

A FABRICAÇÃO DE ENVELOPES MOTORES FOGUETE PARA UTILIZAÇÃO NO VEÍCULO LANÇADOR DE SATELITES BRASILEIRO VLS-1

Adriano Gonçalves

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-904
e-mail adriano@iae.cta.br

José André da Motta Jr.

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-904
e-mail andremottajr@iae.cta.br

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

Resumo. *Fabricar estruturas que apresentem alta resistência e rigidez, associada à baixa massa estrutural, é fator fundamental para que um foguete alcance o desempenho desejado. Atualmente, o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA) está desenvolvendo o Veículo Lançador de Satélites VLS-1, que possibilitará ao Brasil ingressar no grupo de países capazes de colocar uma carga útil em órbita terrestre. Esse trabalho visa apresentar aspectos relativos à fabricação de envelopes motores foguete feitos em aço de ultra alta resistência 300M. Foco é dado aos processos de produção, desde a elaboração da matéria prima na aciaria, passando pelos processos intermediários de obtenção de embutidos, anéis e chapas, usinagens e montagem final da estrutura envolvendo processos de soldagem e tratamento térmico. São abordados aspectos relativos à garantia da qualidade onde são apresentadas as inspeções e os ensaios relativos a esse desenvolvimento, incluindo o teste de recebimento estrutural do envelope motor.*

Palavras-chave: *envelope motor foguete, aço 300M, veículo lançador de satélites.*

1. INTRODUÇÃO

O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), órgão pertencente ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), tem como missão realizar pesquisa e desenvolvimento no campo aeroespacial. Para atender a este fim, o IAE desenvolve uma série de veículos de sondagem e veículos lançadores, sendo o projeto do Veículo Lançador de Satélites VLS-1, mostrado na Figura 1, um dos mais importantes em andamento.

