

Sys 1965310

EDUARDO SATOSHI FUGIY

ROGERIO KEIZO NAKANO

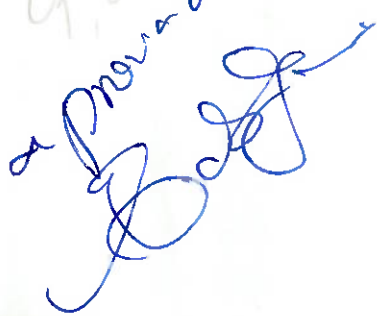
ANÁLISE ESTRUTURAL REALIZADA NO CHASSIS DA PICK-UP
S10 ATRAVÉS DO SOFTWARE - ALGOR

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Graduado em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Edson Gomes

São Paulo
1999

9.0
aprovado


DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que me forneceu condições de completar o curso de graduação em Engenharia, sempre incentivando principalmente nos momentos mais difíceis.

Também dedico este trabalho à minha futura família que se orgulhará do passado por mim vivido durante esta época de faculdade.

Eduardo Satoshi Fugiy

AGRADECIMENTOS

Agradeço o sucesso deste trabalho, aos meus familiares principalmente aos pais que sempre deram um grande incentivo nesta carreira.

Aos meus colegas de curso, ao seu grande companheirismo, e que sempre me auxiliaram nas minhas dúvidas,.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste trabalho.

Rogério Keizo Nakano

Sumário

1	Introdução.....	5
2	Objetivos.....	7
3	Sobre o Método dos Elementos Finitos.....	9
3.1	Processo de Análise por Elementos finitos	11
3.2	Solvers para Análise por Elementos finitos.....	12
3.3	Pós-processamento.....	13
4	Falência em Fadiga.....	14
4.1	Introdução	14
4.2	Observações Históricas.....	16
4.3	A Natureza da Fadiga.....	18
4.4	Carregamento Na Fadiga	23
5	Descrição do problema	28
6	Análise Estrutural.....	31
7	Requisitos de Durabilidade	36
8	Materiais e processos empregados na construção do chassi em estudo	37
9	Custos médios totais referentes a realização dos testes	39
10	Síntese Das Soluções Já Empregadas Anteriormente.....	39
11	Software de análise a ser empregado.....	41
12	Procedimentos adotados na execução da análise	42
13	Modelo Refinado da estrutura.....	45
14	Modelo Simplificado.....	52
15	Resultados Obtidos com o Modelo Simplificado	56
16	Conclusões	63
17	Referências Bibliográficas.....	65

Índice de figuras

Figura 3.1: ilustrativo para o MEF.....	9
Figura 3.2: exemplo de aplicação do MEF.....	9
Figura 3.3: exemplo de construção de malha	11
Figura 3.4: exemplo de componente pos-processado pelo MEF	12
Figura 4.1: Dados registrados por Wohler, em uma investigação sobre fadiga em eixos de aço.....	17
Figura 4.2a: figura ilustrativa das linhas e bandas de escorregamento em uma superfície cristalina sobre a influência de uma tensão de cisalhamento.....	20
Figura 4.2b: Ranhuras e estrias formadas pelos deslizamentos associados à carregamento cíclico.	20
Figura 4.3: Características da superfície fraturada de material tipicamente dúctil sujeito a cargas cíclicas alternantes.	23
Figura 4.4: vários padrões de tensões variantes no tempo, mas de amplitude constante. (a) completamente alternante, $R=-1$. (b) tensão com média não nula. (c) sempre tensionado, $R=0$	24
Figura 4.5: Padrões de tensão em que a amplitude muda e/ou a média se altera para produzir um espectro de tensão mais complicado. (a) média nula, mudança de amplitude. (b) Mudança de média e amplitude.....	26
Figura 4.6: Um padrão quase aleatório que poderia ser tipicamente reconhecido durante a operação de uma aeronave em qualquer missão.....	27
Figura 5.1: Chassis de S-10.	29
Figura 5.2: Detalhe de fixação do braço inferior no suporte.....	30
Figura 6.1: Condições de carregamento do modelo analisado.	32
Figura 6.2: Condições de contorno para o modelo analisado.	33
Figura 13.1: Vista em perspectiva frontal da estrutura.....	46
Figura 13.2: Vista em perspectiva lateral esquerda da estrutura.	47
Figura 13.3: Vista em perspectiva lateral direita da estrutura.	48
Figura 13.4: Vista em perspectiva inferior posterior da estrutura.	49
Figura 13.5: Vista em perspectiva inferior esquerda da estrutura.	50
Figura 13.6: Vista em perspectiva superior da estrutura.....	51
Figura 14.1: Vista em perspectiva lateral direita da estrutura.	53

Figura 14.2: Vista em perspectiva lateral esquerda da estrutura.	54
Figura 14.3: Vista em perspectiva frontal direita da estrutura.	55
Figura 15.1: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração com travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.	57
Figura 15.2: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração com travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.	58
Figura 15.3: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração com travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.	58
Figura 15.4: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração com travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.	59
Figura 15.5: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração sem travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.	60
Figura 15.6: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração sem travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.	60
Figura 15.7: Visualização apenas das máximas tensões da estrutura sem travessa por Von Mises.	61
Figura 15.8: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração sem travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.	61
Figura 15.9: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração sem travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.	62
Figura 15.10: Visualização apenas das máximas tensões da estrutura sem travessa por Tresca.	62

Lista de Símbolos

σ_{esc}	Tensão de escoamento do Material
σ_{rup}	Tensão de ruptura do Material
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_m	Tensão média
σ_a	Tensão alternada
τ	Tensão de cisalhamento
$\Delta\sigma$	Banda de tensão
R	Razão entre tensões máxima e mínima
A	Razão entre tensões alternante e média
L_o	Comprimento inicial da chapa de aço
S_o	Área inicial da seção transversal da chapa de aço
E	espessura da chapa de aço
\varnothing	símbolo indicando dimensão de diâmetro

RESUMO

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi analisado estruturalmente um trecho do chassi de uma pick-up S10, visando comparar a solução adotada para o problema de trincas na longarina com a configuração anteriormente adotada.

Foi utilizada como ferramenta a análise por Elementos Finitos, implementada pelo *Software Algor*, fornecido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A solução do problema se resume na adição de uma travessa auxiliar no chassi, tornando a estrutura mais rígida, aumentando com isso a vida desta em relação à fadiga.

Os resultados obtidos são mostrados através de figuras do trecho em estudo, com os níveis de tensão demonstrados por níveis de cores.

1 Introdução

Todos conhecemos as dificuldades existentes na busca de soluções para problemas envolvendo aspectos reais de estados físicos.

As melhores soluções existentes são aproximações dos casos reais. Estas soluções são obtidas através da aplicação de métodos numéricos, juntamente com o auxílio computacional, pois são raros os casos em que a solução "brota" de equações que são simplesmente solucionáveis por meios manuais.

Um outro problema existente neste tipo de aproximação reside na busca do refinamento da solução obtida.

Na moderna Engenharia é cada vez mais raro encontrar um projeto que não requisite de algum tipo de estudo através de FEM (*Finite Element Analysis* - Método de Elementos Finitos). Mesmo quando não utilizado plenamente, este método pode ser uma maneira de abreviar o andamento do projeto.

Além de auxiliar em análises de tensões e esforços dinâmicos que agem em estruturas, este método possui um campo de aplicação que engloba até mesmo análises do campo termodinâmico ou mecânica dos fluidos. Nestes se enquadram a análise de tensões, transferência e condução de calor, análise de campos magnéticos e elétricos, escoamentos e muitos outros.

Claramente a maior vantagem do FEM, é a facilidade com que este método manipula diversos tipos de geometrias. Outra característica reside no fato de que podem ser empregadas as mais diversas condições de contorno para a resolução, sendo o material homogêneo ou não.

Existem atualmente vários tipos de *softwares* que buscam solucionar as análises de problemas reais.

Estes *softwares* discretizam o problema real, baseado em um modelo, esperando-se que este se aproxime o máximo da situação real considerada.

Cada programa de análise possui um algoritmo próprio para a resolução de determinado problema. E devido a este motivo, possui eficácia maior, em

alguns tipos de problemas (sejam de natureza estrutural térmica ou de outros gêneros), e pouca eficácia em outros tipos de problemas. Mas não entra no escopo deste trabalho fazer uma comparação entre *softwares*.

Mas qualquer que seja o programa voltado para análise pelo método dos elementos finitos, todos partem da mesma fundamentação teórica, relativa as teorias da elasticidade, resistência dos materiais, termodinâmica, mecânica dos fluidos, e outras mais que por ventura sejam necessárias.

O **ALGOR** está dentro deste grupo de *softwares*. Sua configuração baseia-se nas teorias acima mencionadas, e possui um algoritmo particular de resolução pelo FEM, que será detalhado posteriormente, e que será aplicado neste trabalho.

2 Objetivos

Pretende-se, a partir da manipulação do *software* **ALGOR**, estudar o comportamento de uma estrutura sujeita a esforços dinâmicos (sua descrição se fará posteriormente). Neste estudo pretende-se minimizar ou mesmo eliminar um efeito indesejável decorrente da ação destes esforços, e também devido a uma elaboração de forma incorreta.

Em relação a estrutura a ser analisada, serão aplicados os esforços já medidos pela equipe de análise da *General Motors do Brasil*, nos pontos especificados, e como resultados serão medidos (pelo *software*) os esforços gerados na estrutura indicando se estes estão abaixo dos valores esperados para a falência da estrutura.

Este procedimento será aplicado a duas situações: com o chassis adicionado de uma travessa na região do braço de controle da suspensão, e outra com o chassis sem a travessa. Esta última situação indicou que ocorria a falência da estrutura, segundo medições realizadas pela própria *GM*.

É esperado que a adição da travessa reduza os esforços. O que é intuitivamente correto, pois a adição tende a aumentar a rigidez da estrutura neste ponto.

Na verdade, pode-se dizer que o problema da estrutura é empregada quase como um artifício, pois pretende-se obter uma solução para que possamos nos familiarizar com este tipo de *software*, buscando algumas noções referentes ao FEM e sobre a interface do **ALGOR**.

Buscamos não somente aprender a manipular o **ALGOR** e empregá-lo em casos semelhantes aos presentes neste trabalho, mas assimilar o método de programação e edição das propriedades, geometrias e materiais a serem incluídos no programa. Este aprendizado também visa facilitar, futuramente, a nossa assimilação de outros programas que utilizem o mesmo conceito.

À primeira vista um conhecimento aprofundado da teoria de FEM não é requerida, mas algumas noções básicas são imprescindíveis e, portanto, com este estudo, esperamos também assimilar as *nuances* da relação teoria-prática voltada à relação FEM-ALGOR.

Dependendo dos resultados obtidos poderemos verificar se este tipo de análise pode ser viável para dispensar testes excessivos em campo, reduzindo desta maneira os custos envolvidos em equipamentos, tempo e pesquisa, e consequentemente os custos totais que são embutidos no produto final.

E finalmente, e o mais importante dos objetivos, buscamos aplicar em nosso trabalho os conhecimentos obtidos durante o curso de graduação, esperando que estes sejam suficientes, ou mesmo quando não o forem, sejam um guia para novos estudos.

E dito isto, acreditamos que o trabalho possa progredir com sucesso.

3 Sobre o Método dos Elementos Finitos

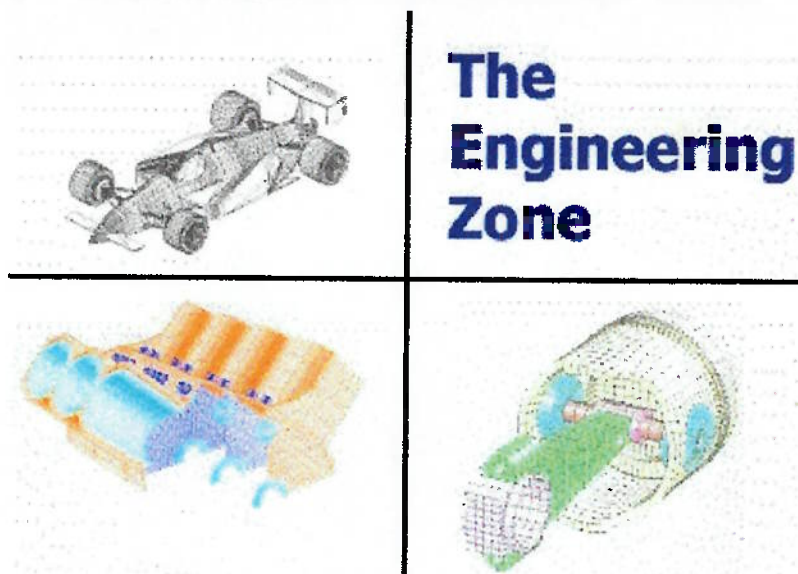


Figura 3.1: ilustrativo para o MEF

Análise por Elementos finitos--um método computadorizado para prever como um componente/montagem reagirá a fatores ambientais como forças, calor e vibração. É chamado "análise", mas no ciclo de projeto de um produto é usado como uma ferramenta para configuração de uma espécie de "protótipo virtual" utilizado para prever o que pode acontecer quando o produto final for utilizado.

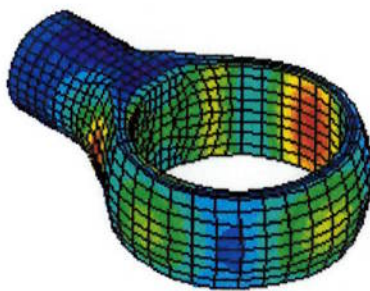


Figura 3.2: exemplo de aplicação do MEF

Análise por elementos finitos, relacionado à mecânica de sólidos, é a forma pela qual é obtida solução para um conjunto finito de equações de matrizes algébricas que aproximam as relações entre carga e deflexão. Estas podem ser

relacionadas a análise estática como também para velocidades e acelerações medidos em tempo real para análises dinâmicas.

Em 1678, Robert Hooke fixou a moderna base para análise de tensão de elemento finito como a Lei de Hooke. Simplesmente, um corpo elástico estica (deforma) proporcionalmente à força (tensão) a que está sujeita.

Matematicamente:

$$F=k*x.$$

- F = força
- k = constante de proporcionalidade do material
- x = distância de estiramento

Esta é a única equação que é necessário saber (a priori) para entender a análise de tensão por elementos finitos no domínio linear.

O método dos elementos finitos trabalha discretizando um objeto em um grande número (1.000 ou 100.000) de elementos (por exemplo cubos, no caso espacial). O comportamento de cada pequeno elemento, que é regular em forma, é prontamente previsto através de um conjunto de equações matemáticas. A "soma" dos comportamentos de cada elemento produz o comportamento esperado do objeto como um todo.

O " elemento " finito é uma pequena, mas não infinitesimal, parte da estrutura mecânica que é modelada incorporando complexas formulações do comportamento dos materiais dentro de uma forma geométrica relativamente simples. Os exemplos mais simples são barras, vigas e placas triangulares. Elementos mais complicados incluem placas quadrilaterais, cascas curvas e sólidos tri-dimensionais como hexaedros (paralelepípedos em casos simples).

O " Finito " em Análise por Elementos Finitos vem da idéia que há um número finito de elementos em um modelo de elementos. Em tempos anteriores, engenheiros empregavam integrais e técnicas com cálculo diferencial para resolver os problemas desta natureza. Estas técnicas fragmentavam os objetos em um número infinito de elementos para resolver o problema, isto é, buscavam analisar o problemas dentro do domínio dos valores reais.

3.1 Processo de Análise por Elementos finitos

Modelamento do Elemento finito

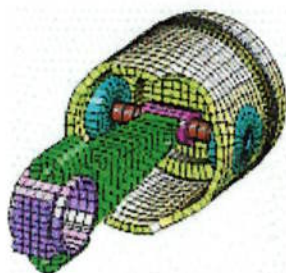


Figura 3.3: exemplo de construção de malha

Análise por Elementos finitos inicia-se com o modelador de elemento finito (às vezes chamado de *mesher* ou pre-processador) aqui já envolvido no escopo do método computacional. O custo efetivo do FEA é fortemente dependente no pre-processador, pois a maior parte do tempo humano envolvida em Análise por Elementos Finitos é gasto criando o modelo para análise.

Para incorporar a análise efetivamente no ciclo de projeto, deve-se criar os modelos exigidos de forma rápida e concisa. O modelador fornece os dados físicos necessários para análise criando uma malha de elementos que pode provir da importação de um modelo 3D gerado por CAD ou de um modelo gerado internamente ao programa de análise.

Há dois tipos de malhas básicas caracterizados pela conectividade de seus pontos. Malhas estruturadas têm uma conectividade em que cada ponto tem o mesmo número de "vizinhos" (para alguns *grids* um pequeno número de pontos terá um número diferente de "vizinhos"). Malhas não estruturadas têm conectividade irregular (por exemplo cada ponto pode ter um número diferente de "vizinhos".)

Foram desenvolvidas malhas não estruturadas principalmente para o método de elementos finitos. Há uma larga gama de possíveis formas para elementos finitos: tetraedros, prismas, blocos, e pode haver conectividade arbitrária conduzindo as malhas não estruturadas. Podem ser geradas malhas automaticamente, usando triângulos 2D, tetraedros ou mesmo blocos em 3D.

3.2 Solvers para Análise por Elementos finitos



Figura 3.4: exemplo de componente pos-processado pelo MEF

Solver é a parte do programa voltado exclusivamente para a análise de elementos finitos. Eles recebem como entrada os elementos, condições de contorno e cargas e fornecem uma saída contendo toda a informação necessária para revisar e compreender os resultados. Os *Solvers* podem ser divididos em duas categorias: linear e não-linear.

