

## ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE ENVELOPES MOTORES FOGUETE DEVIDO À AÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO

### **Paulo Roberto Sakai**

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail [sakai@iae.cta.br](mailto:sakai@iae.cta.br)

### **Lindolfo Araújo Moreira Filho**

ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail: [lindolfo@ita.br](mailto:lindolfo@ita.br)

### **Silvio Fazolli**

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail [sfazolli@iae.cta.br](mailto:sfazolli@iae.cta.br)

### **Miguel Ângelo Menezes**

UNESP - Universidade Estadual Paulista  
Av. Brasil, 56 - Centro  
Ilha Solteira - SP - Brasil. - CEP 15385-000  
e-mail: [miguelm@ita.br](mailto:miguelm@ita.br)

**Resumo.** *O conhecimento dos resultados de um processo e a obtenção de uma interpretação efetiva, que permita uma retro alimentação do processo e subsídio para o estabelecimento de uma especificação adequada são atividades importantes principalmente na área espacial que envolve alto desempenho de seus componentes e alta confiabilidade. Para processos considerados especiais, estas tarefas apresentam uma dificuldade inerente em função das características que apresentam este tipo de processo. Este trabalho propõe um método, baseado em técnicas estatísticas aplicadas a dados históricos, que permite visualizar, atestar de maneira significativa e obter uma previsão dos resultados de um processo. O método proposto foi aplicado na averiguação das deformações ocorridas na têmpera e no revenimento, considerado um processo especial, de envelopes motores S40 e S43, usados correntemente no VLS-1 (veículo lançador de satélites). Variáveis denominadas “Diâmetro”, “Comprimento” e “Erro de Forma Longitudinal” da região cilíndrica de tais motores foram avaliadas antes e após tratamento térmico. Finalmente, o método proposto obteve um intervalo de valores, com um nível de confiança de 95%, que permite o estabelecimento de tolerâncias de projeto para as variáveis trabalhadas, os quais devem ser usados como critérios na aceitação de um envelope motor.*

**Palavras-chave:** *envelope motor foguete, deformação, tratamento térmico, métodos estatísticos.*

## 1. INTRODUÇÃO

O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), órgão pertencente ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, têm como missão realizar pesquisa e desenvolvimento no campo aeroespacial. Para atender a este fim, o IAE desenvolveu uma série de veículos de sondagem e o Veículo Lançador de Satélites, VLS-1, sendo este o projeto mais importante em andamento. O VLS-1 (Figura 1) é um lançador de satélites lançado a partir de plataforma terrestre. Na decolagem, o comprimento do veículo é de 19 m, a massa é de 50 toneladas e o empuxo de 1000 kN. A propulsão principal é fornecida por propulsores a propelente sólido, em todos os estágios, com massa total de 41 toneladas de combustível. O VLS-1 foi projetado para a inserção de satélites, com massa de 100 a 350 kg, em órbitas circulares de 250 a 1000 km, em larga faixa de inclinações, desde as equatoriais às polares (VLS-1 Descrição técnica)<sup>(1)</sup>.

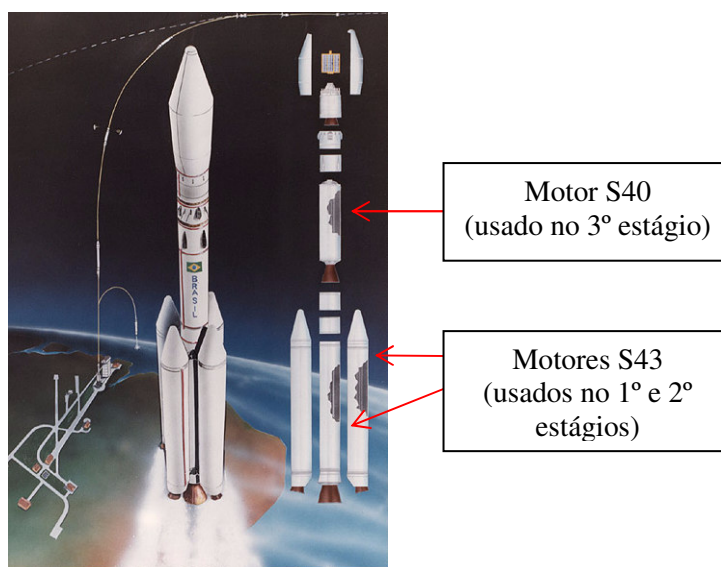


Figura 1. VLS-1 e envelopes motores S40 e S43

Por sua natureza a área espacial envolve alto desempenho e confiabilidade de seus componentes. Portanto, o produto ou resultado dos processos e seu controle devem ser conhecidos o mais profundamente possível, bem como o ambiente o qual o mesmo será submetido. Este conhecimento é importante para estabelecer tolerâncias, julgar adequação ao uso e manter controle do processo.

