

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

**Daniel Gaspari Cirne de Toledo**  
danielgtoledo@gmail.com.br

**Emílio Carlos Nelli Silva**  
ecnsilva@usp.br

**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 simulação da performance do motor para definir o carregamento estático (pressão de combustão) que é aplicado ao conjunto motriz. Com isso é possível determinar o carregamento atuante na biela. Dois problemas de otimização são formulados. O primeiro, minimizar a flexibilidade para uma dada massa e o segundo minimizar a massa considerando restrição de máxima tensão de von Mises e ovalização máxima do olhal.

**Palavras chave:** otimização topológica, método dos elementos finitos, motores a combustão interna

## 1. Introdução

A indústria automotiva e a sociedade demandam veículos e motores a combustão interna mais eficientes. Economia de combustível e emissões foram os principais problemas enfrentados pela indústria nos últimos dez anos e continuarão a ser na próxima década. O aquecimento global, poluição do ar em grandes aglomerações urbanas e o preço dos combustíveis são problemas que tornam necessário e importante o desenvolvimento de motores mais eficientes. A redução da massa dos componentes móveis dos motores a combustão interna associado à redução da cilindrada dos motores é necessário para atingir tais objetivos. Ao fazer isso, o motor necessita de menos combustível (energia) para operar o que significa que o motor passa a ser mais eficiente e menos poluidor.

O trabalho consiste no projeto de uma biela para um motor convertido para etanol de pequena cilindrada quatro tempos com ignição por faísca utilizando o método da otimização topológica (Bendsoe, 2003) com o objetivo de reduzir a massa do componente. 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.

O desenvolvimento de bielas focou-se principalmente, nos últimos anos, em redução de custos de manufatura e melhoria da lubrificação e vida a fadiga dos olhais. Otimização para redução de custos é desenvolvida por Shenoy e Fatemi (2005) considerando seleção de materiais e otimização de forma para assegurar a vida à fadiga do componente. Otimização considerando contato para melhoria dos olhais é realizada por Meske, Mulfinger e Warmuth (2002). Neste trabalho não será considerando o contato dos pinos com os olhais, de forma que é focado no projeto da alma da biela.

Para determinar o comprimento da biela (neste caso o mesmo que a taxa de compressão do motor) é realizada uma simulação unidimensional térmica e do escoamento do ar no motor com o programa Ricardo WAVE<sup>®</sup>, um simulador de desempenho de motores. Com o resultado obtido da pressão de combustão para a rotação de torque máximo e da máxima velocidade rotativa do motor, é calculado o carregamento atuante na biela.

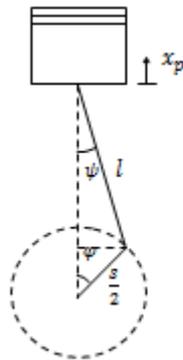
A aplicação de otimização topológica no projeto de componentes mecânicos está crescendo significativamente na indústria e isto representa um desafio para os engenheiros. Isso porque a metodologia do projeto não está bem definida e disseminada. O objetivo deste trabalho é definir uma metodologia de projeto que garanta que os requisitos mecânicos sejam atingidos ao aplicar o método da otimização topológica para a redução da massa de bielas. Definir a melhor metodologia é definir o conjunto mais adequado de função objetivo e restrições a melhor modelagem das condições de contorno do problema.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2, a simulação do desempenho do motor e a modelagem do carregamento são apresentados. Na seção 3, a modelagem em elementos finitos, a determinação dos critérios de engenharia e a formulação do problema de otimização são apresentados. Na seção 4 são apresentados os resultados de validação do projeto da biela. Na seção 5 conclusões são apresentadas.

## 2. Modelagem do carregamento

### 2.1. Equações 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, sendo assim uma primeira aproximação (Basshuysen e Schäfer, 2004). A Figura (1) descreve a geometria da árvore de potência.



Definições:

$x_p$  – posição do pistão

$s$  – curso do pistão

$l$  – comprimento da biela

$\varphi$  – posição angular do virabrequim

$\psi$  – ângulo da biela

Figura 1. Geometria da árvore de potência.

