

PROPULSÃO II

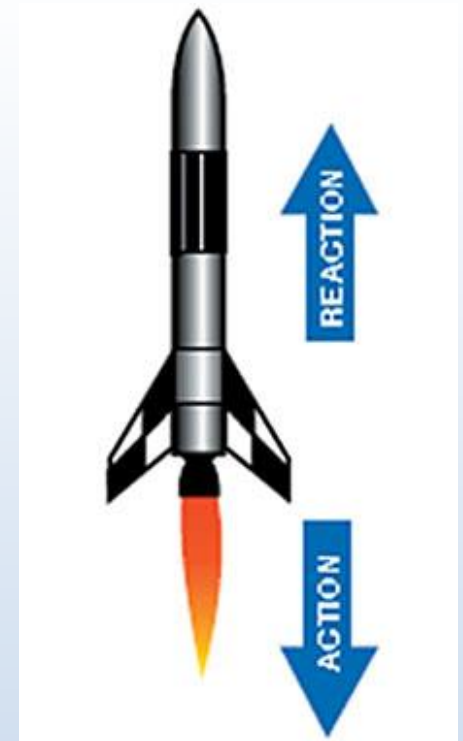
Motores Foguete

Termoquímica

Prof. José Eduardo Mautone Barros

mautone@demec.ufmg.br

www.mautone.eng.br



- Escoamento congelado (*frozen*)
- Escoamento em Equilíbrio Químico
CEA (NASA-SP-273)
- Escoamento em Não-equilíbrio Químico
ODK e TDK, CHEMKIN

□ Exercícios CEA (NASA-SP-273)

- Para os propelentes listados na sequência
- Pressão de câmara de combustão:
20, 70, 100, 120 bar
- Razão de áreas na tubeira
 - Subsônico: 20, 10, 1 (garganta)
 - Supersônico: 1 (garganta), 10, 20, 40, 50, 100
- Fazer gráficos e analisar:
 - Impulso específico, velocidade característica, coeficiente de empuxo, pressão na exaustão, peso molecular, temperatura de chama e razão de calores específicos versus pressão de câmara, razão de expansão em área.
 - Composição dos gases na câmara de combustão para espécies com concentração superior a 1% v/v.

☐ Exercícios CEA (NASA-SP-273)

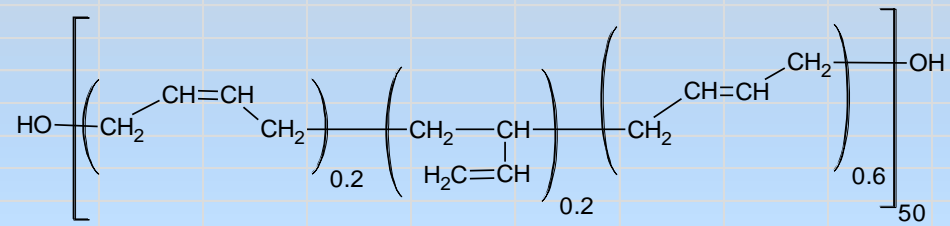
- Para os propelentes listados na sequência
 - Propelente líquido
 - Monopropelente: UDMH (di-metil hidrazina não-simétrica)
 - 100% de UDMH $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2$
 - Bipropelente:
 - UDMH e N_2O_4 (tetróxido de nitrogênio)
 - $\text{H}_2(\text{L})$ e $\text{O}_2(\text{L})$ (criogênicos)
 - RP-1 (querosene de foguete) e $\text{O}_2(\text{L})$ (oxigênio líquido)
 - Razões de equivalentes combustível/oxidante:
0,5; 1,0; 1,1; 1,5; 2,5; 5,0

Exercícios CEA (NASA-SP-273)

- Para os propelentes listados na sequência
 - Propelente híbrido
 - Razões de equivalentes combustível/oxidante: 0,5; 1,0; 1,1; 1,5; 2,5; 5,0
 - N₂O (dióxido de nitrogênio – gás do riso)
 - HTPB (polibutadieno líquido hidroxilado)

Massa Específica		0,904	g/cm ³	904	kg/m ³
Átomo	No	M	M (kg/kmol)		
C	200	12	2400		
H	302	1	302		
O	2	16	32		
			2734		
Ligação	No	H [°] f (kcal/mol)	H [°] f (kcal/mol)		
O-H	2	-27,0	-54		
C=C	50	6,70	335		
C-C	200	2,73	546		
C-H	300	-3,84	-1152	kJ/mol	kJ/kg
			-325	-1359	-497

Hydroxil terminated polibutadiene (HTPB)
Polibutadieno líquido hidroxilado (PBLH)



Exercícios CEA (NASA-SP-273)

- Para os propelentes listados na sequência
 - Propelente sólido tipo Composite

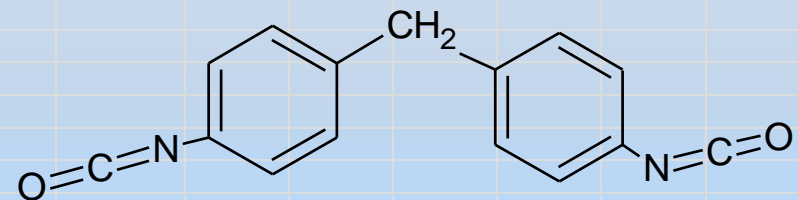
	Composição Composite			Massa Específica (kg/m ³)
	Componente	%p/p		
Combustível	HTPB	13,63	15	904
	MDI	1,37		1230
	Al	15	85	2700
Oxidante	NH ₄ ClO ₄	68		1950
	Fe ₃ O ₄	2	5242	
			100	1976