Enquanto existem processos controlados durante o seu andamento, isto é, medidas de características indicativas da qualidade do produto são tomadas durante seu processamento possibilitando que controle efetivo seja executado (usinagem, por exemplo), nos processos chamados “especiais”, caso, por exemplo, do tratamento térmico, os resultados são verificáveis somente ao seu final não havendo possibilidade de avaliação do resultado parcial do produto e de intervenção no processamento do mesmo. Em decorrência desta peculiaridade, a interpretação efetiva do resultado de um processo especial assume um caráter especialmente importante.

Um exemplo de componente espacial que sofre a ação de um importante processo especial é o envelope motor. O envelope motor de um veículo espacial a propelente sólido tem como função principal conter o grão propelente e é normalmente construído em aço ou compósito.

Envelopes motores em aço mais comumente usados são submetidos a tratamento térmico de têmpera e revenimento. Entretanto, o tratamento térmico, em especial a têmpera, induz deformações no produto e o conhecimento do grau dessas deformações em estruturas de geometria um pouco mais complexa não é de obtenção evidente. Deformações nos envelopes motores têm reflexo nas funções principais do produto e restritivas como características propulsivas, na integração com outros envelopes motores e subsistemas, dinâmica de voo, estrutural e segurança.

Este trabalho descreve um método, baseado em técnicas estatísticas, aplicado na análise e interpretação das deformações ocorridas durante o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento em envelopes motores, a partir de dados históricos. Como resultado final, foi estabelecido limites destas deformações, os quais devem ser usados na aceitação de um envelope motor. Além disso, uma previsão das deformações ocorridas durante o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento do envelope motor foi obtida.

O método de trabalho foi aplicado em dois tipos de envelopes motores, S40 e S43 (figura anterior), feitos em aço 300M e utilizados no VLS-1 utilizando variáveis representativas (indicadores de qualidade) das estruturas mencionadas.

## 2. MÉTODO PROPOSTO

Dados históricos são também chamados de conjuntos de dados existentes e podem ser mais ou menos relevantes para uma questão ou problema.

Portanto, quando se trabalha com dados históricos, certos cuidados devem ser tomados. Informação relativa às circunstâncias em que os dados foram coletados (o que, como, quando, quem, etc.) e uma triagem, separando dados contendo erros ou desnecessários á análise, são medidas pertinentes.

Conhecimento do produto cuja característica (ou características) será avaliada, seus componentes e funções, além da teoria física a respeito do fenômeno investigado que envolve o produto, são informações que possibilitam uma interpretação mais efetiva.

Desenvolvido o passo inicial, as técnicas estatísticas seguintes foram aplicadas conforme fluxograma básico apresentado na Figura 2 (Sakai et al.)<sup>(2)</sup>.

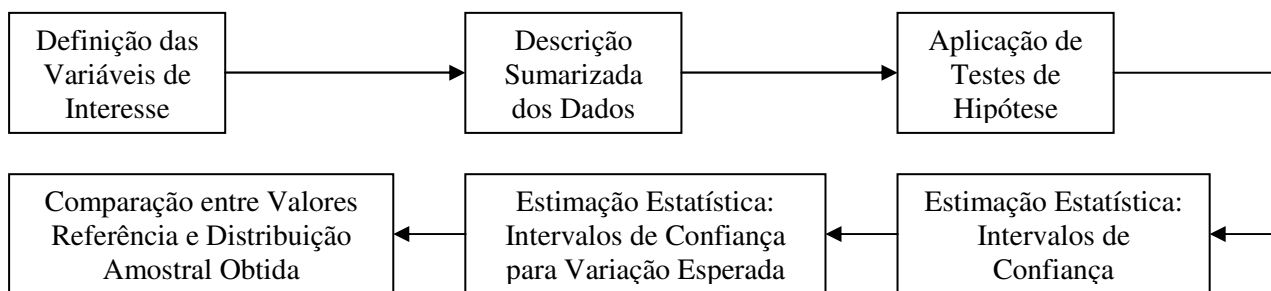


Figura 2. Fluxograma básico da aplicação das técnicas estatísticas

### 2.1. Estatística Descritiva

O processo de análise é iniciado com uma descrição sumarizada de dados. A seqüência para sua construção é definida por:

- Estabelecimento da variável de interesse
- Escolha de estatísticas
- Cálculo das estatísticas
- Expor estatísticas de forma gráfica e efetuar análise
- Efetuar triagem e grupamento dos dados

Variável é a característica de interesse a ser analisada. É desejável que a variável (ou variáveis) tenha boa correlação com as funções principais do produto, represente o fenômeno a ser analisado e possa, no caso de dados pré-existentes, ser extraída dos mesmos.