A Análise por elementos finitos linear é diferenciado da não-linear nas situações em que: todas as deformações são consideradas pequenas, nenhuma condição de contorno sofre alteração durante a análise e, as

propriedades dos materiais são invariáveis ou pouco variáveis (ocorrem linearmente, por exemplo, o seu módulo de elasticidade).

3.3 Pós-processamento

Pós-processadores ou visualizadores utilizam os dados gerados pelo *solver* para criar gráficos e relatórios, para posterior análise crítica.

O Método dos Elementos Finitos é empregado para prever o comportamento dos elementos, considerando virtualmente fenômenos físicos como:

- Tensões na mecânica (análise de tensão);
- Vibrações Mecânicas;
- Transferência de Calor - condução, transmissão, radiação;
- Escoamento de fluidos - fluidos líquidos e gasosos;
- Fenômenos elétrico e magnético variados;
- Acústicas.

4 Falência em Fadiga

4.1 Introdução

Carregamento estático ou quasistático é raramente observado na moderna engenharia, fazendo-se essencial ao projetista endereçar por si mesmo as implicações de cargas repetitivas, cargas flutuantes e cargas aplicadas rapidamente. Sem dúvida, a maioria dos projetos de engenharia envolvendo máquinas estão sujeitas a cargas cíclicas ou flutuantes. Tais cargas induzem tensões flutuantes ou cíclicas que frequentemente resultam em falha por fadiga. Observa-se que o termo fadiga adotado há pelo menos um século, pode não ser a melhor escolha de terminologia, pois muitos aspectos do fenômeno são distintamente diferentes do processo de fadiga biológica. Por exemplo, é difícil detectar as mudanças progressivas nas propriedades do material, que ocorrem durante a fadiga, e fraturas que podem ocorrer desta maneira com pequeno ou nenhum aviso prévio. Também, após a remoção da tensão, não há qualquer indício mensurável dos efeitos do tensionamento cíclico anterior. Assim, o dano produzido durante o processo de fadiga é cumulativo e geralmente irrecuperável.

A fadiga, embora seja um assunto complexo, não foi esquecido pelos pesquisadores. Estimativas feitas [3] indicam que se alguém quisesse acompanhar toda a literatura existente com a leitura de um artigo por dia de trabalho, ele falharia com defasagem de mais de um ano de leitura e, tentar compensar o atraso existente seria virtualmente impossível. No entanto o projetista é constantemente desafiado pela demanda de maiores performances, maiores velocidades, resistência a maiores temperaturas, redução de peso, e tudo isto a um custo e a um tempo razoável de produção. Para alcançar estes objetivos com pleno sucesso o projetista deve encarar diretamente os

problemas e prevenir as falhas por fadiga. Alguns destes problemas podem ser caracterizados como segue:

1. Cálculos de vida geralmente são pouco precisos e menos seguros que cálculos de força. Ordem de erros de grande magnitude em estimativas de vida não é incomum.
2. Características de fadiga de um material não podem ser deduzidas de outras propriedades mecânicas. Eles devem ser medidos diretamente.
3. Um protótipo em escala natural é normalmente necessário para assegurar uma vida de serviço aceitável.
4. Resultados de testes diferentes mas similares podem diferir amplamente e podem portanto requerer uma interpretação estatística pelo projetista.

Os materiais e as suas configurações devem ser selecionadas de modo que se obtenham lenta propagação das trincas e, se possível, detectá-las antes que se tornem perigosas.

Frequentemente os conceitos de "falha-segurança" devem ser implementados para alcançar confiabilidade aceitável. Isto é, até mesmo se um determinado elemento estrutural falhar, a estrutura global tem que permanecer intacta e capaz de suportar a carga em uma base de emergência por um curto prazo até que se possa implementar os reparos necessários.

Investigações de fracasso por fadiga realizados durante os anos, conduziram ao fato de que o processo de fadiga envolve dois domínios de tensionamento cíclico ou deformação que são significativamente diferentes, e em cada um a falha provavelmente é produzida através de mecanismos físicos diferentes. Um domínio de carregamento cíclico é aquele para qual uma significativa deformação plástica acontece durante cada ciclo. Este domínio é associado com cargas altas e vidas curtas, ou baixos números de ciclos para produzir o fracasso de fadiga, e é comumente chamado de fadiga de baixo-ciclo (*low-cycle fatigue*). O outro domínio de carregamento cíclico é aquele para qual os ciclos de flexão do material são largamente limitados ao regime elástico. Este domínio é associado com baixas cargas e vidas longas, ou grande número de

ciclos para produzir fracasso por fadiga, e é comumente chamado fadiga de alto-ciclo (*high-cycle fatigue*). Fadiga de baixo-ciclo é tipicamente associado com vidas da ordem de 10^4 ou 10^5 ciclos, e a fadiga de alto-ciclo para vidas maior que 10^4 ou 10^5 ciclos.

4.2 Observações Históricas

Há séculos o homem tem se dado conta de que ele poderia quebrar madeira ou metal com flexões repetidas de um lado para outro, com esforços de grande amplitude. Foi surpresa, contudo, quando descobriu-se que o tensionamento repetitivo, poderia provocar a fratura ate mesmo com amplitudes de tensão dentro do regime elástico do material.

A primeira investigação sobre a fadiga foi relatada pelo engenheiro mineralogista alemão W. A. S. Albert, que em 1829 realizou alguns testes com carregamento repetitivo em eixos. As mais rápidas falhas em serviço ocorreram em eixos de vagões.

Quando os sistemas de estrada de ferro começaram a desenvolver-se rapidamente, na metade do século XIX, as falhas por fadiga em eixos tornaram-se um problema largamente difundido que começou a delinear atenções mais sérias a respeito do efeito de cargas cíclicas. Esta foi a primeira vez que partes similares de máquinas foram sujeitas a milhões de ciclos de tensões de nível bem abaixo do ponto de escoamento, com as falhas documentadas aparecendo com regular distribuição. Como é frequentemente feito nos casos de falhas em serviço inexplicáveis, foram feitas tentativas para reproduzir as falhas em laboratório.

Entre 1852 e 1870 o engenheiro de vias alemão August Wöhler [4] montou e administrou a primeira investigação sobre fadiga de forma sistemática. Ele ministrou testes em eixos de carros de estrada de ferro em escala natural, também com flexão em pequena escala, torção e testes de carregamento cíclico axial para diferentes materiais. Alguns dos dados originais de Wöhler foram relacionados como mostrado na Figura 4.1. Estes dados para eixo de aço são plotados, no que se tornou posteriormente muito conhecido como o

diagrama S-N, e outros dados de fadiga hoje são apresentados do mesmo modo.

Ao mesmo tempo, outros engenheiros começaram a se preocupar com os problemas de fratura associados com repetidas cargas flutuantes.

Com o rápido desenvolvimento do sistema da estrada de ferro, pontes de ferro forjado estavam começando a substituir tijolos e estruturas de pedra, e foram levantadas perguntas relativo à conveniência de pontes férreas para estruturas das estradas de ferro. Foram realizados testes completos para vigas mestras rebitadas. Algumas vigas mestras de 22 pés de comprimento e 16 polegadas de profundidade foram sujeitas a milhões de ciclos de carregamento.

Em 1900 tinham sido publicados mais de 80 documentos relacionados ao assunto de fadiga e não só tinham sido informados fraturas por fadiga em estrada de ferro, eixos e estruturas de ponte, mas também em correntes, eixos, eixos de propulsão marinha, e corda de arame.

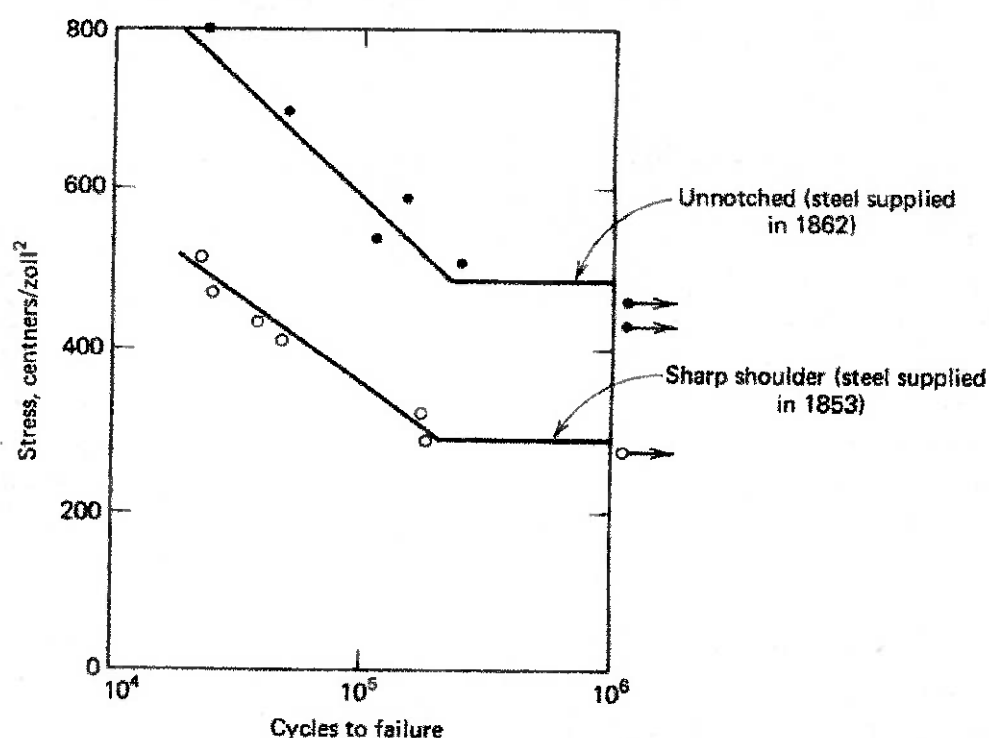


Figura 4.1: Dados registrados por Wohler, em uma investigação sobre fadiga em eixos de aço.
Nota: 1 centner=50Kg; 1 zoll=1in; 1 centner/zoll²= 110psi

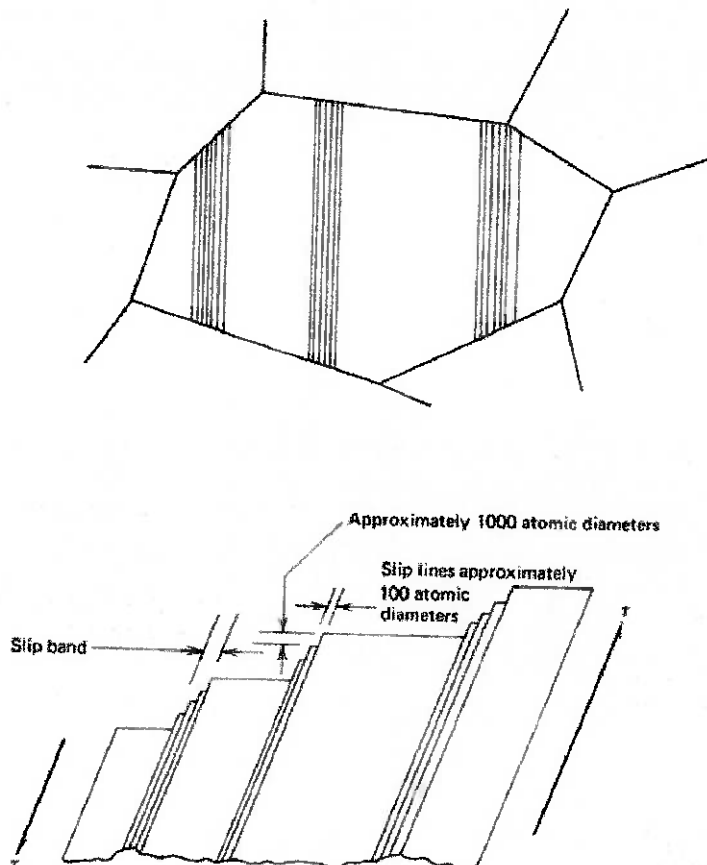
Com a "Era da tecnologia " no século XX, resultando em maquinaria de velocidade mais alta, o advento de turbinas de alta velocidade, e o desenvolvimento da indústria de aviação fez com que muito mais atenção fosse dirigida em direção a tentativa de se entender o problema de fadiga. Pela metade do século XX a atividade difundida em investigação de fadiga era mundial ao nível microscópico, onde os físicos e metalúrgicos estavam tentando explicar o fenômeno básico e ao nível macroscópico onde os engenheiros tentam projetar componentes e sistemas empregando dados de teste de laboratório junto com a teoria semi-empírica.

O desenvolvimento de teoria de deslocamento durante este período contribuiu muito à compreensão de fadiga em nível microscópico. O desenvolvimento do microscópio de elétron com sua resolução superior contribuiu grandemente à observação direta de processos de fadiga. Não menos importante uma contribuição foi feita ao nível macroscópico pelo desenvolvimento do computador de alta velocidade que possibilitou aos projetistas uma ferramenta poderosa para fazer melhores estimativas de vida de fadiga e forças. Finalmente, conceitos de mecânicas de fratura na última década somou uma medida importante da percepção do comportamento na propagação de trincas, assim como, fornecendo as bases para uma nova ferramenta de predição de falhas, útil para projetistas, quando se encara condições de carregamento de fadiga.

4.3 A Natureza da Fadiga

A fadiga pode ser caracterizada como um fenômeno de falência progressiva que acontece pela iniciação e propagação de trincas até um tamanho instável. Embora não haja nenhum acordo completo nos detalhes microscópicos, em relação à iniciação e propagação das trincas, algumas das explicações melhores oferecidas são:

É pensado que a nucleação das trincas, os quais crescem e frequentemente se propagam até a falência do material, se inicia pelos movimentos de deslizamento, que produzem finas faixas de superfície cristalina. Isto pode ser observado na figura 4.2a, em que uma tensão estática de cisalhamento produz passos de deslizamento na superfície que são da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm de altura. Estas faixas deslizantes são caracterizadas comumente como faixas grosseiras de deslizamento. Sobre carregamento cíclico é mais habitual observar finas faixas de deslize de cerca de 10^{-7} cm de altura que em última instância volta a ser as regiões nas quais as trincas de fadiga foram iniciadas. Mais adiante, as faixas de deslize de fadiga dão lugar a entalhe e cumes [5], mostrado esquematicamente na Figura 4.2b, como resultado do deslize invertido em planos de deslize adjacentes causados por reversão de carga. Estes entalhes e cumes podem ser agudos em forma de dente de serra ou corrugados suavemente arredondados. Se muitos planos deslizam os estriamentos resultantes são rasos e ondulados, ao contrário que, se só alguns planos deslizam, são formadas fendas nitidamente definidas e paredes. Em certos casos claramente definidos, foram achados extrusões [6] como resultado de escorregamento invertido, onde sempre são achadas trincas nestas extrusões que podem ser de fato gerados por deslizamento invertido.



Uma vez formado, estas intrusões crescem para o fundo por processo de deslizamento invertido, e o crescimento delas pode constituir a porção principal da vida de fadiga do metal.

Figura 4.2a: figura ilustrativa das linhas e bandas de escorregamento em uma superfície cristalina sobre a influência de uma tensão de cisalhamento.

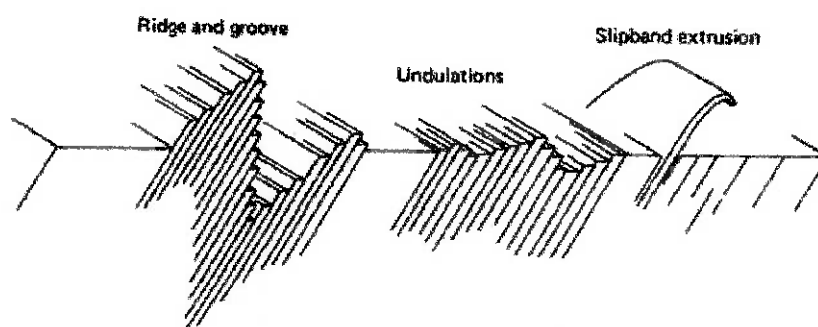


Figura 4.2b: Ranhuras e estrias formadas pelos deslizamentos associados à carregamento cíclico.

Outra explicação proposta para o início da nucleação é baseada na observação de que muitos “*loops*” de deslocamentos são produzidos por tensões cíclicas. É postulado que a iteração destes “*loops*” produzem muitas áreas vagas que condensam no plano, as quais deslizam em quantidades suficientes para formar buracos estáveis em estruturas treliçadas. Certos buracos foram achados [7] ao longo da faixa de deslize e bordas de grãos, mas o mecanismo de sua formação está claramente estabelecida. Então estes buracos constituem núcleos de fadiga, dos quais as trincas crescerão.

A extensão do núcleo de fadiga através de deslizamento tem lugar geralmente ao longo do plano de escorregamento mais estritamente alinhado com a direção da máxima tensão de cisalhamento. Contanto que a trinca continue crescendo ao longo do plano de deslizamento, nenhuma mudança no mecanismo básico de crescimento foi observada. Este tipo de crescimento da trinca foi designado arbitrariamente como Fase I do crescimento. A fase I do crescimento da trinca pode ocupar maior ou menor porção do período de vida em fadiga pois parece ser favorecida pelas baixas tensões aplicadas e condições que conduzem a menores velocidades de crescimento da trinca. Se ocorrerem maiores tensões cíclicas, como em entalhes, ou condições que levam a uma alta relação tensão normal e componente de cisalhamento, então o crescimento da trinca na fase I pode dar lugar ao crescimento na fase II.

