

**ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Mecânica**

Aplicação do Método de Otimização Topológica no Projeto de uma Peça Mecânica

PMC - 581
Projeto Mecânico II

*9/11/2001
15/03/2002*

ALUNO: *No USP:*

Mauricio Caio Rosin *2235771*
Paulo Antonio E. Gonzalez *2369631*

PROF. ORIENTADOR:

Emilio Carlos Nelli Silva

1. INTRODUÇÃO	4
2. MOTIVAÇÃO	6
3. SOFTWARES	7
3.1. Altair OptiStruct	7
3.2. Ansys.....	9
4. CONCEITOS BÁSICOS PARA A VERIFICAÇÃO FINAL EM ANSYS	10
4.1. Line	10
4.2. 2-D Solid	10
4.3. 3-D Shell	10
4.4. 3-D Solid	11
4.5. Definição do tipo de elemento linear ou quadrático	11
4.5.1. Elementos lineares	11
4.5.2. Elementos quadráticos	11
4.6. Densidade da malha.....	12
5. METODOLOGIA DE PROJETO	12
5.1. Definição dos parâmetros de projeto	13
5.2. Definição das Propriedades dos materiais.....	15
5.3. Definição dos tipos de elementos	15
5.4. Definição do volume de existência	16
5.4.1. Definição do volume de existência	16
5.4.2. Construção das malhas de elementos finitos	19
5.4.3. Definição das condições de contorno.....	20
5.5. Carregamento	21
5.6. Definição dos objetivos.....	21
5.7. Refinamento da solução	22
6. TÉCNICAS DE REFINAMENTO DA TOPOLOGIA OTIMIZADA.....	22
6.1. Fator de Penalidade.....	23
6.2. Não unicidade de solução	24
6.3. Métodos de Filtragem.....	24
6.4. Método de gradiente.....	25

6.5. Problemas numéricos	26
6.6. Utilização do comando MINMEMB	27
6.7. Exemplos de aplicação das técnicas de refinamento.....	27
6.7.1. Exemplo 1.....	27
6.7.2. Exemplo 2.....	27
6.7.3. Exemplo 3.....	28
7. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	30
7.1. Definição da peça	30
7.2. Requisitos de Projetos	32
7.3. Tipo de elemento	32
7.4. Definição do volume de existência.....	33
7.5. Cálculo do carregamento	33
7.6. Condições de Contorno.....	34
7.7. Construção do volume de existência.....	34
7.8. Parâmetros de otimização	35
7.9. Obtenção do volume de existência otimizado.....	35
7.10. Interpretação dos resultados:.....	39
7.11. Verificação da peça no Software Ansys.....	42
8. CONCLUSÃO.....	45
9. APÊNDICES	46
9.1. Apêndice A - Passo a Passo a otimização topológica de uma peça	46
8.2. Apêndice B – Propriedade mecânicas de alguns materiais.....	49
8.3. Apêndice C – Exemplo de arquivo de saída do software Optistruct.....	49
10. BIBLIOGRAFIA	59

1. Introdução

A mudança de século foi marcada principalmente pela globalização. O desaparecimento das fronteiras entre os países no setor comercial provocou um aumento da competição entre as empresas de todos os países. Nesta disputa por mercados consumidores de todos os lugares do mundo sobrevivem aquelas empresas que estão melhores estruturadas, ou seja, podem apresentar um produto de qualidade com um menor preço.

Assim, este novo cenário mundial atingiu diretamente a engenharia moderna. A engenharia mecânica anteriormente focada principalmente em atender aos requisitos de projeto a qualquer custo, agora preocupa-se em atender aos requisitos de projeto com especificações de produto que atendam a todos os requisitos de projeto e que principalmente sejam soluções competitivas.

Dificilmente, algum produto que não seja competitivo permanecerá no mercado, mesmo que ele seja uma novidade. A engenharia concorrencial está em todos os lugares do mundo para copiar e melhorar os produtos líderes de venda no mercado.

O custo de fabricação de um produto está muito relacionado ao valor da matéria-prima utilizada. Portanto, a importância da quantidade de matéria-prima utilizada principalmente para produtos fabricados em série consome grande parte dos custo por unidade produto. Assim, o projetista deve saber justificar cada grama utilizado na fabricação de uma estrutura mecânica e saber que este grama terá uma grande influência nas propriedades que fazem a estrutura atender aos requisitos de projeto. A indústria automotiva e aeronáutica tem gastado muitos esforços no desenvolvimento de peças inovadoras e leves que atendam aos objetivos específicos do projeto. Nestes objetivos, por exemplo podem estar relacionadas a rigidez, tensão, características de vibração e severidade, deslocamentos e durabilidade, os quais serão dosados na proporção adequada a sua função, minimizando o custo.

Entretanto, a maior dificuldade ao longo dos tempos foi transformar e simular casos reais em modelos. Assim, com o desenvolvimento de softwares cada vez mais poderosos a simulação pode evoluir causando um aumento na otimização dos componentes mecânicos. Uma das principais melhorias obtida foi a redução

da massa dos componentes e consequentemente a redução dos custos dos componentes mecânicos. Em alguns casos isto representa apenas redução de custo mas em outros pode ser o fator principal na concorrência de um projeto, por exemplo, a concorrência na venda de aviões, quanto mais pesado, mais gasolina gasta e mais difícil a pilotagem.

Assim, a otimização topológica pode ser concebida como uma maneira racional para se achar a distribuição espacial de material no domínio estudado, dada os requisitos de projeto que a estrutura atenderá. Através desta concepção utiliza-se método científico de determinação do modelo ideal.

Para a realização de análises e otimizações o uso de avançados softwares é fundamental, entre eles estão o Ansys, Nastran, Algor, OptiStruct, e outros. A diferença entre os programas de análise estrutural é muito variada., pois alguns funcionam muito bem para alguns casos e para outros não apresentam soluções muito boas. Entretanto, a finalidade do projeto também é um fator fundamental para saber qual software será utilizado no projeto.

Este trabalho de graduação fornecerá uma metodologia de projeto visando principalmente a redução da massa nos projetos de componentes mecânicos. Os software Ansys e Optistruct são os programas utilizados para este tipo de projeto e serão abordados em detalhes nos próximos capítulos.

2. Motivação

O objetivo deste trabalho de graduação é apresentar uma metodologia clara em projetos estruturais de componentes mecânicos. O trabalho aplica-se a projetos mecânicos que caracterizam-se pela redução de massa. Nos próximos itens serão expostos os conceitos e principalmente as inovações tecnológicas relacionadas ao tema: "Otimização Topológica".

O método de otimização topológica (MOT) o método dos elementos finitos com algorítimos de otimização para a obtenção dos resultados. Atualmente, existem diversos softwares disponíveis no mercado, porém ao longo do trabalho será citado apenas dois deles. O primeiro é o software Optistruct desenvolvido pela Altair é um software utilizado exclusivamente para otimização topológica e será utilizado para a obtenção do resultado ideal. O outro é o software Ansys versão 5.7 será utilizado para verificação do modelo interpretado pelo projetista. O Ansys é um software que tem como principal função a análise estrutural, porém existem outros módulos, no próprio programa, que abrangem os diversos tipos de análises, uma delas é a otimização topológica, porém não é um software dedicado.

O trabalho apresentará a base teórica e exemplos práticos de aplicação do método de otimização topológica (MOT). Entretanto, não utilizou-se casos complexos de cargas, pois o foco do trabalho é mostrar a metodologia e a lógica do pensamento do projetista durante o desenvolvimento de uma estrutura ou componente mecânico que atenda aos requisitos de projetos

O trabalho abrange desde o recebimento dos requisitos de projeto pelo projetista até a análise em elementos finitos da solução final demonstrando que a peça final atende aos requisitos de projeto propostos.

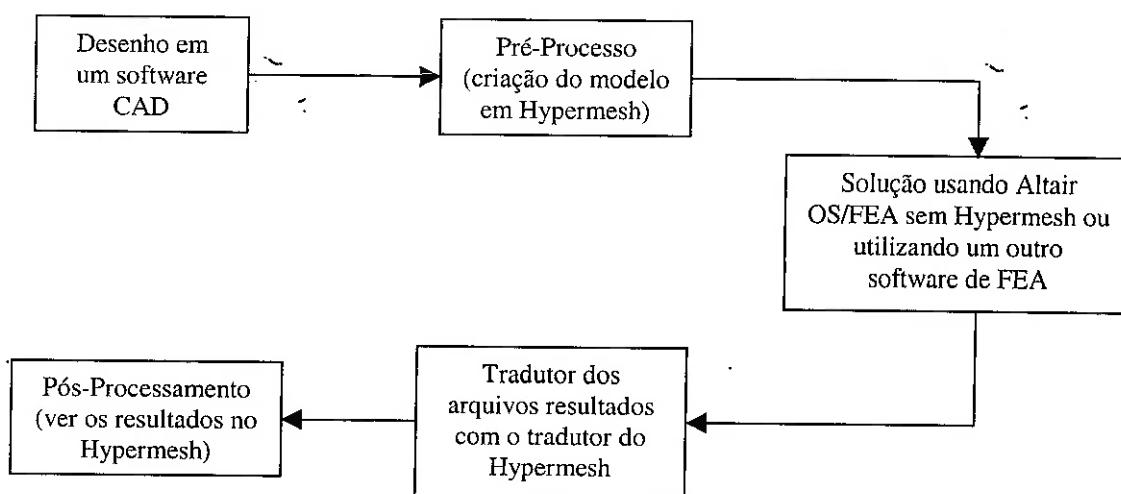
O desenvolvimento da base teórica e os exemplos de aplicação abordam principalmente análises tridimensionais, entretanto os mesmos conceitos podem ser feitos em análises bidimensionais, onde não existe nenhuma carga aplicada à estrutura que não esteja no plano de trabalho

Logo, aplicando corretamente os conceitos de MOT propostos o projetista poderá desenvolver um componente mecânico mais leve, com um menor custo e consequentemente um produto mais competitivo no mercado.

3. Softwares

3.1. Altair OptiStruct

Altair OptiStruct é um software que utiliza como ferramenta os algoritmos de otimização nos cálculos estruturais. O Hypermesh é o módulo utilizado para pré e pós processamento e permite construir elementos e modelos com elementos finitos, ver resultados e análise dos resultados. O módulo Altair OS/FEA é utilizado para resolver os casos de cargas definidos no Hypermesh. O fluxo abaixo mostra o processo de CAE utilizado pelo software.:



O programa possui um módulo de CAD utilizado para desenhar peças com geometrias simples. Entretanto, existe a possibilidade do projetista importar arquivos de outros softwares, por exemplo, arquivos com o formato IGES.

Neste software, o projetista deve definir muito bem os requisitos de projeto que indicarão a direção a ser tomada pela otimização. Altair OptiStruct é um software dedicado exclusivamente a otimização topológica, o que mostra a importância dada a este assunto pelo setor de engenharia.

Este software é baseado principalmente em banco de dados que armazenam todas as informações do modelo, ou seja, definem o caso de carga ao qual a estrutura atenderá.

Nestes bancos de dados são armazenados:

- dados do material
- informações sobre o elemento
- direção, módulo e sentido das forças
- condições de contorno e graus de liberdade dos nós

Para ilustração, a tela do programa é mostrada abaixo:



Figura 1 : Ambiente do programa Optistruct

3.2. Ansys

O programa ANSYS tem muita capacidade de análise de elementos finitos, abrange desde análises de problemas simples, lineares, estáticos até a análise de problemas complexos, transientes e dinâmicos. O programa ANSYS pode ser aplicado nas mais distintas áreas da engenharia.

Uma análise típica no programa ANSYS tem três etapas:

1) Construção do modelo:

- Definir tipo de modelo
- Definir tipo de elementos
- Definir propriedades do material
- Construção da geometria do modelo

2) Aplicação das cargas e obter a solução

3) Rever os resultados

Entretanto, este software utiliza o método de elementos finitos e entre suas ferramentas possui uma opção para análise topológica. Assim este programa mostrou-se eficiente na análise de elementos finitos entretanto mostrou-se extremamente complicado para análise topológica, pois não é um software dedicado para este propósito.

Para ilustração a tela do programa é mostrada abaixo:

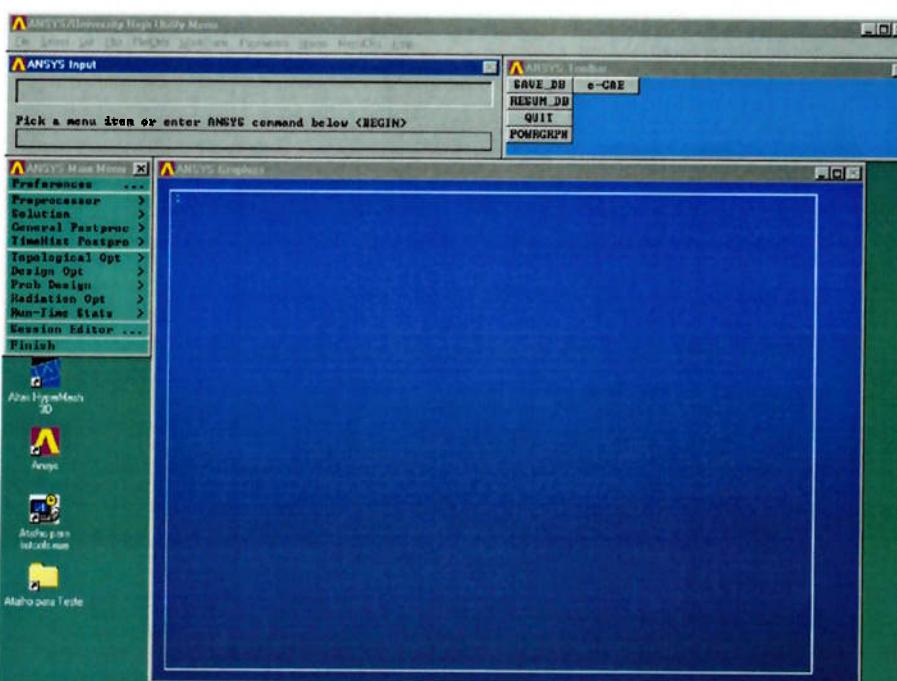


Figura 2: Ambiente do programa Ansys

4. Conceitos básicos para a verificação final em Ansys

O modelo de elementos finitos pode ser do tipo dimensional ou tridimensional, e composto por elementos pontuais, elementos lineares ou elementos sólidos. É possível também associar diferentes tipos de elementos (deve-se tomar cuidado, para manter a compatibilidade entre os grãos de liberdade). Por exemplo deve-se modelar uma estrutura armada rígida usando elementos do tipo 3-D shell para representar a pele e 3-D beam para representar as costelas. A escolha da dimensão e do tipo de elemento freqüentemente determinam qual o método de geração de modelos mais utilizado para o problema.