A utilização de estatísticas seja de tendência central (média, mediana ou moda) e/ou de dispersão (variância, desvio padrão, amplitude ou percentis) é uma maneira simples de extrair informação de uma massa de dados que parece a primeira vista, sem qualquer razão de ser.

Os gráficos das estatísticas escolhidas permitem verificar pontos extremos das estatísticas escolhidas (por exemplo,  $\bar{x}$  e  $s$  ou  $A$  das amostras), visualizar tendências e formular hipóteses.

Dados históricos podem conter erros e eventualmente não estão reunidos de forma a representar grupos homogêneos que permitam a visualização de alguma tendência ou exploração de algum tratamento comum aos grupos.

A retirada de dados contendo erros foi feita através da verificação dos pontos extremos e o rastreamento quanto a causas específicas de erro (erro de registro ou erro experimental).

A verificação da heterogeneidade entre grupos de dados foi auxiliada por uma técnica chamada análise de comparações múltiplas. Esta técnica estatística identifica diferenças entre médias populacionais de vários grupos, previamente classificados, sujeitos as várias causas atuando simultaneamente sobre os elementos da população, que permite distinguir se há ou não diferença estatisticamente significativa entre eles, e quais grupos apresentam esta diferença. No caso, foi utilizado o “método de Scheffé”, pois, segundo Box <sup>(3)</sup> é “o mais conservativo, pois produz o mais largo dos intervalos estabelecidos”.

## **2.2. Teste de Hipóteses**

A confirmação ou rejeição das hipóteses formuladas, sob o ponto de vista estatístico, foi feita através de testes de hipóteses. A escolha do teste adequado foi obtida a partir de Juran <sup>(4)</sup> que apresenta um sumário de doze testes mais comuns mencionados na literatura e usados na prática (Anexo A - Resumo de Testes de Hipóteses).

Após o delineamento de uma conclusão que é afirmar o resultado do teste de hipóteses, uma análise de sensibilidade foi feita variando-se estimativas de amostras chaves e outros fatores e observando o efeito nas conclusões finais. A confirmação dos resultados ou não indica a robustez da decisão tomada.

## **2.3. Intervalos de Confiança Versus Tolerância**

Considerada a rejeição de uma hipótese formulada, a questão que surge é: qual então seria uma boa estimativa do valor do parâmetro para a população? Por outro lado, considerada a aceitação da hipótese, a pergunta seria: qual é o limite de confiança para o resultado da amostra? A resposta a estas duas questões envolveu o uso da estimação estatística.

Intervalos de confiança foram calculados para estimar valores esperados de deformação e valores esperados das variáveis de interesse escolhidas.

Valores de especificação/referência foram comparados com os intervalos de confiança obtidos a fim de verificar a probabilidade de se atingir os mesmos.

Os intervalos calculados a partir de dados amostrais para estimativa da população ou de futuras observações não devem ser confundidos com limites de tolerância. Limites de tolerância são limites estabelecidos pelo projeto que definem os valores mínimo e máximo permitidos para que o produto funcione de maneira apropriada.

## **3. ENVELOPES MOTORES UTILIZADOS NO ESTUDO: S40 E S43**

Envelopes motores S40 e S43 (Figura 3) são fabricados em aço de ultra-alta resistência 300M-ESR, possuem um diâmetro externo nominal de 1007 mm e comprimento total próximo a 4013 mm e 6514 mm, respectivamente.

Além de uso corrente no VLS-1, estes envelopes motores em sua versão atual têm previsão de uso nos futuros veículos VS-40 e VS-43.

### **3.1. Processo de Fabricação dos Envelopes Motores S40 e S43**

Os envelopes motores S40 e S43 são basicamente estruturas metálicas soldadas compostas de virolas, fechamento dianteiro e semifechamento traseiro. O número de virolas (3 a 5) varia em função do tipo de motor (S40 ou S43). O material utilizado na fabricação dos envelopes motores S40 e S43 é o aço E300M-ESR, liga especial que possui elevada resistência mecânica desenvolvida pela antiga Eletrometal.

