

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea magistrale in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe LM-20

TESI DI LAUREA

In Sistemi di Propulsione Avanzati LM

Studio dell'effetto di Hump in un motore a solido
in piccola scala con metodi di produzione di
punzonatura e colaggio

CANDIDATO
MATTEO SABATTINI

RELATORE
Prof. Ing. FABRIZIO PONTI

Anno accademico 2015/2016
Sessione I

ABSTRACT

L'oggetto di questo elaborato riguarda lo studio prestazionale di un *Solid Rocket Motor* mediante l'introduzione del fattore di "*Hump*", che va a compensare il discostamento tra il profilo delle pressioni sperimentali e teoriche, cercando di legare tali variazioni a spiegazioni fisiche. In particolare andremo ad investigare, all'interno di due differenti tipologie di colata, quale sia l'effetto predominante all'interno del propellente che genera proprio tali discostamenti della pressione, e quindi della spinta, rispetto alla condizione ideale. Nell'elaborato verranno anzitutto presentate le diverse tipologie di propulsori, i loro singoli componenti, i parametri fondamentali che regolano la meccanica di questa tipologia di motori, le tipologie di grain esistenti e le loro caratteristiche. Successivamente descriveremo le BARIA (Bomb ARIAne), usate per i test del grain nella ditta AVIO s.p.a., e le tipologie di riempimento di questo motore, investigando i fenomeni fisici a cui sarà legato l'effetto di "*Hump*". Nel capitolo successivo si descriverà il fattore di "*Hump*", ed evidenziando, per le differenti tipologie di riempimento, i fenomeni fisici a cui sarà legato il discostamento tra le pressioni sperimentali e teoriche. Nel quinto capitolo verranno descritti i programmi utilizzati, gli script in matlab prodotti, al fine di ottenere le mappe relative all'orientazione ed alla concentrazione delle particelle, da introdurre nel simulatore. Infine verranno esposti i risultati ottenuti e confrontati con i dati sperimentali forniti dalla ditta AVIO s.p.a., le conclusioni e gli sviluppi futuri.

INDICE

INTRODUZIONE	pg 9
Capitolo 1 : La propulsione a razzo	pg 11
1.1: Introduzione ai veicoli spaziali	pg 11
1.2: Endoreattori chimici	pg 13
1.3: Gli endoreattori a propellente solido	pg 15
1.3.1: La camera di combustione	pg 17
1.3.2: L'ignitore o bomba di Crawford	pg 23
1.3.3: Il grano di propellente solido	pg 24
1.3.4: L'ugello	pg 26
Capitolo 2 : I principali parametri dei SRM ed il grano di propellente solido	pg 29
2.1: Definizioni e parametri fondamentali	pg 29
2.2: Il grain e la sua composizione	pg 35
2.2.1: I propellenti solidi omogenei o doppia base	pg 36
2.2.2: I propellenti solidi eterogenei o compositi	pg 37
2.2.3: Gli ossidanti e le sostanze combustibili	pg 40
Capitolo 3 : I motori BARIA	pg 43
3.1: Descrizione dei motori BARIA	pg 43
3.2: Le modalità di produzione del grain	pg 46
Capitolo 4 : L'effetto di HUMP ed il rateo di combustione	pg 53
4.1: Introduzione all'effetto di HUMP	pg 53
4.2: L'orientazione delle particelle all'interno del grain	pg 55
4.3: La segregazione particellare	pg 60
4.4: La separazione tra le fasi	pg 69

Capitolo 5 : I codici di simulazione numerica	pg 75
5.1: Introduzione ai codici di simulazione numerica	pg 75
5.2: Flow3D	pg 76
5.3: I file di lettura e la creazione delle mappe in MATLAB	pg 89
5.3.1: Il codice di calcolo per l'orientazione particellare	pg 93
5.3.2: Il codice di calcolo per la concentrazione particellare	pg 96
5.4: Il Simulatore 2D	pg 98
Capitolo 6 : Analisi dei risultati	pg 101
6.1: Introduzione simulatore	pg 101
6.2: L'erosione dell'ugello	pg 103
6.3: Il caso della punzonatura	pg 107
6.4: Il caso del colaggio	pg 115
Conclusioni :	pg 129
Bibliografia e sitografia	pg 131
Ringraziamenti	pg 133

*“Miei cari ascoltatori, a stare a sentire certi cervelli limitati
(mai aggettivo è stato più adatto), l’umanità sarebbe rinchiusa
in un cerchio di Popilio che mai essa riuscirebbe a superare,
essendo condannata a vegetare su questo globo senza alcuna speranza
di slanciarsi un giorno negli spazi planetari! Sciocchezze!
Si andrà sulla Luna e poi sui pianeti e sulle stelle come oggi
si va da Liverpool a New York, facilmente, rapidamente, sicuramente,
e l’oceano atmosferico sarà tra breve attraversato come gli oceani terrestri.*

*La distanza non è che una parola relativa,
e finirà per essere ridotta a zero.”*

Tratto da: Dalla Terra alla Luna

Jules Verne

INTRODUZIONE

Il lavoro presentato all'interno di questa tesi ha come scopo legare il fattore di "Hump", che compensa la distanza tra i profili di pressione teorici e sperimentali, ricercando un legame fisico che spieghi tali discostamenti.

Tali fenomeni sono oggetto di uno studio molto accurato in quanto sono in grado di andare a modificare i profili di pressione all'interno della camera di combustione del motore generando variazioni di pressione rispetto alla condizione ideale, con ripercussioni sulle prestazioni di un *Solid Rocket Motor*.

In particolare questo studio ha lo scopo di migliorare il simulatore balistico sviluppato presso i laboratori Hangar di Forlì, andando ad integrare questi fenomeni al suo interno. L'utilizzo di questo simulatore permetterà la diminuzione dei costi all'interno dell'azienda AVIO s.p.a., in quanto, una volta validato, sarà in grado di fornire tutti gli andamenti di un determinato propellente solido, diminuendo il numero di prove sperimentali da eseguire.

Il confronto coi dati sperimentali, forniti da tale azienda, con i risultati ottenuti tramite il simulatore balistico, ci permetteranno di capire la dipendenza dei fenomeni fisici che giustificano i profili di pressione sperimentali. Questo coinvolgerà lo studio fisico di come le particelle tenderanno a disporsi all'interno del propellente, e la velocità con cui quest'ultimo brucierà.

Le prove svolte presso l'azienda AVIO s.p.a., prevedevano due tipologie di riempimento della BARIA:

- La prima avvenuta tramite un processo detto di punzonatura
- La seconda avvenuta tramite un processo colaggio

Di fatto quello che si è cercato di dimostrare in questo elaborato è come nel primo caso di riempimento il fenomeno fisico che compensa tali discostamenti dipenda maggiormente dalla concentrazione delle particelle all'interno del grano, mentre nel secondo caso tale dipendenza sia influenzata dall'orientazione delle particelle rispetto al fronte di fiamma. Effettuando infine un confronto tra le curve dei profili di pressione sperimentali e dei profili di pressione ottenuti a livello numerico andremo a validare il modello.

CAPITOLO 1

LA PROPULSIONE A RAZZO

*“Ho imparato ad utilizzare la parola ‘impossibile’
con estrema cautela”
Wernher von Braun*

1.1: Introduzione ai veicoli spaziali.

Il significato letterale di propulsione è “spinta in avanti”; questa definizione presuppone l’esistenza di una forza finalizzata ad ottenere un certo atto di moto di un corpo. Per sistema propulsivo si intende l’insieme dei componenti necessari a generare e/o controllare la forza propulsiva in modo da realizzare uno stato di moto prefissato.

