

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA DO VOLUME MÍNIMO DE UM CILINDRO DE UM  
MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA ENTRE O MODELO 3D E O PRODUZIDO

por

Gustavo Gottert Knies

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2010

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA DO VOLUME MÍNIMO DE UM CILINDRO DE UM  
MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA ENTRE O MODELO 3D E O PRODUZIDO

por

Gustavo Gottert Knies

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Juan Carlos Sandoval Ortiz

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 06/07/2010

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Guenter e Lúgia, e a minha irmã Carolina pelo apoio incondicional.

Ao Guilherme Sieben e ao Geraldo Pizzato que possibilitaram que este estudo pudesse ser realizado.

A UFRGS pela formação acadêmica.

E aos colegas pela amizade.

KNIES, G. G., **Análise estatística da diferença do volume mínimo de um cilindro de um motor a combustão interna entre o modelo 3D e o produzido**. 2010. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **RESUMO**

Neste trabalho é realizado um estudo da variação do volume mínimo de um cilindro (unidade motora) entre: o volume mínimo calculado pelo software de modelagem 3D e o volume mínimo mensurado em um cilindro produzido. O rendimento térmico de um motor é proporcional a relação de compressão e, quanto maior a compressão maior o rendimento térmico do cilindro. É de extrema importância para o fabricante do cilindro produzir o cilindro com o volume mínimo o mais próximo possível da especificação de projeto. Além da diferença ser prejudicial para o desenvolvimento de novos cilindros. O escopo do presente trabalho é avaliar a variação de volume entre o software de modelagem 3D e o volume medido na bureta. Na avaliação do problema foi utilizado o histórico de três anos da produção do cilindro que, mostrou que as cotas com influência no volume mínimo encontram-se próximas de sua especificação nominal. Foi feita uma análise da influência de algumas cotas relacionadas à câmara de combustão no volume mínimo do cilindro onde foi concluído que a variação dessas cotas, dentro de suas tolerâncias, não altera além do limite de projeto o volume mínimo do cilindro. Uma análise do sistema de medição foi efetuada sendo constatada a existência de um espaço vazio no dispositivo de medição afetando a medição de volume mínimo do cilindro.

**PALAVRAS-CHAVE:** medições mecânicas, câmara de combustão, modelagem 3D.

KNIES, G. G. **Statistical Analysis of the difference of the cylinder, of a internal combustion engine, minimum volume between the 3D modeling cylinder and the produced cylinder** 2010. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **ABSTRACT**

This paper studied the variation of the minimum volume of a cylinder (motor unit) between: the minimum volume calculated by the 3D modeling software and the minimum volume measured in a produced cylinder produced. As the thermal efficiency is proportional to the compression ratio, the greater is the compression ratio the greater is the cylinder thermal efficiency. It is extremely important for the manufacturer to produce the cylinder with the minimum volume as close as possible to the project specification. Besides, the difference is detrimental to the development of new cylinders. The scope of this work is to evaluate the variation in volume between the 3D modeling software and the volume measured in the burette. A three years production historical of the cylinder showed that the quotas with influences on the minimum volume are close to their nominal specification. An analysis was made of the influence of some quotas related to the combustion chamber in the cylinder minimum volume where it was concluded that the variation in those quotas within their tolerances, not change beyond the project boundary the cylinder minimum volume. An analysis of the measurement system was made where it was found that the burette used to measure the volume was properly calibrated. It was also identified the existence of an empty space that is affecting the measurement of cylinder minimum volume.

**KEYWORDS:** mechanical measurements, combustion chamber, 3D modeling.

## ÍNDICE

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 2      | OBJETIVO.....   | 1  |
| 3      | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....   | 1  |
| 3.1    | Rendimento Térmico do Ciclo Otto .....  | 1  |
| 3.2    | Ferramentas Estatísticas .....  | 2  |
| 3.2.1  | Diagrama de causa e efeito .....  | 2  |
| 3.2.2  | Controle estatístico de processo .....  | 3  |
| 3.2.3  | Critério de Chauvenet .....   | 4  |
| 3.2.4  | Tipos de erros .....  | 4  |
| 3.2.5  | Incerteza padrão .....  | 4  |
| 3.2.6  | Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação “tipo A”) .....    | 5  |
| 3.2.7  | Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação “tipo B”)..... | 5  |
| 3.2.8  | Incerteza padrão e incerteza expandida.....   | 5  |
| 3.2.9  | Fatorial completo .....   | 6  |
| 3.2.10 | Princípios da formação de imagem em tomografia computadorizada .....                | 6  |
| 4      | METODOLOGIA.....  | 6  |
| 5      | RESULTADOS E DISCUSÕES .....  | 7  |
| 5.1    | Influência de Cada Cota .....   | 7  |
| 5.2    | Histórico de Medições .....   | 7  |
| 5.3    | Dispositivo de Medição de Volume .....  | 8  |
| 5.4    | Medições de Alguns Cilindros.....   | 9  |
| 5.5    | Diagrama Espinha de Peixe .....   | 11 |
| 5.6    | Outras Medições .....   | 12 |
| 5.7    | Cilindro do Fabricante II .....   | 13 |
| 5.8    | Cilindro Prismático.....  | 14 |
| 6      | CONCLUSÕES.....   | 15 |
| 7      | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 15 |
|        | APÊNDICES .....   | 16 |
|        | ANEXOS ..   | 17 |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Revolução Industrial, surgiu a necessidade de fontes motoras para suprir a demanda proveniente da mecanização da atividade humana. Distintas fontes foram testadas. O motor a combustão interna foi uma delas. Conforme descreve Bosch, 2005, os motores de combustão interna geram energia por meio da conversão de energia química contida no combustível em calor produzindo assim trabalho mecânico. Com isso, a energia do calor aumenta a pressão dentro de um meio que realiza trabalho à medida que se expande.

A relação de compressão é dada pela razão entre os volumes máximo e mínimo da câmara de combustão. No motor a combustão interna, o rendimento térmico do ciclo padrão é função apenas da relação de compressão da mistura ar/combustível, e o rendimento aumenta com o aumento desta relação conforme Wylen e Sonntag, 2003.

Desta forma, o controle do volume da câmara de combustão é muito importante, pois as legislações a níveis mundiais estão cada vez mais forçando o desenvolvimento de fontes mais eficientes e menos poluidoras.

O presente trabalho estuda o cilindro (unidade motora) produzido por uma empresa de equipamentos portáteis motorizados em que o valor do volume mínimo de câmara de combustão medido no produto final é superior ao valor quantificado em um modelo tridimensional (3D).

Apesar de o valor do volume mínimo deste cilindro estar dentro da tolerância exigida em projeto, um mínimo descontrole no processo produtivo pode gerar cilindros com volumes mínimos fora do especificado, causando deficiência funcional como alteração de potência da máquina, entre outros. Assim, um aumento do valor deste volume mínimo acarreta uma menor relação de compressão e conseqüentemente um menor rendimento térmico.

No cilindro finalizado, o volume é medido através de um sistema de medição composto por uma bureta e dois padrões (um para o fundo do cilindro e outro para a vela de ignição) que são utilizados para “fechar” o cilindro. Como fluido de medição, é utilizado álcool propílico por ter uma baixa viscosidade e uma baixa tensão superficial.

Este descompasso entre os volumes obtidos na teoria (modelo 3D) e na prática (sistema de medição) dificulta o desenvolvimento de novos produtos, pois não é possível confiar nos valores calculados pelo software de modelagem. Motivado por essas razões, este trabalho visa apresentar uma explicação para esta diferença de volume.

## 2 OBJETIVO

Estudar a causa raiz da variação do volume mínimo entre o modelo 3D e o cilindro produzido e propor soluções para eliminar a variação de volume ou um novo método para medir o volume mínimo

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Rendimento Térmico do Ciclo Otto

O motor a combustão interna ciclo Otto é uma máquina que trabalha com os princípios da termodinâmica e com os conceitos de compressão e expansão de fluidos gasosos para gerar força e movimento rotativo. Criado e patenteado por Nikolaus August Otto, por volta do ano de 1866, este motor funciona com um ciclo de quatro tempos e os mesmos princípios até os dias atuais. A figura 3.1 ilustra os quatro tempos do ciclo.

