

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE BIELA PARA MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA
UTILIZANDO O MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Daniel Gaspari Cirne de Toledo

São Paulo

2009

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE BIELA PARA MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA
UTILIZANDO O MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de graduação em Engenharia.

Daniel Gaspari Cirne de Toledo

Orientador: Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Toledo, Daniel Gaspari Cirne de
Projeto de biela para motor a combustão interna utilizando o
método da otimização topológica / D.G.C. de Toledo. – São
Paulo, 2009.
92 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Topologia 2. Método dos elementos finitos 3. Motores de
combustão interna I. Universidade de São Paulo. Escola Politéc-
nica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

DEDICATÓRIA

À minha mãe e à meu pai, que me ensinaram a beleza da curiosidade e do saber. À Letícia, pelo amor e apoio incondicional ao longo desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Aos meus irmãos, por terem sido minha referência ao longo de minha formação e pelo incentivo, na forma da admiração que têm pela engenharia.

Aos meus amigos, por terem tornado estes anos inesquecíveis.

Ao Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pela orientação, dedicação e por ter mostrado os caminhos do conhecimento, da engenharia e da inovação.

Aos professores que ao longo destes anos orientaram e apoiaram as atividades extracurriculares que desenvolvi nesta Escola e que foram fundamentais para minha formação como Engenheiro.

À Escola Politécnica e seus professores e funcionários, por ter me ensinado, e permitido que aprendesse, não só o que é Engenharia, mas como se faz Engenharia.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto de uma biela para um motor a combustão interna ciclo Otto quatro tempos utilizando o método da otimização topológica. O método da otimização topológica combina análise pelo método dos elementos finitos com um poderoso algoritmo de otimização para definir a distribuição ótima de massa no interior do domínio de projeto, considerando um carregamento definido e as condições de contorno, para uma função objetivo definida (i.e, minimizar a flexibilidade, minimizar a massa) e restrições. Esta abordagem inova o processo do projeto do componente na indústria mecânica ao passo que altera o fluxo do projeto já que é o engenheiro de CAE o responsável por definir o projeto do componente e não mais o projetista de CAD. Este trabalho inclui a determinação dos critérios de engenharia do componente por meio da engenharia reversa, utilizando-se de simulações do desempenho do motor para definir o carregamento estático (pressão de combustão) que é aplicado ao conjunto motriz e de simulação estrutural do modelo original da biela do motor. O processo de otimização consiste em quatro etapas: 1 – modelagem e geração de malha de elementos finitos do domínio de projeto com o programa Altair Hypermesh®; 2 – formulação e solução do problema de otimização utilizando o programa Altair OptiStruct®; 3 – Documentação em CAD do resultado; 4 – análise estrutural para validação do projeto final. Dois problemas de otimização são formulados. O primeiro consiste em minimizar a massa da biela considerando restrição de máxima tensão de von Mises e ovalização máxima do olhal maior, e o segundo em minimizar a flexibilidade para uma dada massa. O efeito da aplicação de restrições de manufatura na solução ótima é também avaliado.

ABSTRACT

This work presents the design of a connecting rod (conrod) for a lightweight spark-ignition four-stroke internal combustion engine by applying the topology optimization method. Topology optimization method combines FE analysis with a powerful optimization algorithm to find the optimum mass distribution inside the defined design volume concerning the loads and boundary conditions and considering a specified optimization objective function (e.g., minimum compliance, minimum mass, maximum first mode frequency) and constraints. This approach innovates the design process in the mechanical industry while changes the project information and decision flow, because the design is defined by the CAE engineer (supported by an optimization algorithm) and no longer by the CAD designer. The project includes the determination of the engineering criteria of the component by applying reverse engineering methodology using CAE tools for combustion pressure determination and structural analysis to determine the mechanical behavior of the original conrod. The performed optimization process consists in four phases: 1- finite element mesh generation and modeling using Altair Hypermesh[®]; 2 - topology optimization routine using the software Altair OptiStruct[®] as the optimization solver; 3 - CAD documentation of the final result; 4 - finite element analysis validation of the designed conrod. Two optimization problems are formulated, the first is to minimize the conrod mass for a defined maximum stress and maximum big eye oval deflection and the second is to minimize the compliance for a defined maximum mass. An analysis of the effects of the application of manufacturing constraints is performed.

ÍNDICE

1.INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Revisão Bibliográfica.....	12
1.2. Justificativa.....	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Otimização Estrutural	14
1.5. Motores a combustão interna.....	16
1.6. Descrição do componente – Biela.....	17
2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Cálculo analítico do carregamento.....	19
2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF)	20
2.3. Método da Otimização Topológica (MOT).....	21
3.METODOLOGIA	24
3.1. Metodologia global de projeto	24
3.2. Desenvolvimento da metodologia	31
3.2.1. Determinação da pressão de combustão	31
3.2.2. Modelagem em elementos finitos.....	32
3.2.3. Análise da biela original e determinação dos critérios de engenharia	41
3.2.4. Otimização topológica – pré-processamento, restrições e casos de otimização considerados.....	43
4.RESULTADOS.....	49
4.1. Resultados dos casos de otimização	49
4.2. Interpretação e validação do projeto final.....	59
5.CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS	64
GLOSSÁRIO.....	66
ANEXO A – Arquivo de registro (extensão *.out) do processo de otimização topológica da biela projetada – caso 1.b.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Resultados obtidos por Michell (1904).	15
Figura 1.2 – Comparação dos três métodos de otimização.	16
Figura 1.3 – Biela do motor Honda GX-35.	18
Figura 2.1 Geometria da árvore de potência.	19
Figura 2.2. Casos de carregamento de compressão e tração.	20
Figura 2.3 – Progressão e convergência da solução pelo método da otimização topológica.	22
Fluxograma 3.1 – Metodologia global do projeto temático.	25
Fluxograma 3.2 – Cálculo dos carregamentos.	28
Fluxograma 3.3 – Pré-processamento.	29
Fluxograma 3.4 – Validação.	30
Figura 3.1. Pressão dos gases de combustão x Posição do virabrequim para motor convertido para etanol.	32
Figura 3.2. Domínio de projeto em elementos finitos da biela.	33
Figura 3.3. Visão geral do programa Altair HyperMesh®.	34
Figura 3.4. Árvore de modelagem implementada.	35
Figura 3.5. Sistema de coordenadas cilíndrico gerado para análise da ovalização do olhal maior.	36
Figura 3.6. Modelagem do carregamento e restrições do Modelo 1.	37
Figura 3.7. Resultado da análise MEF do Modelo 1 para o caso de compressão. Tensão de von Mises em MPa (esquerda) e ovalização do olhal maior em mm (direita).	38
Figura 3.8. Modelagem do carregamento e restrições do Modelo 2.	39
Figura 3.9. Resultado da análise MEF do Modelo 2 para o caso de compressão. Tensão de von Mises em MPa (esquerda) e ovalização do olhal maior em mm (direita).	40
Figura 3.10. Biela original do motor.	42
Figura 3.11. Ovalização da biela original – estabelecimento do critério de engenharia. Valores relativos ao sistema de coordenada cilíndrico definido na fig. 3.5.	43

Figura 3.12. Restrições nodais de deslocamento para restrição de ovalização sob compressão (esquerda) e sob tração (direita).	46
Figura 3.13. Exemplo do efeito da restrição de <i>mimmember size</i> na solução de otimização topológica. Caso sem restrição (esquerda). Caso com restrição – <i>mimmember size</i> = 8 (direita).	47
Figura 3.14. Definição das direções de forjamento possíveis para manufatura do componente.	47
Figura 4.1. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.a.	50
Figura 4.2. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.a Compressão (esquerda) e tração (direita).	50
Figura 4.3. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.b.	52
Figura 4.4. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.b Compressão (esquerda) e tração (direita).	52
Figura 4.5. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.c.	54
Figura 4.6. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.c Compressão (esquerda) e tração (direita).	54
Figura 4.7. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.d.	55
Figura 4.8. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.d Compressão (esquerda) e tração (direita).	56
Figura 4.9. (a) Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 2.a1.	57
Figura 4.9. (b) Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 2.a2.	57
Figura 4.10. Imagem do resultado da otimização da biela (caso 1.b).	59
Figura 4.11. Projeto final da biela em CAD 3D.	60
Figura 4.12. Validação do projeto final da biela. Tensão máxima de von Mises (esquerda), ovalização sob compressão (centro) e ovalização sob tração (direita).	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas do Aço SAE4340.	33
Tabela 3.2. Descrição dos parâmetros do cartão DOPTPRM do <i>solver</i> de otimização.	44
Tabela 3.3. Descrição dos parâmetros de execução de entrada/saída do <i>solver</i> de otimização.	45
Tabela 3.4. Casos de Otimização implementados e avaliado.	48
Tabela 4.1. Consolidação dos Resultados e Respostas.	58
Tabela 4.2. Resumo do desempenho da biela e comparação com o componente original.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
FEM	Finite Element Method
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOT	Método da Otimização Topológica
OT	Otimização Topológica
FS	Fator de Segurança
PMS	Ponto Morto Superior
DTPL	Design Variable For Topology Optimization Card
DOPTPRM	Design Optimization Parameters
I/O	Input / Output Options
Min Vol	Minimização do Volume
Min Comp	Minimization of the Compliance
Min Flex	Minimização da Flexibilidade
Vol Frac	Fração de Volume

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho faz parte de um projeto temático, de maior abrangência, que tem como objetivo o projeto da árvore de potência (virabrequim, biela e pistão) baseado no Método da Otimização Topológica (MOT). Sendo assim, é único deste trabalho o desenvolvimento da biela do motor. Já o cálculo e simulação do desempenho térmico e dinâmico são compartilhados entre os trabalhos do projeto temático.

O motor selecionado para este projeto é o Honda GX-35 (35 cm³ de cilindrada, quatro tempos, Ciclo Otto). Este motor equipa o veículo de economia de combustível (Milhagem) da Equipe POLI de Milhagem (EPUSP), projeto extracurricular realizado por alunos de graduação. Pretende-se neste trabalho contribuir para o desenvolvimento de um motor mais eficiente para a aplicação do veículo de Milhagem. O veículo de Milhagem é um triciclo invertido (duas rodas na dianteira), leve (35 kg), mono posto e de baixa potência (1,6 cv). O objetivo é que o veículo percorra a máxima distância com um litro de combustível.

1.1. Revisão Bibliográfica

O livro de Basshuyen e Schäfer (2002) apresenta a teoria básica de motores a combustão interna e, em especial para este trabalho, a dedução dos carregamentos atuantes nos componentes do motor. A modelagem aplicada é simplificada ao desconsiderar os efeitos da inércia e do centro de massa da biela, porém é adequada para a fase inicial do projeto. Trata-se de uma importante publicação que permitiu a disseminação do conhecimento técnico da indústria.

O trabalho de Meske, Mulfinger e Warmuth (2002) apresenta a otimização de uma biela considerando o contato dos pinos com os olhais utilizando o software FE-Design TOSCA[®]. Este trabalho é um dos primeiros trabalhos com aplicação na indústria (no caso a Ford Motor Company) de otimização topológica de componentes de motores a combustão interna.

Shenoy e Fatemi (2005) apresentam uma abordagem mais complexa do problema ao considerar a seleção de materiais, durabilidade e custos na aplicação da otimização de forma do componente.

O método da otimização topológica de estruturas baseia-se nas respostas de simulações utilizando o método dos elementos finitos. Saeed (2007) apresenta de forma bastante clara o método dos elementos finitos e permite compreender o que está por trás dos programas computacionais. Em especial, é definido a metodologia de utilização das ferramentas e procedimentos de validação dos modelos e verificação da qualidade dos resultados.

1.2. Justificativa

Com a forte alta do preço dos combustíveis fósseis e necessidade de redução do impacto ambiental causado pelo transporte veicular é necessário que se desenvolva motores a combustão interna mais eficientes. A redução da massa dos elementos móveis é um grande desafio a ser superado para a produção de motores mais econômicos, menos poluentes e mais baratos.

A massa dos componentes reduz o consumo de combustível e assim a emissão de poluentes. Com o aço exercendo uma forte pressão nos custos, a redução da massa na indústria automotiva, onde o volume de produção é da ordem de milhões de componentes por ano, possibilita uma grande redução dos custos finais, resultando em aumento nos ganhos da indústria nacional, aumentando sua competitividade no mercado mundial de autopeças.

O Método da Otimização Topológica (MOT) é extremamente eficiente quando aplicado ao projeto de componentes mecânicos. Neste trabalho o MOT será aplicado ao projeto de biela para motor a combustão interna, visando reduzir a massa do componente mantendo o compromisso estrutural da biela para a operação adequada ao longo da vida do motor.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é aumentar a eficiência mecânica do motor Honda GX-35 (que equipa o veículo de economia de combustível da Equipe Poli de Milhagem) por meio da redução da massa da biela, bem como adequar o componente para a operação em uma condição de carregamento mais severa, devido à alteração do combustível para etanol e o conseqüente aumento da taxa de compressão do motor.

Para atingir tal objetivo é aplicado o método da otimização topológica. Para a eficácia da aplicação da otimização topológica é definida uma metodologia de projeto que consiste na definição do carregamento atuante na biela, na adequada modelagem em elementos finitos, na determinação dos critérios de engenharia do componente, na formulação do problema de otimização e, por final, na interpretação e validação do projeto.

Neste trabalho a metodologia é desenvolvida utilizando softwares comerciais, de forma que não está no escopo deste trabalho a implementação de algoritmos próprios. Como objetivo secundário este trabalho estabelece critérios e práticas a serem adotadas para a correta aplicação do método da otimização topológica ao longo do processo de desenvolvimento de componentes mecânicos.

1.4. Otimização Estrutural

Uma solução ótima é aquela que apresenta o melhor resultado de uma dada operação satisfazendo certas restrições (Haftka, 1992). A abordagem mais intuitiva e imediata para a procura desta solução é a análise comparativa de todos os resultados possíveis, a chamada abordagem analítica. A abordagem de otimização (síntese) consiste na busca racionalizada de uma solução, através do uso de algoritmos numéricos de otimização. Embora a abordagem de análise seja aplicável em problemas simples, ela torna-se inviável com o aumento do espaço de soluções possíveis, devido ao alto custo computacional a ela associado.

Os primeiros exemplos de otimização estrutural datam de 1872 (Maxwell) e 1904 (Michell), propondo que a estrutura ótima para um caso de carregamento único seja composta por um conjunto de treliças orientadas no sentido das tensões principais do domínio, conforme a figura 1.1, correspondendo à solução ótima para o problema de máxima rigidez com mínimo volume de material. Com o desenvolvimento da computação ao longo do século XX, foram criados algoritmos de otimização que viabilizaram a aplicação comercial de técnicas de otimização estrutural. Atualmente, as três principais abordagens de otimização estrutural são a otimização paramétrica, a otimização de forma e a otimização topológica.

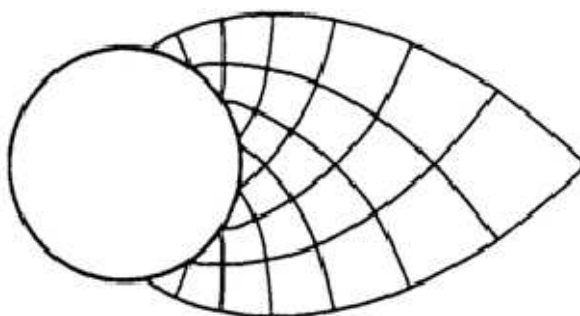


Figura 1.1 – Resultados obtidos por Michell (1904).

A técnica de otimização paramétrica propõe a otimização de parâmetros geométricos da estrutura (dimensões ou razões de dimensões), sem alteração de seu aspecto (forma). Na otimização de forma, altera-se o contorno da estrutura, sem alterar a conectividade ou criar novos vazios (“buracos”). A otimização topológica atua diretamente no leiaute (topologia) da estrutura, não se limitando a seu contorno, o que permite a obtenção de resultados capazes de modificar conceitualmente a estrutura ao gerar vazios no interior. A figura 1.2 apresenta uma comparação dos três métodos.

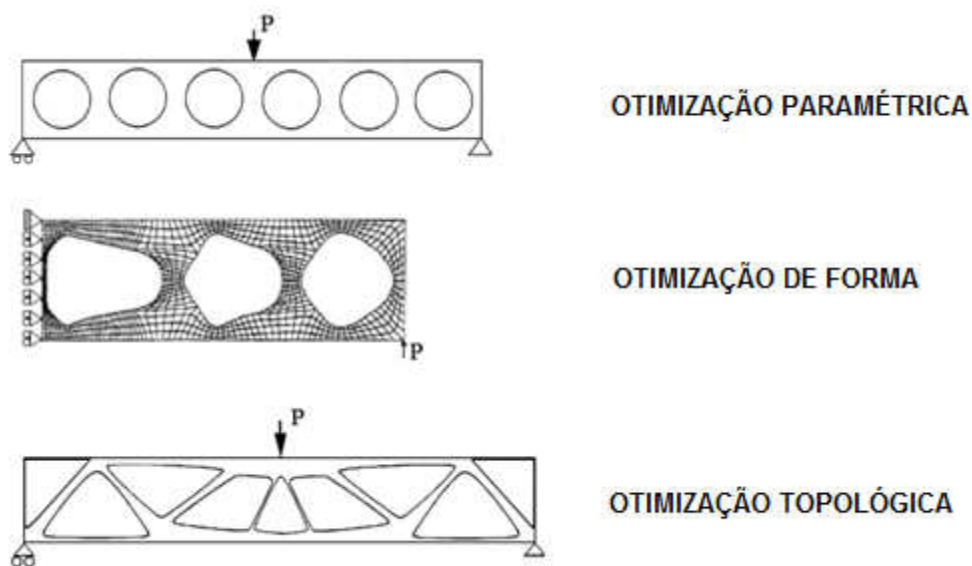


Figura 1.2 – Comparação dos três métodos de otimização.

A aplicação de métodos de otimização, em especial o MOT, implica na alteração do fluxo do projeto do ponto de vista da gestão. Uma vez que ao aplicar o MOT, a geometria do componente é definida pelo engenheiro de CAE (“*Computer Aided Engineering*”) e o projetista somente documenta o desenho em CAD (“*Computer Aided Design*”). Tradicionalmente o fluxo de projeto na indústria é o inverso do realizado neste trabalho, de forma que o projetista gera soluções e o engenheiro de CAE analisa e seleciona as soluções propostas.

1.5. Motores a combustão interna

Um motor a combustão interna é uma máquina térmica, cujo propósito é a transformação de energia química contida no combustível em energia mecânica. Os fluidos de trabalho desta máquina são a mistura ar-combustível não-queimada e, após o processo de combustão, a mistura de produtos do mesmo, sendo que a transferência de trabalho dos fluidos aos componentes do motor ocorre de forma direta.

A forma mais abrangente de classificação dos motores a combustão interna dá-se a partir do seu tipo construtivo. Desta forma, pode-se definir um motor como de

movimento rotativo ou alternativo. A partir do grupo dos motores de movimento alternativo, do qual este trabalho trata, é possível definir a classificação a partir da forma de ignição, que está intimamente ligada ao ciclo termodinâmico segundo o qual o motor trabalha. Neste caso, trata-se de um motor de ignição por centelha, que opera segundo o ciclo Otto, de quatro tempos.

Os quatro tempos de um motor ciclo Otto são:

- Admissão, quando ocorre a sucção da mistura ar-combustível. Com a válvula de admissão aberta, após a passagem do pistão pelo ponto morto superior, cria-se uma depressão no interior do cilindro, fazendo com que a mistura ar-combustível seja levada ao seu interior.
- Compressão, quando a mistura ar-combustível é comprimida.
- Expansão, quando ocorre a transferência de trabalho dos fluidos para os componentes do motor. Entre os ciclos de compressão e expansão ocorre a centelha, que inicia o processo de combustão da mistura ar-combustível.
- Exaustão, quando os gases produtos de combustão são expulsos da câmara de combustão.

1.6. Descrição do componente – Biela

A biela tem como função transformar o movimento de translação do pistão em movimento de rotação do virabrequim. O motor em questão (Honda GX-35) opera entre 3000 e 8000 rotações por minuto. Podemos dividir a biela em duas partes: a alma e os olhais. Os olhais têm característica de mancal e de união com o pistão e virabrequim e neste trabalho o perfil do olhal não será projetado visando a eficiência e durabilidade da lubrificação. A Figura 1.4 apresenta a biela do motor GX-35 digitalizada e disponível em arquivo formato STL.

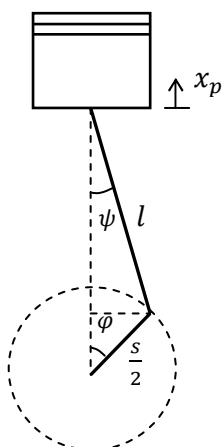


Figura 1.3 – Biela do motor Honda GX-35.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Cálculo analítico do carregamento

O carregamento modelado atuante na biela considera a força estática aplicada pelos gases de combustão na cabeça do pistão e o carregamento dinâmico devido à oscilação linear do pistão. Forças inerciais de oscilação da biela são desconsideradas neste trabalho, sendo uma primeira aproximação da modelagem do carregamento (Basshuysen e Schäfer, 2004). A figura 2.1 descreve a geometria da árvore de potência.