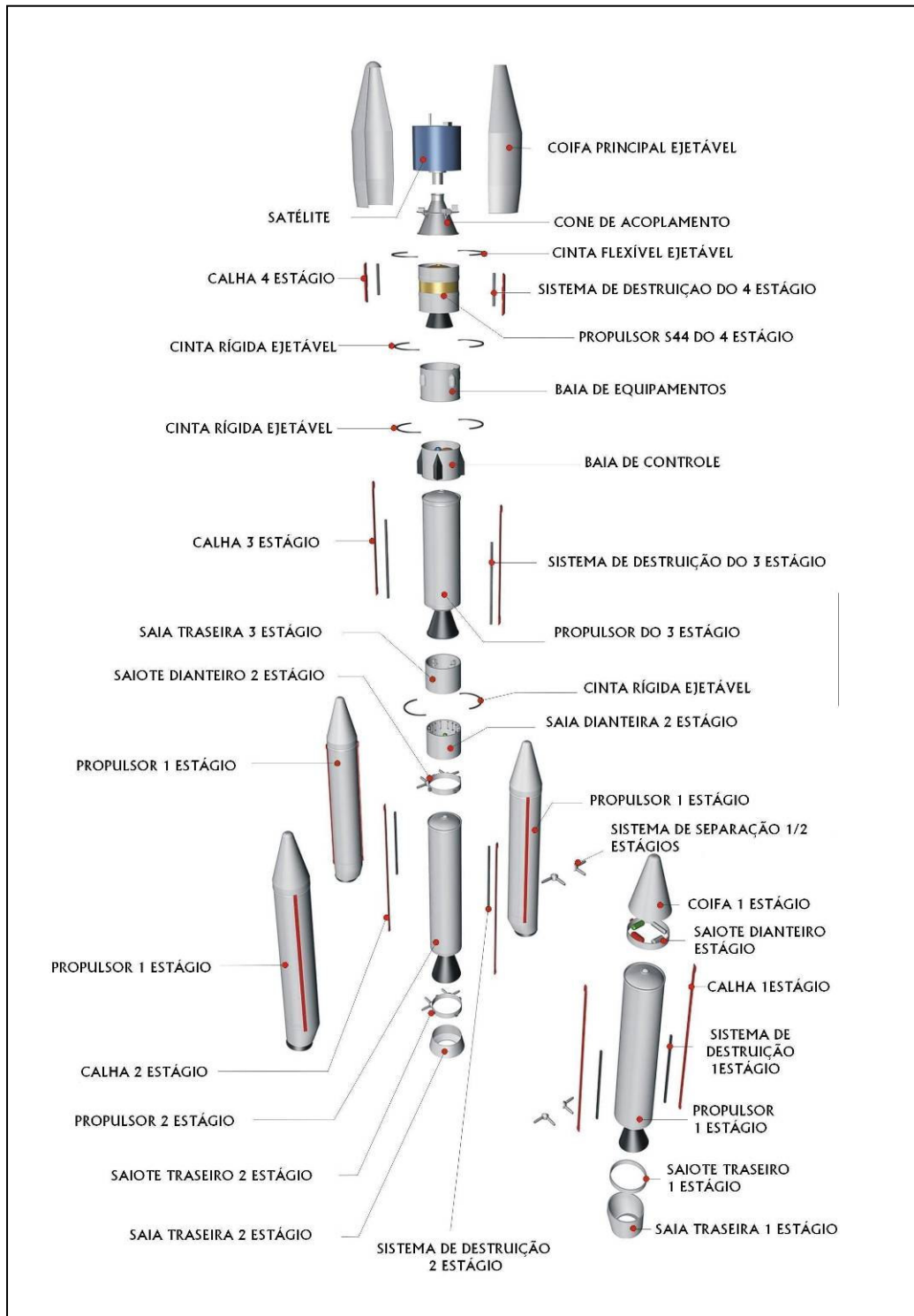


Figura 1. Configuração do VLS-1.

O VLS-1 é um lançador de satélites de quatro estágios, utilizando motores foguete a propelente sólido em todos os estágios como descrito por Isakawitz⁽¹⁾. Tem na decolagem o comprimento de 19 m, massa de 50 toneladas, sendo 41 toneladas de combustível, e empuxo de 1000 kN. O desempenho do VLS-1 permite a inserção de satélites, com massa entre 100 e 350 kg, em órbitas circulares de 250 a 1000 km, em larga faixa de inclinações, desde as equatoriais às polares.

O VLS-1 é constituído de quatro estágios ilustrado na Figura 2, sendo o seu primeiro estágio formado por quatro propulsores do mesmo porte, denominados S43B, fabricados em aço de ultra-alta resistência 300M, acionados simultaneamente e fixados simetricamente ao segundo estágio. Suas tubeiras são móveis para permitir o controle de atitude do veículo.

O propulsor do segundo estágio possui as mesmas dimensões do primeiro estágio, a menos de sua tubeira móvel que é adaptada ao voo em atmosfera rarefeita que a torna de maiores dimensões.

O propulsor do terceiro estágio denominado S40B, é também produzido em aço 300M, mas possui comprimento menor que dos motores S43B. É também equipado com tubeira móvel.

O propulsor do quarto estágio possui sua estrutura em materiais compósitos, utilizando fibra de aramida, fibra de carbono e resina epóxi e suas interfaces em alumínio. É equipado com tubeira fixa, sendo responsável pelo incremento de velocidade necessário a satelização.

