

INPE-00000-TDI/0000

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE
UM ESTADO-REATOR A COMBUSTÍVEL SÓLIDO UTILIZANDO
POLIBUTADIENO HIDROXILADO**

Gabriela Silva Moura

Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais, orientada
pelo Dr. José Gobbo Ferreira, aprovada em 01 de março de 2007.

INPE
Cachoeira Paulista
2007

00.000.00(000.0)

MOURA, G. S.

Análise Teórica e Experimental do Desempenho de um Estado-Reator a Combustível Sólido Utilizando Polibutadieno Hidroxilado / Gabriela Silva Moura. – Cachoeira Paulista: INPE, 2007.

59p. ; (INPE-0000-TDI/00)

1. Estado-Reator. 2. Polibutadieno Hidroxilado. 3. Gerador de Ar Viciado. 4. Taxa de Regressão. 5. Impulsão Específica. I. Análise Teórica e Experimental do Desempenho de um Estado-Reator a Combustível Sólido Utilizando Polibutadieno Hidroxilado

FOLHA DE APROVAÇÃO

CONFECCIONADA PELO SPG E INCLUÍDA PELO SID.

*“Viver não é necessário: o que é necessário é criar.
Não conto gozar a minha vida; nem em gozá-la penso.
Só quero torná-la grande, ainda que para isso tenha de ser
o meu corpo (e a minha alma) a lenha desse fogo.”*

Fernando Pessoa

*A meus pais,
ANTÔNIO LUÍS MOURA e
MARIA TEREZA SILVA MOURA.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado e pelas viagens a congressos nacionais.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos.

Ao Banco de Testes em Condições Atmosféricas – BTCA, pela utilização de suas instalações e grande apoio.

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Gobbo Ferreira, pelo conhecimento passado e pela orientação na realização deste trabalho.

À Oficina Mecânica, pela orientação e apoio nas instalações da parte experimental.

Aos meus amigos do curso pelo estímulo.

RESUMO

Os estato-reatores, também conhecidos como estato-jatos, constituem um meio atraente de propulsão e seu estudo merece considerável interesse, tanto no campo experimental quanto no teórico. A grande utilização dos polibutadienos em foguetes, principalmente do polibutadieno hidroxilado, conhecido na literatura como hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB), estimula a realização deste trabalho que visa à análise teórica e experimental do desempenho de um estato-reator subsônico, quando esse tipo de polímero é utilizado como combustível sólido. Os experimentos foram realizados utilizando-se um gerador de ar viciado do tipo tubo conectado, capaz de simular as condições do ar encontradas durante vôos supersônicos. O trabalho foi dividido em 3 etapas: avaliação teórica do polibutadieno hidroxilado utilizando-se modelagens matemáticas e códigos computacionais, recuperação e dimensionamento do equipamento, utilizando-se um modelo teórico para a queima do combustível e definição / instalação da instrumentação mais adequada para os testes experimentais de forma a adquirir e armazenar os parâmetros relevantes obtidos nos ensaios. Os seguintes passos foram seguidos na realização dos estudos: levantamento das características físicas e químicas do polibutadieno hidroxilado; avaliação teórica da combustão do polibutadieno hidroxilado utilizando-se modelagens matemáticas e códigos computacionais; recuperação e aperfeiçoamento do conjunto sistema gerador de ar viciado / estato-reator; análise teórica do desempenho do estato-reator utilizando o polibutadieno hidroxilado como combustível; dimensionamento de partes do sistema (dimensões do estojo do grão, das tubeiras, das câmaras de mistura) para os ensaios com o novo combustível; determinação da formulação do aglutinante (pré-polímero + agente de cura) com as melhores propriedades mecânicas para o emprego no estato-reator; estudo dos efeitos da câmara de mistura intermediária no desempenho do sistema; avaliação do modelo teórico obtido, através da comparação com os resultados experimentais.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE RAMJET PERFORMANCE USING POLYBUTADIENE AS SOLID FUEL