Definições:

x_p – posição do pistão

s – curso do pistão

l – comprimento da biela

φ – posição angular do virabrequim

ψ – ângulo da biela

Figura 2.1. Geometria da árvore de potência.

O carregamento é:

$$F_{comp} = p_{max} A_p \quad (1)$$

$$F_{trac} = m_p \ddot{x}_{p_{max}} ; \quad \ddot{x}_{p_{max}} = \frac{s}{2} \omega_{max}^2 (\cos \varphi + \frac{r}{l} \cos 2\varphi) \quad (2)$$

onde F_{comp} é a força de compressão, F_{trac} é a força de tração, m_p é a massa do pistão, p é a pressão de combustão, A_p a área da cabeça do pistão e ω é a velocidade de rotação do motor.

A Figura 2.2 ilustra os dois casos de carregamento considerados na otimização.

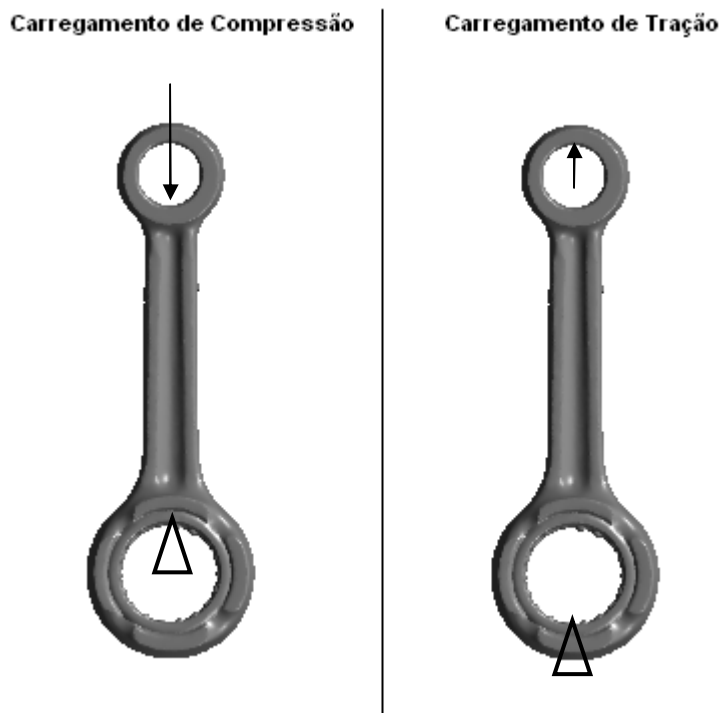


Figura 2.2. Casos de carregamento de compressão e tração.

O carregamento de compressão máximo, conforme equação (2), ocorre no ponto (do ciclo) de máxima pressão de combustão, conforme descrito na seção 2.2.1. Note que a articulação do pino com o olhal menor pode ser modelada como uma treliça de forma que não é correto a projeção e aplicação de uma força de flexão da biela devido à pressão de combustão. No caso do carregamento de tração, é considerada a máxima rotação de operação do motor (8000 rpm) e ocorre no ponto morto superior, conforme descrito na equação (2) e ilustrado na figura 2.2.

2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico de solução de equações diferenciais. Devido a isso ele é amplamente aplicado em análises

estruturais, de transferência de calor, escoamentos unidimensionais, magnetismo e muitos outros problemas da engenharia.

Neste trabalho o MEF é empregado para a solução de problemas estruturais elástico-lineares, considerando materiais isotrópicos (propriedades invariantes com a direção de aplicação do carregamento) e pequenos deslocamentos. Neste trabalho é utilizado o código comercial de MEF Altair RADIOSS®.

Para a aplicação do MEF é necessário que seja seguido o seguinte procedimento:

Pré-processamento:

- a. Discretização do domínio do componente mecânico em elementos finitos, ou seja, dividir o domínio em nós e elementos;
- b. Definição de uma função de forma contínua ao longo do elemento que descreve o comportamento físico (no caso estrutural) de um elemento;
- c. Desenvolver equações governantes para o elemento;
- d. Compor a matriz de rigidez global de forma a descrever a interação física entre os elementos ao longo do domínio;
- e. Aplicar condições de contorno, condições iniciais e carregamento;

Solução:

- f. Solucionar um sistema de equações lineares para obter os deslocamentos nodais da estrutura;

Pós-processamento

- g. Obter outras informações da simulação. No caso, tensões principais, tensão de Von Misses, vida à fadiga, entre outras.

2.3. Método da Otimização Topológica (MOT)

O Método de Otimização Topológica (MOT) é uma ferramenta computacional capaz de sintetizar estruturas através de distribuição de material em um domínio espacial fixo, de forma a maximizar ou minimizar uma ou mais funções

objetivos especificadas (como exemplos tradicionais a maximização da rigidez e a minimização da massa). O método combina algoritmos de otimização com métodos de numéricos de análise, comumente empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Assim, inicialmente uma região do espaço (Domínio Fixo Estendido) é discretizada em elementos finitos, de modo que o modelo em elementos finitos não seja alterado durante a otimização. A figura 2.3 apresenta um exemplo do processo de convergência de uma solução obtida através do MOT.

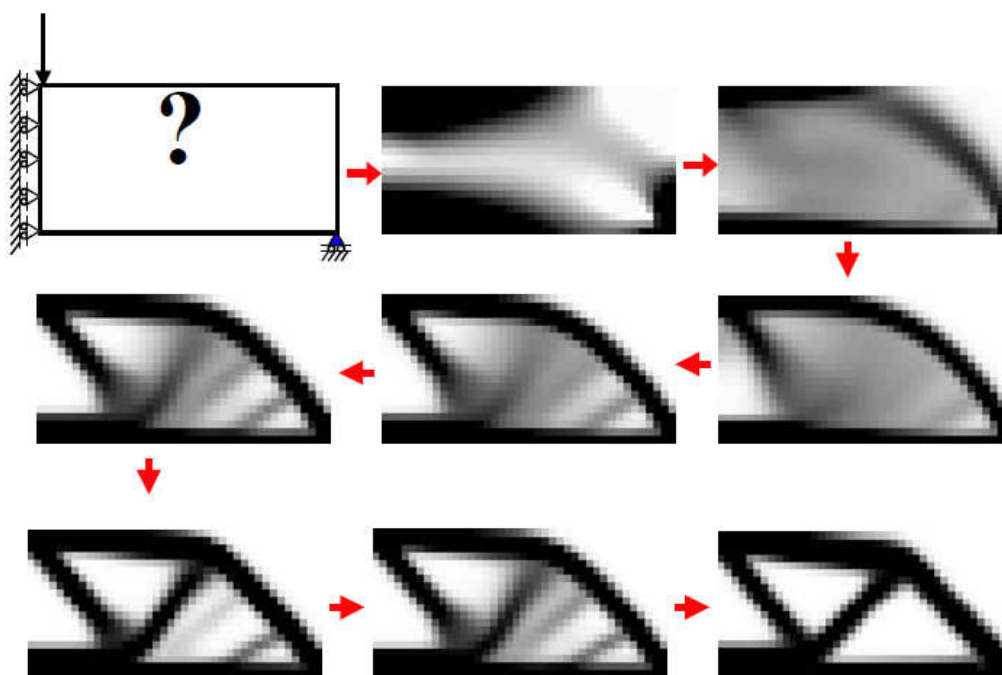


Figura 2.3 – Progressão e convergência da solução pelo método da otimização topológica.

O domínio do projeto é definido com presença de material nos pontos de apoio da estrutura e nos pontos de aplicação de carregamentos, cabendo ao algoritmo de otimização definir, através de adição e remoção de material, as regiões do domínio sem material (vazios) e sua conectividade, com base no modelo de material definido. Um modelo de material é um modo de relaxar o problema de otimização definindo estágios intermediários na interface entre dois materiais diferentes, evitando problemas de tratamento numérico devido a mudanças bruscas de propriedades (especialmente na proximidade de vazios).

O método mais simples, chamado de método das densidades, se baseia na parametrização da distribuição de densidades, de forma que cada elemento do

domínio assumam valores de densidade entre 1 e 0, com 0 correspondendo a ausência de material, 1 à presença de material e valores intermediários como presença de materiais com densidade intermediária.

Apesar de existirem modelos de materiais mais complexos e abordagens que se baseiam na geometria, o modelo das densidades ainda é o que possui maior aplicação prática e fundamentação teórica, sendo empregado na maioria dos softwares comerciais, caso do programa Altair OptiStruct[®], programa de otimização utilizado neste trabalho.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no projeto temático, de forma a apresentar um fluxograma do projeto global que está sendo realizado pelos alunos. Após é detalhado o desenvolvimento da metodologia aplicada ao projeto de biela.

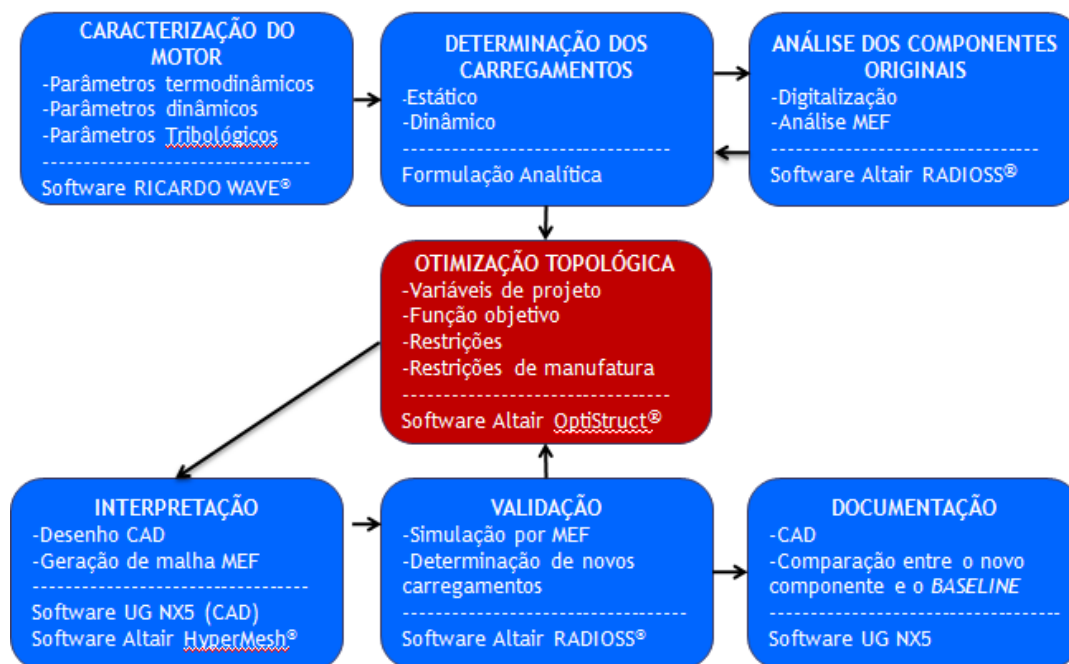
3.1. Metodologia global de projeto

O fluxograma 3.1 apresenta a metodologia global do projeto. A seguir cada etapa do fluxograma global do projeto é detalhada.

A metodologia do projeto é de suma importância para o trabalho, pois se deseja projetar uma biela funcional. Desta forma, é necessário abordar os tópicos relevantes ao desempenho da biela e do motor como um todo, para que o resultado otimizado da geometria do componente seja adequado à sua operação.

O projeto temático é fundamentalmente baseado em modelagens e soluções computacionais. Neste trabalho são apresentados os detalhes da modelagem realizada com os programas Altair HyperMesh[®], Altair RADIOSS[®] e Altair OptiStruct[®]. O programa Altair HyperMesh[®] é um pré-processador de elementos finitos, ou seja, é a ferramenta na qual é realizada a geração da malha e aplicação de forças e condições de contorno, bem como a definição do problema de otimização. Podemos dizer que o pré-processamento é a tarefa de transformação do modelo físico do problema em um modelo matemático. Este modelo matemático é processado pelo *solver* de elementos finitos que é o programa Altair RADIOSS[®], que realiza tanto as simulações estruturais quanto os cálculos das respostas de otimização ao longo da execução do programa Altair OptiStruct[®], que é responsável pela solução do problema de otimização topológica.

Informações dos demais programas e modelagens citados no fluxograma detalhadas podem ser encontradas em Santos, Guilherme e Silva, Emílio (2009) e em Santos, Gustavo e Silva, Emílio (2009).



Fluxograma 3.1 – Metodologia global do projeto temático.

A primeira etapa do projeto consiste na determinação e obtenção dos parâmetros do motor, necessários para a modelagem termodinâmica e dinâmica do motor.

Os parâmetros para a modelagem termodinâmica utilizando o programa Ricardo WAVE® são:

- Parâmetros Geométricos
 - Número de Cilindros
 - Diâmetro do cilindro
 - Curso do pistão
 - Comprimento da biela
 - Taxa de compressão
 - Folga entre cabeça do pistão e topo da câmara de combustão no PMS (Ponto Morto Superior)
 - Dimensões (comprimento e diâmetros) dos coletores de admissão e exaustão
 - Curva de *Deslocamento das válvulas x Ângulo do virabrequim*
 - Geometria da válvula
- Parâmetros termodinâmicos
 - Ciclo operacional - 2T ou 4T
 - Método de ignição - MIF (ignição por faísca) ou MIC (ignição por compressão)

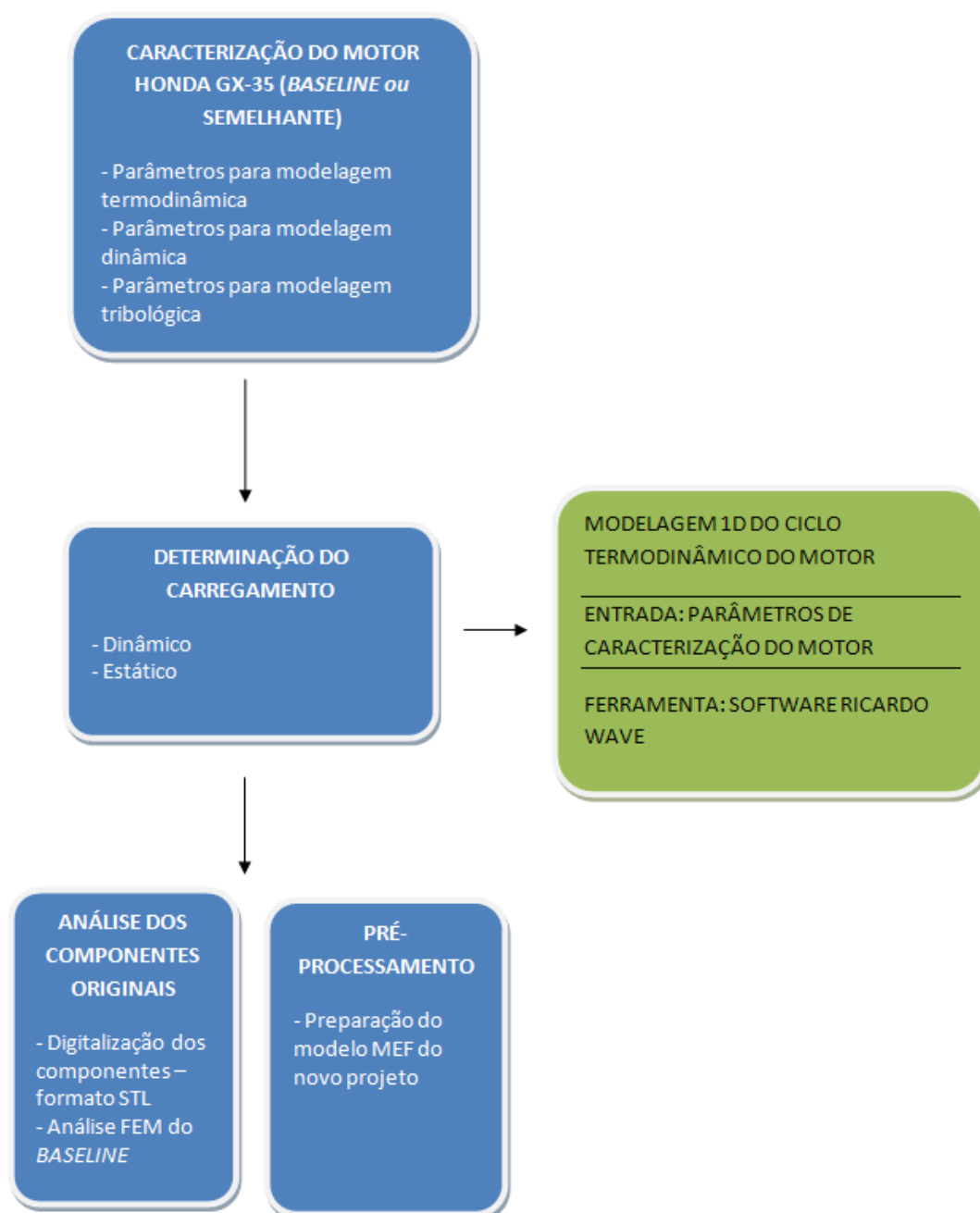
- Estado termodinâmico do ambiente de admissão e exaustão
- Perda de carga gerada pelo filtro de ar e pelo abafador do escape
- Coeficiente de descarga das válvulas
- Coeficientes de troca de calor
- RAC (Razão Ar-Combustível)
- Ponto (posição do virabrequim) no qual 50% da mistura está queimada
- Duração da combustão
- Parâmetros de desempenho (fornecidos pelo fabricante ou obtidos em ensaios dinamométricos)
 - Curva de Torque x RPM
 - Curva de Potência x RPM
 - Curva de Consumo Específico x RPM
 - OBS.: estes parâmetros são usados para a calibração do modelo

Para a modelagem dinâmica e tribológica do motor são necessários os seguintes parâmetros:

- Parâmetros Geométricos e Estruturais
 - Número de cilindros
 - Curso do pistão
 - Distância entre centros dos mancais do munhão
 - Diâmetro do munhão
 - Diâmetro do moente
 - Diâmetro do pistão
 - Folga do pistão com a camisa
 - Medidas do perfil macroscópico do pistão (corte pelo plano do pino)
 - Comprimento da Biela
 - Folga entre cabeça do pistão e topo da câmara de combustão no PMS
 - *Offset* do pino em relação ao centro do pistão
 - Distância do centro do pino ao topo do pistão
 - Diâmetro interno e externo do pino
 - Para Virabrequim, Biela e Pistão
 - Rigidez
 - Inércia
 - Posição do centro de massa
 - Massa
 - Material
 - Para o contrapeso do virabrequim
 - Raio

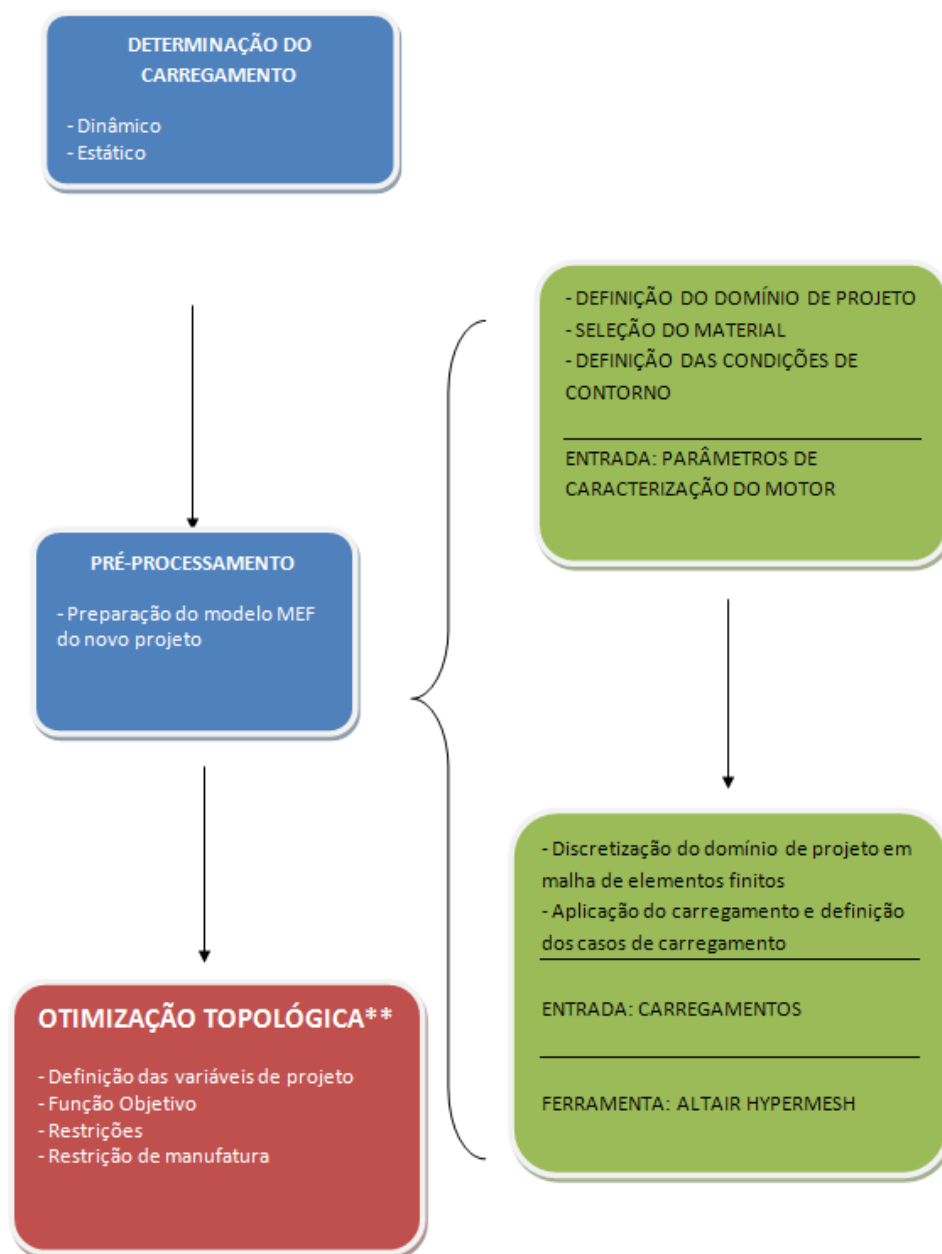
- Ângulos
- Massa
- Inércia
- Rigidez
- Parâmetros Tribológicos
 - Dimensões (folga, diâmetros e largura) dos mancais do munhão, moente e pino
 - Perfil microscópico da saia do pistão e da camisa
 - Rugosidade e propriedade mecânica das asperezas (saís e coroa do pistão, camisa, munhão e moente)
 - Propriedades dos lubrificantes
 - Área dos furos de óleo na região do porta anel do pistão
- Parâmetros Térmicos
 - Condições ambientes
 - Propriedades térmicas dos materiais

Realizada a caracterização, o motor é modelado por Santos e Silva (2009) com o programa Ricardo WAVE[®], um simulador do desempenho de motores. Com isso obtém-se a curva de pressão de combustão para a rotação de torque máximo, que é o carregamento estático atuante no componente. Com isso, os demais carregamentos são calculados conforme descrito no item 2.1. O fluxograma 3.2 apresenta o método de cálculo dos carregamentos.