Conforme Giacosa, 1967, o rendimento térmico ideal para o ciclo Otto teórico é:

$$n_{th} = \frac{\text{calor fornecido} - \text{calor rejeitado}}{\text{calor fornecido}} \quad (3.1)$$

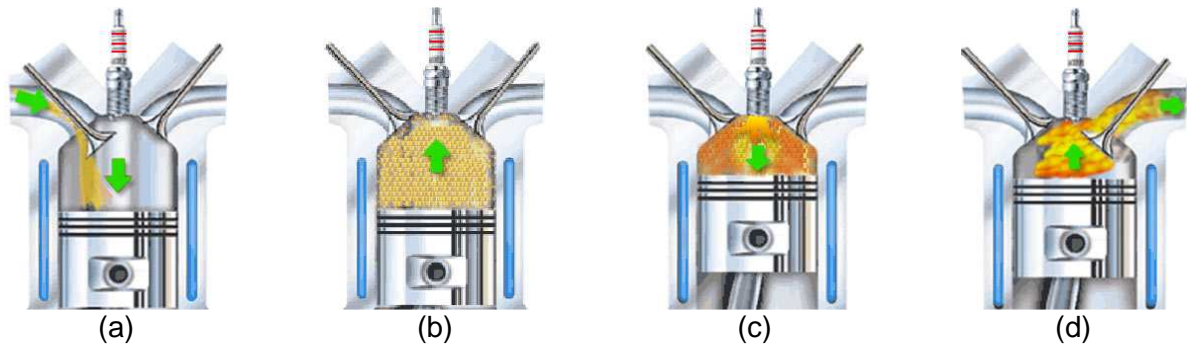


Figura 3.1 – Ciclo Otto: (a) admissão; (b) compressão; (c) explosão; (d) escape

Nos ciclos ideais, considera-se apenas ar como fluido operante comportando-se como um gás perfeito. Por isso, os calores específicos  $c_v$  são considerados constantes e iguais ao do ar. Como o calor é rejeitado e fornecido a volume constante e o trabalho durante estas transformações é nulo:

$$n_{th} = 1 - \left( \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right) \quad (3.2)$$

onde  $T$  representa a temperatura,  $V$  o volume do fluido e o número subscrito representa o ciclo do motor: 1 -início da compressão, 2 – início da explosão, 3 – início da expansão e 4- escape dos gases. Pela expansão e pela compressão serem adiabáticas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (3.3)$$

em que  $k$  é a razão entre os calores específicos à pressão constante e ao volume constante. Logo:

$$n_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-k} \quad (3.4)$$

Sendo  $r_v$  é a taxa de compressão conforme Bosch, 2005:

$$r_v = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (3.5)$$

Onde  $V_h$  é volume do curso do pistão do motor e  $V_c$  o volume mínimo do cilindro.

## 3.2 Ferramentas Estatísticas

### 3.2.1 Diagrama de causa e efeito

Conforme Grant e Leavenworth, 1996, quando uma não-conformidade é isolada para futuros estudos, a atenção se volta para a análise daquilo que causou o desvio da especificação, a causa raiz. Os japoneses desenvolveram uma eficiente ferramenta de análise para descobrir a causa raiz dos problemas chamada de diagrama de Ishikawa (fig. 3.2). Os passos da análise de causa e efeito são os seguintes:

- 1) Definir o problema. O problema pode ser óbvio; mas descobrir sua causa raiz pode requerer o uso de histogramas, cartas de controle, diagrama de Pareto etc.
- 2) Selecionar um método de análise. Comumente o método envolve *brainstorming* com um time de representantes da produção, engenheiros, inspetores, e outras pessoas envolvidas com o item em questão.
- 3) Desenhar o diagrama de causa e efeito.



- 4) Especificar as principais categorias de possíveis fontes do problema.
- 5) Identificar as possíveis causas do problema.

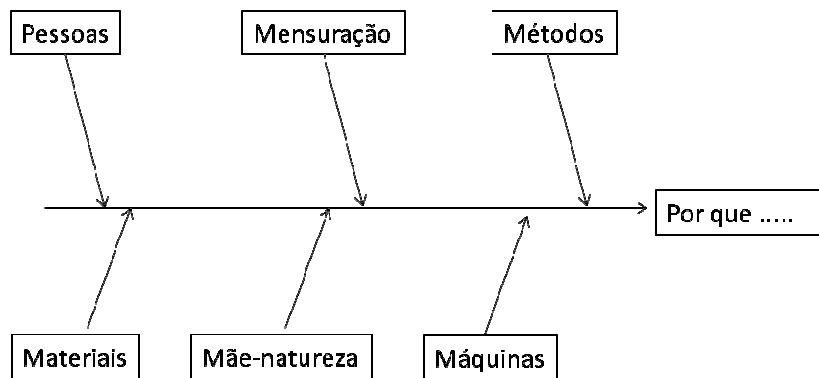


Figura 3.2 – Diagrama de Ishikawa [Grant e Leavenworth, 1996].

### 3.2.2 Controle estatístico de processo

Conforme Paladini, 1990, ao direcionar-se para o processo, o controle de qualidade observa o defeito na fonte, isto é, nas suas causas, atuando de forma preventiva, em uma análise orientada para o futuro.

Muitas das técnicas desenvolvidas pelos matemáticos estatísticos para a análise de dados podem ser usadas no controle da qualidade de um produto. A expressão controle estatístico de processo pode ser usada para cobrir todo o uso de técnicas estatísticas neste propósito. Entretanto ela está comumente ligada à carta de controle que na linguagem técnica são descritas como cartas para variáveis: cartas para média e amplitude e média e desvio.

Segundo Grant *et al.*, 1996, “*um fenômeno pode ser dito sob controle quando se pode prever, dentro de certos limites, como a sua variação pode ser esperada no futuro*”.

Na definição dos limites naturais do processo, primeiramente define-se a média de cada subgrupo (equação 3.6), onde  $\bar{x}$  é o valor da média de cada subgrupo e,  $x_i$  é o valor correspondente a cada amostra.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{x=i}^n x_i \quad (3.6)$$

Em seguida calcula-se a média das médias  $\bar{\bar{x}}$ , sendo  $k$  o número de subgrupos.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{x=i}^n \bar{x}_i \quad (3.7)$$

Para pequenos subgrupos (menos de 10 amostras), devem ser adotados os conjuntos da carta da média e da carta de amplitude, método R.

$$R_i = (x_{max} - x_{min}) \quad (3.8)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{k} (R_1 + R_2 + \dots + R_k) \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (3.10)$$

onde  $R_i$  representa a amplitude de cada subgrupo,  $\bar{R}$  a média das amplitudes,  $\sigma_{\bar{x}}$  o desvio padrão para a amostra e,  $d_2$  um coeficiente da tabela A1 em anexo.

Os limites naturais do processo são definidos pelas equações que se seguem.

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{x} - 3\sigma_{\bar{x}} \quad (3.11)$$

$$LM_{\bar{x}} = \bar{x} \quad (3.12)$$

$$LSC_{\bar{x}} = \bar{x} + 3\sigma_{\bar{x}} \quad (3.13)$$

em que LIC representa o limite inferior de controle, LM linha média de controle e LSC limite superior de controle. Os limites da carta R são definidos por:

$$LIC_R = D_3\bar{R} \quad (3.14)$$

$$LM_R = \bar{R} \quad (3.15)$$

$$LSC_R = D_4\bar{R} \quad (3.16)$$

sendo  $D_3$  e  $D_4$  coeficientes da tabela A1 em anexo.

### 3.2.3 Critério de Chauvenet

Segundo Schneider, 2000, uma amostra de dados pode conter valores espúrios ou duvidosos, que podem constituir erros graves. Para excluí-los, o critério de Chauvenet é empregado a uma amostra de  $n$  eventos. Ele se baseia na identificação do maior desvio da amostra, o que implica em calcular o desvio  $d_i$  de cada evento em relação à média  $d_i = x_i - \bar{x}$ . O critério de eliminação depende do parâmetro  $d_{max}/\sigma$ , e é dado por:

$$\frac{d_i}{\sigma} > \frac{d_{max}}{\sigma} \quad (3.17)$$

onde  $d_{max}$  é o maior desvio e  $\sigma$  o desvio padrão da amostra, experimental ou ainda convencional. Os valores de  $d_{max}/\sigma$  estão na tabela A2 em anexo.