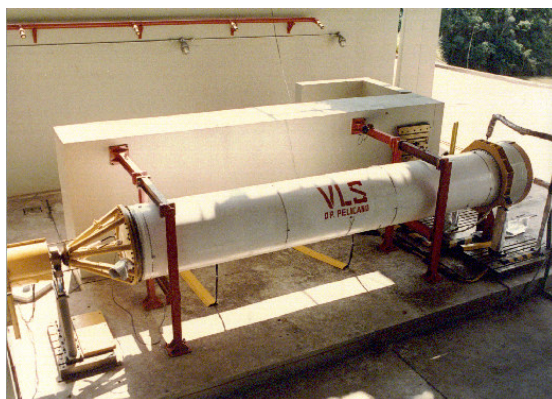


Figura 3. Envelope motor S43 preparado para ensaio em banco de provas

A fabricação dos envelopes motores segue um plano específico onde estão definidas as seguintes fases:

- Processo de montagem: É a fabricação do envelope motor envolvendo as atividades de recebimento das matérias primas, soldagem, inspeções (visual, dimensional, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, raios-x, etc.), tratamento térmico de alívio de tensões e outras atividades que resultam na obtenção do envelope motor antes do tratamento térmico final.
- Tratamento térmico final: É composto das operações de preparação do envelope motor mais a normalização, têmpera e duplo revenimento. Um sumário do ciclo de tratamento térmico para envelopes motores com diâmetro de 1000 mm em 300M é mostrado na Figura 4.
- Ensaio hidráulico. São as operações relativas ao ensaio hidráulico de aceitação estrutural do envelope motor.
- Usinagem final. Engloba a inspeção dimensional após as etapas de tratamento térmico/ensaio hidráulico e a usinagem das interfaces.

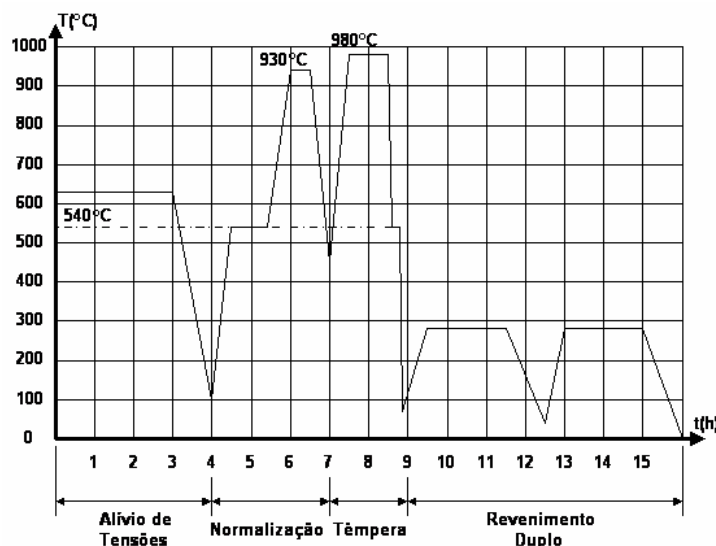


Figura 4. Sumário do ciclo térmico pra envelopes motores  $\varnothing$  1000 mm / 300M (Bosco et al.)<sup>(5)</sup>

### 3.2. Medidas Utilizadas

O “diâmetro externo” e o chamado “erro de forma” são tomados em várias seções do envelope motor, incluindo aí a região das virolas, do fechamento dianteiro e semifechamento traseiro. A Figura 5 discrimina estes pontos de medidas. Especificamente, o “erro de forma” do motor é obtido através da leitura direta do relógio comparador em todos os pontos de intersecção das linhas horizontais (de A até H’) com as linhas circunferenciais com relação a um “zero” ou ponto de referência (diâmetro nominal de 1007 mm no semifechamento traseiro).