I propulsori vengono suddivisi in due grandi famiglie:

- la prima è costituita dagli esoreattori, i quali sono caratterizzati dal fatto che il fluido propulsivo è costituito principalmente dall’aria che fluisce entro il motore. Per una parte minore contribuisce al fluido propulsivo anche il combustibile stivato a bordo, che viene bruciato con l’aria. Nel motore entrano dunque una portata d’aria dall’esterno, ed una portata di combustibile dal veicolo. La portata totale di fluido, la quale ha subito un’alterazione della sua composizione chimica a causa delle reazioni di combustione costituisce il fluido propulsivo;
- la seconda è costituita dagli endoreattori, i quali sono in grado di fornire una spinta anche nel vuoto e quindi in assenza di aria. Sebbene gli endoreattori di uso comune utilizzino una gamma piuttosto ristretta di opzioni, è opportuno ricordare che in linea di principio sia le sorgenti sia i processi di accelerazione possono essere innumerevoli; su queste basi si può operare una classificazione delle famiglie.

In sostanza l'energia proveniente dalla sorgente primaria subisce trasformazioni, fino ad essere convertita in energia cinetica dal getto. Una prima classificazione degli endoreattori è basata sul tipo di energia primaria che può essere chimica, nucleare o solare. I primi due tipi di energia primaria sfruttata riguardano l'energia "interna", cioè quella immagazzinata a bordo del nostro veicolo che risulterà, quindi, essere in quantità limitata, mentre nel caso dell'energia solare si parla di fonte "esterna" al nostro veicolo e quindi illimitata.

Una seconda classificazione deriva dalla tipologia utilizzata per l'accelerazione del fluido propulsivo; infatti, negli endoreattori, la spinta viene generata dall'accelerazione di un fluido propulsivo stivato a bordo per cui, anche in caso di sorgente di energia illimitata, le possibilità di funzionamento del motore sono limitate dalla possibilità di fluido propulsivo. Si distinguono così endoreattori termici elettrostatici/elettromagnetici e a frammenti di fissione nucleare. In questo breve saggio ci limiteremo esclusivamente ad osservare i veicoli spaziali con endoreattori termici chimici ed in particolare quelli a combustibili solidi. Nella tabella sottostante è possibile vedere le differenti tipologie di sorgenti di energia esistenti e i processi per le accelerazioni del fluido.

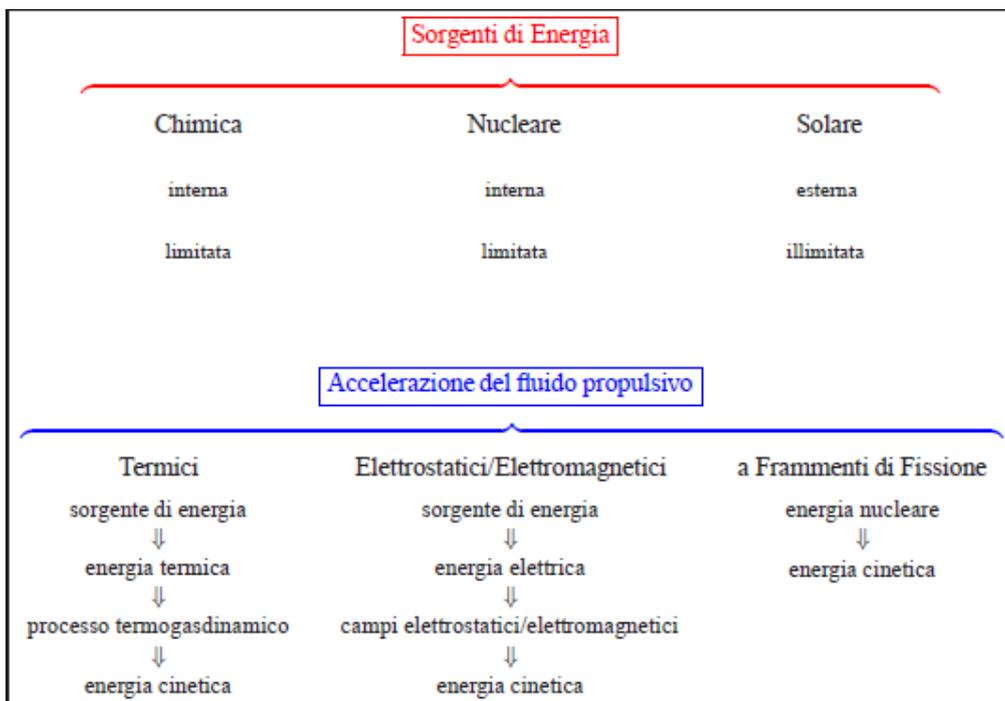


Figura 1.1: Tipologie di energie e accelerazioni del fluido propulsivo

1.2: Endoreattori chimici.

Gli endoreattori termici chimici, detti brevemente endoreattori chimici, sono quelli comunemente impiegati nei sistemi di lancio e nella gran parte dei motori di manovra orbitale e di controllo dell'assetto dei satelliti. L'energia chimica è immagazzinata nei propellenti stivati a bordo i quali per effetto delle reazioni di combustione si trasformano in un gas ad alta temperatura che costituisce il fluido propulsivo. Come propellente si intende quindi la sostanza che dopo aver subito trasformazioni (cambiamenti di stato, reazioni chimiche, riscaldamento, ... a seconda del tipo di endoreattore) va a costituire il fluido propulsivo, cioè il gas che viene accelerato dall'endoreattore nell'ugello. Nel caso di endoreattore chimico il fluido propulsivo è costituito dagli stessi prodotti derivanti dalla reazione tra il combustibile e l'ossidante utilizzati, i quali definiscono perciò il rilascio di energia e la composizione della miscela di prodotti di reazione.

Il propellente può essere stivato a bordo in vari modi. Se è immagazzinato allo stato solido e bruciando passa allo stato gassoso, si parla di propellente solido. Se è immagazzinato allo stato liquido, in serbatoi, si parla di propellente liquido. Se il propellente è immagazzinato in parte allo stato solido e in parte allo stato liquido, si parla di endoreattori a propellenti ibridi.

