } f = k_f \delta_{\text{total}}$$

Em uma colisão unidimensional entre dois veículos, esta relação pode ser traduzida fisicamente em um modelo massa mola representando cada veículo, onde K_1 e K_2 são os coeficientes de rigidez das mola e M_1 e M_2 as massas dos veículos (Figura 23).

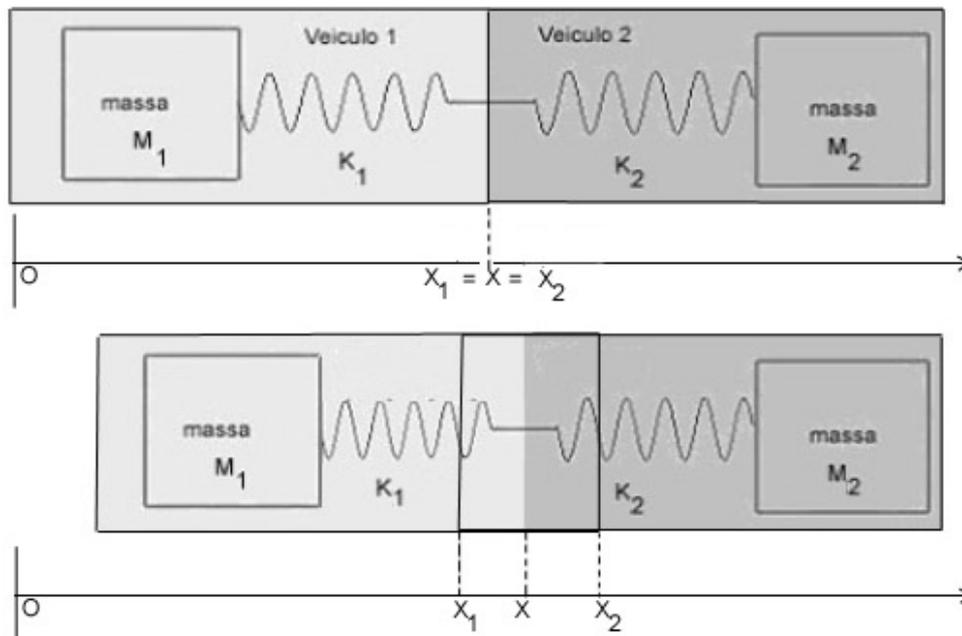


Figura 23: Esquema físico para modelo de colisão bidimensional.

Aplicando a Segunda Lei de Newton ao veículo 1:

$$-K_1(X_1 - X) = M_1 \ddot{X}_1 \quad (30)$$

onde X_1 é a posição do veículo 1 e X é a posição do ponto de contato entre os veículos em qualquer instante durante o choque.

Para o veículo 2, analogamente, tem-se:

$$-K_2(X_2 - X) = M_2 \ddot{X}_2 \quad (31)$$

Substituindo a deformação total combinada (distância ou aproximação relativa) dos veículos $\delta = X_1 - X_2$ chega-se, após alguma manipulação algébrica a

$$\ddot{\delta} + \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \delta = 0 \quad (32)$$

No início do choque a taxa de deformação é igual à velocidade de aproximação:

$$\dot{\delta}_0 = V_{10} - V_{20} \quad (33)$$

Se nos pontos em contato os veículos possuírem rigidez K_1 e K_2 e deformações máximas δ_1 e δ_2 , então a energia absorvida por cada veículo, no instante em que suas velocidades são iguais ($V_1 = V_2 = V_{com}$), será

$$E_1 = \frac{K_1 \delta_1^2}{2} \text{ e } E_2 = \frac{K_2 \delta_2^2}{2}, \quad (34)$$

O impulso envolvido será igual à variação da quantidade de movimento em cada veículo:

$$I = M_1 \Delta V_1 = M_2 \Delta V_2 \quad (35)$$

$$\text{logo } \Delta V_1 = \frac{M_2 \Delta V_2}{M_1}$$

e a soma das energias dissipadas é:

$$E_1 + E_2 = \frac{M_2 \Delta V_2^2}{2} + \frac{M_1 \Delta V_1^2}{2} = \frac{M_2 \Delta V_2^2}{2} + \frac{M_1 M_2^2 \Delta V_2^2}{2 M_1^2}$$

de onde obtém-se ΔV_1 e, analogamente ΔV_2 :

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= V_{10} - V_{\text{com}} = \frac{\sqrt{2(E_1 + E_2)M_1M_2/(M_1 + M_2)}}{M_1} \\ \Delta V_2 &= V_{\text{com}} - V_{20} = \frac{\sqrt{2(E_1 + E_2)M_1M_2/(M_1 + M_2)}}{M_2} \end{aligned} \quad (13)$$

e assim o impulso envolvido na colisão será:

$$I = \sqrt{\frac{2(E_1 + E_2)M_1M_2}{(M_1 + M_2)}} \quad (14)$$

Por definição o impulso e a variação de velocidade ocorrem na mesma direção em cada veículo, definida por um ângulo em relação ao eixo longitudinal marcado no sentido horário P (Figura 24a). Este ângulo deve ser estimado baseando-se na análise do veículo deformado e o impulso é aplicado no centróide da área deformada.

