TÍTULO: PROJETO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: ENGENHARIAS E ARQUITETURA

SUBÁREA: ENGENHARIAS

INSTITUIÇÃO: FACULDADE DE ENGENHARIA DE SOROCABA

AUTOR(ES): DANIEL DOS ANJOS SAYAO

ORIENTADOR(ES): DANIELA GRINTACI VASCONCELLOS MINCHILLO

1 Resumo

Este trabalho se dedicou a estudar a utilização de softwares de computador para projeto e análise de componentes de um motor de combustão interna. Com *benchmarking* e aplicação de conceitos de motores [2], um projeto de motor foi feito e seu trem de válvulas foi otimizado.

O método dos elementos finitos foi aplicado para prever falhas em um processo de montagem do eixo comando do trem de válvulas com uma simulação estática de expansão e contração de componentes por temperatura. Uma análise dinâmica foi feita para avaliar tensões que causam a falha na possibilidade do choque do pistão com as válvulas. Para as análises, Abaqus®, foi utilizado.

2 Introdução

A engenharia de simulação assistida por computador possui utilidade no mercado atual, prevendo falhas na obra de engenharia antes que ocorram e reduzindo custos com protótipos e tempo de projeto. Esta iniciação cientifica serviu para o orientado conhecer ferramentas para simulação, a saber, modelação assistida por computador que possibilita movimento (cinemática e dinâmica) e o método dos elementos finitos, para verificar tensões e deformações.

3 Objetivos

O objetivo desse projeto foi projetar e estudar o comportamento de componentes de um motor de combustão interna utilizando softwares de engenharia assistida por computador.

4 Metodologia

O métodos utilizados para a execução do trabalho foram desenho assistido por computador paramétrico, dinâmica multicorpos e o método dos elementos finitos para simular situações com os componentes. O Método utilizou análises estáticas e dinâmicas.