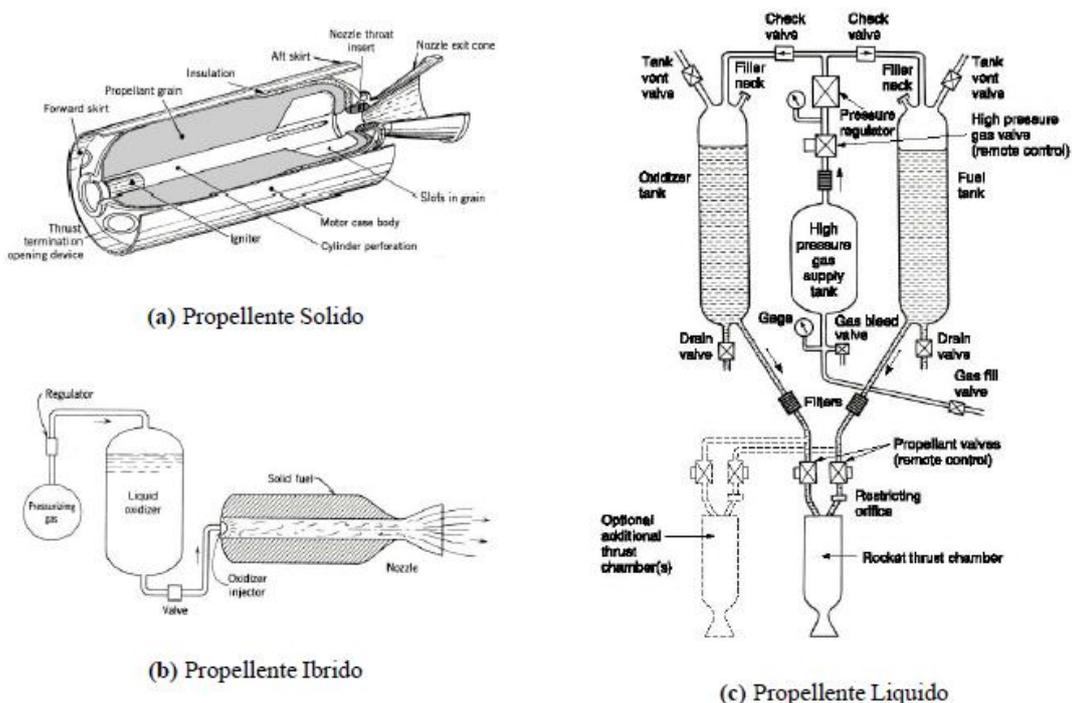


Figura 1.2: Tipologie di endoreattori chimici esistenti

Nel caso gli endoreattori fossero a combustibile solido, il propellente contiene al suo interno tanto il combustibile quanto l'ossidante, e la combustione, che consuma il propellente solido generando gas caldi come prodotti di reazione, avviene sulla superficie esposta del propellente. La caratteristica di tali endoreattori è l'estrema semplicità, nonché la particolarità di non richiedere lunghi preparativi per il lancio. Con endoreattori a combustibile liquido si possono creare sistemi con prestazioni superiori, ma più complessi. In questo caso combustibile ed ossidante possono essere immagazzinati nei serbatoi separatamente. Il sistema di alimentazione, controllato da valvole e pompe, costituisce un importante sottosistema degli endoreattori a propellente liquido.



Figura 1.3: Esempio di endoreattore chimico ibrido utilizzato nello space shuttle

Infine per alcune applicazioni può essere interessante un compromesso costituito dagli endoreattori a propellente ibrido poiché convergono i vantaggi legati a ciascuna delle due tipologie di impianti. Al momento tale sistema risulta essere raramente impiegato poiché ancora in fase di sviluppo.

1.3: Gli endoreattori a propellente solido

Gli endoreattori a propellente solido (o *Solid Rocket Motor SRM*) sono dei motori in cui l'ossidante ed il combustibile sono sempre miscelati assieme prima del caricamento all'interno del motore sotto forma di grano propellente solido. Questa tipologia di motori presenta una serie di pregi operativi che possono essere così riassunti:

- Semplicità di utilizzo, poiché l'innesco del grano propellente avviene semplicemente attraverso un dispositivo ignitore e non è richiesta alcuna particolare procedura di avviamento;
- Assenza di gruppi turbopompe e circuiti di *feeding*, dal momento che il serbatoio di stoccaggio del grano propellente funge anche da camera di combustione;
- Dimensioni compatte, grazie sia al minor volume specifico richiesto dal propellente se stivato sotto forma solida, sia dal layout estremamente essenziale del motore;
- Elevati livelli di spinta a causa di una maggior densità dei propellenti solidi utilizzati.

Dall'altro lato, tuttavia, questi sistemi propulsivi sono affetti da diversi svantaggi prestazionali, che pregiudicano in molti casi la scelta di questa tipologia di propulsori e che possono essere riassunte come:

- Complessità costruttiva ed impossibilità di una regolazione, proprio a seguito dell'assenza di valvole ed altri dispositivi di controllo diretto del processo di combustione;
- Bassi valori dell'impulso specifico, dell'ordine dei 300÷350 s contro i 400÷450 s tipici dei sistemi di endoreattori a propellente liquido (o *Liquid Propellant Rocket Engine LPRE*);

- Possibile tossicità delle specie chimiche contenute nei gas espulsi, soprattutto nel caso di applicazioni intra-atmosferiche.

Per le ragioni precedentemente esposte gli endoreattori a propellente solido vengono generalmente utilizzati ogni qualvolta sono richieste elevate spinte, con ingombri contenuti e senza particolari complicazioni costruttive, anche a scapito di valori relativamente bassi di efficienza.

I principali elementi di cui è costituito propulsore sono:

- *la camera di combustione*, in genere cilindrica o sferica, contenente il propellente solido;
- *il grain di propellente solido* nel quale è presente sia il combustibile che l'ossidante ed altre sostanze accessorie;
- *un ignitore*, dispositivo necessario all'accensione, costituito da una carica esplosiva, azionata elettricamente o per percussione
- *un ugello propulsivo*.

Ognuna di queste parti verrà descritta nelle successive pagine.

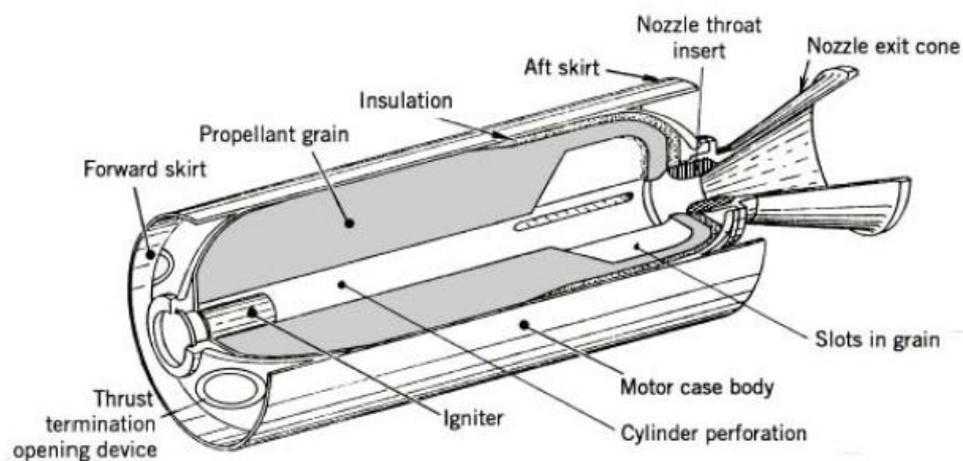


Figura 1.4: Endoreattore chimico a propellente solido

1.3.1: La camera di combustione

Il primo elemento che presenteremo è la camera di combustione e rappresenta la parte del *SRM* in cui avviene lo stoccaggio e la combustione del propellente. Questa avviene a temperature molto più elevate rispetto al punto di fusione del materiale di cui è composta la camera di combustione e perciò è necessaria una protezione termica, oltre a quella fornita dalla presenza del propellente stesso. Essa è generalmente realizzata in materiali metallici (alluminio, titanio, acciaio, etc.), fibre composite, (grafite, Kevlar, fibre di vetro con matrice di resina epossidica) o mediante una combinazione di esse in cui la parte metallica viene posta nella parte interna della camera. I materiali metallici vengono spesso utilizzati per i motori di costo inferiore, poiché più semplici da lavorare ed in grado di essere facilmente riutilizzati (ad esempio i *Solid Rocket Booster* o *SRB* dello Space Shuttle). I materiali compositi sono invece molto interessanti per il loro elevato rapporto tensione di snervamento – peso, che consente la costruzione di propulsori fino a 20-30% più leggeri rispetto al caso precedente, sebbene parte del vantaggio di massa venga in genere perduto a causa della loro minore rigidità, imponendo quindi spessori maggiori o strutture più complesse, come ad esempio inserti metallici nelle zone di maggior sollecitazione. Più complessa risulta essere anche la loro realizzazione tramite l'utilizzo di tali materiali, poiché generalmente questa avviene mediante la tecnica del *filament winding*, attraverso la quale strati continui di fibra composita vengono impregnati in resina catalizzata e avvolti attorno ad un mandrino rotante, secondo uno specifico schema ed orientamento deciso a seconda delle caratteristiche di forma e carico come riportati nelle immagini sottostanti.