4.1. Line

Podem representar estruturas de vigas ou canos tão bem quanto modelos 2-D de estruturas armadas com simetria axial. O modelamento de sólidos freqüentemente não oferece muitos benefícios neste tipo de modelo. Eles são criados através de métodos de geração diretos.

4.2. 2-D Solid

A análise destes tipos de modelos são usados para estruturas planas finas, estas estruturas tem secção transversal constante (plano de tensões) ou estruturas sólidas com simetria axial. Através de muitas análises de modelos 2-D são relativamente fácil de criar pelos métodos de geração diretos, eles são mais fáceis de criar com modelos sólidos .

4.3. 3-D Shell

Estes modelos são utilizados para estruturas finas no espaço tridimensional (3D). Embora algumas análises de modelos 3-D Shell são relativamente fáceis de serem criadas pelos métodos de geração diretos, eles são geralmente mais fáceis de criar com modelos sólidos.

4.4. 3-D Solid

Este tipo de modelo é utilizado para estruturas tridimensionais (3D) com espessuras grandes. Estas estruturas nunca têm a mesma secção transversal e nunca têm um eixo de simetria constante. Criar um modelo sólido 3-D pelos métodos de geração diretos geralmente requer um grande esforço, o modelamento sólido sempre tornará o trabalho mais fácil.

4.5. Definição do tipo de elemento linear ou quadrático

4.5.1. Elementos lineares

Para análises estruturais, estes tipos de nós dos elementos com funções de formas adicionais freqüentemente produzem uma solução apurada em grande quantidade de computadores. Ao utilizar este tipo de elemento é importante evitar a deformação da forma nas regiões críticas. Assim, é importante utilizar a forma triangular dos elementos lineares 2-D e a forma de cunha ou tetraédrica dos elementos lineares 3-D em regiões de especial interesse. Deve-se ter cuidado em utilizar elementos lineares distorcidos. Nas análises estruturais lineares obtem-se geralmente resultados mais precisos e menos caros quando comparado a utilização de uma fina malha de elementos. Na análise de estrutura não linear, obtem-se usualmente a melhor acuracidade com um menor custo se for usado uma malha fina desses elementos lineares em preferencia a uma malha grosseira de elementos quadráticos.

4.5.2. Elementos quadráticos

Para análises lestruturais lineares com formas de elementos deformadas(isto é, elementos 2-D triangular ou elementos em cunha ou tetraédricos 3-D), os elementos quadráticos produziram melhores resultados com menos gastos que os elementos lineares.

4.6. Densidade da malha

Uma questão que sempre aumenta na análise de elementos finitos é, “Qual deve ser a malha usada para obter bons resultados?”. Infelizmente, ninguém pode responder com certeza, pois esta questão deve ser resolvida de caso a caso. Porém, existem algumas técnicas que se aplicadas ajudarão na solução:

- Adaptar a malha para produzir o menor número de erros;
- Comparar os resultados preliminares com os dados experimentais. Refinando a malha nas regiões onde as discrepâncias são grandes;
- Rodar uma análise inicial com a malha que parece mais adequada. Fazendo o mesmo duas vezes para as regiões críticas. Se as duas malhas derem o mesmo resultado, a malha será a adequada. Se derem diferentes, um refinamento será necessário;
- Se o resultado revelar que somente uma porção necessita de uma malha mais fina, deve-se submodelar somente esta parte deficitária.

A densidade da malha é extremamente importante. Se a malha for muito grosseira, os resultados conterão muitos erros. Se for muito fina, os dados serão “perdidos” pelo computador, devido ao tempo excessivo. Para solucionar todos estes problemas, sempre deve-se buscar analiticamente a densidade da malha antes de gerar o modelo.

5. Metodologia de Projeto

Neste item será descrito em detalhes a metodologia utilizada por um projetista para definir a forma e as dimensões finais de uma estrutura mecânica. Será considerado que o projetista dispõem de duas ferramentas essenciais para otimização e verificação estrutural que são respectivamente o software OptiStruct e o software Ansys.

Para qualquer dúvida sobre algum comando no software OptiStruct descrito nos itens seguintes, leia o apêndice A – “Passo a passo a otimização topológica de uma peça”.

5.1. Definição dos parâmetros de projeto

Esta é a etapa mais importante do projeto estrutural. Nesta etapa serão definidos os parâmetros de projetos, ou seja, os requisitos aos quais a estrutura sintetizada vai atender. Os requisitos de projetos são compostos pela função objetivo e pelos fatores limitantes da função objetivo.

O projetista deve saber claramente a funcionalidade da peça, pois será a base para a definição da função objetivo. Para esta função escolhe-se a característica da estrutura que será maximizada ou minimizada. As características podem ser:

- Volume
- Massa
- Rígidez
- Deslocamento
- Frequência de vibração

A otimização topológica buscará a cada interação atingir a função objetivo definida pelo projetista. Apenas uma característica pode ser selecionada dentro das opções acima.

Após a definição da função objetivo, deve-se definir os fatores limitantes de projeto. Estes fatores serão os requisitos numéricos de projeto que o programa deve atender. Por exemplo, pode-se definir um deslocamento, uma tensão admissível, uma quantidade de massa ou até mesmo uma frequência da estrutura final.

Como visto no item 3.1., a otimização é formada por um conjunto de iterações em busca da solução final. Dado o início da otimização, o programa projetará uma estrutura inicial e grosseira que atenda ao fator limitante inserido inicialmente.

Por exemplo, se foi colocado como função objetivo aumentar a rigidez e também foi inserido como fator limitante que a peça de massa de 1000kg, na primeira interação será projetada uma estrutura grosseira com massa de 1000Kg e com uma determinada rigidez. Nas próximas interações o programa aumentará a rigidez da peça obtida. O valor da massa sempre será próximo do valor do fator limitante de 1000Kg, o valor pode ser um pouco menor devido a metodologia de otimização do programa, mas com certeza será muito próximo na última iteração que fornecerá a peça mais rígida possível.

Logo, a função objetivo e os fatores limitantes fornecerão a direção a ser tomada na otimização da peça, pois a função objetivo indicará o que será otimizado e o fator limitante indiretamente fornecerá o quanto a característica da função objetivo será otimizada.

A idéia exposta anteriormente pode ser melhor explicada através de um simples exemplo. Se para uma mesma estrutura temos dois parâmetros de projetos com a mesma função objetivo. No primeiro e no segundo caso, a função objetivo é maximizar a rigidez. A função limitante no primeiro caso é o deslocamento de um determinado ponto igual a 3 mm e a função limitante no segundo caso é o deslocamento do mesmo ponto igual a 30 mm. Intuitivamente, pode-se prever que a primeira estrutura terá uma rigidez muito maior que na segunda. Como explicado anteriormente, o fator limitante é uma indicação de quanto a função objetivo será otimizada.

Para demonstrar que a lógica do programa sempre converge em uma única solução para um determinado parâmetro de projeto, podem ser realizados alguns testes. Por exemplo, consideraremos um caso onde para uma determinada estrutura foi definida uma função objetivo de maximizar a rigidez e como fator limitante a peça deve apresentar uma massa de 500 Kg. Como resultado a estrutura otimizada apresentou uma rigidez de 40. Posteriormente como teste de verificação vamos realizar o contrário.

Na segunda etapa, será definida a função objetivo de minimizar a massa e como fator limitante a peça terá uma rigidez de 40. Quando comparadas as duas

estruturas otimizadas, o projetista pode verificar que as duas estruturas são iguais, pois elas vão atender aos mesmos parâmetros de projeto, a única diferença é que elas convergiram de maneira diferente na mesma solução final. Possivelmente, um processo demorou mais que o outro e apresentou maior número de iterações

O projetista deve ter os conceitos e parâmetros muito claros para que na última etapa, após a obtenção da solução otimizada, o projetista saiba manipular estes dados para novamente otimizar a peça e alterar os parâmetros de projeto.

5.2. Definição das Propriedades dos materiais

Nesta etapa o material será definido. O módulo de Young e o coeficiente de Poisson são necessários para definir as propriedades mecânicas do material e iniciar a otimização topológica. Definindo estas duas características o módulo de torção estará automaticamente definido e não é necessário preencher este campo no programa Optistruct.

Se a função objetivo ou algum fator limitante está relacionado à massa, consequentemente deve-se inserir a densidade do material. Pelas dimensões do modelo tem-se o volume, com o valor da densidade o computador pode transformar este valor de volume em massa. No software Optistruct, para definir a densidade a opção RHO deve ser ativada.

5.3. Definição dos tipos de elementos

Nesta etapa será definido o tipo de elemento a ser utilizado na otimização. No programa OptiStruct existem dois tipos de elementos :

- PSHELL – para análises de estado plano de tensões utiliza-se o elemento de placa ou casca, no programa o elemento é determinado por “PSHELL”. Este tipo de elemento é muito utilizado na análise 2D. Em uma análise dimensional 2D existem carregamentos apenas no plano de trabalho. Caso a estrutura apresente algum tipo de carregamento que não tenha direção contida no plano de trabalho, é aconselhável que seja feita uma análise tridimensional ou de placa. Nesta análise tridimensional podem ser

utilizados elementos PSHELL, ou também outro tipo de elemento que será explicado a seguir, o elemento tipo PSOLID.

- PSOLID – este elemento é utilizado em análise de carregamentos tridimensionais. Este elemento é caracterizado por ser um elemento sólido, como o próprio nome diz.

A aplicação da peça será o fator determinante do tipo de elemento a ser utilizado. Em aplicações onde serão utilizadas estruturas que são montadas com chapas, é aconselhável a utilização de elementos tipo PSHELL. Em outras aplicações podem ser utilizados elementos sólidos, como por exemplo um pilar de sustentação de uma ponte. Assim, a escolha do tipo de elemento dependerá da avaliação do projetista e da aplicação da estrutura a ser modelada.

Na definição do elemento é criado um banco de dados que armazenará todas as informações referentes àqueles elementos. Uma destas informações é o material a ser utilizado com este elemento. Assim, cria-se um vínculo entre o banco de dados do material e o banco de dados do elemento.

5.4. Definição do volume de existência

Nesta etapa será definido o volume de existência a ser utilizado para representar a situação real. Pode-se comparar o projetista a um tradutor, pois ele deve saber traduzir a situação real para o computador em seus maiores detalhes. Assim, o volume de existência é a representação do caso real criado pelo projetista com todas as considerações e hipóteses admitidas.

A construção de um volume de existência que será utilizado para uma otimização topológica tem algumas etapas muito bem definidas:

5.4.1. Definição do volume de existência

A definição do volume de existência pode ser entendida como a definição de todas as restrições geométricas da estrutura. O volume de existência será o volume que pode ser ocupado pela massa da estrutura durante a otimização. Nesta etapa define-se onde pode existir material e onde não pode-se existir

material. Outra característica desta fase é delimitar os espaços onde não pode-se retirar material devido a determinadas peculiaridades da estrutura, como por exemplo, o furo passante de um eixo ou um ponto de fixação.

Assim, as regiões onde não pode existir material serão definidas não desenhando este espaço. As regiões onde pode existir material serão definidas desenhando o espaço em CAD ou no próprio Optistruct. O mesmo acontece com aquelas regiões que obrigatoriamente deve existir material. A única diferença entre as regiões onde deve existir material e onde pode existir material ocorrerá na definição das características do elemento a ser utilizado, pois quando define-se o tipo de elemento, ao mesmo tempo pode-se definir se este elemento será removível ou fixo (não pode-se retirar material desta região).

Em elementos de placa (PSHELL), quando os elementos forem definidos deve-se ativar a opção CONT line para elementos que podem ser otimizados e deve-se desativar a opção CONT line para elementos que não serão otimizados, ou seja, que obrigatoriamente permanecerão após a otimização.

Em elementos sólidos (PSOLID), quando os elementos forem definidos deve-se definir a variável DS igual a 1 para elementos que podem ser otimizados e deve-se definir a variável DS igual a 0 para elementos que não serão otimizados, ou seja, que obrigatoriamente permanecerão após a otimização.

Outro fator importante na definição do volume de existência é a presença de simetria na peça a ser projetada. Muitos objetos tem algum tipo de simetria, pode ser simetria repetitiva (como uma série de aletas igualmente divididas em um longo tubo), simetria reflexiva (como um molde de caixa de plástico), ou simetria axial (como uma lâmpada). Quando um objeto é simétrico em todos os aspectos (geometria, restrições, carregamentos, e propriedades), pode-se tirar vantagem do fato da redução do tamanho e da “extensão” do volume de existência.

