

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

Guilherme Vinícius França dos Santos
gvfrancasantos@gmail.com

Emílio Carlos Nelli Silva
ecnsilva@usp.br

Resumo. Este projeto consiste no desenvolvimento de um pistão para um motor a combustão interna de ignição por faísca e de baixa cilindrada utilizando o método da otimização topológica. O projeto proposto também inclui a modelagem da combustão e processos termodinâmicos que ocorrem no motor. O problema de otimização de um componente de um motor a combustão interna é complexo, desde que no mesmo devem ser considerados diversos casos de carregamento e condições de operação extremas. O projeto consiste em três etapas. Primeiramente, os carregamentos térmicos (distribuição espacial de temperatura), os carregamentos dinâmicos (acelerações) e o carregamento estático (pressão de combustão) que estão atuando no pistão são determinados através de simulações utilizando os programas WAVE® e PISDYN. A segunda etapa consiste na aplicação do método da otimização topológica para o projeto do componente, utilizando restrições de manufatura e as formulações pertinentes. Segue-se então a análise térmica dos resultados, por uma simulação pelo método dos elementos finitos visando obter a distribuição de temperaturas no componente otimizado. Uma etapa de verificação valida o novo componente projetado.

Palavras-chave: Projeto de motores; Otimização topológica; Simulação de motores; Método dos elementos finitos

1. Introdução

Um motor a combustão interna é uma máquina térmica cujo propósito é a transformação da energia química contida nos combustíveis em energia mecânica. Das questões sociais e ambientais envolvendo a queima de combustíveis vem a necessidade da redução no consumo de combustíveis. Uma das formas de se atingir este resultado é por meio da redução da massa dos componentes móveis do motor. Fazendo isso, a energia associada ao movimento dos mesmos torna-se reduzido. O pistão é um componente de motores a combustão interna sujeito a vários tipos de carregamento e tipicamente opera sob condições severas. As funções exercidas pelo pistão incluem a transferência das forças exercidas pelos gases de combustão a alta pressão para a árvore motriz. Sendo assim, o mesmo deve resistir a estas pressões, além da grande quantidade de calor advindo da câmara de combustão e às acelerações, às quais o mesmo está sujeito devido ao seu movimento senoidal. Outra dificuldade encontrada no projeto de pistões é a definição das condições de contorno para as etapas de simulação e de otimização. Bueno (2004) propõe métodos para a modelagem computacional de pistões, considerando diversos conjuntos de condições de contorno de acordo com a condição de operação do componente e seu material. A realização de experimentos para a determinação de parâmetros de comparação com os resultados computacionais requer recursos e instalações dificilmente disponíveis, o que consiste numa limitação ao projeto. Isto pode ser contornado pelo uso de dados e resultados disponíveis na literatura técnica. Kubicki, Watson e Willians (2007) apresentam perfis de distribuição de pressão para pistões de alumínio de motores a combustão interna de ignição por faísca, obtidos através de simulações estáticas e dinâmicas. Além disso, Vignesh et al (2005) apresentam distribuições de temperatura e taxas de troca de calor típicas para pistões, incluindo também avaliação de métodos de resfriamento. O grande número de variáveis que estão relacionadas ao problema do projeto de um pistão leva a impossibilidade de obtenção de uma solução analítica para o problema de otimização, o que também leva a resultados complexos para a distribuição ótima.