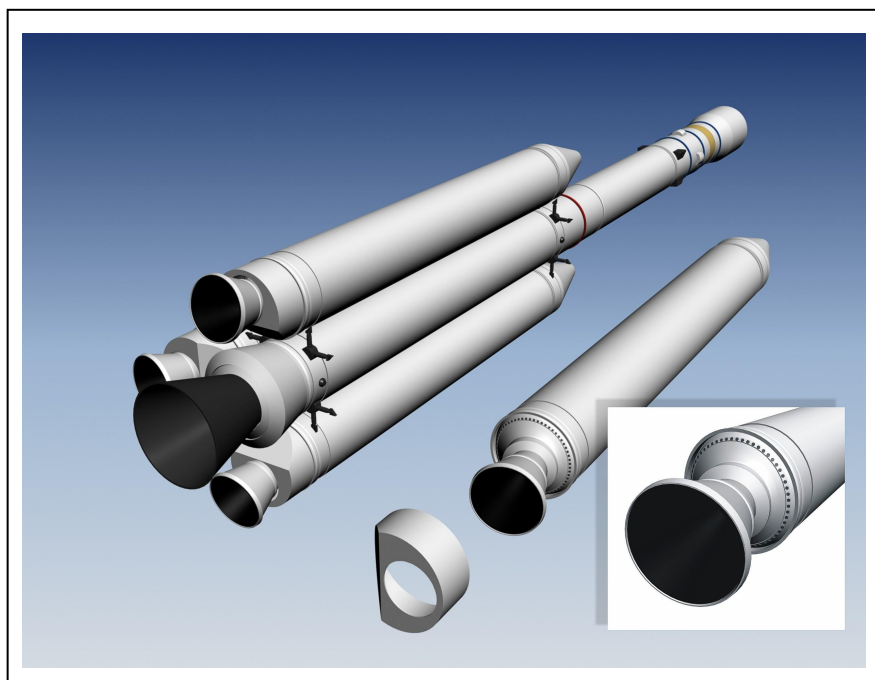


Figura 2. Detalhes dos estágios do VLS-1 com destaque para o propulsor do primeiro estágio.

As principais características do VLS-1 são apresentadas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1. Características e parâmetros de desempenho dos propulsores do VLS-1

	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO	4º ESTÁGIO
Designação do motor	S43B	S43B	S40B	S44
Material da estrutura	Aço 300M	Aço 300M	Aço 300M	Aramida/epóxi
Comprimento, mm	6502	6502	4002	1110
Diâmetro, mm	1007	1007	1007	1009
Massa da estrutura, kg	603	603	391	115
Massa de propelente, kg	7180 (cada)	7180	4430	815
Tempo de queima, s	60	60	58	66
Pressão na câmara, MPa	5,8	5,8	5,8	4,1
Empuxo no vácuo, kN	305 (cada)	327	202	33
Impulso específico no vácuo, s	260	271	267	276
Razão de expansão da tubeira	12,9	37,2	26,0	66,2
Diâmetro de saída da tubeira, mm	700	1200	800	602

2. CONSTITUIÇÃO E PRINCIPAIS FUNÇÕES DE UM PROPULSOR

A fonte de energia na “propulsão a foguete” provém da combustão química, conforme descrito por Sutton⁽²⁾. Gases são produzidos pela combustão de um combustível e de um oxidante em uma câmara apropriada. Estes gases são, subseqüentemente, expandidos em uma tubeira e acelerados a grandes velocidades (1800 a 4300 m/s) sendo ejetados produzindo, desta forma, o empuxo desejado (Figura 3).



Figura 3. Propulsor utilizado em ensaio de tiro em banco.

Para executar esta função os motores foguete a propelente sólido (Figura 4) possuem basicamente os seguintes elementos: envelope motor, propelente, ignitor e tubeira.

O envelope motor é composto de um invólucro cilíndrico com domos hemisféricos, anterior e posterior, formando um vaso de pressão que forma a câmara de combustão do propelente sólido a ser queimado. Além de conter o grão propelente, o envelope motor possui função estrutural constituindo o corpo foguete. Portanto, o projeto e a fabricação do envelope motor devem atender às funções ditas restritivas como, suportar as pressões provenientes da formação dos gases gerados pela queima do propelente e atender às exigências de interfaces com outros subsistemas mecânicos.

São exemplos de interfaces com outros subsistemas do foguete: as interfaces com as baias (componentes de ligação entre estágios e que comportam subsistemas eletrônicos e hidropneumáticos), as ligações com outros envelopes motores, seja como “booster” ou como estágio superior ou inferior, as interfaces com o sistema de controle da tubeira, com o sistema de ignição e finalmente, com as interfaces dos meios de solo relacionados ao lançamento.

