

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

*Relazione per la prova finale*

# *I propellenti solidi nella propulsione spaziale*

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: Matteo Castellan

Padova, 25/11/2022

## **INTRODUZIONE**

### ➤ **PROPELLENTI NITROPOLIMERICI**

**PROPELLENTI A BASE SINGOLA**

**PROPELLENTI A BASE DOPPIA**

**PROPELLENTI NC-NG**

### ➤ **PROPELLENTI COMPOSITI**

**PROPELLENTI COMPOSITI DI TIPO AP**

**PROPELLENTI COMPOSITI NITRAMINICI**

### ➤ **PROPELLENTI A BASE DOPPIA COMPOSITI-MODIFICATI**

**PROPELLENTI CMDB DI TIPO AP**

**PROPELLENTI CMDB NITRAMINICI**

## **CONCLUSIONI**

## **BIBLIOGRAFIA/SITOGRAFIA**

- PROPELLENTI:**
- Propellenti **LIQUIDI**
  - Propellenti **SOLIDI**

## Due tipologie principali:

1. **Propellenti nitropolimerici:** l'ossidante e il combustibile legati chimicamente nella stessa molecola
2. **Propellenti compositi:** ossidante e combustibile sono composti separati e successivamente miscelati.

I propellenti solidi vengono sagomati in forme chiamate **grani**:

- Dipendenza dal tipo di propellente
- Dipendenza dalla temperatura



*grani di propellente all'interno di sezioni di SRB (Solid Rocket Booster)*

Propellenti costituiti da nitropolimeri: - gruppi idrocarburici  
- gruppi alchil-nitrati ( $R - O - NO_2$ )

Prodotti della combustione → gas incolori ( $CO_2, N_2, H_2O$ ).

Il principale nitropolimero impiegato è la nitrocellulosa (NC):

- unico componente energetico → propellente a **BASE SINGOLA**
- combinato con un estere nitrato → propellente a **BASE DOPPIA**



*scia di fumo prodotta dai gas di scarico  
di un comune propellente nitropolimerico*

## PROPELLENTI A BASE SINGOLA

- Nitrocellulosa, con aggiunta di ammine aromatiche come stabilizzatori chimici
- Superficie del grano rivestita con del carbone nero

component	single base wt.%	double base wt.%
nitrocellulose	89.0–96.0	82.0–86.0
nitroglycerin	0.0	7.0–11.0
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.5–1.0	0.5–1.0
dibutylphthalate	3.0–7.0	3.0–7.0
graphite	0.2–0.4	0.2–0.4
calcium carbonate	<0.7	<0.7
stabilizer of formula (I)	0.15–2.0	0.15–2.0

*confronto tra le composizioni chimiche, in %, delle due tipologie di propellenti a base di nitrocellulosa*

## PROPELLENTI A BASE DOPPIA

- Nitrocellulosa legata ad esteri nitrati allo stato liquido
  - ↳ stessi gruppi idrocarburici e alchil-nitrati
- Aggiunta di stabilizzanti e plastificanti per migliorare le proprietà meccaniche

Composti da nitrocellulosa, legata ad un estere nitrato chiamato **nitroglicerina**

I due metodi di produzione più comuni sono:

1. mediante una **pressa meccanica**
2. **fusione** delle polveri fini di nitrocellulosa e nitroglicerina

