

ALEXANDE MARCOS MIYASHITA
MATEUS COGO MARQUES

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE
PROCESSOS DE FABRICAÇÃO CAD/CAE/CAM E FEM**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Graduado em Engenharia**

**São Paulo
2001**

**ALEXANDRE MARCOS MIYASHITA
MATEUS COGO MARQUES**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE
PROCESSOS DE FABRICAÇÃO CAD/CAE/CAM E FEM**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo Para a obtenção de
Título de Mestre em Engenharia.**

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Professor Doutor
Edson Gomes**

**São Paulo
2001**



Alexandre dedica esta obra à sua mãe
Tereza e seu pai Osamu, cujo apoio foi
essencial para minha formação e sem os
quais não seria possível esta obra.

Mateus dedica esta obra a seus pais Mário
e Lúcia, além de sua namorada Daniele,
pela ajuda extraordinária e compreensão
nos momentos difíceis.

Ambos os autores agradecem também aos
seus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao amigo e orientador Professor Doutor Edson Gomes pela ajuda nas decisões mais difíceis (escolha do software de análise Algor e como proceder devido às dificuldades encontradas) e o constante incentivo.

Aos profissionais da área de Engenharia de Produto da DaimlerChrysler do Brasil pelo apoio permanente em fornecer informações e a consultoria técnica prestada.

Aos profissionais da Empresa T Systems pela ajuda na construção e conversão do modelo IGES.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	
LISTA DE FIGURAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
3 ESPECIFICAÇÕES DE EXIGÊNCIAS DE PROJETO.....	3
4 CONJUNTO DE SOLUÇÕES VIÁVEIS.....	3
4.1 Chassi Escada.....	3
4.2 Chasi Monobloco.....	5
4.3 Chassi Plataforma.....	6
5 MATRIZ DE DECISÃO.....	7
6 TECNOLOGIAS CAD/CAE/CAM/FEM.....	10
6.1 CAD (Projeto Auxiliado por Computador).....	10
6.2 CAE(Engenharia Auxiliada por Computador).....	11
6.3 FEM (Método de Elementos Finitos).....	11
6.4 CAM(Manufatura Auxiliada por Computador).....	14
7 MONTAGEM DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	15
7.1 Escolha de um modelo CAD de chassi escada.....	15
7.2 Diferenças entre modelo convencional e a nova proposta.....	16
7.3 Metodologia Planejada.....	22
7.4 Execução do projeto.....	24
8 SIMULAÇÃO ESTATICA.....	25
8.1 Estudo do modelo da longarina.....	25
9. RESULTADOS DA ANÁLISE MEF NA LONGARINA.....	28
10. TUTORIAL .DE.UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ALGOR.....	30
11 CONCLUSÃO	31

LISTA DE TABELAS

TABELA I – Modelo da matriz de decisão.....	8
TABELA II – Matriz de decisão preenchida pelos alunos.....	9
TABELA III – Matriz de decisão preenchida pelos projetistas experientes....	10

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Exemplo de chassi escada.....	5
FIGURA 2 – Exemplo de chassi monobloco.....	6
FIGURA 3 – Exemplo de chassi plataforma.....	7
FIGURA 4 – Exemplo de representação CAD de chassi escada.....	11
FIGURA 5 – Modelo de chassi de caminhão para simulação em computador utilizando o método de elementos finitos.....	14
FIGURA 6 – Representação de simulação computacional de chassi deformado, indicando as regiões mais solicitadas	14
FIGURA 7 – Exemplo de representação CAD de chassi escada.....	15
FIGURA 8 – Exemplo de representação CAD de chassi escada.....	16
FIGURA 9 – Representação CAD do chassi FSK.....	17
FIGURA 10 – Representações CAD dos chassis FSK.....	18
FIGURA 11 – Representação CAD do novo conceito de chassi escada.....	19
FIGURA 12 – Vista superior, lateral e frontal da representação CAD do novo conceito de chassi escada.....	20
FIGURA 13 – Representações CAD das travessas e amarrações do novo conceito de chassi escada.....	21
FIGURA 14 – Modelo CAD obtido (no formato IGES) do novo conceito de chassi escada.....	24
FIGURA 15 – Representação wireframe (linhas) da longarina do novo conceito de chassi escada.....	26
FIGURA 16 – Malha de elementos finitos da longarina (incluindo os carregamentos).....	26
FIGURA 17 – Representação dos deslocamentos no modelo simulado.....	28
FIGURA 18 – Representação da distribuição de tensões no pior caso considerado na simulação.....	28

FIGURA 19 – Representação da distribuição de tensões na direção principal devido ao carregamento.....	29
FIGURA 20 – Representação da variação de tensões devido ao esticamento da estrutura do modelo simulado.....	29

RESUMO

O presente trabalho reúne informações sobre as tecnologias CAD (Projeto auxiliado por computador), CAE (Engenharia auxiliada por computador), CAM (Manufatura auxiliada por computador) e FEM (Método de Elementos Finitos). Atualmente, estas tecnologias são fatores primordiais na área de Engenharia de Produto de indústrias automobilísticas. A preocupação do texto está centrada na análise de uma peça fundamental na construção de um veículo automotivo: o chassi. Esta análise está focada em procedimentos de estudo da peça, considerações sobre a sua estrutura e a simulação computacional de esforços em um modelo de elementos finitos. Deve-se ressaltar que o texto considera uma proposta inédita de estrutura de chassi, que ainda está em fase de desenvolvimento. Portanto, o objetivo deste trabalho é levantar informações técnicas necessárias para projetar-se um chassi, além de considerar as dificuldades práticas de aplicar-se certos métodos científicos.

ABSTRACT

The present work gathers information on the technologies CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering), CAM (Computer Aided Manufacturing) and FEM (Finite Elements Method). Nowadays, these technologies are primordial factors in the area of Engineering of Product of automobile industries. The concern of the text is centered in the analysis of a fundamental piece in the construction of a automotive vehicle: the chassis. This analysis is focused in procedures of study of the piece, considerations about its structure and the computacional simulation of stress in a finite elements model. It should be emphasized that the text considers an unpublished proposal of chassis structure, that is still in development phase. Therefore, the objective of this work is to reunite necessary technical information to project a chassis, besides considering the practical difficulties of applying certain scientific methods.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é o estudo e entendimento do estado da arte atual de uma peça automobilística: o *chassi*. Além disso, este trabalho também tem como objetivo a criação de modelos para análise e otimização dos chassis por meio das tecnologias CAD/CAE/FEM. Esta análise será preliminar para um estudo mais profundo posteriormente.

Chassi tem o mesmo significado que suporte, estrutura. Sempre que se monta uma máquina, ou um instrumento, o suporte sobre o qual é montado o conjunto recebe o nome de chassi. Portanto é fundamental o seu estudo para concepção de um veículo.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O chassi é uma estrutura que suporta todos os órgãos mecânicos do veículo automotivo, ou seja, motor (completo, com sistema de alimentação, reservatório e tubo de descarga), suspensões, sistema de freios, rodas, órgãos de direção e sistema elétrico.

Os primeiros automóveis reduziam-se praticamente a um autochassi: a carroceria limitava-se a um cofre de proteção do motor, bancos e poucos revestimentos. O progresso da técnica automobilística permitiu que se revestissem os chassis com carroçarias cada vez mais completas e luxuosas. As indústrias automotivas de caminhões e ônibus passariam a construir chassis e entregá-los aos carrozzeri, para que estes os “vestissem” – freqüentemente, sob encomenda dos próprios clientes.

O chassi evolui de acordo com as mudanças que sofriam os componentes mecânicos. Com a introdução da estrutura autoporte e, mais tarde, da carroçaria monobloco, o autochassi perdeu seu aspecto característico, encontrável atualmente apenas nos chassis dos veículos de corrida (fórmulas e protótipos) e caminhões. Na maior parte dos veículos modernos não se distingue com facilidade o chassi da carroçaria: as plataformas atuam principalmente como elementos de suporte, e pequenos chassis auxiliares suportam o grupo motopropulsor e as suspensões.

O antigo autochassi absorvia diversas funções, principalmente a de resistência estrutural. Nos veículos atuais, mesmo quando o chassi se mantém separado do habitáculo, este suporta, pelo menos em parte, as solicitações transmitidas pelo motor, pelos freios e pelos calçamentos das estradas através das rodas. Isso explica a tendência – que se tornou cada vez mais freqüente – de não se construírem carroçarias fora-de-

série, que se observa desde o início da década 70. A introdução de normas de segurança – que prevêem provas de choque contra barreiras – talvez contribua para o retorno às formas do autochassi original, que tinha importância fundamental da absorção dos choques.

Explicando melhor tecnicamente, o chassi mais comumente usado é formado por duas longarinas ligadas entre si por várias travessas, que são peças de aço estampado com seção em forma de “U”, tubular ou retangular, de formas variadas. As longarinas costumam ser curvas na parte posterior, com a finalidade de permitir as oscilações verticais do eixo traseiro. As longarinas fecham-se na parte dianteira, estreitando o chassi, para que as rodas dianteiras, que são as diretrizes, tenham espaço livre e não virem de um lado e do outro. As extremidades das longarinas, que estão curvadas, chamam-se mãos dos feixes porque é neste ponto que se articulam estas peças.

Sobre a armação, montam-se os elementos da carroceria, sendo esta construída antigamente com armação de madeira, mas atualmente com peças metálicas que têm grande resistência e rigidez, sendo ainda muito leves. São fixadas ao chassi por meio de solda elétrica ou parafusos de fixação, interpondo-se, às vezes, arruelas de borracha, devendo-se verificar periodicamente essa fixação a fim de evitar a oxidação.

Na parte inferior do chassi é fixada a suspensão, que prendem as rodas. Com a finalidade de rebaixar o máximo possível o assoalho do carro, as longarinas e travessas são encurvadas cada vez mais, para adaptar-se às conveniências da colocação dos mecanismos e carroceria.