Na fase II o crescimento da trinca não é governado pela tensão cisalhante local mas pela máxima tensão normal principal na vizinhança da borda da trinca. Assim a trinca diverge de seu caminho de deslizamento e propaga-se em uma direção aproximadamente perpendicular à direção da máxima tensão normal. A superfície de fratura durante o crescimento na fase II é caracterizada por estriamentos que podem ser relacionadas à densidade delas e largura do nível de tensão aplicado [8]. A superfície de fratura produzida durante a fase II é relativamente liso.

Finalmente o comprimento da trinca alcança uma dimensão crítica e então um ciclo adicional causa falência. A região de fratura final mostrará tipicamente evidências da deformação plástica produzida no destacamento final. Para materiais dúcteis a área de fratura final aparece freqüentemente como um

“lábio” de deslizamento produzido por propagação de trinca ao longo dos planos de máximo cisalhamento. São ilustradas várias características de uma superfície de fratura por fadiga típica na Figura 4.3.

Embora os projetistas achem estas observações básicas de grande interesse, eles têm que se interessar muito mais pelos aspectos fenomenológicos macroscópicos de fratura por fadiga e evitando-o durante a vida do projeto. Alguns dos efeitos macroscópicos e dados básicos que requerem consideração no projeto sob carga de fadiga incluem:

1. Os efeitos de uma tensão aplicada de forma alternada na resistência e propriedades de materiais de engenharia.
2. Os efeitos de uma tensão constante superposta por uma alternada, isto é, tensões cíclicas com seu valor médio não nulo.
3. Os efeitos de tensões alternantes em um estado de tensão multiaxial.
4. Os efeitos de gradientes de tensão e tensões residuais, como imposto pelo *shoot-peening* ou *cold-rolling*.
5. Os efeitos de multiplicadores de tensão, como entalha, filetes, buracos, linhas, articulações rebitadas, e solda.
6. Os efeitos do acabamento superficial, inclusive os efeitos de usinagem, revestimento e recobrindo.
7. Os efeitos de temperatura no comportamento de materiais de engenharia na fadiga.
8. Os efeitos de tamanho do elemento estrutural.
9. Os efeitos de cumulativos dos ciclos a vários níveis de tensão e a permanência do efeito.
10. A extensa variação nas propriedades de fadiga a ser esperado para um determinado material.
11. Os efeitos de umidade, meios corrosivos, e outros fatores ambientais.
12. Os efeitos de interação entre fadiga e outros modos de fratura, como *creeping* e *fretting*.

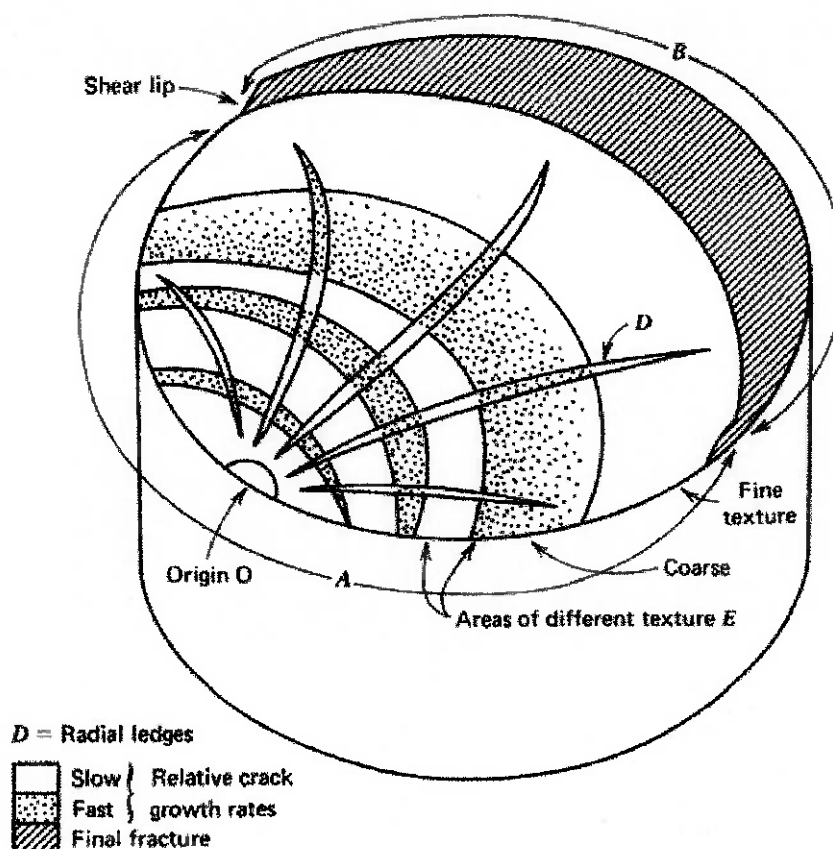


Figura 4.3: Características da superfície fraturada de material tipicamente dúctil sujeito a cargas cíclicas alternantes.

4.4 Carregamento Na Fadiga

Encarando um projeto de elemento sensível a fadiga em uma máquina ou estrutura, o projetista está interessado criticamente na resposta de materiais de engenharia sob fadiga para vários carregamentos, que poderia ocorrer ao longo da vida do projeto da máquina. Isto é, ele está interessado nos efeitos de vários espectros de carregamento e espectro de tensão associada, que será em geral uma função da configuração do projeto e do uso operacional da máquina.

Talvez o mais simples espectro de tensão de fadiga para o qual um elemento poderia estar sujeito, seja uma tensão do tipo senoidal variante no tempo, com tensão média não nula, mas com amplitude e frequência constantes, aplicada

por um número específico de ciclos. Tal padrão de tensão variante no tempo frequentemente chamada de tensão cíclica completamente reversa, é ilustrada na figura 4.4a. Utilizando o esquema da figura 4.4a nós podemos definir convenientemente vários termos e símbolos úteis, que incluem:

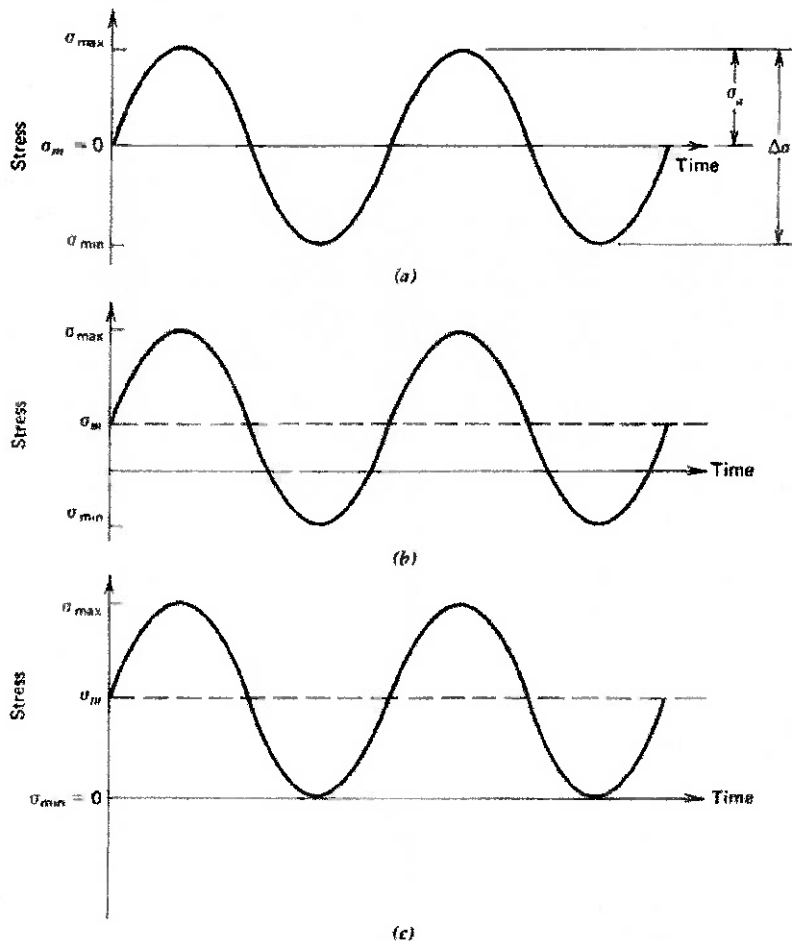


Figura 4.4:vários padrões de tensões variantes no tempo, mas de amplitude constante. (a) completamente alternante, $R=-1$. (b) tensão com média não nula. (c) sempre tensionado, $R=0$

σ_{max} = máxima tensão no ciclo

σ_m = tensão média = $\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

σ_{min} = mínima tensão no ciclo

σ_a = amplitude da tensão alternante = $\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

$\Delta\sigma$ = banda de tensão = $\sigma_{max} - \sigma_{min}$

$$R = \text{razão de tensão} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

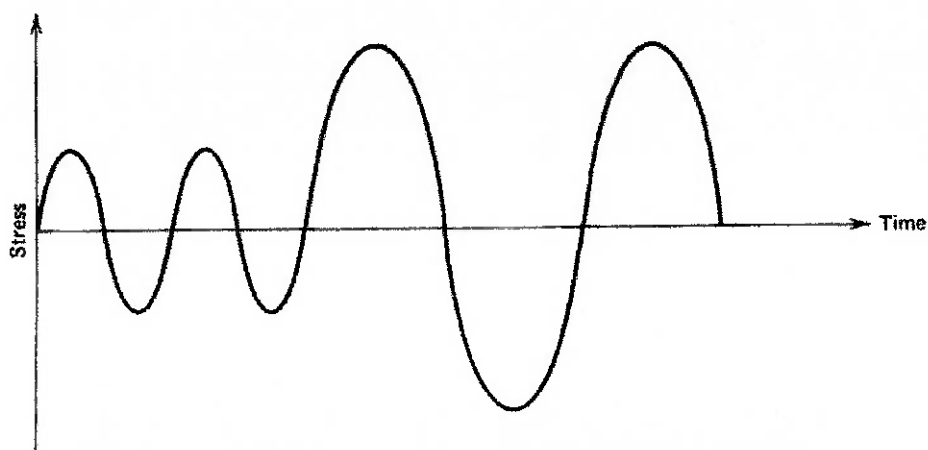
$$A = \text{razão de amplitude} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

Quaisquer duas das quantidades há pouco definidas, excluindo a combinação σ_a e $\Delta\sigma$ ou a combinação A e R são suficientes para descrever o padrão de tensão variante no tempo completamente.

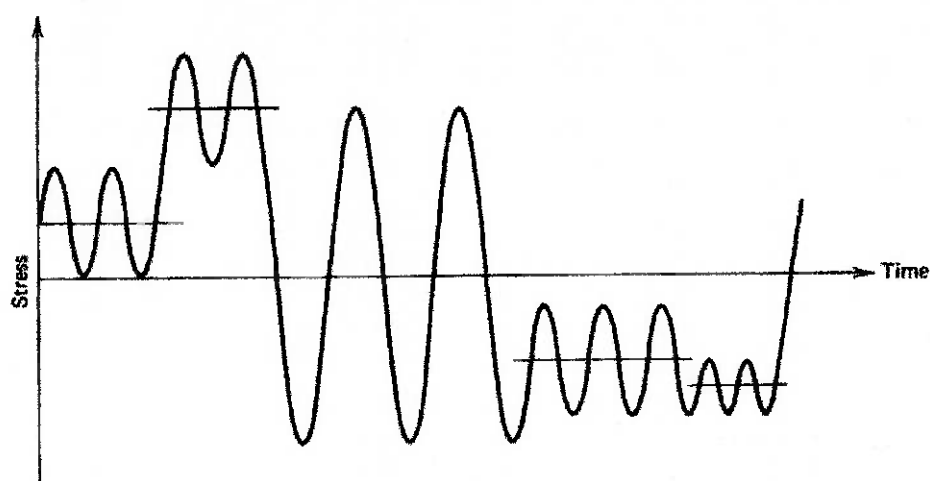
Um segundo tipo de padrão de tensão no tempo freqüentemente encontrado é o espectro cuja média não é nula, mostrado na figura 4.4b. Este padrão é bem parecido com o caso reverso exceto que a tensão média é diferente de zero seja na compressão ou na tração. O caso não-zero pode ser entendido como uma tensão estática igual em magnitude para a média σ_m , com uma tensão cíclica superposta de amplitude σ_a .

O caso especial em que a tensão média não é nula, ilustrado na figura 4.4c, é freqüentemente encontrado na prática. Neste caso a tensão mínima σ_{\min} é nula. Isto é, a tensão varia de zero até algum máximo dentro do regime elástico e então volta para zero. Este tipo de tensão é freqüentemente chamada de *released tension*. Para a *released tension* pode ser notado que a tensão média é metade da tensão de máximo, ou $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}$. Um outro padrão de tensão similar mas pouco frequente é a *released compression*, onde $\sigma_{\max}=0$ e

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min}}{2}.$$



(a)



(b)

Figura 4.5: Padrões de tensão em que a amplitude muda e/ou a média se altera para produzir um espectro de tensão mais complicado. (a) média nula, mudança de amplitude. (b) Mudança de média e amplitude

Um padrão de tensão variante no tempo um pouco mais complicado é ilustrado na Figura 4.5a onde a tensão média é zero mas há duas ou mais amplitudes de tensão diferentes juntos. Em ordem de complexidade crescente, o esboço da figura 4.5b ilustra o caso em qual não só a amplitude de tensão varia mas também a magnitude da tensão média varia periodicamente. Pode ser notado que este espectro de tensão está começando a se aproximar de um grau de realismo.

Finalmente, na Figura 4.6 está determinado um esboço de um espectro de tensão real. Este tipo de padrão de tensão quase aleatório é encontrado em

membros estruturais de aeronaves em operação, incluindo abastecimento, taxiamento, manobras, partidas e aterrissagem. A obtenção de dados realísticos é uma tarefa desafiadora por si só. Máquinas de instrumentação existentes, como em aeronaves, fornecem alguma informação útil para o projetista se a missão dele é semelhante ao executado pela máquina instrumentada.

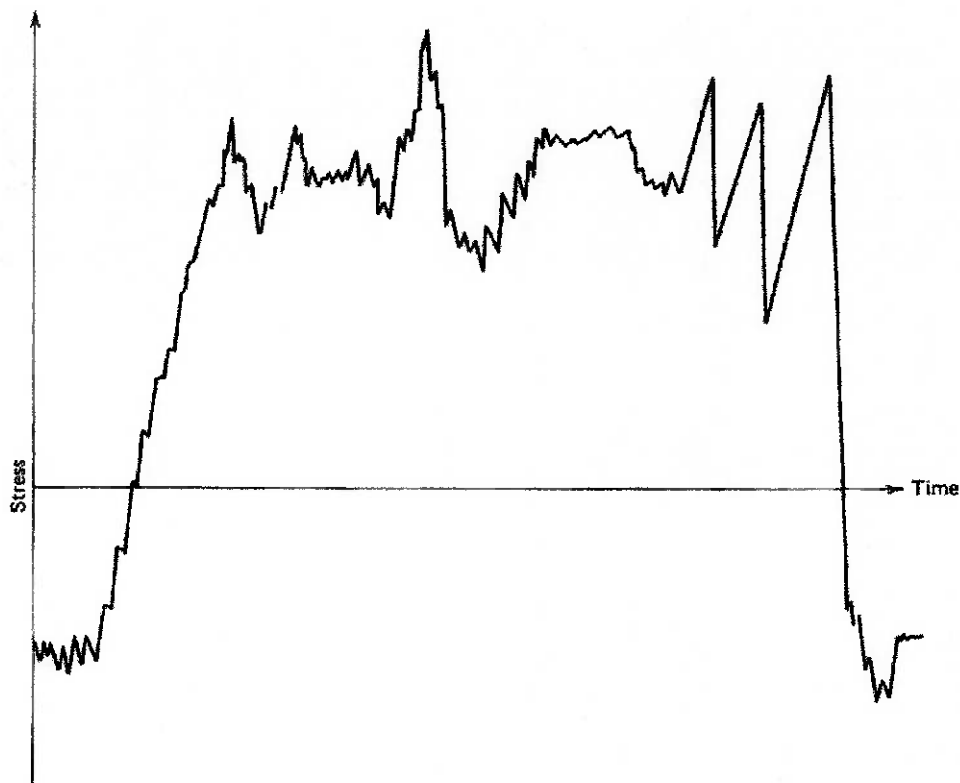


Figura 4.6: Um padrão quase aleatório que poderia ser tipicamente reconhecido durante a operação de uma aeronave em qualquer missão.

Dados registrados por acelerômetros, *strain gauges* e outros tipos de transdutores podem fornecer uma base para se desenvolver uma representação estatística do fenômeno, e extrapolá-la para futuras necessidades de estudo do processo de fadiga. Ter uma boa estimativa do espectro do carregamento é um começo bom, mas até mesmo com tal informação disponível, a tarefa do projetista em selecionar os materiais para evitar o fracasso de uma estrutura não é fácil.

5 Descrição do problema

O Problema existente, pode ser resumido na nucleação de trinca e sua propagação na região de solda de uma estrutura.

A estrutura é o chassi da *pick-up* S10 produzida pela empresa *General Motors do Brasil (GM)*, estabelecida em São Caetano do Sul - São Paulo.

Esta empresa projetou e fabricou este chassi, seguindo o seu próprio método e execução. Tempos depois do lançamento do produto S10 constatou-se que em algumas unidades sujeitas a testes de durabilidade intensos, ocorriam nos veículos a presença de trincas, com aproximadamente 45 mm de comprimento, na região da longarina próxima ao suporte do braço inferior de controle esquerdo da suspensão dianteira. Claramente nota-se que a nucleação deve-se a fadiga por esforços dinâmicos por vezes cíclicos, pois o chassi é constantemente sujeito a esse tipo de esforço. O croqui do chassi e da região do suporte do braço podem ser visualizados na figura 5.1 e com mais detalhes na figura 5.2.