### 3.2.4 Tipos de erros

Conforme Gonçalves, 2002, existem dois principais tipos de erros assim descritos:

- Erro sistemático ( $Es$ ) é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas em idênticas condições de operação. Pode tanto ser causado por um problema de ajuste ou desgaste do sistema de medição, quanto por fatores construtivos. Pode estar associado ao próprio princípio de medição empregado ou ainda ser influenciado por grandezas ou fatores externos, como as condições ambientais. A estimativa do erro sistemático da indicação de um instrumento de medição é denominada Tendência ( $Td$ ).
- Erro aleatório ( $Ea$ ) é a parcela do erro responsável pelas variações imprevisíveis nos valores obtidos, tanto para valores acima quanto para abaixo do valor médio, quando uma medição é repetida diversas vezes, nas mesmas condições. Diversos fatores contribuem para o surgimento deste erro: existência de folgas, atritos, vibrações, flutuações de tensão elétrica, instabilidades internas, das condições ambientais etc. A estimativa do erro aleatório da indicação de um instrumento de medição é denominada Repetitividade ( $Re$ ).

### 3.2.5 Incerteza padrão

De acordo com Gonçalves, 2002, a incerteza padrão  $u$  de uma fonte de incertezas é definida como a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a  $1\sigma$  (um desvio padrão). Portanto, corresponde ao desvio padrão do  $Ea$  associado à fonte de incertezas. A estimativa de  $u$  associada a uma fonte de incertezas pode ser efetuada através de procedimentos estatísticos ou por outros meios.

### 3.2.6 Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação “tipo A”)

A variável aleatória  $q$  represente os efeitos de uma fonte de incertezas sobre o resultado da medição. O desvio padrão experimental desta variável  $q$  é determinado a partir de  $n$  valores independentemente obtidos para a variável  $q$ , isto é,  $q_k$  (para  $k = 1, 2, \dots, n$ ). A média de  $q$  pode ser estimada por:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.18)$$

O desvio padrão experimental de  $q$  representado por  $s$  é estimado por:

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n - 1}} \quad (3.19)$$

Uma vez estimado  $s(q)$ , a incerteza padrão a ser associada à fonte de incerteza avaliada depende apenas do procedimento de medição utilizado. Se apenas uma medição é efetuada, a incerteza padrão é dada por:

$$u(q) = s(q) \quad (3.20)$$

Entretanto, se  $m$  medições são efetuadas e o seu valor médio é usado para calcular o resultado da medição, a incerteza padrão corresponde ao desvio padrão da média de  $m$  medições, ou seja:

$$u(q) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{m}} \quad (3.21)$$

### 3.2.7 Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação “tipo B”)

Há várias situações onde não é prático, ou mesmo possível, usar procedimentos estatísticos para estimar o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incertezas. Outras informações devem ser usadas para estimar o desvio padrão associado aos efeitos da fonte de incertezas sobre o processo de medição. Os procedimentos não-estatísticos são conhecidos como procedimentos de avaliação “tipo B” em que são consideradas informações conhecidas *a priori* sobre o comportamento da fonte de incertezas ou deduzidas por observação das suas características. Informações obtidas de certificados de calibração, especificações do instrumento e mesmo estimativas baseadas em experiências anteriores do experimentalista podem ser levados em conta. Os limites dentro dos quais uma fonte de incertezas naturalmente se encontra, e o tipo de distribuição de probabilidade tipicamente atribuída a esta podem ser deduzidos em alguns casos.

### 3.2.8 Incerteza padrão e incerteza expandida

Conforme Gonçalves, 2002, freqüentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incertezas se refletem sobre a indicação do sistema de medição como parcelas aditivas, isto é, cada fonte de incertezas soma (ou subtrai) sua contribuição sobre a indicação. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias. Ao desvio padrão resultante da ação conjunta das várias fontes de incertezas agindo simultaneamente sobre o processo de medição denomina-se de incerteza padrão combinada. A incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) das várias fontes de incertezas pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incertezas pela equação (3.22), onde  $u_1, u_2, \dots, u_p$  são as incertezas de cada uma das  $p$  fontes e  $u_c$  a incerteza padrão combinada.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad (3.22)$$

A incerteza padrão combinada, estimada através da equação (3.22), corresponde ao desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incertezas consideradas. Em aplicações nas áreas da engenharia é comum trabalhar com nível de confiança de 95%. Para atingir este nível, a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ), que corresponde a apenas  $1\sigma$  (um desvio padrão), deve ser multiplicada pelo coeficiente numérico de *Student*. A denominada incerteza expandida ( $U_{95\%}$ ) corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 95%. É estimada por:

$$U_{95\%} = k_{95\%} u_c \quad (3.23)$$

em que  $k_{95\%}$  é o fator de abrangência para o nível de confiança de 95%.

### 3.2.9 Fatorial completo

Conforme Eckes, 2001, fatorial completo é um método onde são testadas todas as combinações entre fatores escolhidos, em determinados níveis. Com este modelo pode-se não apenas examinar o efeito médio de cada fator, como também examinar estas condições na medida em que todos os outros fatores mudam proporcionalmente. Isto pode ser observado na tabela A3 em anexo. O efeito de cada fator é calculado através da diferença entre as médias do resultado para o nível alto e do resultado para o nível baixo.

### 3.2.10 Princípios da formação de imagem em tomografia computadorizada

Conforme Parks, 2000, os princípios físicos da tomografia computadorizada são os mesmos da radiografia convencional. Para a obtenção de imagens são utilizados os raios-x. Enquanto na radiografia convencional o feixe de raios-x é piramidal e a imagem obtida é uma imagem de projeção, na tomografia computadorizada o feixe é emitido por uma pequena fenda e tem a forma de leque.

Na tomografia computadorizada o tubo de raios-x gira  $360^\circ$  em torno da região do corpo a ser estudada e a imagem obtida é tomográfica, ou seja, "fatias" da região do corpo estudada. Em oposição ao feixe de raios-x emitidos tem-se um detector de fótons que gira concomitantemente ao feixe de raios-x. Como na radiografia convencional as características das imagens vão depender dos fótons absorvidos pelo objeto em estudo. Dessa forma, os fótons emitidos dependem da espessura do objeto e da capacidade deste de absorver os raios-x.

## 4 METODOLOGIA

O procedimento adotado na realização deste pode ser subdividido em cinco etapas:

- 1) Análise de dados da produção. Durante a produção é analisada por amostragem uma determinada quantidade de cilindros. Nessa análise são mensuradas algumas cotas e os resultados registrados. Estão disponíveis registros desde o ano de 2007.
- 2) Análise de modelo do cilindro. No software de modelagem 3D é possível calcular o volume da câmara de combustão. Foi feita uma simulação, alterando o valor de determinadas cotas – dentro de suas tolerâncias – para avaliar o seu impacto no volume do cilindro.
- 3) Medições e análise de alguns cilindros. Alguns cilindros foram completamente mensurados conforme as características da câmara de combustão e tomografados. A partir destas medições fez-se uma análise das características e sua influência no volume da câmara.
- 4) Levantamento das possíveis causas. Com base nas medições efetuadas foi feito um diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) para extrair opiniões da equipe técnica da empresa com o intuito de levantar possíveis causas para o problema.
- 5) Confecção de um cilindro com uma forma simples. Como a câmara de combustão do cilindro estudado é de uma geometria peculiar, é complexo o cálculo do seu volume através

das medições de suas formas. Um cilindro prismático, no qual é possível calcular o seu volume através do seu diâmetro e de sua altura, foi confeccionado para confrontar a medida do volume calculada a partir de suas dimensões, com a medida de volume pelo modelo 3D e pelo sistema via bureta.

## 5 RESULTADOS E DISCUSÕES

### 5.1 Influência de Cada Cota

Por especificação de projeto, o volume mínimo de câmara de combustão deve ser de  $(3,38 \pm 0,16)$  cm<sup>3</sup>, ou seja, compreendido entre 3,22 e 3,54 cm<sup>3</sup>. O modelo 3D do produto é confeccionado com as dimensões em seus valores nominais, o que resulta em um volume mínimo de 3,388 cm<sup>3</sup> (nominal da especificação).

Quando uma dimensão relacionada à câmara de combustão se altera, esta variação é refletida no volume mínimo do cilindro. Assim, foi feito um fatorial completo para avaliar o impacto de algumas cotas do cilindro no seu volume mínimo. Para o estudo, foram consideradas como os níveis máximo e mínimo as tolerâncias superior e inferior de cada dimensão. Os dados são apresentados na tabela do Apêndice 1.