O motor é fixado ao chassi de três maneiras: por três pontos (mais comum), dois pontos (fixação Chrysler) e por quatro pontos. As fixações por três pontos utilizam grossos tacos de borracha sintética, com o propósito de que as vibrações produzidas pelo movimento alternado das bielas e pistões não sejam transmitidas ao chassi, deste para a carroceria, e conseqüentemente para os passageiros. Na fixação por dois pontos, apesar das fixações serem grandes, o motor tem certa liberdade de movimento oscilatório, e por causa disso, costuma-se fazer com que os apoios sejam arranjados de tal forma que o eixo de oscilação passe pelo centro de gravidade do motor, tornando os esforços torcionais mínimos. A fixação de quatro pontos é mais usada em caminhões do que em carros, por ser mais rígida e ter que sustentar um motor maior e mais pesado.

Para finalizar, a carroçaria é definida como toda a cobertura que proporciona aos ocupantes, a proteção adequada contra sol, chuva, vento, poeira, etc. Pode ser construída

separadamente e presa ao chassi, ou pode , como já vimos, formar com o assoalho um conjunto monobloco.

A carroçaria é fabricada em chapa de aço, podendo ser uma única peça ou mais de uma, soldadas ou parafusadas entre si. Dentro de uma indústria automobilística, a carroçaria é construída numa fábrica à parte, que se dedica só a isso.

3. ESPECIFICAÇÕES DE EXIGÊNCIAS DE PROJETO

Um bom chassi deve cumprir, de modo satisfatório para o cliente, as seguintes funções (que são, na verdade, necessidades e exigências do consumidor):

- Deve resistir as solicitações estruturais, tais como o peso dos componentes (motor, transmissões, carroceria, carga, passageiros, etc...);
- Deve ser capaz de resistir as forças transmitidas pelo motor, pelas transmissões, pelos eixos e pelas suspensões durante a operação normal do veículo. Os esforços que o chassi sofre, quando o veículo está andando, são violentos e, por isso, ele deve ter um formato que seja resistente;
- Também pode ser projetado para minimizar os efeitos das vibrações transmitidas pelo solo e pelo motor, tornando-se uma espécie de apoio ao sistema de suspensão;
- Pode também ter a função de absorção de choques, tendo o objetivo de proporcionar maior segurança ao usuário contra impactos e acidentes.

4. CONJUNTO DE SOLUÇÕES VIÁVEIS

As soluções consideradas neste trabalho são as existentes no mercado atual de veículos automotivos (ou seja, os tipos comercialmente viáveis e disponíveis). A seguir, serão expostos os principais modos de construção de chassis:

4.1. Chassi Escada

A parte inferior da carroceria de um veículo consiste numa estrutura enrijecida por meio de dobras e encaixes de reforço. Dependendo de sua construção, pode assumir função portante autônoma.

Os principais tipos de construções de chassi escada são com longarinas de aço paralelas, curvas ou em “X”. O modelo que não possui a peça em “X” confia a rigidez transversal à carroceria. No modelo que possui as longarinas em “X”, as travessas transversais centrais tornam-se flutuantes. O “X” melhora a resistência à torção. É importante que o chassi resista bem a torção, para impedir que a carroçaria também se torça (isto levaria a movimentos das portas, podendo até abri-las).

Portanto, o chassi escada é uma sólida viga armada horizontalmente. Normalmente, este tipo de chassi fica sujeito a todos os esforços do veículo e a carroçaria é apenas o elemento de cobertura, para abrigar os passageiros.

Basicamente, os chassis escada são construídos com duas longarinas de aço ao longo do veículo, que são fixadas por meio de várias travessas menores, perpendiculares. Todas as travessas são rebitadas entre si, de maneira a formar uma única estrutura sólida.

As longarinas e travessas de aço são fabricadas com chapa de aço bastante grossas, que são pré-moldadas numa prensa e ficam com o formato de um “U”. O formato em “U” é utilizado para que as longarinas e travessas adquiram maior resistência. Eles servem ainda como dutos para aeração, aquecimento e abrigo para fios elétricos.

Suas partes mais expostas exigem tratamento anticorrosivos para garantir a integridade da estrutura. A fadiga desta última aumenta de acordo com as solicitações (flexões, torções e vibrações).

O chassi escada de construção mais simples é o paralelo, no qual todas as vigas são retas. Sua montagem é a mais simples. Os chassis brasileiros são, em sua maioria, deste tipo. A figura a seguir mostra um chassi escada de um modelo de caminhão Mercedes-Benz.



FIGURA 1 – Exemplo de chassi escada

4.2. Chassi Monobloco

O chassi monobloco foi primeiramente idealizado por Vincenzo Lancia em 1922. No princípio, ele pretendia obter uma estrutura mais resistente e leve para o chassi, que seria obtida com a criação de “caixas”. Desse modo, o chassi não se limitaria a uma estrutura de plataforma, mas seria integrado à carroceria. A própria carroceria se une ao plano do assoalho formando um único conjunto. Nos veículos monoblocos, todo o conjunto trabalha. Os esforços são suportados, simultaneamente, pelo chassi e pela cobertura.

Portanto, o chassi tipo monobloco (ou chassi de estrutura única) aproveita a armação metálica da carroceria para formar uma verdadeira viga armada na largura e na altura, que aumenta de modo notável a rigidez do veículo.

Portanto, no monobloco, a carroceria é construída de maneira tal que recebe todos os esforços suportando os pesos, durante o movimento do veículo. O assoalho, as laterais e o teto da carroceria são construídos de maneira tal que trabalham como se fosse um conjunto único. A vantagem disso se sente imediatamente no peso, pois uma carroceria monobloco é bem mais leve. Não pense, porém, que apenas veículos pequenos utilizam este sistema, sendo usado até em grandes veículos. É o caso de veículos de carga, em que tanto a cabina do

caminhão quanto a carroçaria inteira do ônibus são construídas com base neste sistema.

Entretanto, esse chassi não foi utilizado durante muito tempo, devido à dificuldade de fabricação de peças curvas. Sua fabricação só foi viabilizada algumas décadas à frente, quando seu custo de fabricação se tornou economicamente viável. Um exemplo de aplicação recente é a figura a seguir, um chassi monobloco de um modelo de ônibus Mercedes-Benz.

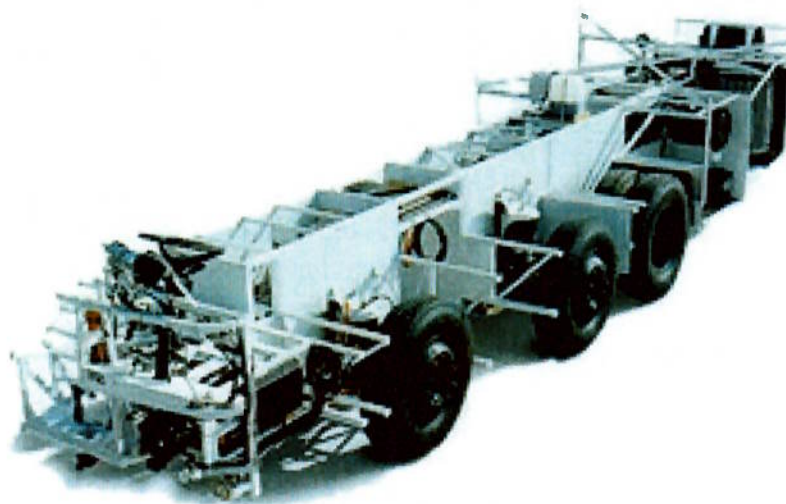


FIGURA 2 – Exemplo de chassi monobloco

4.3 Chassi Plataforma

O chassi tipo plataforma é baseado (como o próprio nome diz) em uma plataforma metálica (que é na verdade uma chapa estampada de grande espessura) que constitui a base da construção do chassi. Sobre essa plataforma é construída uma estrutura metálica (geralmente aço), a qual é constituída de várias travessas, tanto horizontal quanto verticalmente. Em seguida, são colocadas chapas metálicas (geralmente aço ou alumínio) a fim de fechar a estrutura de travessas.

A carroçaria (constituída de travessas e chapas) não possui função de auxiliar na resistência estrutural do chassi. Portanto, é apenas um habitáculo, como a carroçaria no modelo escada.

É a estrutura metálica que suporta a carroceria e a maioria dos órgãos do chassi. Pode ser perfilado, tubular ou estampado em chapa. Os quadros de chassi plataforma, tubulares ou de perfis, estão restritos aos veículos mais pesados (ou veículos que por seu uso exigem maior resistência). Os veículos mais leves e baratos tendem a ter a plataforma do chassi em chapa estampada. Também os ônibus, que são feitos para carregar carga delicada estão utilizando cada vez mais chassi plataforma. A foto a seguir é de um chassi plataforma com motor traseiro e suspensão por barras de torção.

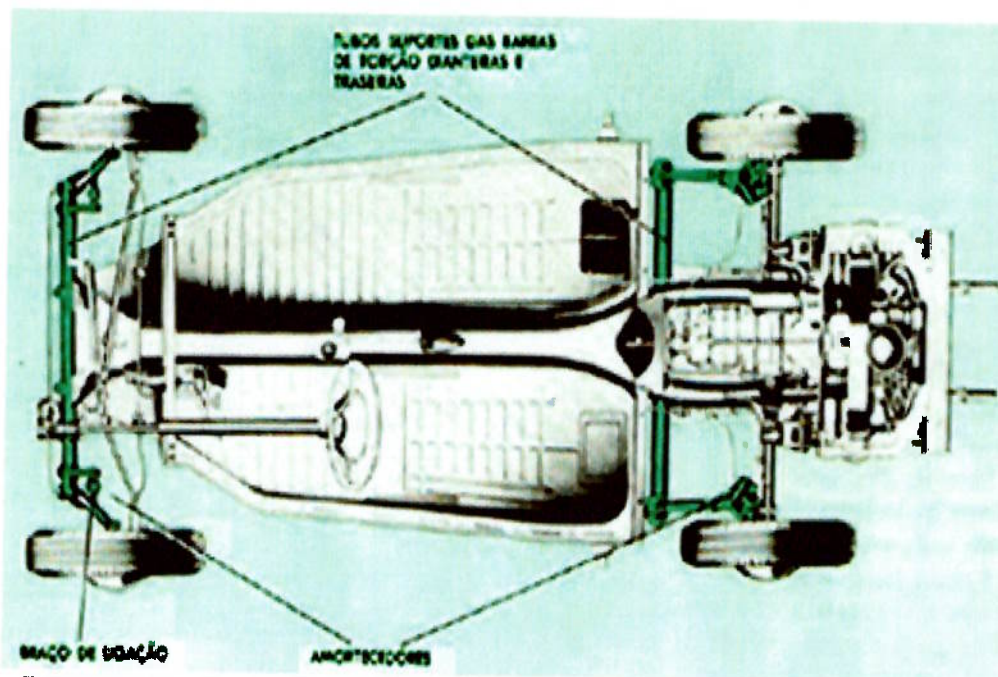


FIGURA 3 – Exemplo de chassi plataforma.