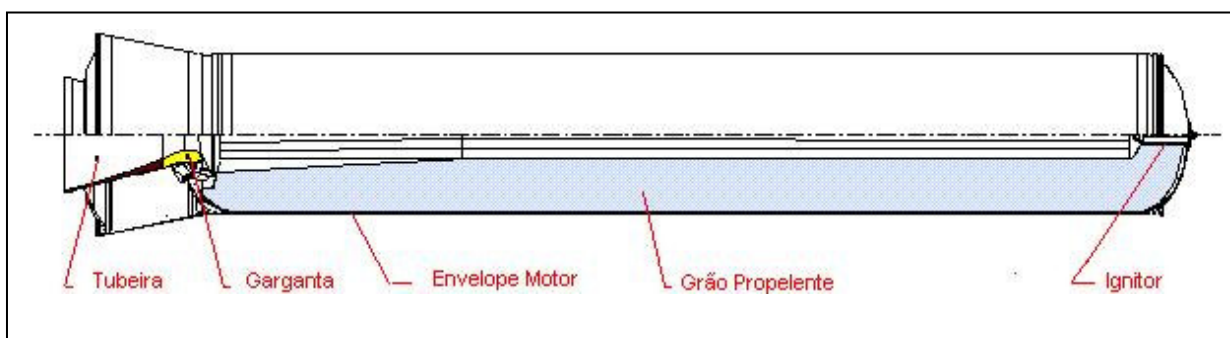


Figura 4. Esquema de um propulsor.

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS ENVELOPES MOTORES S40 E S43

Os envelopes motores S40B e S43B são basicamente estruturas metálicas soldadas compostas de membranas cilíndricas (virolas), fechamento dianteiro e semifechamento traseiro. O número de virolas (3 a 5) varia em função do tipo do motor.

3.1 Obtenção da Matéria Prima

O material utilizado na fabricação desses envelopes motores é o aço E300M-ESR, liga especial que possui elevada resistência mecânica desenvolvida pela antiga Eletrometal. A obtenção de um lingote dessa liga se dá através de um processo de refusão sob escória (ESR ou “eletroslag remelting”). Esse lingote é o ponto de partida para uma série de operações para obtenção de chapas, anéis e embutidos, os quais irão compor os envelopes motores. Após a produção dos lingotes, os mesmos são forjados em placas ou barras redondas.

Análises químicas e metalográficas são realizadas em corpos de prova retirados pela aciaria. Ao final desta etapa, ensaio de ultra-som é executado nos forjados.

As placas são em seguida, laminadas a quente para obtenção de chapas de espessura de 3,8 mm, destinadas a formarem as virolas do envelope motor, ou placas de espessuras de 37,5 mm ou 55,0 mm, se destinadas a obtenção do fechamento dianteiro e tampa traseira.

A bobina de 3,8 mm obtida da laminação a quente é recozida para diminuição da resistência mecânica antes de ser submetida à decapagem mecânica e nova laminação, desta vez a frio em laminador específico, até a espessura nominal de 3,3 mm. Finalmente, a bobina é cortada em chapas de comprimento de 3.250 mm para transformação em virolas de diâmetro de 1000 mm.

As placas de 37,5 mm e 55,0 mm são cortadas, pelo processo plasma, em discos de diâmetros de 1.350 mm e 1.050 mm. Esses discos são forjados em calotas esféricas, denominadas embutido, que são usinados até uma dimensão próxima a final, para montagem do envelope motor.

As barras de diâmetro de 355,6 mm, oriundas do forjamento do lingote, são utilizadas na confecção de anéis forjados que usinados formarão os anéis de fixação para fechamento dianteiro e semifechamento traseiro, além do próprio semifechamento traseiro.

Novamente, ensaios metalográficos são realizados após as etapas de laminação a quente e recozimento da bobina e laminação a frio no caso da fabricação das chapas que comporão as virolas do envelope motor. Ainda, são previstos ensaio por ultra-som nos anéis e calotas esféricas após seu forjamento ou embutimento.