A figura 5.1 mostra um esquema que indica as cotas representativas do volume mínimo da câmara de combustão.

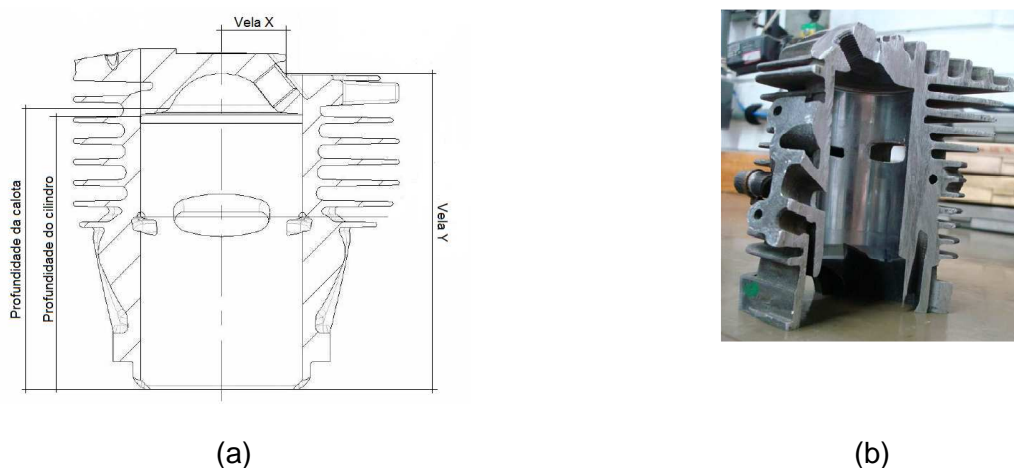


Figura 5.1 – (a) Cotas no cilindro (b) Cilindro cortado

Pelo fatorial foi observado que a cota com maior influência sobre o volume mínimo do cilindro é a profundidade da calota (tab. 5.1).

Tabela 5.1 – Análise do fatorial completo

| Fator  | Profundidade do cilindro | Profundidade da calota | Vela em X | Vela em Y |
|--------|--------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| +      | +3,41                    | +3,46                  | +3,41     | +3,41     |
| -      | -3,38                    | -3,34                  | -3,38     | -3,39     |
| Efeito | 0,03                     | 0,11                   | 0,02      | 0,01      |

### 5.2 Histórico de Medições

Pelo controle de qualidade da empresa, a cada 3500 cilindros produzidos, um é medido. Nesta amostra são medidas diferentes cotas e os resultados são arquivados digitalmente. A partir destes registros foi possível levantar um histórico da produção do produto (tab. 5.2).

Porém, deve-se ater ao fato que as medições são efetuadas em cilindros que estão em expedição na empresa. É bem provável que estejam apresentando valores conforme a especificação, pois como durante a produção são feitas medições no cilindro, aqueles que apresentam cotas fora do especificado são retirados da linha ou geram ações corretivas.

Tabela 5.2 – Dados históricos da produção do cilindro

| Cota                      | Medida nominal | Média  | Desvio padrão | Confiança (95,45%) | Tamanho da amostra |
|---------------------------|----------------|--------|---------------|--------------------|--------------------|
| Prof. cilindro [mm]       | 91,4           | 91,39  | 0,01347       | $\pm 0,03$         | 832                |
| Prof. calota [mm]         | 91,65          | 91,64  | 0,01351       | $\pm 0,03$         | 696                |
| Vela em X [mm]            | 104,5          | 104,52 | 0,08858       | $\pm 1,17$         | 150                |
| Vela em Y [mm]            | 15,2           | 15,18  | 0,09855       | $\pm 0,20$         | 150                |
| Volume [cm <sup>3</sup> ] | 3,38           | 3,43   | 0,03657       | $\pm 0,07$         | 56                 |

O histórico de medições apresenta valores que têm influência no volume mínimo do cilindro muito próximas da medida nominal, sendo a única exceção o volume que está acima da dimensão nominal. Além disso, o intervalo de confiança de cada cota fica próximo de sua respectiva tolerância. O Apêndice 2 mostra o gráfico do histórico das medições do volume.

### 5.3 Dispositivo de Medição de Volume

O volume mínimo no cilindro produzido é medido por uma bureta da seguinte maneira: um pistão padrão de aço é inserido pela base do cilindro para simular o pistão no ponto morto superior e um dispositivo padrão é rosqueado no furo da vela de ignição (fig. 5.2).

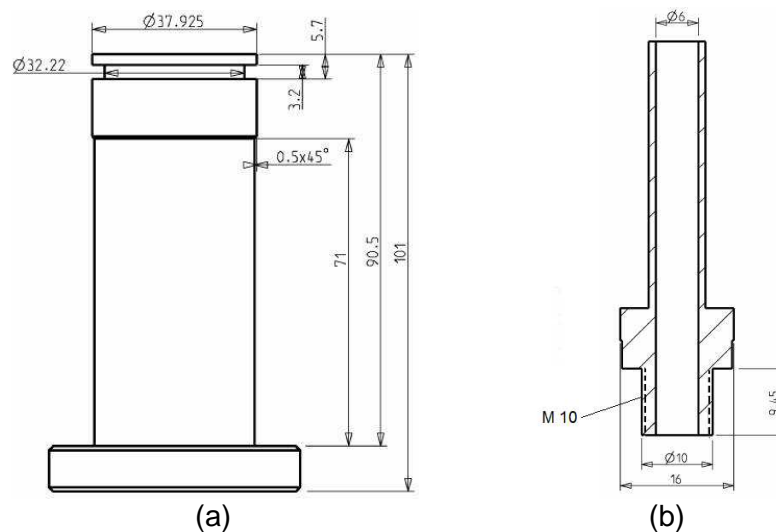


Figura 5.2 – Esquema do dispositivo de medição: (a) pistão de medição; (b) dispositivo rosqueado na vela. Dimensões em [mm]

O fluido (álcool) é inserido no dispositivo de medição através do padrão da vela. O padrão da vela é composto por um “bujão” com uma coluna de vidro, sendo que no vidro existe uma marcação de forma que no padrão da vela contenha exatamente 1,0 cm<sup>3</sup>. Dessa forma, da medição lida na bureta, desconta-se 1,0 cm<sup>3</sup> e tem-se o volume da câmara de combustão.

As cotas de 9,45 mm do padrão da vela e de 90,5 mm do pistão de medição foram mensuradas resultando respectivamente  $(9,456 \pm 0,009)$  mm e  $(90,502 \pm 0,001)$  mm. Os resultados mostram que os valores não causam perturbação significativa na medição.

Entre o pistão de medição e o cilindro que está sendo medido existe um folga diametral para possibilitar que o mesmo seja inserido no cilindro. Como é utilizado um líquido para medir o volume mínimo é necessário que haja uma vedação suficiente da câmara de combustão para

que o líquido de medição não vaze pela parede do cilindro. Com este intuito, existe no pistão padrão um rasgo para a instalação de um anel elástico, comercialmente aplicado, tipo *o-ring* que veda a câmara de combustão. Porém, este rasgo não é completamente preenchido pelo anel, ficando um espaço vazio que depende do diâmetro do cilindro (fig. 5.3). Este vazio é indicado na tabela 5.3.

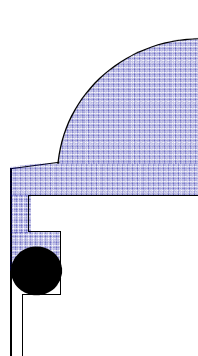


Figura 5.3 – Esquema do pistão de medição com o anel elástico (*o-ring*). No rasgo do pistão de medição, acima do *o-ring*, é a região do espaço vazio.

Tabela 5.3 – Espaço vazio no pistão de medição na região do rasgo do anel elástico em função do diâmetro do cilindro

| Diâmetro [mm] | Espaço vazio [cm <sup>3</sup> ] |
|---------------|---------------------------------|
| 37,988        | 0,168                           |
| 37,994        | 0,171                           |
| 38,000        | 0,173                           |
| 38,006        | 0,175                           |
| 38,012        | 0,177                           |

A bureta utilizada possui uma resolução de 0,01 cm<sup>3</sup> e possui um certificado de calibração conforme tabela 5.4. Ela foi aferida no dia 17 de março de 2010 por uma empresa terceirizada através de uma balança analítica. A incerteza de medição relatada é declarada como incerteza padrão da medição multiplicada por um fator de abrangência  $k_{95\%} = 2,0$ .