A variação de velocidade sofrida por cada veículo é decomposta em uma componente longitudinal e uma transversal:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{long}} &= \Delta V \cos(P - 180) \\ \Delta V_{\text{trans}} &= \Delta V \sin(P - 180) \end{aligned} \quad (36)$$

Observa-se que, para o cálculo efetivo das variações de velocidade, deve-se determinar E_1 e E_2 . Este cálculo é feito discretizando-se a geometria do veículo em elementos com comportamento linear, conforme os coeficientes f_0 e k_f , também comumente denominados de A e B (trabalhos de Day e Mc Henry), obtidos em "crashtests", disponibilizados de acordo com as respectivas categorias de veículos no programa. Tais elementos funcionam como molas com comprimento livre que ultrapassam a geometria do modelo em uma distância

f_0/k_f , de forma a caracterizar impactos sem deformações permanentes, e com uma rigidez igual a k_f , como mostrado na Figura 24b. As deformações sofridas pelo veículo real são aferidas de modo a determinar, por meio de uma integração, a energia dissipada pelas “molas virtuais”.

A energia armazenada em cada elemento mola linear com rigidez K e deformação δ é, como já visto, $E = \frac{K\delta^2}{2}$. Integra-se esta equação ao longo do perfil deformado w , mostrado na Figura 25, para se obter a energia total dissipada, conseqüentemente extraindo-se a variação de velocidade.

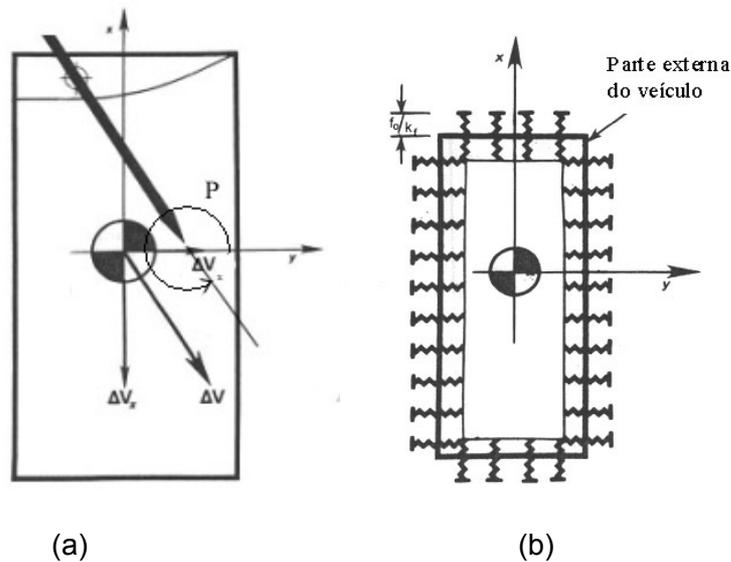


Figura 24: (a) – Direção do impulso definida pelo ângulo P ; (b) - Discretização de um veículo em elementos mola lineares.

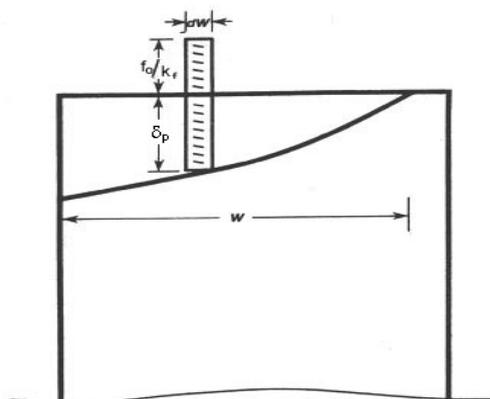


Figura 25: Elemento mola discretizado ao longo do perfil deformado w .

Para a determinação do perfil w se faz necessária a medição das deformações sofridas pelo veículo, da largura da área atingida e da localização

do centróide da área atingida. Day & Hargens-1987 recomenda, para o EDCRASH, o uso de no máximo seis medidas de deformações, interpoladas linearmente ao longo do perfil, conforme ilustrado na Figura 26.