↳ impiegato nelle applicazioni spaziali

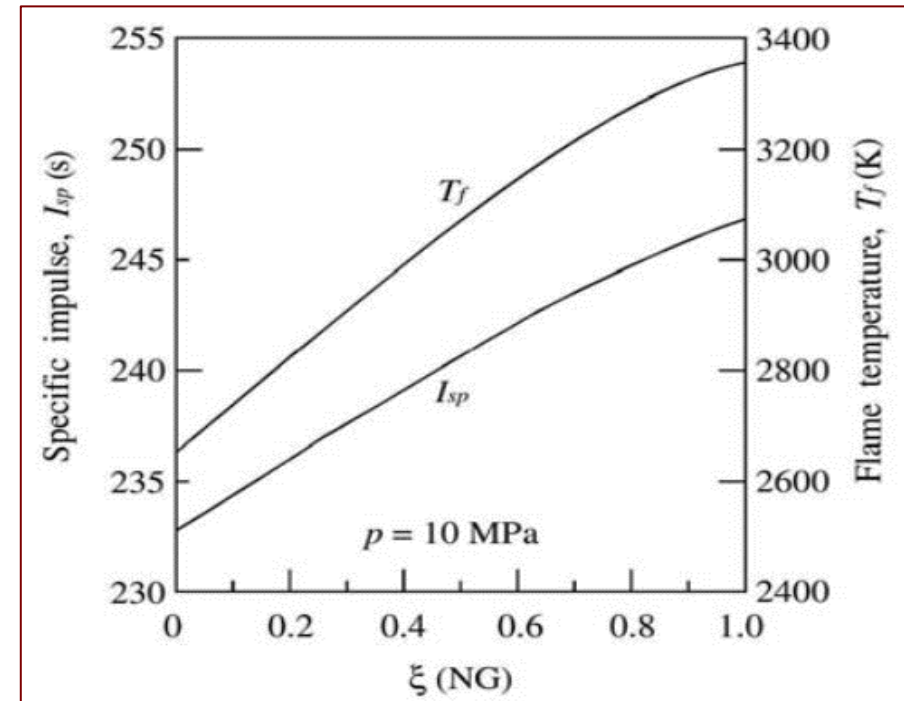
% by mass	NC-NG
NC	39.6
NG	49.4
TMETN	–
DEP	10.0
REGDN	–
EC	1.0
<hr/>	
$Q_p$ (kg m <sup>-3</sup> )	1550
$T_f$ (K)	2690
$M_g$ (kg kmol <sup>-1</sup> )	24.6
$\Theta$ (kmol K kg <sup>-1</sup> )	109
$I_{sp}$ (s)	242
<hr/>	
Combustion products (% by mol)	
CO	39.7
CO <sub>2</sub>	12.4
H <sub>2</sub>	11.5
H <sub>2</sub> O	23.8
N <sub>2</sub>	12.4
OH	0.1
H	0.2

*composizione chimica, in %, proprietà termodinamiche e prodotti della combustione di un comune propellente NC-NG*

- Le proprietà fisico-chimiche dipendono dalle % di NC e NG
- Aumento della percentuale di NG → aumento della densità energetica

*Dal grafico:*

- Massimi  $I_{sp}$  e  $T_f$  teorici quando  $\xi(NG) = 1.0$
- Tuttavia, nei comuni propellenti a base doppia  $\xi(NG) \sim 0.50$



*variazione dell'impulso specifico  $I_{sp}$  e della temperatura della fiamma  $T_f$  in funzione della concentrazione  $\xi(NG)$*

Miscele eterogenee di ossidanti e combustibili

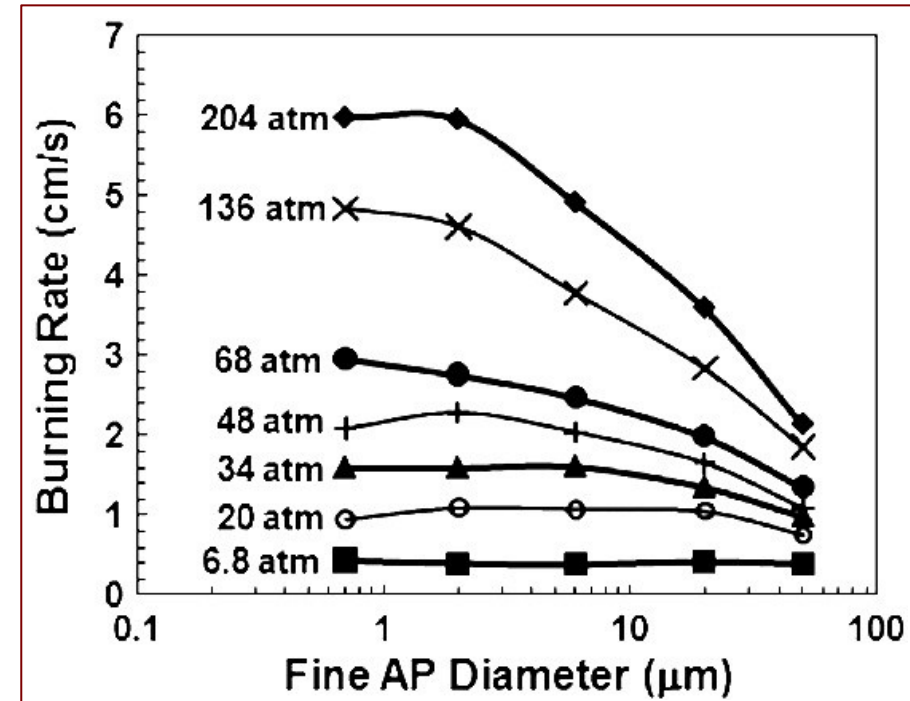
**Ossidanti:** materiali cristallini (es. nitrato di ammonio  $NH_4NO_3$ , perclorato di ammonio  $NH_4ClO_4$ )