ABSTRACT

Solid fuel ramjets (SFR's) constitute an important subject in the current stage of propulsion research. These systems can incorporate the high performance achieved by conventional liquid fuel ramjets to the simplicity of solid fuel motors, leading to significant advantages related to fabrication and operation costs. A ramjet is an air-breathing propulsion device. As it flies at a certain speed and altitude, the air captured from the atmosphere is heated and compressed as it passes through the shock wave established in the air intake entrance section. Air pressure is additionally increased as it traverses the diffusion zone of the engine and, in the combustion section, this hot, high-pressure air stream is put in contact with some fuel, that can be liquid or solid. The resulting combustion gases are then expanded in a nozzle to produce thrust. The operational conditions during supersonic flights were emulated by the use of a vitiated air generator, connected-pipe type. Hydroxyl terminated polybutadiene is the fuel used in this research. It is the most commonly used binder for composite propellants. Its combustion properties are a matter of great interest in propulsion field. The ramjet combustion conditions allow the study of these properties, providing a means to evaluate its linear regression rate, a procedure which is otherwise hard to perform. The following steps were followed: review of HTPB physical and chemical characteristics; theoretical analysis of HTPB combustion using mathematical models and computational codes; theoretical analysis of the ramjet performance when using HTPB as fuel; definition of the system dimensions (grain case, nozzles throats and area ratios, and chambers) for use with HTPB; rebuild and updating of the existing vitiated air generator / ramjet engine set; determination of the best formula for the fuel (polymer + cure agent) as far as mechanical and propulsive properties are concerned; analysis of an intermediate mixture chamber and an extended recirculation zone influences on the system performance, and, comparison between theoretical and experimental results.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - O ESTADO-REATOR	27
CAPÍTULO 2 - O POLIBUTADIENO HIDROXILADO	35
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
3.1 Taxa de Regressão Teórica do HTPB.....	41
3.2 Configuração do Grão	44
3.3 Processo Termodinâmico	46
3.4 Parâmetros do Desempenho	51
3.5 Sistema de Ignição do Estado-Reator	59
CAPÍTULO 4 - FUNCIONAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL E DETERMINAÇÃO DE SEUS PARÂMETROS RELEVANTES	65
4.1 Análise do Sistema Gerador de ar Viciado	68
4.1.1 Saída do Módulo Gerador de Ar Viciado	69
4.1.2 Vazões do Ar, O ₂ e H ₂ no Módulo Gerador de Ar Viciado	73
4.1.3 Tuberias de H ₂ e O ₂	75
4.1.4 Entrada do Módulo Gerador de Ar Viciado.....	77
4.1.5 Módulo Expansor	80
4.2 Taxa de Regressão Teórica – \dot{r}	83
4.2.1 Cálculo do Fluxo de Calor para a Superfície do Grão (\dot{q}_s).....	84
4.2.2 Cálculo do Diâmetro Interno do Grão, d_i	84
4.2.3 Cálculo da Condutividade Térmica do Ar, k_{ar}	85
4.2.4 Cálculo do Fluxo de Massa do Ar através do Grão, G_{ar}	86
4.2.5 Cálculo da Viscosidade do Ar, μ_{ar}	87
4.3 Módulo Combustor.....	89
4.3.1 Simulação do Desempenho	89
4.3.2 Comprimento da Câmara de Mistura Posterior	92
4.3.3 Localização do Ponto de Reatamento	97
4.4 Parâmetros do Desempenho Teóricos.....	98
CAPÍTULO 5 - TRABALHO EXPERIMENTAL.....	99
5.1 Arranjo do sistema	99
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
APÊNDICE A	115