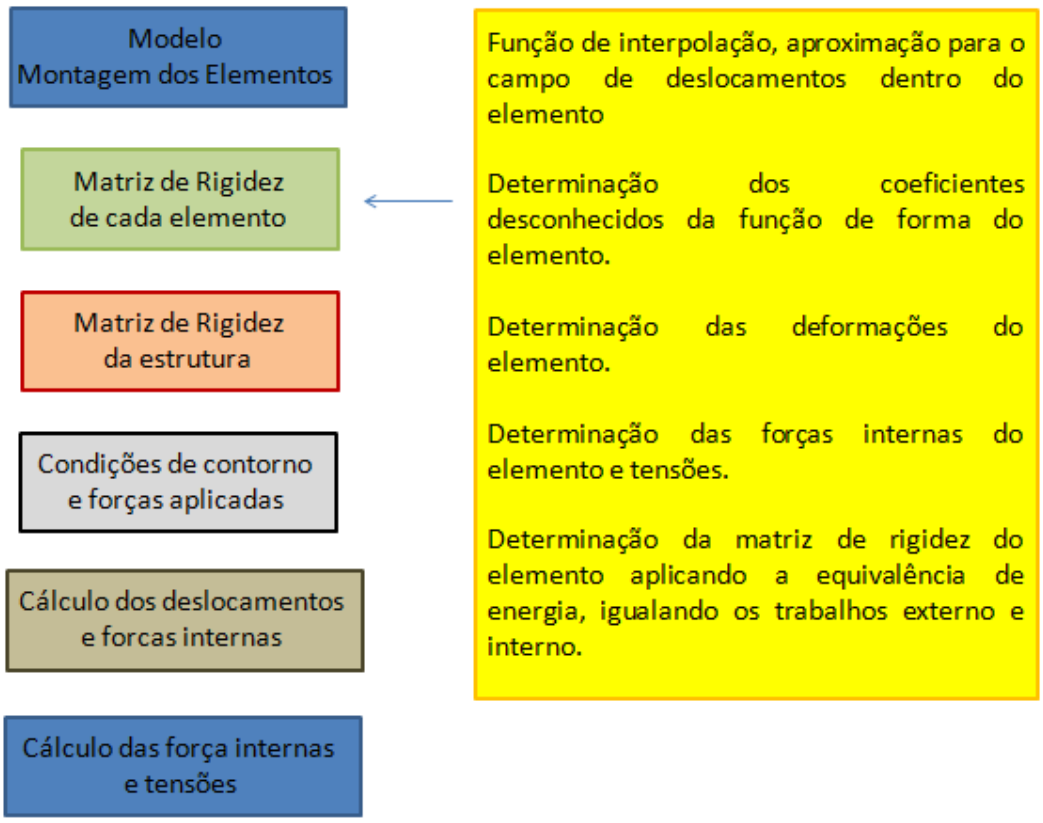


Figura 1 – Método dos elementos finitos

5 Desenvolvimento

5.1 Benchmarking e projeto de um motor

Para se modelar um motor, o orientado recolheu alguns componentes de um motor Honda CBR600 Hornett® na oficina da faculdade e os mediu com o auxílio de um paquímetro, fazendo esboços deles no AutoCAD. Com os esboços, modelos em 3D foram feitos no software Creo Parametric®.

O conjunto do eixo comando levou cerca de 2 dias para ser medido, esboçado e modelado. O conjunto Pistão – Biela, foi um pouco mais trabalhoso, levou cerca de uma semana para ser medido, esboçado e desenhado, em trabalho intermitente. Este foi modelado em Pro/Engineer®, depois foi salvo como formato .STEP para ser utilizado no Creo Parametric®. O virabrequim levou cerca de três dias para ser medido, esboçado e modelado. Outros componentes menores, como os tuchos, molas e válvulas foram medidos e projetados no esquema da montagem. A

montagem foi feita utilizando-se de graus de liberdade, permitindo ao modelo, simular seu funcionamento dinâmico e cinemático, no ambiente *Simulation*.

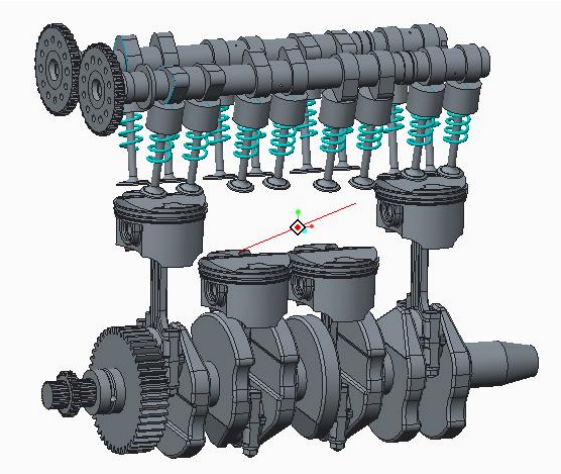


Figura 2 – Modelo medido do motor 600 cc

Com este modelo, foi pensado em se alterar o projeto para se utilizar balancins flutuantes no trem de válvula. O projeto [5] utilizou de um software específico chamado *KinValve*, que projeta o curso do balancim e gera o perfil de came para acompanhar o rolete. O balancim possui menor atrito comparado aos tuchos.

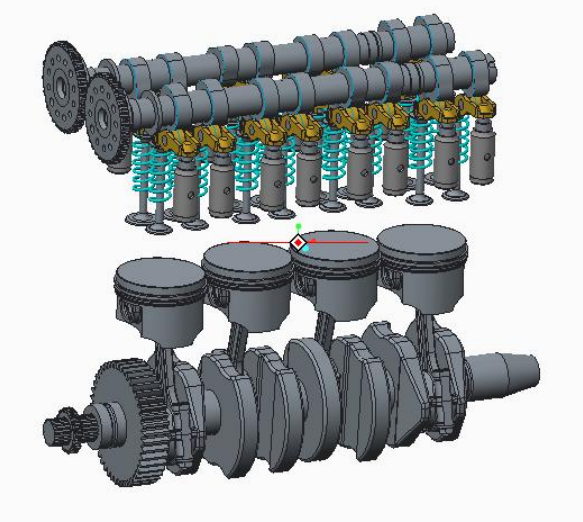


Figura 3 – Modelo com balancins flutuantes

Como tendência de *downsizing*, os motores estão sendo reduzidos de quatro para três cilindros, também a utilização da injeção direta de VCT para recirculação de gases visa a redução das emissões e economia de combustível. Foi feito um projeto final, dando maior ênfase ao trem de válvulas. O eixo comando agora é um tubo com

cames sinterizados, para redução de massa e o diâmetro dos pistões foram aumentados, para manter o mesmo volume de cilindrada.