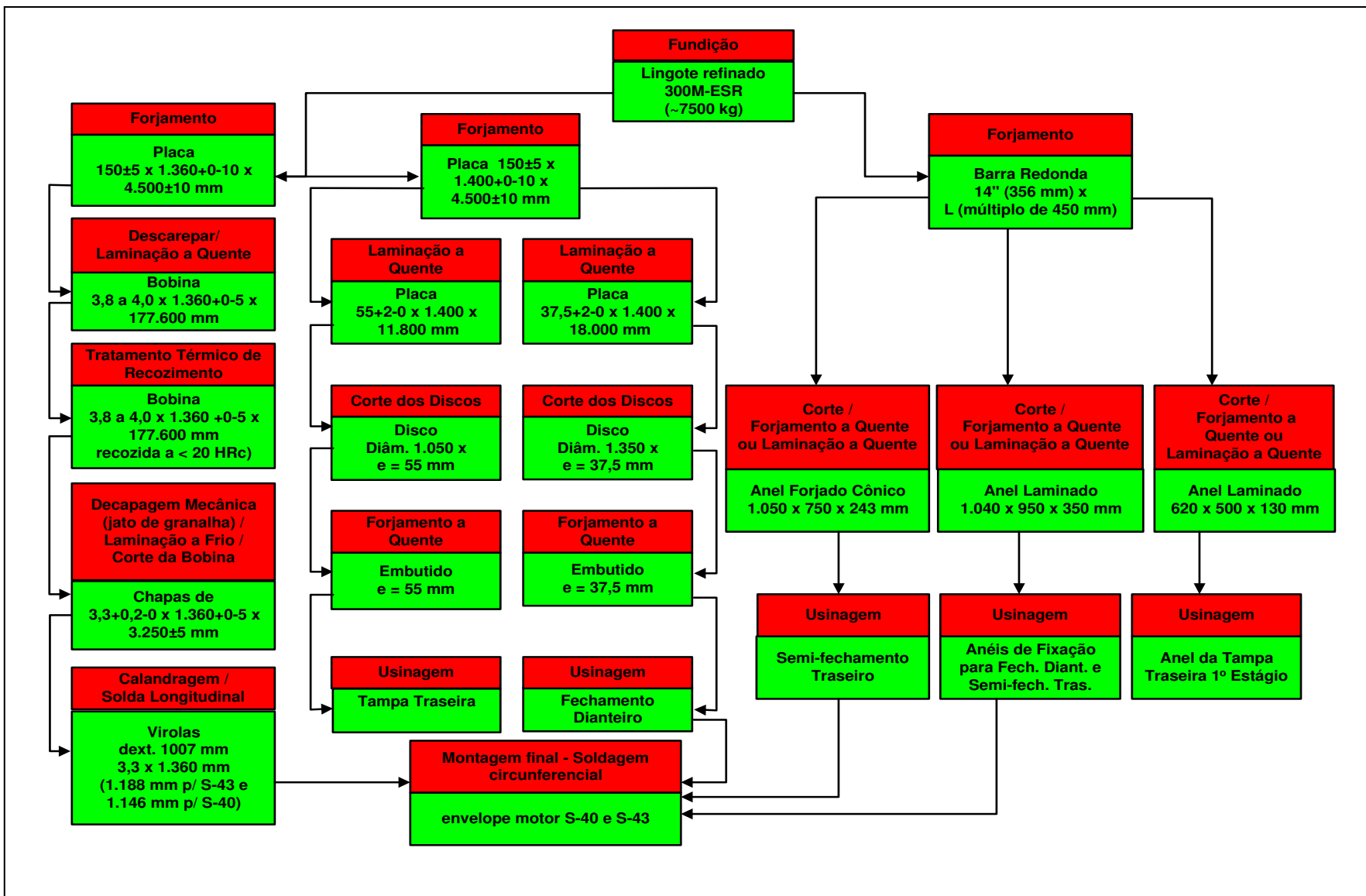
Após a obtenção dos pré-usinados, a fabricação dos envelopes motores desdobra-se nas seguintes etapas, a saber: Processo de Montagem, Tratamento Térmico Final, Ensaio Hidráulico e Usinagem Final. Todo o processo de produção do item, segundo Sakai⁽³⁾, que vai desde a obtenção da matéria prima até a finalização das montagens, está representado na figura 6.