Tabela 5.4 – Certificado de calibração da bureta

| Característica [cm <sup>3</sup> ] | VVC [cm <sup>3</sup> ] | IM [cm <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 2,50 ± 0,05                       | 2,495                  | ± 0,001               |
| 12,50 ± 0,05                      | 12,511                 | ± 0,001               |
| 25,00 ± 0,05                      | 25,041                 | ± 0,001               |

VVC = valor verdadeiro convencional

IM = incerteza da medição

#### 5.4 Medições de Alguns Cilindros

Foram mensurados quinze cilindros retirados aleatoriamente da produção. O volume foi mensurado cinco vezes em cada cilindro. Foi aplicado o critério de Chauvenet a fim de eliminar valores duvidosos – por esse critério, uma medição do cilindro nº 04 foi eliminada. A altura foi medida em cada cilindro dez vezes com auxílio de um micrômetro com resolução 0,001 mm. Aplicando o critério de Chauvenet, foram eliminadas cinco medições de altura. Os resultados das medições estão na tabela 5.5.

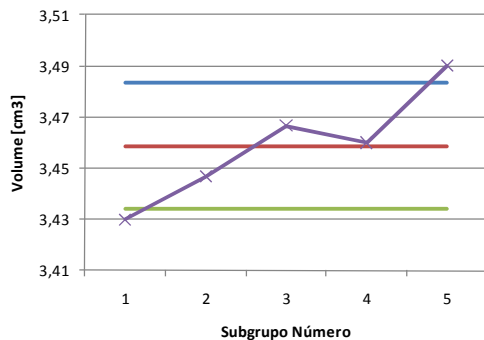
Como já mencionado, o volume mínimo do cilindro deve ser de  $(3,38 \pm 0,16)$  cm<sup>3</sup>. Os valores médios obtidos em todos os cilindros medidos estão acima da dimensão nominal de 3,38 cm<sup>3</sup>. Na média das médias (3,46 cm<sup>3</sup>), o volume do cilindro está 0,08 cm<sup>3</sup> maior do que o volume nominal. Já a incerteza expandida da medição de volume apresenta uma variação de 0,02 a 0,04 cm<sup>3</sup>, valores condizentes com a grandeza que está sendo mensurada.

A altura do fundo em todos os cilindros está um pouco menor que o valor nominal de (91,4 mm), o que causa um volume mínimo do cilindro um pouco menor do que o nominal.

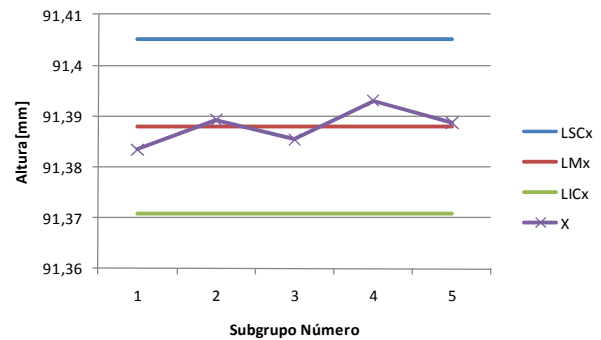
Tabela 5.5 – Resultado da medição do volume mínimo de 15 cilindros (operador A)

| Cilindro                      | nº 01          | nº 02          | nº 03          | nº 04          | nº 05          |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Volume [cm <sup>3</sup> ]     | 3,42 ± 0,03    | 3,42 ± 0,02    | 3,43 ± 0,02    | 3,43 ± 0,04    | 3,46 ± 0,03    |
| Profundidade do cilindro [mm] | 91,383 ± 0,001 | 91,380 ± 0,002 | 91,387 ± 0,001 | 91,400 ± 0,005 | 91,383 ± 0,002 |
| Cilindro                      | nº 06          | nº 07          | nº 08          | nº 09          | nº 10          |
| Volume [cm <sup>3</sup> ]     | 3,45 ± 0,02    | 3,47 ± 0,03    | 3,45 ± 0,02    | 3,48 ± 0,03    | 3,46 ± 0,04    |
| Profundidade do cilindro [mm] | 91,386 ± 0,002 | 91,399 ± 0,005 | 91,373 ± 0,001 | 91,384 ± 0,001 | 91,385 ± 0,001 |
| Cilindro                      | nº 11          | nº 12          | nº 13          | nº 14          | nº 15          |
| Volume [cm <sup>3</sup> ]     | 3,45 ± 0,04    | 3,47 ± 0,03    | 3,50 ± 0,04    | 3,49 ± 0,02    | 3,48 ± 0,02    |
| Profundidade do cilindro [mm] | 91,385 ± 0,003 | 91,395 ± 0,001 | 91,384 ± 0,001 | 91,386 ± 0,001 | 91,395 ± 0,002 |

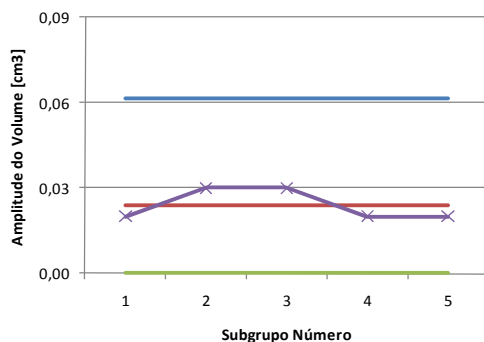
Com as medições desses quinze cilindros foram feitas cartas de controle com cinco subgrupos com três cilindros. Na carta da altura do fundo não foi observado nenhum ponto fora dos limites naturais do processo e a média das médias está muito próxima da dimensão nominal. Na carta do volume foram observados dois pontos fora dos limites naturais (fig. 5.4).



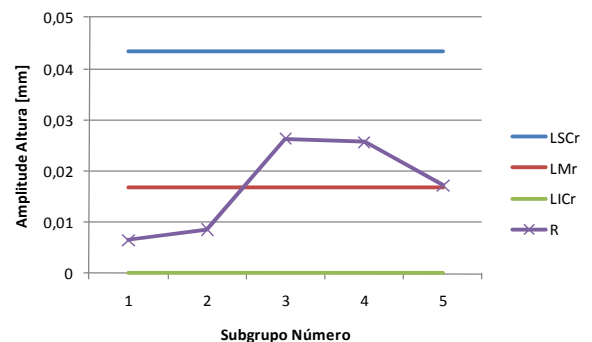
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4 – Cartas de controle: (a) X para o volume; (b) X para a profundidade (altura); (c) R para o volume; (d) R para a profundidade (altura)

Com o intuito de avaliar a usinagem da calota foi feita uma tomografia computadorizada em três cilindros e o resultado obtido foi comparado com o modelo 3D (fig. 5.5). A tomografia



possui uma exatidão de 50  $\mu\text{m}$ . O ponto zero da escala foi definido como sendo o modelo 3D; logo, as cores representam a diferença entre o cilindro analisado e o modelo 3D. Foi observada uma diferença de  $\pm 0,2$  mm em parte da superfície do cilindro, que é pequena para gerar uma variação significativa em um volume de 3380  $\text{mm}^3$ .