Se o volume de existência é simétrico, deve-se verificar se o carregamento também é simétrico, pois algumas vantagens de volume de existências simétricos podem ser utilizadas. Volume de existências simétricos não apresentam deslocamentos na direção perpendicular ao plano de simetria. Assim, pode-se desenhar metade da estrutura simétrica impondo as restrições descritas. Este fato é de suma importância, pois em alguns casos a qualidade da malha não pode ser melhorada devido a limitações computacionais. Dividindo a estrutura do meio, consequentemente necessita-se da metade da capacidade computacional

utilizada para a estrutura inteira, ou seja, pode-se diminuir o tamanho do elemento e aumentar a qualidade da malha.

A simetria axial é outro tipo de simetria encontrada nos volume de existências. Qualquer estrutura que dispõe de simetria geométrica central (como uma sólido de revolução), é considerado uma estrutura de simetria axial. Exemplos deste tipo são: cones, pratos circulares, cúpulas, e tubos.

Volume de existências 3-D com simetria axial podem ser representados com uma forma equivalente em 2-D. Pode-se esperar que os resultados no volume de existência 2-D serão mais acurados que no volume de existência original 3-D.

Para este tipo de simetria, pode-se ter tanto carregamentos simétricos axiais como não simétricos axiais. No caso de um carregamento não simétrico axial, deve-se criar um volume de existência 2-D com carregamento não simétrico axial.

As exigências para os volume de existências simétricos axiais:

- O eixo de simetria deve coincidir com o eixo global cartesiano (eixo Y);
- Coordenadas negativas no eixo X não são permitidas;
- O eixo cartesiano global Y representa a direção axial, o eixo cartesiano global X representa a direção radial, e o eixo global cartesiano Z corresponde a direção circular.
- O volume de existência pode ser “compactado” usando alguns tipos apropriados, para volume de existências simétricos axiais Além disso, várias combinações, contatos, ligações, e superfícies podem ser incluídas num volume de existência que também contém sólidos e células simétrica axiais.
- Para volume de existências 2-D cujo efeitos de discretização são importantes para se obter um melhor contorno, devem ser usados no mínimo 2 elementos na malha aumentando esta discretização.

Se a estrutura contém simetria axial em toda sua extensão, não se deve esquecer de fornecer os espaços apropriados entre o eixo Y e a simetria do volume de existência 2-D.

A introdução do volume de existência pode ser desenhada no módulo Hypermesh do Optistruct ou pode ser desenhada em softwares do tipo CAD e posteriormente exportada em arquivos com formatação IGES.

Durante o desenho do volume de existência, pequenos detalhes que não são importantes para a síntese podem ser descartados, desde que estes deixem seu volume de existência mais complicado que o necessário. No entanto, para algumas estruturas, “pequenos” detalhes como arredondamentos, ou furos, podem ser lugares de máxima tensão, e portanto devem fazer parte de sua síntese. Por isso, é muito importante estar atento ao tipo de detalhe que deve ser incluído ou não, para evitar que a síntese seja inadequada.

5.4.2. Construção das malhas de elementos finitos

A construção da malha está relacionada intimamente com o tamanho do elemento. Não pode-se reduzir o tamanho do elemento de maneira que o hardware não suporte um número grande de nós, mas por outro lado deve-se diminuir o máximo possível o tamanho do elemento para que as respostas apareçam mais refinadas. Assim, existe um problema entre custo e benefício da parte física do método de otimização topológica. Portanto, pode-se fazer uma sintetização o mais precisa possível que se possa pagar.

Porém, existem algumas técnicas que se aplicadas ajudarão na solução:

- Adaptar a malha para produzir o menor número de erros;
- Comparar os resultados preliminares com os dados iniciais. Refinando a malha nas regiões onde as discrepâncias são grandes;
- Rodar uma análise inicial com a malha que parece mais adequada. Fazendo o mesmo duas vezes para as regiões críticas. Se as duas malhas derem o mesmo resultado, a malha será a adequada. Se derem diferentes, um refinamento será necessário;
- Se o resultado revelar que somente uma porção necessita de uma malha mais fina, deve-se submodelar somente esta parte deficitária.

A densidade da malha é extremamente importante. Se a malha for muito grosseira, os resultados conterão muitos erros. Se for muito fina, os dados serão “perdidos” pelo computador, devido ao tempo excessivo. Para solucionar todos estes problemas, sempre deve-se buscar analiticamente a densidade da malha antes de gerar o volume de existência.

No programa Optistruct a malha pode ser definida quando as superfícies são construídas para análises bidimensional, e no caso de análises tridimensionais podem ser definidas na pasta SOLID MESH do menu 3D.

5.4.3. Definição das condições de contorno

Nesta etapa serão definidas as condições de contorno, ou seja, as restrições dos nós e consequentemente as restrições da estrutura. Por exemplo, se um nó está apoiado em alguma superfície ou plano, o nó terá alguns impedimentos que podem limitar o grau de liberdade deste nó. Um nó comum, possui 6 graus de liberdade:

- translação no eixo x
- translação no eixo y
- translação no eixo z
- rotação no eixo x
- rotação no eixo y
- rotação no eixo z

Ao selecionar qualquer destas opções no programa OptiStruct, automaticamente você estará limitando o grau de liberdade deste nó. Por exemplo, caso um nó esteja apoiado em um plano que impeça o movimento de translação no eixo y, deve ser selecionada a opção de translação no eixo y deste nó. Assim, isto deve ser feito em todos os nós que contornam a estrutura para determinar os pontos de apoio destes nós e consequentemente da estrutura. Após ser feita a otimização topológica, talvez alguns nós não estejam exercendo influencia na estrutura, ou seja, mesmo definidos como pontos de apoio eles entraram na otimização.

Para armazenar estas informações deve ser criado um banco de dados para armazenar todos os graus de liberdade de cada nó. Isto é feito criando e nomeando um novo “load col” na pasta “collectors” do menu BC’s do programa OptiStruct.

5.5. Carregamento

Esta etapa consiste em se definir o carregamento ao qual o volume de existência será submetido, ou seja, nesta etapa as forças, pressões, temperaturas, etc., devem ser aplicadas nos locais adequados do volume de existência.

O primeiro passo será criar um novo "load col", no menu "collectors", com isso um novo tipo de carregamento será criado, armazenando todas as informações referentes ao carregamento que se está impondo, como por exemplo o tipo (pressão). É importante frisar que caso o "load col" selecionado seja diferente do criado, deve-se selecionar o "load col" correto entrando no menu "global" que se encontra do lado direito do monitor.

Com o banco de forças criado, pode-se aplicá-las aos volume de existência, indicando seus módulos, direções e sentidos. Para isto, basta selecionar no banco de dados o carregamento desejado.

5.6. Definição dos objetivos

Em mãos com todos os parâmetros definidos anteriormente, o usuário poderá fornecer ao programa OptiStruct os parâmetros de projeto, ou seja, qual será a finalidade funcional da peça. Por exemplo, será citado duas condições, com dois caminhos possíveis de convergência:

- Minimizar a massa da estrutura para um deslocamento pré definido – esta opção tem como parâmetro de projeto o deslocamento ao qual a estrutura sintetizada tem que atender no nó definido no programa. Tendo como limite o deslocamento em um mais nós definido previamente durante a definição da função da estrutura, o programa sintetizará a estrutura retirando a maior massa possível.
- Minimizar o deslocamento para uma massa pré-definida – esta opção é exatamente o inverso da outra, ou seja, primeiro informa-se ao programa o quanto de massa a estrutura deve ter e o programa devolverá a estrutura mais

rígida possível, ou seja, a estrutura que tiver o menor deslocamento possível em um nó definido previamente.

O usuário colocará os limites de máximo ou mínimo, conforme as condições de trabalho e o programa se encarregará de obter a estrutura sintetizada que atenderá ao limite mais crítico de trabalho, atendendo a este limite, a estrutura sintetizada atenderá a qualquer valor dentro do limite de máximo e mínimo. Ou seja, a estrutura será sintetizada de forma a suportar a qualquer valor entre o máximo e mínimo.

Além disso o número de iterações poderá ser estipulado. Porém isto não garantirá que o número colocado seja suficiente para a convergência do problema.

5.7. Refinamento da solução

Após salvar o arquivo com o formato FEM, deve-se rodar o mesmo, para se obter a estrutura sintetizada.

Feito isto, com a estrutura já sintetizada, tem-se a opção de ver os gráficos, em qualquer iteração, desde da primeira até a última, quando ocorrerá a convergência. Nestes resultados poderá se ver os deslocamentos, as tensões de Von Misses e a densidade da estrutura, além de outros conforme o tipo de carregamento aplicado.

Ao analisar os resultados, pode-se remodelar a estrutura e realizar novamente a otimização, para se refinar os resultados, ou mesmo utilizar outros programas mais específicos, como o Ansys, para a verificação das tensões.

6. Técnicas de Refinamento da Topologia Otimizada

O projetista deve ter os conceitos muito claros para a interpretação da solução e posteriormente a fabricação da peça final. Neste processo, a participação mais importante do projetista é saber interpretar a solução correta. A

interpretação correta dos resultados depende de uma clara apresentação dos resultados. Durante o MOT, o projetista deve caminhar para uma clara obtenção de resultados, mas existem alguns problemas numéricos que tornam a solução muito confusa. Portanto, neste item são apresentados algumas técnicas de refinamento da solução final.

6.1. Fator de Penalidade

Na região de projeto são inseridas as regiões onde deve existir material, regiões onde não deve existir material e regiões onde poderá existir massa, ou seja, a região onde será realizada a otimização topológica. As condições de contorno definem todos os contornos da estrutura a ser projetada, ou seja, todos os graus de liberdade dos nós da estrutura.

As variáveis de projeto do problema são as densidades relativas das células da micro estrutura no domínio de projeto. Normalmente aproxima-se a densidade como constante em cada elemento finito do problema discreto e pode ser representada por um vetor ρ de dimensão N (número total de elementos na malha). Esta densidade representa uma proporção relativa de material e, em nenhum momento, pode ser confundida com o peso específico do material.

No processo de pós processamento as regiões de densidades intermediárias não são desejadas. Uma solução ótima ideal seria uma estrutura bem definida contendo apenas regiões de vazios e sólidos.

Um dos métodos mais utilizados para otimização topológica é o emprego de materiais do tipo SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization). Este método aumenta o custo de densidades intermediárias eliminando boa parte das regiões de densidades intermediárias. A parametrização do tensor constitutivo para a aproximação SIMP é dada na forma:

$$C = \rho^P C_0$$

Onde:

C_0 = Tensor constitutivo do material base

P = Fator penalidade

O fator de penalidade força as variáveis de projeto no sentido da solução 0-1. Vários valores para a constante P foram sugeridos na literatura estando eles entre 1.0 e 4.0. Nos casos práticos realizados serão comparados os diferentes valores de penalidades. Os valores podem ser alterados na opção “DISCRETE” do programa OptiStruct utilizado durante as aplicações práticas deste trabalho.

Segundo o help do OptiStruct, na primeira otimização é aconselhável a utilização de 1 para elemento de placa (PSHELL) e 2 para elemento sólido (PSOLID)

6.2. Não unicidade de solução

Um problema de otimização topológica utilizando materiais do tipo SIMP com um fator de penalidade maior que 1 é não ser convexo. A natureza não convexa do problema matemático leva a uma não unicidade de solução, isto é, o ponto ótimo encontrado não é necessariamente um mínimo global. A existência de mínimos locais conduz o algoritmo a diferentes soluções possíveis considerando o mesmo problema discretizado. Diferentes pontos de partida, parâmetros de filtro e do algoritmo de otimização interferem no resultado obtendo soluções diferentes.

6.3. Métodos de Filtragem

Os métodos de filtragem são responsáveis pela melhoria final da síntese, ou seja, melhora consideravelmente o refinamento da solução.

Esses métodos utilizados em otimização topológicas podem ser classificados de acordo com a forma com que os elementos vizinhos são considerados: filtros de vizinhança fixa, onde somente vizinhos de aresta e/ou nó são considerados e filtros espaciais, onde elementos que se encontram dentro de um determinado raio de varredura em torno do elemento central são considerados.

Os filtros espaciais permitem abstrair o formato dos elementos vizinhos assim como na malha, são menos dependentes do refino da malha. O filtro espacial mais simples é o filtro linear, onde são considerados os elementos

vizinhos que se encontram dentro de um raio em torno do elemento central. Este valor é conhecido como raio de abrangência. Os pesos da média ponderada são calculados por uma relação linear, inversamente proporcional à distância.

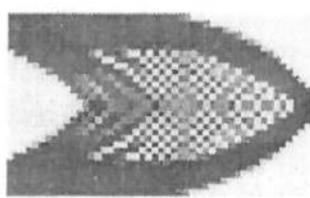
As vantagens de se utilizar a técnica de filtro é que ela não requer restrição extra no processo de otimização, exige pouco esforço computacional e é de fácil implementação. A desvantagem é que não há prova matemática de unicidade de solução e convergência para a solução ótima.

6.4. Método de gradiente

Uma outra solução para os problemas numéricos, aqueles em que o cálculo não é suficiente para traduzir um resultado, é necessária a utilização de um controle do gradiente. Esta técnica, porém, é computacionalmente ineficiente uma vez que introduz no problema de otimização um número de restrições maior do que o número de variáveis, que deve ser grande para uma boa solução.

6.5. Problemas numéricos

Instabilidade de tabuleiro – uma maneira de evitar o aparecimento numérico é utilizar elementos de 8 nós em vez de elementos com 4 nós. Um exemplo do aparecimento da instabilidade de tabuleiro é apresentada na figura 3:

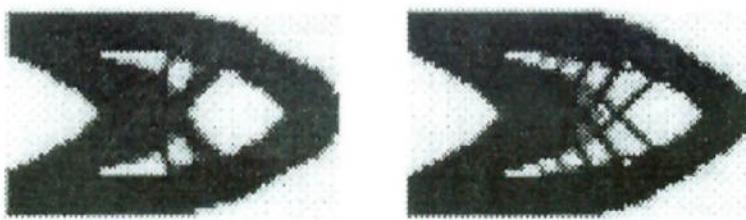


exemplo de instabilidade de tabuleiro

Figura 3: Instabilidade de tabuleiro

Mínimos locais – a natureza não convexa do problema matemático conduz o algoritmo para mínimos locais. Mesmo que do ponto de vista da execução seja importante obter várias topologias ótimas, é fundamental que se conheça a topologia correspondente ao mínimo global. As figuras 4 mostram as diferentes topologias obtidas com duas penalidades e pontos de partidas diferentes:

Mínimos locais – a natureza não convexa do problema matemático conduz o algoritmo para mínimos locais. Mesmo que do ponto de vista da execução seja importante obter várias topologias ótimas, é fundamental que se conheça a topologia correspondente ao mínimo global. As figuras 4 mostram as diferentes topologias obtidas com duas penalidades e pontos de partidas diferentes:



a)

b)

diferentes topologias para penalidades a) $p = 4.0$ e b) $p = 3.2$

Figura 4: Exemplos de penalidade

6.6. Utilização do comando MINMEMB

A utilização deste comando permite controlar os buracos, com o controle destes, é possível equalizar a estrutura, e com isso, obter uma solução o mais uniforme possível. O Optistruct possui esta ferramenta para determinar o diâmetro do menor elemento possível. Porém utilizando este tipo de ferramenta torna a obtenção da solução mais demorada.

6.7. Exemplos de aplicação das técnicas de refinamento

6.7.1. Exemplo 1

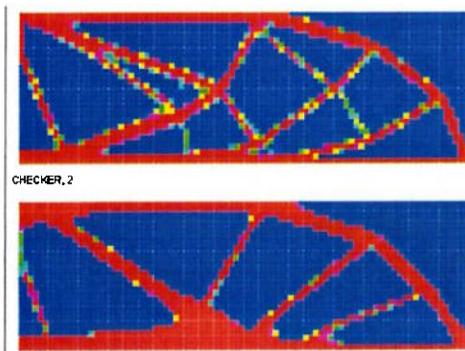


Figura 5: Exemplo 1- MINMEMB

6.7.2. Exemplo 2

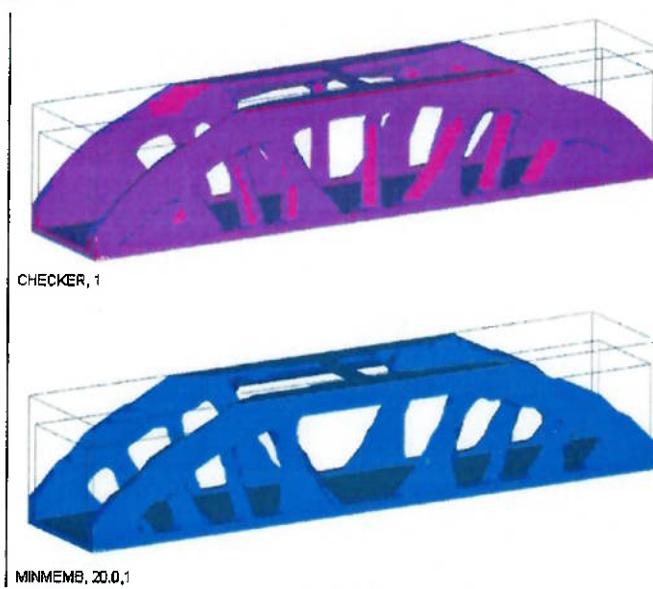


Figura 6: Exemplo 2 - MINMEMB

6.7.3. Exemplo 3

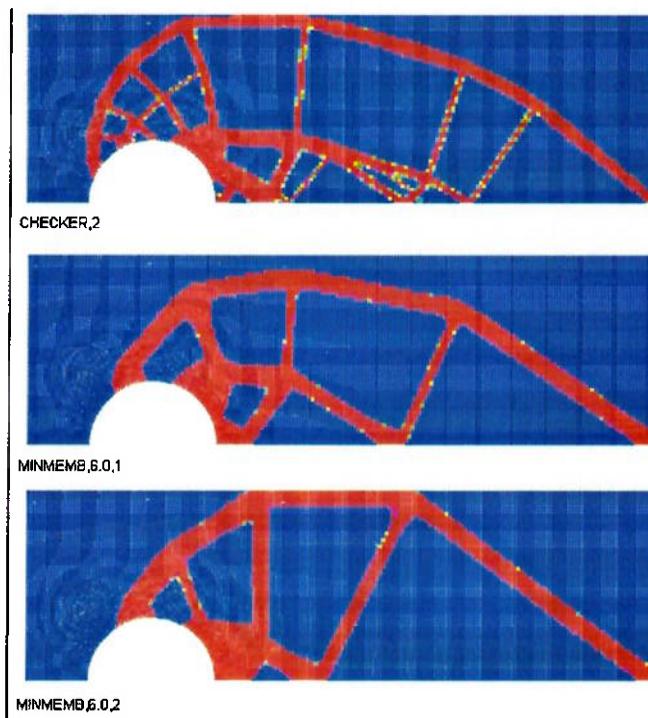


Figura 7-A: Exemplo 3 - MINMEMB

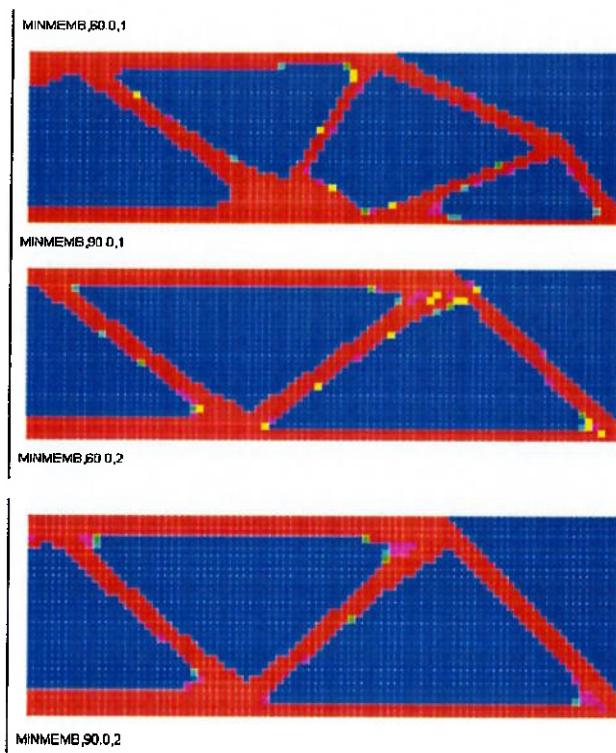


Figura 7-B: Exemplo 3 - MINMEMB

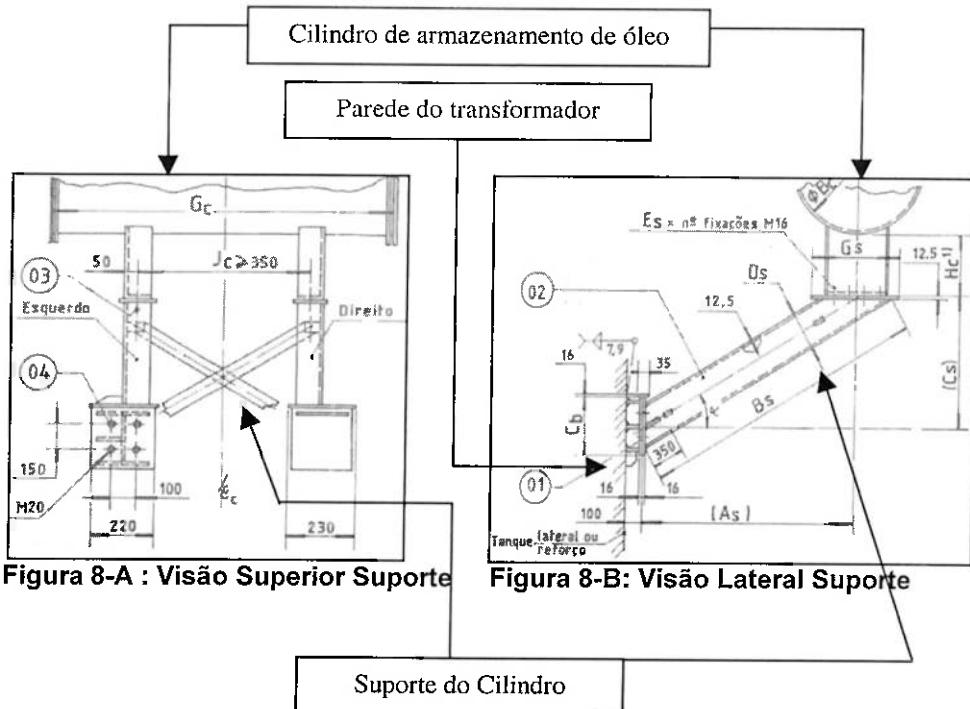
7. Exemplo de Aplicação

7.1. Definição da peça

O objetivo da apresentação deste exemplo é fornecer um caso prático para enfatizar todas as qualidades e os benefícios obtidos com o método de otimização topológica (MOT).

A peça utilizada será um suporte de um transformador de potência. Estes transformadores são utilizados para aumentar a tensão e consequentemente diminuir as perdas elétricas durante a transmissão de energia entre dois pontos muito distantes. Assim, são muito utilizados em hidroelétricas para aumentar a tensão e também são utilizados em subestações para abaixar a tensão.

O transformador possui um sistema de refrigeração interna com óleo. Este óleo deve ser armazenado em um cilindro que está ao lado do transformador. A figura 8 pode ilustrar melhor onde está localizado o suporte, o cilindro e a parede do transformador.



Assim, o objetivo deste trabalho será projetar novamente o suporte do transformador utilizando o método de otimização topológica através do software Optistruct e verificar os resultados através do software Ansys. A figura 9 mostra em detalhes o suporte a ser projetado e otimizado.

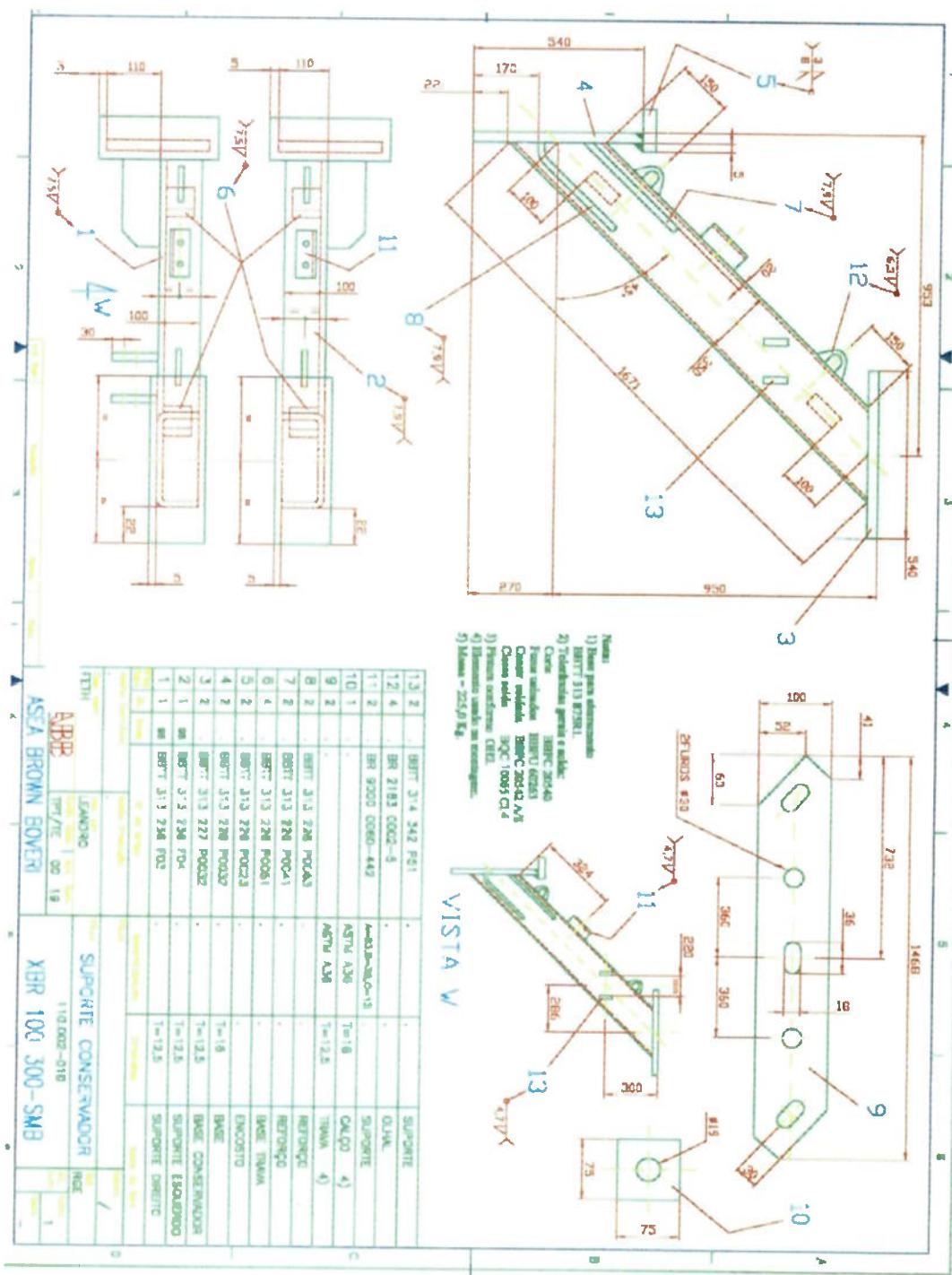


Figura 9: Desenho técnico do suporte atualmente existente

7.2. Requisitos de Projetos

A primeira ação a ser tomada é obter os requisitos de projeto de modo um claro para que a otimização seja direcionada no sentido da melhor solução.