3.2 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, entre outras), tratamento térmico de alívio de tensões e outras atividades que resultam na obtenção do envelope motor antes do tratamento térmico final. Todas estas operações são agrupadas sequencialmente num documento apropriado para controle das atividades e registro.

Uma operação de destaque neste sequencial é a operação de soldagem longitudinal das virolas que utiliza o processo plasma.

Figura 6. Fluxo de fabricação dos componentes do envelope motor.



3.3. Tratamento térmico final

É composto, na seqüência das atividades de produção, das operações de preparação do envelope motor, para sua normalização, têmpera e revenimento. Seguem-se, a sua limpeza para remoção do sal utilizado no revenimento, a execução dos ensaios de dureza e dos ensaios não destrutivos (visual, líquidos penetrantes e inspeção por raios-X) para comprovação da qualidade requerida. O valor especificado de resistência do material obtida após o tratamento térmico é de 1800 MPa, que equivale a uma dureza de 52 a 54 HRC. O ciclo de tratamento térmico para envelopes motores fabricados com aço 300M e com diâmetro de 1000 mm, conforme descrito por Boscov⁽⁴⁾, é mostrado na Figura 7.

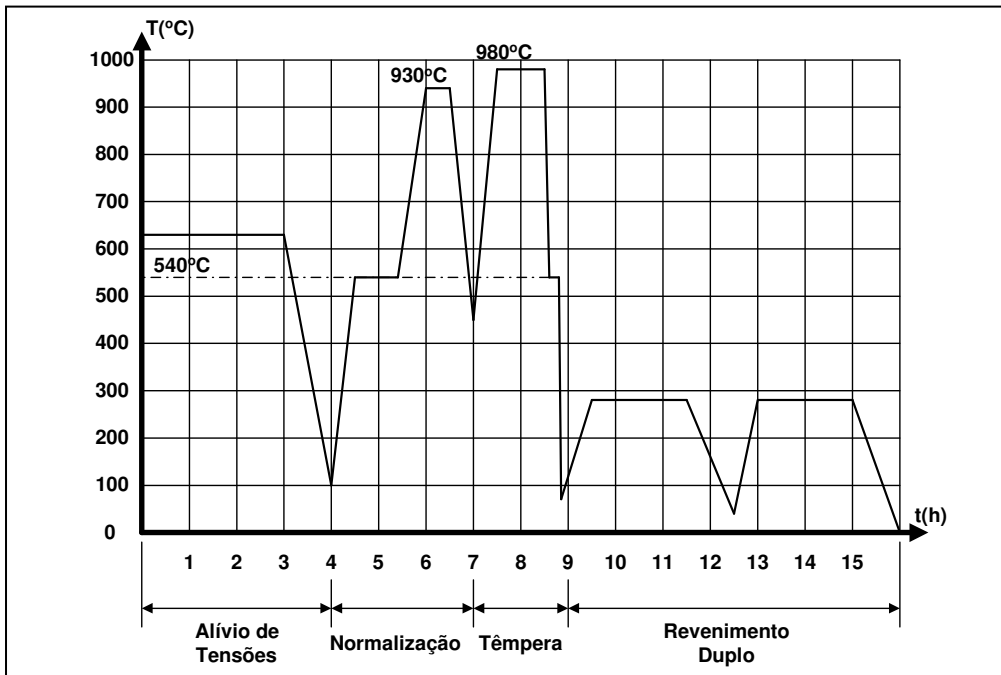


Figura 7. Sumário do ciclo térmico para envelopes motores de 300M.

O tratamento térmico ocorre em um forno do tipo “poço”, fabricado pela empresa alemã Aichelin. Durante o processo, os envelopes motores ficam no interior de um “invólucro protetor”, com o intuito de controlar a interação da estrutura com o meio ambiente externo, fundamental para a obtenção das características especificadas. A Figura 8 permite a visualização de um envelope motor S43B sendo içado do forno de austenitização.