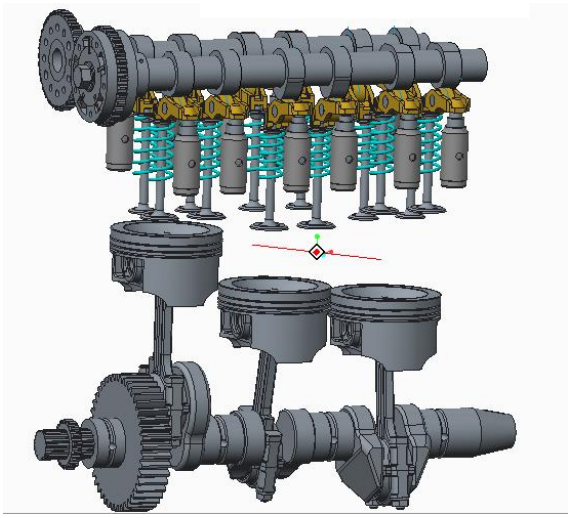


Figura 1 – Modelo de motor com três cilindros

5.2 Simulação da montagem de um eixo comando pelo método dos elementos finitos

Nos últimos anos, houve um progresso na tecnologia de produção dos eixos comandos. Os eixos comandos tradicionais eram forjados ou fundidos, sendo maciços e gerando grandes forças inerciais e perdas por atrito. Redução de massa nos componentes do motor gera menores perdas por atrito, aumentando o rendimento e economia de combustível. Os novos eixos comandos são tubos, os cames são elementos sinterizados. A montagem se da pelo resfriamento do tubo e aquecimento dos cames. Um robô gira o eixo para que os cames sejam montados precisamente em sua posição.

Para simular a montagem do came no tubo. A análise será feita com elementos tridimensionais que terão sua formulação da própria biblioteca de elementos do software utilizado para análise. Os dados de material importantes a serem fornecidos são: Módulo de elasticidade do aço: 210.000 MPa e coeficiente de Poisson: 0,3.

Os dados de fixação (condições de contorno) que correspondem ao dispositivo serão aplicados a uma face do tubo, como um engaste, a face externa do came será fixada, como se fosse presa pelo robô.

Os dados de carregamento serão dados pela variação de temperatura seguindo a lei de deformação linear [3]:

$$\Delta L = L. \propto . \Delta T \qquad \text{Equação 1}$$

Sendo ΔL a deformação causada pela diferença de temperatura;

L o comprimento inicial do corpo;

α o coeficiente de expansão térmica;

ΔT a diferença de temperatura.

Manipulando-se a equação, para que se pareça com o modelo do FEM, com uma matriz de carregamento igual a uma matriz de rigidez vezes a matriz de deformação, obtemos a seguinte equação:

$$\Delta T = \frac{1}{\propto . L} . \Delta L \qquad \text{Equação 2}$$

- Vemos que a matriz de rigidez irá depender da geometria do modelo (L) e do coeficiente de expansão térmica do aço. Este dado deve ser também fornecido ao modelo, dado por $11{,}7.10^{-6}\ (C°)^{-1}$.

Agora, com o modelo vindo do projeto, os procedimentos planejados, os dados necessários para as entradas definidos, iremos ao pré-processador para realizar a simulação. Foi utilizado o Abaqus® [4]. O primeiro procedimento foi importar o eixo comando em formato STEP. Um material foi criado sob nome "*steel*" com os dados do módulo de Young, coeficiente de Poisson e coeficiente de expansão térmica previamente citados, uma seção homogênea foi dada para as peças com os dados do material, o componente foi adicionado a montagem.