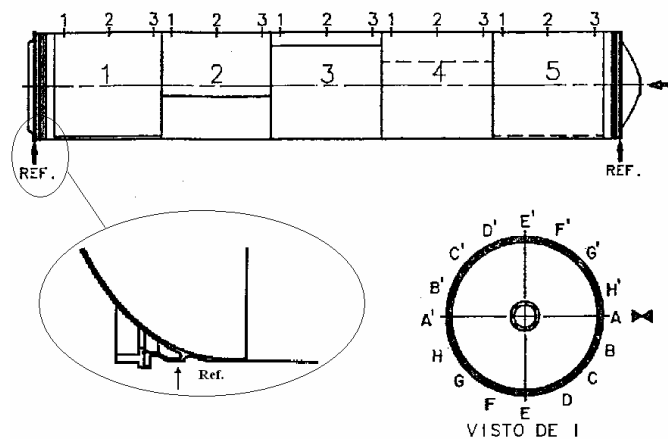


Figura 5. Linhas e seções do envelope motor S43 para medição

Estas medidas são normalmente realizadas após o todo o processo de montagem. Esta inspeção é denominada “pós-montagem”. Também são realizadas medidas de “diâmetro externo” e “erro de forma” antes da usinagem final dos envelopes motores. Quando estas são realizadas após o tratamento térmico, são chamadas “pós tt” e quando realizadas após o ensaio hidráulico de “pós eh”.

Medidas chamadas de controle de tratamento térmico são feitas antes e depois do tratamento térmico e destinam-se a engenharia de processos de fabricação para previsão de sobremetal em regiões de usinagem final a fim de manter as características dentro dos limites tolerados, envolvendo cotas de comprimento e diâmetro desta região de interesse.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

O método de trabalho proposto foi aplicado numa série histórica de dados de 38 envelopes motores S43 e S40, ou seja, uma sumarização foi feita e análise preliminar realizada o que permitiu indicar tendências e formular uma série de hipóteses com relação a diferenças entre lotes, influências do tratamento térmico e ensaio hidráulico.

As hipóteses levantadas foram testadas, separadamente para envelopes motores S40 e S43, considerando o nível de significância escolhido de  $\alpha = 5\%$ , teste aplicável e procedimentos escolhidos adequados à comparação de duas médias, dados pareados, situações “antes” e “após o tratamento térmico somado ao efeito do ensaio hidráulico”. Os testes de hipóteses indicaram, a um nível de confiança de 95%, que o “Diâmetro” dos motores S40 e S43 sofrem diminuição com o “tratamento térmico + ensaio hidráulico”, o “Erro de forma longitudinal – Virolas” dos motores S40 e S43 sofrem aumento com o “tratamento térmico + ensaio hidráulico” e o “Comprimento – Virolas” dos motores S40 e S43 sofrem diminuição com o “tratamento térmico + ensaio hidráulico”.

A obtenção de valores de intervalo de confiança foi feita considerando-se os parâmetros de média de uma população normal com desvio-padrão desconhecido para as variáveis “Diâmetro”, “Erro de Forma Longitudinal” e “Comprimento” para os envelopes motores S40 e S43 nas situações pós montagem (ou antes do tratamento térmico) e pós tt+eh (ou após tratamento térmico somado ao ensaio hidráulico). Os intervalos de confiança encontrados para a situação pós tt+eh são descritos na Tabela 1 e indicam valores esperados para estas variáveis após tt+eh.

Tabela 1. Intervalos de confiança - envelopes motores S40 e S43 – pós tt+eh

Motor	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Erro de Forma longitudinal (mm)
S40	1004,23 +/- 0,44	3439,94 +/- 5,69	2,49 +/- 0,88
S43	1004,07 +/- 0,83	5936,06 +/- 6,21	3,60 +/- 0,55

Valores de referência e especificação estabelecidos pelo projeto foram ainda comparados com o intervalo de confiança e distribuição amostral obtidos (pós tt+eh). Verificou-se que a probabilidade das referências serem atingidas é nula.

O cálculo de intervalo de confiança para a variação esperada entre antes e após “tt+eh” para a população foi feita para a diferença entre médias assumindo distribuições normais, dados pareados e desvios padrão desconhecidos. Os valores esperados de deformação foram transformados em variações percentuais para “Diâmetro” e “Comprimento”. A variação de “Erro de Forma Longitudinal” foi colocada diretamente na Tabela 2, bem como, os valores percentuais calculados. Considerando que deformações “de tamanho” e “de forma”, segundo Lement<sup>(6)</sup>, ocorrem simultaneamente normalmente em estruturas tratadas, observa-se que as respostas das variáveis incluem ambos os tipos de deformações no envelope motor.