Tabela 5.1 - Braking Forces – Bush Forces

Load Position	FORCE	FX [N]	FY [N]	FZ [N]
Lower Control Arm Front Bush	F1	10520	-22510	2780
Upper Control Arm Front Bush	F2	-4970	11050	290
Upper Control Arm Rear Bush	F3	-4700	-7500	1820
Lower Control Arm Rear Bush	F4	179,66	20039,24	5609,79

Estudo de situações do chassi em frenagem, passagem por lombada, e curvas foram realizados para detectar os maiores esforços que ocorriam. Estes

resultados foram fornecidos pela GM, e verificaram que os maiores esforços ocorriam em situações de frenagem brusca.

A tabela 5.1 fornece os esforços medidos pelos sensores acoplados no veículo, bem como os pontos de aplicação destes. Estes esforços surgiram em condições de frenagem brusca do veículo.

O método de estudo utilizado pela GM consistiu em testes de campo, em que o veículo (protótipo) plenamente montado e com cargas iniciais (por exemplo sacos de areia) simulam um estado normal de operação. Disto verifica-se que é indispensável algum tipo de teste em campo.

O veículo em teste trafega em percursos que normalmente tráfegaria em operação, e além disso os testes também são realizados em pistas de configuração mais rigorosas, para testes de suspensão ou mesmo das estruturas do chassis e carroceria.

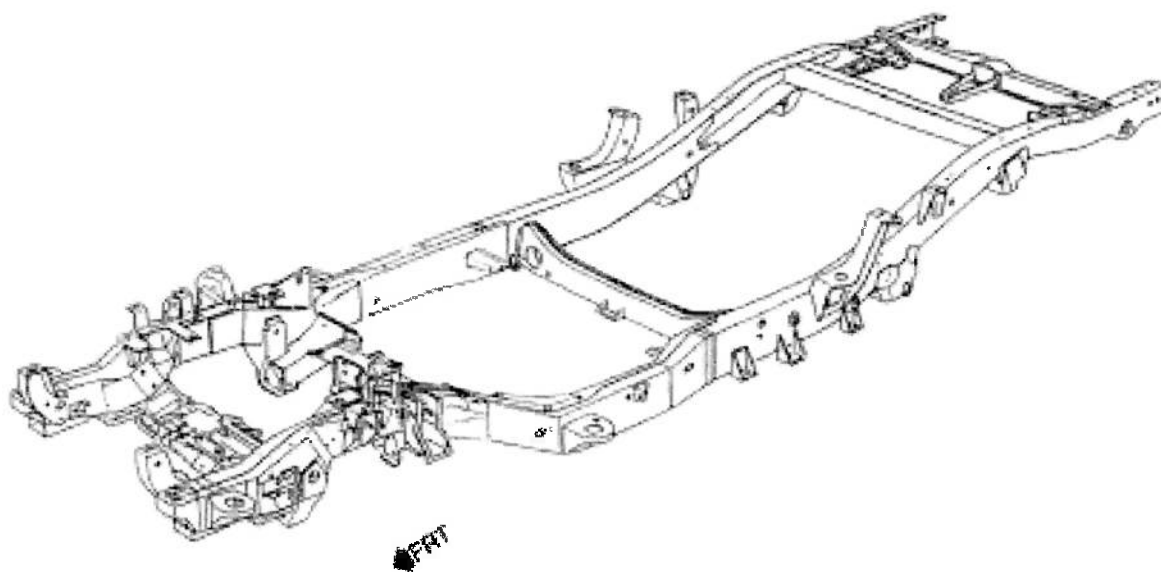


Figura 5.1: Chassis de S-10.

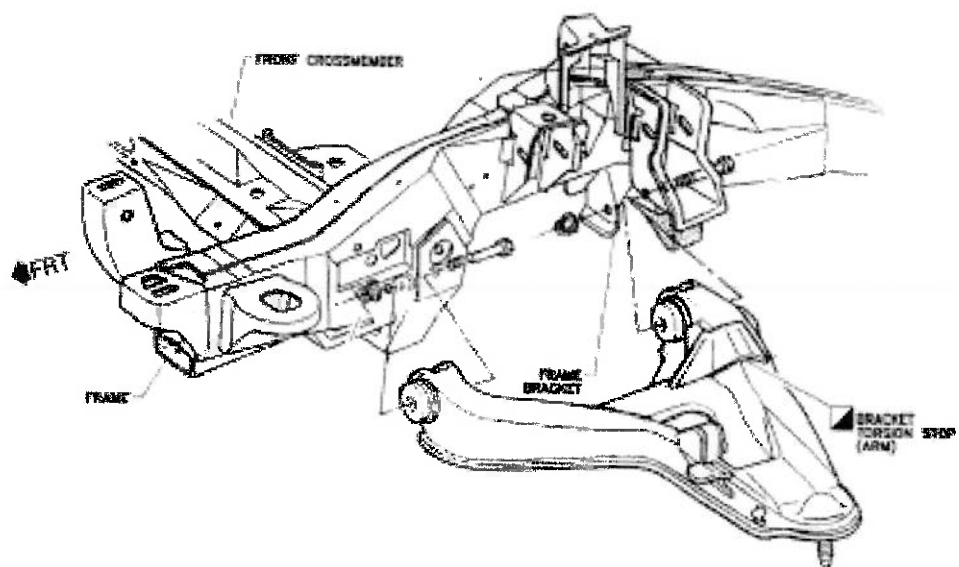


Figura 5.2: Detalhe de fixação do braço inferior no suporte.

6 Análise Estrutural

Para a análise estrutural foi feito um modelamento do chassis, principalmente da parte frontal da longarina esquerda, região que realmente importa para o estudo.

O modelamento, pelo menos no que se refere ao desenho geométrico da estrutura, foi realizado pela GM e posteriormente nos fornecida. As etapas de carregamento e análise em condições dinâmicas e também aplicação das condições de contorno a serem consideradas serão realizadas por nós no modelo.

As cargas aplicadas devem considerar condições dinâmicas como situações de frenagem, movimentos em curvas e esforços torcionais na estrutura. Através de análises já realizadas pela General Motors do Brasil, a condição mais crítica ocorre sob situações de frenagem, como dito anteriormente. As cargas aplicadas e as condições de contorno utilizadas nesta análise estão representadas nas figuras 6.1 e 6.2, e com os valores das forças, medidas por sensores no campo de testes, dadas pela tabela 5.1.

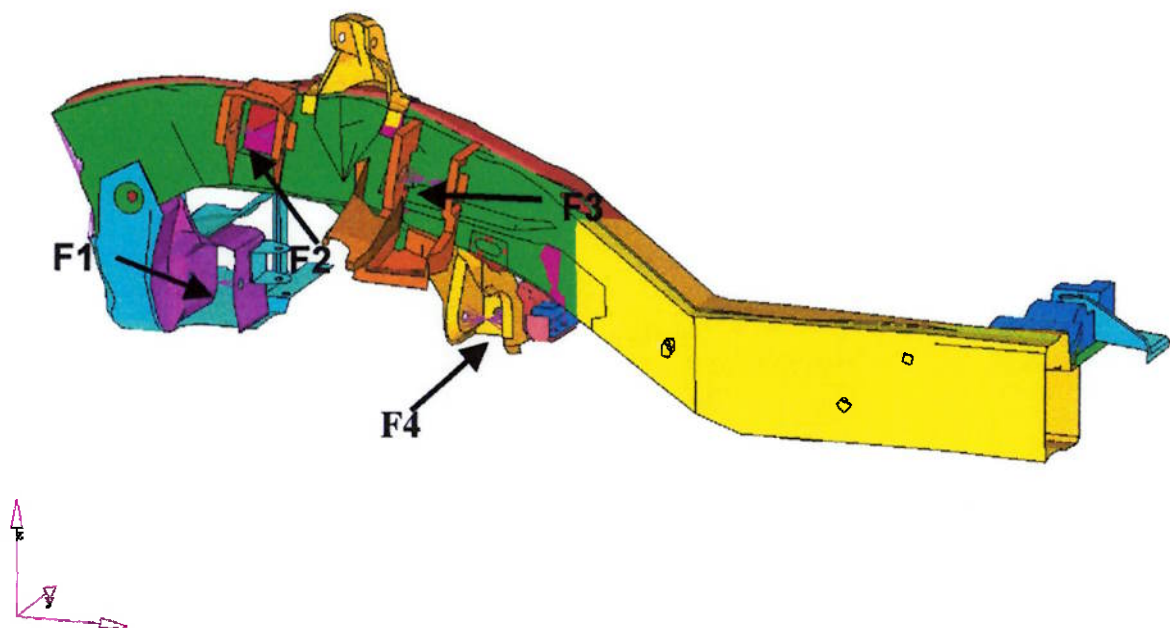


Figura 6.1: Condições de carregamento do modelo analisado.

A figura 6.1 indica o trecho da longarina esquerda na sua parte anterior. Os vetores F_1 , ..., F_4 são indicadores dos pontos e dos sentidos de aplicação das forças. A tabela 5.1 fornece os valores destas forças decompostas sobre a base de coordenadas utilizada.

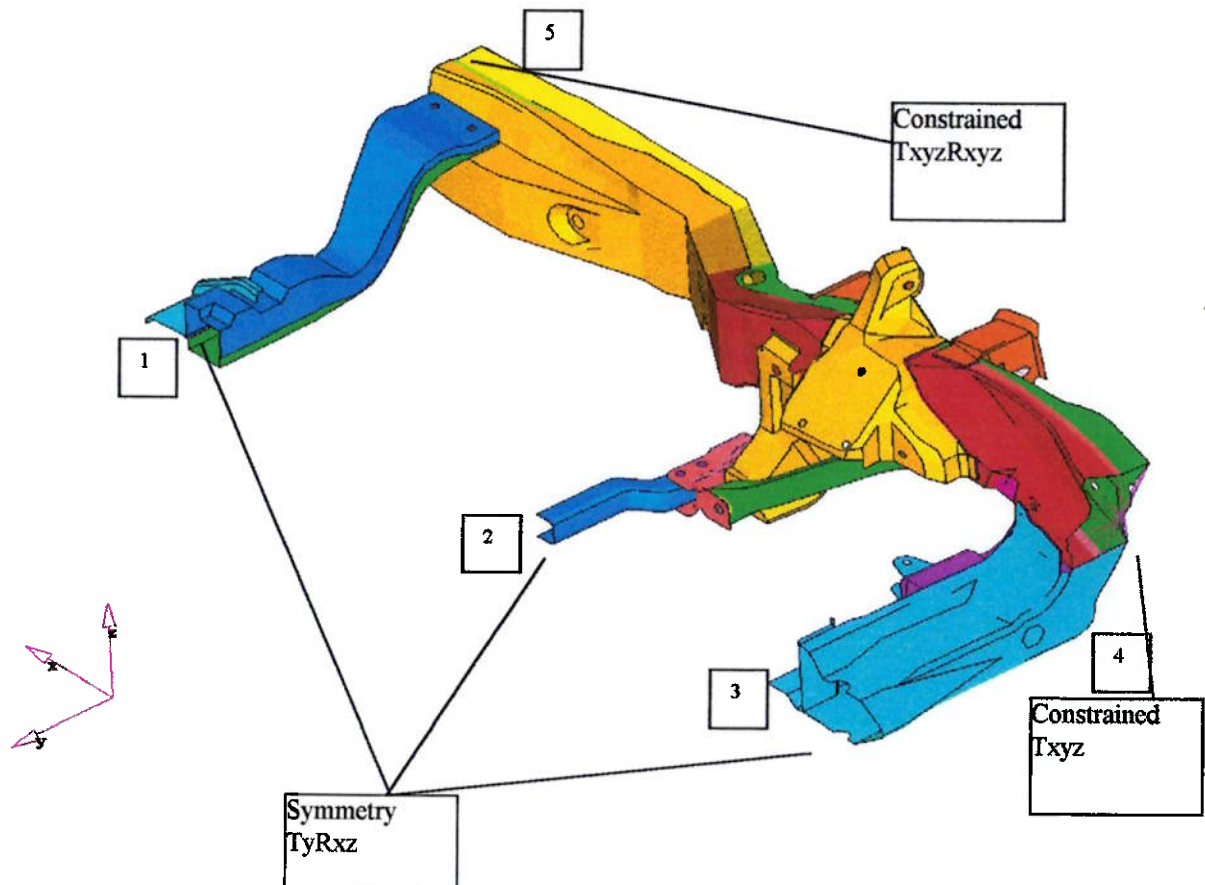


Figura 6.2: Condições de contorno para o modelo analisado.

Pela figura 6.2, podemos verificar que é possível analisar a estrutura na região que nos interessa (região da nucleação da trinca) sem que para isto seja necessário utilizar a configuração total do chassi.

Podemos aplicar as teorias de resistência de materiais e Elementos de máquinas. Disto resulta que pode-se tomar apenas uma parte do chassi, pois existem os chamados eixos de simetria, onde os esforços existentes e calculados em uma parte pode ser rebatida em outra, conforme a disposição do eixo de simetria.

Em pontos (proporcionalmente a estrutura) muito distantes da região da análise os esforços que agem nas mesmas não representam grande influência na nucleação da trinca (regiões tais como os extremos posteriores das longarinas do chassi).

Neste processo, em que secciona-se a estrutura, é necessário que se estabeleçam as restrições de deslocamentos e das condições de contorno.

Nestas condições e restrições se enquadram, o engastamento da extremidade seccionada da longarina (vide figura 5.1), as restrições de rotação da extremidade seccionada livre da longarina, e algumas restrições de rotação e outras de translação das semi-travessas, que unem as longarinas.

Ressaltando, estes tipos de restrições surgem porque foi utilizado o seccionamento da estrutura como artifício para reduzir as operações de cálculo e também o tempo de processamento. Se caso utilizássemos a estrutura com sua configuração "inteira" haveria a necessidade de outras condições de contorno.

Da figura 6.2, verifica-se que há restrições de translação na direção y (no sistema de coordenadas estabelecido na figura), e rotação na direções x e z . Analogamente no ponto 4 temos restrições de translação nas três direções mas liberdade de rotação em todas as direções, e finalmente temos um engate no ponto 5 (restrição de todos os movimentos e rotações). Deve-se destacar que o sistema de coordenadas na figura 6.2 está fixo e move-se juntamente com a parte da estrutura considerada. Mesmo que estes componentes (molas) não estejam configurados no modelo.

O modelamento das molas e amortecedores da suspensão será substituída pela análise com os esforços agindo de forma cíclica.

Nas situações de frenagem brusca, o esforço de frenagem age, em relação a um sistema de coordenadas inercial, como um impulso de força que atua ciclicamente tanto quanto sejam realizados as operações de frenagem. A forma cíclica do esforço provém do amortecimento entre cada pico de impulso de força.

Não foi realizado para o estudo um modelamento das molas e amortecedores, pois o efeito dos mesmos já foram considerados pela equipe de análises da *GM* quando foram estabelecidos os esforços máximos agentes na região da estrutura. Valores estes refletidos na tabela 1.

Portanto será de nossa alçada aplicar os esforços tabelados, nos pontos especificados na figura 6.1, e disto verificar os esforços gerados na estrutura.

As molas modeladas devem possuir constante de 1000 N/mm a qual corresponde a uma estimativa das molas reais. Outros fatores que influenciem

no comportamento do sistema devem ser melhor analisados para descobrir a sua real importância.

7 Requisitos de Durabilidade

Como qualquer tipo de produto este chassis deve ser projetado para um período de durabilidade, em que o produto não apresenta falhas até que este período tenha se passado.

Os chassis utilizados nos testes devem ter um período de durabilidade mínima equivalente a um percurso de 27.000 Km do veículo sob condições severas do percurso.

Os testes no veículo S10 são realizados em campo, captando as medidas das grandezas necessárias para o estudo dos esforços e deformações, através de sensores acoplados ao veículo. Estes testes são realizados com o intuito de obter dados sob diferentes condições, como por exemplo condições de frenagem, curvas simulando serras, asfaltos com “costelas de vaca” ou esburacados.

Para que uma solução adotada com o intuito de resolver o problema das trincas seja confiável é necessária a realização de pelo menos 3 testes, procedimento este estabelecido pela *GM*.

8 Materiais e processos empregados na construção do chassis em estudo

O chassis é construído basicamente de chapas de aço conformadas em formato U e unidos por solda. A espessura é de 3mm.

O aço empregado na construção do chassis é o ESM.ME.732LNE230, código utilizado para identificação do material internamente a empresa da *General Motors do Brasil*, e é equivalente ao material descrito na norma NBR 6656-LNE23. As características referentes a propriedades do aço utilizado bem como o procedimento a ser empregado no seu manejo e preservação, estão descritos na norma NBR6656, estabelecidos pela *GM*, e aceitos por nós neste trabalho.

Na tabela 8.1 estão descritos alguns dos componentes adicionais deste aço, bem como a sua participação em porcentagem.

Tabela 8.1: elementos presentes na composição do aço

Elementos	Quantidade (%)
Carbono (C)	0.12
Manganês (Mn)	0.80
Fósforo (P)	0.03
Enxofre (S)	0.03
Silício (Si)	0.35
Alumínio (Al)	0.02

Elementos endurecedores do aço, tais como: Vanádio, Nióbio, Titânio, Molibdênio, Cromo, Nitrogênio, e/ou terras raras, como Cério, Praseodímio e Lantânio, podem estar presentes para melhorar sua característica de rigidez e propriedades mecânicas, mas o total participação destes elementos não pode

exceder o total de 2% do peso total do composto final (estes adicionados individualmente ou combinados).