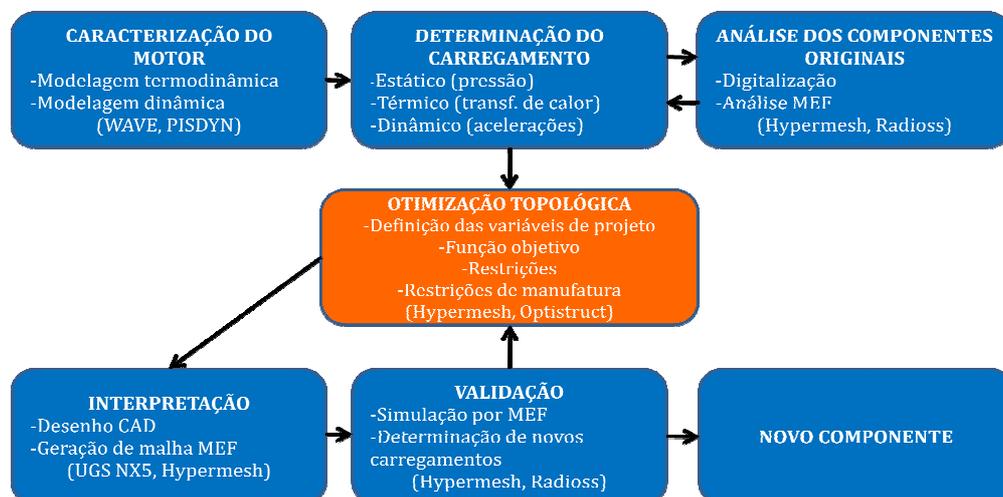


Figura 1. Fluxograma de projeto utilizando o método da otimização topológica

2. Obtenção dos carregamentos

A modelagem do motor para a obtenção dos carregamentos é um processo chave no projeto de um pistão. O motor de base é monocilindro, de quatro tempos e de ignição por faísca. O seu combustível é a mistura de 25% de álcool etílico anidro com 75% de gasolina A, segundo as normas brasileiras. As aplicações gerais para este tipo de motor são cortadores de grama, pequenos geradores e bombas. O modelo de motor proposto é uma versão modificada do motor original, que funcionaria com álcool etílico hidratado e cuja performance foi predizida pela utilização de métodos computacionais através do programa WAVE®, um programa de simulação uni-dimensional de motores.

Tabela 1. Dados do motor.

Número de cilindros	1
Diâmetro do cilindro	39mm
Curso do pistão	30mm
Volume	35.8cm ³
Taxa de compressão	12:1
Potência máxima	1.2kW @ 7000rpm
Torque máximo	1.9Nm @ 5000rpm
Ignição	Trasistorizada
Carburador	Diafragma
Óleo lubrificante	SAE 20W 50
Método de arrefecimento	Forced-air
Faixa de rotações	4,000rpm a 8,000rpm
Massa (vazio)	3.46kg
Massa do pistão	32g
Material do pistão	AA4032

Como resultado também das simulações obtém-se os carregamentos de pressão e de fluxo de calor que atuam sobre o pistão. Os principais resultados obtidos nesta etapa são a distribuição da pressão na câmara de combustão em função do ângulo do virabrequim e da rotação do motor, uma distribuição temporal de temperatura na parede superior do pistão que está em contato com os gases de combustão e a taxa de troca de calor para o pistão. Neste artigo são apresentados apenas os resultados relacionados à primeira etapa de otimização, que contempla apenas os carregamentos estáticos de pressão. O material considerado para o pistão é a liga de alumínio AA4032, comumente utilizada para este tipo de aplicação.

Tabela 2. Propriedades da liga AA4032.

Coefficiente de Poisson	0,33
Módulo de elasticidade	79GPa
Tensão de escoamento	315MPa
Densidade	2,7.10 ³ kg/m ³
Coef. de expansão térmica	2,3.10 ⁻⁵ /K
Condutividade térmica (300K)	237 W/(m.K)

As entradas do modelo são parâmetros geométricos do motor, como dimensões do coletor de ar e curso do pistão, o combustível utilizado e as condições de operação. O resultado obtido para a curva de pressão para o ponto de máximo torque é apresentado na Fig. 1.