A função objetivo é maximizar a rigidez de forma a obter a solução mais rígida possível. A peça atual apresenta uma massa de aproximadamente 225 Kg, como são dois suportes podemos concluir que o peso da peça deve ser de 550Kg aproximadamente. A informação da massa e a tensão de escoamento do material serão os fatores limitantes de projeto.

O material a ser utilizado é aço que apresenta um módulo de elasticidade (E) de 2 07 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 7600 Kg/m³.

O suporte deve sustentar um cilindro cheio de óleo com diâmetro de 500mm e comprimento de 4000 mm. A massa de calderaria do cilindro é de 1077Kg. Além disso, o cilindro possui uma bolsa interna com massa de 186 Kg.

O suporte deve suportar a força lateral do vento e o peso do tanque cheio de óleo. O óleo apresenta densidade de 800 kg/m³.

7.3. Tipo de elemento

A estrutura estará submetida a forças na direção Z (força do vento) e na direção Y (força peso do tanque). Portanto, não será possível realizar uma análise bidimensional e será necessária realizar uma análise tridimensional. O peso do tanque fornece momento à peça e consequentemente está poderia ser uma possível análise bidimensional. Entretanto, a força do vento é perpendicular a este plano de trabalho justificando a análise tridimensional.

O elemento de placa ou casca não é aconselhável para este caso, pois o objetivo é descobrir qual o local que apresenta maior necessidade de material e não obter zonas de reforços da estrutura.

Assim, para fazer uma análise tridimensional de elemento sólido devemos utilizar o elemento PSOLID e selecionar a opção DS=1 para todo o volume de existência a ser definido, pois os requisitos de projeto restringem nenhuma área com material obrigatoriamente em uma determinada região.

7.4. Definição do volume de existência

A obtenção dos requisitos de projeto permite que o projetista defina o volume de existência para a futura estrutura a ser projetada. A figura 8 pode fornecer uma boa referência para definição do volume de existência. O suporte deve estar entre a parede do transformador e sob o cilindro de armazenamento do óleo. Assim, com os dados do desenho técnico e com a figura 8 definiu-se a área no plano XY a ser utilizada pelo volume de existência. O último dado que define o bloco a ser utilizado como volume de existência é o comprimento do cilindro. Assim, pode-se definir o volume de existência como um bloco com as dimensões:

X = 1207 mm (eixo perpendicular à parede do cilindro)

Y = 1185 mm (eixo paralelo à parede do transformador)

Z = 4000 mm (eixo paralelo ao eixo do cilindro)

7.5. Cálculo do carregamento

O suporte estará submetido a dois tipos de carregamentos. Ele estará submetido a carregamentos devido ao peso do tanque e devido a força do vento.

A força do vento foi estimada em uma força de 300 Kgf, ou seja, de aproximadamente 3000 Newtons.

A força exercida pelo tanque deve ser calculada em função do peso próprio de calderaria do tanque, da bolsa interna e do óleo contido internamente. Assim, considerando que o tanque esteja cheio de óleo, temos:

Volume do tanque:

$$Vol = \pi \cdot (0,5)^2 \cdot 4 = 3,14m^3$$

Massa de óleo no tanque, (Densidade do óleo X Volume de óleo):

$$massa = 3,14 \times 800 = 2512Kg$$

Força total exercida pelo tanque,(Massa Óleo + Massa Bolsa + Massa Tanque):

$$F_t = (2512 + 1077 + 186) \cdot 10 = 37750N$$

7.6. Condições de Contorno

A definição das condições de contorno do suporte podem ser visualizados na figura 8 . Pode-se verificar que o suporte deve ficar fixo na parede do transformador. Esta é a única condição de contorno de contorno para o suporte a ser projetado. Portanto, todos os elementos contidos no plano YZ devem apresentar deslocamento zero.

7.7. Construção do volume de existência

Assim, colhendo todas as informações anteriormente calculadas pode-se obter um volume de existência da situação real. A figura 10 mostra o volume de existência proposto. O volume de existência encontra-se dividido em elementos finitos e mostra apenas a metade da estrutura aproveitando a propriedade de simetria da peça:

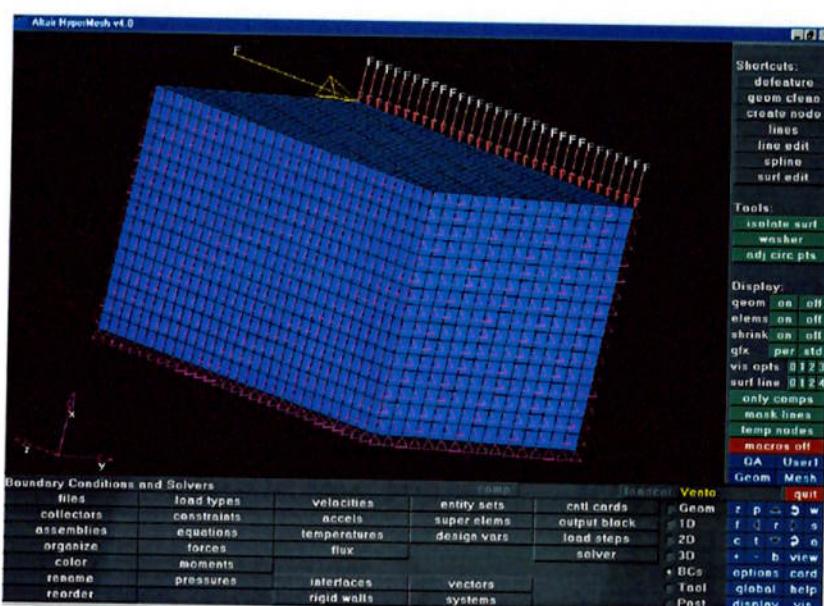


Figura 10: Modelagem do Problema

O volume de existência apresentado na figura 10 apresenta 7944 nós e 6750 elementos.

7.8. Parâmetros de otimização

O projetista deve introduzir os parâmetros de projeto, ou seja, a função objetivo, os fatores limitantes e os coeficientes para refinação da solução obtida. A função objetivo definida anteriormente pelo projetista será a maximização da rigidez, o fator limitante será a quantidade de massa.

O objetivo da otimização topológica é obter a topologia ideal para atender ao caso proposto. Assim, não colocaremos a massa objetivo final de 500 kg e introduziremos uma massa maior. Logo, a estrutura obtida terá uma quantidade de massa maior. O projetista deve saber interpretar a topologia obtida e desenvolver a peça final com a massa objetivo de 500kg. Portanto, introduziu-se como fator limitante que a peça otimizada deverá ter uma massa de aproximadamente 4 vezes a massa final da peça, ou seja 2000 Kg.

Apesar do programa possuir muitas ferramentas de refinamento da solução final, apenas necessitou-se de algumas delas. O "checkboard" foi utilizado para evitar o erro numérico conhecido por "Tabuleiro de Xadrez", explicado anteriormente. Assim, adotou-se o "checkboard" igual a 1.

O programa optistruct sugere que o fator de discretização ρ seja igual a 2. Assim, inicialmente utilizou-se o fator de discretização sugerido pelo programa. A ferramenta MINMEMB não foi ativada.

7.9. Obtenção do volume de existência otimizado

Assim, após a gravação do volume de existência e todas as informações relativas a ele consequentemente, pode-se otimizar a estrutura. Apenas deve-se seguir as etapas seguintes para

1. Salvar o arquivo com o formato FEM. Esta extensão é lida pelo módulo de cálculo do Optistruct, o Altair OS/FEA
2. Após a leitura do arquivo FEM pelo Optistruct, deve-se calcular a solução ótima através da pasta solver contida no BC's.
3. Com o término do cálculo, deve-se ler o arquivo com o formato res, no submenu results na pasta file.

Aplicando estas ações ao volume de existência apresentado anteriormente obteve-se os seguintes resultados para isosurface(desenho final) igual a 0,4.

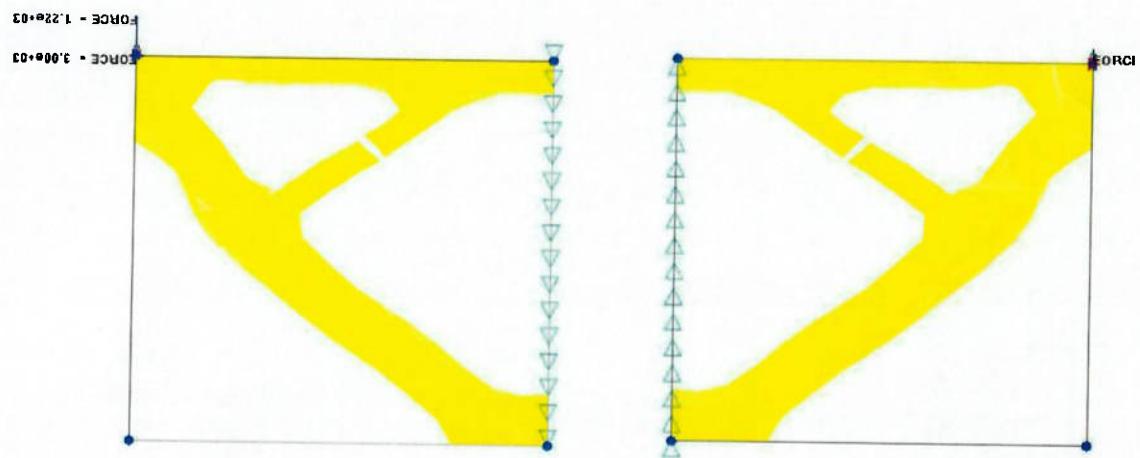


Figura 11: Visão da peça otimizada

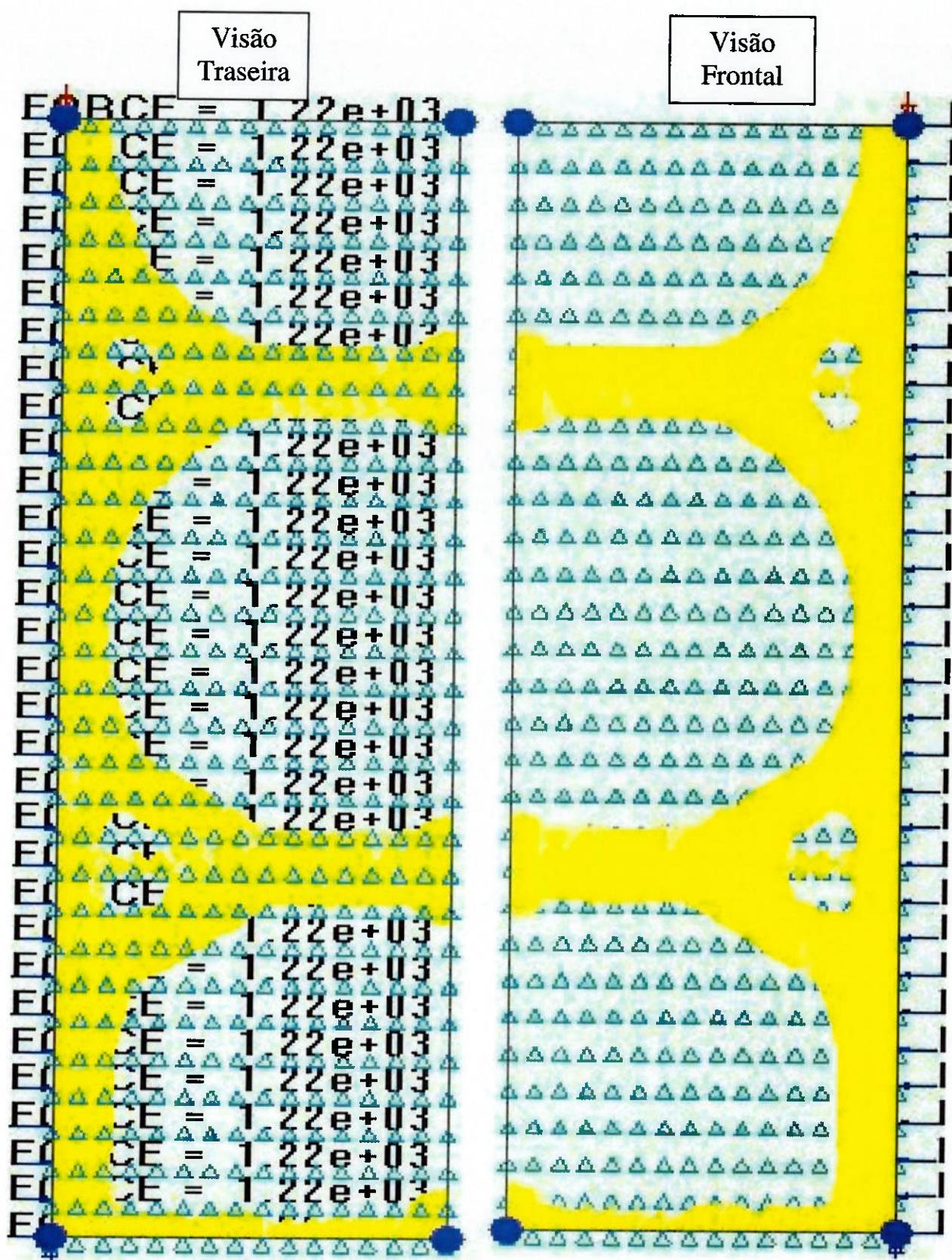


Figura 12: Estrutura Otimizada

Abaixo encontram-se outras visões da peça:

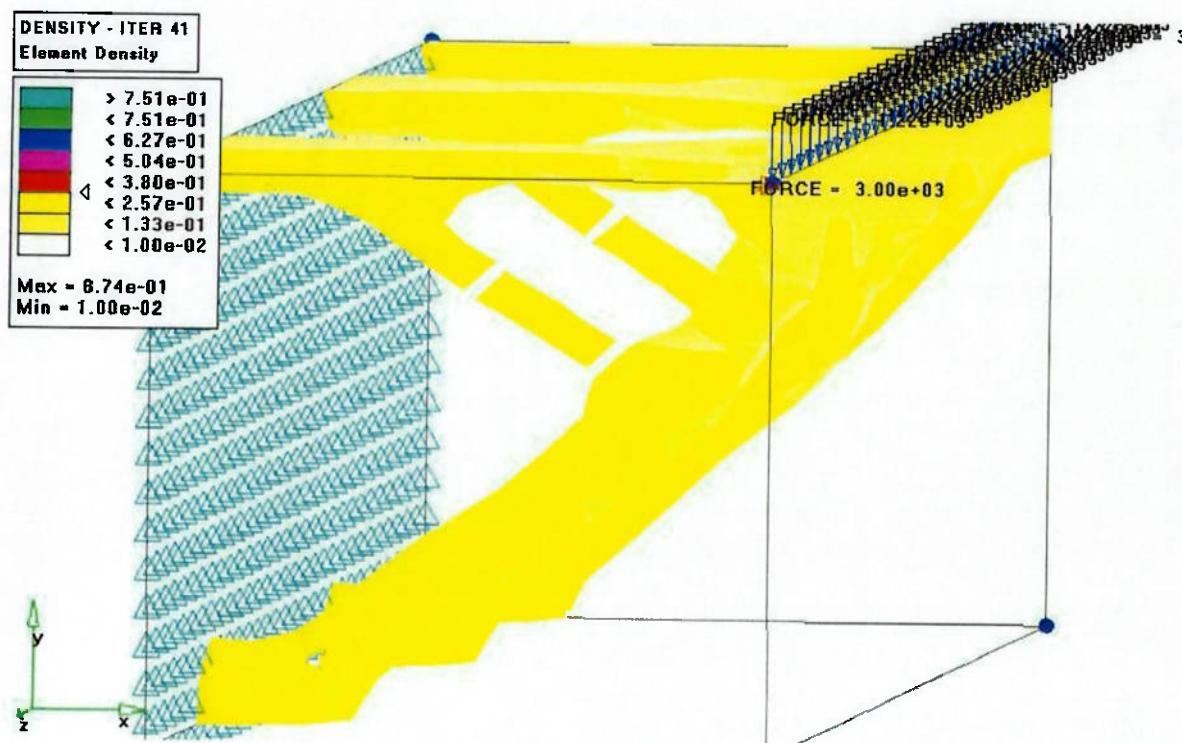


Figura 13: Estrutura na visão isométrica

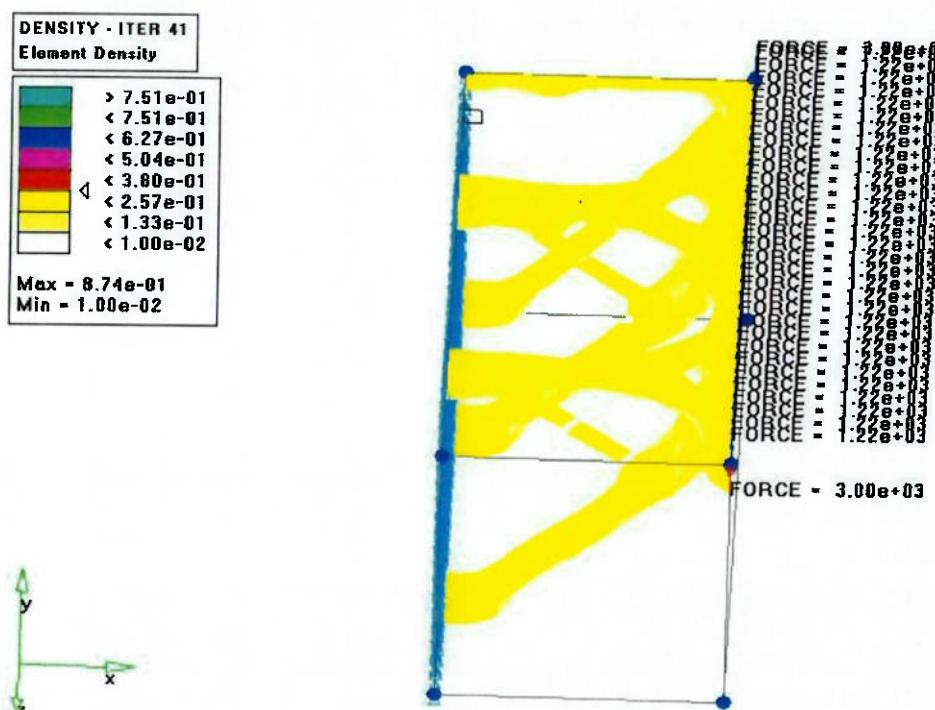


Figura 14: Visão opcional

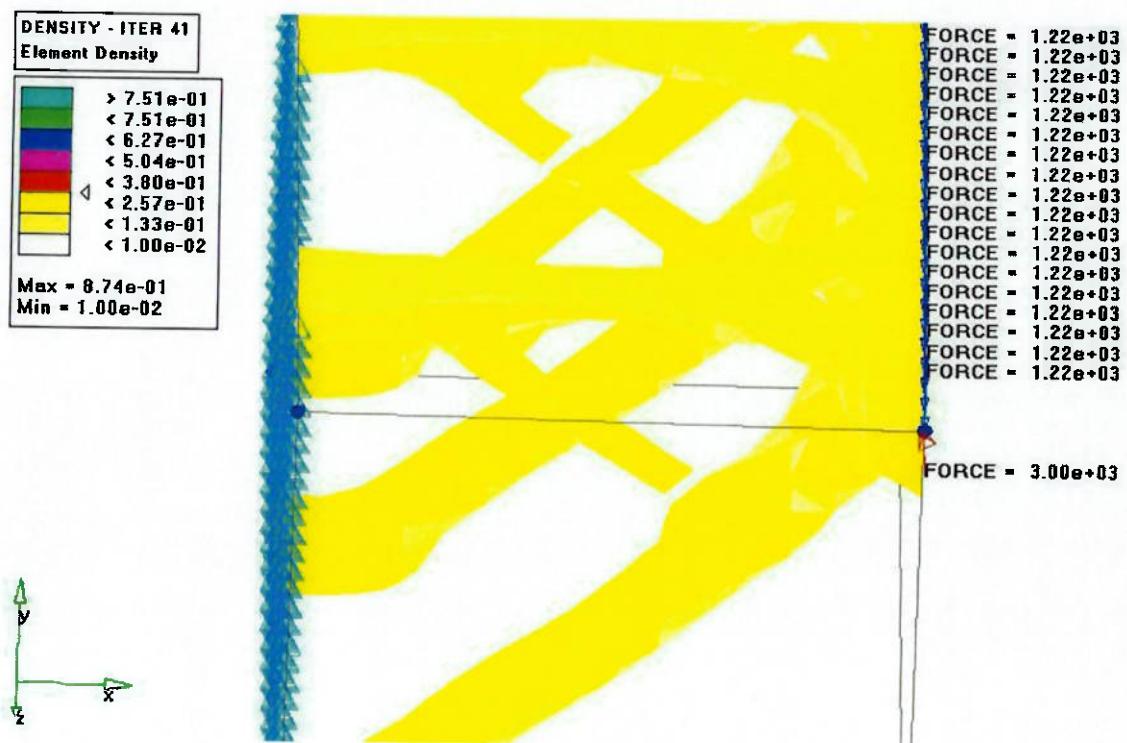


Figura 15: Visão opcional da figura otimizada

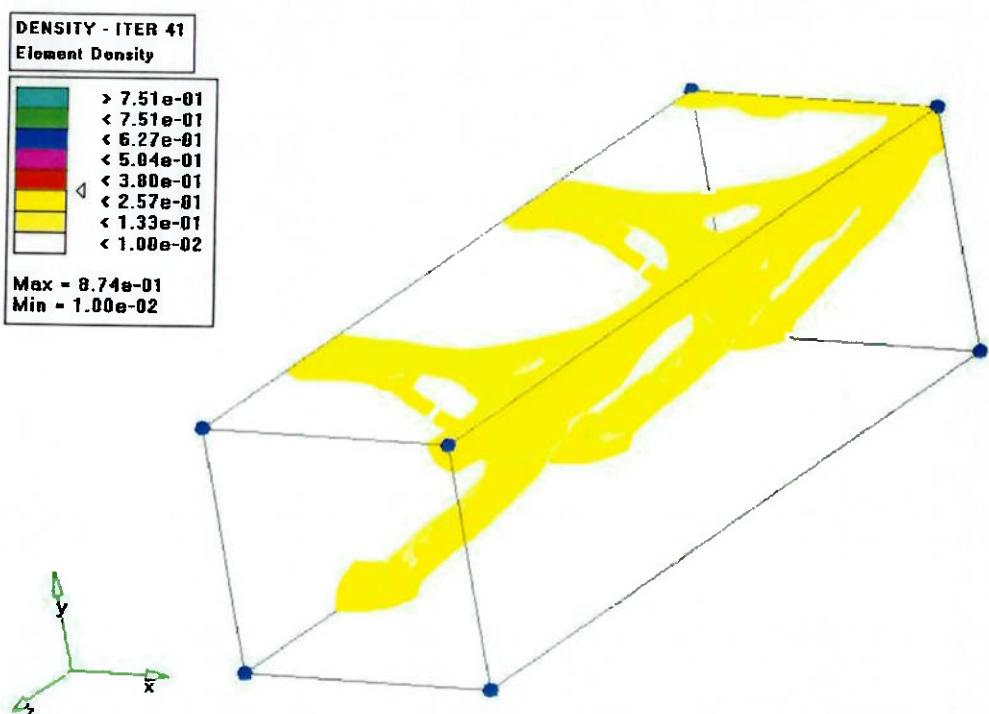


Figura 16: Visão opcional da figura otimizada

7.10. Interpretação dos resultados:

O projetista tendo a solução final deve saber interpretá-la e torná-la realidade. Nesta interpretação podem entrar muitos fatores. O mais importante dos fatores é o método de fabricação da estrutura a ser projetada.

A estrutura foi desenhada com o isosurface igual a 0,4, ou seja, todos os elementos que apresentam densidades maiores que 0,4 aparecem na figura. A massa introduzida como fator limitante da estrutura foi de 2000 Kg, ou seja, se multiplicarmos todas as densidades pelos seus respectivos volumes será encontrado o valor de 2000 Kg.

Mas, o projetista deve estar atento ao fato de que a peça final apresentará densidade igual a 1, ou seja, voltando ao raciocínio anterior, a peça conterá mais do que 2000 Kg. O propósito deste exemplo é obter uma topologia totalmente diferente para a mesma massa da peça mostrada nas figuras de 11 até 16, logo devemos retirar muita massa da peça otimizada e apresentada pelo Optistruct. Entretanto, a forma da peça será a mesma, apenas deve-se engrossar ou afinar a peça otimizada de maneira que se atinja a massa de aproximadamente 500 Kg.

As figuras seguintes apresentam uma interpretação da solução otimizada. Esta peça apresenta uma massa de 511 Kg, ou seja, praticamente a mesma massa da estrutura real. Entretanto a solução otimizada apresenta propriedades mecânicas melhores, pois é uma solução otimizada e não é baseada em perfis tradicionais da engenharia como no caso da peça com perfil em U, atualmente existente:



Figura 17: Interpretação do projetista

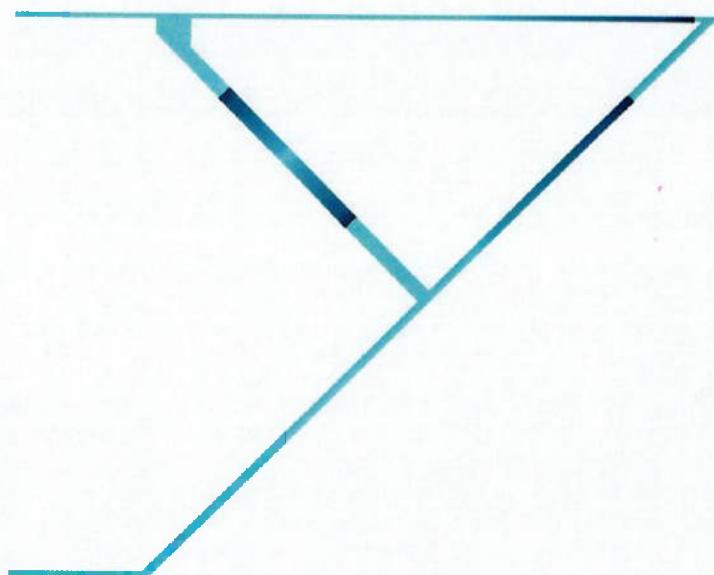


Figura 18: Visão lateral da peça interpretada



Figura 19: Visão superior



Figura 20: Visão frontal da peça otimizada

7.11. Verificação da peça no Software Ansys

A peça final apresentada anteriormente deve ser verificada para ver se atende aos critérios definidos no projeto. Os desenhos a seguir, mostram a verificação da peça otimizada. A peça foi desenhada no Autocad na escala de milímetros. Posteriormente, a peça foi lida pelo programa Ansys. Portanto os dados de saída estão em N/mm^2 , ou seja, MPa. A barra inferior dos desenhos mostra a tensão de Von Mises existente na peça. Pode-se, notar que o ponto de máxima tensão foi obtido no engaste da peça na parede do transformador.

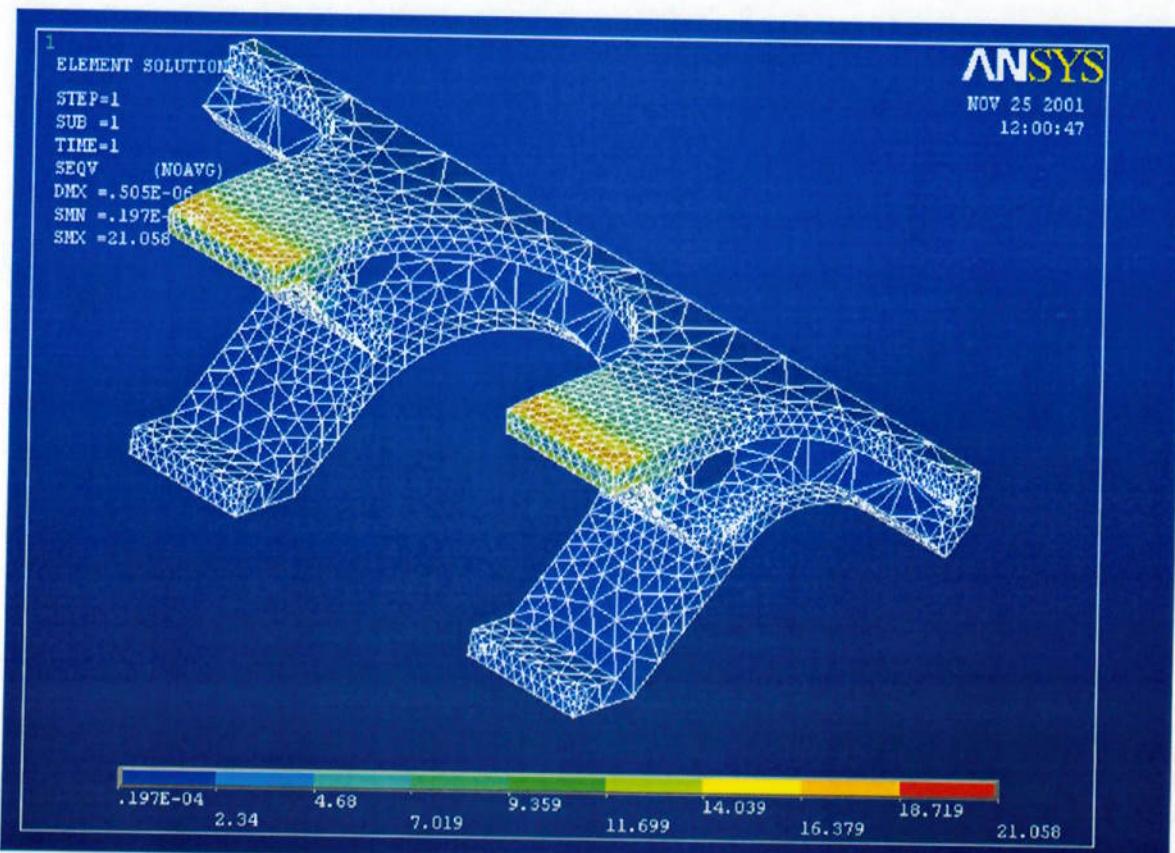


Figura 21: Verificação da solução final em Ansys

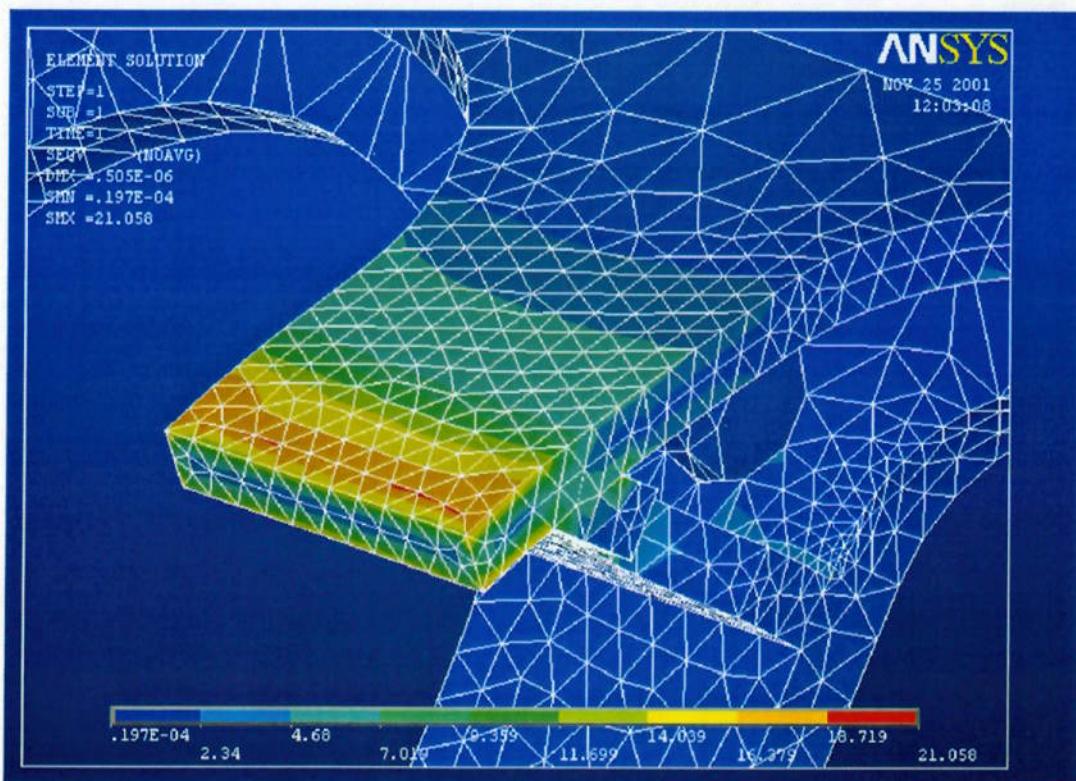


Figura 22: Zoom na região de máxima tensão

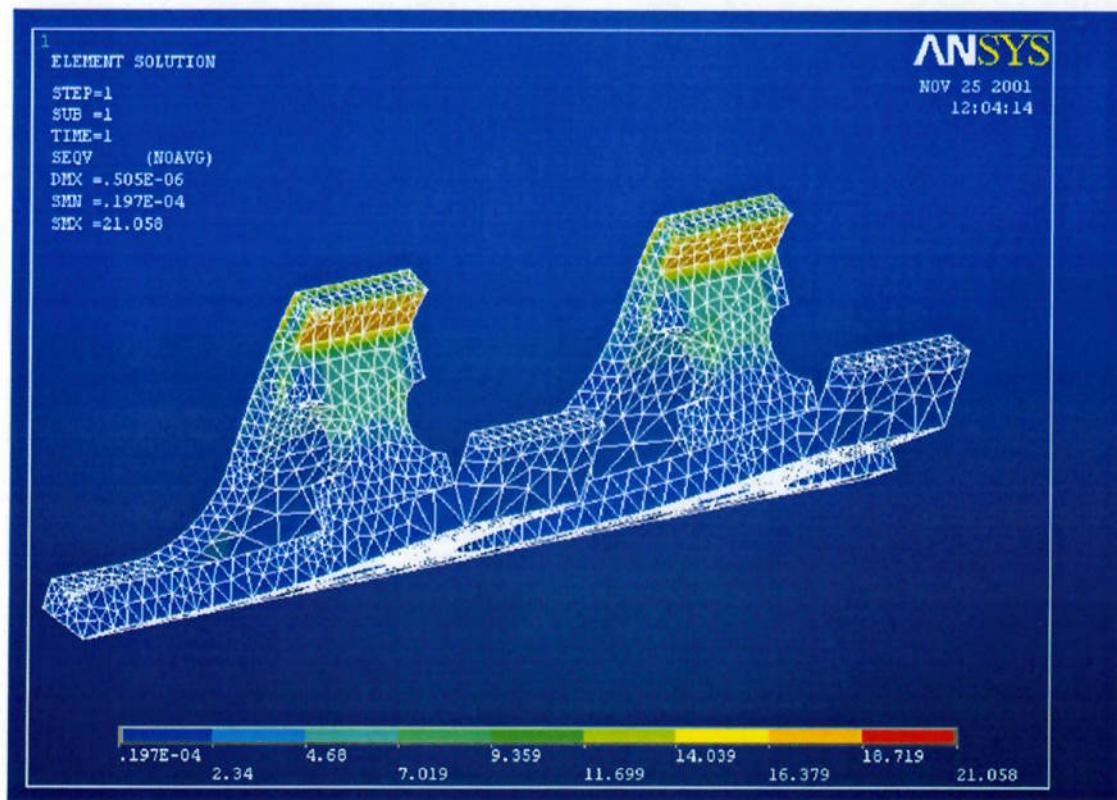


Figura 23: Visão Opcional da verificação em Ansys

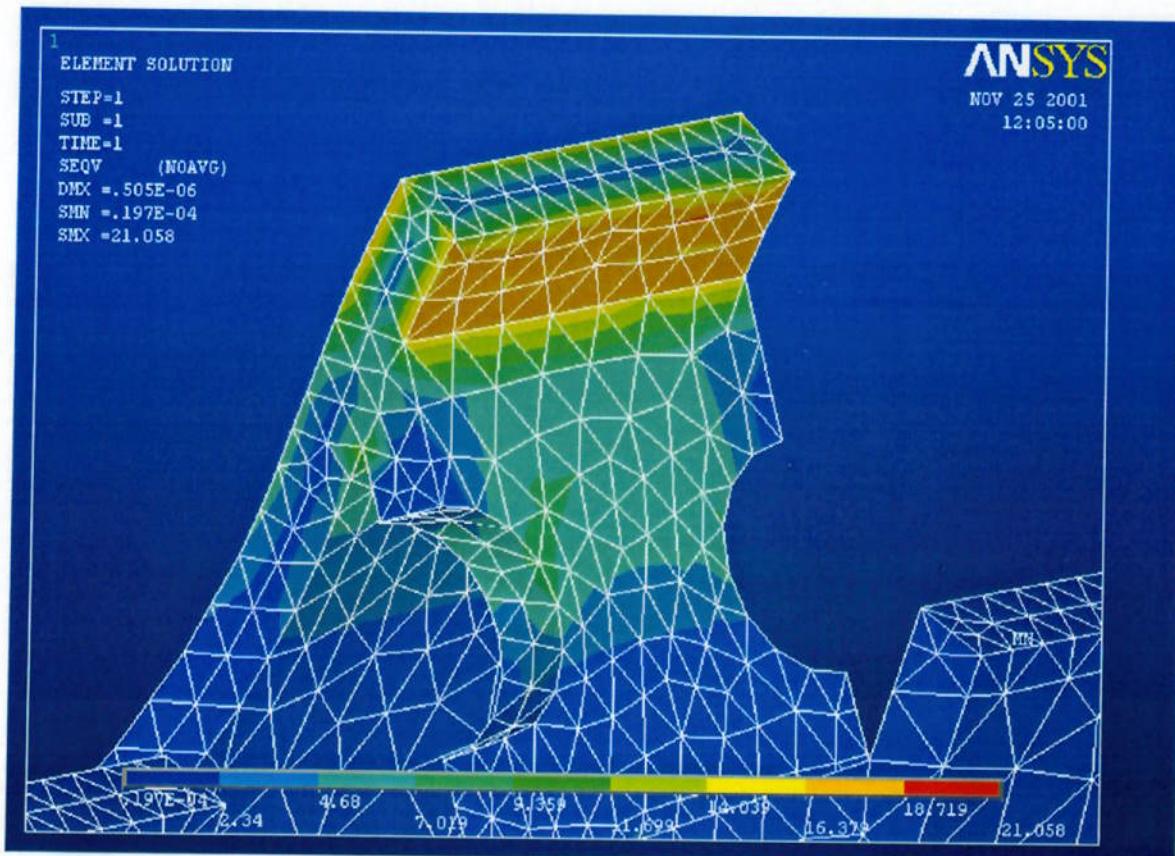


Figura 24: Zoom da região de tensão na visão opcional

Como pode ser visto nas figuras acima, a máxima tensão obtida na estrutura foi de 21.058 Mpa. O apêndice B mostra uma tabela com o valor da tensão de escoamento de diferentes tipos de aços. O valor da tensão de escoamento é muito acima do obtido na análise de elementos finitos do Ansys, ou seja, a peça otimizada possui a mesma massa da peça atualmente projetada, mas possui uma tensão máxima de 5 vezes menos o valor da tensão de escoamento do aço mais barato,. Assim, pode-se escolher o aço 1002 A, o mais barato e que apresenta uma tensão de escoamento de 131 MPa .

Logo, reprojetou-se a estrutura, obtendo-se um volume de existência sintetizado, com a mesma rigidez, e com massa igual ao do caso real.