Na tabela 8.2 estão descritas as propriedades mecânicas do aço, fornecidas segundo a norma ASTM A-370.

Tabela 8.2. Propriedades mecânicas do LNE-230

Tensão de escoamento (σ_{esc}) (Yeld Stress)	Tensão de ruptura (σ_{rup}) Ultimate Stress	Mínima Elongação (%)	
		$L_o = 5,65\sqrt{S_o}mm$	$L_o = 200mm$
200 ~300 MPa	330 ~ 450 MPa	$2 \leq e \leq 9$	$9 \leq e \leq 15$
		24 ($L_o = 50 mm$)	22

Tabela 8.3: teste de dobra à 180° - faixa do diâmetro de dobra para espessura e (mm)

LNE 230	$2 \leq e \leq 9$	$9 \leq e \leq 15$
	0.1	0.5

A solda empregada é do tipo cordão, isto é, ela é aplicada de forma contínua ao longo de todas as arestas a serem unidas. O material constituinte da vareta de solda é do tipo MAG denominado por AWS ER7056, diâmetro padronizado de 1mm.

O gás utilizado na soldagem é gás industrial composto basicamente por argônio e dióxido de carbono (este constituindo 20% da mistura do gás utilizado).

9 Custos médios totais referentes a realização dos testes

A execução de testes incidem no acúmulo de custos médios de R\$60.000,00. Destes custos totais 15% representam por peças de reposição necessárias e manutenções. O restante é representado pelo: combustível utilizado nos testes de campo, a mão-de-obra empregada (considerando os mensalistas e horistas), e também o preço médio do veículo completo (obtido através de uma média dos preços do veículo conforme suas variações em relação aos diversos modelos fabricados).

10 Síntese Das Soluções Já Empregadas Anteriormente

Conforme análises realizadas na GM do Brasil foram implementadas diversas soluções, mas que falharam durante o teste de campo. Estas soluções foram:

- *Reforço Externo*: chapa de aço soldada na região do aparecimento da trinca na longarina, próxima do suporte do braço inferior. Após realização dos testes verificou-se novamente o surgimento da trinca, mas deslocada da região anterior e próxima da solda do reforço;
- *Reforço Interno*: chapa de aço soldada na região da trinca do lado interno da longarina do chassi. Os resultados obtidos foram os mesmos obtidos da solução anterior;

- *Reforço Interno e Externo:* Apesar das análises estruturais da GM indicarem uma redução de 20% no nível de tensões da região da trinca com ambos os reforços, o problema continuou aparecendo nos testes de campo. Segundo relatório da GM, os resultados da análise estrutural podem ser inválidos devido a variação que pode ocorrer na espessura da chapa ao longo da longarina, assim como mudanças da propriedade do material na região da solda.
- *Adição de mais uma travessa do chassis na região do braço de controle da suspensão:* com a adição de uma travessa entre as longarinas do chassis na região em estudo, os testes que estão sendo realizados no Campo de Provas da GM ainda não detectou nenhuma trinca até agora, com mais de 80% dos testes concluídos.

11 Software de análise a ser empregado

O ALGOR é um programa de análise de fenômenos físicos. Dentre estes fenômenos estão: estruturas submetidas a carregamentos estáticos e/ou dinâmicos, escoamentos de fluidos, visando ao estudo de seu comportamento físico e/ou termodinâmico, estudo termodinâmico voltado para a troca de calor pelos meios já conhecidos (condução, convecção, radiação), fenômenos electromagnéticos, e também a enorme gama de combinações destes fenômenos que se encontram no mundo real. O programa realiza suas análises baseado em modelos de situações reais. Para que o software forneça resultados coerentes e dentro do esperado (não fornecer resultados absurdos), o modelo utilizado deve conter os "inputs" necessários.

Cabe ao usuário estabelecer este modelo. O programa fornece uma ajuda neste processo de modelamento, indicando as incoerências de construção (tais como restrições impostas no modelo, deficiência geométrica do modelo etc.). Entretanto erros específicos no modelo não são detectados pelo software (por exemplo, se quisermos uma densidade diferente de um fluido em uma certa direção, o programa não consegue executar a análise corretamente sem que o programador, dê os "inputs" necessários.

Disto surge um dos mais importantes requisitos para se utilizar o software. O programador dever ter consciência para estimar o modelo, e discernir entre os "inputs" que são imprescindíveis, e aqueles que mesmo sendo necessários apresentam pequena influência nos "outputs" da análise.

Para cada tipo de análise o programa possui um "pacote" específico, mas isto não impede que se possa realizar estudos de situações combinadas (por exemplo, o escoamento de ar próximo a um fio aquecido, devido ao efeito Joule, obtido pela carga elétrica a que está sujeito).

Mas a parte que nos importa neste estudo é a análise estrutural e os cálculos de esforços e tensões em componentes presentes em uma determinada estrutura.

O software realiza as análises através da aplicação da teoria de Elementos Finitos.

Novos conceitos em relação a este software serão adquiridos no período de familiarização programada no cronograma.

12 Procedimentos adotados na execução da análise

1. Estabelecimento do modelo de análise

O modelo constitui na estrutura de um chassi de veículo automotivo, com energização por motor de combustão interna. Foi tomado apenas um quarto da estrutura total, pois existiam eixos de simetria (pelo menos dois eixos).

2. Tipo de análise

A partir da análise, pretende-se obter o comportamento de uma estrutura sujeito aos esforços medidos pela *GM*.

3. A princípio era necessário (e melhor para a análise) que o modelo obtido estivesse configurado com elementos sólidos, necessitando apenas uma posterior construção de malha; entretanto este modelo foi obtido em formato *00. wireframe*.

4. Ocorreu que no processo de importação do modelo, (que depende fortemente do método de exportação do software emissor), ele sofreu

modificações, que tornaram o processo de análise, diretamente do arquivo importado, inviável.

5. Foi necessário reconstruir os elementos do modelo, apelando para elementos de construção não mais tridimensionais, mesmo que em *wireframe*, mas para elementos superficiais, no formato de cascas (*Shell*).
6. Para obter o modelo em formato *shell*, foi necessário eliminar os componentes de linhas e superfícies que tornavam alguns elementos tridimensionais.
7. Para facilitar a reformulação do modelo, este foi dividido em suas partes constituintes básicas, intencionando-se remontá-lo no final do modelamento.
8. Dando prosseguimento ao procedimento de análise, foi necessário construir as malhas que serão utilizados pelo programa para cálculo de elementos finitos. O programa ALGOR, não produziu automaticamente uma malha, que pudesse ser utilizada na análise. Portanto foi necessário criar a malha manualmente, gerando curvas fechadas, e dividindo-as em elementos quadriláteros e triangulares.
9. Com a fragmentação do modelo de elementos tridimensionais, foram formados vazios nos elementos de superfícies, que foram preenchidos com elementos de mesma constituição. Também ocorreu, por consequência da eliminação da espessura dos elementos, a separação entre elementos, deixando um espaço onde inicialmente no modelo tridimensional, estavam unidos.
10. Para retomar estas conexões entre os elementos, o software permite que criemos elementos de contato entre os elementos. O programa entende que estes tipos de elementos não possuem massa, mas bastante rigidez, desta

forma simulando um estado de união entre peças. A presença de elementos de contato entre peças indica que não existem deslocamentos relativos entre os elementos ou nós de malhas que estão conectados pelos mesmos.

11. No processo de checagem do modelo acima, como os elementos eram do tipo *shell*, ocorreu que o programa ALGOR, criou automaticamente a espessura das chapas modeladas (que são de 3 mm), e nisto pode-se verificar que ocorreu a interferência das peças, e como não havia recursos, que nós conhecessemos, foi necessário implantar um novo modelo, mais simplificado.
12. Nesta simplificação foram excluídos as pequenas características geométrica se tentou-se modelar o problema a partir dos entes geométricos primitivos . disto resultou um modelo simplificado, com uma longarina sendo representada por um tubo de secção retangular vazado e as travessas transversais como barras engastadas na longarina. Os pontos de aplicação dos carregamentos foram idealizados como apêndices da longarina (simulando a solda de elementos no tubo).
13. Os carregamentos desta forma seriam esforços aplicados em vigas em balanço engastadas na longarina.
14. Neste modelo o processo de criação de malha ocorreu de forma automática, no decorrer da construção do modelo. Os elementos da malha resultante são em forma de paralelepípedos regulares.

13 Modelo Refinado da estrutura

Através dos desenhos obtidos da GM foram modelados os componentes a serem analisados, de acordo com os procedimentos explicados no item anterior. Depois de realizarmos a conexão de todas as partes entre si e da imposição dos esforços e condições de contorno, concluímos a parte de modelamento (ou Pré-Processamento), estando aptos a iniciar o Solver do programa para a obtenção dos esforços na estrutura.

As figuras 13.1 a 13.6 ilustram sob diferentes ângulos a estrutura modelada, dando uma idéia de sua complexidade e elevado número de elementos que a compõem.

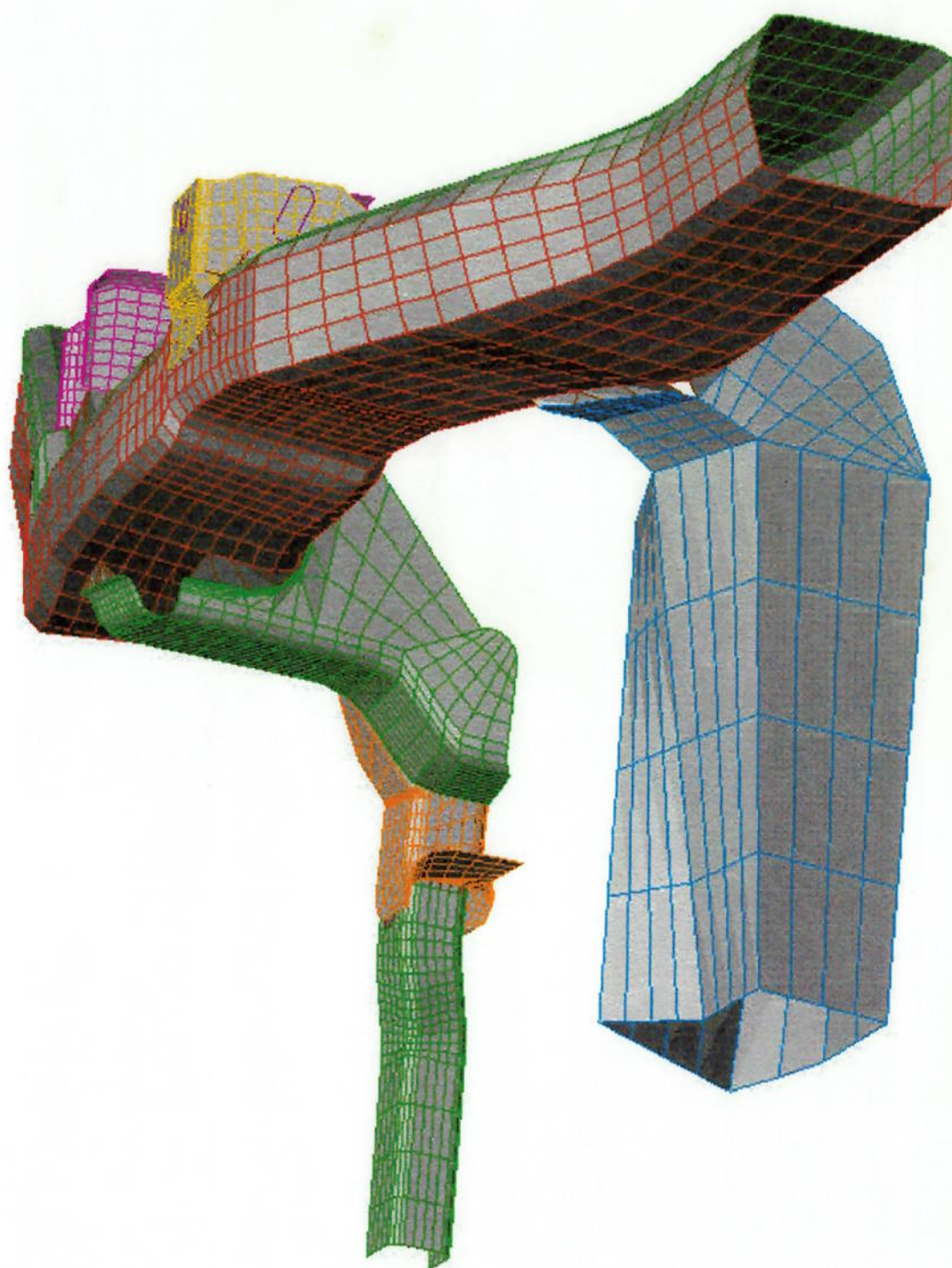


Figura 13.1: Vista em perspectiva frontal da estrutura.

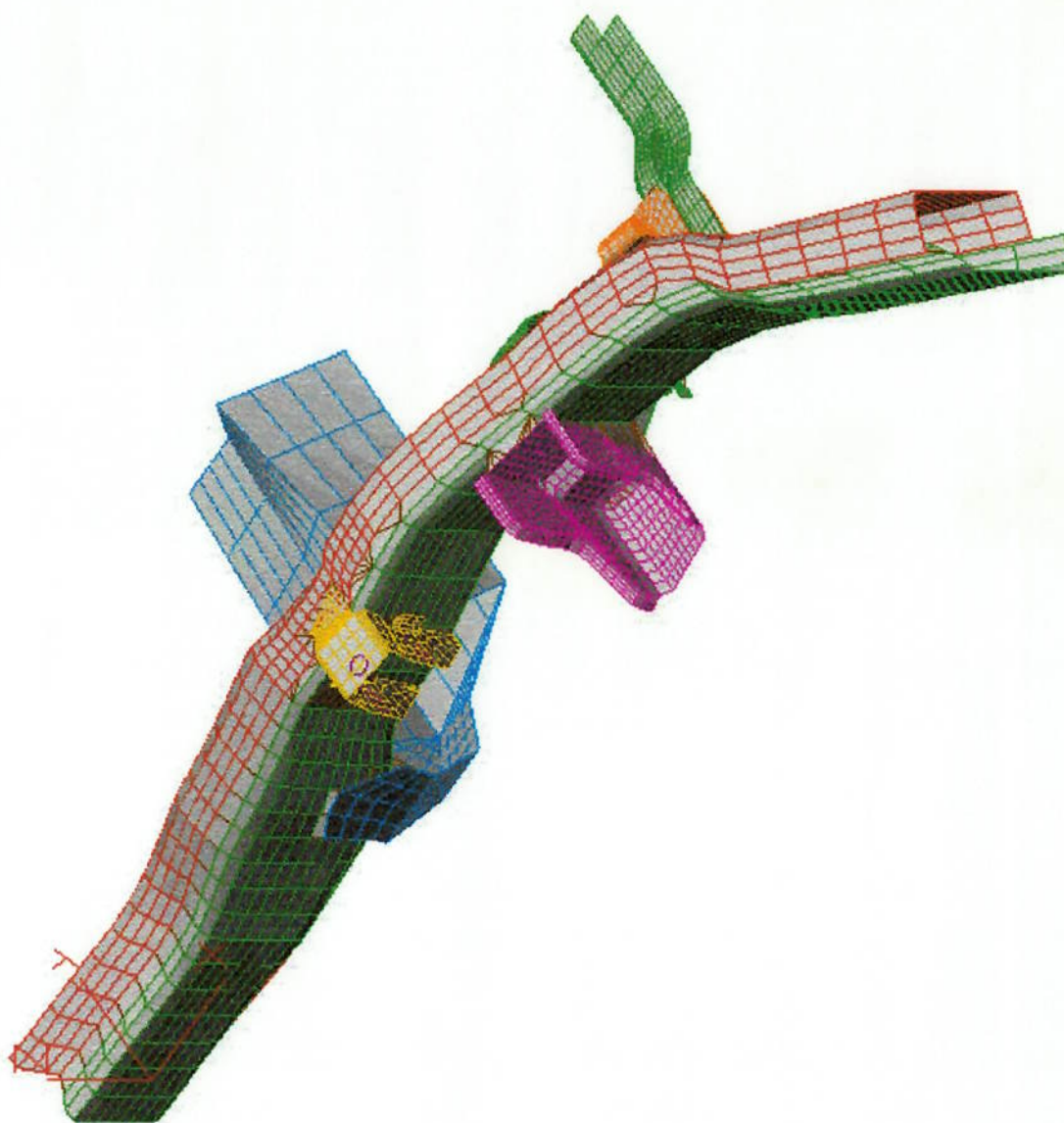


Figura 13.2: Vista em perspectiva lateral esquerda da estrutura.