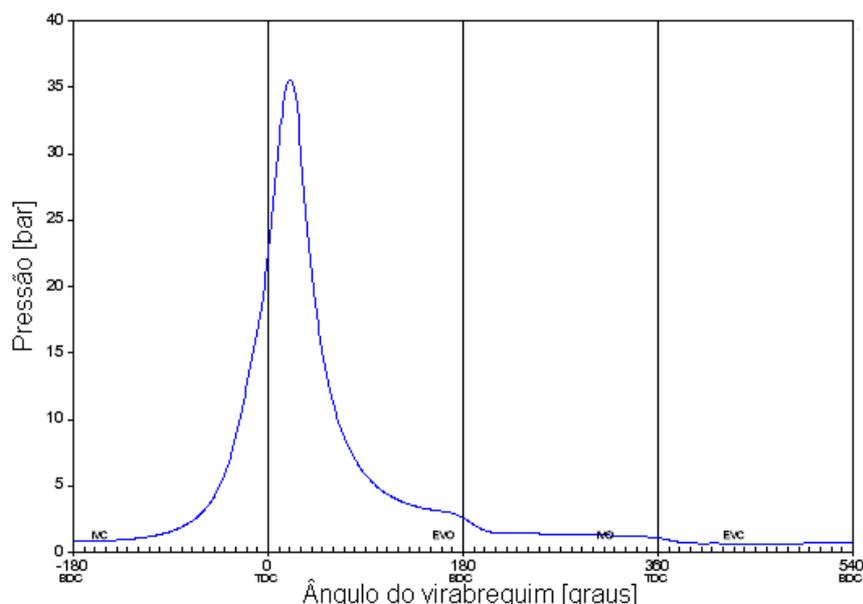


Figura 2. Pressão dos gases de combustão em função do ângulo do virabrequim.

O carregamento considerado na face superior do pistão é então considerado como um pressão distribuída uniformemente de 3,6MPa.

Em seguida realizou-se a modelagem do movimento do pistão no software PISDYN®. Com esta modelagem obtêm-se os carregamentos a serem aplicados nas saias do pistão e a aceleração do movimento de primeira ordem do pistão, no valor de 2,2MPa e de 5000m/s², respectivamente.

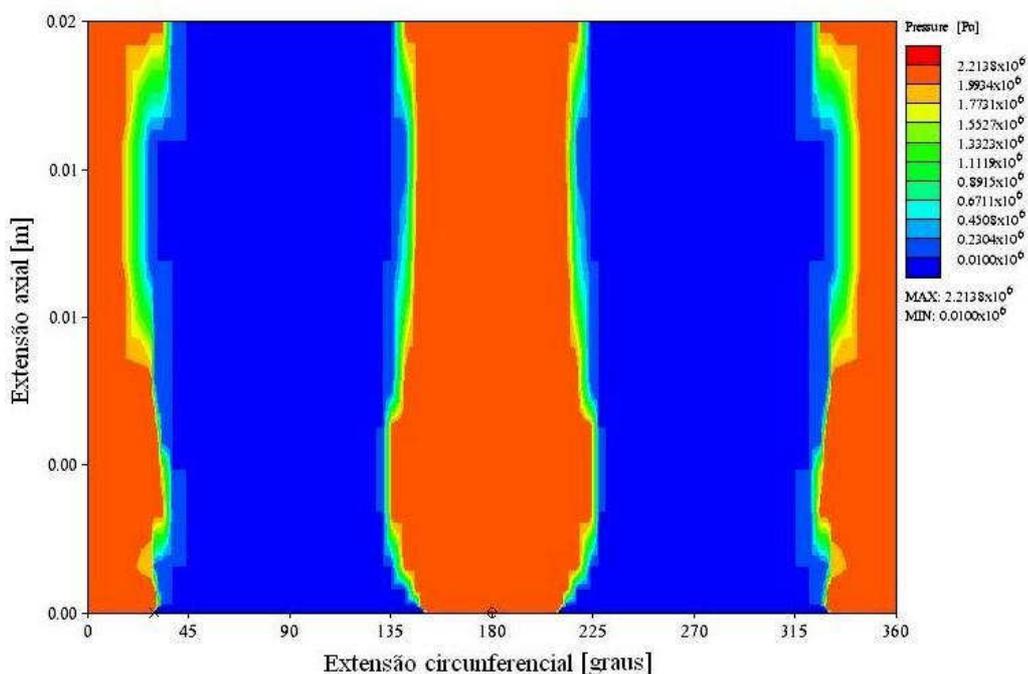


Figura 3. Distribuição de pressão atuante nas saias do pistão

3. Otimização

Uma vez determinados os carregamentos estáticos de pressão na face superior do pistão (Seção 2), passa-se para a etapa de otimização topológica preliminar do componente.