O carregamento é:

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

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

Onde  $F_{comp}$  é a força de compressão,  $F_{trac}$  é a força de tração,  $F_{bend}$  é a força de flexão,  $m_p$  é a massa do pistão,  $p$  é a pressão de combustão,  $A_p$  a área da cabeça do pistão e  $\omega$  é a velocidade de rotação do motor.

A Figura (2) ilustra os dois casos de carregamento considerados na otimização.

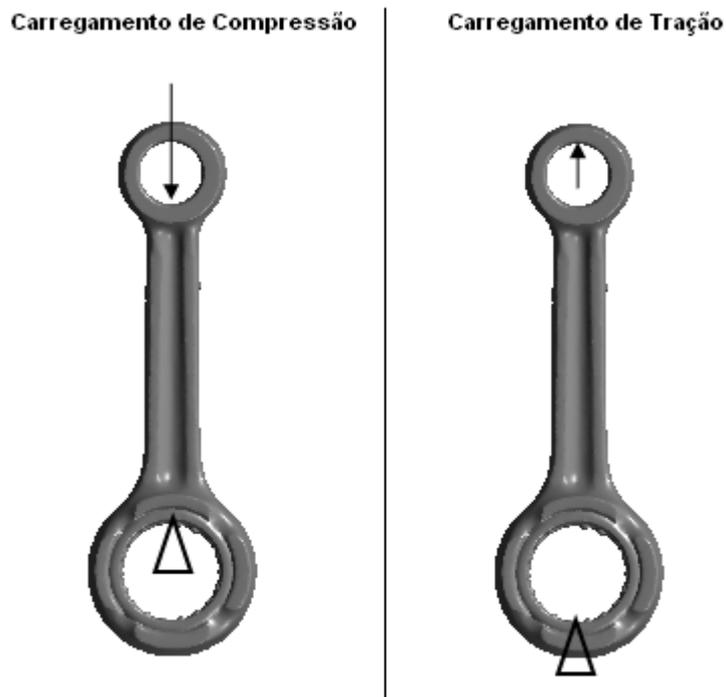


Figura 2. Casos de carregamento de compressão e tração.

## 2.2. Determinação da pressão de combustão

O motor é modelado com o programa Ricardo WAVE<sup>®</sup>, 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 máxima pressão é de 3.5 MPa à 5250 rpm e a posição da biela ( $\psi$ ) é igual a 0.115 rad.

## 3. Formulação do problema de otimização topológica

### 3.1. Modelagem em elementos finitos

O domínio de projeto é definido considerando o comprimento da biela e a geometria dos olhais. A Figura (4) apresenta a malha gerada com o programa Altair HyperMesh<sup>®</sup> 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 Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do Aço SAE4340.

Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,3
Módulo de Young	$E$	210 GPa
Tensão de Escoamento	$\sigma_e$	473 MPa

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, é desenvolvida uma modelagem linear estática que tenha baixo custo e ao mesmo tempo seja fiel às condições reais de operação. A ovalização do olhal maior, i.e, a deformação radial do olhal maior da biela deve ser verificada caso o modelo seja realístico. Para tanto, é determinado um sistema de coordenadas cilíndrico no centro do olhal maior para o pós-processamento da ovalização do mesmo.

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 se trata 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. A Figura (4) ilustra a modelagem das condições de contorno.