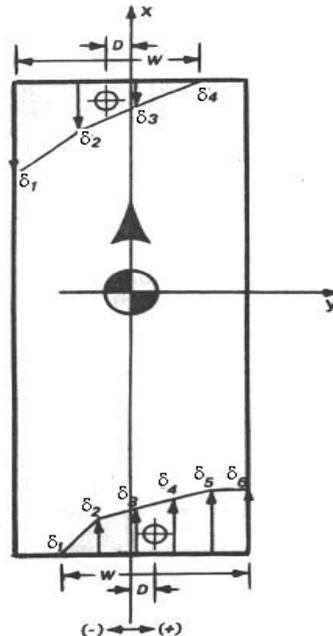


Figura 26: Medidas de deformação em um veículo – quatro medidas usadas para a deformação frontal e seis medidas para a deformação traseira.

Esta forma de modelagem, ao contrário das anteriores, é fisicamente justificada, empregando o conceito de conservação de quantidade de movimento. Possui, porém, a desvantagem de não possibilitar uma análise dinâmica do problema, ou seja, o acompanhamento das deformações e dos esforços envolvidos ao longo do tempo, além de limitar sua aplicação a reconstituições, fazendo-se necessário o conhecimento de parâmetros posteriores ao choque propriamente dito.

3.2.4.

Modelo para veículo deformável, baseado em elementos discretos mola – amortecedor em série (programa SINRAT)

Uma das formas usuais de se modelar as deformações associadas a uma colisão veicular é a discretização da geometria do veículo envolvido, considerando-se o veículo como um conjunto de vários corpos rígidos conectados entre si por diversos elementos flexíveis ou não. Baseado neste artifício de modelagem, tem-se o modelo apresentado por Lozano et al. – 1998, usado no programa SINRAT III de reconstituição de acidentes veiculares. Este

modelo possui características dinâmicas, onde divide-se o intervalo de tempo em que ocorre a colisão, calculando-se os esforços envolvidos a cada instante. As estruturas dos veículos são discretizadas em regiões paralelas e fazendo-se um mapeamento constante de seus limites, determinando-se as regiões que estão envolvidas no choque a cada incremento de tempo. Uma vez determinadas estas áreas, são inseridos, em cada uma das regiões envolvidas de cada veículo, um elemento transversal e outro longitudinal, constituídos de uma mola linear em série com um amortecedor viscoso não-linear e em paralelo com um amortecedor Coulombiano, conforme o modelo físico ilustrado na Figura 27.

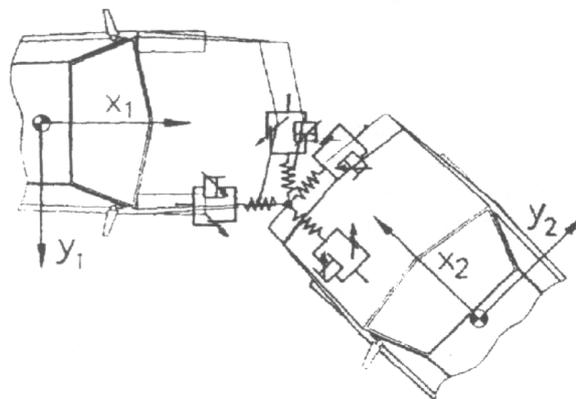


Figura 27: Representação do contato entre dois veículos segundo o modelo de Vera et al. (1993).

Estes elementos modelam o comportamento elastoplástico da estrutura do veículo. As molas representam o comportamento elástico, ou seja, a deformação que é recuperada ao término do contato, e os amortecedores viscosos representam a deformação plástica, ou seja, a deformação permanente após o término do choque. Como para uma colisão a baixa velocidade é possível não haver danos permanentes, isto é, o veículo possuir um comportamento puramente elástico, se faz necessário a inserção de um limite para o acionamento do amortecedor viscoso. Este limite é uma força mínima aplicada sobre o veículo, extraída de dados de testes e modelada pelo amortecimento Coulombiano, que, posicionado em paralelo ao amortecedor viscoso, funciona como uma “chave liga-desliga”, ou seja, adquirindo valor infinito (10^7 Ns/m) quando sob esforços inferiores à mencionada força limite, não possibilitando deformação e não permitindo ação do amortecedor viscoso, e, acima deste patamar, assumindo um valor nulo, dando completa liberdade ao elemento viscoso.

Antes do término do contato entre os elementos envolvidos no choque, após o instante de maior deformação, ocorre a recuperação da energia absorvida pelos componentes elásticos, porém o elemento Coulombiano assume novamente valor infinito impedindo que o elemento viscoso acompanhe o movimento de retorno, mantendo sua deformação máxima, garantindo a coerência física do modelo no que se refere às deformações plásticas.