Esse tipo de chassi é mais utilizado em veículos de passeio, como por exemplo, o automóvel Gol.

5. MATRIZ DE DECISÃO

O modelo de matriz de decisão apresentada a seguir tem como objetivo servir como visão geral das opiniões sobre as várias soluções existentes na construção de chassis de veículos (ônibus, caminhões, carros, furgões, etc...).

Por se tratar de opiniões, muitas das notas são subjetivas e refletem a experiência e conhecimento da pessoa que deu a nota. Portanto, não deve ser um estudo conclusivo, mas apenas uma orientação para o projeto.

Característica	Chassis		
	Plataforma	Escada	Monobloco
Dimensões Básicas			
Capacidade de Carga			
Facilidade de fabricação			
Peso Bruto			
Peso Máximo			
Peso Máximo por Eixo			
Estabilidade			
Adaptação a modificações			
Facilidade de transporte			
Distância entre eixos			
Alteração na distância entre eixos			
Dirigibilidade			
Conforto			
Distribuição de peso			
Segurança			
Durabilidade			
Quantidade de juntas			
Qualidade das juntas			
Alinhamento			
Nivelamento			
Prolongamento da estrutura			
Facilidade para reforçar o chassi			
Facilidade de encarroçamento			
Materiais Necessários			
Custo de fabricação			
Modularização			
Manutenção			
Inspeção			
TOTAL			

TABELA I – Modelo da matriz de decisão

OBS: As notas devem ser entre zero até 10.

A seguir, será apresentada a matriz preenchida pelos alunos deste trabalho de formatura. As notas são baseadas nos conhecimentos adquiridos através de pesquisas e da vivência com o assunto em questão.

Características	Chassis		
	Plataforma	Escada	Monobloco
Dimensões Básicas	8	10	5

Capacidade de carga	8	10	7
Facilidade de fabricação	9	8	10
Peso Bruto	8	9	10
Peso máximo por eixo	9	10	7
Estabilidade	9	7	10
Adaptabilidade a modificações	8	10	6
Facilidade de transporte (durante a fabricação)	7	8	10
Versatilidade	9	10	5
Dirigibilidade	9	7	10
Conforto	9	5	10
Distribuição de Peso	7	9	10
Segurança	9	8	10
Durabilidade	10	9	7
Quantidade de juntas	10	8	7
Qualidade das juntas	10	9	5
Alinhamento/Nivelamento (quadro baixo)	9	6	9
Prolongamento da estrutura	5	10	0
Facilidade para reforçar o chassi	8	10	5
Facilidade de encarroçamento	8	7	10
Materiais necessários	9	10	7
Custo de fabricação	8	10	6
Modularização	7	10	6
Manutenção	9	10	7
Inspeção	10	9	8
Facilidade de reparo	8	7	5
TOTAL	220	226	192

TABELA II – Matriz de decisão preenchida pelos alunos

A seguir, será apresentada a matriz preenchida pelo projetista Hermann da área TVC (tecnologia de chassis de caminhão), pertencente à Empresa Daimler-Chrysler do Brasil Ltda. As notas são baseadas nos conhecimentos adquiridos através da experiência do profissional na sua área de atuação.

Características	Chassis		
	Plataforma	Escada	Monobloco
Dimensões Básicas	8	10	5
Capacidade de carga	8	10	7
Facilidade de fabricação	8	10	8
Peso Bruto	9	8	10
Peso máximo por eixo	9	10	7
Estabilidade	9	7	10
Adaptabilidade a modificações	8	10	6
Facilidade de transporte (durante a fabricação)	7	8	10
Versatilidade	9	10	5
Dirigibilidade	9	7	10
Conforto	9	5	10

Distribuição de Peso	7	9	10
Segurança	9	7	10
Durabilidade	9	10	7
Quantidade de juntas	10	8	7
Qualidade das juntas	5	9	6
Alinhamento/Nivelamento (quadro baixo)	9	6	9
Prolongamento da estrutura	5	10	0
Facilidade para reforçar o chassi	9	9	5
Facilidade de encarroçamento	6	8	10
Materiais necessários	9	10	7
Custo de fabricação	8	10	6
Modularização	8	10	6
Manutenção	9	10	7
Inspeção	7	10	8
Facilidade de reparo	8	7	5
TOTAL	211	228	191

TABELA III – Matriz de decisão preenchida pelos projetistas experientes

Pode-se notar que as notas presentes nas duas matrizes não diferem muito, tanto que as somas totais se aproximam.

Através da análise das matrizes de decisão obtidas, temos que o chassi tipo ESCADA foi o escolhido (somas totais 226 e 228).

6. TECNOLOGIAS CAD/CAE/CAM/FEM

É crescente o número de empresas que vêm desenvolvendo os seus produtos com a utilização de modernas ferramentas computacionais como os recursos CAD/CAE/CAM/FEM. Tais recursos têm se tornados fatores essenciais à obtenção de produtos com alta qualidade e desempenho. Em vez de se desenvolver o produto por tentativas e erros, com aumento dos custos de produção, procura-se obter significativos ganhos com o uso da engenharia preditiva, ou seja, o comportamento dos componentes é simulado no computador, em que são previstas as falhas e as conseqüentes correções dos problemas por intermédio das técnicas de simulação.

A seguir, serão apresentados conceitos sobre cada tipo de tecnologia citada.

6.1.CAD (Projeto Auxiliado por Computador)

O sistema CAD é utilizado para se gerar o modelo/desenho do projeto em questão. Através de sistemas CAD, pode-se fazer a concepção geométrica e dimensional do chassi, verificando-se as interferências. As superfícies geradas no CAD serão posteriormente utilizadas em outros “softwares”. Como referência, o modelo 3D é usado para gerar vistas 2D, usando a projeção ortogonal, a fim de se observar detalhes

como curvas, dimensões e outras entidades geométricas. A figura anexa ilustra um modelo CAD de chassi de caminhão:

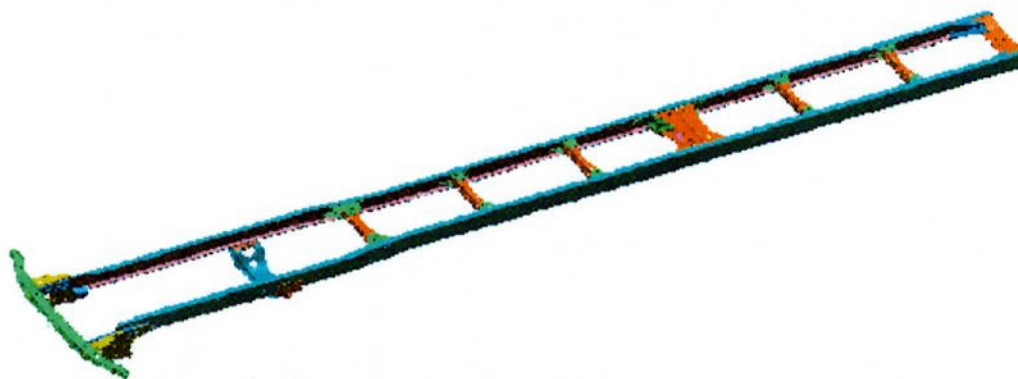


FIGURA 4 – Exemplo de representação CAD de chassi escada

6.2.CAE (Engenharia Auxiliada por Computador)

O sistema CAE se propõe a verificar se a geometria utilizada está apta a suportar as especificações de projeto aplicadas ao modelo. Para se realizar esta verificação, um modelo matemático é aplicado nas especificações de projeto. Na maioria dos recursos de CAE na solução de problemas estruturais, e em outras aplicações mecânicas, são utilizados o Método dos Elementos Finitos (MEF). A figura a seguir exemplifica um exemplo de aplicação do CAE para análise de tensões a partir de um modelo CAD.

6.3. FEM (Método de Elementos Finitos)

É próprio da mente humana querer subdividir os sistemas em seus componentes individuais ou, mais propriamente, em seus elementos. Assim, surge quase que naturalmente a idéia de que, a partir do entendimento do comportamento de cada elemento, poder-se-á entender o funcionamento do conjunto, por mais complexo que possa parecer. Ou seja, compreender o todo, entendidas as partes. Em muitas situações práticas, a identificação dos componentes de um sistema, ou mais particularmente de uma estrutura, parece-nos uma tarefa quase que óbvia. Por exemplo, para uma estrutura espacial metálica constituída unicamente por vigas, é natural identificar os componentes individuais de vigas, ou elementos, que conectados entre si nas juntas ou nós estruturais constituirão o conjunto estrutural.

Outra idéia bastante comum e que se torna fundamental na análise estrutural é a idéia de rigidez. Todos nós temos a idéia de rigidez desde as primeiras aplicações com os elementos elásticos (ou molas) da Física Básica. O conceito de mola equivalente (ou rigidez equivalente) a um conjunto de molas também faz parte do dia-a-dia do técnico. Assim ocorre também ao abordarmos a análise estrutural. A rigidez da estrutura depende da rigidez de cada um de seus elementos. Pode-se avaliar a rigidez da estrutura a partir da rigidez de cada elemento. Eis então, de um modo simples, a primeira idéia do Método dos Elementos Finitos.

A estrutura (ou de forma geral, o componente mecânico) é subdividida em um número finito de partes (os elementos) que são conectados entre si. A estrutura então pode ser representada como uma montagem de elementos que constitui um modelo matemático, também chamado de modelo estrutural ou idealização estrutural.

Diversos outros componentes podem ser representados dessa forma: a caixa estrutural completa de um veículo, componentes de um chassi, pára-choques, eixos, componentes de máquinas, carcaça de diferencial, etc. A figura 1 representa o modelo em Elementos Finitos de um chassi de caminhão. Dois aspectos iniciais chamam a atenção, e que constituem características principais do método de elementos finito:

- A subdivisão da estrutura em elementos, isto é, a malha de Elementos Finitos;
- A escolha do elemento apropriado para modelar uma dada situação física.

A escolha do tamanho adequado da malha não nos parece óbvia em uma estrutura contínua, como no caso do chassi (e realmente não é!). Depende do conhecimento das propriedades do elemento escolhido para representação do problema, que é a mais fundamental característica do Método.

Do ponto de vista prático, os "softwares" de Elementos Finitos oferecem-nos uma biblioteca de elementos do programa, contendo diversos elementos, cada qual tentando representar um diferente comportamento físico conhecido da Mecânica Estrutural (placas, cascas, membranas, sólidos, vigas, etc.). Esse comportamento é descrito por intermédio de funções matemáticas que em última análise contabilizam a

rigidez daquele elemento individual. Dispondo da biblioteca de elementos, podemos avaliar a rigidez da estrutura inteira a partir da rigidez de cada elemento.

Tendo montado o modelo estrutural, podemos determinar a configuração deformada da estrutura no computador, por intermédio dos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. Estamos então em condições de determinar o estado de tensões na estrutura e fazer a avaliação de sua resistência mecânica.

Assim, o Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta extremamente valiosa para ajudar as equipes de engenharia em uma das tarefas mais importantes no desenvolvimento de um produto, que é determinar o seu comportamento estrutural e garantir que não haverá falha tanto em condições normais de operação, como em situações críticas de operação, por intermédio da determinação do panorama de tensões no componente.

Para executar uma análise estrutural que conduza a decisões adequadas, devem ser observados alguns pré-requisitos:

- Entendimento claro do problema físico a ser simulado;
- Conhecimento do comportamento estrutural desejado (critério de projeto);
- Propriedades dos materiais envolvidos;
- Características dos elementos finitos envolvidos na análise;
- Definição da região objeto de interesse, definindo a extensão do modelo de análise;
- Condições de contorno - cargas e vínculos da estrutura.

Assim, o modelo proposto deve representar trecho a trecho da forma mais acurada possível o que ocorre na estrutura real. Essa representação só poderá ser feita se o analista estrutural conhecer o comportamento dos elementos finitos disponíveis e identificar na estrutura objeto de análise esse comportamento, de sorte a utilizar o elemento adequado para cada aplicação. Em resumo, os programas de elementos finitos não são, sob hipótese alguma, ferramentas mágicas, que independem do julgamento do analista, pois constituem um auxílio

a ele, que deve conhecer os conceitos fundamentais do MEF, e o comportamento dos principais elementos da biblioteca do programa. Uma base conceitual adequada é o melhor caminho para obter bons resultados nas aplicações práticas do dia-a-dia com os softwares de Elementos Finitos.



Figura 5 - Modelo de chassi de caminhão para simulação em computador utilizando o Método dos Elementos Finitos.

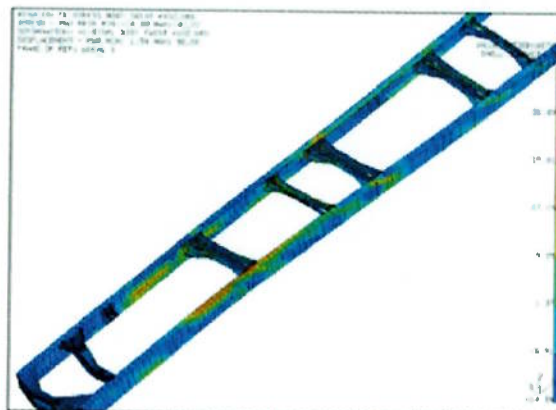


Figura 6 - Representação da simulação no computador do chassi deformado, indicando as regiões mais solicitadas.

6.4.CAM (Manufatura Auxiliada por Computador)

O sistema CAM pode simular um processo de fabricação, indicando a melhor disposição do maquinário disponível. Iniciando a partir dos modelos gerados pelo CAD e pelas confirmações obtidas através de estudos do CAE, os elementos requeridos para fabricação são definidos pelo CAM. Pelas superfícies geradas pelo CAD, o melhor caminho das ferramentas é definido. Este processo é também relacionado com as

dimensões das ferramentas e com o acabamento superficial desejado das ferramentas de estampagem. Depois da definição da melhor trajetória, o sistema simula graficamente a operação de usinagem e gera um programa CNC para o maquinário.

7. MONTAGEM DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

7.1 Escolha de um modelo CAD de chassi escada

Existem muitas configurações de chassis escada devido às diversas categorias de capacidade de carga existentes no mercado. Nas figuras seguir seguem alguns tipos de configurações já conhecidas e previamente estudadas.

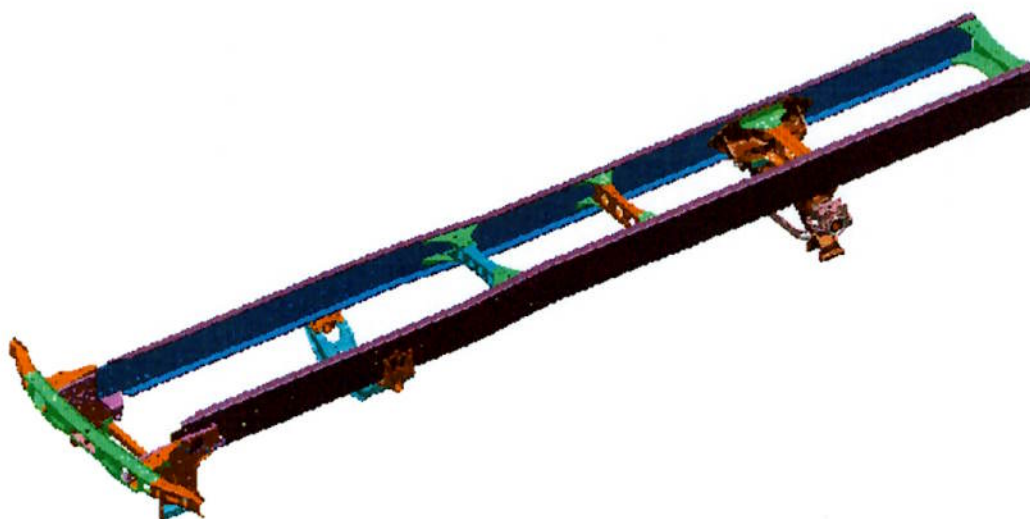


FIGURA 7 – Exemplo de representação CAD de chassi escada

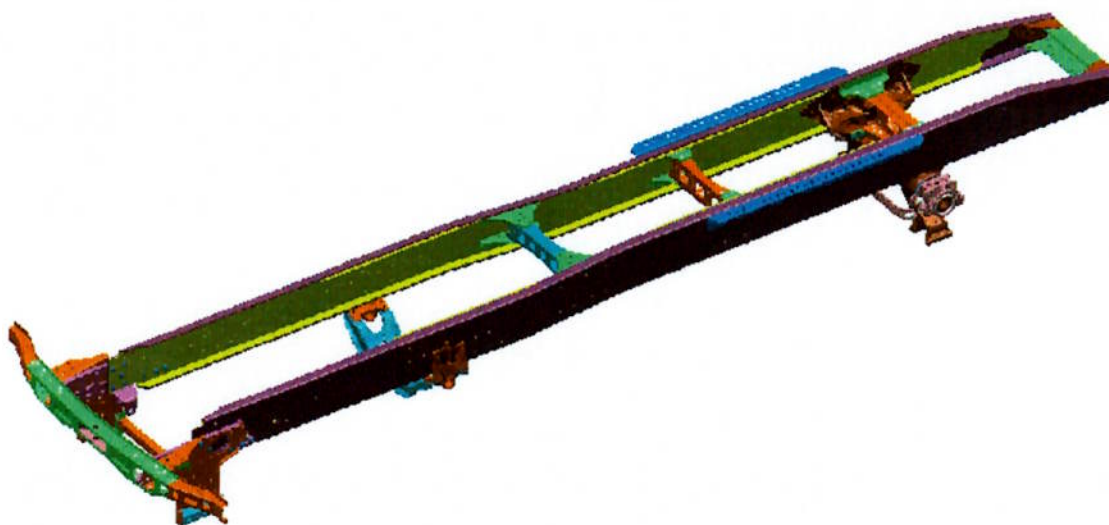


FIGURA 8 – Exemplo de representação CAD de chassi escada

Uma análise de elementos finitos considerando estas configurações não representaria um estudo inovador na respectiva área. Portanto buscou-se realizar um trabalho que apresentasse novidades, em que fosse considerado um modelo diferente dos convencionais.

A adoção de um modelo totalmente novo e ainda em fase de estudo representa a chance de se desenvolver um projeto inovador e que possibilite possíveis considerações necessárias ao estudo por causa do seu estágio de evolução. Esse critério de escolha foi anteriormente discutido tanto com projetistas profissionais, assim como com o professor orientador.

7.2. Diferenças entre modelo convencional e a nova proposta

As páginas seguintes apresentam as seguintes configurações:

- Família FSK (Mercedes-Benz): armações completas convencionais de chassis escada;
- New Frame Concept: nova proposta de estrutura (parcial) adotada para estudo;

**Perfil de Longarina
300x70x7 LNE50**

Utilização de
parafusos KTO

Travessas tipo U
(Actros)

Sem Fischbauch

Travessa
LS2638-import

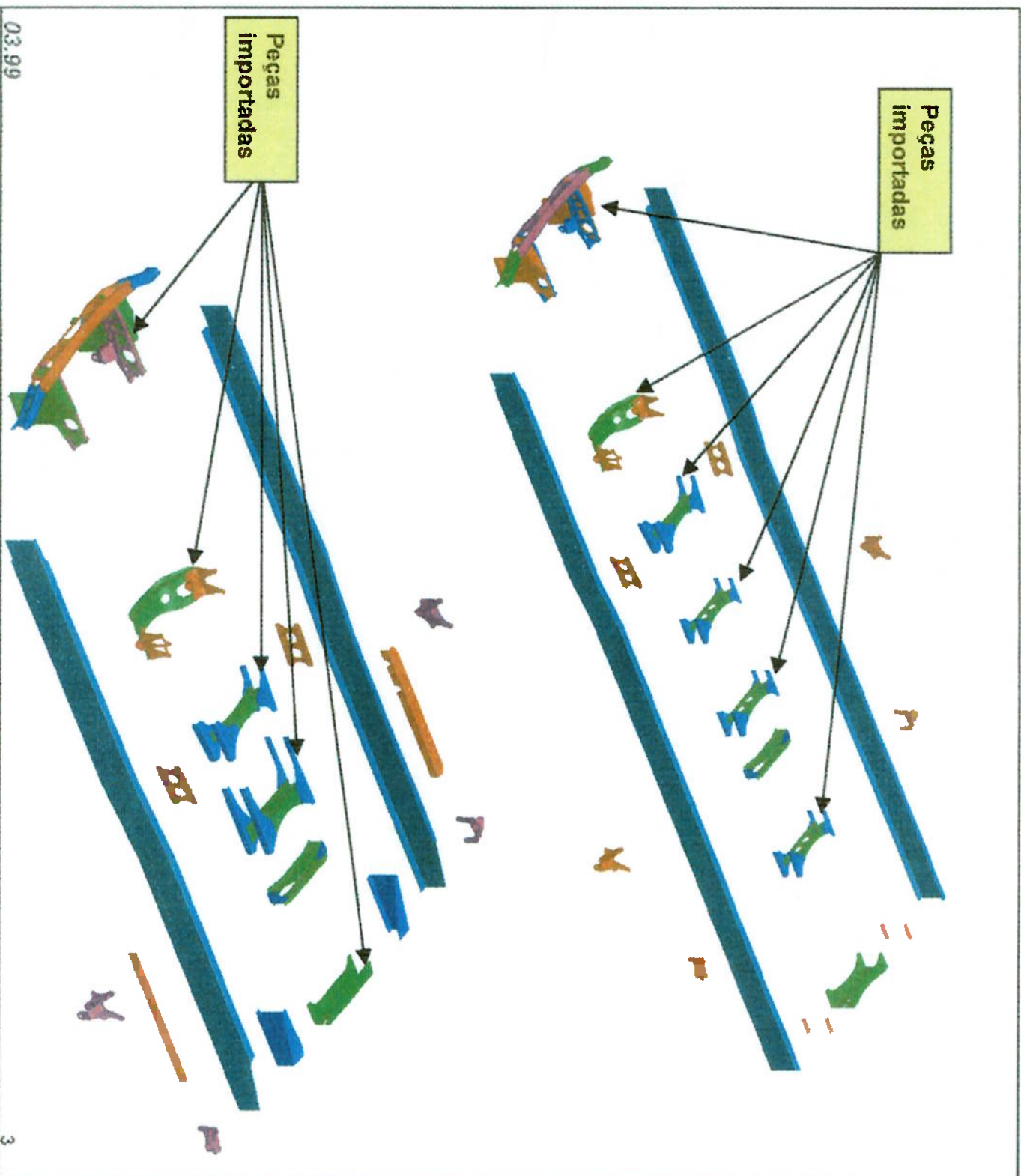
Sem Fischbauch

Mancais
Wartungsfrei

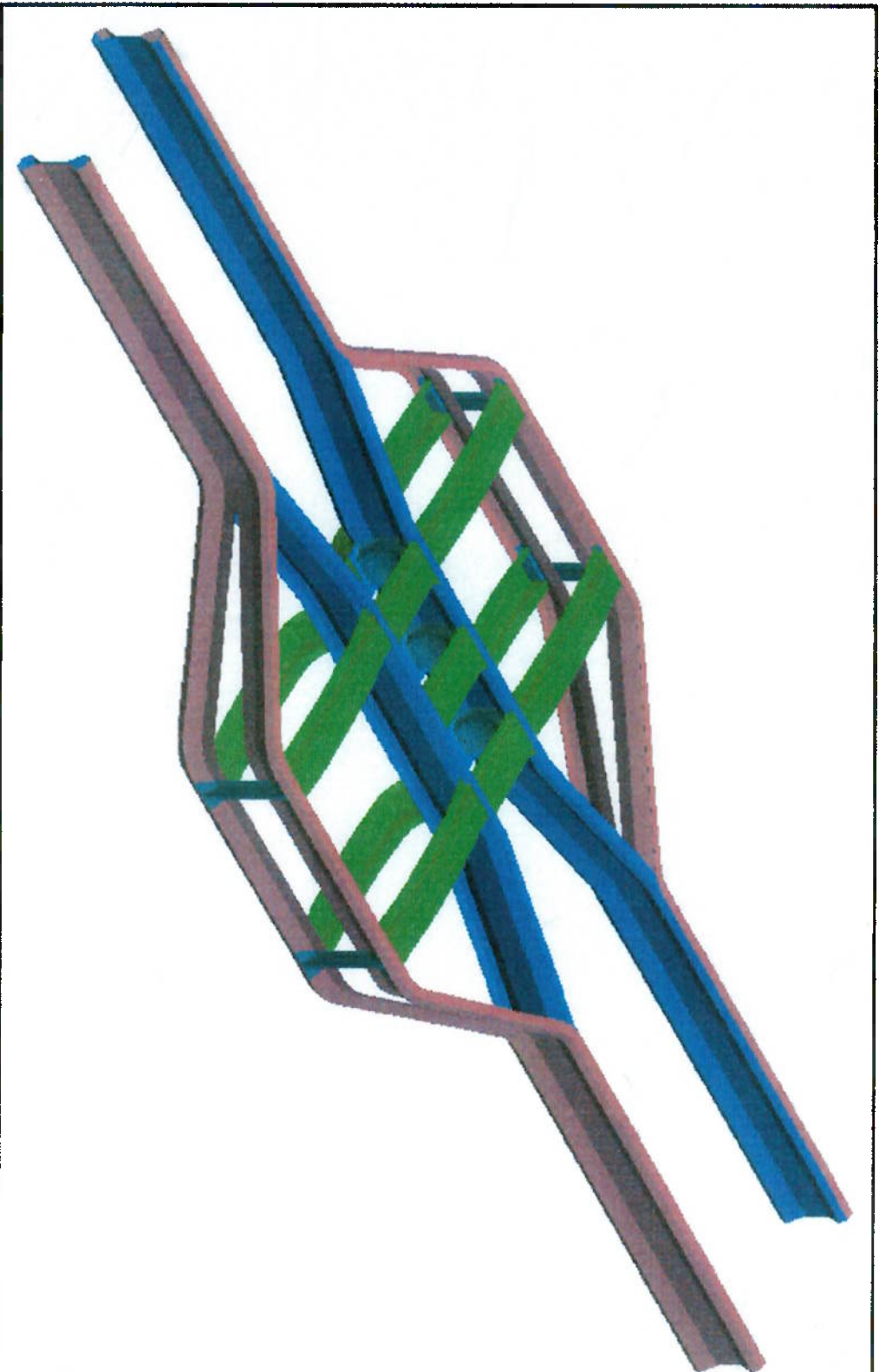
offset

Travessa Omega
(Actros)

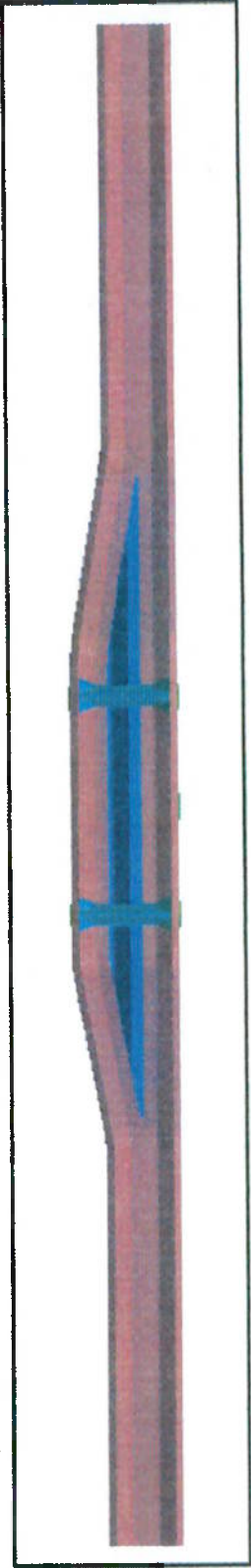
Conjunto
Rahmenkopf (Actros)