Um *step* foi criado como "*Coupled-temp displacement*" (analise térmica), um *Predefined Field* (condição inicial) foi dado com 26 graus Celsius no *step* inicial. Para condições de contorno (*Boundary conditions* ou BC), uma BC de *Encastre* em uma das faces do eixo e na face externa do came foi criada, uma BC de temperatura -100 graus Celsius na face externa do tubo e outra BC de temperatura de 170 graus Celsius na face interna do came foram aplicadas.

Para a malha, foi utilizado um *seed* (distância unitária entre os nós) de valor 2, elementos C3D8T, hexaédricos foram preferidos em relação a elementos tetraédricos. A malha ficou com 2211 elementos para o tubo e 780 elementos para o came.

Com os dados de entrada, o "*job*" (cálculo para ser resolvido) foi criado e resolvido, houve convergência. Os resultados serão apresentados e discutidos posteriormente.

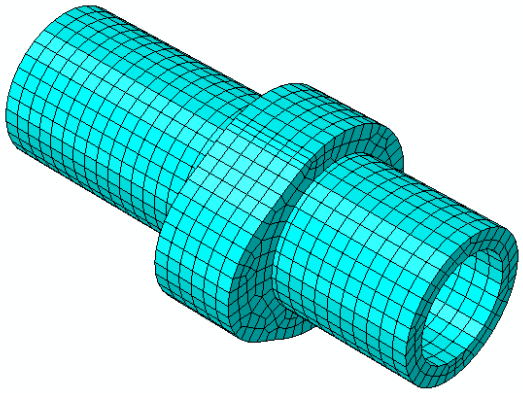


Figura 5 – Malha da montagem

5.3 Analise dinâmica do choque entre pistão e válvulas

No ano de 2012, na competição nacional de formula SAE, uma falha no motor ocasionou a perda de pontos no enduro. Ao se abrir o motor na oficina, foi constatado o seguinte cenário:



Figura 6 – Cabeça do pistão danificada por choque com válvula

Foi proposto analisar quais as tensões que ocasionaram a falha do material do pistão, decorrentes pelo choque com as válvulas. Para isso, uma análise dinâmica foi feita, para se avaliar tensões em um período de tempo. Em aspectos simplificados, uma análise dinâmica ocorre em função do tempo, dadas as condições de contorno e carregamentos, as tensões se propagam em forma de uma onda.

Para a análise, o primeiro modelo do motor foi utilizado, com a geometria similar ao motor que apresentou falha na competição.

Após o planejamento, os dados utilizados para os materiais da análise foram:

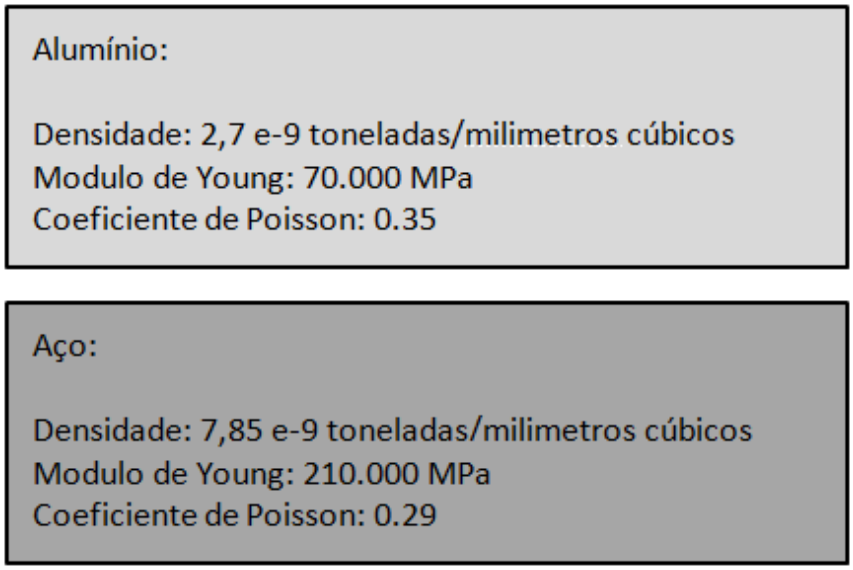


Figura 7 – Dados de material

Para determinar a velocidade inicial do pistão, que foi aplicada como condição de contorno para a análise, as fórmulas do capitulo 2 do livro de John Heywood [2] foram utilizadas, a figura abaixo mostra como isso foi obtido:

Ratio of connecting rod/crank radius	R	3.8
Conn rod lenght (mm)	l	95
Crankshaft radius (mm)	a	25

Fórmula $R = \frac{l}{a}$

Piston velocity ratio	Sp/!Sp	0.843995
Crank angle (rad)	e	0.53
Ratio of connecting rod/crank radius	R	3.8

Fórmula $\frac{S_p}{\bar{S}_p} = \frac{\pi}{2} \sin\theta \left[1 + \frac{\cos\theta}{(R^2 - \sin^2\theta)^{1/2}}\right]$

Mean piston speed (mm/s)	!Sp	10000
Piston stroke (mm)	L	50
Crankshaft rotation (rps)	N	100

Fórmula $\bar{S}_p = 2LN$

Instantaneous speed (mm/s)	Sp	8400
Piston velocity ratio	Sp/!Sp	0.84
Mean piston speed (mm/s)	!Sp	10000

Fórmula $Sp = \overline{Sp}.\frac{Sp}{\overline{Sp}}$

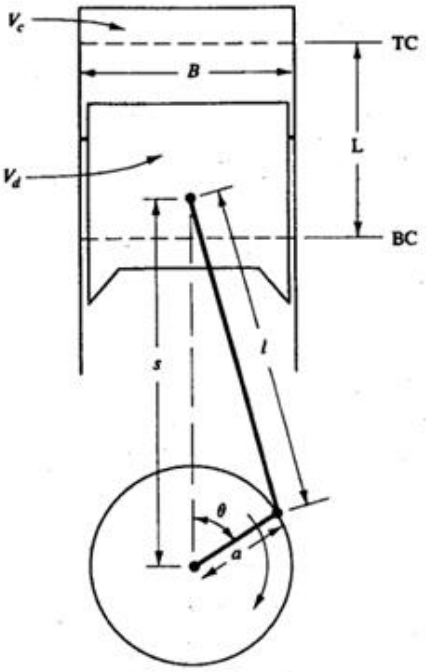


Figura 2 – Determinação da velocidade inicial do pistão

Com a frequência do pistão do motor em 100 Hz, o período se fixou em 0,01 s e o tempo da análise foi adotado em 10% desse valor, pois corresponde em um trecho do deslocamento do motor entre o ponto morto inferior (ver BC na figura acima) e o ponto morto superior (TC).

Com todos os dados de entrada fixados, o modelo foi importado no software de pré-processamento. As válvulas foram fixadas, contato com coeficiente de atrito 0,1 foi adotado entre os componentes, o tipo de *step* adotado foi *"Dynamic,Explicit"* (análise dinâmica). Todos os dados de condições de contorno previamente citados neste tópico foram incluídos, sendo materiais e velocidade inicial do pistão.

A malha foi feita apenas na parte superior do pistão, com 6400 elementos C3D4, tetraédricos, com *seed* global de 5. Para as válvulas, 497 elementos C3D4 em cada válvula, apenas na sua parte inferior com *seed* global de 3.

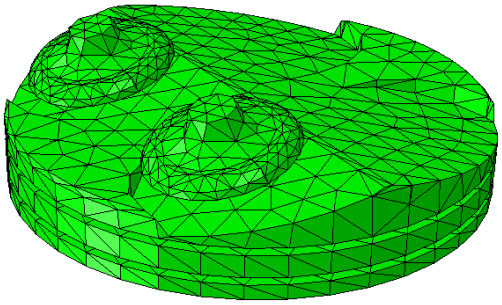


Figura 9 – Malha da analise dinâmica

Após o cálculo, os resultados analisados foram os do no momento do impacto. Serão expostos adiante.

6 Resultados

Os resultados da análise do eixo comando deixou constatar que o processo de resfriamento do eixo e aquecimento do came com a geometria projetada permite que haja folga suficiente para a montagem, cerca de 0,5 a 0,7mm. Após a montagem, com os componentes unidos por interferência, a tensão máxima dessa interferência fica na ordem de 35 MPa, que não é alta o suficiente para risco de falha do material, com tensão de escoamento maior que 800 MPa.