**Combustibili:** idrocarburi polimerici → i più utilizzati sono l'HTPB (*polibutadiene con radicali ossidrilici terminali*) e il GAP (*polimero di azoturo di glicidile*).

- Le proprietà meccaniche dipendono dalla struttura fisico-chimica degli idrocarburi polimerici
- Le proprietà balistiche dipendono dalle particelle ossidanti

Due tipologie principali:
 

- propellenti composti di **tipo AP**
- propellenti composti **nitramminici**



*variazione della velocità di combustione rispetto alla pressione e alla dimensione delle particelle ossidanti*



**Perclorato di ammonio (AP)** come composto cristallino ossidante.

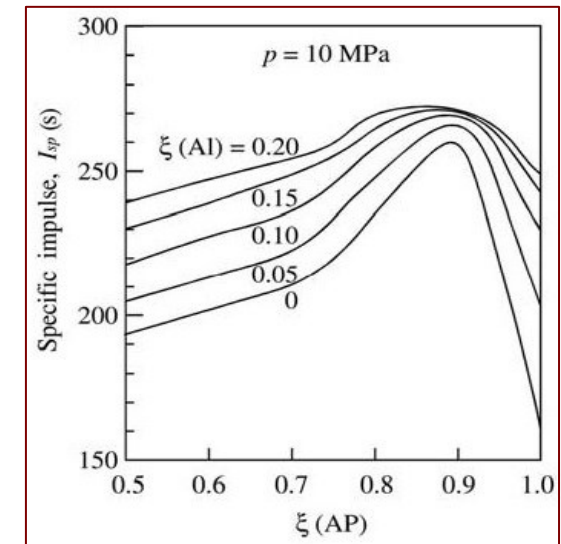
L'impulso specifico è direttamente proporzionale alla concentrazione  $\xi(AP)$

Al fine di aumentare ulteriormente  $I_{sp}$  può essere aggiunta della polvere di alluminio  $\rightarrow$  propellente alluminato

A  $\xi(Al) = 0.20$ , l'impulso specifico può arrivare a  $I_{sp} = 270s$

Component	Mass Fraction	
AP (160-200 $\mu\text{m}$ )	58.00%	
AP (5-10 $\mu\text{m}$ )	10.00%	
Metal Fuel Powder	18.00%	
Binder	14.00%	
	HTPB R-45	79.21%
	IPDI	7.68%
	DOA	13.11%

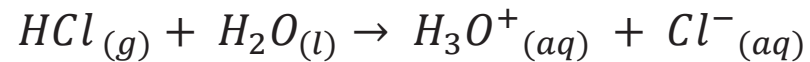
composizione chimica, in %, dei componenti ossidanti e combustibili di un propellente di tipo AP-HTPB



variazione dell'impulso specifico  $I_{sp}$  in funzione di  $\xi(AP)$  e  $\xi(Al)$

Prodotti della combustione → generano un fumo bianco ( $HCl, Al_2O_3$ )

Reazione dell'acido cloridrico con l'umidità:



Per ridurre la visibilità del fumo sostituire la polvere di alluminio con **magnesio** → formazione di cloruro di magnesio ( $MgCl_2$ )

Se il fumo non è in alcun modo tollerabile:

- sostituire l'ossidante con uno non alogeno/non metallico
- sostituire il propellente con uno a base doppia.



*scia di fumo prodotta dai gas di scarico di un comune propellente composito di tipo AP*

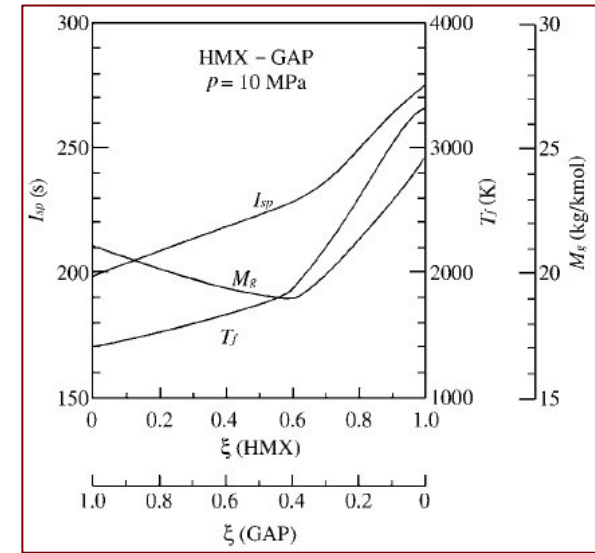
Impiego di **nitrammine** come materiale cristallino ossidante:

- elevata densità di energia
- Moderata temperatura della fiamma
- bassa massa molecolare dei prodotti della combustione

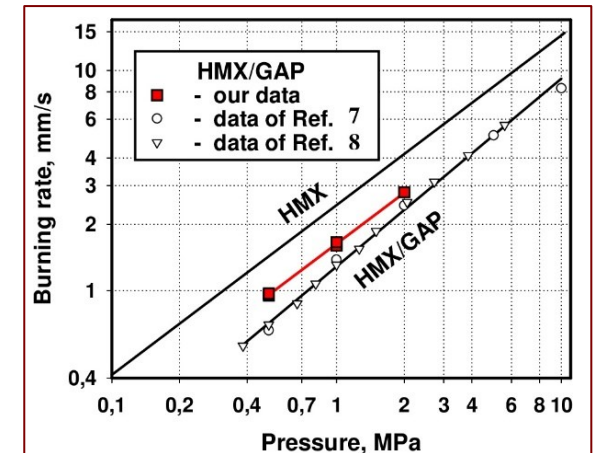
Le ammine più utilizzate sono l'*HMX* ( $C_4H_8N_8O_8$ ) e l'*RDX* ( $C_3H_6N_6O_6$ )

*Dal grafico:*

- Le prestazioni massime si raggiungono quando  $\xi(HMX) = 1.0$
- Nella pratica  $\max \xi(HMX) = 0.80$ , a cui corrisponde  $I_{sp} = 250s$  e  $T_f = 2200K$



variazione di  $I_{sp}$ ,  $M_g$  e  $T_f$  in funzione di  $\xi(HMX)$  e  $\xi(GAP)$



variazione della velocità di combustione tra HMX e HMX-GAP

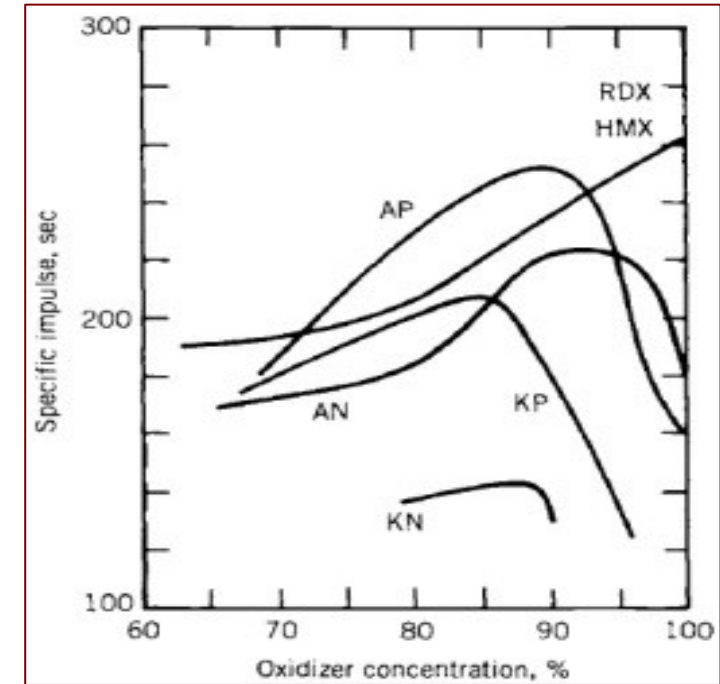
- Tipologia relativamente *nuova*
- Propellente nitropolimerico a base doppia (**matrice di base**) al quale viene aggiunto un composto cristallino

Concentrazione maggiore di ossidante:
 

- maggiori prestazioni → alto  $I_{sp}$
- superiori proprietà meccaniche

**Proprietà fisico-chimiche:** intermedie tra propellenti compositi e propellenti DB

**Modalità di combustione:** diverse da entrambi questi propellenti, dipendono dalla tipologia e concentrazione di composto cristallino



variazione dell'impulso specifico  $I_{sp}$  in funzione dell'elemento ossidante e della sua relativa concentrazione

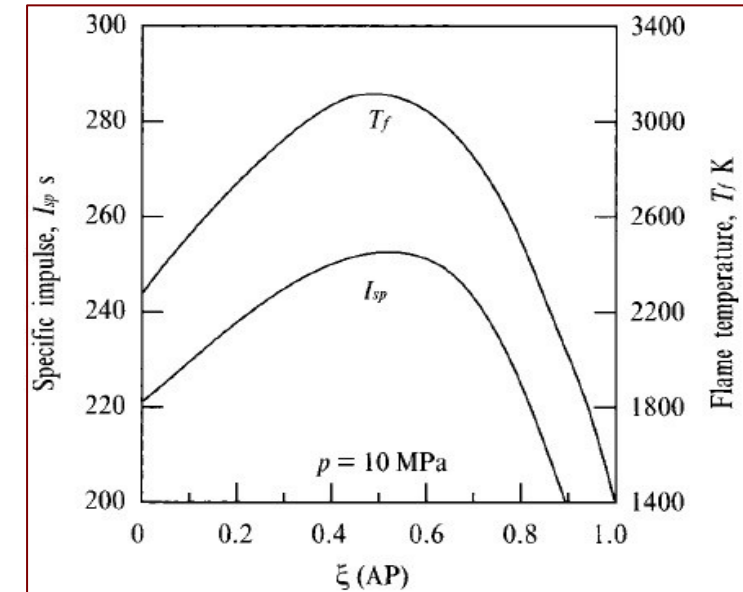
Perclorato di ammonio come materiale cristallino → propellenti CMDB di tipo AP

**Modalità di combustione:** decomposizione termica di AP

- l'ossidante interagisce con i composti gassosi prodotti dalla decomposizione della matrice di base
- Matrice di base tipicamente utilizzata → NC-NG in uguali concentrazioni

*Dal grafico:*

- Dipendenza non lineare di  $I_{sp}$  e  $T_f$  rispetto a  $\xi(AP)$
- I valori massimi si raggiungono a  $\xi(AP) = 0.50$



variazione dell'impulso specifico  $I_{sp}$  e temperatura della fiamma  $T_f$  di un propellente AP-CMDB in funzione di  $\xi(AP)$

Impiego di *nitrammine* (*HMX* o *RDX*) → propellenti CMDB nitramminici

**Modalità di combustione:** combustione indipendente delle nitrammine e della matrice di base

- Fiamma monopropellente → nitrammine utilizzati come composti energetici

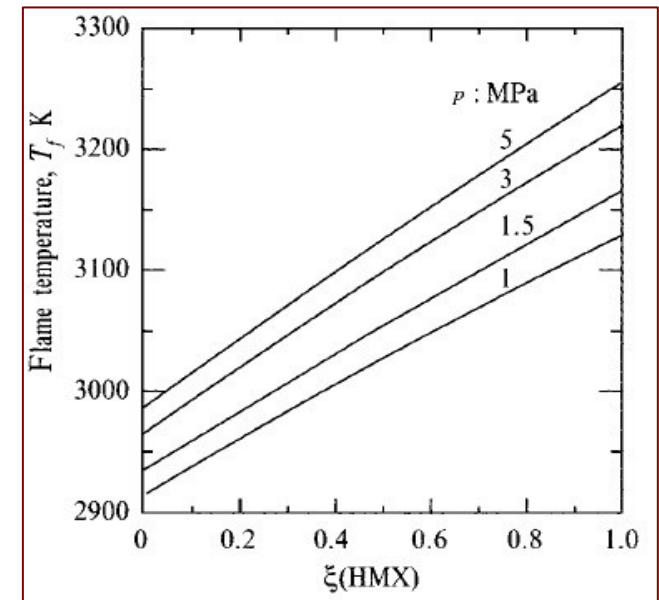
Matrice di base tipicamente utilizzata → NC-NG in concentrazioni di 0.20/0.80

*Dal grafico:*

- Dipendenza lineare di  $T_f$  rispetto a  $\xi(HMX)$
- Le prestazioni massime si raggiungono quando  $\xi(HMX) = 1.0$

	P0 <sub>00</sub>	P0 <sub>10</sub>	P0 <sub>20</sub>	P0 <sub>30</sub>
NC1230, mass%	61.0	54.5	48.3	42.0
NG, mass%	33.0	29.5	25.7	22.0
RDX, mass%		10	20	30
CI, mass%	3	3	3	3
DBP, mass%	3	3	3	3

*composizione chimica, in %, di 4 tipologie di propellenti RDX-CMDB*



*variazione della temperatura della fiamma  $T_f$  di un propellente HXM-CMDB in funzione di  $\xi(HXM)$  e della pressione*

## PROPELLENTI NITROPOLIMERICI

- Efficienza limitata dalla quantità di ossidante
- Propellenti a base doppia → è possibile aumentare l'efficienza aumentando la % di esteri nitrati
- Prodotti di scarto sono gas serra, fumo invisibile

## PROPELLENTI COMPOSITI

- Possibilità di regolare la percentuale di ossidante e combustibile
- Basso impulso specifico e bassa densità energetica
- Prodotti di scarto più tossici ( $HCl$ ,  $Al_2O_3$ ), fumo visibile

## PROPELLENTI CMDB

- Proprietà meccaniche migliori
- Alto impulso specifico e alta densità energetica
- Prodotti di scarto limitatamente tossici, fumo poco visibile

## BIBLIOGRAFIA

N. Kubota – Propellants and Explosives Thermochemical Aspects of Combustion, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007*

T. Naya, M. Kohga – Thermal decomposition behaviours and burning characteristics of AN/ nitramine-based composite propellant, *Journal of Energetic Materials, 2015 – Taylor & Francis*

M. Kohga, D. Shigi, M. Beppu – Detonation properties of nitrate/nitramine-based composite propellants, *Journal of Energetic Materials, 2019 – Taylor & Francis*

A.R. Kulkarni, V.K. Bhat, S.P. Phadke, R.G.K. Naif – Simplified Burn-Rate Model for CMDDB Propellants, *July 1990*

## SITOGRAFIA

[https://www.researchgate.net/figure/Particle-size-and-pressure-effects-for-an-AP-HTPB-composite-propellant-consisting-of-200\\_fig22\\_269565824](https://www.researchgate.net/figure/Particle-size-and-pressure-effects-for-an-AP-HTPB-composite-propellant-consisting-of-200_fig22_269565824)

<https://aerospaceamerica.aiaa.org/departments/better-boosters-production/>

<https://www.chemring.com/what-we-do/countermeasures-and-energetics/extruded-double-base-propellants>