O processo de modelagem da colisão resume-se às seguintes etapas:

1 - Ao primeiro contato entre os veículos a mola linear inicia a compressão e o amortecedor viscoso não se deforma devido ao alto valor assumido pela constante de amortecimento do elemento Coulombiano;

2 - Após a força de contato ultrapassar o limite estabelecido para a ocorrência de deformações elásticas, o amortecedor Coulombiano assume valor nulo, permitindo a deformação do elemento Viscoso;

3 - Quando a velocidade de aproximação entre os elementos envolvidos se anula, ou seja, ao final da compressão, a parte elástica (mola) inicia o retorno à sua posição inicial, causando uma separação entre os veículos, enquanto que os amortecedores manterão sua deformação, já que os esforços atingem valores inferiores ao limite requerido e a constante de amortecimento do elemento Coulombiano voltará a assumir valor elevado, bloqueando o movimento do elemento plástico.

Os valores para as constantes utilizadas nos elementos deformáveis são próprios de cada veículo e obtidos de testes experimentais, que, segundo Lozano et al. - 1998 apontam uma distribuição percentual entre as regiões do veículo, de acordo com suas características, descritas a seguir:

Parte dianteira do veículo - Em veículos com motor dianteiro, a parte central, independente do posicionamento transversal ou longitudinal do motor, é normalmente menos resistente que as bordas da parte frontal, conforme ilustrado na Figura 17a, até o instante no qual o motor é atingido pela deformação, quando estes valores então se equiparam.

A parte localizada na altura do pára-choque é em torno de três a seis vezes mais rígida que a parte acima dele e a resistência cresce em conjunto com a deformação, devido às geometrias utilizadas. As barras longitudinais e o compartimento de passageiros são considerados elementos rígidos.

Parte lateral do veículo - As partes mais rígidas de um veículo são a parte posterior da lateral, após a porta traseira, a parte lateral do assoalho e a área entre a porta e a suspensão dianteira (região A da Figura 28b). A área compreendida entre a suspensão dianteira e a frente do veículo (região B da Figura 28b) possui rigidez intermediária enquanto que as portas (região C da Figura 28b) são a parte de menor resistência.

Parte traseira do veículo - A parte traseira de um veículo possui rigidez elevada de forma a evitar danos ao tanque de combustível e, segundo Vera et al – 1995, não há dados disponíveis para se supor diferença de rigidez entre áreas da traseira de um veículo.

Com base nestes dados o modelo faz a divisão da parte frontal de um veículo em seis regiões e da parte lateral em três regiões, enquanto a parte traseira permanece como um único elemento (Figura 28).

Os dados de rigidez global das partes frontal, lateral e traseira podem ser extraídos de testes reais ou de outras bases de dados, como modelos de outros programas de simulação. O limite para deformação elástica varia entre 2000N e 4000N, dependendo da massa e tamanho do veículo.

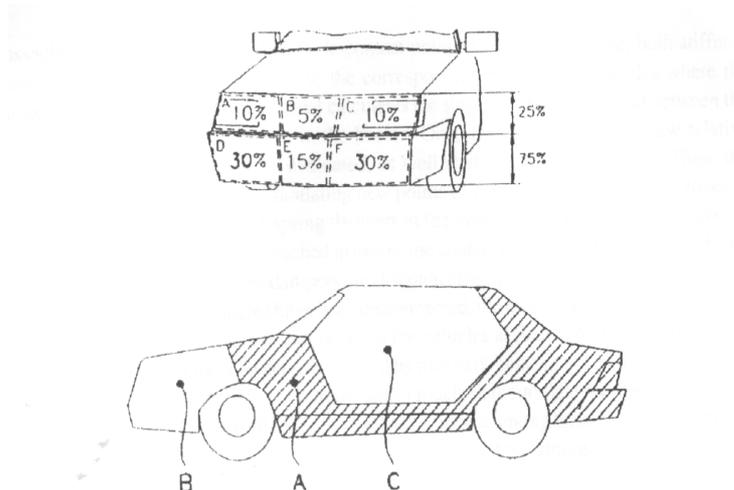


Figura 28: Divisão das áreas da superfície de um veículo segundo as constantes de amortecimento e rigidez: a) Parte frontal; b) Parte lateral.

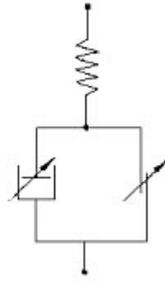


Figura 29: Elemento flexível utilizado para simular contato entre os veículos.

O amortecimento viscoso não linear, utilizado em um elemento flexível (Figura 29) pode ser calculado por um coeficiente C obtido pela seguinte fórmula apresentada em Lozano et al.-1998 :

$$C=1,2C_0-\frac{C_0}{2}\delta_T^2, \quad (37)$$

onde C_0 é um valor de amortecimento próprio de cada categoria de veículos e δ_T é a deformação total a cada instante.

Por ser fisicamente justificável, pois discretiza o veículo em elementos com característica elastoplásticas e por permitir um acompanhamento da deformação ao longo do tempo, este modelo foi escolhido como base para o desenvolvimento do modelos apresentados neste trabalho e será discutido detalhadamente nos capítulos seguintes.