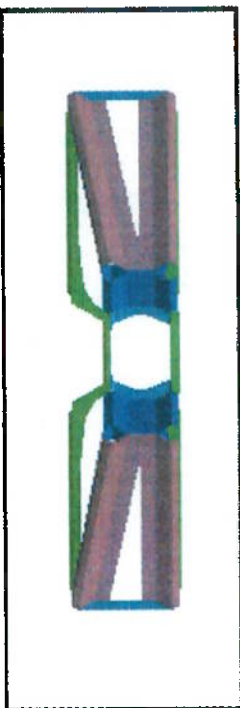
NewFrameConcept



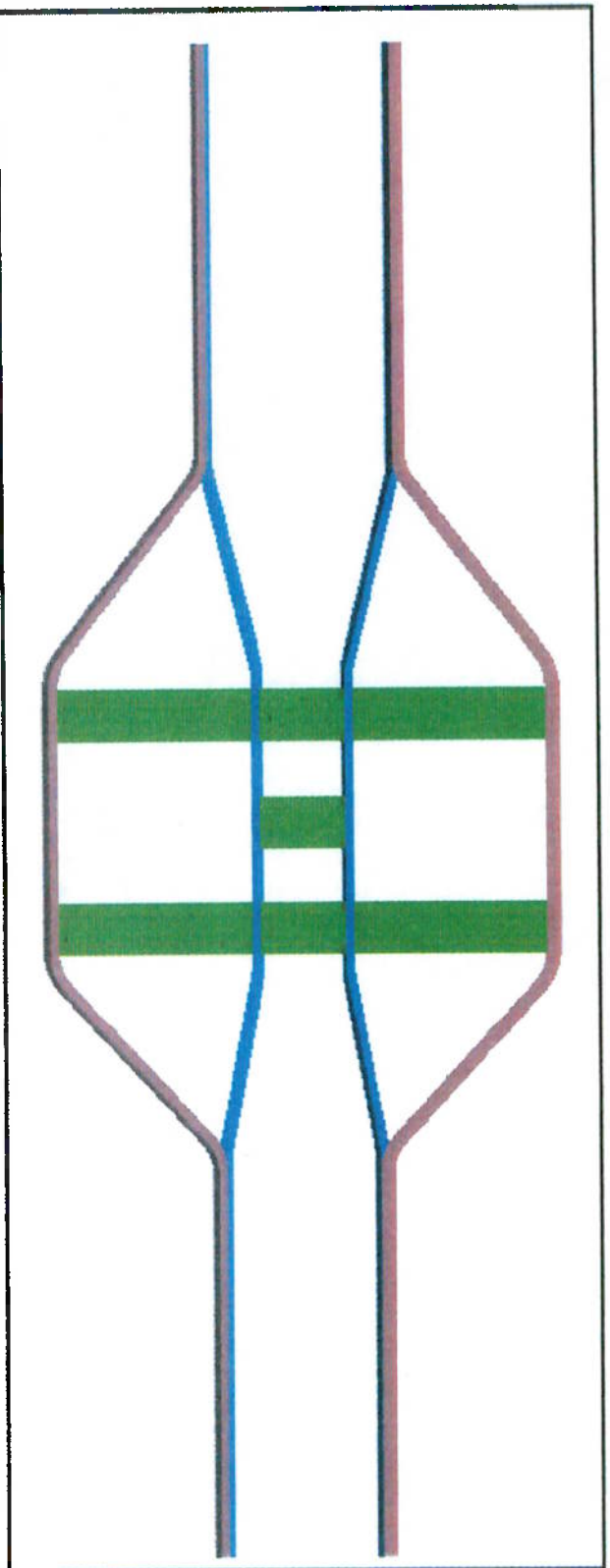
Isometrische Ansicht



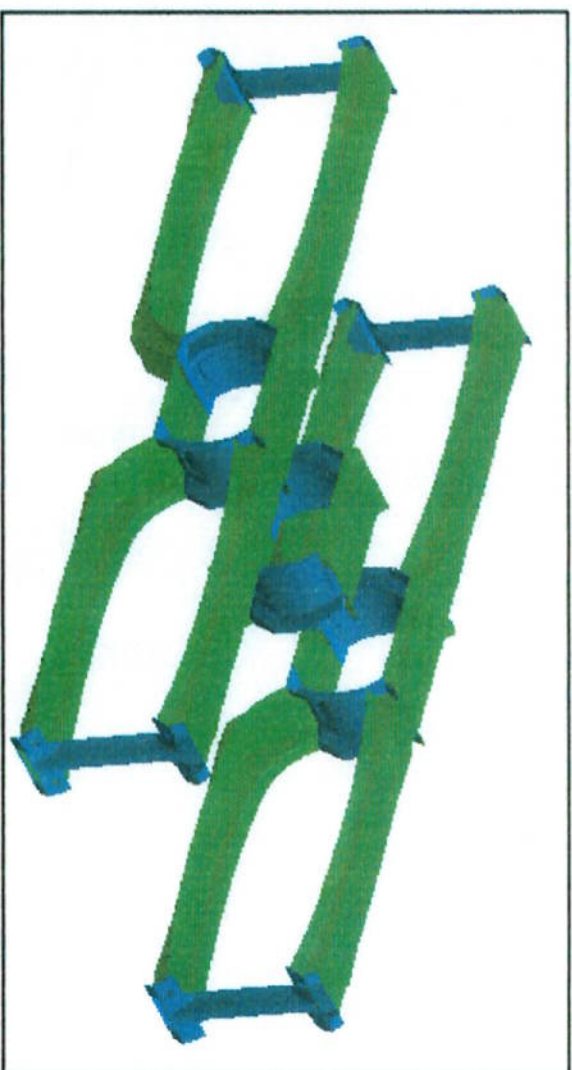
Seitenansicht



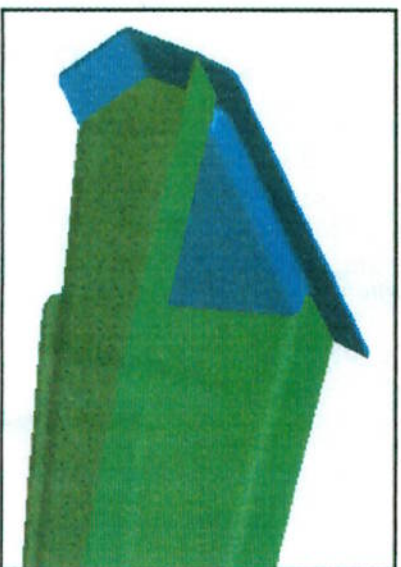
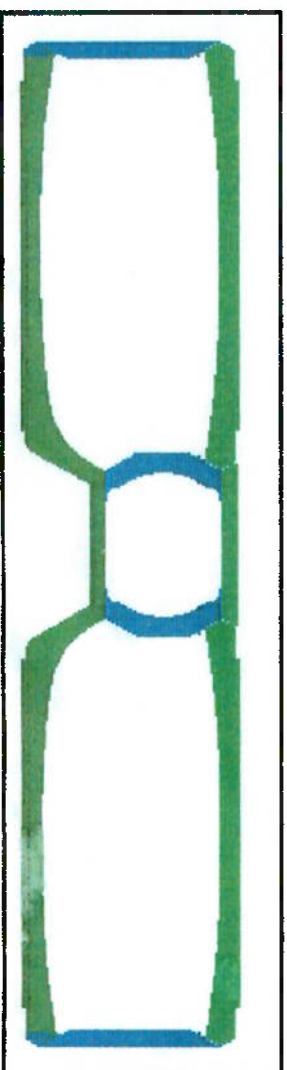
Frontansicht



Draufsicht



Travessas e Chapas de amarração



Primeiramente, deve-se esclarecer que o novo modelo está apenas parcialmente desenvolvido, isto é, não estão definidas ainda como serão as partes dianteiras e as partes traseiras da estrutura e os seus modos de ligação com o modelo em questão. Destaca-se ainda a possibilidade de mudanças na estrutura devido à inexistência das partes mencionadas anteriormente.

Começando a comparação entre os modelos apresentados, de início percebe-se nitidamente no modelo FSK que as duas longarinas paralelas de aço ao longo do veículo são fixadas por travessas perpendiculares rebitadas. No novo conceito, as longarinas que percorrem o perfil do caminhão não são retas (possuem uma curvatura central), mas possuem uma configuração simétrica facilmente percebível nas figuras.

Outro ponto passível de discussão é a utilização de chapas finas (em torno de 3 mm) para a fabricação das longarinas e travessas presentes na nova estrutura. Convencionalmente, utilizam-se chapas grossas a fim de se obter uma maior resistência por parte da estrutura. Este fato não é imperativo na estrutura proposta devido ao conceito do projeto inovador ser considerado em 3 dimensões. A utilização de um modelo tridimensional admite que exista resistência nos três eixos existentes e, portanto, permite que o projetista possa criar estruturas mais leves (economia de material) com resistências semelhantes aos dos projetos usuais.

Além disso, as travessa e chapas de amarração do novo conceito foram especialmente desenvolvidas para esta aplicação. Pode-se notar que elas possuem geometrias e disposições bem diferentes das travessas do modelo convencional.

Acredita-se que ocorrerão mudanças neste novo modelo devido a pontos ainda em discussão sobre sua utilização e fabricação em série.

7.3 Metodologia Planejada

Para a análise do modelo de chassi escolhido foi planejada a seguinte metodologia:

- Primeiramente será obtido um modelo CAD no software CATIA do chassi escolhido. Este modelo foi desenvolvido por projetistas experientes da área de chassis de caminhões da Mercedes-Benz.
- O segundo passo será a obtenção do modelo do chassi em padrão IGES (IGES é a sigla para Initial Graphics Exchange Specification) para que pudesse ser utilizado por um software de análise de elementos finitos. Para a conversão do modelo em CAD para IGES foi utilizada a função CATIGE do software CATIA. Esta conversão é realizada por profissionais experientes na área de design em CAD da Empresa T Systems.
- O terceiro passo será a importação do modelo em IGES para o software de elementos finitos através de um interface CAD. O software de elementos finitos escolhido chama-se Algor. Este programa possui incorporada nele a tecnologia denominada “Houdini”, que permite a leitura do modelo IGES e possibilita a posterior montagem de uma malha de elementos finitos (MEF) a fim de se realizarem as simulações propostas.
- O quarto passo será a montagem de uma malha de elementos finitos (MEF) sobre o modelo do chassi através do software escolhido Algor.
- O quinto passo será a definição do tipo de elemento finito a ser considerado na análise. Neste experimento serão considerados elementos não-lineares para que a simulação possa produzir resultados mais realistas.
- O sexto passo será especificar os materiais que serão utilizados na fabricação da estrutura. O material a ser considerado na confecção do modelo é o aço LNE 50 na norma ABNT (ou aço E500LM na notação DIN).
- O sétimo será a definição das condições de contorno envolvidas nas premissas adotadas e a aplicação de esforços externos típicos de um chassi de caminhão sobre a MEF. Será adotada a metodologia de aplicação de cargas distribuídas em superfícies (análise não-linear).