Primeiramente, o domínio estendido de otimização deve ser definido. Uma vez que apenas carregamentos de pressão são considerados nesta etapa, as regiões do buraco do pino do pistão, as paredes laterais, a região do porta-anéis e a face superior do pistão não devem sofrer alterações. Desta forma, define-se estes volumes como regiões não-otimizáveis. Entretanto, os efeitos estruturais das mesmas são considerados durante os processos de otimização por meio das soluções pelo método dos elementos finitos inerentes ao processo de otimização topológica. Por fim, define-se

o domínio de otimização como sendo o volume interno do pistão, desconsideradas as regiões já definidas como não-otimizáveis.



Figura 4. Vista externa e inferior do pistão.

Sendo assim o domínio estendido de otimização e as regiões não-otimizáveis são discretizados em elementos finitos, com resultado apresentado na Fig. 2. O domínio de otimização está colorido em azul e as regiões não-otimizáveis estão coloridas em amarelo. A condição de contorno é o engastamento do semicírculo superior dos furos do pino e os carregamentos aplicados são as pressões atuantes nas saias e na cabeça do pistão.

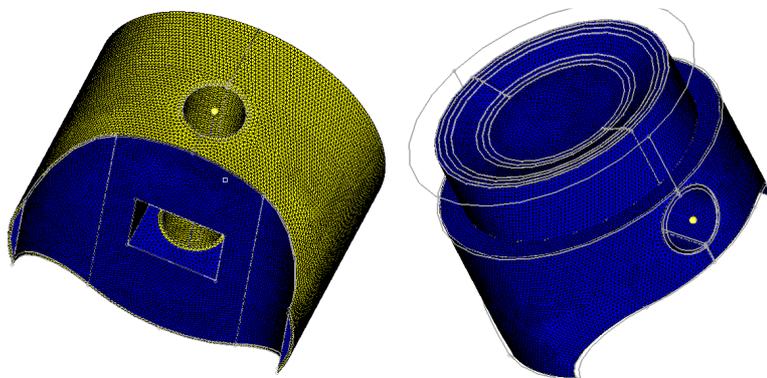


Figura 5. Malha gerada.

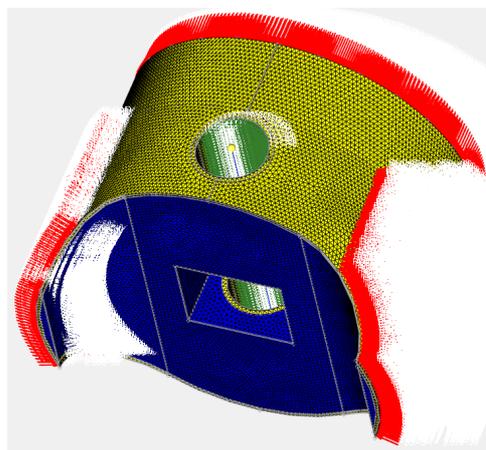


Figura 6. Malha gerada, com carregamentos aplicados e condições de contorno.