Massa Específica	1,230	g/cm ³	1230	kg/m ³
------------------	-------	-------------------	------	-------------------

Átomo	No	M	M (kg/kmol)
C	15	12	180
H	10	1	10
O	2	16	32
N	2	14	28
			250

Ligação	No	H ^o f (kcal/mol)	H ^o f (kcal/mol)		
C=N	2	18,6	37,2		
C-N	2	9,3	18,6		
C=C	6	6,70	40,2		
C-C	2	2,73	5,46		
C-H	10	-3,84	-38,4		
C=O	2	-44,8	-89,6	kJ/mol	kJ/kg
			-26,54	-111	-444

4,4' difenilmetano diisocianato (MDI)



Reação de formação de poluretana				
MDI/HTPB	0,09144	p/p	1	eq/eq
	9,14	% p/p		

Exercícios CEA (NASA-SP-273)

- Para os propelentes listados na sequência
 - Propelente sólido tipo Base Dupla (BD)

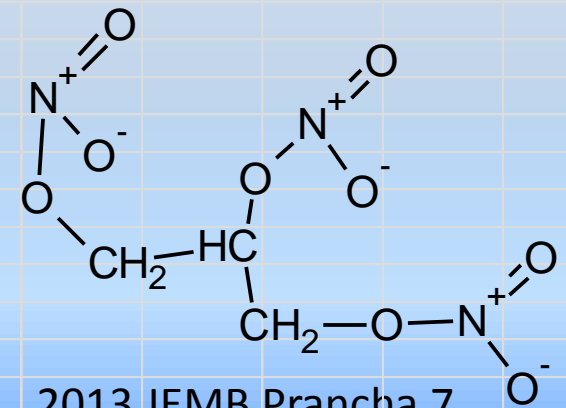
Composição Base Dupla (BD)			
	Componente	%p/p	Massa Específica (kg/m ³)
Combustível	Nitrocelulose	50	1670
Oxidante	Nitroglicerina	50	1600
		100	1635

Massa Específica	1,600	g/cm ³	1600	kg/m ³
------------------	-------	-------------------	------	-------------------

Átomo	No	M	M (kg/kmol)
C	3	12	36
H	5	1	5
O	9	16	144
N	3	14	42
			227

H°f (kcal/mol)	kJ/mol	kJ/kg
-88,8	-371,0	-1634

Nitroglicerina



2013 JEMB Prancha 7

Exercícios CEA (NASA-SP-273)

- Para os propelentes listados na sequência
 - Propelente sólido tipo Base Dupla (BD)

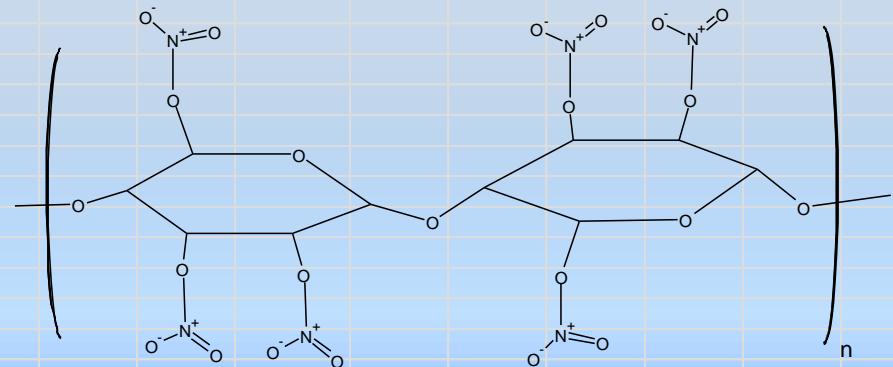
Composição Base Dupla (BD)			
	Componente	%p/p	Massa Específica (kg/m ³)
Combustível	Nitrocelulose	50	1670
Oxidante	Nitroglicerina	50	1600
		100	1635

Massa Específica	1,670	g/cm ³	1670	kg/m ³
------------------	-------	-------------------	------	-------------------

Átomo	No	M	M (kg/kmol)
C	10	12	120
H	10	1	10
O	23	16	368
N	6	14	84
			582

H ^{°f} (kcal/kg)	H ^{°f} (kcal/gmol)	kJ/gmol	kJ/kg
-523,9	-305	-1275	-2190

Nitrocelulose



Bibliografia

- BARRERE, M., JAUMOTTE, A., DE VEUBEKE, B. F. e VANDENKERCKOVE, J. *Rocket Propulsion*. Amsterdam: Elsevier, 1960. 829p.
- ALVIM FILHO, G. *Problemas Relativos a Motor Foguete*. Apostila de Curso, PRP-30. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos: ITA. 1982.
- ALVIM FILHO, G. *Motor Foguete*. Apostila de Curso, PRP-11. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos: ITA. 1983.
- MATTINGLY, J. D. *Elements of Gas Turbine Propulsion*. New York: McGraw-Hill, 1996. 960p.
- OATES, G. C. *Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion*, AIAA Education Series. Washington, DC: AIAA, 1988. 456p.
- CORNELISSE, J. W., SCHÖYER, H. F. R. et WAKKER, K. F. *Rocket Propulsion na Spaceflight Dynamics*. London: Pitman, 1979, 505p.