- Por último será feita uma análise criteriosa dos resultados obtidos. Isto inclui a obtenção da distribuição das tensões e deformações devido aos carregamentos que seriam tanto estáticas quanto dinâmicas. Além disso, será feita uma síntese dos dados obtidos e elaborado um relatório descritivo acompanhado de algumas conclusões.

7.4 Execução do Projeto

Primeiramente foi obtida uma cópia simplificada do modelo em IGES. A figura a seguir ilustra o modelo citado.



FIGURA 14 – Modelo CAD obtido (no formato IGES) do novo conceito de chassi escada

Observa-se que o modelo representa apenas metade do chassi. A representação de metade do chassi foi feita para diminuir o tempo de processamento computacional. Esta simplificação é possível devido à simetria do chassi em questão.

Após a obtenção do modelo, fez-se necessário à instalação de 2 softwares: Algor e CATIA. A plataforma CATIA será utilizada para aplicação de algumas premissas:

- Construção de uma chapa de 12 mm de espessura sobre as duas travessas traseiras a fim de se obter uma carga distribuída sobre a superfície;
- Elementos que impeçam o movimento ao longo do eixo y (direção das travessas);
- Travessas adicionais de 5mm de espessura em “U” a fim de promover a estabilidade nas extremidades das longarinas.

O software Algor representa o software que formará a MEF a partir do modelo CAD disponível. A utilização deste software será explicada em um item a seguir.

Infelizmente ocorreram umas séries de imprevistos que acarretaram na impossibilidade da aplicação da metodologia planejada. Os problemas ocorridos são:

- A transformação do modelo CAD desenvolvido no CATIA para o padrão IGES apresentou-se muito problemática devido ao excessivo número de elementos que o constituíam;
- Não foi possíveis a abertura e posterior modificação no software CATIA instalado;
- O Algor, apesar de importar o modelo IGES, não possibilitava sua exportação e nem a edição das superfícies existentes;
- Não foi possível realizar a operação de meshing devido a problemas no modelo (número excessivo de superfícies existentes, superfícies muito extensas e apresentando inconsistências);

Por causa destas dificuldades, decidiu-se que a metodologia planejada será aplicada de uma maneira diferente. A partir do modelo IGES e das figuras disponíveis, será feito no próprio software Algor (através de seu editor gráfico SuperDraw) um modelo aproximado da longarina. Assim, a simulação planejada será aplicada na estrutura da longarina desenhada e seus resultados expostos e analisados.

8. SIMULAÇÃO ESTÁTICA

8.1. Estudo da longarina

Como foi explicado no item anterior, decidiu-se construir um modelo aproximado da longarina. Através dos desenhos e do modelo IGES disponível do chassi, desenhou-se um modelo em wireframe (linhas) da longarina como mostra a figura a seguir.

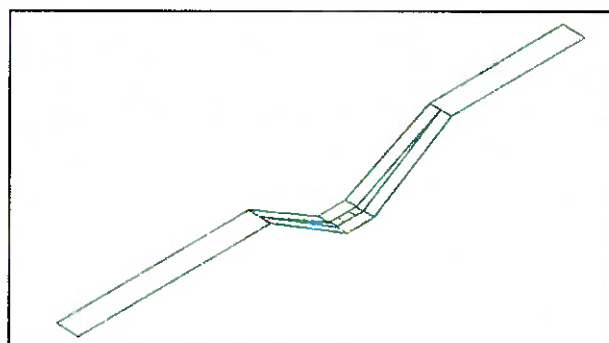


FIGURA 15 – Representação wireframe (linhas) da longarina do novo conceito de chassi escada

A partir do modelo existente, usou-se o módulo Supersurf do software SuperDraw para a criação de uma malha de elementos finitos (MEF). Esta operação compreende os seguintes passos:

- Selecionou-se todas as formas constituintes do modelo da longarina e, assim, gerou-se superfícies (comandos: **"FEA Mesh : Supersurf"** **"Construct : Gpatch : Select : None : All : [Esc] : Gpatch"**);
- Construiu-se a malha nas superfícies (comandos: **"Construct : Quick Mesh : Test"**). Neste ponto a malha ainda não foi gerada em definitivo. Realizou-se um primeiro teste para verificar a possibilidade de construção desta malha no modelo desenhado previamente;
- Podemos verificar que o teste de construção da malha ficou como desejado, portanto podemos gerar a malha em definitivo (comandos: **"File Mesh"**);
- Depois de construída a malha, voltou-se para o Superdraw (comandos: **"F9Top : Done"**).

A figura a seguir mostra a malha construída a partir do modelo desenhado :

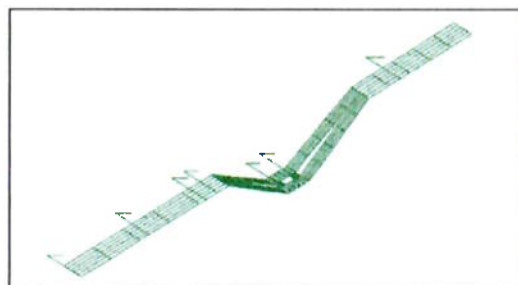


FIGURA 16 – Malha de elementos finitos da longarina (incluindo os carregamentos)

Após a construção da malha, definiu-se o carregamento (comandos: "**FEA Add: Stress and Vibration Analysis: Nodal Forces**"). Os valores dos respectivos carregamentos considerando metade do chassi:

- Motor + Câmbio = 3250 N em dois pontos (total: 15.000 N);
- Cabina = 2500 N em dois pontos (total 10.000 N);
- Bateria ou Escape (em lados opostos) = 850 N em ponto único;
- 2 Tanques de Combustível = 3000 N em um ponto (total 6000 N);
- Carga da carreta = 75.000 N em ponto único (total: 130.000 N);

Depois, foram definidos os apoios (comandos: "**FEA Add: Stress and Vibration Analysis: Boundary Conditions**"). Definiu-se dois vínculos que permitem apenas a rotação na direção perpendicular ao plano que contém as vigas das extremidades da longarina. A posição dos apoios foi:

Apoio dianteiro: 1400 mm da ponta da longarina;

Apoio traseiro: 4600mm do eixo dianteiro (distância entre eixos);

Agora foram definidas as condições de controle do modelo. Para isso, abriu-se a janela da função "**model control data**". Nessa janela, definiram-se as seguintes características:

- Tipo de análise: Análise de carregamento vertical estático ("**Linear Static Stress**");
- Tipo de elemento: "**Beam**";
- Dados: Valores Default;
- Material: Aço endurecido (Reinforced Steel);
- Variáveis Globais: Gravidade (3 vezes o valor default);

Após definir estas condições, partiu-se para uma checagem do modelo (comando; "**Check**"). Após a verificação, realizou-se a análise propriamente dita (comando: "**Analysis**").

9. RESULTADOS DA ANÁLISE MEF DA LONGARINA

Depois de realizada a análise citada no item anterior, iniciou-se o processo de avaliação dos resultados.

A figura a seguir demonstra os deslocamentos sofridos na estrutura devido ao carregamento.

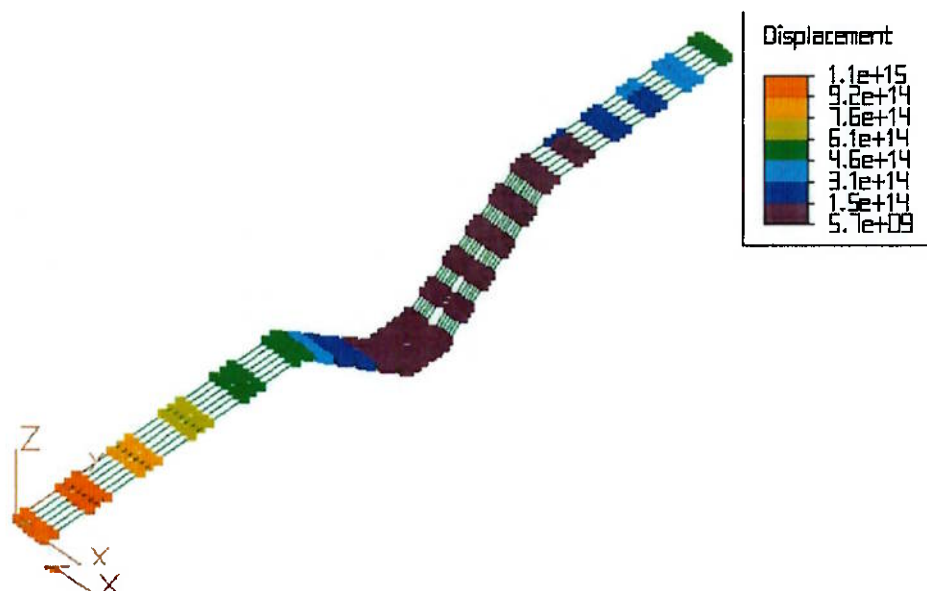


FIGURA 17 – Representação dos deslocamentos no modelo simulado

A figura seguinte mostra o pior caso de distribuição de tensões na malha considerada.