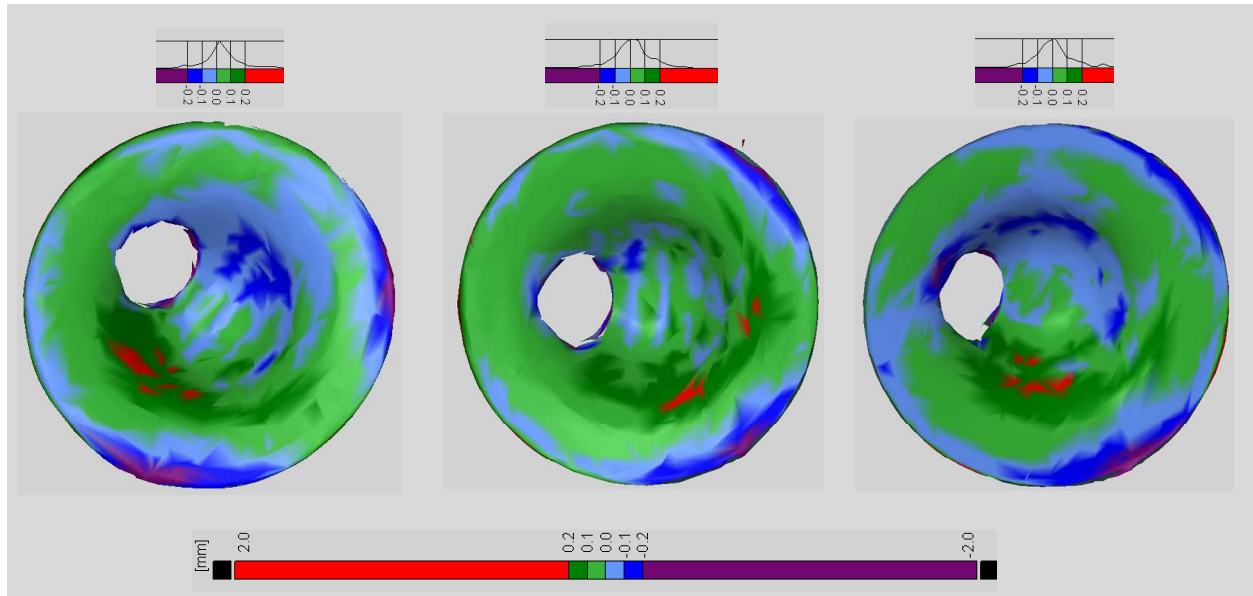


Figura 5.5 – Vista superior do cilindro: da esquerda para a direita, tomografia dos cilindros nº 1, nº 2 e nº 3; abaixo, escala de cores utilizada

## 5.5 Diagrama Espinha de Peixe

Com os dados levantados foi montado um diagrama de causa e efeito (Ishikawa) através das opiniões de pessoas que tem maior contato com o problema (fig. 5.6).

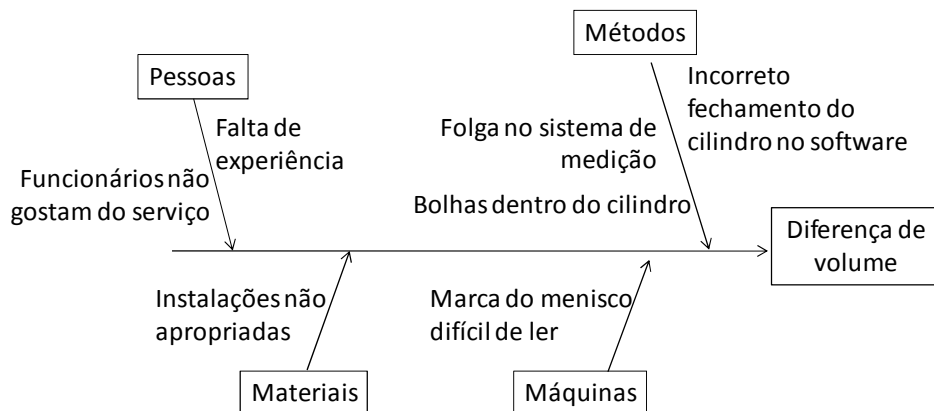


Figura 5.6 – Diagrama de Ishikawa da diferença de volume do cilindro

Como existe baixa rotatividade entre as pessoas que realizam a medição, a falta de experiência foi descartada. Os funcionários também não aparentam insatisfação com o serviço; logo, a falta de interesse também foi descartada.

Para retirar o fluido de medição (álcool) por completo do cilindro, é utilizado um jato de ar comprimido entre uma medição e outra. Para aplicá-lo, o operador precisa ir até uma célula de produção. Sendo assim, as instalações podem ser aprimoradas. Por ser uma substância volátil, a evaporação do álcool poderia afetar a medição; entretanto foi observado que no tempo de um minuto a evaporação do álcool não é perceptível e, portanto, não influi.

O padrão da vela apresenta uma marcação onde deve ser lido o menisco do fluido de medição. A marcação no padrão é claramente identificável. Se por ventura ocorrerem bolhas

de álcool dentro do cilindro, a leitura da bureta apresentará um valor de volume menor que o valor real. Ademais, o fechamento do cilindro pelo software (modelagem) foi efetuado com fidelidade para utilizar a bureta, não devendo ser uma fonte de erro.

O espaço vazio no pistão de medição na região do rasgo do anel elástico em função do diâmetro do cilindro já foi abordado na seção 5.3.

## 5.6 Outras Medições

O volume dos primeiros cinco cilindros também foi medido por outro operador (operador B). Em um cilindro (nº 3), ambos os operadores mediram o mesmo valor; em três cilindros, ocorreu uma diferença de 0,03 cm<sup>3</sup> e em um deles (nº 2) esta chegou a 0,05 cm<sup>3</sup>. O operador B mediu apenas duas vezes cada cilindro, resultando para dois cilindros (nº 1 e nº 2) uma incerteza dez vezes maior do que a do operador A. A tabela 5.6 mostra os dados obtidos.

Tabela 5.6 – Volume dos cilindros 1 a 5 medidos pelos operadores A e B

| Operador | Volumes dos Cilindros [cm <sup>3</sup> ] |             |             |             |             |
|----------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          | nº 01                                    | nº 02       | nº 03       | nº 04       | nº 05       |
| A        | 3,42 ± 0,03                              | 3,42 ± 0,02 | 3,43 ± 0,02 | 3,43 ± 0,04 | 3,46 ± 0,03 |
| B        | 3,45 ± 0,13                              | 3,47 ± 0,02 | 3,43 ± 0,04 | 3,40 ± 0,02 | 3,43 ± 0,13 |

O operador A teve uma variação média de 0,06 cm<sup>3</sup> e um range de 0,05 cm<sup>3</sup> em suas medições enquanto que o operador B teve uma variação média de 0,07 cm<sup>3</sup> e um range de 0,07 cm<sup>3</sup>. Aplicando um teste de hipótese com confiança de 95% para a medição do cilindro pelo operador B, apenas a do cilindro 2 reprovou, ou seja, esta é a única medição que está significativamente diferente das medições realizadas pelo operador A.

As seguintes cotas dos mesmos cinco cilindros foram mensuradas em uma máquina de medir por coordenadas (MMC) tridimensionais: profundidade do cilindro, profundidade da calota e posicionamento da vela em X e Y. Conforme mostra a figura 5.7 e 5.8, a profundidade do cilindro está um pouco abaixo do valor nominal, provocando um volume menor. A profundidade da calota está próxima da tolerância superior, o que implica em um volume maior. A vela em X apresenta um valor próximo da tolerância inferior, o que sugere um volume maior.

Com as medições da MMC foi possível, no software de modelagem 3D (*Pro-E*), estimar o volume mínimo do cilindro mensurado. Esta estimativa foi comparada com o valor medido na bureta pelos dois operadores. Na comparação levou-se em conta também o espaço vazio, conforme tabela 5.3, existente na região do anel elástico (*o-ring*) do pistão padrão (espaço vazio). Esses valores são apresentados na tabela 5.7.

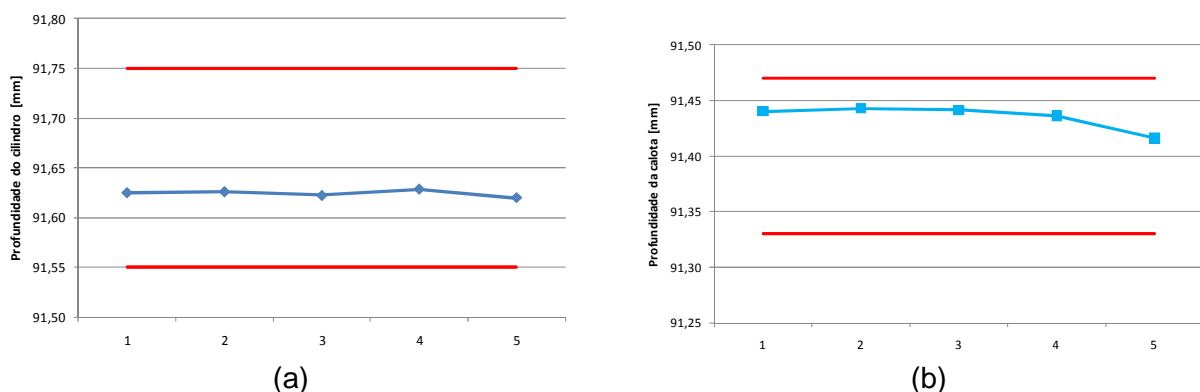


Figura 5.7 – Medidas obtidas com a MMC: (a) profundidade do cilindro; (b) profundidade da calota. As linhas em vermelho indicam os limites inferior e superior de tolerância