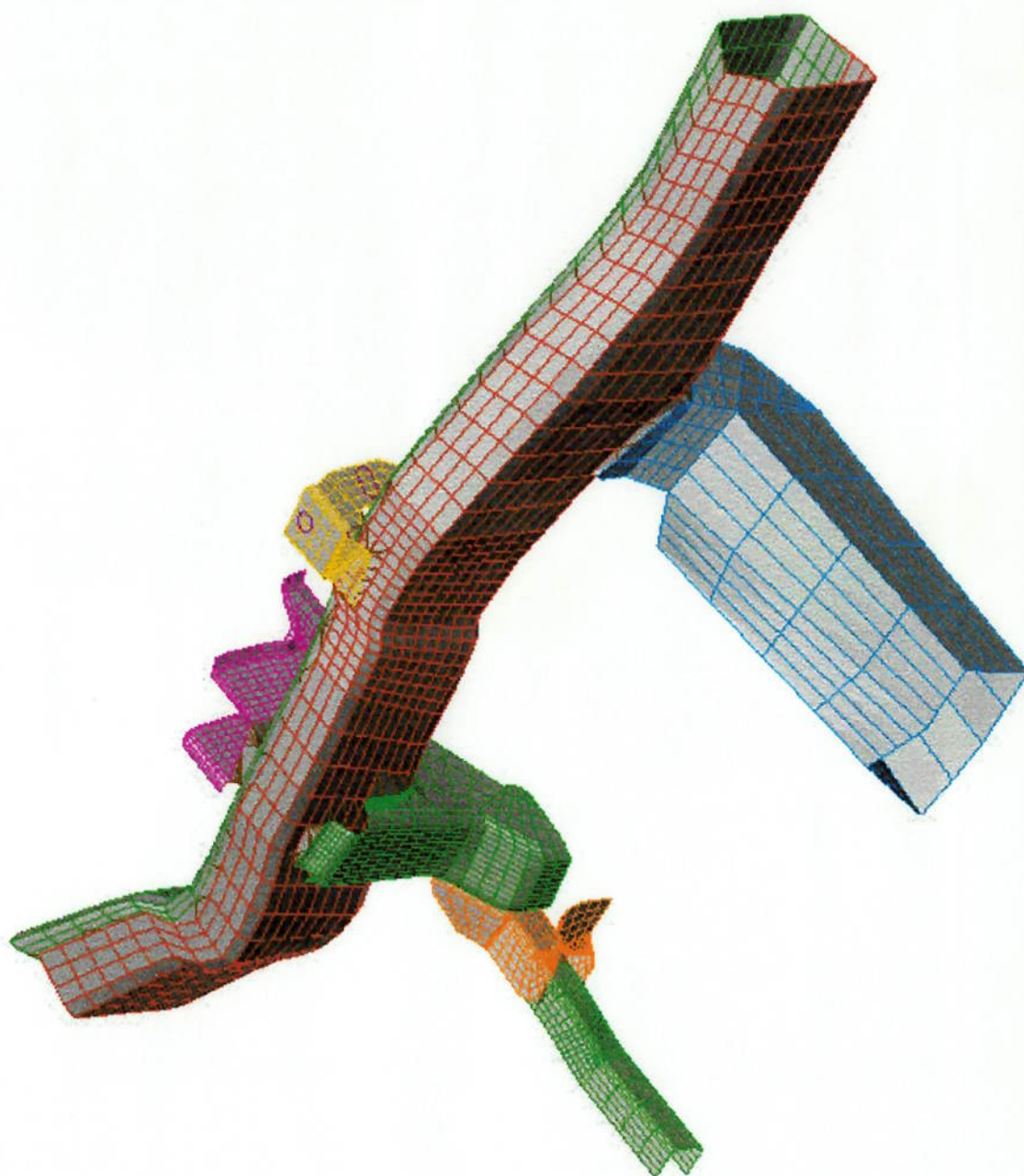


Figura 13.3: Vista em perspectiva lateral direita da estrutura.

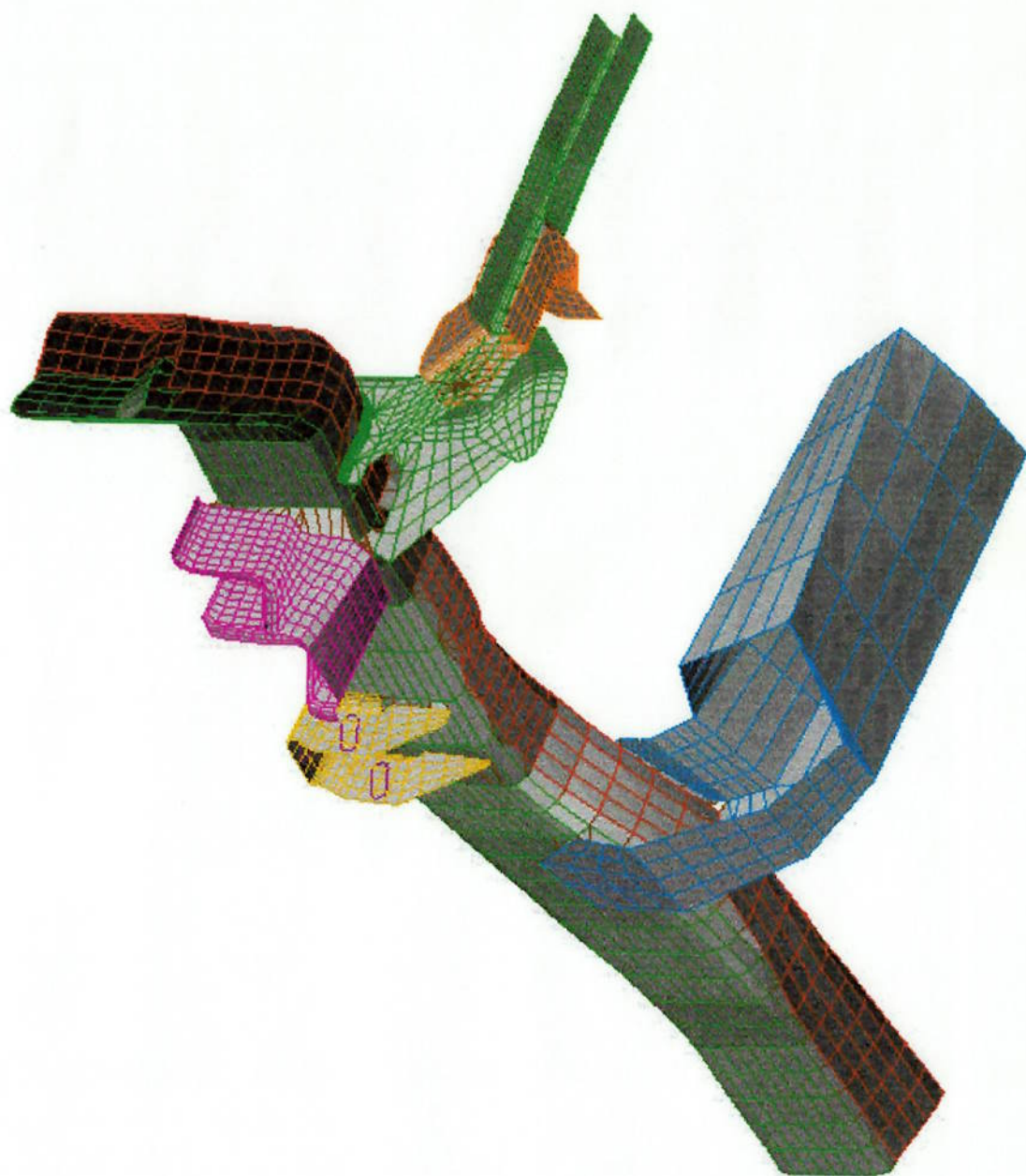


Figura 13.4: Vista em perspectiva inferior posterior da estrutura.



Figura 13.5: Vista em perspectiva inferior esquerda da estrutura.

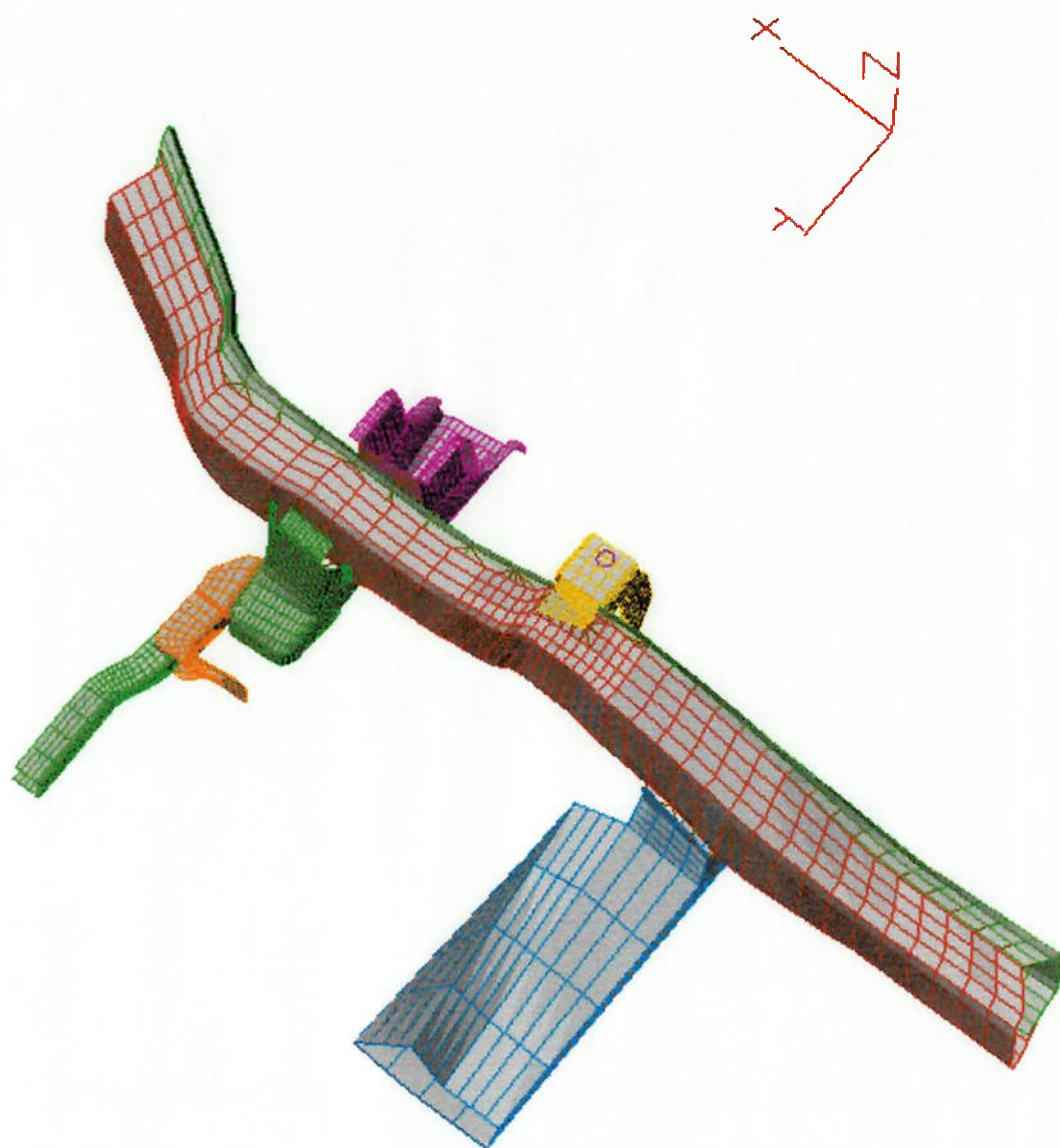


Figura 13.6: Vista em perspectiva superior da estrutura.

14 Modelo Simplificado

Para simplificar o modelo com o intuito de diminuir a complexidade do problema, foi elaborado uma outra malha de geometria mais simples. Com isso, diminuámos o número de nós da estrutura, compatibilizando o modelo com o equipamento que tínhamos disponível para a realização da análise.

Seria praticamente inviável analisar o modelo anteriormente proposto devido ao tempo que seria necessário para que o computador processasse todos os cálculos para fornecer os resultados.

As figuras 14.1 a 14.3 ilustram este modelo simplificado, mostrando as formas bem mais simples, mas mantendo a sua forma genérica.

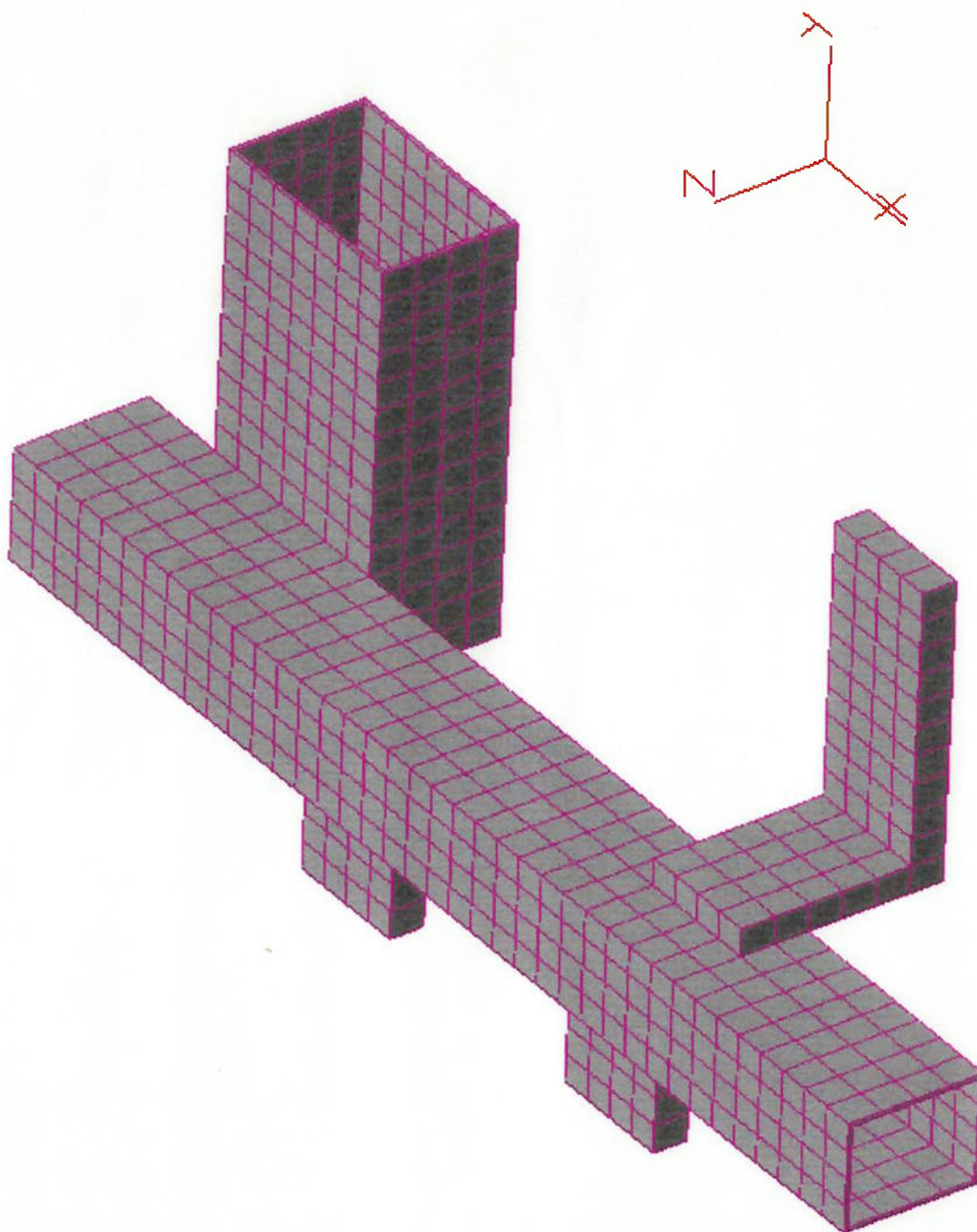


Figura 14.1: Vista em perspectiva lateral direita da estrutura.

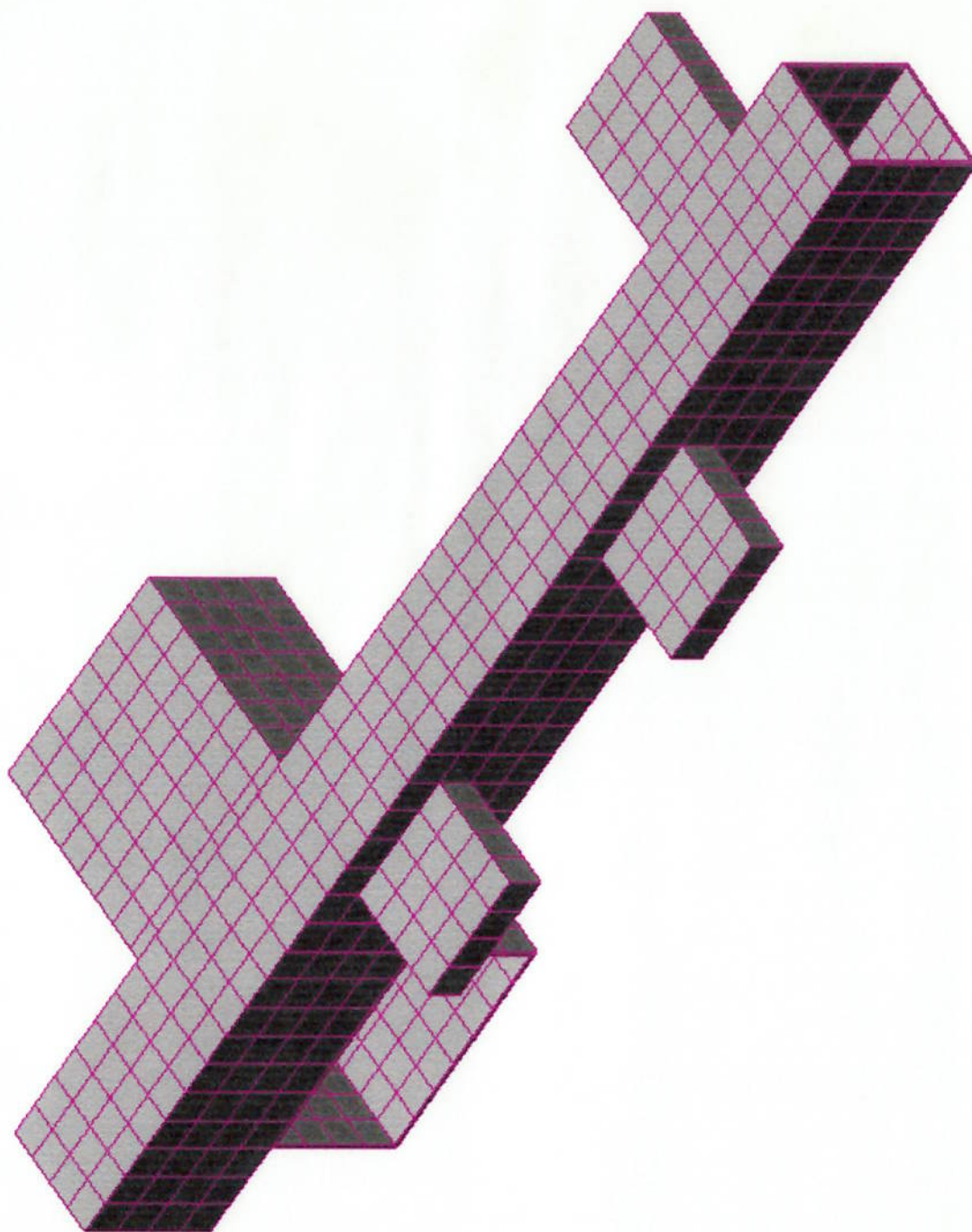


Figura 14.2: Vista em perspectiva lateral esquerda da estrutura.