APÊNDICE B	137
APÊNDICE C	139
APÊNDICE D	153
APÊNDICE E.....	155

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Diagrama esquemático de um estato-reator sólido.	29
1.2 - Aspectos da queima de um combustível sólido em um estato-reator	30
2.1 - Comparação do desempenho de um estato-reator utilizando diferentes combustíveis sólidos	36
2.2 - Fórmula molecular básica do polibutadieno hidroxilado	36
2.3 - Estrutura molecular (a) isômero 2,4 e (b) isômero 2,6	37
2.4 - Estrutura molecular do IPDI	38
2.5 - Esquema da formação de poliuretano a partir de PBLH e diisocianato.	38
3.1 - Desenho esquemático da câmara de combustão.	44
3.2 - Desenho esquemático de um estato-reator.	47
3.3 - Volume de controle de um estato-reator.	52
3.4 - Empuxo e consumo de combustível de um estato-reator ideal	58
3.5 - Empuxo e eficiências de um estato-reator ideal	58
4.1 - Desenho esquemático do sistema operacional	65
4.2 - Diagrama do comportamento da temperatura e entropia no equipamento	67
4.3 - Esquema das condições a serem simuladas na saída do módulo gerador de ar viciado (resultados dos cálculos já adicionados na figura).....	69
4.4 - Esquema das condições a serem simuladas na entrada do módulo gerador de ar viciado (resultados dos cálculos já adicionados).....	77
4.5 - Esquema das condições a serem simuladas no módulo expansor (resultados dos cálculos já adicionados)	81
4.6 - Esquema do combustor	83
4.7 - Esquema das condições a serem simuladas no módulo combustor (resultados dos cálculos já adicionados)	89
4.8 - Gráficos de simulação dos parâmetros I_{sp} , c^* e T_c em função da razão de equivalência.	91
5.1 - Estato-reator recuperado, posicionamento horizontal	99
5.2 - Estato-reator recuperado, posicionamento vertical	100
5.3 - Desenho esquemático do sistema de fornecimento de ar	101
5.4 - Pontos de medição ao longo do equipamento. (P = pressão, T = temperatura, E = empuxo).....	102
5.5 - Desenho esquemático da câmara de combustão com zona de recirculação anterior.	103
5.6 - Posicionamento dos cilindros H_2 e N_2	104
5.7 - Posicionamento dos cilindros ar e O_2 (a seta indica a válvula manual) .	104
5.8 - Desenho esquemático do sistema de fornecimento de ar	105
5.9 - Comportamento da pressão, temperatura e empuxo durante ensaios sem câmara de mistura intermediária	107
5.10 - Superfície interna do grão após queima	108
B.1- Curva característica da válvula reguladora de pressão do ar	137
C.1 - Esquema do sistema gerador de ar viciado / estato-reator	139

C.2 - Módulo combustor.....	140
C.3 - Módulo combustor.....	141
C.4 - Placa adaptadora.....	142
C.5 - Placa adaptadora.....	143
C.6 - Estojo do grão.....	144
C.7 - Câmara de mistura intermediária.....	145
C.9 - Estojo do grão.....	146
C.10 - Câmara de mistura posterior.....	147
C.11 - Câmara de mistura posterior.....	148
C.12- Tubeira de ar frio.....	149
C.13 - Tubeira de ar quente.....	150

LISTA DE TABELAS

5.1 – Resultados dos ensaios sem câmara de mistura intermediária.....	106
5.2 – Resultados dos ensaios com câmara de mistura intermediária após ponto de reatamento	109
5.3– Resultados dos ensaios com câmara de mistura intermediária na metade do comprimento do polímero	109
5.4 – Comparação dos resultados dos ensaios com diferentes tipos de polímero	110
D.1– Lista de materiais	153
E.1– Procedimentos para a execução dos ensaios	155