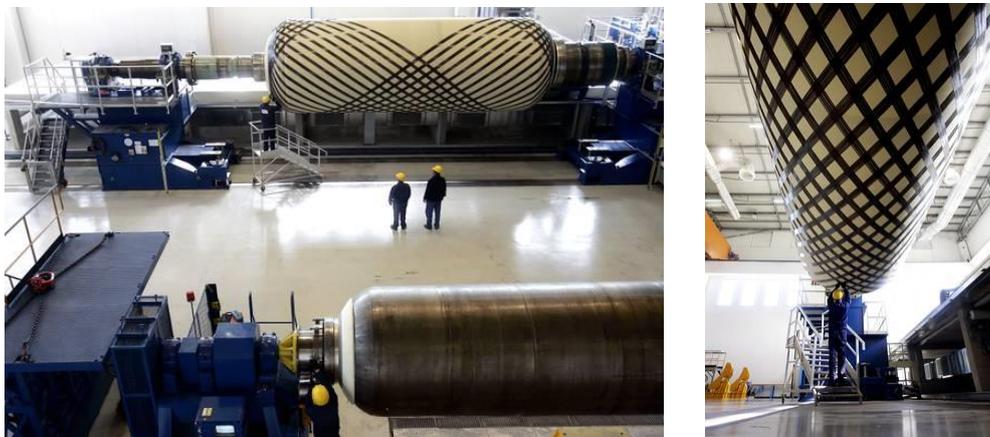


Figura 1.5: Fasi di produzione del *motor case* del primo stadio del lanciatore VEGA, il P80, in materiale composito mediante la procedura del *filament winding* (Foto Avio Space Division)

Il valore di pressione all'interno della camera di combustione è ottenibile effettuando semplicemente un bilancio di masse. Infatti, se si considera che la portata di gas che passa attraverso la gola dell'ugello (in condizioni stazionarie) \dot{m}_n deve essere uguale a quella di gas generato dalla combustione del propellente solido \dot{m}_b si ha:

$$\dot{m}_n = \frac{\Gamma p_c A_t}{\sqrt{RT_c}} = \dot{m}_b \quad (1.3.1)$$

Dove:

p_c e T_c : rappresentano rispettivamente la pressione e la temperatura presente in camera di combustione

A_t : rappresenta l'area della sezione di gola dell'ugello.

Γ : rappresenta la funzione di Vandekerckhove pari a

$$\Gamma = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (1.3.2)$$

La portata di gas combusto è data dal volume di propellente che viene bruciato nell'unità di tempo per la densità del propellente stesso. Il volume di propellente solido che brucia nell'unità di tempo è facilmente ottenuto come prodotto della velocità di combustione r e della superficie di combustione A_b

$$\dot{m}_b = r \rho_p A_b \quad (1.3.3)$$

Uguagliando le due equazioni sopra riportate, sostituendo ad r la legge di Vieille, definita come $r = ap_c^n$, ed introducendo la velocità caratteristica, definita come $c^* = \sqrt{RT_c}/\Gamma$ otteniamo:

$$p_c = (ac^* \rho_p K)^{\frac{1}{1-n}} \quad (1.3.4)$$

dove il parametro K è un parametro balistico, detto *klemmung*, definito come il rapporto tra la superficie di combustione e l'area della sezione di gola dell'ugello ($K = A_b/A_t$).

L'importanza di tale relazione è dovuta al fatto che permette di legare la pressione della camera di combustione alle proprietà balistiche del propellente ed alla geometria del grano e della gola dell'ugello. Ovviamente è possibile ricorrere a valori determinati sperimentalmente per una valutazione accurata. È interessante notare che si ha anche una dipendenza diretta tra la pressione in camera di combustione e la superficie di combustione, la quale risulterà essere lineare se n risulta essere pari a zero mentre risulta essere più forte nel caso in cui n sia diverso da zero.

Una trattazione più rigorosa del bilancio di pressioni in camera di combustione, ci fa notare che l'espressione del bilancio di massa deve più correttamente essere scritto considerando anche la variazione di massa nell'unità di tempo all'interno del volume di controllo, dovuto all'aumentare del volume disponibile per il gas al recedere del grano. Indicando con m_c la massa di gas combusti contenuti all'interno della camera, si ha perciò

$$\dot{m}_b - \dot{m}_n = \frac{dm_c}{dt} \quad (1.3.5)$$

Si ha che la massa di gas combusti può essere espressa anche come prodotto tra la densità dei gas in camera di combustione ed il volume dei gas combusti: $m_c = \rho_c V_c$.

La densità dei gas combusti è possibile ricavarla dall'equazione di stato dei gas come $\rho_c = p_c/RT_c$, in cui il denominatore risulta nell'ipotesi di stazionarietà, e pari a $RT_c = (\Gamma c^*)^2$; infine l'aumento di volume a disposizione del gas nell'unità di tempo è uguale al volume lasciato libero dal grain nel medesimo tempo. Potremo dunque riscrivere l'equazione come:

$$\frac{dm_c}{dt} = V_c \frac{d\rho_c}{dt} + \rho_c \frac{dV_c}{dt} = \frac{V_c}{(\Gamma c^*)^2} \frac{dp_c}{dt} + r p_c A_b \quad (1.3.6)$$

Tale espressione ci permette di effettuare alcune considerazioni interessanti sulla stabilità delle condizioni di funzionamento del motore. Riscrivendo l'equazione sopra riportata in maniera tale da esprimerla rispetto alla derivata temporale della camera di combustione ed esprimendo dm_c/dt come differenza tra la massa di propellente che brucia nell'unità di tempo e quella che esce dall'ugello otteniamo:

$$\frac{V_c}{(\Gamma c^*)^2} \frac{dp_c}{dt} = r(\rho_p - \rho_c)A_b - \frac{p_c A_t}{c^*} \quad (1.3.7)$$

Introducendo la legge di Vieille e sostituendo il rateo di combustione r e ponendo che $\rho_c \ll \rho_p$ (poiché ρ_c è la densità di un gas, sicuramente trascurabile rispetto a quella di un solido) otteniamo:

$$\frac{V_c}{RT_c} \frac{dp_c}{dt} = a p_c^n \rho_p A_b - \frac{p_c A_t}{c^*} \quad (1.3.8)$$

Sostituendo c^* all'interno dell'equazione (1.3.8) otteniamo:

$$\frac{V_c}{RT_c} \frac{dp_c}{dt} = a p_c^n \rho_p A_b - p_c A_t \sqrt{\frac{\Gamma}{RT_c}} \quad (1.3.9)$$

Se la pressione di combustione rimane costante il termine a sinistra dell'equazione scompare permettendoci così di determinare il valore della pressione di combustione come:

$$p_c = \left[\frac{A_b a \rho_p}{A_t \sqrt{\frac{\Gamma}{RT_c}}} \right]^{1/(1-n)} \quad (1.3.10)$$

L'esponente n del rateo di combustione deve essere minore del valore unitario per garantire la stabilità in camera di combustione; ciò è facilmente dimostrabile mediante la seguente

argomentazione. Trascurando i piccoli termini relativi ai gas in camera di combustione, si ha che il rateo del flusso dei gas all'ugello, il quale risulta essere proporzionale alla pressione di combustione p_c , deve essere pari al rateo della generazione dei gas in camera di combustione, il quale è direttamente proporzionale a p_c^n .

Il grafico riportato nella pagina seguente mostra le curve del rateo di efflusso dei gas alla sezione di gola dell'ugello e del rateo di generazione dei gas in camera di combustione in funzione della pressione. Le curve generate dai gas risultano avere il medesimo punto di funzionamento per il medesimo ugello, ma, come è possibile vedere, si possono generare due curve differenti e dipendenti dal valore n :

- la prima è la curva generata nel caso in cui il valore di n risulti essere minore di 1. Consideriamo che il valore della pressione in camera di combustione tenda a diminuire; in tal caso, come si può notare dal grafico, al diminuire della pressione si determina un aumento del rateo di generazione dei gas in camera di combustione che tende a superare il rateo di efflusso dei gas alla sezione di gola dell'ugello determinando così un aumento di pressione in camera di combustione in maniera da riportare il sistema al punto iniziale di funzionamento. Viceversa se il valore di pressione tende ad aumentare si può notare che il rateo di generazione dei gas in camera di combustione risulta essere minore del rateo di efflusso dei gas all'ugello; ciò determina dunque un abbassamento della pressione riportando il sistema al punto di funzionamento corretto della camera
- la seconda curva invece vede il termine n maggiore di 1. In tal caso si può notare che se si verifica un aumento della pressione di combustione il rateo dei gas generati in camera di combustione risulta essere maggiore del rateo di efflusso dei gas; ciò determina dunque un ulteriore aumento della pressione senza la possibilità di tornare al punto di funzionamento corretto. Se si verifica una diminuzione della pressione in camera di combustione il rateo dei gas generati risulta essere minore del rateo di efflusso dei gas determinando un ulteriore abbassamento della pressione.

Si può concludere quindi che per ottenere un valore di pressione stabile in camera di combustione è necessario che il coefficiente n risulti essere minore di uno; infatti nel caso contrario ciò che otteniamo sarà o un'esplosione del velivolo oppure uno spegnimento.

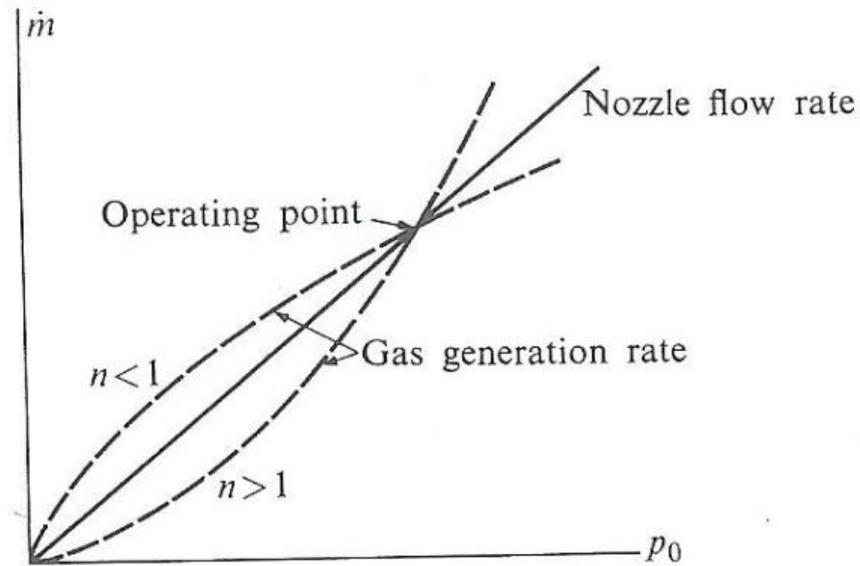


Figura 1.6: Grafico per l'equilibrio della pressione in camera di combustione

1.3.2: Ignitore o bomba di Crawford

L'ignitore (o accenditore o bomba di Crawford) di un SRM rappresenta di per sé un piccolo propulsore a solido il quale, una volta avviato mediante una scarica elettrica, genera gas ad elevata temperatura e pressione che, fuoriuscendo da uno o più ugelli, è in grado di innescare la combustione sulla superficie del grano propellente all'interno della camera principale. La progettazione di tale dispositivo segue la medesima logica del propulsore stesso, essendo i due sistemi molto simili, e pertanto la sua struttura viene realizzata per resistere alle pressioni generate dalla combustione del propellente al suo interno.

Esso inoltre deve essere dotato di una protezione esterna per garantire la resistenza all'interno della camera di combustione principale. In alcuni casi vengono utilizzati degli ignitori a perdere poiché, essendo realizzati con materiali soggetti ad ablazione (come per esempio i compositi a base di fibre di carbonio), si consumano durante il funzionamento del sistema consentendo così un sensibile risparmio della massa inerte. Di seguito viene riportato uno schema che mostra la configurazione di un ignitore nelle sue parti.

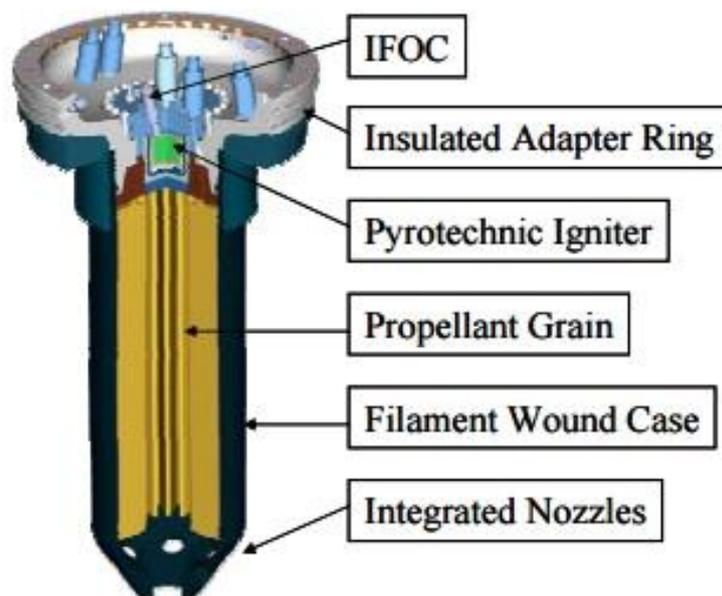


Figura 1.7: Configurazione di un ignitore per il VEGA

1.3.3: Il grano di propellente solido

Il grano di propellente solido è la massa di propellente sagomato all'interno del motore. La composizione e la configurazione geometrica del grano determinano le prestazioni del motore stesso. Il grano è un solido colato, stampato o estruso, ed ha tipicamente consistenza simile a gomma dura o plastica, che può essere posto nella cassa (telaio) in diversi modi. Si avrà pertanto:

- Grani caricati come cartuccia: sono grani di propellente manufactured separatamente (per estrusione o colata) e caricati come una cartuccia nella cassa.
- Grani legati alla cassa: in questo caso la cassa stessa è usata come stampo ed il propellente è colato direttamente al suo interno. La maggior parte dei grani viene realizzata in questo modo.

Infine, in base alle caratteristiche geometriche con cui il grano viene caricato la spinta verrà influenzata diversamente. Nel grafico riportato si può notare come la spinta possa essere regressiva, neutra o progressiva.

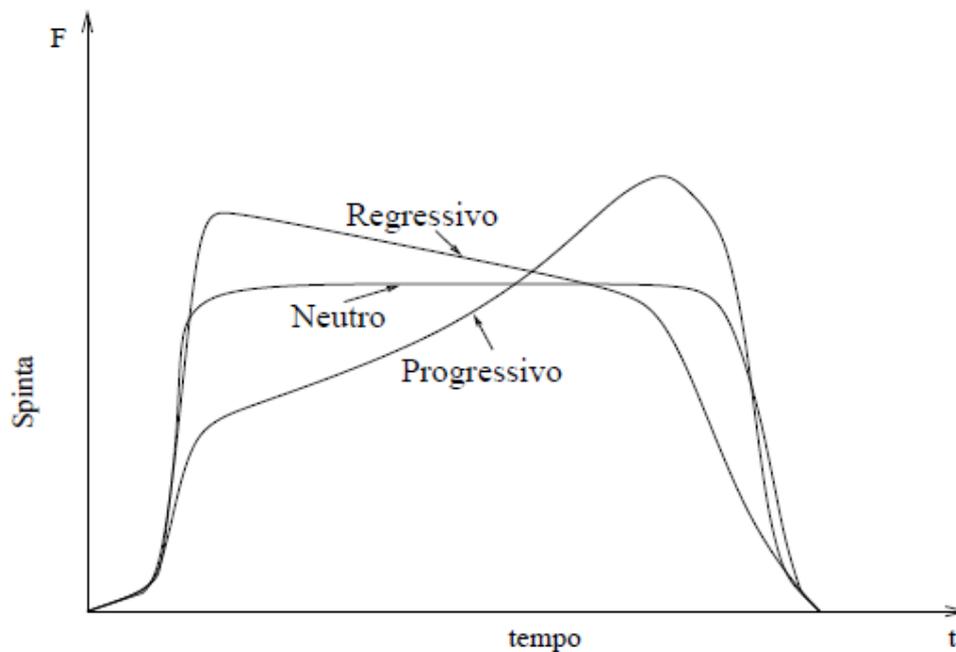
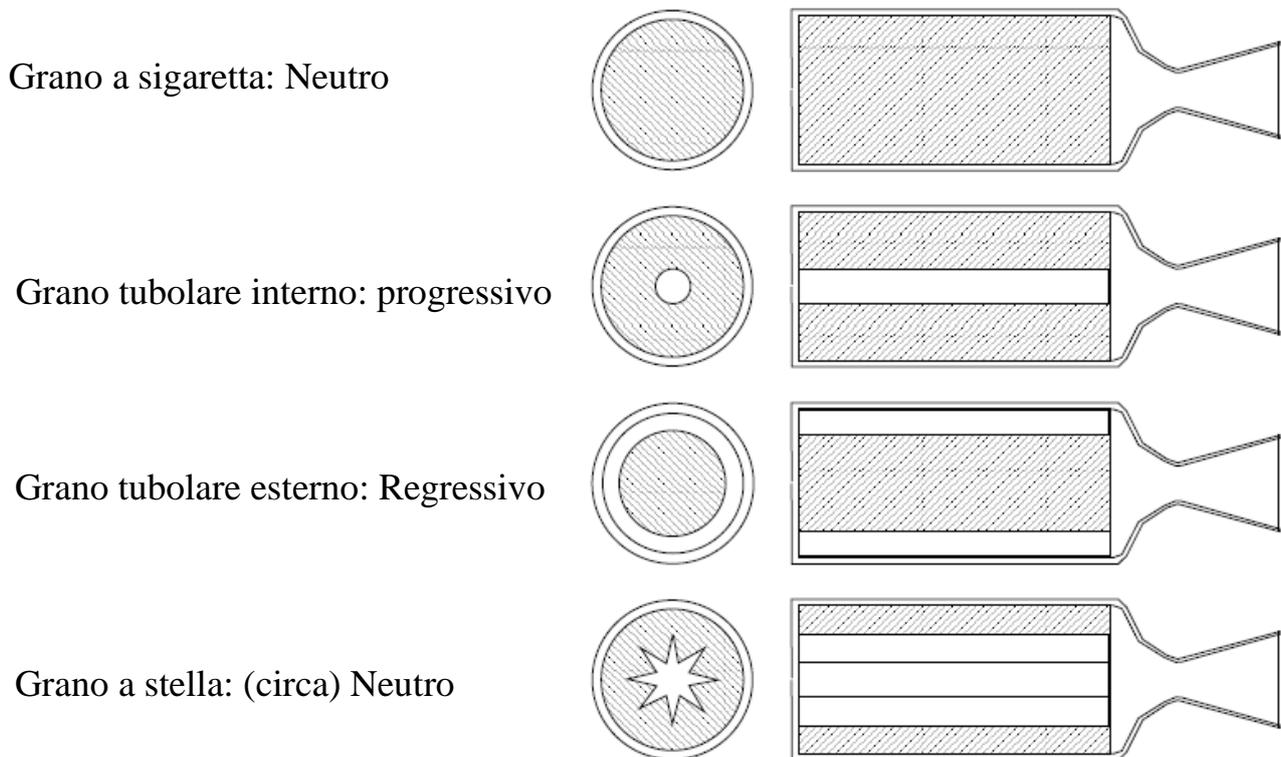


Figura 1.8: Tipologie di spinte generate

Come si può notare la geometria del grano progressivo determina il fatto che la spinta, la pressione in camera e la superficie di combustione aumentino nel tempo, mentre nel caso regressivo si verifica esattamente la condizione opposta. Nel caso invece del grano neutro non si determinano notevoli variazioni nella spinta. La combustione è detta comunque neutra se le variazioni della spinta nel tempo si mantengono al di sotto del 15%.

La realizzazione di queste tipologie di spinte sono date da differenti configurazioni geometriche tra cui le principali sono:

- grani bidimensionali
 - grani a combustione di estremità (es.: grano a sigaretta)
 - grani a combustione radiale (es.: grani tubolari, grano a stella...)
- grani tridimensionali



Nel capitolo successivo verrà ulteriormente approfondita questa parte riportando i tipi di combustibili esistenti, le sostanze utilizzate per produrli e le principali proprietà.

1.3.4: L'ugello

L'ugello è il componente che permette l'espansione del fluido propulsivo convertendo l'energia termica in energia cinetica del getto dei gas in uscita. Sebbene questo elemento possa essere studiato con la stessa teoria utilizzata per gli ugelli aeronautici, gli ugelli per la propulsione a razzo presentano caratteristiche differenti soprattutto a causa dei maggiori rapporti di espansione che caratterizzano i getti degli endoreattori. La progettazione di un ugello richiede di specificare l'intera sua forma, non solo la sezione di gola, considerando anche le variazioni di pressione e velocità lungo le superfici normali alle linee di corrente. Vanno considerati inoltre anche l'influenza degli effetti di attrito, scambi termici ed altri effetti minori. Nella grande maggioranza dei casi si hanno ugelli a sezione circolare; questi hanno il vantaggio di essere a simmetria assiale e di presentare il minimo ingombro trasversale.

Nella figura sottostante viene riportato un tipico ugello a sezione circolare.

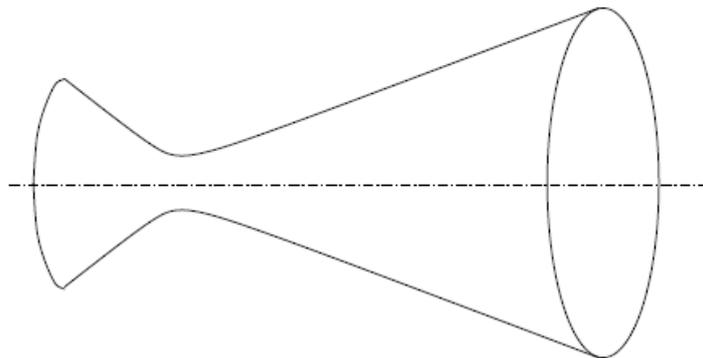


Figura 1.9: Ugello a sezione circolare

In alcuni casi invece vengono scelti altre forme che permettono una miglior integrazione con la base del veicolo; le altre configurazioni di ugelli spesso usate in ambito di propulsivo sono:

- *ugelli con divergente conico*: la cui semplicità di forma permette una facile fabbricazione, determinando una facilità di realizzazione e sviluppo del dispositivo, una buona affidabilità e un elevato risparmio dal punto di vista economico, ma non consentono di ottenere prestazioni ottime
- *ugelli a campana o contornati*: questi consentono di ottenere prestazioni più pregiate rispetto ai primi; tuttavia nel caso di endoreattori a propellente solido si preferiscono

comunque ugelli tronco-conici poiché la presenza di particelle solide all'interno del flusso propulsivo provoca il danneggiamento delle superfici concave presenti in questa tipologia di ugelli.

Gli ugelli di endoreattori sono sempre del tipo tronco-conici convergente-divergente.

Di seguito viene riportata una tabella che mostra le principali tipologie di ugelli e le loro caratteristiche di efflusso.

	Cone	Contoured or Bell-Shaped	Plug	Expansion-Deflection
Shape				
Flow with underexpansion at altitude				
Flow with overexpansion, (Sea level)				
Mass flow distribution at exit				

Figura 1.10: Tipologie di ugelli utilizzate

Gli ugelli possono essere classificati mediante 4 differenti categorie:

- *Ugelli fissi*: sono ugelli costruttivamente molto semplici. Generalmente questi ugelli non sono contenuti in parte nel velivolo, ma sono sempre esterni e non permettono di controllare la direzione in cui viene erogata la spinta.
- *Ugelli mobili*: permettono di controllare la direzione della spinta e quindi permettono di controllare la direzione del velivolo; inoltre un ugello mobile permette il controllo del velivolo sia in beccheggio che in imbardata, mentre per il controllo in rollio sono necessari due ugelli mobili.
- *Ugelli incassati*: in questo caso una notevole porzione dell'ugello risulta essere all'interno della struttura del velivolo; questa tipologia di dispositivo riduce la lunghezza complessiva del motore che a sua volta riduce la lunghezza del velivolo e il suo peso.
- *Ugelli estensibili*: comunemente si riferiscono a cono di uscita estendibile, che la maggior parte delle volte non risulta essere esattamente conico. Questo sistema permette così di ottenere un elevato rapporto tra la parte di espansione dell'ugello e il

poco spazio in cui risulta essere stivato riducendo così sia la lunghezza del velivolo sia il peso.

Di seguito vengono riportati le tipologie di ugello descritte.

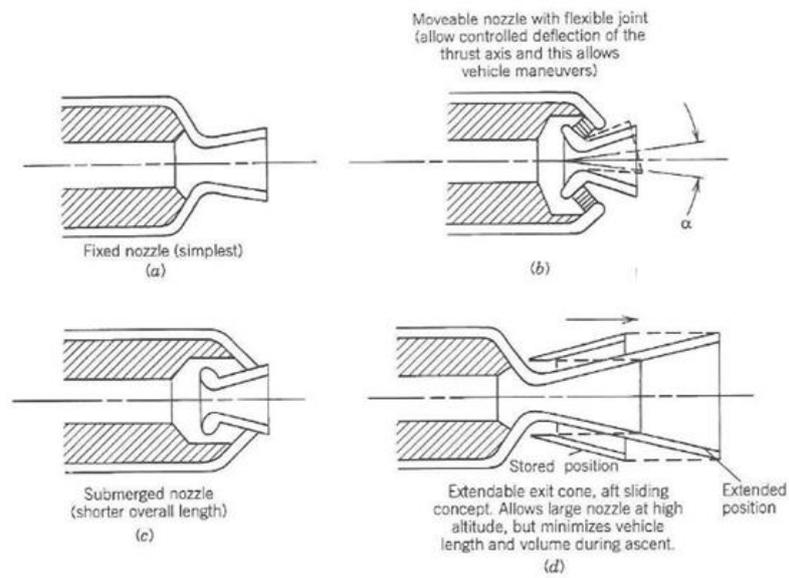


Figura 1.11: Tipologie di ugelli esistenti.

CAPITOLO 2

I PRINCIPALI PARAMETRI PRESTAZIONALI DEI SRM ED IL GRANO DI PROPELLENTE SOLIDO

“Gli uomini amano meravigliarsi e questo è il seme della scienza”

Ralph Waldo Emerson

2.1: Definizioni e parametri fondamentali

La propulsione a razzo trova le sue leggi fondamentali nella meccanica, nella termodinamica e nella chimica. La propulsione è semplicemente ottenuta dall'applicazione di una forza su un velivolo, in maniera tale da poterlo accelerare oppure al fine di mantenere costante la velocità contro forze resistenti. Tale forza è ottenuta dall'espulsione di propellente a velocità molto elevate. All'interno di tale capitolo forniremo, prima di descrivere nel dettaglio il propellente e i materiali ablativi, alcuni parametri fondamentali di tale forza propulsiva.

Il primo elemento che definiamo è l'*impulso totale* (I_t). Si definisce *impulso totale* la forza della spinta F integrata durante tutto il periodo di combustione t .

$$I_t = \int_0^t F dt \quad (2.1.1)$$

Se il valore di spinta risulta essere costante, trascurando i fenomeni transitori sia all'inizio che alla fine della combustione, la formula può essere rivista come:

$$I_t = Ft \quad (2.1.2)$$

Dalla formula è dunque possibile dedurre che l'impulso totale, in caso di spinta costante, è direttamente proporzionale all'energia totale rilasciata da tutto il propellente presente all'interno del sistema di propulsione.

Altro elemento fondamentale è l'*impulso specifico*. Questo elemento è definito come il rapporto tra l'impulso totale erogato e la forza peso della massa di propellente consumato e viene misurato in secondi. Questo elemento è un importante indice di merito all'interno dei sistemi propulsivi a razzo e concettualmente può essere paragonato alla quantità di chilometri che una macchina può percorrere con un litro di benzina. Ovviamente maggiore tale indice migliori saranno le prestazioni del nostro sistema propulsivo. Possiamo dunque calcolare l'impulso specifico come:

$$I_s = \frac{\int_0^t F dt}{g_0 \int \dot{m} dt} \quad (2.1.3)$$

Dove

g_0 è la costante gravitazionale

F è la spinta

\dot{m} rappresenta la massa di propellente espulso nell'unità di tempo.

Nel caso sia la spinta sia \dot{m} risultino essere costanti, trascurando i brevi transitori che si verificano negli istanti iniziali e finali di combustione, l'equazione si semplifica notevolmente divenendo:

$$I_s = \frac{I_t}{m_p g_0} \quad (2.1.4)$$

Dove m_p è l'effetto totale della massa di propellente espulso dal razzo.

Tale equazione può essere anche rappresentata come:

$$I_s = F / (\dot{m} g_0) = F / \dot{w} \quad (2.1.5)$$

$$I_s = I_t / (m_p g_0) = F / \dot{w} \quad (2.1.6)$$

In particolare nei sistemi di propulsione a propellente solido viene usata molto spesso la notazione I_{sp} per rappresentare l'impulso specifico.

Nelle tabelle riportate di seguito è possibile vedere valori tipici per differenti sistemi di propulsione a razzo.