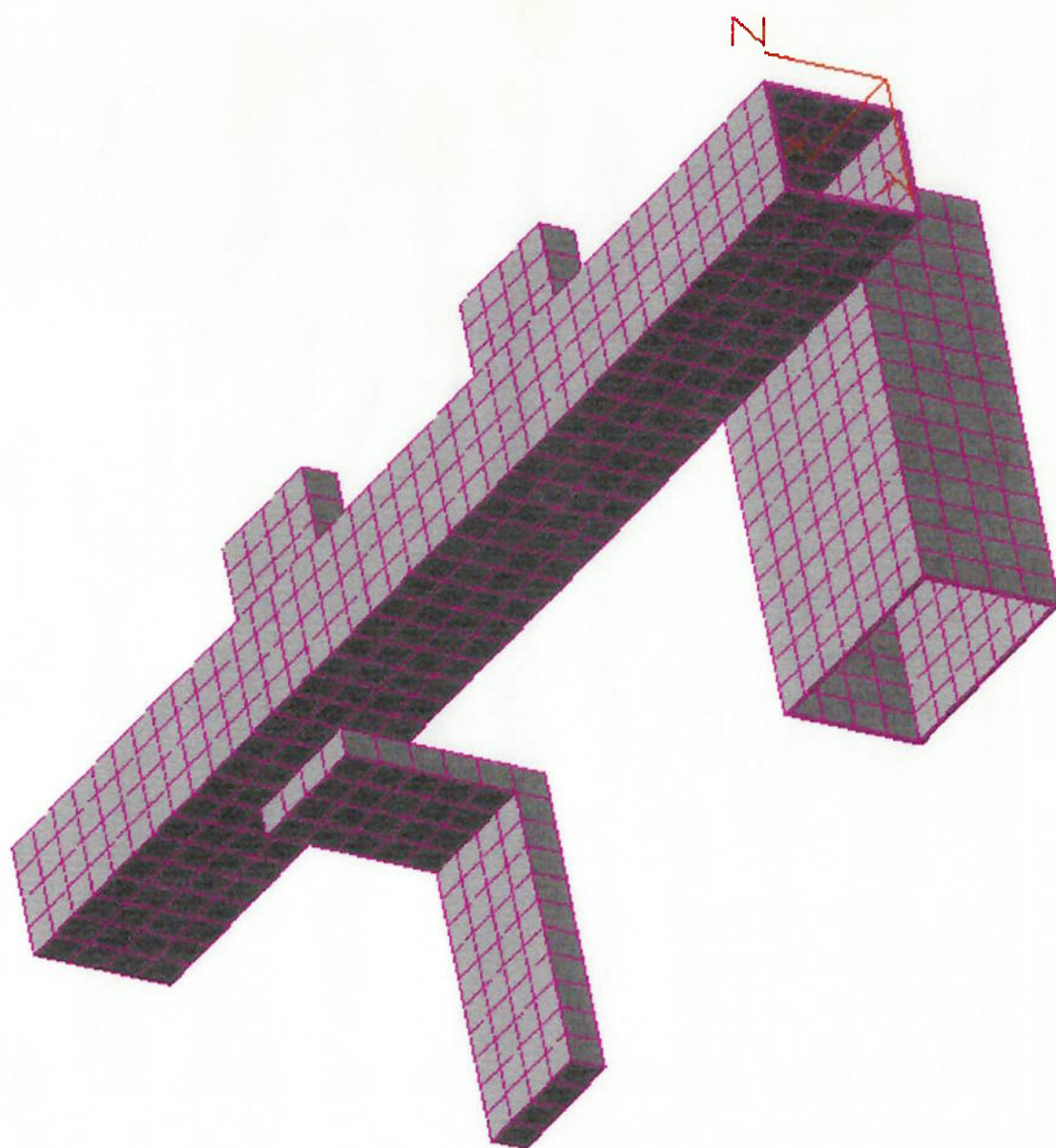


Figura 14.3: Vista em perspectiva frontal direita da estrutura.

15 Resultados Obtidos com o Modelo Simplificado

Os resultados obtidos abaixo foram calculados de duas maneiras, sendo uma levando em consideração a teoria de Von Mises, e outra, a teoria de Tresca.

Conforme o estudo proposto no início deste trabalho, faremos a comparação de duas configurações do modelo, em que será enfatizada a influência da travessa auxiliar nos esforços resultantes da longarina, na região próxima aos suportes inferiores do braço de controle. Com isso, teremos uma confirmação dos testes reais em campo de que a adição desta travessa realmente ajuda na diminuição dos esforços e consequente aumento da vida da longarina, sem a ocorrência de trincas.

Em todos os modelos foi desprezada a ação da força gravitacional, pois o intuito dos resultados não é seu valor numérico exato, mas a comparação entre as duas configurações em estudo.

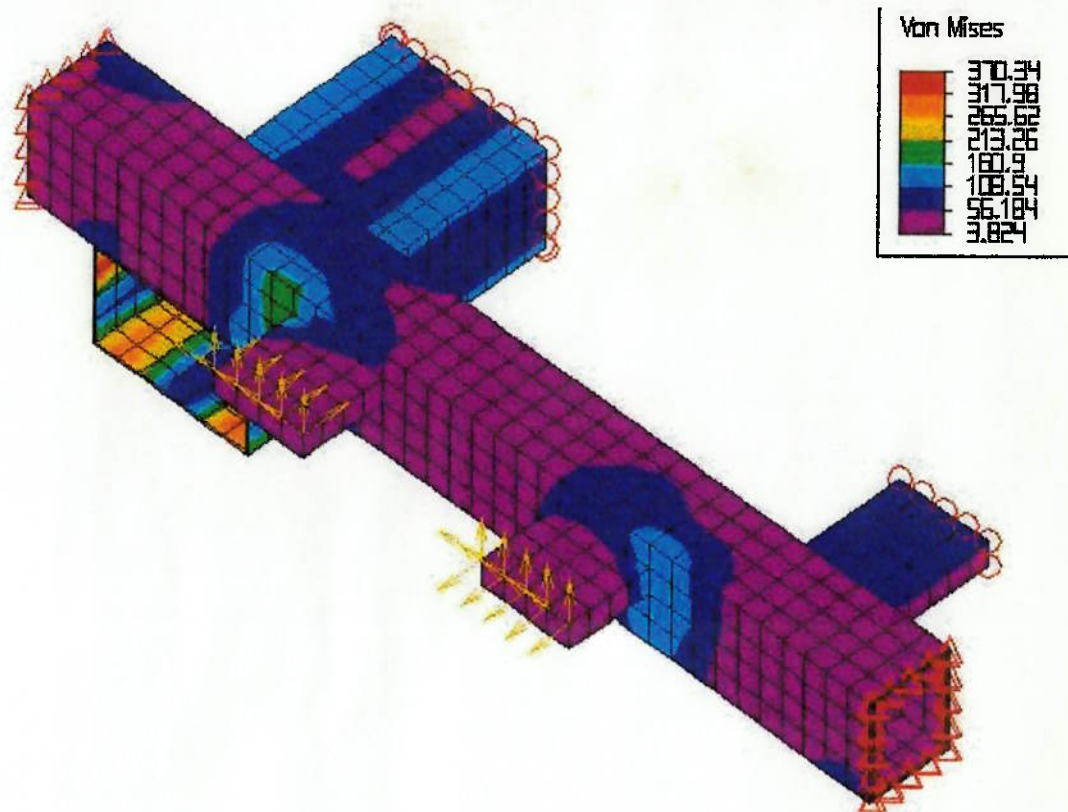


Figura 15.1: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração com travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.

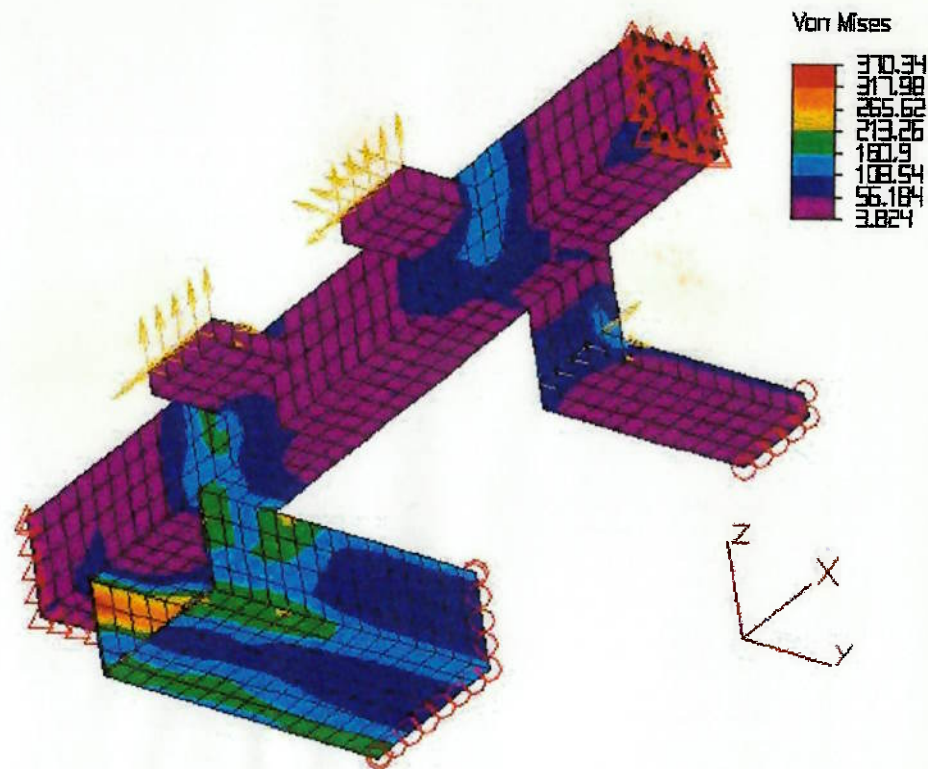


Figura 15.2: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração com travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.

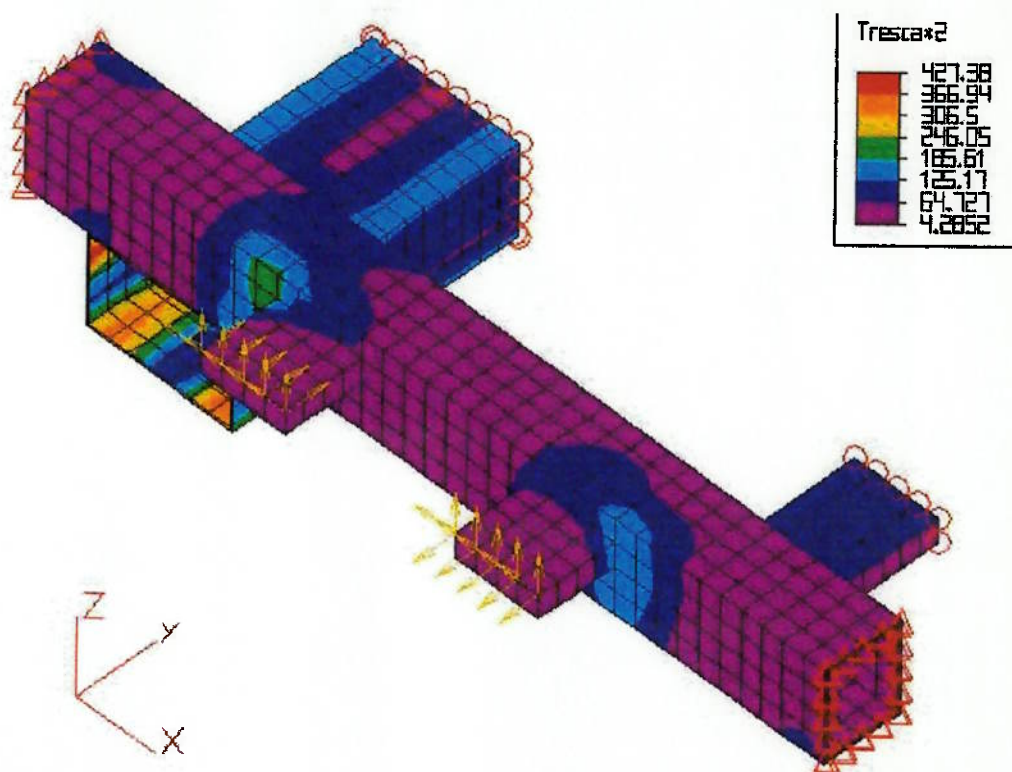


Figura 15.3: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração com travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.

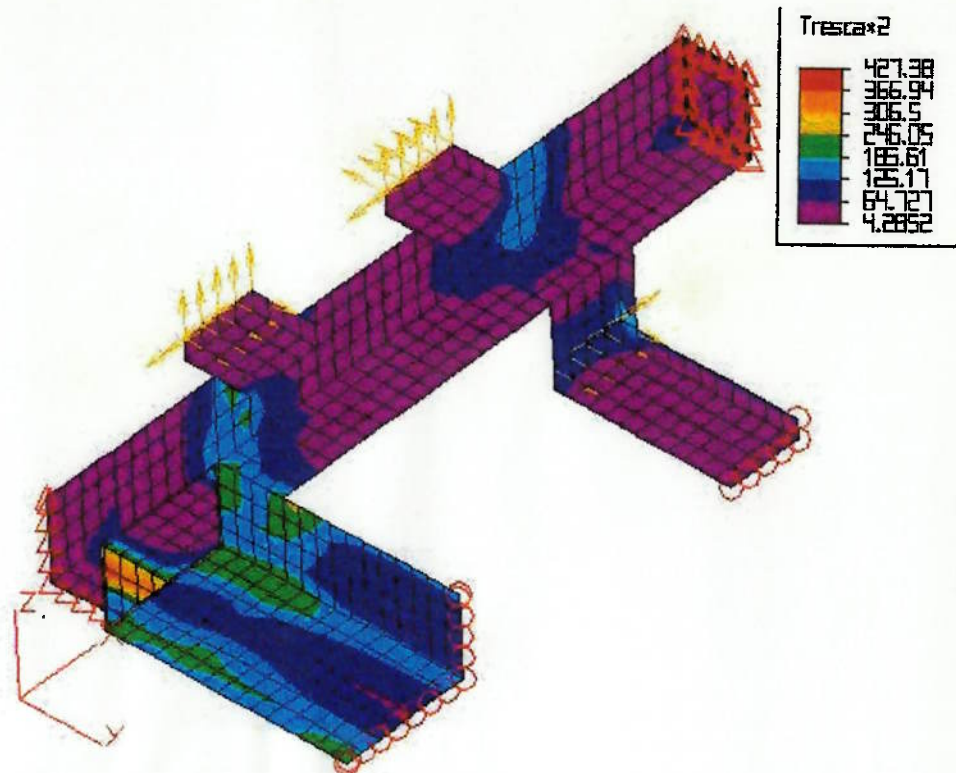


Figura 15.4: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração com travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.

No modelo sem a travessa auxiliar, apesar do desenho desta continuar aparecendo, ela não causa influência alguma nos resultados de tensão porque foram retiradas as suas condições de restrição e, o seu peso, não está sendo considerado. Desta forma, somente influenciam nas tensões as forças aplicadas em sua base provenientes do braço de controle inferior.