Fluxograma 3.2 – Cálculo dos carregamentos.

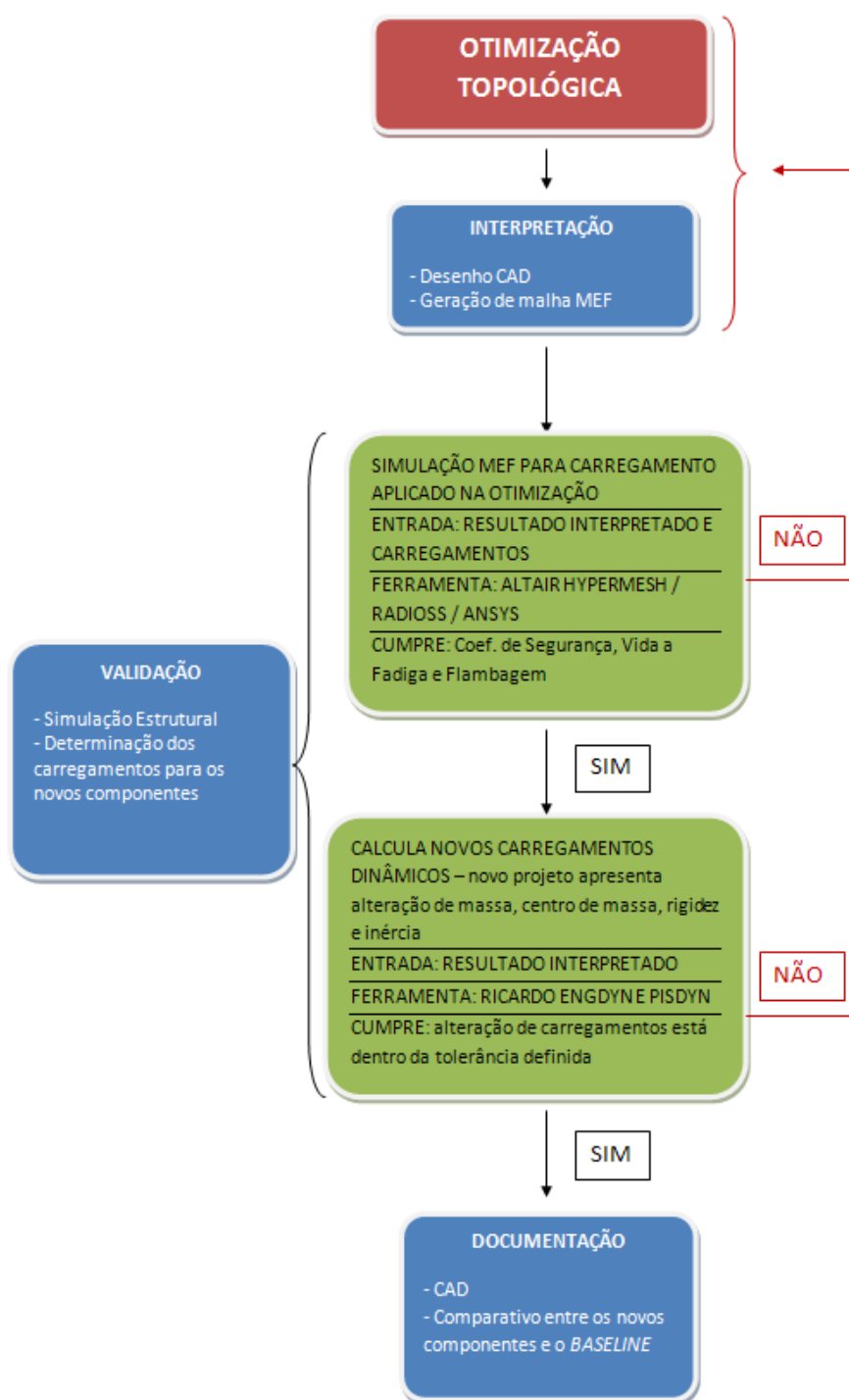
Obtido os carregamentos inicia-se a etapa de preparação do problema de elementos finitos com o pré-processador Altair Hypermesh[®]. Nesta etapa é definido o domínio de projeto, isto é, o máximo volume que o componente pode ocupar. Após é realizada a discretização do domínio em elementos finitos, seleção do material e são aplicadas as condições de contorno e o carregamento. O fluxograma 3.3 descreve esta etapa.



Fluxograma 3.3 – Pré-processamento.

É de grande importância a etapa de validação dos resultados. O fluxograma 3.4 apresenta a metodologia de validação. O resultado da otimização é primeiramente documentado em desenho CAD 3D. Com isso é realizado um processo iterativo de avaliação do projeto final. Este processo inicia-se com a análise do componente baseado no carregamento original utilizado na primeira otimização, de forma a verificar se a formulação do problema de otimização e a interpretação foram adequados. Caso positivo, os carregamentos são calculados novamente, pois a nova

geometria dos componentes da árvore pode alterar o carregamento de forma a comprometer estruturalmente os mesmos. Dessa forma, caso haja alteração do carregamento dinâmico, o processo de projeto é reiniciado até a convergência, isto é, até o modelo final atingir os requisitos estruturais do carregamento associado à sua geometria.



Fluxograma 3.4 – Validação.

3.2. Desenvolvimento da metodologia

O projeto da biela apresenta metodologia específica, em relação aos carregamentos que serão considerados, critérios de projeto, modelo de elementos finitos (MEF) e problemas de otimização formulados.

3.2.1. Determinação da pressão de combustão

O motor é modelado por Santos, Guilherme e Silva, Emílio (2009) com o programa Ricardo WAVE[®], um simulador de desempenho de motores. As entradas são a geometria do motor (árvore de potência, coletor de admissão, escape, válvulas, etc), as propriedades do combustível e o modelo de combustão. A base deste trabalho é um motor de pequena cilindrada, quatro tempos de ignição por faísca, convertido para etanol. A curva de pressão de combustão na rotação de torque máximo é apresentada na Fig. 3.1. A máxima pressão é de 3.5 MPa à 5250 rpm e a posição da biela (ψ) é igual a 0.115 rad (veja Fig. 2.1). Com isso é possível calcular os esforços de tração e compressão atuantes na biela, conforme apresentado na seção 2.1.

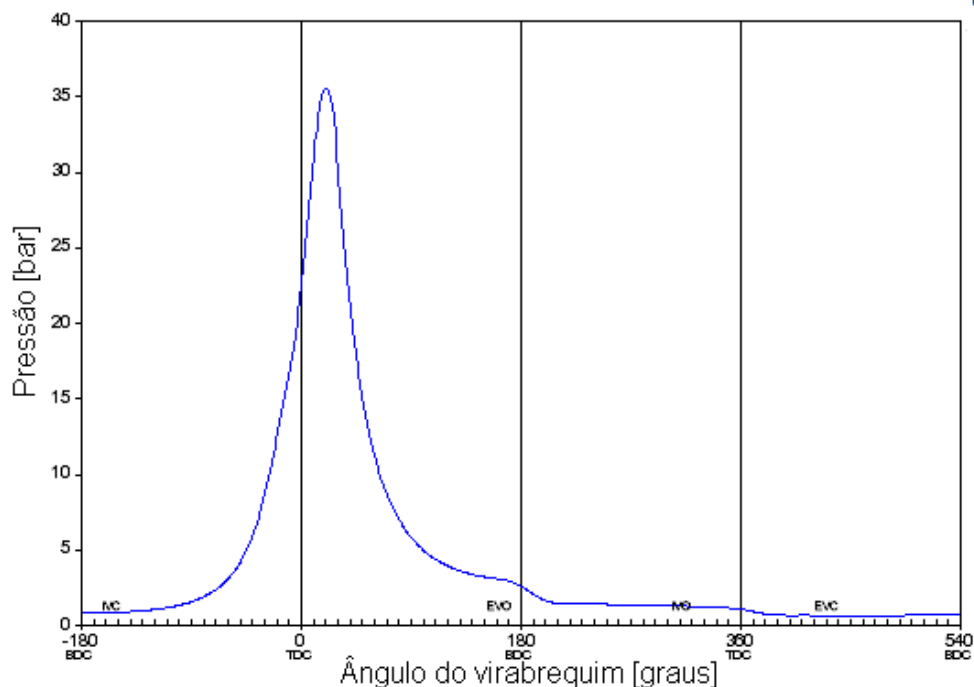


Figura 3.1. Pressão dos gases de combustão x Posição do virabrequim para motor convertido para etanol.

3.2.2. Modelagem em elementos finitos

O domínio de projeto foi definido considerando o comprimento da biela e a geometria dos olhais. A Figura 3.2 apresenta a malha gerada com o programa Altair HyperMesh[®] contendo 30.000 elementos sólidos tetraédricos. As variáveis de projeto são definidas pela densidade dos elementos em azul. Os elementos em amarelo não estão sujeitos à otimização, de forma a garantir a funcionalidade da biela ao final da otimização. O material da biela é o aço SAE 4340, selecionado devido ao seu desempenho adequado para a aplicação em componentes mecânicos de motores e pela disponibilidade do material no mercado de varejo, o que é de suma importância no caso deste projeto, considerando a viabilidade para fabricação dos componentes em lote piloto. As propriedades do material são definidas na Tabela 3.1.

Parâmetros geométricos da biela:

- Comprimento (entre centro dos olhais) – 52,6 mm
- Diâmetro do olhal menor – 8mm
- Diâmetro olhal maior – 16mm
- Largura olhal menor – 7mm
- Largura olhal maior – 10mm

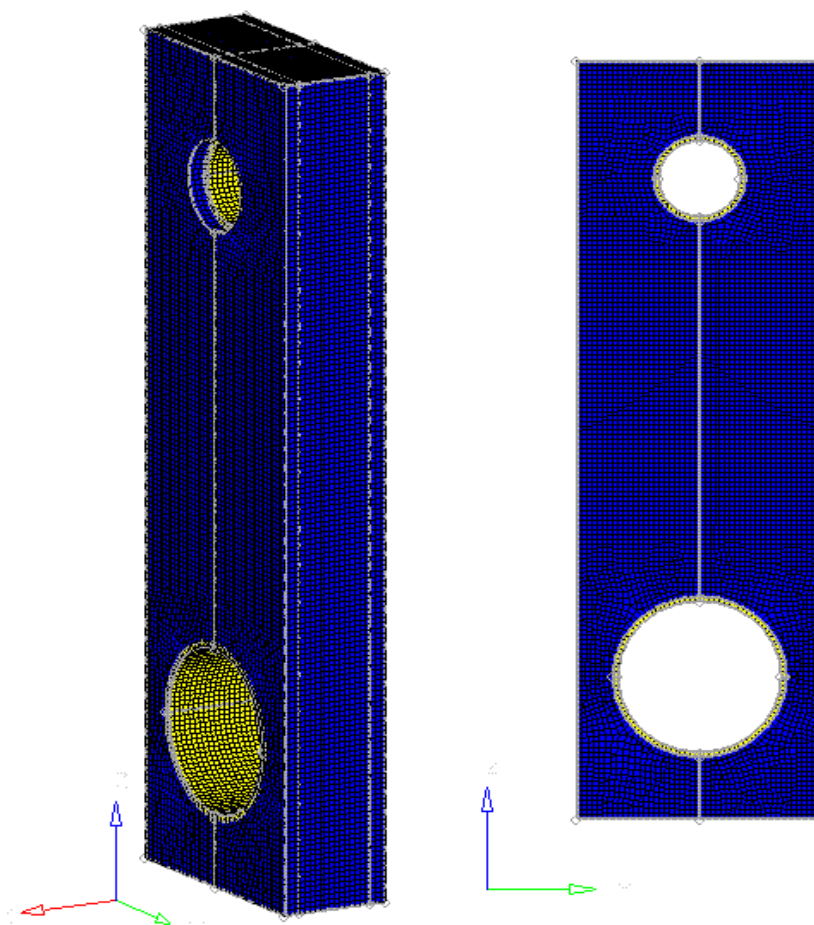


Figura 3.2. Domínio de projeto em elementos finitos da biela.

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas do Aço SAE4340.

Coefficiente de Poisson	ν	0,3
Módulo de Young	E	210 GPa
Tensão de Escoamento	σ_e	473 MPa

Como já citado o pré-processamento é realizado com o software Altair HyperMesh[®]. O programa é uma ferramenta avançada de geração de malhas e modelagem estrutural de componentes. A figura 3.3 apresenta a visão geral da ferramenta.

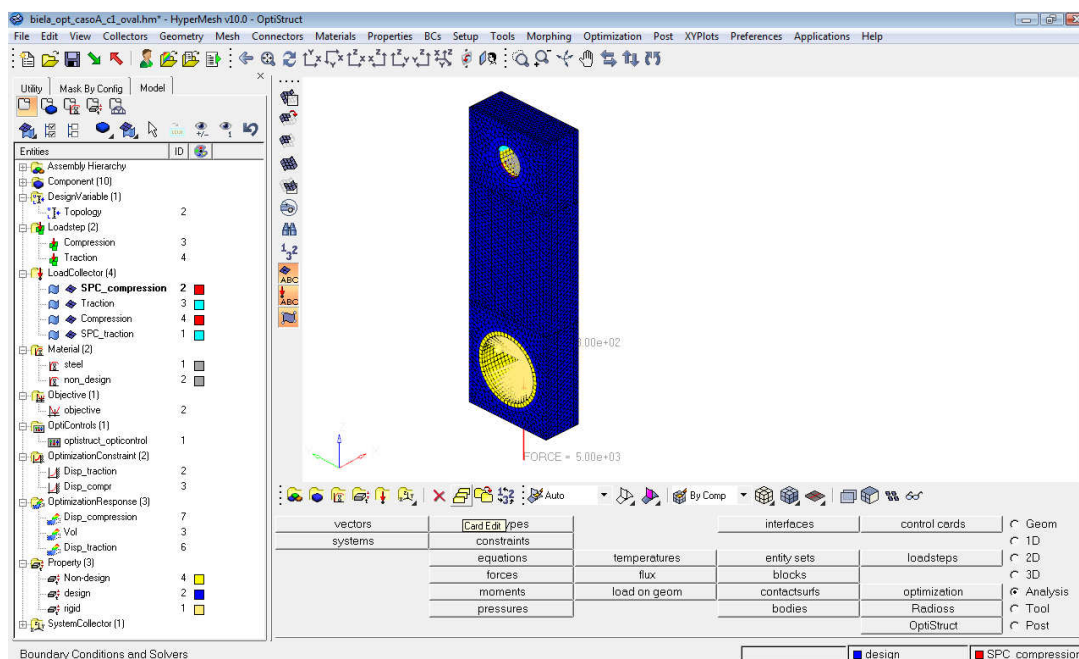


Figura 3.3. Visão geral do programa Altair HyperMesh[®].

Para a adequada utilização da ferramenta e compreensão do funcionamento do programa, é necessária a execução dos tutoriais da ferramenta. A habilidade na modelagem requer experiência e o aprendizado dos comandos e estratégias de modelagem são de suma importância para garantir bom desempenho. A figura 3.4 apresenta a árvore de modelagem, que descreve sucintamente os parâmetros definidos e permite a compreensão do modelo de maneira ágil e direta.

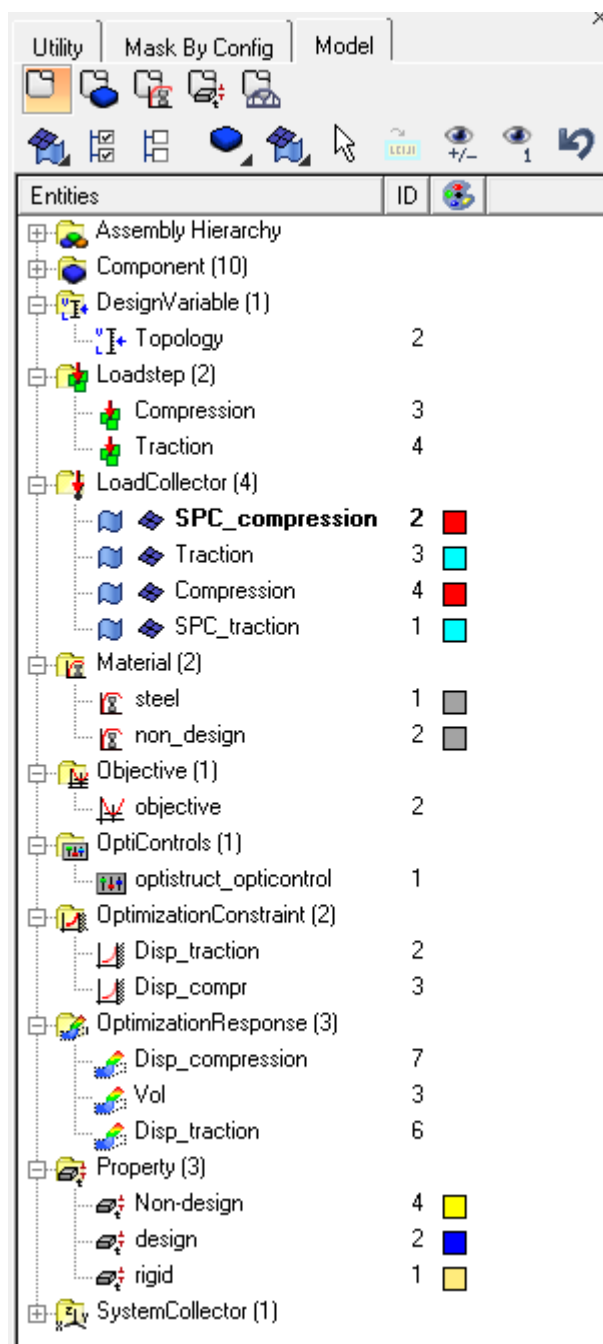


Figura 3.4. Árvore de modelagem implementada.

A modelagem em elementos finitos do carregamento e das condições de contorno é de suma importância para garantir a validade da otimização e, assim, de todo o projeto. Tipicamente a abordagem mais adotada pela indústria é a de contato entre biela e pinos. Esta abordagem é computacionalmente custosa, já que se trata de um modelo não-linear estático. Desta forma, duas modelagens lineares estáticas são

avaliadas para a determinação de um modelo computacional barato e ao mesmo tempo fiel ao comportamento do componente quando em operação.

Para a biela em questão a ovalização do olhal maior (isto é, a deformação radial do olhal maior da biela) deve ser obtida em um modelo realístico, já que se trata de um critério de engenharia da biela em questão. Isto porque para garantir o adequado funcionamento do mancal de rolamento que é montado no olhal maior é necessário que a circularidade e concentricidade das pistas do rolamento não violem a tolerância definida pelo fabricante. Já no olhal menor o pino do pistão é engastado, de forma que a ovalização do olhal menor não é relevante para o projeto. Note que caso ambos os olhais da biela fossem lubrificadas a modelagem por contato seria necessária para avaliar ambas as ovalizações simultaneamente.

Para o pós-processamento da ovalização é definido um sistema de coordenadas cilíndrico no centro do olhal maior da biela. A figura 3.5 ilustra o sistema de coordenadas.