LISTA DE SÍMBOLOS

- A^* - menor área da tomada de ar [m^2]
- a - velocidade sônica na região [m/s]
- A_∞ - área real de captação do ar [m^2]
- C_p - calor específico à pressão constante [$cal\ kg^{-1}K^{-1}$]
- C_v - calor específico à volume constante [$cal\ kg^{-1}K^{-1}$]
- D - arrasto de compressão [N]
- d_e - diâmetro externo do grão [m]
- d_i - diâmetro interno do grão [m]
- F - empuxo bruto do motor [N]
- F_{ER} - empuxo do estado-reator [N]
- FD - fator de depolimerização
- f - razão mássica combustível / ar
- f_{est} - razão mássica combustível / ar estequiométrica
- f_{real} - razão mássica combustível / ar real
- G_{ar} - fluxo de massa do ar através orifício do grão [$kg\ m^{-2}s^{-1}$]
- h - coeficiente de transferência de calor por convecção [$cal\ m^{-2}\ s^{-1}\ K^{-1}$]
- h - degrau de recirculação [m]
- h_0 - entalpia de estagnação [$kcal / mol$]
- ΔH_f° - entalpia de formação padrão [$kcal / mol$]
- H_d - calor de depolimerização [J/g]

- H_v - calor efetivo de vaporização [J/g]
- I_{sp} - impulsão específica [m/s]
- $I_{sp,c}$ - impulsão específica por unidade de massa de combustível do estado reator [m/s]
- $I_{sp,f}$ - impulsão específica para motores foguete obtido do código computacional [m/s]
- K_{ar} - condutividade térmica do ar [$\text{cal m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$]
- L_c - comprimento do grão combustível [m]
- L_{CM} - comprimento da câmara de mistura [m]
- M - massa molecular [g/mol]
- \dot{m} - vazão total (ar + combustível) [kg/s]
- \dot{m}_{ar} - vazão mássica do ar [kg/s]
- \dot{m}_c - vazão mássica do combustível [kg/s]
- Me - número de Mach na região “e”
- M_n - massa molar média do HTPB [g/mol]
- M_∞ - número de Mach na entrada do ar
- Nu - número de Nusselt = hd/λ
- $P_{0,\infty}$ - pressão de estagnação na entrada do ar [atm]
- P_{ar} - pressão do ar
- Pr - número de Prandtl = $\mu C_p/\lambda$
- P_∞ - pressão na entrada do ar [atm]
- Q_r - entalpia de reação do combustível [kcal / mol]
- \dot{q}_s - fluxo de calor para a superfície do grão [$\text{cal m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- \dot{r} - taxa de regressão [mm/s]

- R - constante do gás [Nm/kg/K]
- Re - número de Reynolds $=\rho v d/\mu$
- S_c - superfície de queima do grão combustível [m]
- T_i - valor inicial da temperatura do polímero [K]
- T₀ - temperatura de estagnação [K]
- T_{0,∞} - temperatura de estagnação na entrada do ar [K]
- T_{am} - temperatura de amolecimento [K]
- T_{ar} - temperatura do ar [K]
- T_c - temperatura adiabática da chama [K]
- t_{res} - tempo de residência [s]
- T_s - temperatura da superfície do combustível [K]
- T_v - temperatura de vaporização
- T_∞ - temperatura na entrada do ar [K]
- v_{ar} - velocidade do ar [m/s]
- v_∞ - velocidade de captação do ar [m/s]
- W_n - Peso molecular médio
- μ_s - viscosidade do ar à temperatura da superfície do polímero [kg m⁻¹s⁻¹]
- μ_{ar} - viscosidade do ar a uma temperatura média [kg m⁻¹s⁻¹]
- ρ_{ar} - massa específica do ar [kg m⁻³]
- ρ_c - massa específica do combustível condensado [kg m⁻³]
- γ - C_p/C_v
- σ - diâmetro efetivo de colisão entre duas moléculas [Å]

Ω_u - integral de colisão para a viscosidade

Ω_k - integral de colisão para a condutividade térmica

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DBO - dibutil ftalato
TDI - diisocianato de tolueno
PBLH - polibutadieno líquido hidroxilado
IPDI - diisocianato de isoforona
HTPB - polibutadieno hidroxilado