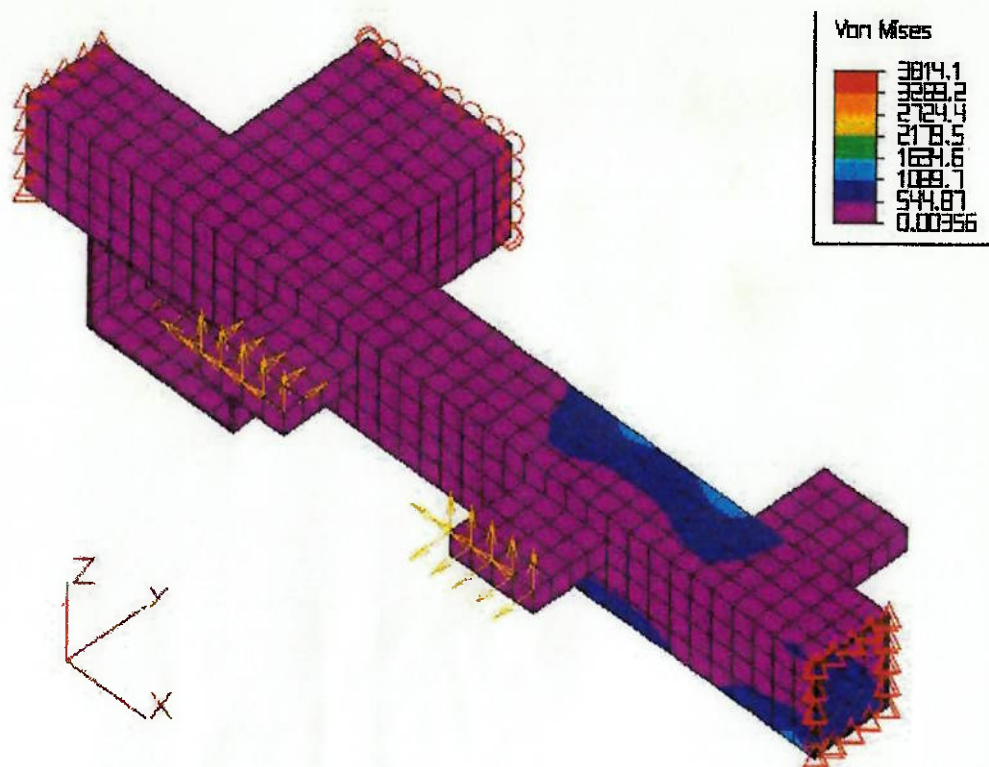


Figura 15.5: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração **sem** travessa auxiliar – Vista Isométrica Superior.

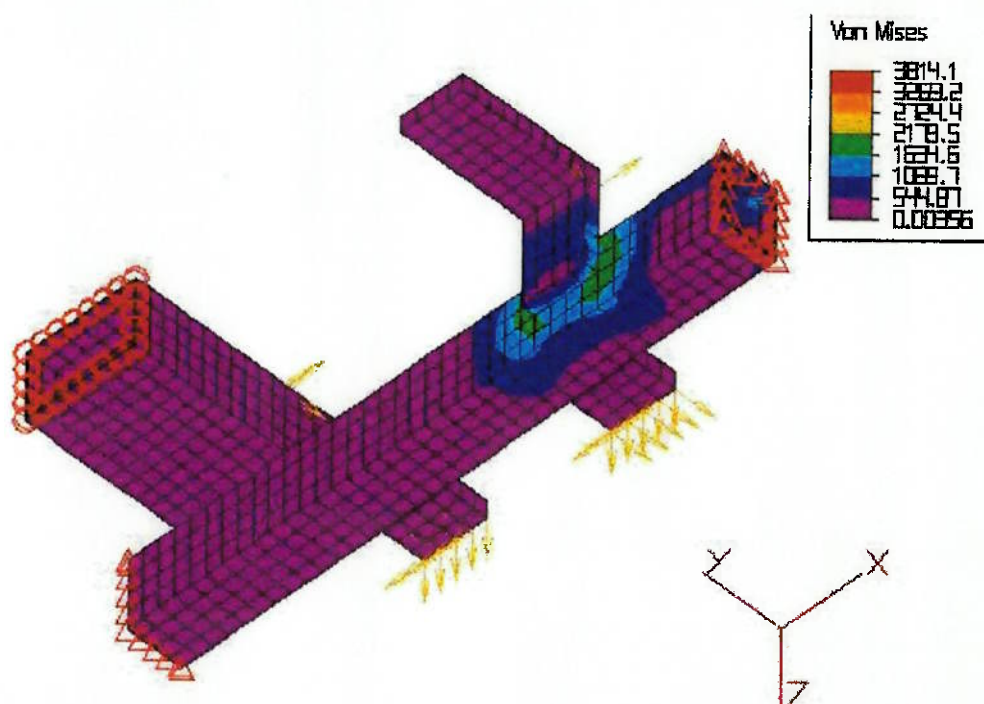


Figura 15.6: Distribuição de Tensões por Von Mises na configuração **sem** travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.

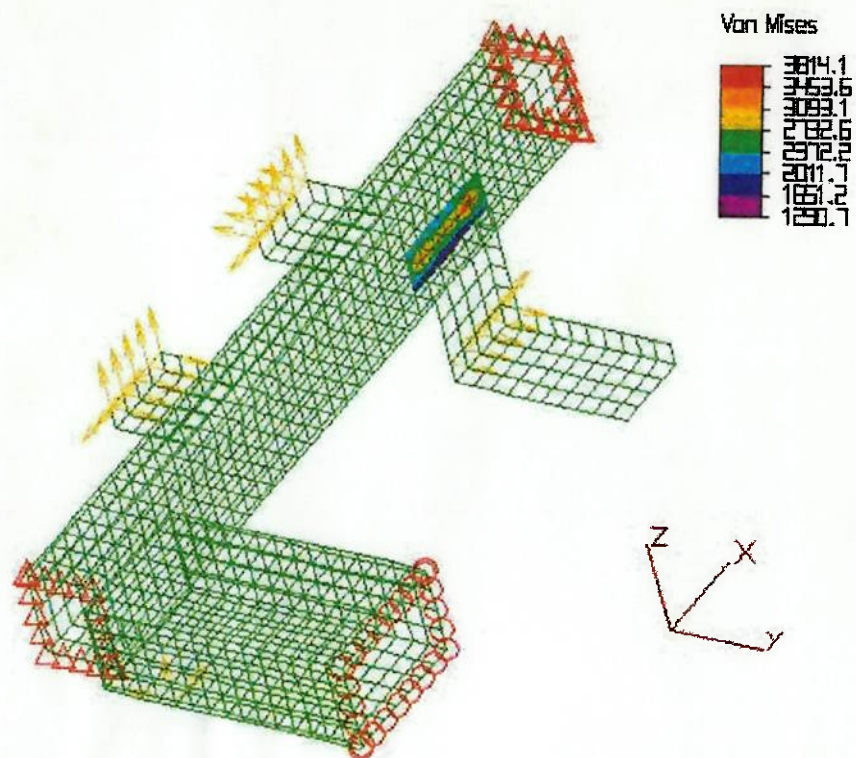


Figura 15.7: Visualização apenas das máximas tensões da estrutura **sem travessa** por Von Mises.

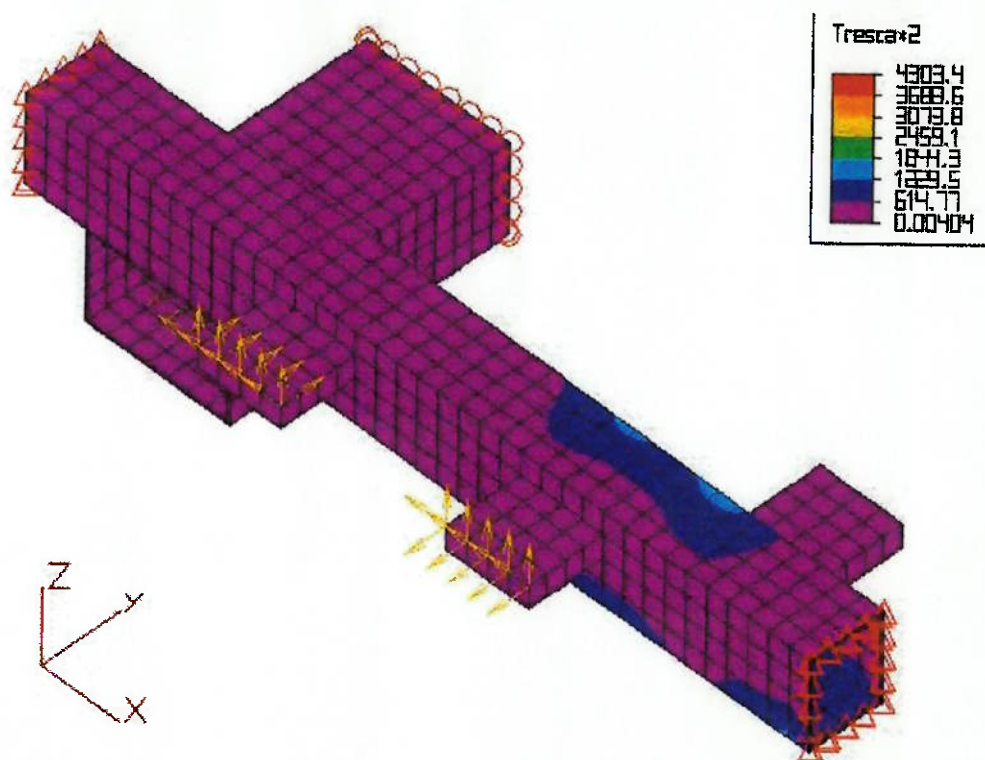


Figura 15.8: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração **sem travessa auxiliar** – Vista Isométrica Superior.

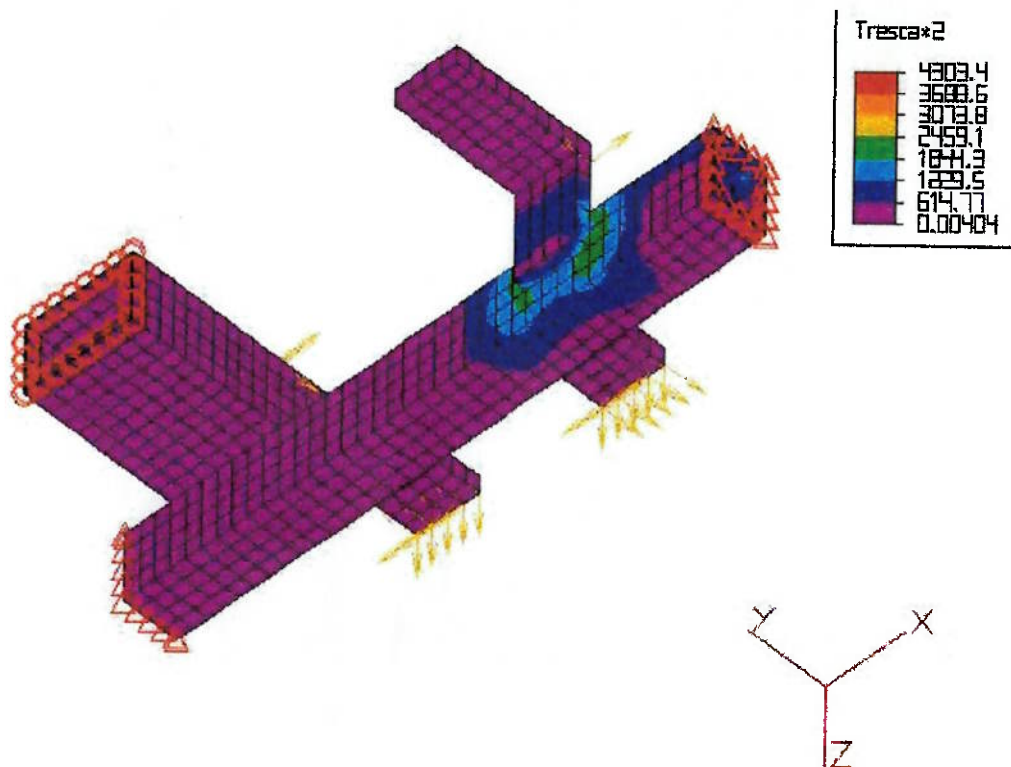


Figura 15.9: Distribuição de Tensões por Tresca na configuração **sem** travessa auxiliar – Vista em Perspectiva Inferior.

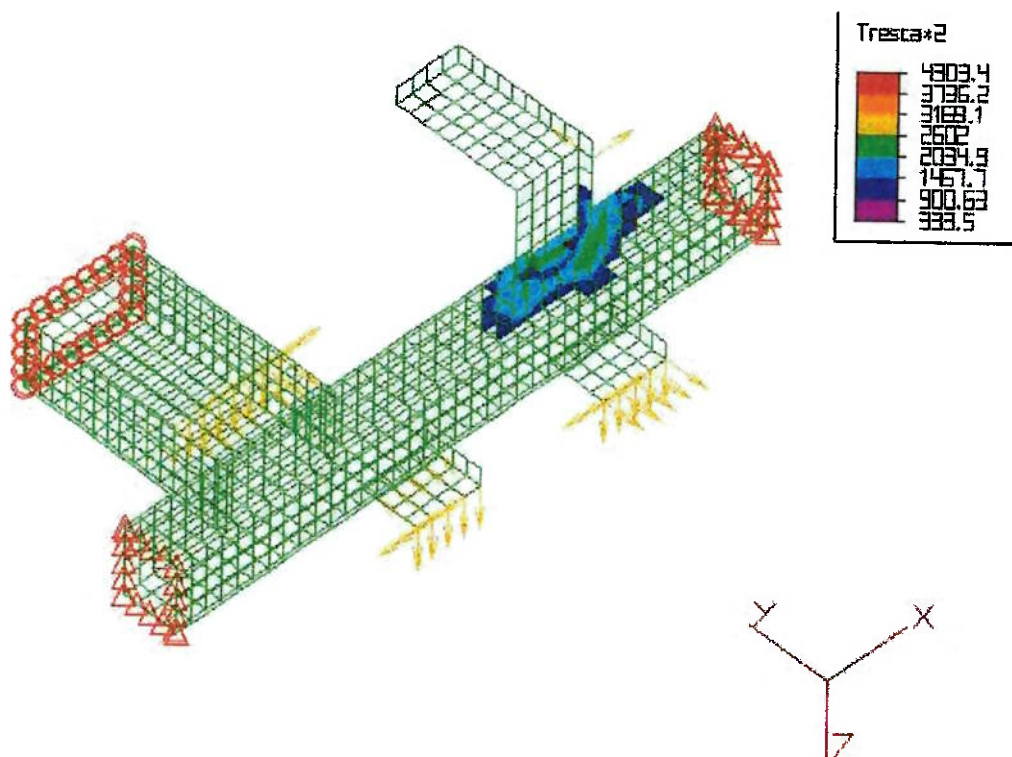


Figura 15.10: Visualização apenas das máximas tensões da estrutura **sem** travessa por Tresca.

16 Conclusões

Analisando as figuras acima, podemos comprovar que a ausência da travessa realmente aumenta consideravelmente os níveis de tensão na região da longarina próxima do suporte do braço de controle. Tanto os cálculos por Von Mises quanto por Tresca, as máximas tensões sem a travessa são cerca de 10 vezes maiores do que as máximas tensões da configuração com travessa.

Outro ponto de menor relevância, por não ter apresentado nenhum problema, é o fato das tensões na travessa frontal principal serem menores quando não há a travessa auxiliar, apesar da grande concentração de tensões na região da longarina próxima desta.

Comparando com os resultados obtidos pela G.M do Brasil, as conclusões obtidas foram as mesmas em relação a influência da travessa auxiliar, apesar dos valores numéricos serem relativamente diferentes. Isto pode ser explicado pelo fato do modelo utilizado neste trabalho ser muito mais simplificado em termos geométricos do que aquele adotado pela GM, já que o intuito era apenas verificar a comparação de uma forma não muito refinada.

Para estudos mais detalhados, seria necessário a utilização do modelo mostrado no item 13 que contém maiores detalhes geométricos, sendo que estes ainda não representam a melhor aproximação em relação ao modelo analisado pela GM, surgindo assim a necessidade de computadores mais velozes e de maior capacidade para a sua análise. Considerando que o modelo proposto pela GM foi analisado com máquinas de capacidades de processamento e armazenamento muito superiores aos equipamentos que tínhamos em mãos, seria possível fazer a análise dinâmica dos componentes, obtendo a durabilidade destes em relação à fadiga, além da possibilidade de se detalhar as influências de fatores como a espessura das chapas da longarina e propriedades do material variando ao longo do componente.

Contudo, foi possível aprender bastante sobre a utilização do software Algor, verificando as vantagens e facilidades que ele fornece em relação ao modelamento de elementos e visualização dos resultados, assim como algumas características que poderiam ser melhoradas, como por exemplo, a parte de construção geométrica que necessitaria de um número maior de ferramentas para estruturas complexas. Também ocorreu a dificuldade em se assimilar os comandos do programa, já que estes, a nosso ver, não se apresentam de uma forma que se possam compreendê-los intuitivamente. O mesmo vale para o sistema de auto-ajuda fornecido pelo programa, que acentua muito mais o lado da programação e concepção do *software* do que realmente o auxílio na compreensão pelo usuário.

17 Referências Bibliográficas

1. Giacomini, Antonio A.; **Analysis Report**. São Caetano do Sul, Structural and Engineering Analysis Group – GENERAL MOTORS DO BRASIL LTDA., 10/1997 (Relatório interno; report number: SEAG 186).
2. Collins, J. A. ; **Failure of Materials in Mechanical Design - Analysis, Prediction, Prevention**, Copyright© 1981 by John Wiley & Sons, Inc.
3. Manson, S.S.; **Fatigue: A Complex Subject - Some Simple Approximations**, *Experimental Mechanics*, July 1965
4. Wöhler, A., **Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagen-Achsen**, *Zeitschrift für Bauwesen*, 1860.
5. Forsyth, P.J.E., **Proceedings of the Royal Society (London)**, A242 (1957): pg198.
6. Forsyth, P.J.E., and Stubbington, C. A., **The slip Band Extrusion Observed in Some Aluminum Alloys Subjected to Cyclic Stresses**, *Journal of the Institute of Metals*, 83 (1954):395.
7. Polmear, I.J.; and Bainbridge, I.F., **Philosophical Magazine**, 4, Nº 48 (1959):126.
8. Forsythe, P.J.E., and Ryder, D. A., **Aircraft Engineering**, April 1, 1960.
9. Norma ABNT NBR 6656, **Chapas e bobinas de aço acalmados com características especiais e propriedades mecânicas de conformabilidade e soldabilidade**.
10. <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/2549/fea.htm>
11. <http://www.algor.com>