8. Conclusão

O estudo do método de otimização topológica (MOT) pode trazer um novo pensamento no desenvolvimento de novos componentes mecânicos. Através deste método pode-se otimizar estruturas utilizando um raciocínio lógico que indicará a existência ou inexistência de cada elemento pertencente ao volume de existência.

O MOT surge como uma potente ferramenta de cálculo e otimização estrutural. Ao contrário do que muitos analistas pensam, a função do engenheiro torna-se cada vez mais importante, pois eliminando o tempo de cálculo gasto em projeto pelos engenheiros, aumenta-se o tempo dedicado a análise e melhoria do projeto, tarefa que o computador não pode realizar ainda.

Assim como os elementos finitos são uma valiosa ferramenta de cálculo para a utilização do método de otimização topológica, o MOT pode servir como uma ferramenta para abrir novos caminhos às inovações tecnológicas. Pois, hoje a utilização de perfis padronizados e tabelados pode dar espaço à nova tecnologia de cálculo estrutural.

Portanto dentro deste novo cenário mundial o projetista deve estar disposto a realizar constantes atualizações e ter contato com os desenvolvimentos tecnológicos do momento.

9. Apêndices

9.1. Apêndice A - Passo a Passo a otimização topológica de uma peça

OptiStruct será usado, como foi dito anteriormente, para se determinar o resultado da sintetização de uma peça. Algumas condições iniciais devem ser definidas, como propriedades do material, forças, apoios, etc., que ao final formarão um conjunto de subcasos.

Definidas as condições e efetuadas as compilações do programa se obtém o resultado final onde aparecem a peça e seus contornos que implicam nos valores de densidade normalizada (variando de 0.0 a 1.0). Também são usados Isosurfaces para ver os resultados de densidade. Áreas que precisam de reforço tendem para uma densidade de 1.0, e as demais variam conforme a necessidade de reforço.

Condições iniciais do projeto:

➤ Propriedades do Material:

- $E = 2,07e11$;
- $G = 7,6e10$;
- $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$.

➤ Dimensões da Peça:

- L (comprimento) = 1223 mm;
- W (largura) = 4000 mm;
- H (altura) = 1050 mm.

➤ Forças Atuantes:

- Força Peso = 35,77 KN;
- Força do Vento = 3 KN.

➤ OBJETIVO : Minimizar a Massa;

➤ RESTRIÇÃO: Redução da massa em 90 %

➤ NÚMERO DE ELEMENTOS : 3770 elementos.

Montando o Problema no HyperMesh

➤ "Puxando" o Desenho

Após desenhar a figura, salvá-la com extensão ***.fem** e definir o

"volume de existência" OptiStruct:

1. Selecione files do painel do HyperMesh;
2. Clique **import**;
3. Duplo clique em **translator=** e selecione **optistruct**;
4. Clique **filename=** e selecione ***.fem**;
5. Clique **import**;
6. No painel **files** , selecione o subpainei **template**;
7. Clique duas vezes em **template file=**;
8. Selecione **optistruct/optistruct**,

Isso permitirá definir atributos específicos no OptiStruct.

9. Clique **return**.

➤ Definido as propriedades do material

Criando o material:

1. Selecione o painel **collectors**;
2. Clique **create** no subpainei;
3. Selecione **mats**;
4. Clique **name=** e dê um nome (steel);
5. Clique **card image=** e selecione **MAT1**;
6. Clique **create/edit** para ler o material criado;
7. Entre com os valores das propriedades do material;
 - E (2.07e11);
 - NU (0.26);
8. Clique **return**

A partir do momento que as informações das propriedades são incluídas, fica assumido que a performance do material irá se dar em condições elásticas.

➤ Definindo as regiões de forma

Regiões onde pode ser retirado material.

1. Clique em **card image** no subpainei;
2. Selecione **comps** no botão **collector type**;
3. Clique duas vezes em **name=** e selecione **shells**.
4. Clique **edit**;
5. Clique **CONT**;

	PSHELL	PSOLID
DESIGN	CONT ativado	DS=1
NON-DESIGN	CONT desativado	DS=0

6. Clique **return**.

➤ Criando os Subcasos

1. Acessar o subpainei **load steps** no painel BCs;
2. Clique **name** = e digite um nome para o caso de carga a ser criado
3. Clique **loadcols** e selecione as cargas e constrains criados anteriormente
4. Clique **select all** para selecionar as entidades
5. Clique **create** e automaticamente o caso de carga estará criado.

➤ Submetendo o trabalho

Salvar antes de rodar o OptiStruct

Para salvar:

1. Selecione **files** no painel;
2. Selecione **export** no subpainei;
3. Clique **filename**= e escreva o nome ***.fem**;
4. Clique **write**;
5. Clique **return**.

Para compilar:

O tempo dependerá do número de elementos obtidos.

1. Selecione o **solver** do painel **BCs**;
2. Clique **input file**= e puxe o arquivo ***.fem**;
3. Clique **memory in Mb**= e ponha um número;

O número de memória é relacionada ao número de elementos
8MB/1000elem

4. Clique **solve**.

O check do OptiStruct será executado, provendo a folha de resultado, que será mostrada mais para frente, esta folha contém informações específicas :

- Arquivo Set-up;
- Estimativas de memória RAM e espaço de disco requerido;

- Iterações de otimização;
 - Tempo computado.
5. Feito isto, considerar as perguntas:
- O set-up está de acordo ?
 - O objetivo está de acordo ?
 - As condições estão de acordo ?
 - Quanto é necessário de memória RAM para a convergência ?

➤ Visualizando os resultados

O OptiStruct prove informações de densidade em cada iteração.

Resultados de deslocamento e tensões de von Misses também são fornecidas.

Para ler o resultados:

1. Selecione o **files**= do painel;
2. Clique em **results** para acessar o subpainel;
3. Clique em **results**= e puxe o arquivo com extensão **.res** criado;

Para ver a deformação na peça:

1. Selecione o **deformed, density or Von Misses** no painel **Post**;
2. Clique **simulation** - e escolha a iteração desejada;
3. Ponha no **scale factor = 1.0**;
4. Clique **linear** para verificar a animação;

Irá aparecer a figura após o processo.

9.2. Apêndice B – Propriedade mecânicas de alguns materiais

Tipos de aços disponíveis no mercado	Tensão de Escoamento
1002 A	131
1010 A	200
1018 A	221
1020 HR	290
1045 HR	414
1212 HR	193
4340 HR	910
52100 A	903

9.3. Apêndice C – Exemplo de arquivo de saída do software Optistruct

**
** OptiStruct 3.6.1 **
**
** Structural Optimization Software **
** from Altair Engineering, Inc. **
**
**

** COPYRIGHT 1996-1999 Altair Engineering, Inc. **

OPTIMIZATION FILE AND PARAMETER INFORMATION :

Optimization parameters from : ..\..\..\..\users\inict\tf(paulomaur)\total80.fem
FEM model file : ..\..\..\..\users\inict\tf(paulomaur)\total80.fem
Output files prefix : ..\..\..\..\users\inict\tf(paulomaur)\total80

FINITE ELEMENT MODEL DATA INFORMATION :

Total # of Nodes : 7944
Total # of Elements : 6750
Total # of Degrees of Freedom : 22320

Total # of Non-zero Stiffness Terms : 821151

Element Type Information

HEXA Elements : 6750

Load and Boundary Information

FORCE Sets : 3

SPC Sets : 1

Material and Property Information

PSOLID Cards : 1

MAT1 Cards : 1

OPTIMIZATION PROBLEM PARAMETERS :

Objective Function : Minimize Weighted Compliance

Constraint Summary :

Const. Response Bound Subcase ID Grid/Mode Disp./ Bound

Number Type Type /Element Stress Value

Number Comp.

1 MASS UPPER - - - 2.000E+03

Load Subcase Summary :

Subcase ID SPC FORCE Weight = w(i)

1	6	1	1.000
2	6	7	1.000
3	6	2	1.000

Design Parameters Summary :

Total # of design elements : 6750

Total Volume of Design Material : 5.7212E+09

Total Mass of Design Material : 4.3481E+04

Volume of Non-Design Material : 0.0000E+00

Mass of Non-Design Material : 0.0000E+00

Solid Design Elements : PSOLID

2

Optimization Parameters Summary :

Initial Material Fraction [0,1] : 0.0460**Minimum Element Volume Fraction :** 0.0100**Maximum Number of Iterations :** 100**Convergence Tolerance :** 5.0000E-03**Discreteness Parameter :** 2.0000**Step Size (Moving Bound) :** 0.5000**Solution Smoothness Parameter :** 0.5000 (default)**Run Type :** Topology Optimization**Checkerboard Control :** On (1 - Global Averaging)**Restart from previous solution :** No**Scratch file directory :** ..\..\..\..\users\inict\tf(paulomaur)\

MEMORY ESTIMATION INFORMATION :

Solver Type is: Sparse-Matrix Solver

Current Memory (RAM) : 250 Mb

Estimated Minimum Memory (RAM) for Out of Core Solution : 22 Mb

Recommended Memory (RAM) for Out of Core Solution : 24 Mb

Recommended Memory (RAM) for In-Core Solution : 148 Mb

DISK SPACE ESTIMATION INFORMATION :

Estimated Disk Space for Output Data Files : 8 Mb

Estimated Scratch Disk Space for In-Core Solution : 20 Mb

Estimated Scratch Disk Space for Out of Core Solution : 180 Mb

BEGINNING OPTIMIZATION SOLUTION.....

OPTIMIZATION HISTORY INFORMATION :

(Running in-core solution)

ITERATION 0

Subcase	Weight	Compliance	Weight*Comp.
1	1.000E+00	4.762883E+04	4.762883E+04
2	1.000E+00	4.762887E+04	4.762887E+04

3 1.000E+00	2.159632E+05	2.159632E+05
-------------	--------------	--------------

Sum of Weight*Compliance	3.112209E+05
--------------------------	--------------

Current Design Volume Fraction = 4.59971E-02

Current Mass = 2.00000E+03

No.	Type	Load	Grid #	Disp	Bound	Value	Bound	Viol.	Active
Case	Elem #	/Str	Type				%	Const.	
			Mode #	Comp					
1	MASS	-	-	-	UB	2.000E+03	2.000E+03	0.0	-

Objective Function (Min WCOMP) = 3.11221E+05

Maximum Constraint Violation % = 0.00

ITERATION 1

Subcase	Weight	Compliance	Weight*Comp.
1	1.000E+00	1.208354E+04	1.208354E+04
2	1.000E+00	1.232117E+04	1.232117E+04
3	1.000E+00	8.756427E+04	8.756427E+04

Sum of Weight*Compliance	1.119690E+05
--------------------------	--------------

Current Design Volume Fraction = 4.59592E-02

Current Mass = 1.99835E+03

No.	Type	Load	Grid #	Disp	Bound	Value	Bound	Viol.	Active
-----	------	------	--------	------	-------	-------	-------	-------	--------

Case	Elem #	/Str	Type	%	Const.
Mode #	Comp				
1	MASS	-	-	UB	1.998E+03 2.000E+03 0.0 YES

Objective Function (Min WCOMP) = 1.11969E+05 % change = -64.02

Maximum Constraint Violation % = 0.00

ITERATION 2

Subcase	Weight	Compliance	Weight*Comp.
1	1.000E+00	4.278884E+03	4.278884E+03
2	1.000E+00	4.397479E+03	4.397479E+03
3	1.000E+00	5.771485E+04	5.771485E+04
<hr/>			
Sum of Weight*Compliance			6.639121E+04

Current Design Volume Fraction = 4.59593E-02

Current Mass = 1.99836E+03

No.	Type	Load	Grid #	Disp	Bound	Value	Bound	Viol.	Active
Case	Elem #	/Str	Type				%	Const.	

Mode # Comp

1 MASS	-	-	UB	1.998E+03	2.000E+03	0.0	YES
--------	---	---	----	-----------	-----------	-----	-----

Objective Function (Min WCOMP) = 6.63912E+04 % change = -40.71

Maximum Constraint Violation % = 0.00

ITERATION 41

Subcase	Weight	Compliance	Weight*Comp.
1	1.000E+00	7.031362E+01	7.031362E+01
2	1.000E+00	9.267592E+01	9.267592E+01
3	1.000E+00	1.299977E+03	1.299977E+03
<hr/>			
Sum of Weight*Compliance			1.462966E+03

Current Design Volume Fraction = 4.59971E-02

Current Mass = 2.00000E+03

No.	Type	Load	Grid #	Disp	Bound	Value	Bound	Viol.	Active
Case	Elem #	/Str	Type				%	Const.	
				Mode #	Comp				

1 MASS - - - UB 2.000E+03 2.000E+03 0.0 YES

Objective Function (Min WCOMP) = 1.46297E+03 % change = -0.35

Maximum Constraint Violation % = 0.00

the 2nd satisfied convergence ratio = 3.5440E-03

OPTIMIZATION HAS CONVERGED.

COMPUTE TIME INFORMATION

EXECUTION STARTED 11 22 19:25:51 2001

EXECUTION COMPLETED 11 22 22:50:42 2001

ELAPSED TIME 03:24:50

CPU TIME 03:24:50

***** END OF REPORT *****

10. Bibliografia

Optimization Training Manual, An Altair Hyperworks Product

Help do Software Ansys

Tatiana G. Lagun, Luiz E. Vaz, e Jun S. O. Fonseca, "Uma metodologia para otimização topológica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A.V. Kumar, D.C. Gossard, "Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures

B.J.G. Kidd, "Application of Topology Optimisation Technology to an Automotive Bracket Component"

Ole Sigmund, "A 99 line Topology Optimization code written in MatLab"