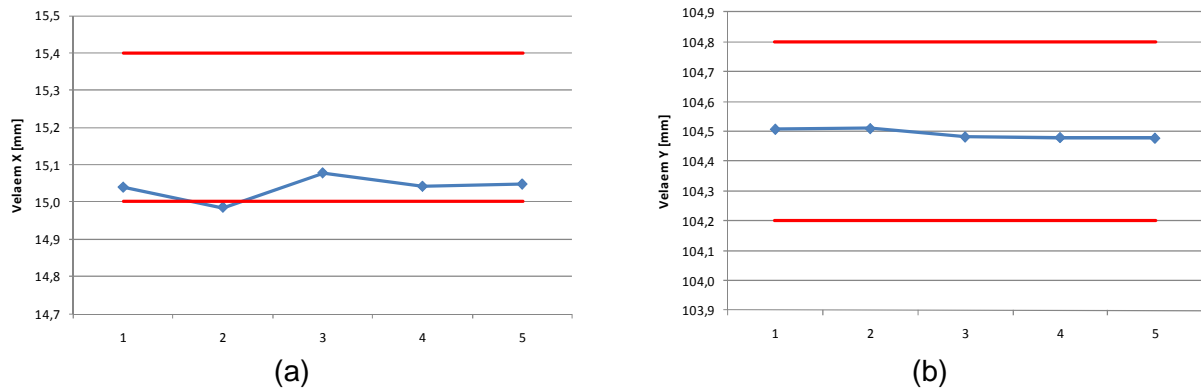


Figura 5.8 – Medidas obtidas com a MMC: (a) vela em X (b) vela em Y. As linhas em vermelho indicam os limites inferior e superior de tolerância

Tabela 5.7 – Comparação dos volumes medidos pelos operadores A e B com o volume estimado pelo software *Pro-E*

| Medições          | Volumes dos Cilindros [cm <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|
|                   | nº 01                                    | nº 02 | nº 03 | nº 04 | nº 05 |
| Op. A             | 3,42                                     | 3,42  | 3,43  | 3,43  | 3,46  |
| Op. B             | 3,45                                     | 3,47  | 3,43  | 3,40  | 3,43  |
| <i>Pro-E</i>      | 3,37                                     | 3,37  | 3,37  | 3,37  | 3,36  |
| Espaço vazio (EV) | 0,19                                     | 0,19  | 0,19  | 0,20  | 0,20  |
| Op. A – EV        | 3,23                                     | 3,23  | 3,24  | 3,23  | 3,26  |
| Op. B – EV        | 3,26                                     | 3,28  | 3,24  | 3,20  | 3,23  |

Na tabela 5.7, o volume mínimo descontando o espaço vazio passa a ser quase o volume da tolerância mínima do volume do cilindro. O valor encontrado para o espaço vazio na região do anel elástico no pistão de medição padrão é maior do que a diferença entre o volume medido na bureta e o volume estimado pelo *Pro-E* (fig. 5.9).

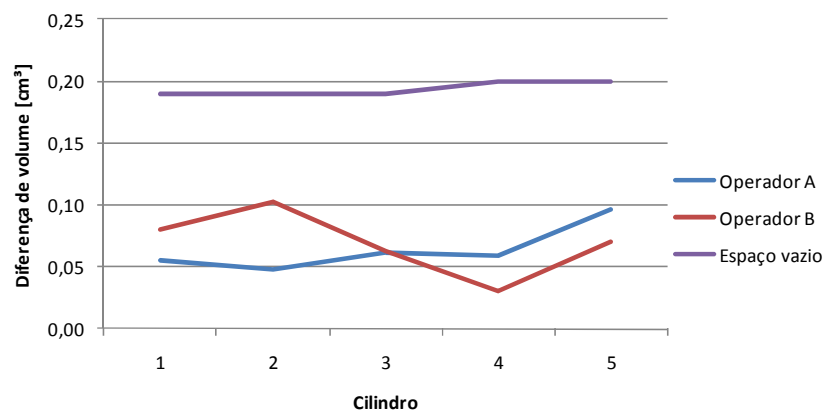


Figura 5.9 – Espaço vazio existente na região do anel elástico e diferença de volume entre medição da bureta e estimativa do *Pro-E*

## 5.7 Cilindro do Fabricante II

Afim de analisar variáveis de processo foram medidos cinco cilindros do mesmo modelo de outro fabricante (fabricante II). Esses cilindros apresentaram um volume mínimo mais próximo do volume nominal (3,38 cm<sup>3</sup>) que o fabricante I. Foi também observada uma incerteza de medição muito próxima da incerteza de medição do fabricante I. O valor do volume mínimo

do fabricante II foi comparado com o valor nominal (VN) do cilindro. Estes dados são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Volume dos cilindros 1 a 5 dos fabricantes I e II

| Fabricante | Volumes dos Cilindros [cm <sup>3</sup> ] |                 |                 |                 |                 |
|------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            | nº 01                                    | nº 02           | nº 03           | nº 04           | nº 05           |
| II         | $3,39 \pm 0,03$                          | $3,39 \pm 0,03$ | $3,42 \pm 0,04$ | $3,43 \pm 0,04$ | $3,42 \pm 0,03$ |
| II-VN      | 0,01                                     | 0,01            | 0,04            | 0,05            | 0,04            |

Para o cilindro nº 02 do fabricante II realizou-se uma tomografia computadorizada em que pôde ser observado que a geometria da câmara de combustão está abaixo da linha da geometria da câmara de combustão do modelo, resultando assim em um volume menor do que o volume de projeto (fig. 5.10).

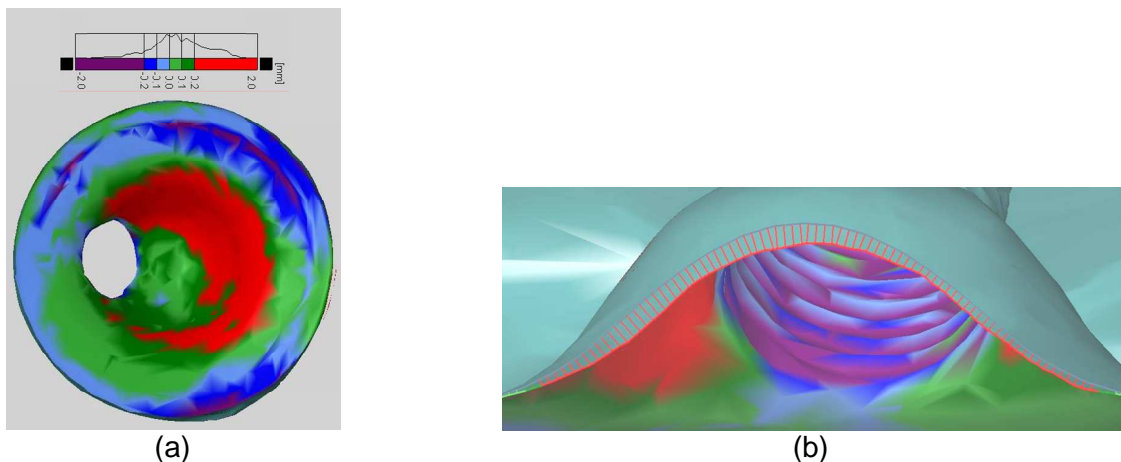


Figura 5.10 – (a) vista inferior do cilindro com cores mostrando a diferença da câmara de combustão do cilindro em relação ao modelo; (b) seção do cilindro, onde a linha cinza representa o modelo 3D e a linha colorida o cilindro tomografado

## 5.8 Cilindro Prismático

Um cilindro prismático foi usinado no intuito de confrontar a medição de volume da bureta, do software de desenho com o volume calculado analiticamente (figura 5.11).