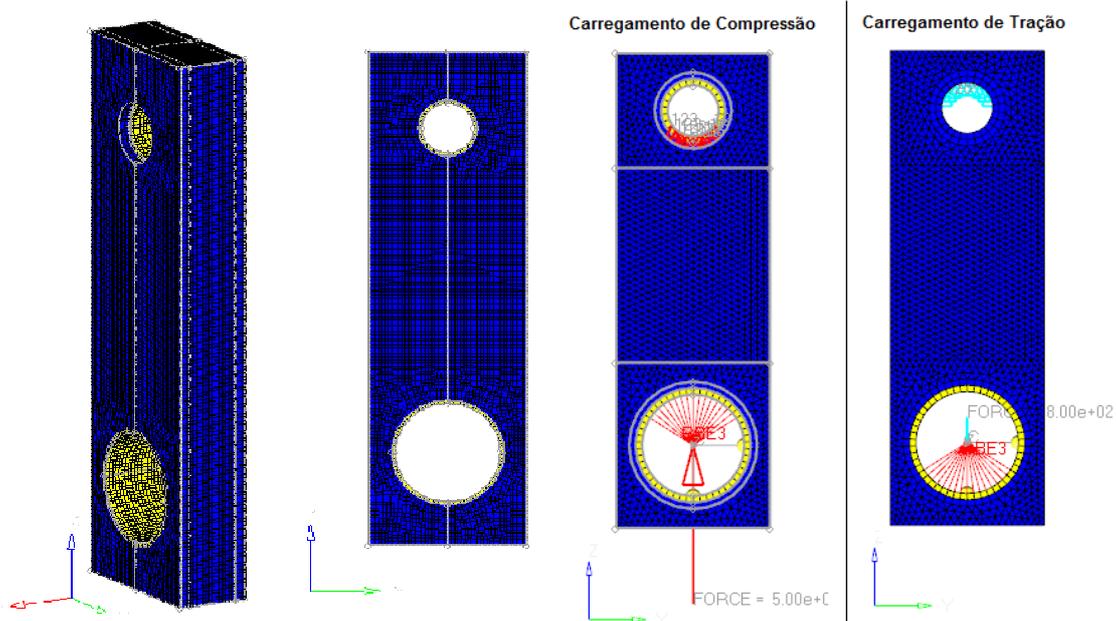


Figura 4. Domínio de projeto e modelagem do carregamento e restrições.

Com a finalidade de avaliar a qualidade da modelagem, uma análise estrutural é realizada para verificação entre o comportamento do modelo e aquilo que é esperado fisicamente. A Figura (5) apresenta o resultado da análise estrutural do modelo.

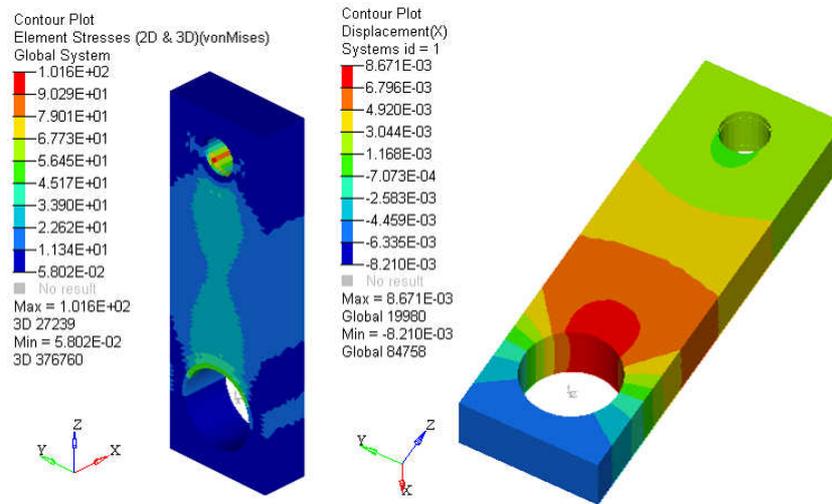


Figura 5. Resultado da análise MEF do modelo para o caso de compressão. Tensão de von Mises em MPa (esquerda) e ovalização do olhal maior em mm (direita).

A análise do resultado leva à conclusão de que a modelagem proposta e utilizada é adequada para o projeto, já que ocorre ovalização de ambos os olhais 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.

### 3.2. 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 Tab. (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, não ocorrência de colisão do pistão com as válvula e manutenção do desempenho tribológico do par saia do pistão - camisa.
- 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 realizada a engenharia reversa do 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.

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 3.1, 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. A Figura (6) apresenta a ovalização observada do componente original.

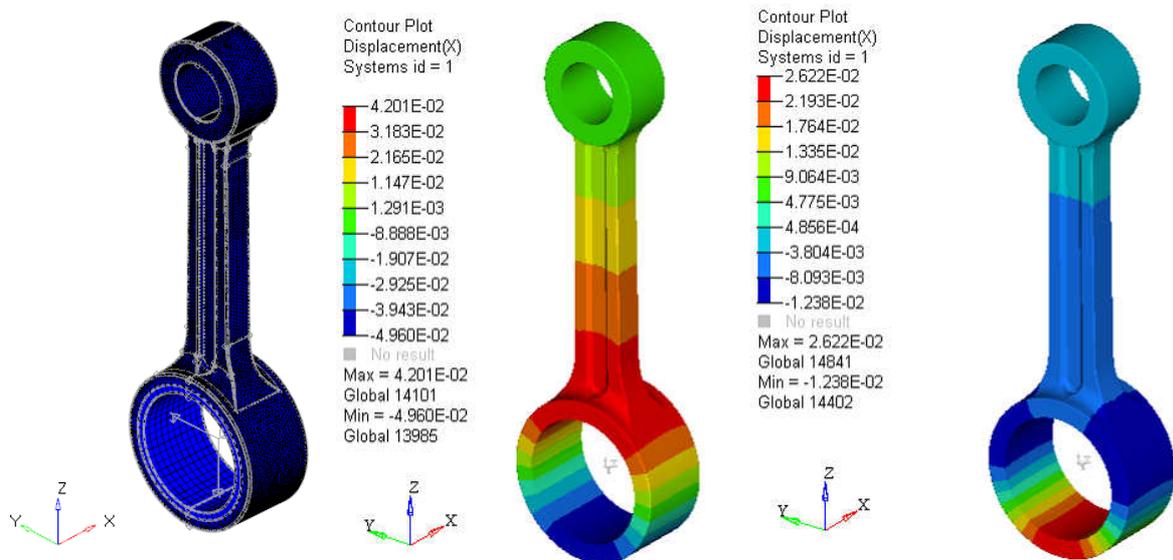


Figura 6. Geometria e ovalização da biela original do motor – estabelecimento do critério de engenharia.

A análise por meio da engenharia reversa, ilustrada na Fig. (6), 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

### 3.3. Formulação do problema de otimização – restrições e função objetivo

O problema de otimização topológica definido no programa Altair OptiStruct® é:

**Caso 1.b** (segundo a nomenclatura do projeto):

- 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 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 (7) ilustra os nós nos quais a restrição de ovalização é aplicada.

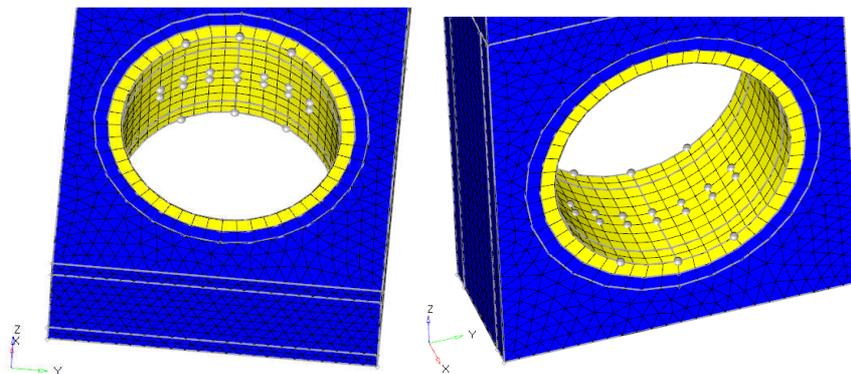


Figura 7. Restrições nodais de deslocamento para restrição de ovalização sob compressão (esquerda) e sob tração (direita).

## 4. Resultados numéricos

### 4.1. Resultado e análise da otimização

A Figura (8) ilustra o resultado das densidades dos elementos ao final da última iteração do processo de otimização.

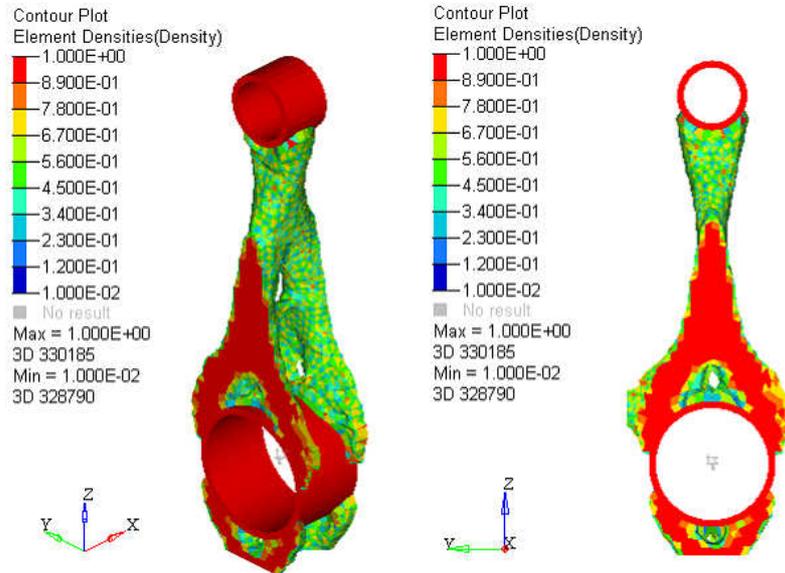


Figura 8. Densidades dos elementos ao final da otimização para o caso 1.b.

Para a avaliação dos critérios de engenharia (ovalização do olhal maior) da solução é feita a análise estrutural para ambos os carregamentos (de acordo com o modelo apresentado na seção 3.1). A Figura (9) apresenta o resultado da análise estrutural considerando as densidades da solução da otimização na última iteração. Verifica-se que os critérios de engenharia de ovalização do olhal maior são atendidos.

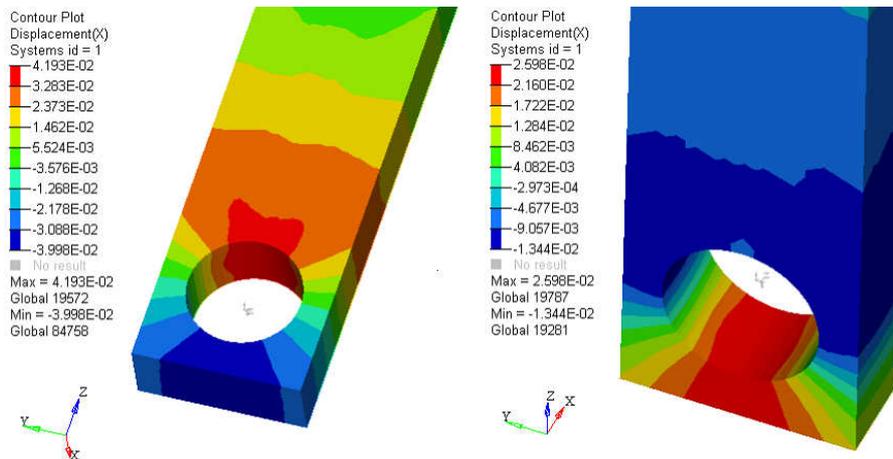


Figura 9. Ovalização do olhal para a solução do caso 1.b – Compressão (esquerda) e tração (direita).

### 4.2 Interpretação e Validação

A partir do resultado apresentado na Fig. (8) é realizada a documentação da solução em desenho CAD 3D, utilizando o software UG NX5. A Figura (10) ilustra o modelo final do projeto da biela.

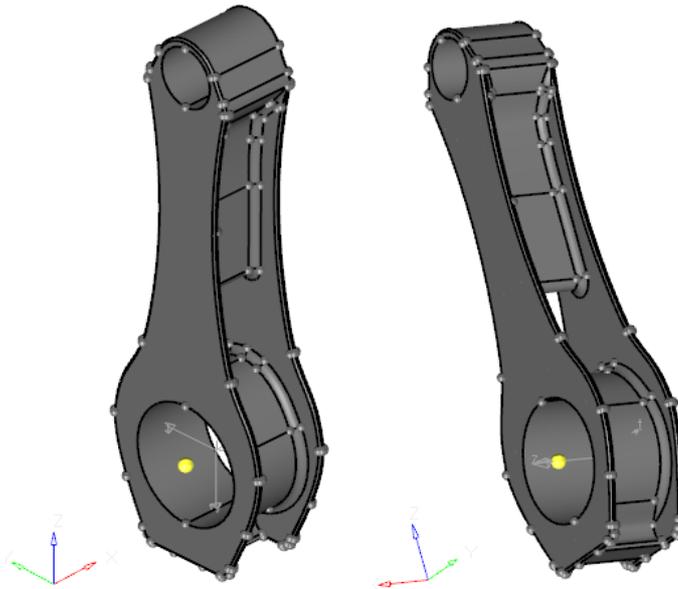


Figura 10. Projeto final da biela em CAD 3D.

A metodologia definida estabelece a realização de uma análise estrutural do desenho final para validação do projeto. O modelo de elementos finitos é o mesmo que o descrito na seção 3.1 (com alteração da geometria). A Figura (11) apresenta o resultado da análise estrutural realizada.

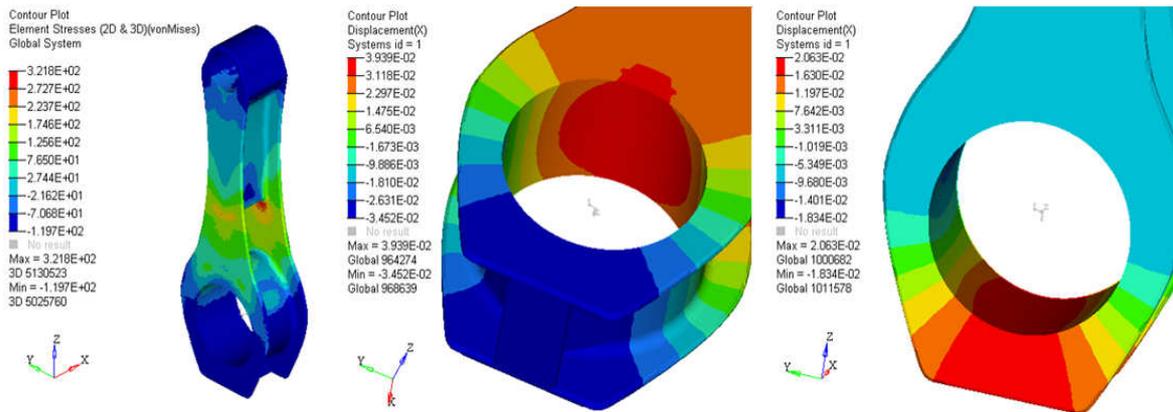


Figura 11. Validação do projeto final da biela. Tensão máxima de von Mises (esquerda), ovalização sob compressão (centro) e ovalização sob tração (direita).

A análise do resultado da simulação ilustrada na Fig. 11 permite verificar que o modelo atende os critérios de engenharia determinados no projeto. A Tabela (2) apresenta o comparativo entre a nova biela e a biela original do motor.

Tabela 2. Resumo do desempenho da biela e comparação com o componente original

Restrição (MPa e mm)	Massa (g)	Variação <sup>(1)</sup> da massa	Tensão (MPa)	Ovalização
Tensão <sup>(2)</sup> ≤ 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

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.

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 pinos e olhais, de forma a tornar o problema não-linear, o que aumentará significativamente o custo computacional e a complexidade do problema de otimização e sua convergência.

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.

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.

## 6. Agradecimentos

O primeiro autor agradece à ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo (Campo Limpo – São Paulo – Brasil) pela bolsa de estudos conferida à ele. Os autores agradecem à ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo pelo programa de cooperação com a Universidade, à FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia pela administração dos recursos do programa de cooperação, à Altair Engineering do Brasil pelas licenças e suporte técnico dos produtos Altair HyperWorks e à Robtec pela digitalização dos componentes do motor.

## 7. Referências

- Basshuysen, Richard van; Schäfer, Fred; 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.
- Pravardhan, S. Shenoy; Ali, Fatemi; Connecting Rod Optimization for Weight and Cost Reduction. SAE International Congress 2005.
- 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.

## 8. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

## DESIGN OF A CONNECTING ROD FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY APPLYING THE TOPOLOGY OPTIMIZATION METHOD

**Daniel Gaspari Cirne de Toledo**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – São Paulo – SP - Brasil  
daniel.toledo@poli.usp.br

**Emílio Carlos Nelli Silva**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – São Paulo – SP - Brasil  
ecnsilva@usp.br

***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 simulation of the combustion to predict the static load (gas pressure) that is applied to the conrod. With this it is possible to determine the loads that are applied to the 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 compliance for a defined maximum mass and the second is to minimize the mass for a defined maximum stress and maximum oval deflection of the big eye. Manufacturing constraints are applied to assure the feasibility of the conrod design in the end of the optimization routine*

***Keywords.** topology optimization, finite element analysis, internal combustion engine*