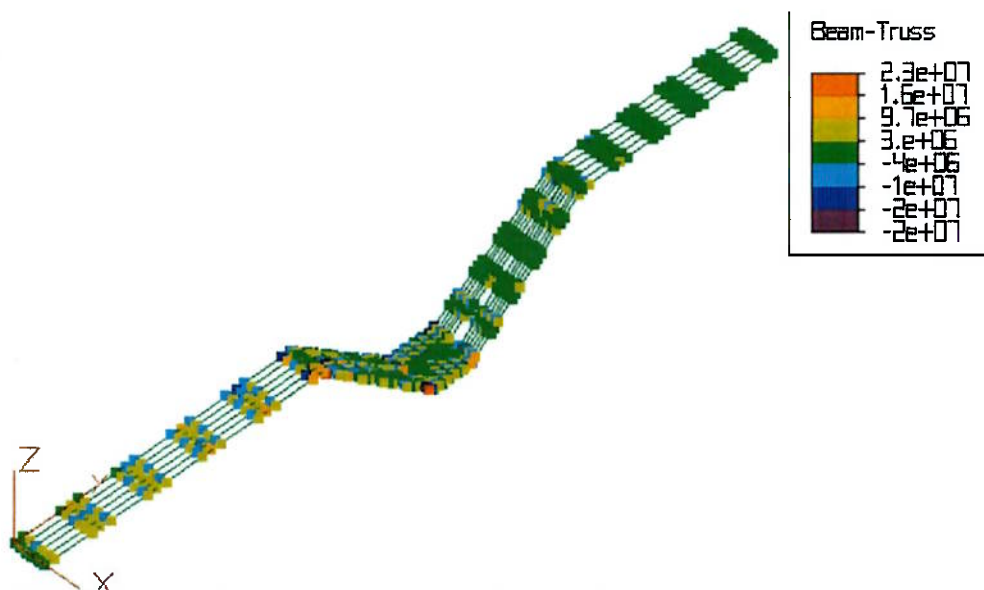


FIGURA 18 – Representação da distribuição de tensões no pior caso considerado na simulação

A próxima imagem mostra tensões na direção principal (eixo X) devido às forças existentes.

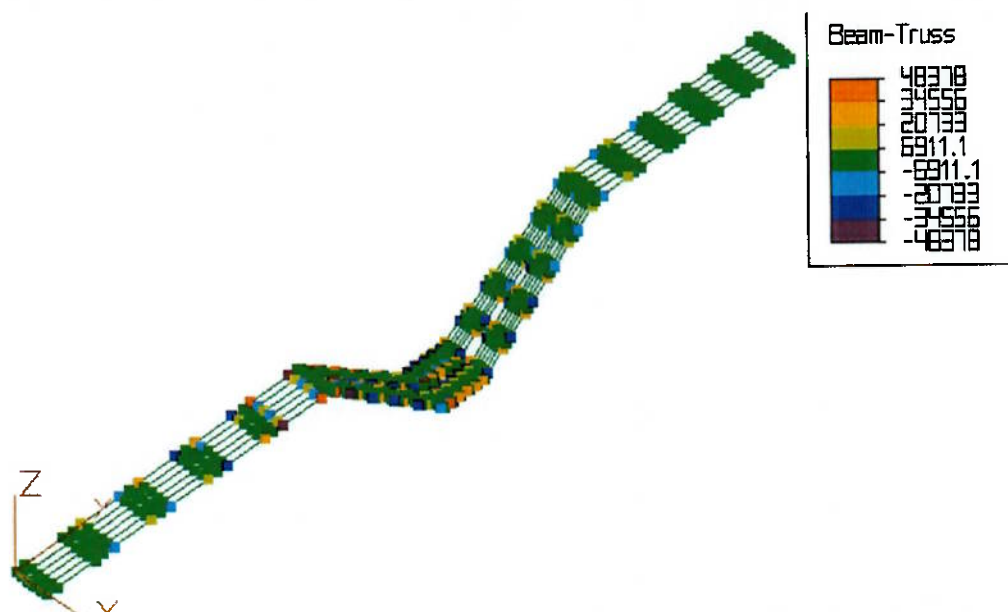


FIGURA 19 – Representação da distribuição de tensões na direção principal devido ao carregamento

A imagem a seguir demonstra a variação de tensões devido ao esticamento da estrutura (strain).

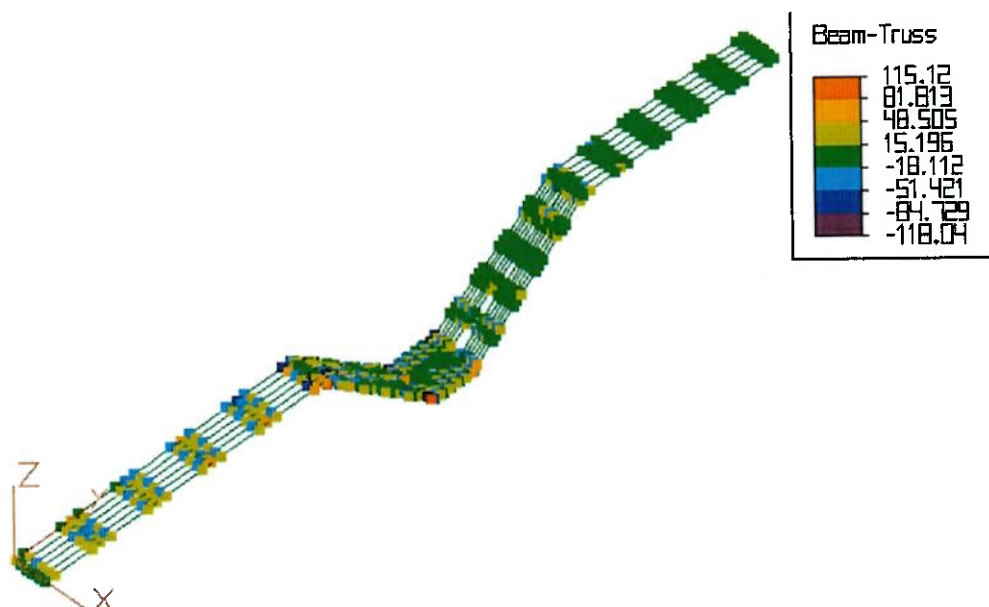


FIGURA 20 – Representação da variação de tensões devido ao esticamento da estrutura do modelo simulado

10. TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ALGOR

Este item tem como objetivo descrever o uso do software Algor neste projeto.

O Algor foi utilizado para abertura do modelo IGES do chassi fornecido pelos especialistas em CATIA. O Algor possibilitou (em um primeiro momento) apresentar a imagem em CAD do modelo.

Entretanto, ao realizar a função “meshing” (operação necessária para a simulação do modelo), o Algor não realiza a operação após atingir a superfície 187 no processamento.

Suspeitou-se primeiramente da capacidade de memória do microcomputador utilizado, hipótese descartada, pois ao tentar-se realizar o “meshing” em uma workstation com maior capacidade de processamento e memória disponível, o comportamento do software foi idêntico.

Suspeitou-se então do modelo fornecido pelos especialistas em CATIA. Realizou-se uma análise junto a estes especialistas, que constataram que a superfície 187 era muito maior que as demais. Como medida corretiva, fez-se a edição desta superfície, de modo a transformá-la em várias partes menores a fim de facilitar o processamento. Além disso, a própria superfície foi redesenhada e remodelada pelos especialistas. Foi realizada a exportação deste modelo “corrigido” novamente para o arquivo em padrão IGES através da plataforma CATIA. Entretanto, ao realizar-se a operação de meshing no Algor deste novo modelo, o problema ocorreu novamente na mesma superfície 187.

Diante deste fato, outra hipótese foi questionada: a versão do Algor utilizada não conseguiria interpretar o modelo devido ao excesso de superfícies. Portanto tentou-se abrir o modelo em microcomputadores com Algor instalado no laboratório do setor de Projeto e Fabricação - PMC - EPUSP. Os microcomputadores utilizados para tentar realizar o meshing voltaram a apresentar o problema anteriormente citado na superfície 187.

Por causa destes inúmeros problemas encontrados, conclui-se a impossibilidade de se realizar a simulação do modelo parcial fornecido. Portanto, foi decidido que seria desenvolvido um modelo aproximado da longarina usando-se o novo conceito no próprio editor gráfico do Algor (chamado SuperDraw) e a simulação realizada sobre este modelo.

11. CONCLUSÃO

Inicialmente, deve-se esclarecer que a decisão de se adotar um conceito novo de chassi tipo escada resultou em diversas simplificações devido ao estágio de desenvolvimento do modelo considerado.

Além disso, considerando as dificuldades encontradas em simular o modelo IGES no software Algor devido aos problemas citados anteriormente, as simplificações e a decisão de se desenhar o formato da longarina no SuperDraw fizeram-se necessárias.

A conclusão final é que se deve buscar uma análise mais profunda e detalhada do modelo. Recomenda-se um modelo mais acurado e uma malha de elementos finitos que represente melhor a realidade. As simulações devem abordar aspectos dinâmicos tais como carregamentos variáveis no tempo e frenagens (simétrica e assimétrica).

Acredita-se que este primeiro passo realizado em estudar tal modelagem é necessário, mas não suficiente para conclusões decisivas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

FEM – Finite Elements Method

MEF – Malha de Elementos Finitos

IGES - Initial Graphics Exchange Specification

FSK –

Referências Bibliográficas

- [1] Arias-Paz, Manuel, Manual de automóveis, 2. ed., São Paulo : Mestre Jou, 1970.
- [2] Crouse, William H, Automotive chassis and body, 3. ed., New York : McGraw-Hill, 1966.
- [3] Manuais de operação de veículos Mercedes-Benz.
- [4] Manual de conservação Bosh.
- [5] Manual para construção de superestruturas Mercedes-Benz.
- [6] Manual do usuário de veículos Mercedes-Benz.
- [7] Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo : Sae Brasil, 1994.
- [8] Material sobre chassis plataforma. Disponível em
<<http://www.histoautomovel.hpg.com.br/chassi.htm>>
- [9] Método de Elementos Finitos. Disponível em:
<<http://www.ERICA.com.br/news/cae.htm>>
- [10] Teoria de chassis. Disponível em:
<http://www.redemarket.com.br/dicas/eng_mecanica/>
- [11] Teoria de chassis de ônibus. Disponível em:
<<http://www.softbus.com.br/tecnologia/tecnologia.htm>>
- [12] Exemplos de chassis. Disponível em: <<http://www.mercedes-benz.com.br/>>
- [13] Informações sobre o software Algor. Disponível em:
<<http://www.algor.com/>>
- [14] Tutoriais do Algor. Disponível em:
<<http://www.pce.com.br/>>