Para fechar o copo foram utilizados os mesmos dispositivos utilizados para fechar o cilindro estudado. Sendo o diâmetro ( $38,021 \pm 0,001$ ) mm e a altura ( $93,439 \pm 0,002$ ) mm do copo, o volume pelo software de modelagem 3D é de  $3,337 \text{ cm}^3$ , igual ao volume calculado analiticamente. Foram feitas nove medições no copo com a bureta. O resultado da medição encontrado para uma confiança de 95% foi ( $3,531 \pm 0,023$ )  $\text{cm}^3$ . Levando em consideração o espaço vazio de  $0,180 \text{ cm}^3$  que existe no rasgo do anel elástico, conforme tabela 5.3, o volume do copo passa a ser ( $3,351 \pm 0,023$ )  $\text{cm}^3$ . Assim, a diferença entre o valor medido na bureta e o valor medido no *Pro-E* é  $0,014 \text{ cm}^3$ .

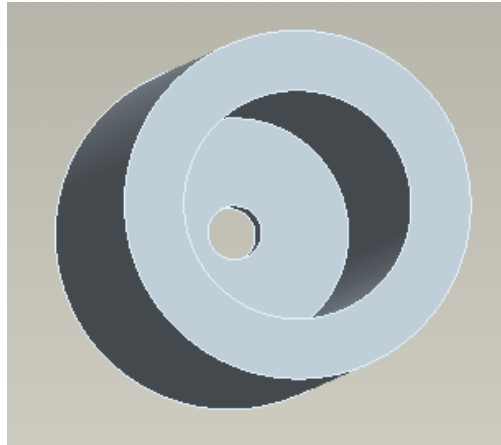


Figura 5.11 – Cilindro prismático

## 6 CONCLUSÕES

O modelo 3D do cilindro apresentou um volume condizente com a especificação de projeto. Pela análise do fatorial completo, foi constatado que a variação das cotas referentes à câmara de combustão, dentro de suas tolerâncias, afeta o volume mínimo do cilindro dentro de sua tolerância de projeto. O histórico de medições apresenta as cotas referentes à câmara de combustão dentro dos seus limites de projeto. E o sistema de medição de volume apresentou uma incerteza expandida condizente com a tolerância da grandeza que ele está medindo.

A mensuração com o cilindro prismático mostrou que existe um erro sistemático no sistema de medição. O quanto ele está afetando encontra-se muito próximo ao volume da folga existente no rasgo para o posicionamento do anel elástico no pistão padrão de medição. Porém, quando foi utilizada a mesma metodologia, de descontar o volume da folga do anel elástico (o-ring) no cilindro produzido, não foi obtido resultado satisfatório. Isto pode estar acontecendo: devido a alguma interação do sistema de medição com o cilindro que não foi verificado no cilindro prismático, ou o modelamento geométrico do cilindro pode não estar refletindo naquele produzido. Sendo aconselháveis estudos mais detalhados do que pode estar interferindo na medição do cilindro produzido.

Com isso, conclui-se que existe um erro sistemático no sistema de medição de volume, que pode ser corrigido pela estimativa de volume do espaço vazio através do diâmetro do cilindro que está sendo ensaiado. Sendo assim basta medir o diâmetro do cilindro ensaiado para corrigir o erro sistemático.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

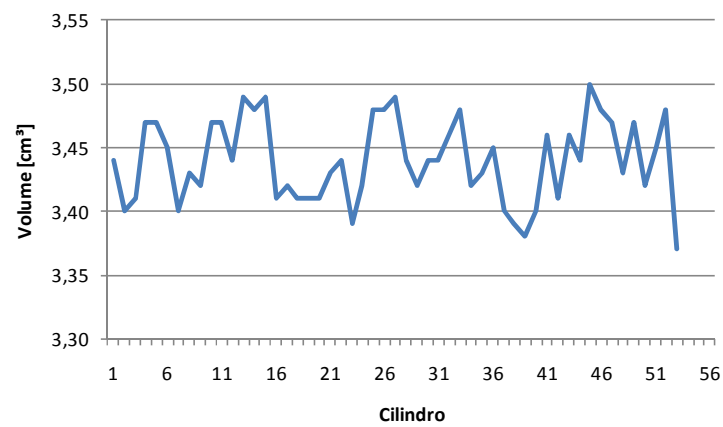
- Bosch, R., “**Manual de tecnologia automotiva**”, Edgard Blücher, 25.edição, 2005.  
 Eckes, G., “**Six sigma revolution**”, Campus, 3.edição, 2001.  
 Giacosa, D., “**Motores endotérmicos**”, Hoepli, 2.edição, 1967.  
 Gonçalves Jr., A. A., “**Metrologia**”, Apostila LABMETRO-UFSC, 2002.  
 Grant, E. L.; Leavenworth, R. S., “**Statistical quality control**”, McGraw-Hill, 7.edition, 1996.  
 Paladini, E. P., “**Controle de qualidade**”, Atlas, 2 edição, 1990.  
 Parks, E. T., “**Computed tomography applications for dentistry**”. 2.edition, 2000.  
 Schneider, P., “**Incerteza de medição e ajuste de dados**”, Apostila, UFRGS, 2000.  
 Wylen, V.; Sonntag, B., “**Fundamentos de termodinâmica**”, 6.edição, Edgard Blücher, 2003.

## 8 APÊNDICES

## 1 – Tabela Fatorial Completo

| Característica | Profundidade do cilindro | Profundidade da calota | Vela em Y | Vela em X | Volume [cm <sup>3</sup> ] |
|----------------|--------------------------|------------------------|-----------|-----------|---------------------------|
| 1              | +                        | +                      | +         | +         | 3,49                      |
| 2              | +                        | +                      | +         | -         | 3,47                      |
| 3              | +                        | +                      | -         | +         | 3,47                      |
| 4              | +                        | +                      | -         | -         | 3,45                      |
| 5              | +                        | -                      | +         | +         | 3,38                      |
| 6              | +                        | -                      | +         | -         | 3,36                      |
| 7              | +                        | -                      | -         | +         | 3,36                      |
| 8              | +                        | -                      | -         | -         | 3,34                      |
| 9              | -                        | +                      | +         | +         | 3,46                      |
| 10             | -                        | +                      | +         | -         | 3,44                      |
| 11             | -                        | +                      | -         | +         | 3,44                      |
| 12             | -                        | +                      | -         | -         | 3,42                      |
| 13             | -                        | -                      | +         | +         | 3,34                      |
| 14             | -                        | -                      | +         | -         | 3,32                      |
| 15             | -                        | -                      | -         | +         | 3,33                      |
| 16             | -                        | -                      | -         | -         | 3,30                      |

## 2 – Gráfico dos dados históricos de medições de volume



## 9 ANEXOS

Tabela A1 – Fatores de calculo dos limites de controle para variáveis

| Tamanho da<br>Amostra N | Gráfico de Amplitude |       |       |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|
|                         | $D_2$                | $D_3$ | $D_4$ |
| 2                       | 3,686                | 0     | 3,267 |
| 3                       | 4,358                | 0     | 2,575 |
| 4                       | 4,698                | 0     | 2,282 |
| 5                       | 4,919                | 0     | 2,115 |
| 6                       | 5,078                | 0     | 2,004 |
| 7                       | 5,203                | 0,076 | 1,924 |
| 8                       | 5,307                | 0,136 | 1,864 |

Tabela A2 – Critério de rejeição de Chauvenet

| Número de<br>leituras $n$ | $d_{max}/\sigma$ | Número de<br>leituras $n$ | $d_{max}/\sigma$ |
|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| 2                         | 1,15             | 20                        | 2,24             |
| 3                         | 1,38             | 25                        | 2,33             |
| 4                         | 1,54             | 30                        | 2,39             |
| 5                         | 1,65             | 40                        | 2,49             |
| 6                         | 1,73             | 50                        | 2,57             |
| 7                         | 1,80             | 100                       | 2,81             |
| 8                         | 1,86             | 300                       | 3,14             |
| 9                         | 1,92             | 500                       | 3,29             |
| 10                        | 1,96             | 1000                      | 3,48             |
| 15                        | 2,13             | $\infty$                  | 3,50             |

Tabela A3 – Método fatorial completo

| Fator A | Fator B | Fator C | Resultado |
|---------|---------|---------|-----------|
| -       | -       | -       |           |
| +       | -       | -       |           |
| -       | +       | -       |           |
| +       | +       | -       |           |
| -       | -       | +       |           |
| +       | -       | +       |           |
| -       | +       | +       |           |
| +       | +       | +       |           |