Para se definir uma metodologia para a abordagem do problema de otimização é necessário considerar as condições de operação do componente, os requisitos mecânicos de desempenho e as limitações do material e do processo de fabricação. Como proposto por Sonsino e Esper (1994), em componentes de motor a combustão interna, a tensão de von Mises não deve exceder a tensão de escoamento do material, considerando um fator de segurança 1,6. Além disso, é desejável que se obtenha resultados do processo de otimização que sejam efetivamente fabricáveis. Isto pode ser conseguido através da utilização de restrições de manufatura. Comumente pistões são fabricados através de processos de forja e fundição. Desta forma, é interessante a utilização de uma restrição de direção de desmoldagem, para assim considerar as limitações destes processos. Além disso, no caso de processos de fundição, há uma espessura mínima necessária para o adequado vazamento do metal no molde. Para que tal fenômeno possa ser considerado, pode-se utilizar uma restrição de *minimum member size*.

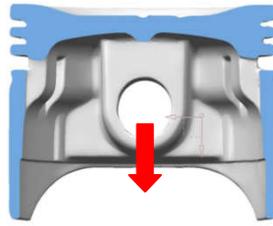


Figura 7. Vista em corte do pistão com direção de desmoldagem.

Considerando as condições expostas, os seguintes cenários finais de otimização, considerando os carregamentos completos, são propostos.

- a. Caso A'
Objetivo: minimização da flexibilidade
Restrições: máxima fração do volume inicial, direção de desmoldagem, *minimum member size*
Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio de otimização
- b. Caso B'
Objetivo: minimização da massa
Restrições: restrição de máxima tensão de von Mises, direção de desmoldagem, *minimum member size*
Variável de projeto: densidade dos elementos do domínio de otimização

4. Resultados

O objetivo para o caso A é a redução da flexibilidade geral do componente, considerando uma restrição de máxima fração de volume de 0,25. A Figura 5 mostra o resultado para o caso A'.

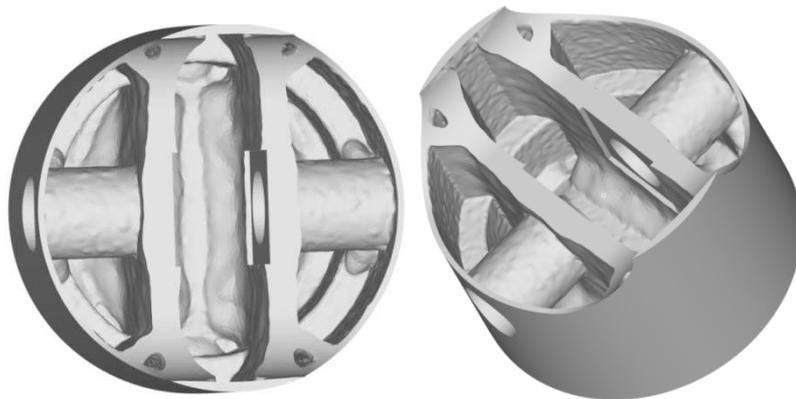


Figura 8. Resultado da otimização para o caso A'.

Finalmente, visando alcançar resultados em que se considere a tensão de escoamento do material do pistão e o coeficiente de segurança de 1,6, uma restrição de tensão máxima é utilizada no caso B'. Já as restrições de manufatura são as mesmas encontradas no caso A'.

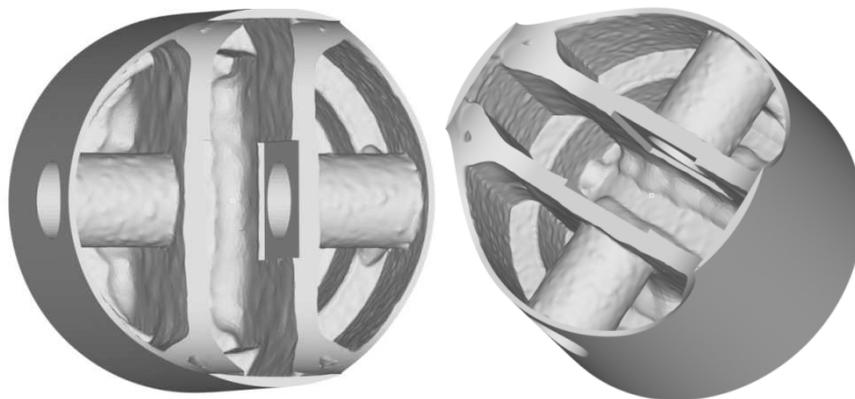


Figura 9. Resultado da otimização para o caso B'.

Na Tab. 3 pode-se ver uma comparação numérica entre os resultados dos diversos casos propostos.

Tabela 3 – Comparação entre os resultados para cada caso de otimização.

Caso	Objetivo	Restrição	Restrição de manufatura	Massa	Redução de massa	Tensão
A'	Min. flexibil.	Vol frac < 0,25	Desmold. e <i>min. member</i>	25,9g	19,06%	202MPa
B'	Min. massa	Tensão < 195MPa	Desmold. e <i>min. member</i>	22,7g	28,9%	192MPa

(1) Tomando como base o pistão original de 32g.

Como passo subsequente, realizou-se a análise térmica dos resultados de otimização, que consiste numa simulação de transferência de calor, utilizando o fluxo de $0,33\text{W/mm}^2$ encontrado nas simulações termodinâmica do motor. A seguir apresenta-se o resultado para o caso B'.

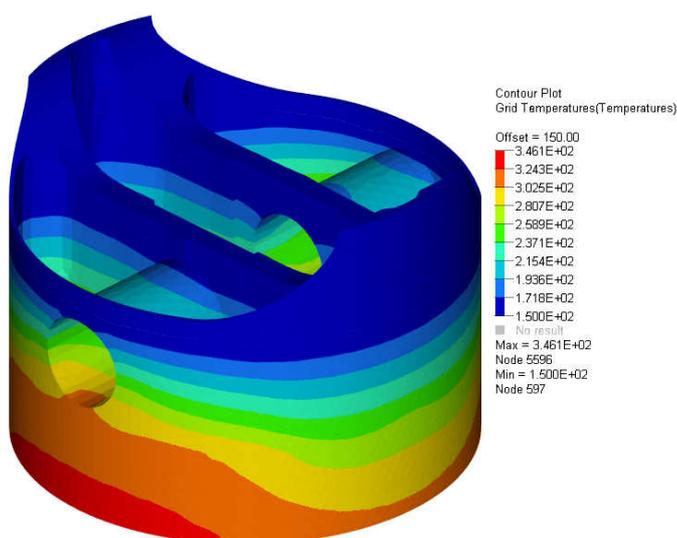


Figura 10 – Distribuição de temperatura do pistão B'

Finalmente, realizou-se uma simulação estática do componente final, visando a validação do comportamento estrutural do mesmo.

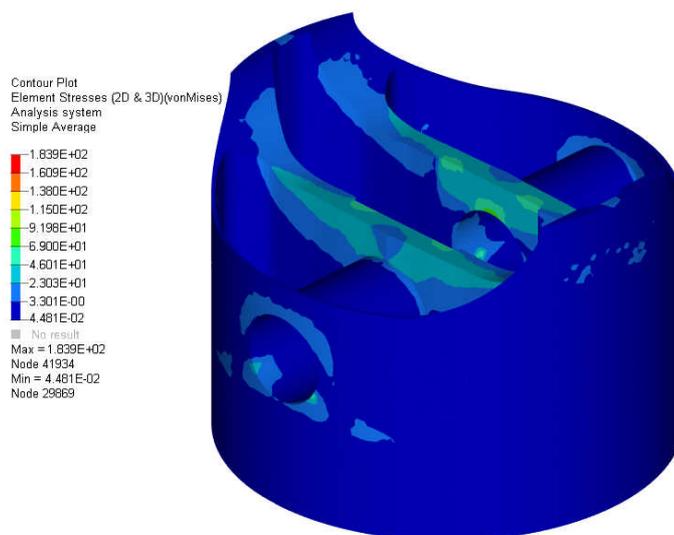


Figura 11 – Resultado de tensão para simulação estrutural de verificação – Caso B'