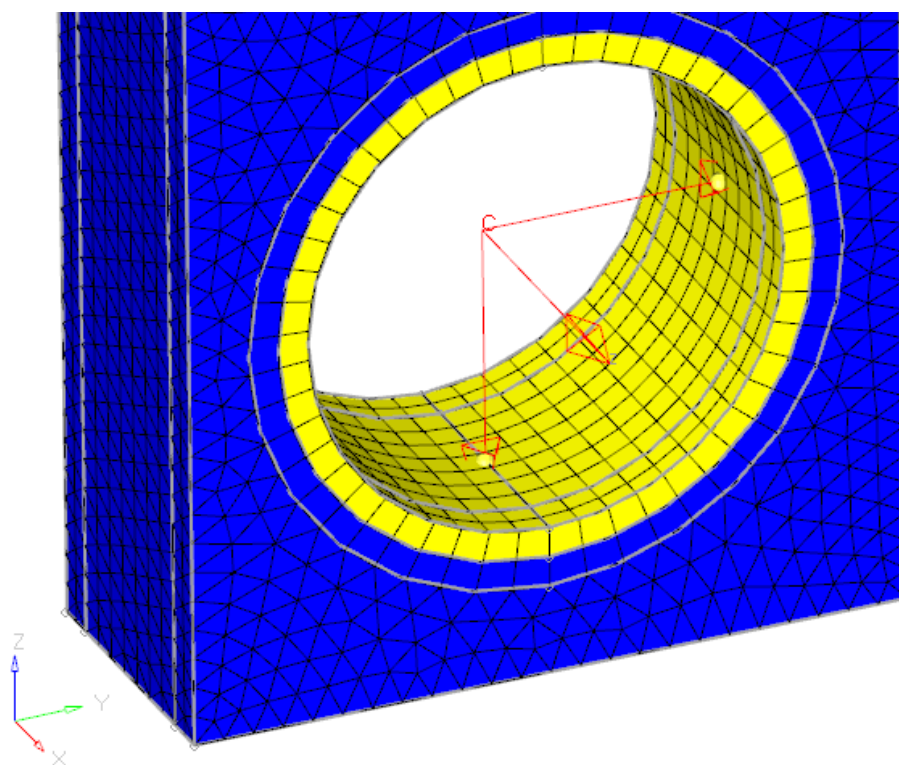


Figura 3.5. Sistema de coordenadas cilíndrico gerado para análise da ovalização do olhal maior.

A primeira modelagem, considerada mais intuitiva, consiste na aplicação das forças no olhal menor e restrições de deslocamento no olhal maior da biela. Forças e restrições são aplicadas ao longo de um setor de 120° dos olhais, modelagem adotada pela indústria que representa de forma adequada o modo de falha do componente na região dos olhais. A figura 3.6 apresenta a modelagem realizada, o Modelo 1.

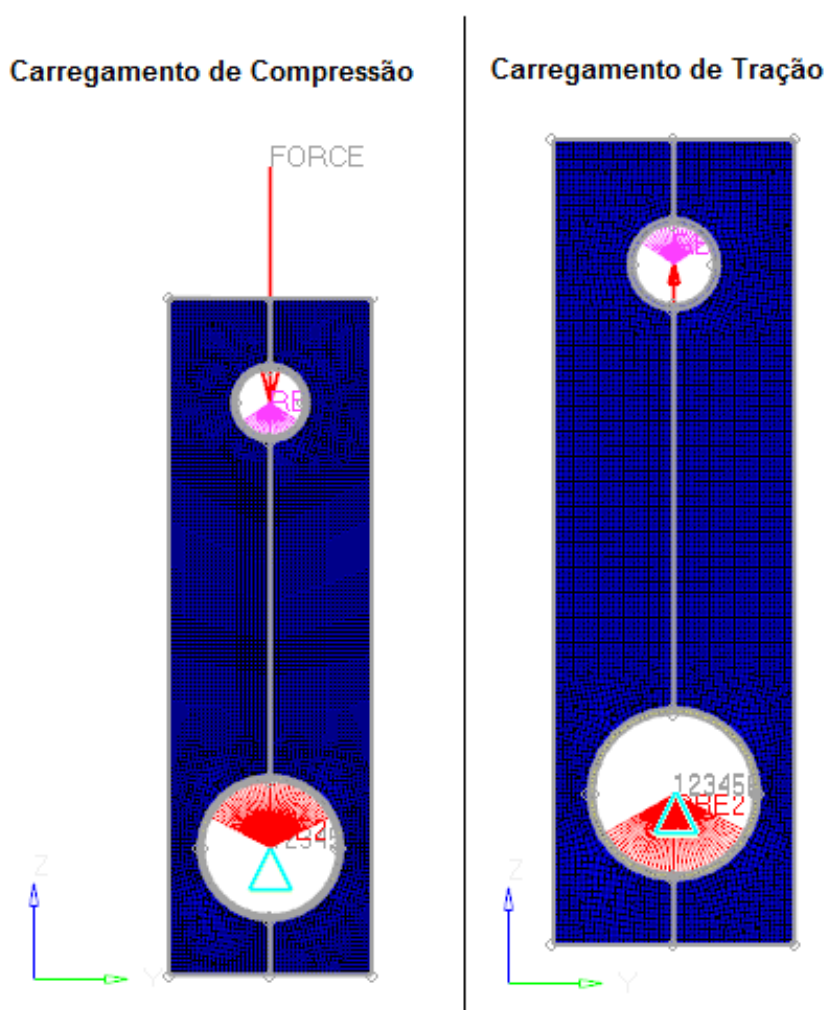


Figura 3.6. Modelagem do carregamento e restrições do Modelo 1.

Para uma adequada avaliação da modelagem é realizada a análise estrutural do modelo para avaliar deslocamentos e distribuição de tensão ao longo do domínio utilizando o programa Altair RADIOSS[®]. A figura 3.7 apresenta o resultado da análise do Modelo 1 para o carregamento de compressão.

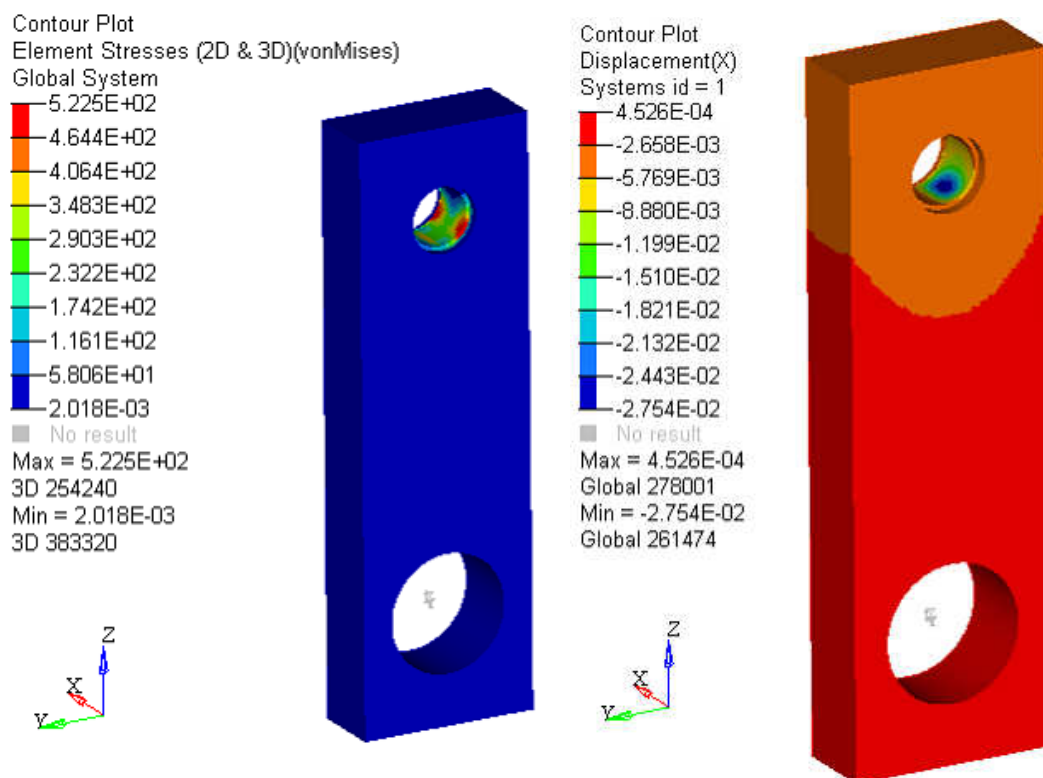


Figura 3.7. Resultado da análise MEF do Modelo 1 para o caso de compressão. Tensão de von Mises em MPa (esquerda) e ovalização do olhal maior em mm (direita).

A análise do resultado da análise do Modelo 1 leva à conclusão de que a modelagem é inadequada, pois o olhal da biela não apresenta ovalização e a distribuição de tensão é concentrada no olhal menor e não se distribui por todo o modelo. Isto se deve ao fato de a modelagem das restrições de deslocamento com elementos rígidos no olhal maior introduz ao modelo rigidez excessiva, não permitindo o comportamento realístico do mesmo.

O Modelo 2 consiste em uma abordagem considerada, de certa forma, contra-intuitiva, pois o carregamento é aplicado no olhal maior da biela, o que não é a condição física do ponto de vista de ação, mas fisicamente é válido e correto já que trata-se da reação. Para a aplicação do carregamento é utilizado o elemento unidimensional RBE3, que possui o nó central dependente e os demais nós independentes. Desta forma o elemento permite a distribuição das forças ao longo do olhal e ao mesmo tempo permite o deslocamento independente dos nós. As restrições são aplicadas nos nós do olhal menor, sendo que a utilização de elementos rígidos RBE2 não é adequada neste caso (no qual não são todos os nós do olhal que estão

restringidos) já que confere ao modelo rigidez adicional e pode levar a resultados inválidos a respeito das tensões e deformações na região próxima aos elementos rígidos. A figura 3.8 ilustra o Modelo 2.

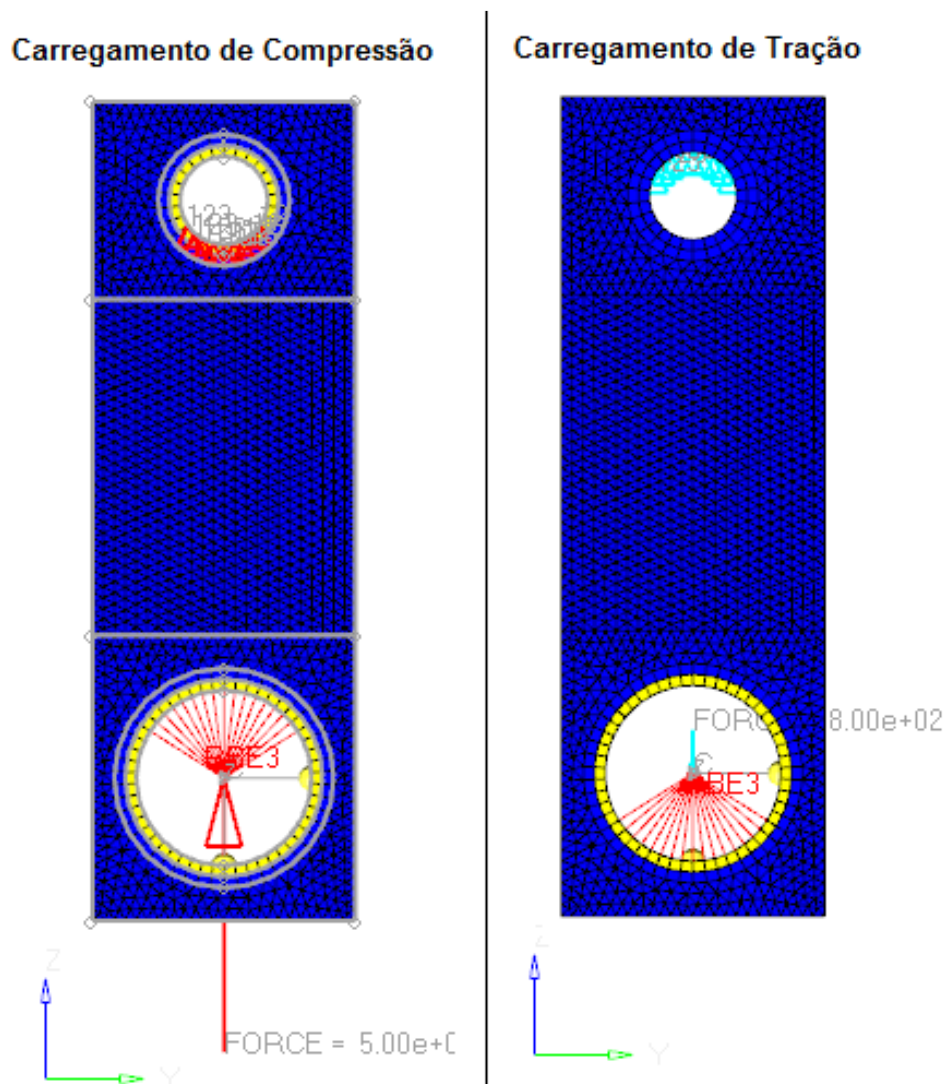


Figura 3.8. Modelagem do carregamento e restrições do Modelo 2.

De forma análoga ao Modelo 1 é realizada a análise estrutural do Modelo 2 para o carregamento de compressão, a fim de avaliar o comportamento mecânico do componente e assim verificar a validade da modelagem. A figura 3.9 apresenta os resultados da análise do Modelo 2.

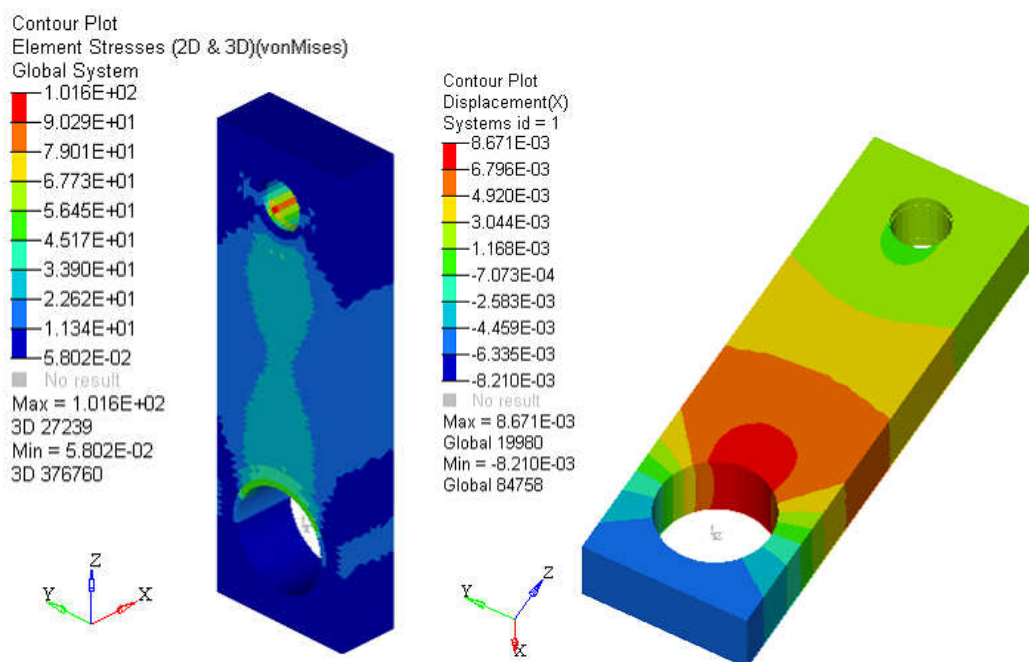


Figura 3.9. Resultado da análise MEF do Modelo 2 para o caso de compressão. Tensão de von Mises em MPa (esquerda) e ovalização do olhal maior em mm (direita).

A análise do resultado leva à conclusão de que a modelagem proposta e implementada no Modelo 2 é adequada para o projeto, já que permite a ovalização do olhal maior e a tensão se distribui ao longo do modelo, o que está adequado em relação ao comportamento mecânicos do componente em operação e ao comportamento físico esperado do componente. Isso se deve ao fato de que os nós nos quais forças são aplicadas a deformação é possível, e os nós nos quais as restrições são aplicadas o deslocamento nodal não é permitido. Sendo assim, por mais que fisicamente ambas as modelagens sejam iguais, do ponto de vista da modelagem matemática elas diferem em relação às singularidades existentes nos modelos. De maneira geral as forças devem ser aplicadas no olhal que se deseja avaliar a ovalização.

3.2.3. Análise da biela original e determinação dos critérios de engenharia

Em geral o maior desafio ao longo do desenvolvimento estrutural de componentes mecânicos está na determinação dos critérios de engenharia do componente. São três os principais critérios considerados neste trabalho:

- 1) não ocorrência de falha por ruptura ou plastificação do material, o que é modelado pelo critério de falha de von Mises. Desta forma a tensão de von Mises atuante no componente deve ser inferior à tensão de escoamento do material, considerando ainda um fator de segurança (no caso, $FS = 1,6$ para componentes de motores). Este parâmetro depende unicamente do material, o qual está definido na tabela 3.1.
- 2) Deslocamento entre os olhais da biela deve ser inferior ao deslocamento máximo admissível, o que está relacionado com a manutenção da taxa de compressão do motor.
- 3) Ovalização do olhal maior da biela menor do que a ovalização máxima admissível, o que está relacionado com a garantia do desempenho tribológico do mancal.

- Note que o critério de vida a fadiga é de suma importância para o projeto de bielas. A análise de vida a fadiga é negligenciada neste trabalho devido às limitações dos programas utilizados. Considerando que a versão utilizada do pacote Altair HyperWorks[®] é a 9.0 – esta função está disponível na versão 10.0 do pacote.

O desafio em si está na determinação dos valores admissíveis para os critérios enunciados. Para tanto, é necessária a aplicação de engenharia reversa ao componente original do motor. O componente é digitalizado com o uso de

equipamentos baseados em imagem, de forma a obter um modelo matemático da geometria tridimensional do componente. A figura 3.10 ilustra o componente.

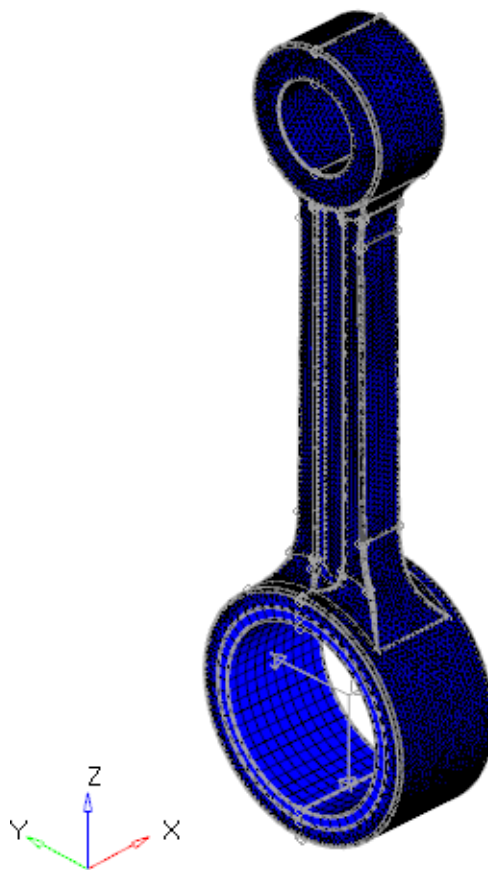


Figura 3.10. Biela original do motor.

Para a determinação dos valores admissíveis dos critérios de engenharia, é realizada a análise estrutural do componente original de acordo com a modelagem definida na seção 3.2.2, o Modelo 2, com o programa Altair RADIOSS[®]. No caso, o carregamento aplicado considera a curva de pressão do motor original, i.e., sem alteração da taxa de compressão e de combustível do motor. Neste caso o carregamento de tração permanece o mesmo, já que é inercial, e o carregamento de compressão é 30% inferior ao do novo componente a ser projetado com a aplicação da otimização topológica, já que no caso do novo componente a taxa de compressão do motor foi alterada de 8:1 para 12:1 e o motor foi convertido para etanol (Santos e Silva, 2009). A Figura 3.11 apresenta a ovalização observada do componente original.