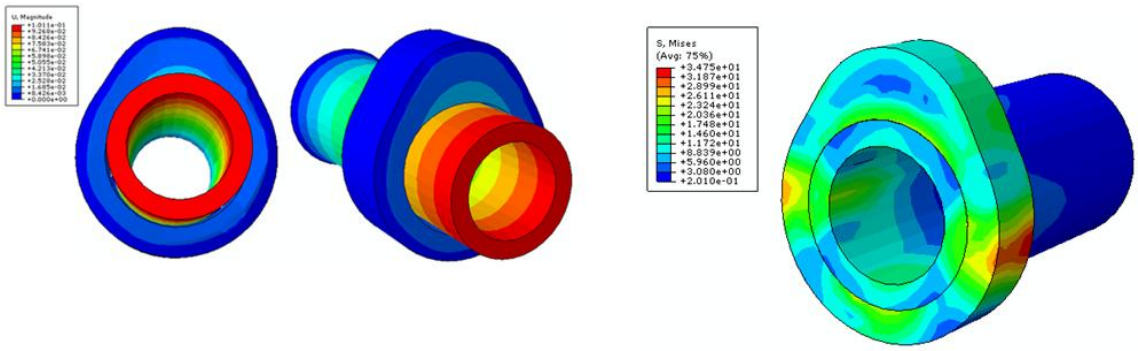


Figura 10 – Resultados da montagem do eixo comando. A esquerda as deformações causadas pelo aquecimento do furo do came e resfriamento da superfície externa do tubo. A direita, as tensões com as peças prensadas uma contra a outra.

Analisando os resultados da simulação do choque do pistão, para um material com tensão de escoamento avaliado em 240 MPa e tensão de ruptura 300 MPa, estar submetido a uma tensão na ordem de 1400 MPa em uma área relativamente pequena, mesmo que por pouco espaço de tempo pode ser responsável pela falha do material.

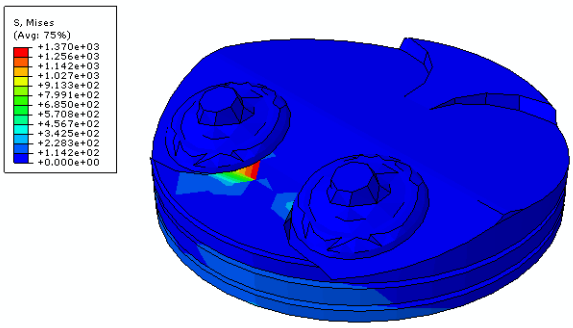


Figura 11 – Resultado das tensões na cabeça do pistão, no momento da batida com as válvulas.

7 Considerações finais

A utilização do computador para fazer o projeto e as simulações gerou custo zero ao projeto, por parte do orientado. Para empresas, o custo seria estimado apenas em *software*, *hardware* e Mão de obra especializada. A utilização do método dos elementos finitos possibilitou a análise de tensões e deformações de geometrias complexas, como os elementos de motor vistos aqui. Fatores como o conhecimento das propriedades dos materiais, a imposição de condições de contorno, tipo de elementos a serem utilizados e o número de elementos na simulação se tornaram imperativos para a precisão e exatidão dos resultados.

O aumento do número de elementos nas duas análises possivelmente aumentaria a exatidão e precisão dos resultados, porém os cálculos seriam mais demorados e necessitariam de um *hardware* mais potente para efetuar os cálculos.

8 Fontes Consultadas

[1] Alves Filho, Avelino – Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE, Érica, São Paulo.

[2] Heywood, John B – Internal Combustion Fundamentals, McGraw Hill, New York, NY, USA.

[3] Halliday. Resnick, Walker – Fundamentos de Física 2, LTC, São Paulo.

[4] Getting Started with Abaqus – Interactive Edition, 3DS Simulia, Rhode Island, USA.

[5] Haas, Michael - Sistemas de comando de válvulas para motores de combustão interna -Desenvolvimento, fabricação, aplicações, Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG.