

ANÁLISE DIMENSIONAL

Até agora, depois de todas as análises apresentadas, os elementos da suspensão do veículo apresentam apenas os seus pontos de fixação como referência final nos desenhos. O formato destes elementos e o material utilizado em sua construção podem caracterizar elevada robustez ou grande fragilidade ao fim a que se destinam. É nesta fase do projeto que os componentes utilizados na suspensão podem ser refinados de acordo com sua utilização. Para isto devem ser verificados os carregamentos existentes em cada componente, de forma que seu peso possa ser diminuído suportando, ainda assim, todos os esforços provenientes destes carregamentos.

A intenção da diminuição do peso para os componentes da suspensão baseia-se principalmente em três fatores:

- diminuição da quantidade de material empregado – quanto menor a quantidade será menor o custo de obtenção do material escolhido.
- aumento da relação massa suspensa/massa não-suspensa;
- diminuição total do peso do veículo, trazendo benefícios também para o usuário final, tais como menor consumo de combustível e maior capacidade de aceleração e de frenagem.

Para a redução de peso dos componentes é necessária a verificação das tensões impostas a ele e as deformações que este pode sofrer dentro do período de vida útil estimado. Atendendo a isto, a diminuição do peso pode ocorrer pela adequação do desenho no sentido de atender às maiores solicitações, na remoção de material nas áreas de menor solicitação e na seleção de materiais mais leves de elevada robustez. Um método de remoção de peso pode ser visto na figura 6.01.

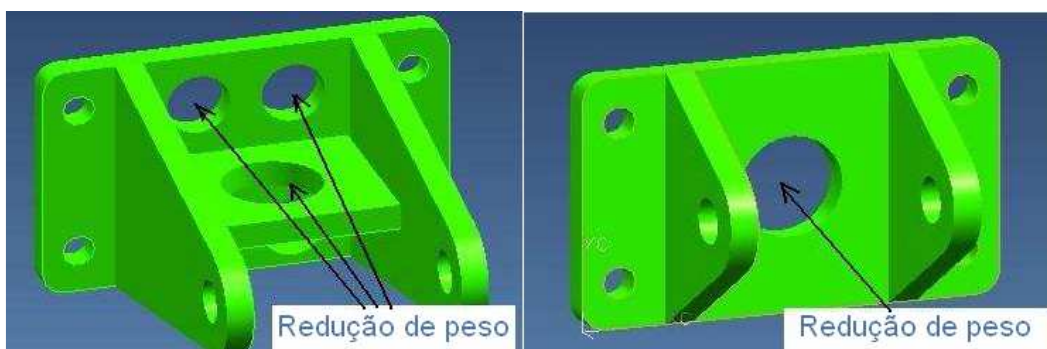


Figura 6.01 – Redução de peso de componentes em concepção pela remoção de material nas áreas de menor solicitação.

A verificação das tensões e deformações resultantes dos esforços empregados nos componentes deve ser realizada visando como objetivos:

- prever a durabilidade dos componentes e sua previsão de substituição de acordo com a quantidade de ciclos de utilização, relacionado à quilometragem rodada pelo veículo.

- verificar a resistência dos componentes à flexão, torção, cisalhamento, tensão e compressão de acordo com os esforços a que são submetidos, ou seja, realizar a análise estrutural destes componentes quanto aos esforços dinâmicos e estáticos de forma que não ocorra falha ou desconforto ao motorista.

- a escolha do material a ser empregado, de acordo com as propriedades mecânicas, químicas e de soldagem, se for o caso, e ainda de sua disponibilidade no mercado.

Durante a execução do projeto dimensional dos componentes da suspensão é feita a realimentação dos valores de entrada na análise dinâmica para validação final. Entre estes valores podemos citar o posicionamento dos novos centros de massa dos componentes, as massas, os momentos de inércia, e demais valores que tenham se alterado necessários a esta análise.

Um método de otimização de geometria de um suporte dos elementos de suspensão pode ser visto no artigo da SAE (SAE Technical Paper) número 970092 – [38]. Neste artigo é mostrado o estudo de caso de criação da bandeja inferior da suspensão traseira do Corvette C5 de 1997.

Durante esta criação, a bandeja sofreu grande evolução para atender às premissas de acomodação ao pequeno espaço disponível, aos carregamentos, manufatura e redução de peso.

A bandeja evoluiu bastante seu design da fase Alpha até a fase de produção, como pode ser visto na figura 6.02.

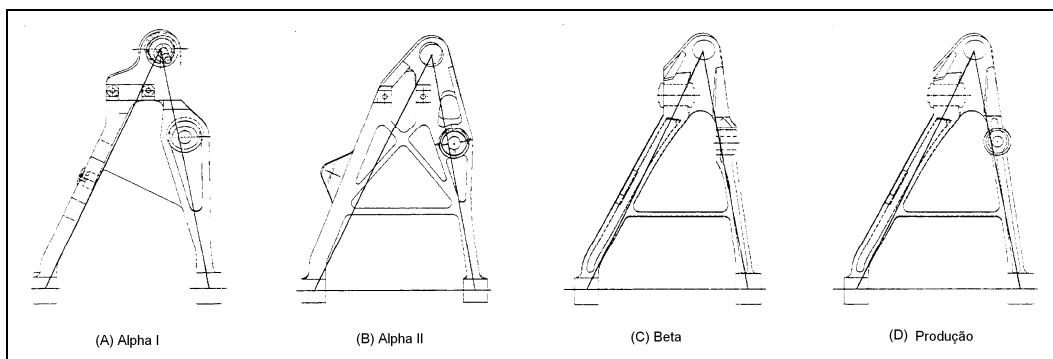


Figura 6.02 – Fases do dimensionamento de um novo componente – [38].

Durante a análise dimensional, o único fator que não poderia ser alterado foi quanto à topologia geral do componente, ou seja, as localizações no espaço dos pontos de fixação da bandeja e do ponto de pivoteamento deveriam ser mantidas. A equipe de projeto teve total liberdade para alterar a forma estrutural e os componentes de fixação e pivô de forma a atingir as metas pré-estabelecidas de massa, durabilidade e dimensão global (empacotamento), sem comprometer o desempenho da suspensão. Vários estudos de carregamentos foram realizados através da análise por elementos finitos, incluindo depressões de grande proporção na pista (figura 6.03), frenagem máxima e elevado ciclo de fadiga. O veículo deveria posteriormente passar pela mesma pista de provas que outros veículos de passeio e caminhões leves.



Figura 6.03 – Depressão na pista. Pode ser verificada como uma combinação dos gráficos mostrados pela figura 5.14.

As fases de concepção descritas são evidenciadas como:

- Alpha I – Os componentes são utilizados para a verificação da funcionalidade do sistema e não refletem qualquer tentativa de otimização. O objetivo deste desenho é apenas obter a posição dos pontos de pivô com a manga de eixo e de rotação da bandeja em suas fixações ao chassi ou outro elemento da massa suspensa.

- Alpha II – Início da otimização. As linhas de ação entre os pontos de carregamento citados em Alpha I são traçadas. Nesta fase. Foi implementada uma estrutura de treliça ao componente na proximidade do acoplamento ao amortecedor. Houve ainda a tentativa de se criar maior simetria possível na bandeja. O posicionamento do amortecedor entre os elementos da suspensão impediu que o seu ponto de apoio fosse mais para longe da linha, impedindo o acréscimo de material no local de maior flexão. Este fator dificultava a redução da massa.

Com o amortecedor acoplado, os maiores carregamentos observados na peça eram os realizados pelo próprio amortecedor durante a simulação da passagem por depressões na pista. Na vista traseira o amortecedor possui elevada inclinação, fazendo a bandeja ter grande componente de força para fora em movimentos ascendentes da suspensão. Nesta versão, dois parafusos de 8mm uniam a bandeja ao chassis. Na passagem por uma depressão mais severa na pista esta medida não suportava os carregamentos, o que foi verificado também em testes práticos. Para atender aos esforços de cisalhamento dos parafusos foi necessário dimensioná-los para 14mm. Neste caso mais material também deveria

ser adicionado à bandeja para atender a esta nova dimensão, dificultando ainda mais o atendimento ao objetivo de diminuição de peso.

- Beta – Nesta fase verificou-se que o formato geral da peça deveria ser reavaliado. A redução de massa proposta não estava sendo atingida e a utilização de forjado não estava sendo bem aceita para o formato da peça Alpha II. Além disso, o local de acoplamento do amortecedor estava muito largo e pesado. Neste caso, optou-se por transpor as buchas para a bandeja e substituir o acoplamento inferior do amortecedor por braçadeira. Foram substituídos os parafusos por um único de 16mm, que suportou as forças impostas pelas depressões na pista. O número de parafusos diminuiu pela metade e o acoplamento da braçadeira de acoplamento para a mola também foi investigada.

- Produção – O acoplamento da mola mudou do conceito de braçadeira para orifício. Este conceito permitiu melhor acoplamento pela possibilidade de melhor articulação devido ao ajuste ao câmber. O acoplamento da barra de estabilização foi por último refinado de forma a permitir o uso de uma única barra para a suspensão dianteira. A economia de peso final no sistema foi de 2kg.

Para a realização deste estudo foi necessária a utilização dos seguintes procedimentos:

- definição dos carregamentos
- determinação dos esforços
- determinação das tensões e deformações pelo método de elementos finitos.
- escolha dos materiais

A finalização do processo ocorre com a criação dos desenhos de produção.

6.1 Definição dos carregamentos

Os carregamentos utilizados no projeto dimensional dos componentes da suspensão são aqueles obtidos primeiramente pela análise estática e posteriormente pela análise dinâmica. A análise estática fornece as cargas

impostas ao veículo em diversas situações sem que haja variação com o tempo. As cargas podem ser definidas pelo peso próprio do veículo sendo este denominado “peso em ordem de marcha”, peso somando um ou mais ocupantes e/ou a carga, tal como realizado no capítulo 4. Este então é o primeiro passo para a realização da análise dimensional dos componentes da suspensão. O maior objetivo do estudo das cargas durante a fase de análise estática da suspensão é identificar a ordem de grandeza das massas e acelerações envolvidas na suspensão as quais servem de entrada para a realização da análise dinâmica.

Apenas como exemplo de carregamento, observamos no capítulo que trata da análise dinâmica que o trailing-arm equivalente pode ser determinado para o sistema de bandeja dupla. Seguindo o desenho da figura 6.04 pode ser determinado o carregamento das buchas da suspensão quanto aos esforços de tração e frenagem do veículo para este sistema como:

$$P_1 = F_x \cdot z_2 / z_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$P_2 = F_x \cdot (1 + z_2 / z_1) \cdot \cos \theta_2$$

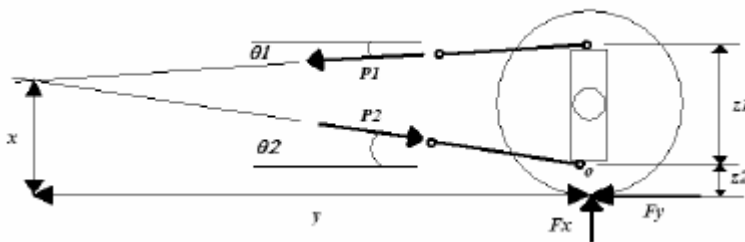


Figura 6.04 – Carregamentos no sistema de suspensão

6.2

Determinação dos esforços

Os elementos da suspensão estão sujeitos a diversos tipos de esforços provenientes dos carregamentos citados no item anterior. Entre estes esforços

podemos citar os relacionados à tração, à compressão, ao cisalhamento, à torção e à flexão.

Os esforços podem ser do tipo:

- esforço normal (tração e compressão)
- esforço cortante (cisalhamento)
- momento fletor (flexão)
- momento torsor (torsão)

Os métodos de determinação dos esforços para estes esforços podem ser vistos no livro de Shigley. Os programas de análise normalmente precisam que os esforços atuantes sejam identificados pelo menos quanto ao tipo, de forma que o modelo de estudo a ser aplicado ao componente seja o mais verdadeiro possível, dentro dos pacotes de cálculo já existentes.

6.3

Análise computacional através de elementos finitos para determinação de tensões e deformações

Os critérios apresentados para a determinação das tensões e deformações atualmente são executados através da utilização de programas de computador. Atualmente, existem vários programas comerciais bastante completos que permitem aplicar o MEF - Método de Elementos Finitos (FEM - Finite Element Method) à análise de diferentes tipos de situações físicas. Estes programas são conhecidos comercialmente como COSMOS, NASTRAN, ASKA, SAP, TITUS, MARC, ABACUS, ANSYS, ADINA, entre outros. Alguns destes são bastante conhecidos inclusive nos meios acadêmicos da engenharia mecânica, sendo estes o ANSYS e o COSMOS.

O MEF é uma técnica para resolver equações diferenciais parciais. Sua característica básica é trabalhar no campo contínuo subdividido em células, que são os chamados elementos, os quais formam uma malha. A malha em si não necessita ser estruturada, tornando mais fácil o tratamento de geometrias complexas.

O problema a ser estudado pelo MEF, a princípio, deve ter uma forma prescrita. A solução tem que pertencer a um espaço de funções e este é construído pelos valores da função variando numa dada maneira, por exemplo, linearmente ou quadraticamente, entre os valores dos pontos nodais. Os pontos nodais, ou nós, são pontos obtidos dos elementos tais como os vértices, os pontos médios dos lados, os pontos médios do elemento, entre outros. Deste modo, a solução final tem bastante ligação com o formato original do componente estudado.

As condições de contorno recebem tratamento através de funções diferenciais. Esta propriedade constitui enorme vantagem para o FEM em relação a outros métodos de análise. Este método possui ainda excelente discretização, cujas equações são constituídas pela contribuição dos vários níveis do elemento, sendo mais tarde reunidos.

De uma forma mais simples, estes programas recebem como fonte de informações, o desenho inicial do componente na fase Alpha I, os carregamentos e os tipos de esforços aos quais os componentes serão submetidos, este último pela escolha do tipo de elemento a ser utilizado.

De acordo com o tipo de análise a ser realizada existem várias formas de se implementar os elementos a serem analisados. Estas formas são na verdade procedimentos de cálculo internos dos programas. Apenas como exemplo, no caso do programa Ansys, pode-se adotar para a verificação de estruturas na forma de tubo o Beam4 e, para a forma de superfície, o Shell.

No caso da necessidade de importação de arquivos entre os programas de concepção de desenho e os de análise dimensional, na prática, podem ocorrer certos problemas de compatibilidade de leitura. Muitas vezes o programa de análise estrutural não consegue fazer a leitura do arquivo original do programa de desenho, devendo ser verificadas as possíveis extensões dos arquivos a serem importados. Neste caso, deve ser criado, ainda no programa de desenho, um arquivo intermediário cuja leitura possa ser realizada pelo programa de análise. Mesmo assim existem casos em que não ocorre a assimilação de todas as informações existentes no arquivo importado e demanda tempo de adequação dos desenhos para a análise, não sendo algo imediato como normalmente se pensa.

Depois de importado o desenho e definido o tipo de análise a ser executada, são definidos os elementos que formarão uma estrutura única e criada a malha (figura 6.05). Em seguida é selecionado no sistema o tipo de material a ser utilizado ou entra-se diretamente com as propriedades mecânicas do material. O carregamento é colocado pontualmente ou na forma de carregamento, sendo ainda computadas as acelerações atmosférica e outras que definem a utilização do componente se for julgada necessária.

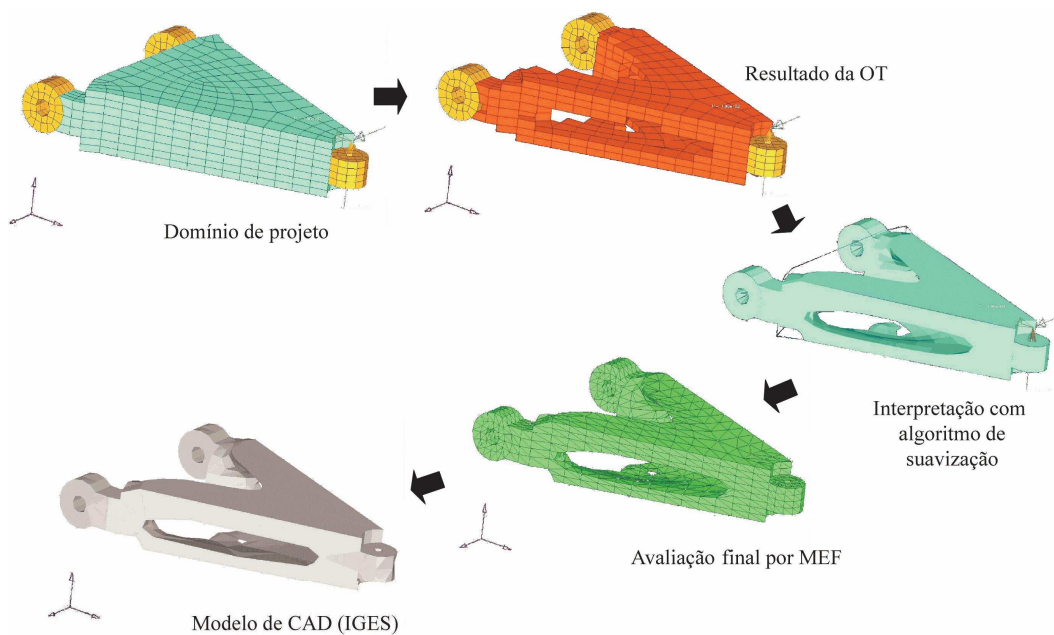


Figura 6.05 – Tratamento em MEF de um braço de suspensão dianteira.

6.4

Escolha dos materiais

A escolha do material a ser utilizado para cada componente é realizada de acordo com o fim ao qual se destina e de acordo com premissas a serem adotadas para a escolha de cada componente. Estas premissas podem envolver fatores relacionados basicamente a peso, custo, tempo de fabricação ou obtenção, qualidade, resistência à fadiga, resistência à oxidação, emprego em processos de estampagem ou forjamento e de soldagem, entre outros.

A relação entre estes fatores gera as premissas, nas quais são baseados os poderes de decisão sobre qual material deverá ser utilizado.

Nos últimos tempos, os componentes criados em grande escala são fabricados preferencialmente por conformação mecânica por prensa. Este processo, embora apresente elevado custo inicial na obtenção das prensas e dos moldes, torna extremamente rápido o processo de fabricação e dilui seu custo devido à maior capacidade de produção e conseqüente aumento de venda do produto final. A conformação mecânica também possui a vantagem de criar tensões internas que auxiliam na correta rigidez do elemento sem que seja necessário o aumento do peso para este fim.

6.5

Especificação de componentes

A especificação de componentes envolve a possibilidade de utilização de um componente de mercado já existente ou a de fabricação de um componente próprio. Geralmente, no caso de itens de suspensão a preferência deve ser no sentido de se fabricar novos componentes, a menos que a quantidade de veículos a serem fabricados não justifique o custo. Esta linha de raciocínio é muito empregada quanto aos componentes forjados, tais como bandejas e braços de ligação devido à necessidade de se seguir o correto desenho de fabricação para cada tipo de suspensão. Desta forma, os pontos de ligação dos componentes de mercado geralmente não são passíveis de utilização para uma nova suspensão. Entretanto, podem servir como guia para a concepção de uma nova peça.

No caso de elementos de ligação tais como coxins e pivôs, pode-se ter maior facilidade de utilização de itens de mercado desde que atenda às necessidades do projeto. Para tal, os elementos de ligação devem atender às condições de trabalho em termos de limites máximos de tensões resultantes das forças aplicadas, temperatura de utilização e ainda possuir adequada geometria e relação peso e custo.

6.6

Desenhos para construção

Para a fabricação das peças é necessária a existência de desenhos. Até o momento, tratamos a respeito de:

- desenhos de geometria, onde procurávamos determinar os pontos de ligação, relacionados aos centros de rotação;
- desenhos de concepção ou design, a partir dos quais as peças tinham seu primeiro esboço e;
- desenhos de análise, de acordo com o tipo de entrada necessária ao entendimento do desenho de acordo com o programa de análise estrutural utilizado.

Neste ponto do projeto são necessários os desenhos de fabricação e de manufatura. Os desenhos de fabricação definem as dimensões das peças, seus itens, existência de soldas, tolerâncias, indicando ainda a numeração de cada item e o material a ser utilizado, conforme figura 6.06.

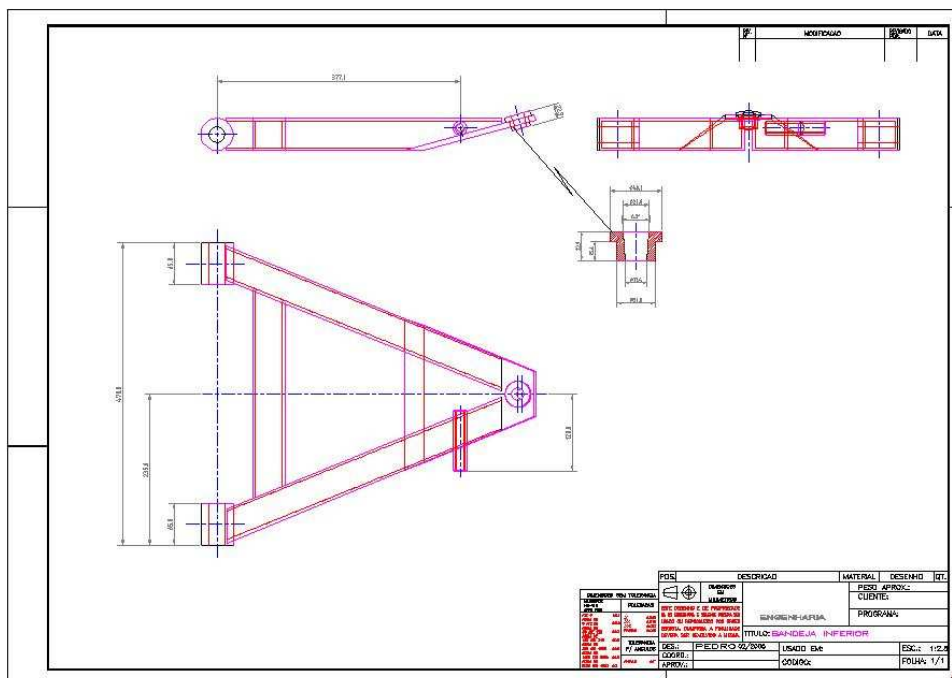


Figura 6.06 – Desenho de fabricação de uma bandeja inferior de suspensão. Como a peça deste desenho é soldada e não forjada, outras cotas devem ser mostradas em outros desenhos relativos a cada item deste componente.