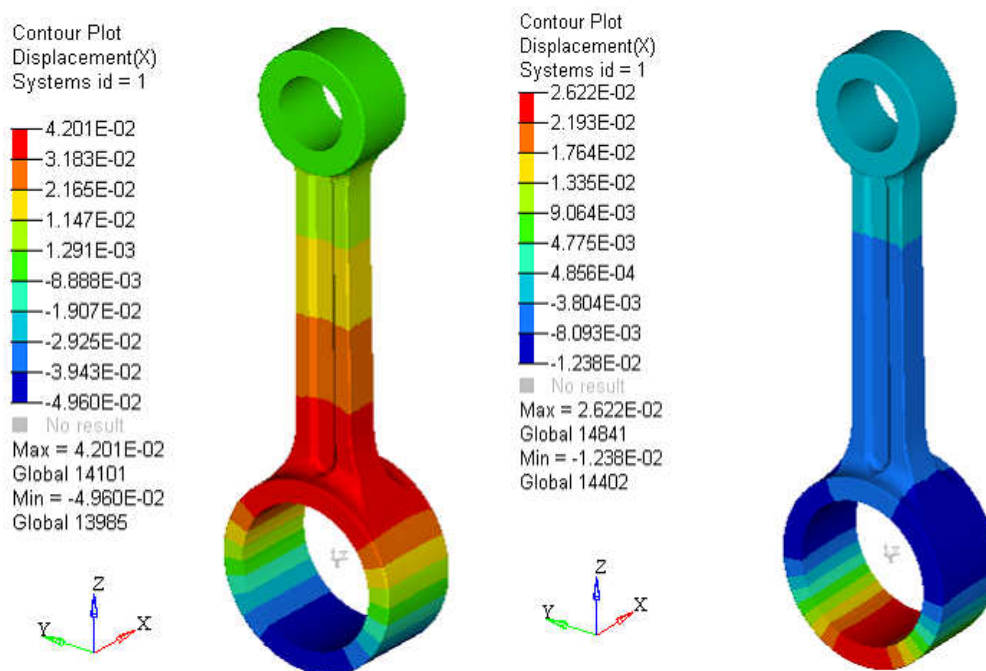


Figura 3.11. Ovalização da biela original – estabelecimento do critério de engenharia. Valores relativos ao sistema de coordenada cilíndrico definido na fig. 3.5.

A análise por meio da engenharia reversa permite a determinação dos parâmetros de ovalização da biela:

- 1) Máxima ovalização sob compressão em módulo = $4,2 \cdot 10^{-2}$ mm
- 2) Máxima ovalização sob tração em módulo = $2,6 \cdot 10^{-2}$ mm

3.2.4. Otimização topológica – pré-processamento, restrições e casos de otimização considerados

Pré-Processamento da Otimização:

O pré-processamento da Otimização é realizado com a ferramenta Altair HyperMesh[®], assim como nas análises estruturais anteriores. Esta etapa é rápida e

fácil de ser executada com o pré-processador, porém o engenheiro precisa dedicar-se para definir a formulação adequada para o problema e os parâmetros adicionais do *solver* de otimização Altair OptiStruct®.

É necessário o domínio do cartão DTPL – *Design Variable for Topology Optimization* (Variável de Projeto para Otimização Topológica), descritos nos arquivos de ajuda do programa para a correta configuração da otimização.

Neste trabalho as variáveis de projeto da otimização topológica são elementos sólidos. Para a obtenção do melhor desempenho da otimização é necessário a definição de parâmetros adicionais do *solver* por meio do cartão DOPTPRM (Parâmetros da Otimização Topológica). A tabela 3.2 descreve os parâmetros.

Tabela 3.2. Descrição dos parâmetros do cartão DOPTPRM do *solver* de otimização.

Parâmetro	Valor	Descrição
CHECKER	0 ou 1 Padrão = 0	Controla problema do tabuleiro de xadrez. Use 0 para desativar. Use 1 para ativar. Esta opção (1) leva a uma solução com muitos elementos intermediários. Uma possível solução para este problema é reiniciar (<i>restart</i> – tabela 3.3) a otimização (a partir da última) por mais 10-20 iterações com a opção desativa.
DISCRETE	Real ≥ 0 Padrão = 1.0	Parâmetro de discretização. Influencia a tendência dos elementos convergirem para densidade 0 ou 1. Valores maiores diminuem o número de densidades intermediárias. Para sólidos recomenda-se 3,0 (podendo chegar até 4,0).
DESMAX	Real > 0	Número máximo de iterações
OBJTOL	Real entre 0 e 1	Caso a função objetivo apresente por duas iterações consecutivas redução relativa inferior a OBJTOL a otimização finaliza.
MATINIT	Real entre 0 e 1	Define a fração de volume inicial. Quando massa é definida como função objetivo o valor padrão é 0,9. Caso contrário o valor é 0,6 ou o valor da restrição, caso esta seja imposta (por exemplo fração de volume no problema de minimização da flexibilidade).

Os parâmetros de execução do *solver*, chamados de I/O Options (Opções de Entrada e Saída) também são importantes de serem usados corretamente. A tabela 3.3 descreve os principais parâmetros de entrada e saída necessários para o uso da ferramenta, note que a cada execução o engenheiro deve decidir quais parâmetros utilizar.

Tabela 3.3. Descrição dos parâmetros de execução de entrada/saída do *solver* de otimização.

Parâmetro	Descrição
-optiskip	Pula a otimização, realizando apenas a análise de elementos finitos
-core in	Use este parâmetro para processamento alocado na memória RAM. Caso haja disponibilidade de memória esta opção aumenta significativamente a velocidade de processamento.
-nproc X	Defina o número X de processadores do computador para utilização de processamento paralelo. Isto irá aumentar a velocidade do processamento.
-restart "file.sh"	<p>Reinicia o problema "file.sh" a partir da última iteração da otimização do arquivo "file.fem". Esta opção é utilizada tanto para reiniciar a otimização devido a uma pausa não esperada (por exemplo falta de luz) e também para dar continuidade a um processo que atingiu o número máximo de iterações (veja parâmetro DESMAX na tabela 3.2) sem convergência.</p> <p>O uso da opção também é aconselhado para problemas de difícil convergência ou que apresentem muitas densidades intermediárias devido ao uso do parâmetro CHECKER (tabela 3.2). Neste caso pode-se adicionar restrições ao problema, ou remover a opção CHECKER e executar o programa a partir da última iteração já realizada. O uso da ajuda do programa para o entendimento deste parâmetro e suas limitações é fundamental para obtenção de sucesso em seu uso.</p>

Definição das restrições:

A restrição de ovalização é definida para apenas alguns nós da superfície do olhal, de forma a reduzir o número total de restrições do problema e facilitar seu processamento e convergência. A figura 3.12 ilustra os nós nos quais a restrição de ovalização é aplicada.

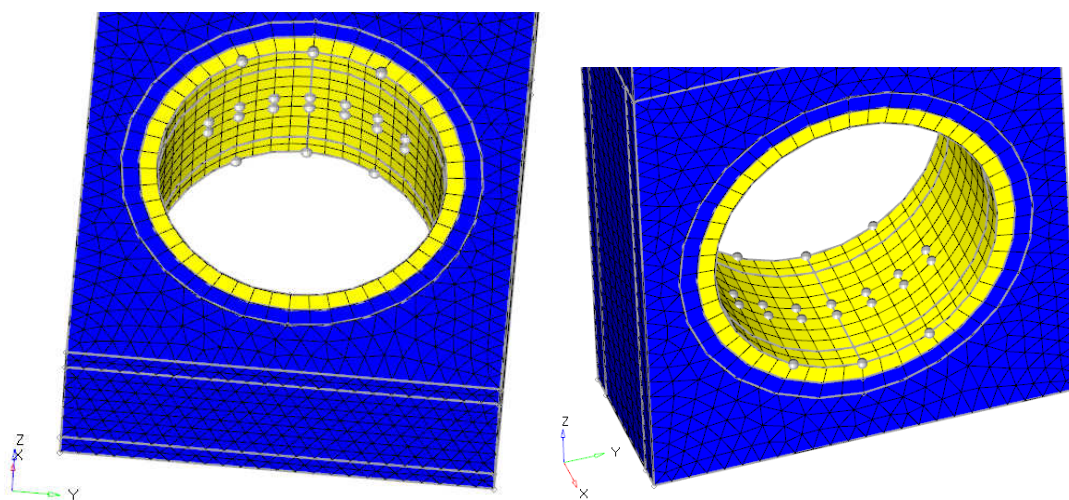


Figura 3.12. Restrições nodais de deslocamento para restrição de ovalização sob compressão (esquerda) e sob tração (direita).

A restrição de tamanho mínimo de membro (*mimmember size*) deve ser utilizada apenas em casos nos quais a solução da otimização leva a resultados com grande número de membros de tamanho indesejado. Ou seja, a otimização deve ser realizada primeiramente sem este controle. No caso de aplicação de restrições de manufatura o parâmetro *mimmember size* é obrigatório e sempre maior ou igual a 3,0 vezes o tamanho médio dos elementos do domínio (caso não seja definido pelo usuário ou definido com valor inferior a 3,0 o otimizador define automaticamente este parâmetro para 3,0). A figura 3.13 apresenta o efeito deste controle na solução da otimização topológica.

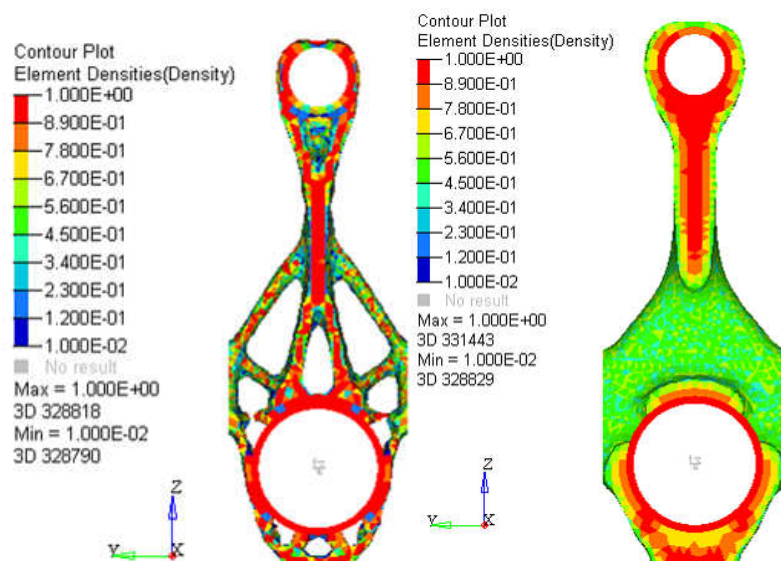


Figura 3.13. Exemplo do efeito da restrição de *mimmember size* na solução de otimização topológica. Caso sem restrição (esquerda). Caso com restrição – *mimmember size* = 8 (direita).

A restrição de manufatura de forjamento é aplicada por meio da definição da restrição de manufatura de desmoldagem com divisão da ferramenta (opção *DRAW 1-SPLIT* - HyperMesh[®]). A figura 3.14 ilustra as duas direções de desmoldagem consideradas.

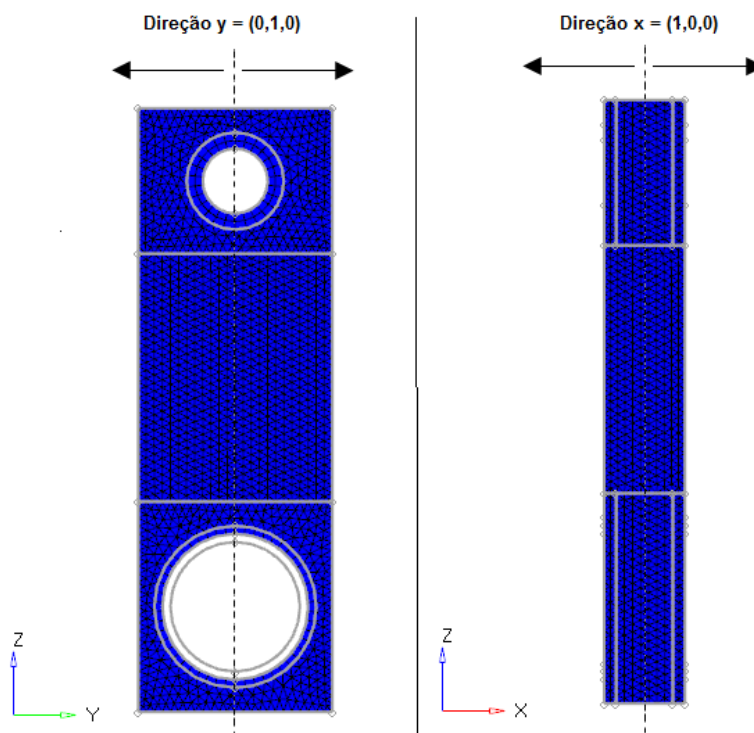


Figura 3.14. Definição das direções de forjamento possíveis para manufatura do componente.

Formulações implementadas do problema de otimização:

Para definir a formulação do problema de otimização topológica é necessário uma análise dos requisitos mecânicos e de manufatura da biela. Primeiramente, a tensão de von Mises não deve exceder o limite de escoamento do material, considerando um coeficiente de segurança (CS) de 1.6 (Sonsino e Esper, 1994). Em segundo lugar, a deflexão entre os olhais e a ovalização dos mesmos deve ser suficientemente pequena para garantir a operação do motor o que significa que uma maior rigidez do componente é desejável. Finalmente, restrição de desmoldagem nas direções y ou x pode ser utilizada caso deseje-se uma solução que seja manufaturável com os métodos utilizados atualmente pela indústria, como forjamento e sinterização.

A definição do problema de otimização é de suma importância para a garantia de qualidade do projeto final do componente. Desta forma, diversas formulações foram avaliadas para análise e comparação dos resultados a fim de obter a melhor formulação para o problema. A tabela 3.4 apresenta os casos considerados.

Tabela 3.4. Casos de Otimização implementados e avaliado.

CASO	Sub-caso	Objetivo	Restrições de desempenho mecânico			Restrição Manufatura		Peso do Carregamento	
			Tensão (MPa)	Ovalização (mm)		Mim. member Size	Forjamento	Compressão	Tração
				Compressão	Tração				
1	a	Mín Vol	< 330	Não	Não	Não	Não	1.0	1.0
1	b	Mín Vol	< 330	< $4,2 \cdot 10^{-2}$	< $2,6 \cdot 10^{-2}$	Não	Não	1.0	1.0
1	c	Mín Vol	< 330	< $4,2 \cdot 10^{-2}$	< $2,6 \cdot 10^{-2}$	Sim (auto = 3)	Sim = (1,0,0)	1.0	1.0
1	d	Mín Vol	< 330	< $4,2 \cdot 10^{-2}$	< $2,6 \cdot 10^{-2}$		Sim = (0,1,0)		
2	a1	Mín Flexibilidade	Não	Não	Não	Não	Não	1.0	1.0
2	a2	Mín Flexibilidade	Vol Frac < 0.15	Não	Não	Não	Não	1.0	3.0

4. RESULTADOS

4.1. Resultados dos casos de otimização

Nesta seção os resultados de cada caso de otimização são apresentados e analisados, visando a definição da melhor formulação do problema de otimização para o projeto da biela.

Caso 1.a: (vide tabela 3.4)

Objetivo: Minimizar Volume

Restrições: Tensão de *von Mises* $< \frac{\sigma_e}{cS}$

Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio

Este caso foi adotado para avaliar a necessidade de adicionar restrições de ovalização ao problema de otimização. Trata-se de uma formulação tradicional de problemas de otimização. A figura 4.1 ilustra o resultado das densidades dos elementos ao final da última iteração.

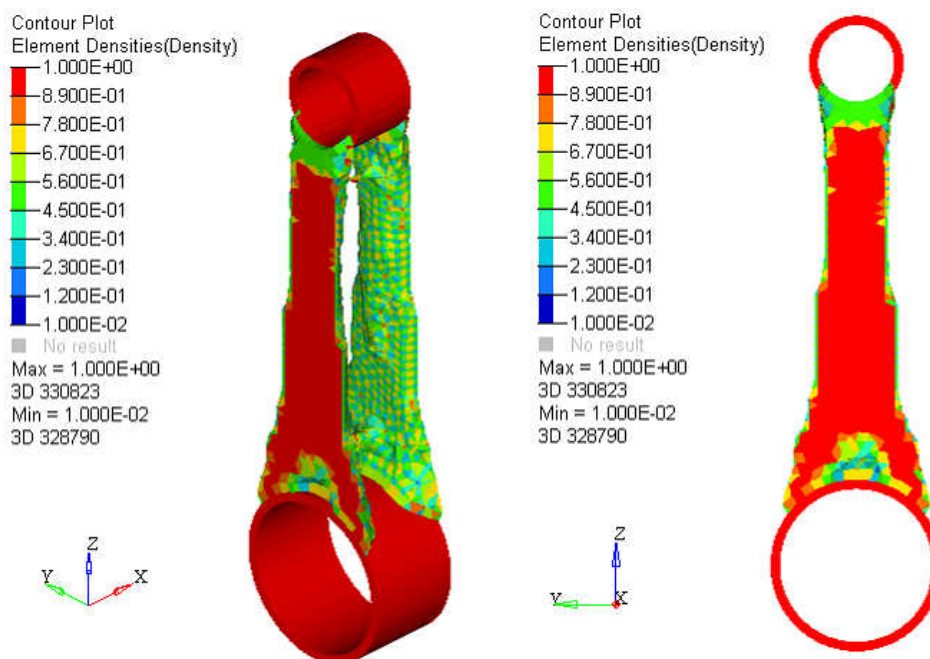


Figura 4.1. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.a.

Para a avaliação do critério de engenharia de ovalização do olhal maior da solução é feita a análise estrutural para ambos os carregamentos (de acordo com o Modelo 2 – figura 3.8). A figura 4.2 apresenta o resultado da análise estrutural considerando as densidades da solução da otimização na última iteração. Ou seja, a imagem tem a geometria do domínio, mas cada elemento tem a densidade da solução da otimização, valor entre 0 e 1. Isto se deve ao fato de que o pós-processamento de tensões e deslocamentos não pode ser feito sobre a imagem da figura 4.1.

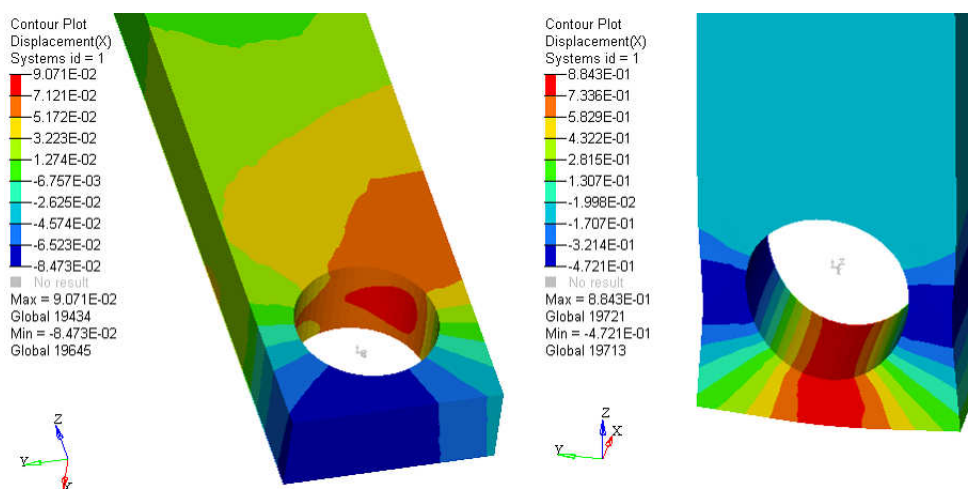


Figura 4.2. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.a – Compressão (esquerda) e tração (direita).

A análise do resultado leva à verificação de que para a adequada formulação do problema é necessário a introdução de restrições de ovalização, já que para o caso 1.a o critério de máxima ovalização do olhal maior não é atendido. A tabela 4.1 – Consolidação dos Resultados e Respostas - apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

Caso 1.b: (vide tabela 3.4)

Objetivo: Minimizar Volume

Restrições: Tensão de *von Mises* $< \frac{\sigma_e}{CS}$

Ovalização $<$ ovalização da biela de referência (seção 3.2.4)

Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio

A verificação de que a formulação do caso 1.a não resulta no respeito de todos os critérios de engenharia faz necessária a adição de restrição de ovalização do olhal maior, conforme descrito na seção 3.2.4. A figura 4.3 ilustra o resultado das densidades dos elementos ao final da última iteração. A tabela 4.1 apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

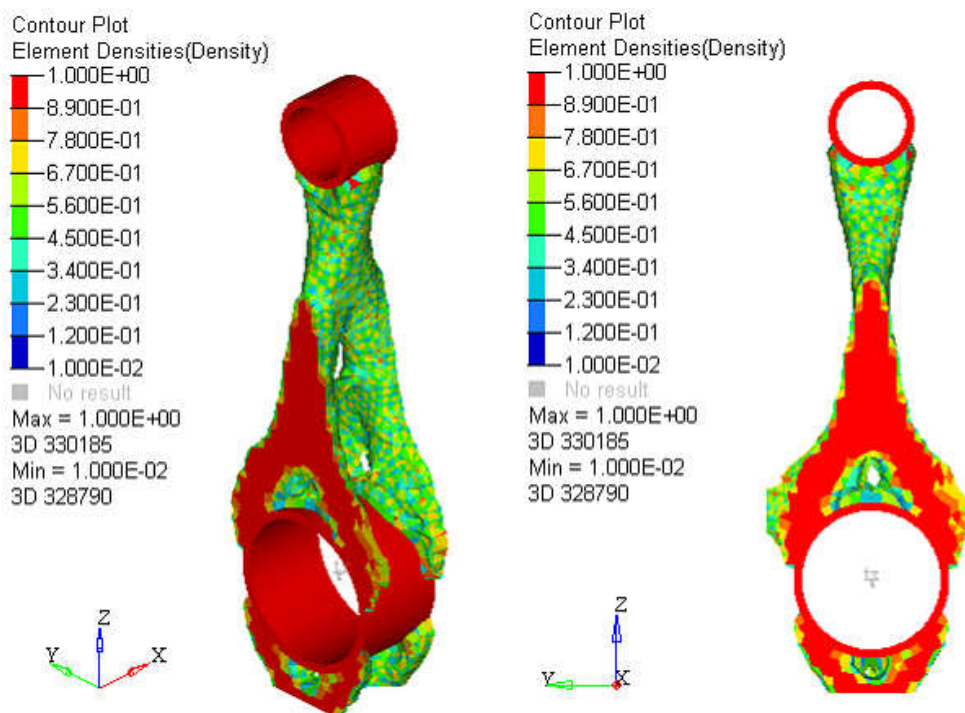


Figura 4.3. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.b.

Para a avaliação do critério de engenharia de ovalização do olhal maior da solução é feita a análise estrutural para ambos os carregamentos (de acordo com o Modelo 2 – figura 3.8). A figura 4.4 apresenta o resultado da análise estrutural considerando as densidades da solução da otimização na última iteração.

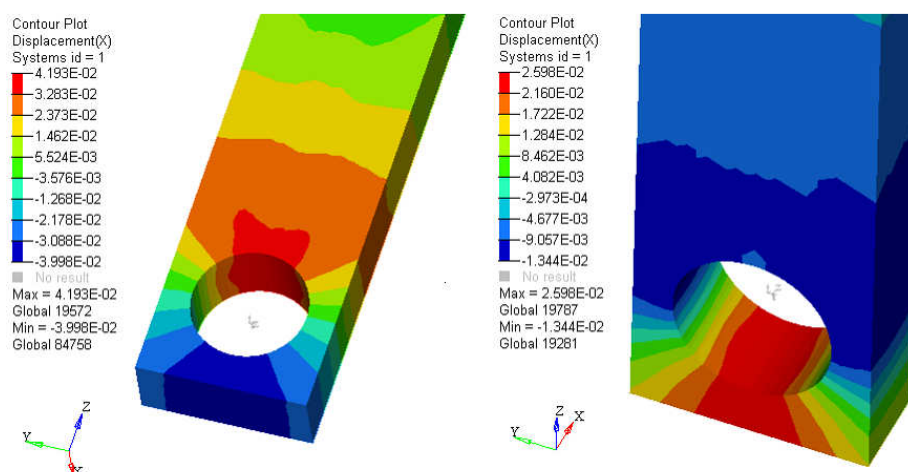


Figura 4.4. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.b – Compressão (esquerda) e tração (direita).

A análise do resultado leva à verificação de que a formulação 1.b é adequada para o projeto do componente já que os critérios de engenharia são atendidos. A tabela 4.1 apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

Caso 1.c: (vide tabela 3.4)

Objetivo: Minimizar Volume

Restrições: Tensão de *von Mises* $< \frac{\sigma_e}{CS}$

Ovalização $<$ ovalização da biela de referência - (seção 3.2.4)

Manufatura: forjamento na direção $x=(1,0,0)$ – (seção 3.2.4)

Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio

A solução obtida no caso 1.b atende aos critérios de engenharia, porém a solução é de difícil manufatura (considerando uma posição conservadora da engenharia de processos). Desta forma é introduzida uma restrição de forjamento na direção $x=(1,0,0)$, conforme descrito na seção 3.2.4. A figura 4.5 ilustra o resultado das densidades dos elementos ao final da última iteração. A tabela 4.1 apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

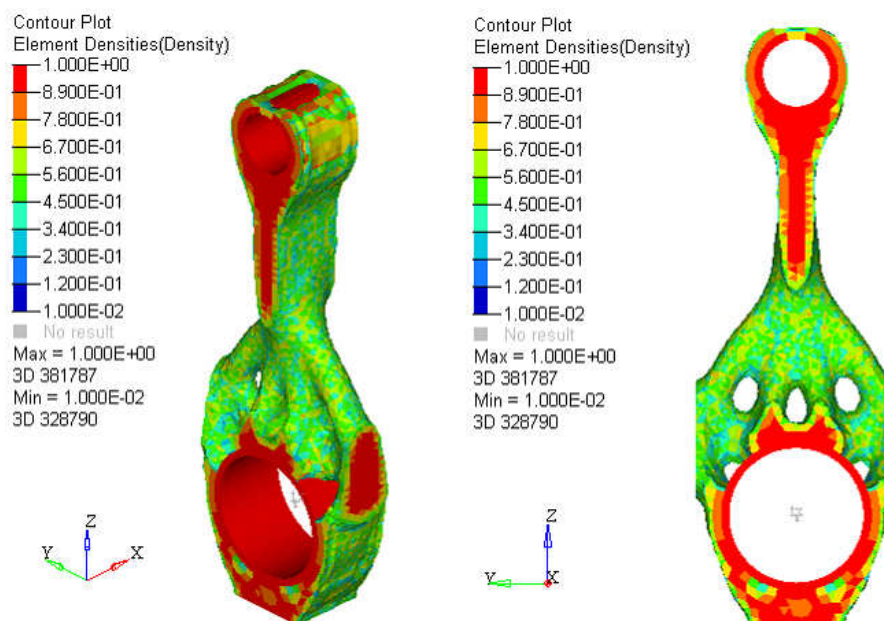


Figura 4.5. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.c.

Para a avaliação dos critérios de engenharia de ovalização do olhal maior da solução é feita a análise estrutural para ambos os carregamentos (de acordo com o Modelo 2 – figura 3.8). A figura 4.6 apresenta o resultado da análise estrutural considerando as densidades da solução da otimização na última iteração.

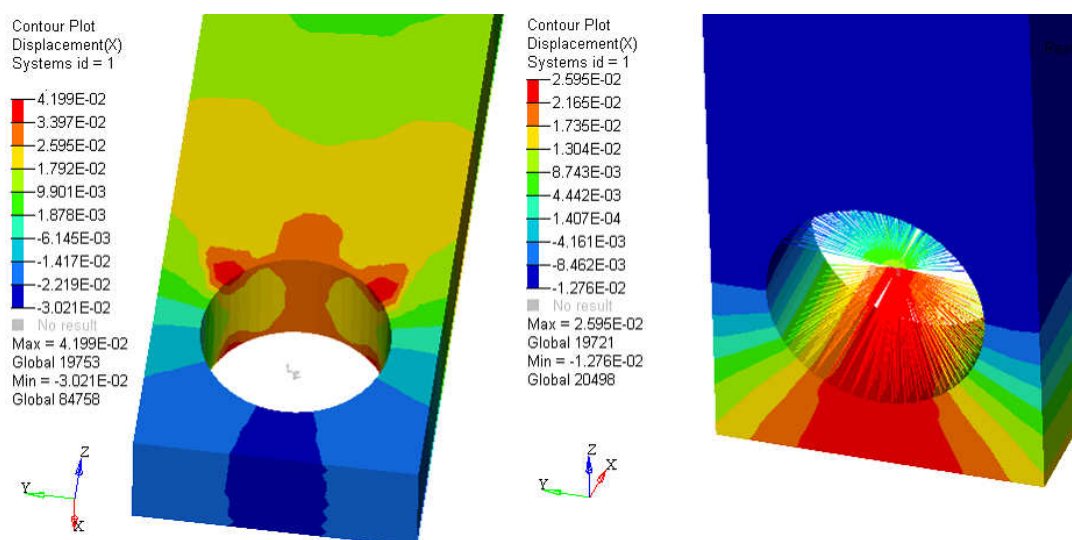


Figura 4.6. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.c – Compressão (esquerda) e tração (direita).

A análise do resultado leva à verificação de que a formulação 1.c é adequada para o projeto do componente já que os critérios de engenharia são atendidos.

Caso 1.d: (vide tabela 3.4)

Objetivo: Minimizar Volume

Restrições: Tensão de *von Mises* $< \frac{\sigma_e}{cS}$

Ovalização $<$ ovalização da biela de referência - (seção 3.2.4)

Manufatura: forjamento na direção $y=(0,1,0)$ – (seção 3.2.4)

Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio

A solução do caso 1.c com restrição de forjamento em x leva a uma solução distante, do ponto de vista da minimização do volume, da solução que é a obtida no caso 1.b. Desta forma, neste caso a direção de forjamento é alterada para $y=(0,1,0)$ (veja seção 3.2.4) e os olhais passam a ser manufaturados em uma etapa posterior de usinagem. A figura 4.7 ilustra o resultado das densidades dos elementos ao final da última iteração. A tabela 4.1 apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

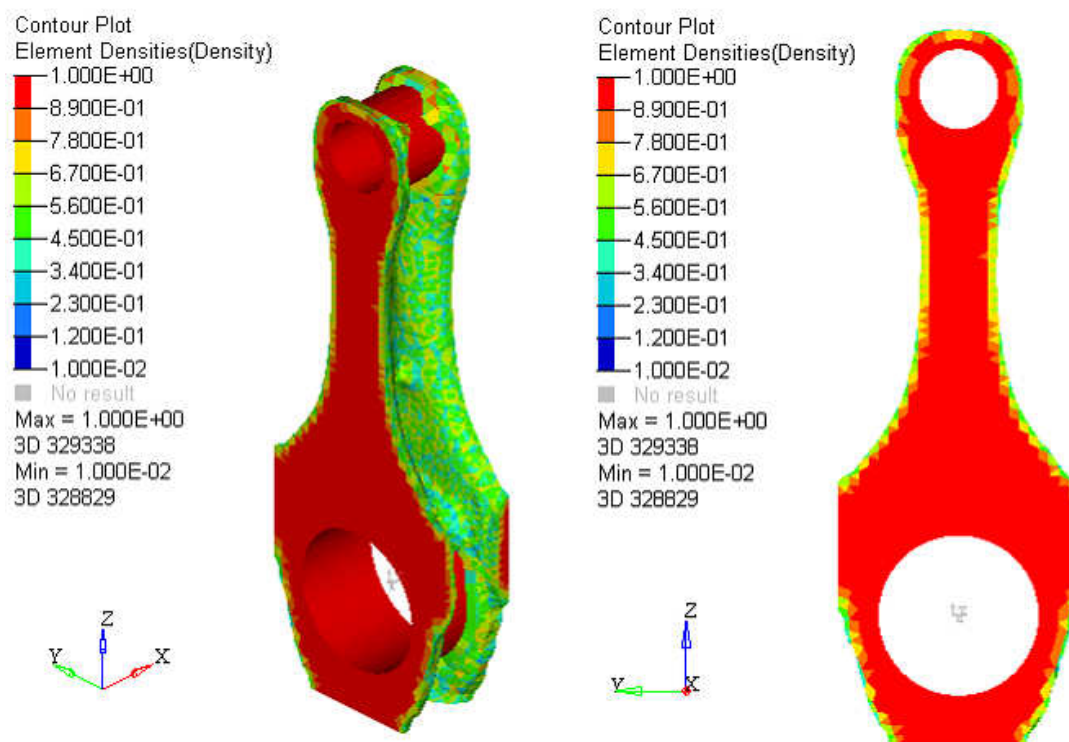


Figura 4.7. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.d.

Para a avaliação dos critérios de engenharia de ovalização do olhal maior da solução é feita a análise estrutural para ambos os carregamentos (de acordo com o Modelo 2 – figura 3.8). A figura 4.8 apresenta o resultado da análise estrutural considerando as densidades da solução da otimização na última iteração.

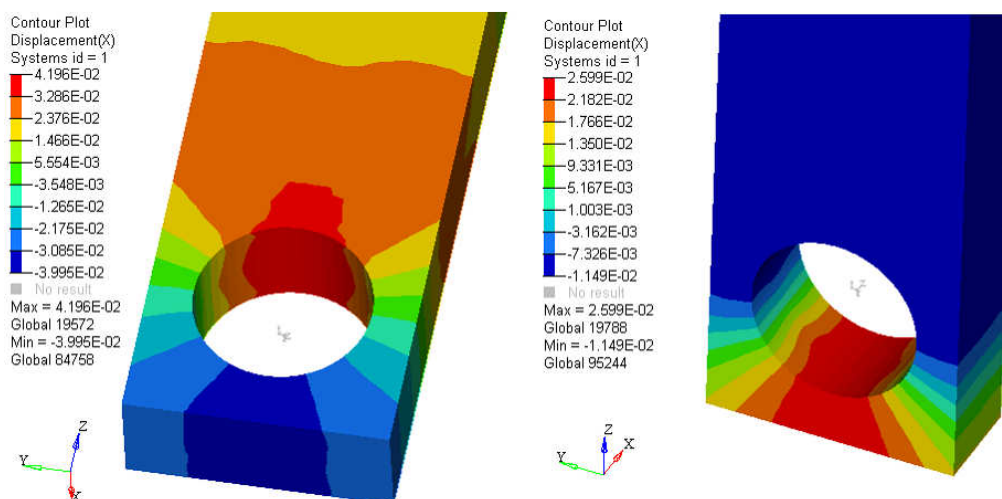


Figura 4.8. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.d – Compressão (esquerda) e tração (direita).

A análise do resultado leva à verificação de que a formulação 1.d é adequada para o projeto do componente já que os critérios de engenharia são atendidos.

Caso 2 – a1 e a2: (vide tabela 3.4)

Objetivo: Minimizar Flexibilidade (ou seja, maximizar a rigidez)

Restrições: Fração do volume $< 15\%$ (Volume final / Volume inicial do domínio)

Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio

a1 – Peso compressão = 1 / Tração = 1

a2 – Peso compressão = 1 / Tração = 3

Esta formulação é adotada para avaliar a viabilidade de utilizá-la para o projeto de biela. O problema de otimização com flexibilidade como função objetivo é um problema convexo (possui mínimo global) e possui solução analítica de sua minimização, fatores que tornam esta formulação robusta e eficiente. Porém, no caso

do programa Altair OptiStruct® a introdução de restrições adicionais de deslocamento não é possível para a formulação de minimização da flexibilidade. Desta forma, não é possível introduzir a restrição de ovalização ao problema.

A solução proposta para esta limitação é alterar os pesos dos carregamentos no cálculo da flexibilidade ponderada pelos pesos, pois a diferença de uma ordem de grandeza no carregamento de compressão em relação ao carregamento de tração faz com que o aumento da rigidez para carregamento de compressão prevaleça na solução final.

As figuras 4.9 (a) e 4.9 (b) apresentam os resultados obtidos para diferentes pesos utilizados no caso 2. A tabela 4.1 apresenta o resultado global da otimização (massa, flexibilidade e atendimento dos critérios de engenharia).

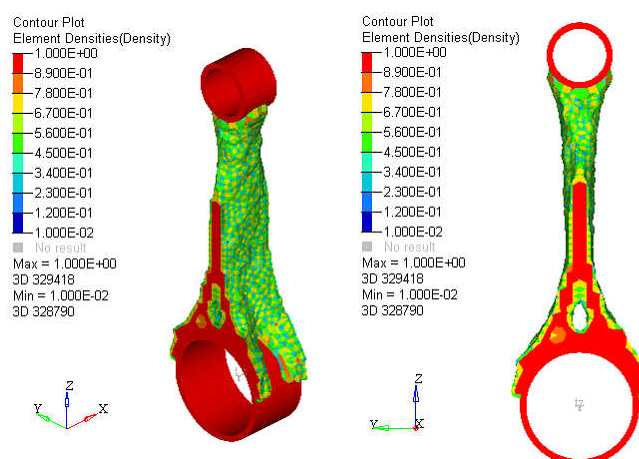


Figura 4.9. (a) Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 2.a.1

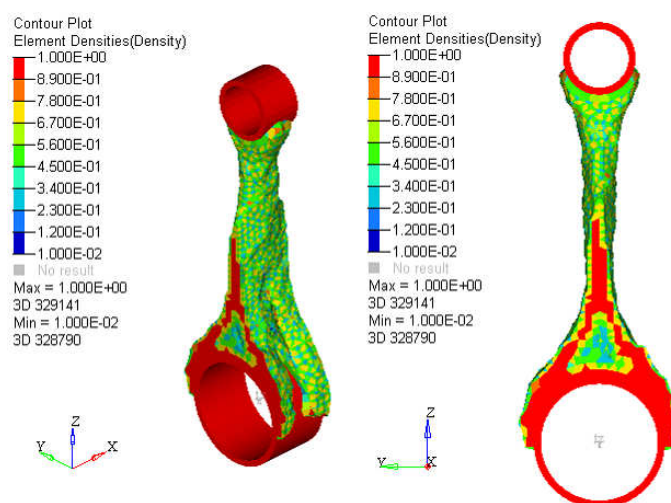


Figura 4.9. (b) Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 2.a.2.

A análise da solução (Fig. 4.9) mostra o efeito da alteração dos pesos na solução da otimização. Nota-se que no caso 2.a3 o material passou a envolver um setor maior do olhal maior, em relação ao caso 2.a1. Porém, isto não é suficiente, neste caso, para atender os critérios de engenharia de ovalização que são violados no caso de carregamento de tração.

Consolidação e Análise dos Resultados

A tabela 4.1 apresenta a consolidação dos resultados das diferentes formulações implementadas.

Tabela 4.1. Consolidação dos Resultados e Respostas.

CASO	Sub-caso	Objetivo	Respostas			
			Massa (g)	Flexibilidade - Compressão	Flexibilidade - Tração	Crítérios de Engenharia violados
1	a	Mín Vol	16,9	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^2$	Elongamento / Ovalização
1	b	Mín Vol	24,3	$9,99 \cdot 10^1$	9,46	Nenhum
1	c	Mín Vol	32,7	$1,05 \cdot 10^{-2}$	9,79	Nenhum
1	d	Mín Vol	26,5	$9,98 \cdot 10^1$	9,84	Nenhum
2	a1	Mín Flexibilidade	23,14	$1,02 \cdot 10^2$	$8,36 \cdot 10^1$	Ovalização sob tração
2	a2	Mín Flexibilidade	23,14	$1,17 \cdot 10^2$	$5,8 \cdot 10^2$	Ovalização sob tração

A análise da tabela 4.1 permite concluir que a formulação mais adequada para o projeto de biela e a minimização de sua massa é a do caso 1.b, pois atende a todos os critérios de engenharia e entre as que atende é a que possui menor massa. A análise dos resultados permite avaliar o efeito da introdução de restrições de manufatura na solução ótima (comparando casos 1.b, 1.c e 1.d), e desta forma conclui-se que é necessário que a engenharia de manufatura também se esforce para a fabricação de geometrias cada vez mais complexas.

A análise do caso 2 permite avaliar o efeito dos pesos de ponderação na solução. Note que quanto maior o peso de compressão (caso 2.a3) menor a flexibilidade sob tração e maior a flexibilidade sob compressão. Nota-se também que a não introdução de restrições de ovalização (casos 2) leva a uma solução menos rígida do que quando a restrição é aplicada (casos 1).

4.2. Interpretação e validação do projeto final

A otimização considerada para o projeto da biela é a solução do caso 1.b, conforme descrito no item 4.1. A Figura 4.10 apresenta a imagem da solução do caso 1.b. O Anexo A apresenta o histórico e parâmetros de todo o processo de otimização executado pelo programa Altair OptiStruct[®] para a solução do caso 1.b.

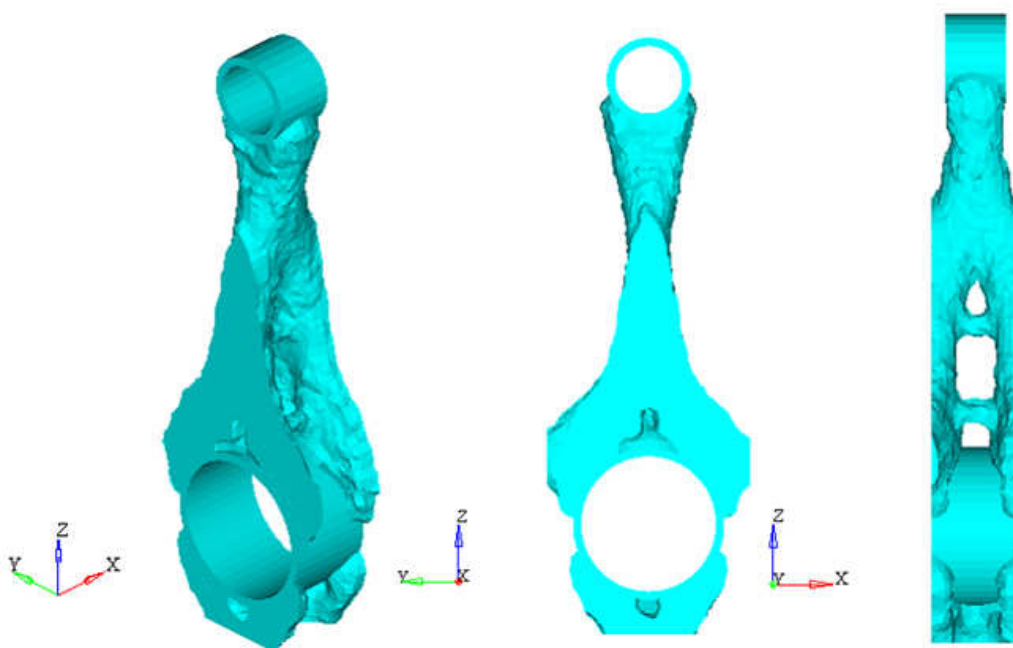


Figura 4.10. Imagem do resultado da otimização da biela (caso 1.b).

A partir do resultado apresentado na Fig. 4.10 é realizada a documentação da solução em desenho CAD 3D, utilizando o software UG NX5. A figura 4.11 ilustra o modelo final do projeto da biela.

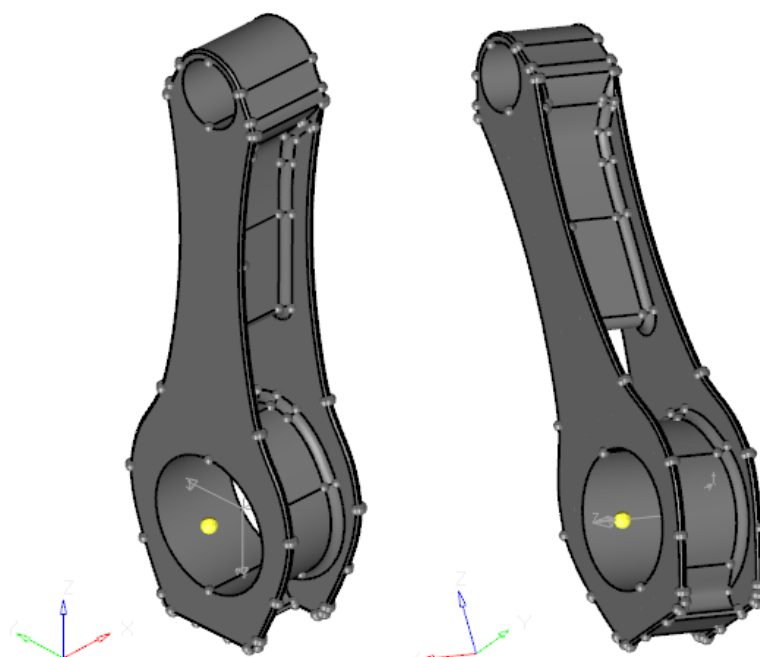


Figura 4.11. Projeto final da biela em CAD 3D.

Conforme descrito na metodologia do projeto (item 3.1) é necessário a realização de uma análise estrutural do projeto final para validação do projeto. O modelo de elementos finitos é o mesmo que o descrito na seção 3.2.1 (com alteração da geometria) e pode ser visualizado na Fig. 3.8. A figura 4.12 apresenta o resultado da análise estrutural realizada.

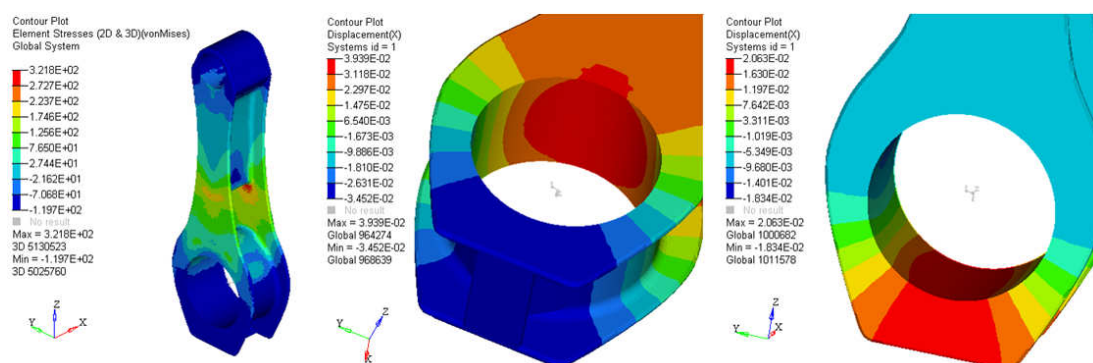


Figura 4.12. Validação do projeto final da biela. Tensão máxima de von Mises (esquerda), ovalização sob compressão (centro) e ovalização sob tração (direita).

A análise do resultado da simulação ilustrada na Fig. 4.12 permite verificar que o modelo atende os critérios de engenharia determinados no projeto. A tabela 4.2 apresenta o comparativo entre a nova biela e a biela original do motor.

Tabela 4.2. Resumo do desempenho da biela e comparação com o componente original

Restrição (MPa e mm)	Massa (g)	Varição⁽¹⁾ da massa	Tensão (MPa)	Ovalização
Tensão ⁽²⁾ \leq 330 Ovalização < Biela referência	23.6	0%	330	Respeitada

(1) Em relação a massa da biela de referência de 23,5 g

(2) Tensão de von Mises

5. CONCLUSÕES

A metodologia global do projeto mostra-se adequada para o desenvolvimento de componentes de motor a combustão interna. O processo de engenharia reversa possibilitou a determinação dos parâmetros de desempenho e dos carregamentos atuantes. A adoção de simulação computacional do desempenho termodinâmico do motor e a conseqüente determinação de sua curva de pressão para a condição de máximo torque é fundamental para o desenvolvimento do componente.

As condições de carregamento consideradas (tração e compressão) são as típicas para motores de baixo desempenho. A futura aplicação de carregamentos mais complexos considerando as forças inerciais da árvore de potência pode levar a resultados melhores para a biela do motor, dado que a máxima rotação do mesmo é de 8000 rpm. No caso sugere-se a realização de um procedimento iterativo no qual ao final da otimização o carregamento inercial é recalculado e caso haja alteração significativa a otimização é realizada novamente até a variação do carregamento for menor que o fator de convergência estabelecido.

O modelo de elementos finitos utilizado e a respectiva modelagem das condições de contorno se mostraram adequados para o projeto. O modelo é computacionalmente barato e fiel ao comportamento físico esperado do componente. O ponto negativo do modelo é que ele não considera a interação entre a biela e os pinos. Para tanto é necessário a implementação de contato entre pino e olhais, de forma a tornar o problema não-linear e aumentar significativamente o custo computacional e a complexidade do problema de otimização e sua convergência.

Note que neste projeto a limitação encontrada não está no otimizador Altair OptiStruct[®], mas sim no programa de elementos finitos RADIOSS[®]. Como o programa Altair OptiStruct[®] não permite o uso de outros *solvers*, uma alternativa é o uso do programa FE-Design Tosca[®] como otimizador e o programa Abaqus[®] como *solver* de elementos finitos.

Investigando diversas formulações do problema de otimização topológica é possível avaliar que a aplicação da restrição de ovalização do olhal não necessita ser aplicada a toda a superfície do mesmo, de forma a reduzir o número de restrições e reduzir a complexidade do problema de otimização. Neste trabalho foram

considerados os critérios de ovalização e de tensão de von Mises. Porém, mostra-se necessário a consideração da vida à fadiga do componente. Para tanto futuros trabalhos devem abordar a introdução de restrições de fadiga na otimização. Além disto, dado o elevado carregamento de compressão da biela a carga crítica de flambagem do componente deve ser verificada, dado que não é possível introduzir esta restrição no problema de otimização. Futuramente o projeto final para manufatura deve considerar estes dois critérios adicionais.

A adoção cada vez mais comum na indústria de restrições de manufatura ao aplicar a otimização topológica deve ser avaliada de maneira mais profunda entre engenharia do produto e engenharia de manufatura. A comparação entre os casos 1.c e 1.d comprova o custo da restrição já que a função objetivo aumentou em 74% entre o caso 1.d (com restrição de forjamento) e o caso 1.b (sem restrição). Isso comprova a necessidade de avanços na manufatura para a fabricação de geometrias cada vez mais complexas. Esta é uma condição fundamental para avanços significativos no desempenho dinâmico e aumento da eficiência mecânica dos motores por meio da redução da massa do componente.

A formulação do problema de otimização denominada neste trabalho de Caso 1.b se mostrou robusta e adequada para o projeto do componente. Os parâmetros de tensão máxima de von Mises, ovalização do olhal maior da biela sob compressão e sob tração são atendidos sem penalização do valor da função objetivo quando comparada a outros casos.

A transferência do resultado da otimização topológica para o CAD ainda é um grande desafio. Mesmo com a introdução de ferramentas de exportação da geometria esta tarefa ainda é custosa do ponto de vista de horas-homem necessárias para a documentação adequada do resultado. Em geral a interação entre os softwares utilizados ao longo do projeto (descritos na metodologia geral do trabalho) consiste em um grande desafio para os engenheiros de projeto e simulação.

Por final, a conversão do motor para etanol possibilitou melhorias no processo de combustão que elevaram o carregamento atuante em 40%. A aplicação de otimização topológica para o projeto da nova biela possibilitou a manutenção dos parâmetros de desempenho do componente mantendo a massa da biela original, de forma a aumentar a eficiência mecânica do motor.

REFERÊNCIAS

Basshuysen, Richard; Schäfer, Fred van; **Internal Combustion Engine Handbook**. SAE International, Warrendale, 2004.

Bendsoe, M. B. **Topology Optimization**, Theory, Methods and Applications, Springer, Berlim, 2003.

Heywood, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, New York, 1988.

MESKE, Ralf; FE-design Engineers; Ford Engineers. **Topology and Shape Optimization of Components and Systems with Contact Boundary Conditions**. NAFEMS Seminar, 2002.

Moaveni, Saeed, **Finite Element Analysis**. Theory and application with ANSYS, Prentice-Hall, New Jersey, 1999.

Pravardhan, S. Shenoy; Ali, Fatemi; **Connecting Rod Optimization for Weight and Cost Reduction**. SAE International Congress 2005.

Santos, Guilherme Vinícius França; Silva, Emílio Carlos Nelli. **Projeto de um Pistão para Motor a Combustão Interna utilizando o Método da Otimização Topológica**. Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2009.

Santos, Gustavo Rocha da Silva; Silva, Emílio Carlos Nelli. **Projeto de Virabrequim utilizando o Método da Otimização Topológica**. Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2009.

Sonsino, C. M. and Esper, F. J., **Fatigue Design for PM Components**. European Powder Metallurgy Association (EPMA), 1994.

Webster, W. D., Coffell R., and Alfaro D., **A Three Dimensional Finite Element Analysis of a High Speed Diesel. Engine Connecting Rod,**” SAE Technical Paper Series, Paper No. 831322, 1983.

Altair HyperWorks® 10.0 User’s Manual.

GLOSSÁRIO

Cartão - Tabela, formatação, organização de parâmetros de um grupo que compõe um arquivo de entrada de um *solver*.

Olhal maior - Mancal, furo da biela no qual o virabrequim é montado

Olhal menor - Mancal, furo da biela no qual o pistão é montado

Solver - Executável, programa de computador que resolve um problema numérico

ANEXO A – Arquivo de registro (extensão *.out) do processo de otimização topológica da biela projetada – caso 1.b.

```

*****
**
**
**      OptiStruct 10.0
**
**      Design and Optimization Software
**      from Altair Engineering, Inc.
**
**
**      Windows XP Professional x64 Edition SP1 (Build 3790) TKUSP02
**      4 CPU: Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q6600 @ 2.40GHz
**      CPU speed 2400 MHz
**      6106 MB RAM, 9792 MB swap
**
**      Build tag: 0466934_5533000_Ce64BW842M-000 20006000
*****
**      COPYRIGHT (C) 1996-2009      Altair Engineering, Inc.
**      All Rights Reserved. Copyright notice does not imply publication.
**      Contains trade secrets of Altair Engineering, Inc.
**      Decompilation or disassembly of this software strictly prohibited.
*****

*** OptiStruct defaults set from:
    install config file: E:\Altairwin64\hw10.0\hwsolvers/hwsolver.cfg

*** WARNING # 1848
Topology Optimization without Minimum Member Size Control activated.
Use DTPL card, or DOPTRM,MINDIM is recommended.

NOTE # 1847
AUTOMATIC SCREENING is activated.
Use "DSCREEN,AUTO,OFF" to turn off this effect.

*****

OPTIMIZATION FILE AND PARAMETER INFORMATION :
-----

Optimization parameters from : F:/Work/TF 2Semestre/TF_biela_final/biela_opt_caso_1b.fem
FEM model file      : F:/Work/TF 2Semestre/TF_biela_final/biela_opt_caso_1b.fem
Output files prefix : F:/Work/TF 2Semestre/TF_biela_final/biela_opt_caso_1b

*****
*****

```

FINITE ELEMENT MODEL DATA INFORMATION :

 Total # of Grids (Structural) : 16876
 Total # of Elements : 73983
 Total # of Rigid Elements : 2
 Total # of Rigid Element Constraints : 12
 Total # of Local Coordinate Systems : 1
 Total # of Degrees of Freedom : 50628
 Total # of Non-zero Stiffness Terms : 1147155

Element Type Information

 CHEXA Elements : 1672
 CTETRA Elements : 72311

Load and Boundary Information

 FORCE Sets : 2
 SPC Sets : 2

Material and Property Information

 PSOLID Cards : 2
 MAT1 Cards : 2

OPTIMIZATION PROBLEM PARAMETERS :

 Objective Function : Minimize Volume

 Response Summary :

 Number of volume responses : 1
 Number of displacement responses : 42

 Static Subcase Summary :

 Subcase ID SPC ID FORCE ID

 3 2 4

4 1 3

 Design Parameters Summary :

Total # of topology design elements : 73251
 Total # of topology cards : 1

Total Volume of Design Material : 1.4672E+04
 Total Mass of Design Material : 1.1591E-04
 Volume of Non-Design Material : 7.2869E+02
 Mass of Non-Design Material : 5.7567E-06

Solid Design Elements : PSOLID

 2

 Optimization Parameters Summary :

Initial Material Fraction [0,1] : 0.9000
 Minimum Element Volume Fraction : 0.0100
 Discreteness Parameter : 3.0000

Topology Optimization Method : Density Method
 Maximum Number of Iterations : 30

Convergence Tolerance : 5.0000E-03
 Step Size (Topology) : 0.5000

Checkerboard Control : On (1 - Global Averaging)

Run Type : Topology Optimization

 Topology Optimization Summary :

DTPL ID	Minimum Member Size	Maximum Member Size	Pattern Repet.	Pattern Grouping	Draw Direction Constraints	Extrusion Constraints
2	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE

Restart from previous solution : No
 Scratch file directory : ./
 Free space: 444393 MB
 Number of CPU processors : 4

MEMORY ESTIMATION INFORMATION :

Solver Type is: Sparse-Matrix Solver

Direct Method

Current Memory (RAM) : 269 MB

Estimated Minimum Memory (RAM) for Out of Core Solution : 209 MB

Recommended Memory (RAM) for Out of Core Solution : 209 MB

Recommended Memory (RAM) for In-Core Solution : 269 MB

(Note: The Minimum Memory Requirement is limited by Optimization Module.)

DISK SPACE ESTIMATION INFORMATION :

Estimated Disk Space for Output Data Files : 107 MB

Estimated Scratch Disk Space for In-Core Solution : 607 MB

Estimated Scratch Disk Space for Out of Core Solution : 886 MB

BEGINNING OPTIMIZATION SOLUTION

OPTIMIZATION HISTORY INFORMATION :

ITERATION 0

Element # 326495, element type TETRA.

WARNING - Outside of recommended range: Edge Angle = 77.343

upper limit = 75.000

Element # 373959, element type TETRA.

WARNING - Outside of recommended range: Edge Angle = 76.533

upper limit = 75.000

Element Quality Check Summary

Total # of elements that exceeded recommended range (warning) = 2

Recommended range violations:

Element Property # of Recommended Range Max. Viol. Elem.
Viol. Lower Upper Value type No.

TETRA Edge Angle 2 -- 75.00 77.34 U 326495

(Scratch disk space usage for starting iteration = 463 MB)

(Running in-core solution)

Objective Function (Minimize VOLUM) = 1.39337E+04

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 9.00000E-01 Mass = 1.10076E-04

Subcase Compliance
 3 2.052587E+01
 4 1.764265E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase /RANDPS	Grid/Element/	DOF/Comp	Response Value	Objective Reference	Viol. %
User-ID		+Frqncy MID/PID/	/Reg	Comp	Constraint		
		Mode No.		Bound			
3	VOLUM Vol	-- --	TOTL	1.393E+04	MIN		
Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization							inactive

ITERATION 1

Objective Function (Minimize VOLUM) = 1.13479E+04 % change = -18.56
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 7.23763E-01 Mass = 8.96485E-05

Subcase Compliance
 3 3.301407E+01
 4 3.064085E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase /RANDPS	Grid/Element/	DOF/Comp	Response Value	Objective Reference	Viol. %
User-ID		+Frqncy MID/PID/	/Reg	Comp	Constraint		
		Mode No.		Bound			
3	VOLUM Vol	-- --	TOTL	1.135E+04	MIN		
Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization							inactive

ITERATION 2

Objective Function (Minimize VOLUM) = 9.21888E+03 % change = -18.76
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 5.78657E-01 Mass = 7.28292E-05

Subcase Compliance
 3 4.942895E+01
 4 4.245246E+00

RETAINED RESPONSES TABLE


```

-----
Response Type Response Subcase Grid/ DOF/ Response Objective Viol.
User-ID Label /RANDPS Element/ Comp Value Reference/ %
+Frqncy MID/PID/ /Reg Constraint
Mode No. Bound

```

```

-----
3 VOLUM Vol -- -- TOTL 9.219E+03 MIN
-----

```

```

-----
Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive
-----

```

ITERATION 3

```

Objective Function (Minimize VOLUM) = 7.42381E+03 % change = -19.47
Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
Design Volume Fraction = 4.56312E-01 Mass = 5.86481E-05

```

```

Subcase Compliance
3 7.546355E+01
4 6.062215E+00

```

RETAINED RESPONSES TABLE

```

-----
Response Type Response Subcase Grid/ DOF/ Response Objective Viol.
User-ID Label /RANDPS Element/ Comp Value Reference/ %
+Frqncy MID/PID/ /Reg Constraint
Mode No. Bound

```

```

-----
3 VOLUM Vol -- -- TOTL 7.424E+03 MIN
6 DISPL Disp_tra 4 84759 TZ -1.516E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19716 TZ -1.544E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19693 TZ -1.544E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19168 TZ -1.409E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19166 TZ -1.410E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19140 TZ -1.566E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19138 TZ -1.566E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19110 TZ -1.685E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18985 TZ -1.409E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18959 TZ -1.565E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18957 TZ -1.565E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18931 TZ -1.685E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18929 TZ -1.685E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18896 TZ -1.732E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 18892 TZ -1.732E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19721 TZ -1.685E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19805 TZ -1.546E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19112 TZ -1.685E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19788 TZ -1.687E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra 4 19856 TZ -1.546E-02 > -2.600E-02 0.0
7 DISPL Disp_com 3 84758 TZ 3.019E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com 3 19612 TZ 2.971E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com 3 19589 TZ 2.894E-02 < 4.200E-02 0.0

```

7	DISPL	Disp_com	3	19572	TZ	2.987E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19547	TZ	3.015E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	3.013E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	3.012E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	3.010E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	3.073E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	3.072E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	3.134E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	3.133E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	3.142E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	3.141E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	3.077E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	3.079E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	2.978E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	2.963E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	2.989E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19956	TZ	2.959E-02	<	4.200E-02	0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 4

Objective Function (Minimize VOLUM) = 6.06077E+03 % change = -18.36
Maximum Constraint Violation % = 0.39821E+01
Design Volume Fraction = 3.63413E-01 Mass = 4.78801E-05

Subcase Compliance
3 1.003714E+02
4 8.766841E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type Response Subcase Grid/ DOF/ Response Objective Viol.
User-ID Label /RANDPS Element/ Comp Value Reference/ %
 +Frqncy MID/PID/ /Reg Constraint
 Mode No. Bound

3	VOLUM	Vol	--	--	TOTL	6.061E+03	MIN		
6	DISPL	Disp_tra	4	84759	TZ	-2.192E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19716	TZ	-2.217E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19693	TZ	-2.216E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19168	TZ	-2.047E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19166	TZ	-2.048E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19140	TZ	-2.291E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19138	TZ	-2.291E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19110	TZ	-2.458E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18985	TZ	-2.043E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18959	TZ	-2.287E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18957	TZ	-2.288E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18931	TZ	-2.455E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18929	TZ	-2.455E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18896	TZ	-2.514E-02	>	-2.600E-02	0.0

4 8.461130E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response User-ID	Type Label	Response Subcase +Frqncy MID/PID/ Mode No.	Grid/ Element/ /Reg	DOF/ Comp	Response Value	Objective Reference/	Viol. %
				Constraint Bound			
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	5.392E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.115E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.148E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.152E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.025E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.025E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.212E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.212E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.298E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18985	TZ	-2.022E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.211E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.210E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.298E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.297E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.319E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.319E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.023E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.282E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.149E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.298E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.291E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.156E-02	> -2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.663E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.517E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	3.629E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.040E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	3.923E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	3.922E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	3.921E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	3.921E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	3.751E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	3.750E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	3.692E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	3.691E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	3.691E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19405	TZ	3.691E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19980	TZ	3.632E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19461	TZ	3.750E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19463	TZ	3.751E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19709	TZ	3.513E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.513E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.040E-02	< 4.200E-02	0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization

inactive

ITERATION 6

Objective Function (Minimize VOLUM) = 4.75716E+03 % change = -11.78

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 2.74564E-01 Mass = 3.75816E-05

Subcase Compliance

3 8.699410E+01

4 8.372275E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase	Grid/Element/Reg	DOF/Comp	Response Value	Objective Reference/	Viol. %
User-ID	+Frqncy MID/PID/ Mode No.	/RANDPS	/Reg	Comp	Constraint	Reference/	%
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	4.757E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.093E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.125E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.123E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.004E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.004E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.199E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.199E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.284E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.198E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.197E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.284E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.283E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.298E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.298E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.001E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.277E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.118E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.283E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.279E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.126E-02	> -2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.480E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.309E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	3.506E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	3.853E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	3.765E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	3.762E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	3.757E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	3.754E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	3.611E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	3.610E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	3.548E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	3.547E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	3.553E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19405	TZ	3.552E-02	< 4.200E-02	0.0

7 DISPL Disp_com	3	19980	TZ	3.497E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19461	TZ	3.615E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19463	TZ	3.617E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19709	TZ	3.311E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.298E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19574	TZ	3.854E-02	<	4.200E-02	0.0

 Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 7

Objective Function (Minimize VOLUM) = 4.20728E+03 % change = -11.56
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 2.37086E-01 Mass = 3.32375E-05

Subcase Compliance

3	8.984405E+01
4	8.711751E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase	Grid/Element	DOF/Comp	Response Value	Objective Reference	Viol. %
User-ID		/RANDPS	/Reg	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint			
	Mode No.			Bound			

3	VOLUM	Vol	--	--	TOTL 4.207E+03	MIN	
6	DISPL	Disp_tra	4	84759 TZ	-2.178E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19716 TZ	-2.208E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19693 TZ	-2.202E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19168 TZ	-2.085E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19166 TZ	-2.084E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19140 TZ	-2.295E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19138 TZ	-2.295E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19110 TZ	-2.387E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18959 TZ	-2.293E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18957 TZ	-2.292E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18931 TZ	-2.388E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18929 TZ	-2.388E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18896 TZ	-2.403E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18892 TZ	-2.402E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18987 TZ	-2.079E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19721 TZ	-2.381E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19805 TZ	-2.199E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19112 TZ	-2.387E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19788 TZ	-2.383E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19856 TZ	-2.210E-02	>	-2.600E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	84758 TZ	3.594E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19612 TZ	3.377E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19589 TZ	3.600E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19572 TZ	3.928E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19547 TZ	3.886E-02	<	4.200E-02 0.0

7	DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	3.883E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	3.875E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	3.872E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	3.803E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	3.801E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	3.761E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	3.759E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	3.768E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	3.767E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	3.604E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	3.810E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	3.812E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	3.375E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.369E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	3.928E-02	<	4.200E-02	0.0

 Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 8

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.84603E+03 % change = -8.59
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 2.12465E-01 Mass = 3.03836E-05

Subcase Compliance

3 9.285742E+01
 4 9.032695E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint			
	Mode No.		Bound				

3	VOLUM	Vol	--	--	TOTL	3.846E+03	MIN
6	DISPL	Disp_tra	4	84759	TZ	-2.258E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19716	TZ	-2.290E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19693	TZ	-2.286E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19168	TZ	-2.163E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19166	TZ	-2.163E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19140	TZ	-2.380E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19138	TZ	-2.380E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19110	TZ	-2.476E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18959	TZ	-2.379E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18957	TZ	-2.377E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18931	TZ	-2.477E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18929	TZ	-2.476E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18896	TZ	-2.491E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18892	TZ	-2.491E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18987	TZ	-2.157E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19721	TZ	-2.475E-02	> -2.600E-02 0.0

6	DISPL	Disp_tra	4	19805	TZ	-2.278E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19112	TZ	-2.475E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19788	TZ	-2.474E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19856	TZ	-2.292E-02	>	-2.600E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	84758	TZ	3.714E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19612	TZ	3.485E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19589	TZ	3.743E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19572	TZ	4.030E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19547	TZ	4.002E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	3.999E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	4.002E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	3.997E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	3.968E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	3.966E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	3.935E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	3.934E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	3.928E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	3.927E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	3.763E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	3.960E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	3.961E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	3.462E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.466E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	4.030E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19956	TZ	3.473E-02	<	4.200E-02	0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 9

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.61531E+03 % change = -6.00
Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
Design Volume Fraction = 1.96740E-01 Mass = 2.85609E-05

Subcase Compliance

3 9.479219E+01
4 9.210175E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.		
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%		
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint					
	Mode No.			Bound					
3	VOLUM	Vol	--	--	TOTL	3.615E+03	MIN		
6	DISPL	Disp_tra	4	84759	TZ	-2.303E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19716	TZ	-2.333E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19693	TZ	-2.331E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19168	TZ	-2.207E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19166	TZ	-2.207E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19140	TZ	-2.426E-02	>	-2.600E-02	0.0

6	DISPL	Disp_tra	4	19138	TZ	-2.426E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19110	TZ	-2.521E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18959	TZ	-2.426E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18957	TZ	-2.424E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18931	TZ	-2.524E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18929	TZ	-2.522E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18896	TZ	-2.536E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18892	TZ	-2.536E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18987	TZ	-2.202E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19721	TZ	-2.529E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19805	TZ	-2.324E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19112	TZ	-2.521E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19788	TZ	-2.526E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19856	TZ	-2.338E-02	>	-2.600E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	84758	TZ	3.792E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19612	TZ	3.573E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19589	TZ	3.871E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19572	TZ	4.083E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19547	TZ	4.061E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	4.057E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	4.060E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	4.054E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	4.042E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	4.042E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	4.023E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	4.022E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	4.019E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	4.019E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	3.902E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	4.038E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	4.039E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.551E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	4.084E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19956	TZ	3.563E-02	<	4.200E-02	0.0

 Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 10

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.46127E+03 % change = -4.26
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 1.86242E-01 Mass = 2.73441E-05

Subcase Compliance
 3 9.611428E+01
 4 9.301110E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

 Response Type Response Subcase Grid/ DOF/ Response Objective Viol.
 User-ID Label /RANDPS Element/ Comp Value Reference/ %
 +Frqncy MID/PID/ /Reg Constraint

Mode No.	Bound				

3 VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.461E+03	MIN
6 DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.325E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.354E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.351E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.233E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.232E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.450E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.451E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.544E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.450E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.449E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.547E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.546E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.558E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.558E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.225E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.552E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.346E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.543E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.552E-02	> -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.362E-02	> -2.600E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.845E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.650E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19589	TZ	3.994E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.108E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.088E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.086E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.085E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.078E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.075E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.075E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.064E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.064E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.064E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19405	TZ	4.064E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19980	TZ	4.033E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19461	TZ	4.075E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19463	TZ	4.076E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.628E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.109E-02	< 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3	19956	TZ	3.641E-02	< 4.200E-02 0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization					inactive

ITERATION 11

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.35282E+03 % change = -3.13

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 1.78850E-01 Mass = 2.64873E-05

Subcase Compliance

3 9.712758E+01
4 9.355892E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type Response Subcase Grid/ DOF/ Response Objective Viol.
User-ID Label /RANDPS Element/ Comp Value Reference/ %
+Frqncy MID/PID/ /Reg Constraint
Mode No. Bound

3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.353E+03	MIN		
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.339E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.367E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.363E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.250E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.250E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.467E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.468E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.559E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.463E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.462E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.559E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.558E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.570E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.570E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.238E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.566E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.358E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.558E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.565E-02	>	-2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.377E-02	>	-2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.885E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.726E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	4.093E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.122E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.103E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.102E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.100E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.093E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.097E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.096E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.093E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.094E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.094E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19405	TZ	4.094E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19980	TZ	4.109E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19461	TZ	4.098E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19463	TZ	4.099E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.697E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.123E-02	<	4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19956	TZ	3.711E-02	<	4.200E-02	0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization

inactive

ITERATION 12

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.27491E+03 % change = -2.32
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 1.73540E-01 Mass = 2.58718E-05

Subcase Compliance
 3 9.778762E+01
 4 9.386189E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint			
	Mode No.			Bound			
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.275E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.347E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.373E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.368E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.258E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.259E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.475E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.477E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.568E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.473E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.471E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.569E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.567E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.578E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.578E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.246E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.575E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.366E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.565E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.575E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.384E-02	> -2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.912E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.778E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	4.130E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.135E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.118E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.116E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.114E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.108E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.113E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.112E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.115E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.115E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.117E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19405	TZ	4.116E-02	< 4.200E-02	0.0

7 DISPL Disp_com	3	19980	TZ	4.130E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19461	TZ	4.117E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19463	TZ	4.119E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.748E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.135E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19956	TZ	3.752E-02	<	4.200E-02	0.0

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 13

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.21512E+03 % change = -1.83
Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
Design Volume Fraction = 1.69465E-01 Mass = 2.53994E-05

Subcase Compliance

3	9.832085E+01
4	9.407579E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase	Grid/ Element/ +Frqncy MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg Bound	Response Value	Objective Reference	Viol. %

3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.215E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.352E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.376E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.372E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.264E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.265E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.480E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.483E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.573E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.480E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.478E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.575E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.573E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.582E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.582E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.254E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.581E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.371E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.570E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.579E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.390E-02	>	-2.600E-02 0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.933E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.814E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	4.145E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.150E-02	<	4.200E-02 0.0
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.133E-02	<	4.200E-02 0.0

7 DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.131E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.132E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.125E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.132E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.130E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.134E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.134E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.133E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19405	TZ	4.133E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19980	TZ	4.141E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19461	TZ	4.132E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19463	TZ	4.135E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19709	TZ	3.793E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.793E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.151E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL Disp_com	3	19956	TZ	3.782E-02	<	4.200E-02	0.0

 Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 14

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.17000E+03 % change = -1.40
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 1.66390E-01 Mass = 2.50430E-05

Subcase Compliance

3 9.881539E+01
 4 9.423472E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase	Grid/Element	DOF/Comp	Response Value	Objective Reference	Viol. %
User-ID	Label	/RANDPS	/Reg	Comp	Value	Reference/	%
		+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint		
		Mode No.		Bound			

3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.170E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.356E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.377E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.377E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.266E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.268E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.484E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.487E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.577E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.486E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.485E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.580E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.578E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.586E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.586E-02	>	-2.600E-02 0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.260E-02	>	-2.600E-02 0.0

6	DISPL	Disp_tra	4	19721	TZ	-2.585E-02	>	-2.600E-02	0.0	A
6	DISPL	Disp_tra	4	19805	TZ	-2.376E-02	>	-2.600E-02	0.0	
6	DISPL	Disp_tra	4	19112	TZ	-2.574E-02	>	-2.600E-02	0.0	
6	DISPL	Disp_tra	4	19788	TZ	-2.583E-02	>	-2.600E-02	0.0	A
6	DISPL	Disp_tra	4	19856	TZ	-2.393E-02	>	-2.600E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	84758	TZ	3.953E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19612	TZ	3.846E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19589	TZ	4.159E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19572	TZ	4.164E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19547	TZ	4.145E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	4.142E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	4.149E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	4.141E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	4.149E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	4.146E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	4.151E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	4.150E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	4.148E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	4.147E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	4.154E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	4.145E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	4.147E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	3.839E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.832E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	4.165E-02	<	4.200E-02	0.0	A

 Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 15

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.13743E+03 % change = -1.03
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 1.64170E-01 Mass = 2.47857E-05

Subcase Compliance
 3 9.922133E+01
 4 9.435018E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response Label	Subcase	Grid/	DOF/	Response Value	Objective Reference/	Viol.
User-ID		/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
		+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint		
		Mode No.			Bound		
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.137E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.359E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.378E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.380E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.269E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.271E-02	>	-2.600E-02 0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.487E-02	>	-2.600E-02 0.0

6 DISPL	Disp_tra	4	19138	TZ	-2.490E-02	>	-2.600E-02	0.0
6 DISPL	Disp_tra	4	19110	TZ	-2.580E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	18959	TZ	-2.491E-02	>	-2.600E-02	0.0
6 DISPL	Disp_tra	4	18957	TZ	-2.489E-02	>	-2.600E-02	0.0
6 DISPL	Disp_tra	4	18931	TZ	-2.585E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	18929	TZ	-2.582E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	18896	TZ	-2.589E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	18892	TZ	-2.589E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	18987	TZ	-2.264E-02	>	-2.600E-02	0.0
6 DISPL	Disp_tra	4	19721	TZ	-2.589E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	19805	TZ	-2.378E-02	>	-2.600E-02	0.0
6 DISPL	Disp_tra	4	19112	TZ	-2.577E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	19788	TZ	-2.587E-02	>	-2.600E-02	0.0 A
6 DISPL	Disp_tra	4	19856	TZ	-2.395E-02	>	-2.600E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	84758	TZ	3.969E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19612	TZ	3.865E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19589	TZ	4.168E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19572	TZ	4.176E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19547	TZ	4.156E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19545	TZ	4.153E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19518	TZ	4.164E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19516	TZ	4.158E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19490	TZ	4.166E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19488	TZ	4.162E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19434	TZ	4.167E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19432	TZ	4.166E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19407	TZ	4.162E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	4.162E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	4.165E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	4.157E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	4.160E-02	<	4.200E-02	0.0 A
7 DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	3.876E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.858E-02	<	4.200E-02	0.0
7 DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	4.177E-02	<	4.200E-02	0.0 A

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 16

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.11482E+03 % change = -0.72
 Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00
 Design Volume Fraction = 1.62629E-01 Mass = 2.46071E-05

Subcase Compliance

3 9.949098E+01
 4 9.444000E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
		+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint		

Mode No.	Bound
3 VOLUM Vol	-- -- TOTL 3.115E+03 MIN
6 DISPL Disp_tra	4 84759 TZ -2.361E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19716 TZ -2.379E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19693 TZ -2.382E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19168 TZ -2.270E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19166 TZ -2.272E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19140 TZ -2.489E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19138 TZ -2.492E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19110 TZ -2.583E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 18959 TZ -2.495E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 18957 TZ -2.493E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 18931 TZ -2.589E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 18929 TZ -2.586E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 18896 TZ -2.592E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 18892 TZ -2.592E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 18987 TZ -2.268E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19721 TZ -2.591E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 19805 TZ -2.381E-02 > -2.600E-02 0.0
6 DISPL Disp_tra	4 19112 TZ -2.579E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 19788 TZ -2.591E-02 > -2.600E-02 0.0 A
6 DISPL Disp_tra	4 19856 TZ -2.397E-02 > -2.600E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 84758 TZ 3.980E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 19612 TZ 3.879E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 19589 TZ 4.175E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19572 TZ 4.183E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19547 TZ 4.162E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19545 TZ 4.158E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 19518 TZ 4.173E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19516 TZ 4.168E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19490 TZ 4.177E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19488 TZ 4.173E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19434 TZ 4.176E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19432 TZ 4.175E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19407 TZ 4.172E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19405 TZ 4.171E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19980 TZ 4.175E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19461 TZ 4.164E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19463 TZ 4.168E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com	3 19709 TZ 3.909E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 19949 TZ 3.875E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com	3 19574 TZ 4.183E-02 < 4.200E-02 0.0 A

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 17

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.09896E+03 % change = -0.51

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 1.61548E-01 Mass = 2.44818E-05

Subcase Compliance

3 9.969889E+01
4 9.450297E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg		Constraint		
	Mode No.				Bound		
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.099E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.363E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.380E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.385E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.270E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.272E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.490E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.493E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.584E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.498E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.496E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.592E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.588E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.594E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.594E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.271E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.593E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.382E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.580E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.593E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.398E-02	> -2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.988E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.887E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	4.181E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.187E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.166E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.161E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.179E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.174E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.183E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.180E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.182E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.181E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.180E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19405	TZ	4.180E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19980	TZ	4.181E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19461	TZ	4.170E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19463	TZ	4.173E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19709	TZ	3.935E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19949	TZ	3.891E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19574	TZ	4.187E-02	< 4.200E-02	0.0 A

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 18

the 1st satisfied convergence ratio = 3.8255E-03

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.08715E+03 % change = -0.38

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 1.60743E-01 Mass = 2.43885E-05

Subcase Compliance

3 9.983136E+01

4 9.455369E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint			
	Mode No.			Bound			
3	VOLUM Vol	--	--	TOTL	3.087E+03	MIN	
6	DISPL Disp_tra	4	84759	TZ	-2.364E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19716	TZ	-2.382E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19693	TZ	-2.388E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19168	TZ	-2.272E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19166	TZ	-2.274E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19140	TZ	-2.492E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19138	TZ	-2.495E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19110	TZ	-2.586E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18959	TZ	-2.500E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18957	TZ	-2.497E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	18931	TZ	-2.593E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18929	TZ	-2.590E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18896	TZ	-2.595E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18892	TZ	-2.595E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	18987	TZ	-2.273E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19721	TZ	-2.594E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19805	TZ	-2.381E-02	> -2.600E-02	0.0
6	DISPL Disp_tra	4	19112	TZ	-2.582E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19788	TZ	-2.594E-02	> -2.600E-02	0.0 A
6	DISPL Disp_tra	4	19856	TZ	-2.400E-02	> -2.600E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	84758	TZ	3.993E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19612	TZ	3.897E-02	< 4.200E-02	0.0
7	DISPL Disp_com	3	19589	TZ	4.185E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19572	TZ	4.190E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19547	TZ	4.168E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19545	TZ	4.163E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19518	TZ	4.182E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19516	TZ	4.178E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19490	TZ	4.187E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19488	TZ	4.184E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19434	TZ	4.186E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19432	TZ	4.186E-02	< 4.200E-02	0.0 A
7	DISPL Disp_com	3	19407	TZ	4.185E-02	< 4.200E-02	0.0 A

7	DISPL	Disp_com	3	19405	TZ	4.185E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19980	TZ	4.186E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19461	TZ	4.173E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19463	TZ	4.177E-02	<	4.200E-02	0.0	A
7	DISPL	Disp_com	3	19709	TZ	3.950E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19949	TZ	3.900E-02	<	4.200E-02	0.0	
7	DISPL	Disp_com	3	19574	TZ	4.190E-02	<	4.200E-02	0.0	A

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

ITERATION 19

the 2nd satisfied convergence ratio = 2.8776E-03

Objective Function (Minimize VOLUM) = 3.07829E+03 % change = -0.29

Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00

Design Volume Fraction = 1.60139E-01 Mass = 2.43185E-05

Subcase Compliance

3 9.994687E+01

4 9.459696E+00

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type	Response	Subcase	Grid/	DOF/	Response	Objective	Viol.
User-ID	Label	/RANDPS	Element/	Comp	Value	Reference/	%
	+Frqncy	MID/PID/	/Reg	Constraint			
	Mode No.		Bound				

3	VOLUM	Vol	--	--	TOTL	3.078E+03	MIN
6	DISPL	Disp_tra	4	84759	TZ	-2.365E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19716	TZ	-2.385E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19693	TZ	-2.390E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19168	TZ	-2.274E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19166	TZ	-2.275E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19140	TZ	-2.494E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19138	TZ	-2.497E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19110	TZ	-2.587E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	18959	TZ	-2.501E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18957	TZ	-2.498E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	18931	TZ	-2.595E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	18929	TZ	-2.591E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	18896	TZ	-2.596E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	18892	TZ	-2.596E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	18987	TZ	-2.274E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19721	TZ	-2.595E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	19805	TZ	-2.380E-02	> -2.600E-02 0.0
6	DISPL	Disp_tra	4	19112	TZ	-2.583E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	19788	TZ	-2.596E-02	> -2.600E-02 0.0 A
6	DISPL	Disp_tra	4	19856	TZ	-2.400E-02	> -2.600E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	84758	TZ	3.998E-02	< 4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19612	TZ	3.906E-02	< 4.200E-02 0.0
7	DISPL	Disp_com	3	19589	TZ	4.188E-02	< 4.200E-02 0.0 A

```
7 DISPL Disp_com      3 19572 TZ 4.193E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19547 TZ 4.170E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19545 TZ 4.165E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19518 TZ 4.185E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19516 TZ 4.181E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19490 TZ 4.190E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19488 TZ 4.187E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19434 TZ 4.189E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19432 TZ 4.189E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19407 TZ 4.189E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19405 TZ 4.189E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19980 TZ 4.191E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19461 TZ 4.176E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19463 TZ 4.180E-02 < 4.200E-02 0.0 A
7 DISPL Disp_com      3 19709 TZ 3.961E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com      3 19949 TZ 3.906E-02 < 4.200E-02 0.0
7 DISPL Disp_com      3 19574 TZ 4.192E-02 < 4.200E-02 0.0 A
```

Stress Constraints for Topology/Free-Sizing Optimization inactive

OPTIMIZATION HAS CONVERGED.

FEASIBLE DESIGN.

RESOURCE USAGE INFORMATION

```
MAXIMUM MEMORY USED             269 MB
MAXIMUM DISK SPACE USED         570 MB
```

COMPUTE TIME INFORMATION

```
EXECUTION STARTED              Sat Nov 14 14:27:52 2009
EXECUTION COMPLETED           Sat Nov 14 14:35:48 2009
ELAPSED TIME                   00:07:55
CPU TIME                       00:13:39
```

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

For Useful OptiStruct Tips and Tricks, go to the URL:
<http://www.altairhyperworks.com/tips.aspx>