Figura 8. Envelope motor S43B sendo retirado do forno Aichelin.

Medidas de dureza são feitas em pontos específicos no próprio envelope motor e em corpos de prova que são tratados conjuntamente com a estrutura. Esses corpos de prova permitem, também, a realização de ensaios metalográficos.

A verificação metrológica da estrutura é executada antes e após o tratamento térmico com vistas a monitorar as deformações oriundas do próprio tratamento.

3.4. Ensaio hidráulico.

Referem-se às operações relativas ao ensaio hidráulico de aceitação estrutural do envelope motor. O envelope motor é pressurizado com água, seguindo patamares de subida e permanência em determinados níveis de pressão. A pressão máxima de ensaio é 9 MPa, que representa 1,5 vezes a pressão a qual a estrutura do motor é submetida durante a queima do propelente.

3.5. Usinagem final.

Engloba a inspeção dimensional após ensaio hidráulico e a usinagem das interfaces, isto é, dos anéis de fixação e do fechamento dianteiro (região do ignitor).

4. CONCLUSÃO

Por sua natureza a área espacial envolve alto desempenho e confiabilidade de seus componentes. No caso de envelopes motores, isto implica em obter estruturas que apresentem alta resistência e rigidez, além de baixa massa estrutural, fator fundamental para que um foguete alcance o desempenho desejado.

Esse trabalho apresentou aspectos relativos à fabricação de envelopes motores foguete feitos em aço de ultra alta resistência 300M, desde a elaboração da matéria prima na aciaria, passando pelos processos intermediários de obtenção de embutidos, anéis e chapas, usinagens e montagem final da estrutura envolvendo processos de soldagem e tratamento térmico. Foram abordados aspectos relativos à garantia da qualidade onde são apresentadas as inspeções e os ensaios relativos a esse desenvolvimento, incluindo o teste de recebimento estrutural do envelope motor.

Os métodos de fabricação, os procedimentos de inspeção e testes agrupados num conjunto coerente apresentados neste trabalho, permitiram a obtenção de envelopes motores com alta performance, capazes de resistir às pressões de trabalho. Finalmente, cabe ressaltar o esforço em procurar desenvolver todos os processos aqui apresentados utilizando recursos e processos instalados no país.

5. REFERÊNCIAS

1. ISAKOWITZ, Steven J. et al. **International Reference Guide to Space Launch Systems**. 3th ed. Virginia: AIAA, 1999. p. 487-500.
2. SUTTON, George Paul; biblarz, Oscar. **Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets**. 7. ed. New York: John Wiley and Sons, 2001. p. 739.
3. SAKAI, Paulo R., **Análise da deformação de envelopes motores foguete devido à ação do tratamento térmico**, 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.
4. 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 Balloon Programmes and Related Research, 7, [S.L.]. Proceedings... [S.I.]: ESA, 1985.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

THE FABRICATION OF THE MOTOR CASES FOR THE BRAZILIAN SATELLITE LAUNCH VEHICLE VLS-1.

Adriano Gonçalves

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-904
e-mail adriano@iae.cta.br

José André da Motta Jr.

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.
São José dos Campos - SP - Brasil. - CEP 12228-904
e-mail andremottajr@iae.cta.br

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

Abstract. *Obtain structures with high strength and stiffness allied to low weight is the basis to a rocket to achieve the desired performance. Presently, the Institute of Aeronautics and Space (IAE) of General-Command of Aerospace Technology (CTA) is developing the Satellite Launch Vehicle VLS-1, that it will make possible to Brazil to enter in the group of countries capable to place payloads in the Earth's orbit. The aim of this work is to present some aspects of the manufacture of the rocket motor cases, produced in ultra-high resistance steel 300M. Focus is given to the production processes, from the elaboration of the raw material (to obtain sheets, plates and blanks), machining and final assembly of the structure involving welding processes and heat treatment. Some quality assurance aspects like inspections and tests concerned to this development are presented, including the structural test for acceptance of the motor case.*

Keywords *Rocket Motor Case, 300M Steel, Satellite Launch Vehicle.*