Tabela 2. Variação percentual – envelopes motores S40 e S43

<b>Envelope Motor</b>	<b>Variação Diâmetro (%)</b>	<b>Variação Comprimento (%)</b>	<b>Variação Erro de Forma longitudinal</b>
<b>S40</b>	- 0,211 (- 0,225 a - 0,195)	- 0,186 (- 0,229 a - 0,0548)	0,88 (0,170 a 1,60)
<b>S43</b>	- 0,216 (- 0,299 a - 0,172)	- 0,178 (- 0,222 a - 0,0837)	0,761 (0,330 a 1,18)

## 5. CONCLUSÃO

Foi proposto um método que permite, a partir de dados históricos oriundos de um processo especial, visualizar, atestar de maneira significativa e obter uma previsão das variações ocorridas durante o mesmo com relação a determinadas características.

Este método foi aplicado na averiguação das deformações ocorridas no tratamento térmico de têmpera e revenimento de envelopes motores S40 e S43, onde variáveis de “Diâmetro”, “Comprimento” e “Erro de Forma Longitudinal” da região das virolas foram avaliadas antes e após tratamento térmico somado ao ensaio hidráulico. Respostas positivas foram obtidas permitindo obter maior conhecimento do processo.

Finalmente, o método proposto obteve um intervalo de valores, com um nível de confiança de 95%, que permitem o estabelecimento de tolerâncias de projeto para as variáveis trabalhadas, “Diâmetro”, “Erro de Forma Longitudinal” e “Comprimento” para a região das virolas, os quais devem ser usados na aceitação de um envelope motor.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao IAE e ao ITA pelo suporte ao trabalho realizado.

## 7. REFERÊNCIAS

1. VLS-1 DESCRIÇÃO TÉCNICA. São José dos Campos: IAE, 2005. <<http://www.iae.cta.br>>. acesso em: 12 de abril de 2006.
2. SAKAI, P. R. et al. Análise da deformação de envelopes motores foguete devido à ação do tratamento térmico. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006, Recife. **Anais...Recife: CONEM, 2006.**
3. BOX, George E. P.; HUNTER, William G.; HUNTER, J. Stuart. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building.** New York: John Wiley and Sons, 1978. 654 p.
4. JURAN; J. M.; GRZYNA, Frank M. (Ed.). **Juran's quality control handbook.** 4. ed. New York: McGraw-hill. 1988.

5. BOSCOV, Jayme et al. Rocket motor cases in 300M steel: a pioneer development performed in the brazilian space programme. In: ESA SYMPOSIUM ON EUROPEAN ROCKET AND BALOON PROGRAMMES AND RELATED RESEARCH, 7., 1985, [S.L.]. **Proceedings...** [S.l.]: ESA, 1985. (SP-229)
6. LEMENT, Bernard S. **Distortion in tool steels**. 4. ed. Novelty: American Society for Metals, 1959, 172 p.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

## ANALYSIS OF DISTORTION OF ROCKET MOTOR CASES DUE TO HEAT TREATMENT

### Paulo Roberto Sakai

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail [sakai@iae.cta.br](mailto:sakai@iae.cta.br)

### Lindolfo Araújo Moreira Filho

ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail: [lindolfo@ita.br](mailto:lindolfo@ita.br)

### Silvio Fazolli

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.  
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-900  
e-mail [sfazolli@iae.cta.br](mailto:sfazolli@iae.cta.br)

### Miguel Ângelo Menezes

UNESP - Universidade Estadual Paulista  
Av. Brasil, 56 - Centro  
Ilha Solteira - SP - Brasil. - CEP 15385-000  
e-mail: [miguelm@ita.br](mailto:miguelm@ita.br)

**Abstract.** *Understanding and achievement of an effective interpretation of a process result that allows a process feedback and information to establish a suitable specification are important activities, mainly in spatial domain which involves components with high performance and reliability. For process considered specials, these tasks present an inherent difficult, function of the features of this kind of process. The present work propose a method based on statistical techniques that permit through its application on historical data, visualizing, attesting and estimating the results of a special process. This method was applied in the investigation of distortions due to quenching and tempering of two types of rocket motor cases, S40 and S43, currently used in VLS-1 (satellites launcher vehicle). Variables like “Diameter”, “Length” and “Longitudinal Shape Distortion” of the cylindrical region of these motors were evaluated before and after heat treatment. Finally, the method proposed a range of values with a 95% confidence interval that provides the statement of tolerance limits for the referred variables, which should be used for criteria acceptance of a motor case.*

**Keywords.** *Rocket motor case, Distortion, Heat treatment, Statistical methods.*