5. Conclusões

Este trabalho mostra a viabilidade de aplicação da otimização topológica para um pistão de um motor a combustão interna, considerando apenas os carregamentos estáticos de pressão aplicados na face da cabeça do pistão. Pode-se notar que há redução significativa de massa para os resultados obtidos nos casos nos quais se utiliza a restrição de fração de volume máxima. Já no caso D a otimização levou a massa a um mínimo, considerando a tensão de escoamento do material, já com coeficiente de segurança, como uma restrição. Fazendo isso, o nível de tensão na estrutura é elevada e a sua massa é reduzida de 56,2% em relação ao domínio original, 32% menos massa que o resultado obtido no caso A. Nota-se que, com a aplicação dos carregamentos dinâmicos, o conceito de estrutura muda consideravelmente. Além disso, o potencial para a redução de massa caiu em cerca de 50% com a aplicação destes novos carregamentos.

A avaliação térmica dos resultados mostrou que os componentes obtidos nos casos A' e B' da malha 1, nos quais foram obtidos as maiores reduções de massa, são viáveis. Com isso obteve-se de massa máxima de 28,9%, levando a um componente final com massa de 22,7g.

Análises que poderiam dar continuidade aos resultados apresentados neste trabalho seriam a consideração de efeitos de comportamento à fadiga, análise considerando o contato das saias do pistão com a camisa do cilindro e o estudo de outros materiais. Sugere-se o estudo da aplicação de materiais cerâmicos e de materiais gradado-funcionais (MGF).

6. Agradecimentos

O primeiro autor agradece à ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo pelo suporte através de uma bolsa de estudos. O primeiro e o último autor agradecem à ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo pelo apoio técnico, FDTE, Altair Engineering do Brasil e Robtec.

7. Referências

- Bendsoe, M. B. "Topology Optimization. Theory, Methods and Applications", Springer, Berlim, 2003
- Bueno, E. M. R. "Sobre metodologias de modelagem estrutural de pistões: plasticidade e contato". Tese(Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- Heywood, John B. "Internal Combustion Engine Fundamentals". McGraw-Hill, New York, 1988
- Kubicki, Maciej "Spatial and temporal stress distributions in spark ignition engine pistons at wide open throttle". In: Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division Charleston, 2007
- Poinsot, Thierry "Theoretical and Numerical Combustion". Edwards, Philadelphia, 2005
- Sonsino, C. M. and Esper, F. J., "Fatigue Design for PM Components," European Powder Metallurgy Association (EPMA), 1994.
- Turns, Stephen R. "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications". McGraw-Hill, 2000
- Vignesh, C. "Prediction of heat flow and temperature for pistons with improved cooling methods". In: Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, 2005

8. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Design of a piston by using the topology optimization method

Guilherme Vinícius França dos Santos

gvfrancasantos@gmail.com

Emílio Carlos Nelli Silva

ecnsilva@usp.br

Abstract. This project is concerned with the development of a piston for a lightweight spark-ignition four-stroke internal combustion engine, using the topology optimization method. The proposed project includes also the modeling of the combustion and gas exchange processes which are present in a typical four-stroke engine. The optimization problem of a combustion internal engine piston is complex, since it must consider various kinds of loads and extreme operating conditions. First of all, the thermal (spatial temperature distribution), dynamic (accelerations) and static (pressure from combustion chamber) loads acting on the piston are determined by simulating the cycle of a reference mono cylinder engine (Honda GX-35) using RICARDO INC. softwares. These loads are inputs for a FEM analysis, in which the safety factor of the component is determined and compared with typical safety factors used in engine developments, in order to decide whether the loads are consistent. The next step is the development of a piston using the topology optimization method, using the software OptiStruct®, as optimization solver and Hypermesh®, as mesh generator. Then a thermal analysis of the obtained results is performed, in order to determine the temperature distribution. The last step is a verification finite-element analysis, in order to testify the validity of the results.

Keywords: Engine design; Topology Optimization; Engine Simulation; Finite Element Method