Engine Type	η_{int}	I_s	v_2 (m/sec)	\dot{m} (kg/sec)	Power Input (kW)
Chemical rocket	0.50	300	2940	0.0340	294
Nuclear fission	0.50	800	7840	0.0128	787
Arc—electrothermal	0.50	600	5880	0.0170	588
Ion electrostatic	0.90	2000	19,600	0.0051	1959

Figura 2.1: Tabella caratteristiche per differenti tipologie di motori

Engine Type	Specific Impulse ^a (sec)	Maximum Temperature (°C)	Thrust-to-Weight Ratio ^b	Propulsion Duration	Specific Power ^c (kW/kg)	Typical Working Fluid	Status of Technology
Chemical—solid or liquid bipropellant	200–410	2500–4100	10^{-2} –100	Seconds to a few minutes	10^{-1} – 10^3	Liquid or solid propellants	Flight proven
Liquid monopropellant	180–223	600–800	10^{-1} – 10^{-2}	Seconds to minutes	0.02–200	N ₂ H ₄	Flight proven
Nuclear fission	500–860	2700	10^{-2} –30	Seconds to minutes	10^{-1} – 10^3	H ₂	Development was stopped
Resistojet	150–300	2900	10^{-2} – 10^{-4}	Days	10^{-3} – 10^{-1}	H ₂ , N ₂ H ₄	Flight proven
Arc heating—electrothermal	280–1200	20,000	10^{-4} – 10^{-2}	Days	10^{-3} –1	N ₂ H ₄ , H ₂ , NH ₃	Flight proven
Electromagnetic including Pulsed Plasma (PP)	700–2500	—	10^{-6} – 10^{-4}	Weeks	10^{-3} –1	H ₂	Flight proven
Hall effect	1000–1700	—	10^{-4}	Weeks	10^{-1} – 5×10^{-1}	Solid for PP Xe	Flight proven
Ion—electrostatic	1200–5000	—	10^{-6} – 10^{-4}	Months	10^{-3} –1	Xe	Several have flown
Solar heating	400–700	1300	10^{-3} – 10^{-2}	Days	10^{-2} –1	H ₂	In development

^aAt $p_1 = 1000$ psia and optimum gas expansion at sea level ($p_2 = p_3 = 14.7$ psia).

^bRatio of thrust force to full propulsion system sea level weight (with propellants, but without payload).

^cKinetic power per unit exhaust mass flow.

Figura 2.212: Tabella range parametri caratteristici

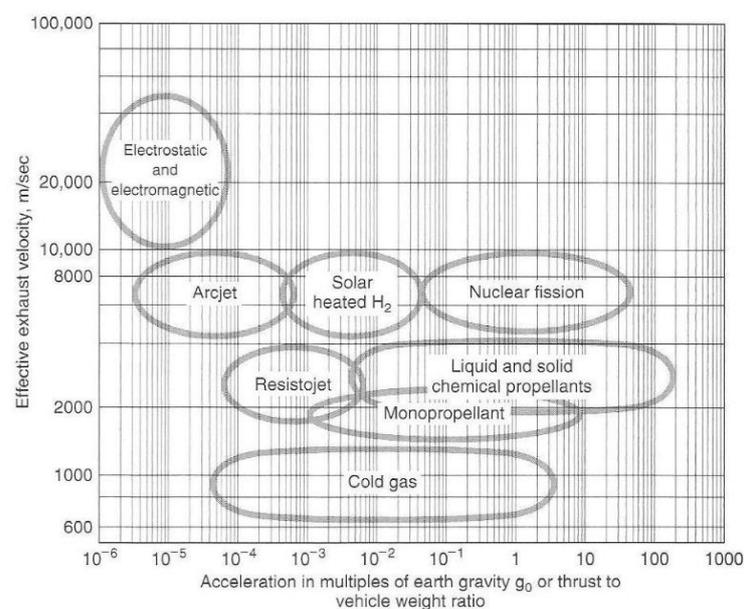


Figura 2.313: Grafico rappresentante la velocità effettiva dei gas di scarico

Da questo indice di merito è possibile ricavare la velocità effettiva dei gas di combustione c . Questo valore rappresenta la velocità media equivalente alla quale viene espulso il propellente dal velivolo. Questa è definita come:

$$c = I_s g_0 = F / \dot{m} \quad (2.1.7)$$

Questa velocità può essere rappresentata sia in metri al secondo che in piedi al secondo.

L'elemento sicuramente più importante di tutti all'interno del sistema propulsivo è ovviamente la spinta generata. Questa viene definita come la forza prodotta da un sistema di propulsione a razzo agente su un veicolo. In altre parole, è la reazione agente sull'intera struttura e dovuta all'espulsione di materia ad elevata velocità. Concettualmente tale fenomeno è simile al rinculo di una pistola.

La spinta è legata a due fattori importanti:

il primo è la variazione del momento della quantità di moto. Supponendo spinta e il flusso della massa di propellente in uscita costanti e la velocità dell'uscita dei gas sia uniforme ed in direzione assiale otteniamo:

$$F = \frac{dm}{dt} v_2 = \dot{m} v_2 = \frac{\dot{w}}{g_0} v_2 \quad (2.1.8)$$

Il secondo contributo che aumenta la spinta viene fornito dalla pressione del fluido circostante. All'interno della figura sotto riportata è possibile notare come la pressione del fluido esterno agisca uniformemente sulla superficie esterna della camera di combustione e come agisca la pressione la pressione del gas all'interno di un endoreattore.

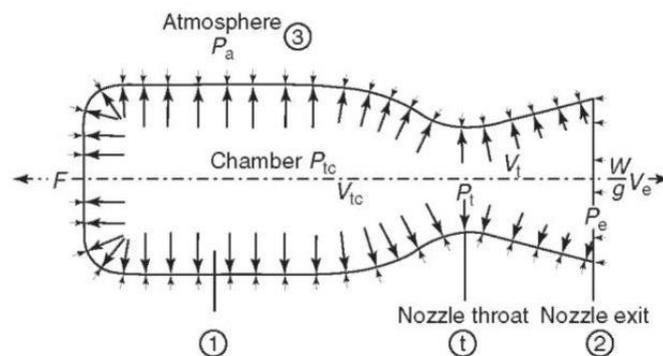


Figura 2.4: Pressione in camera di combustione

La spinta totale del razzo risulta pari a:

$$F = \dot{m}v_2 + (p_2 - p_3)A_2 \quad (2.1.9)$$

Dove con A_2 si è indicata la superficie dell'uscita dell'ugello.

Nello spazio si ha però che il valore di quest'ultima risulterà essere pari a zero ($p_3=0$) per cui l'equazione della spinta diviene:

$$F = \dot{m}v_2 + p_c A_2 \quad (2.1.10)$$

Legato a tale parametro viene definito un ulteriore parametro fondamentale che risulta essere la velocità caratteristica. Questa velocità viene indicata con c^* e viene misurata in metri al secondo. Essa viene determinata partendo dall'espressione della velocità equivalente di espulsione dei gas definita come il rapporto tra la spinta generata ed il rateo del flusso della massa di propellente otteniamo:

$$c = \frac{F}{\dot{m}} = \frac{p_c A_2}{\dot{m}} \frac{F}{p_c A_2} = \left(\frac{p_c A_2}{\dot{m}} \right) C_F = c^* C_F \quad (2.1.11)$$

Perciò è possibile definire la velocità caratteristica come: $c^* = \frac{p_c A_2}{\dot{m}}$

Quindi la velocità efficace di uscita può essere ottenuta come prodotto tra il coefficiente di spinta, che risulta essere un valore adimensionale, e di un altro termine che ha dimensioni di una velocità e viene appunto definita *velocità caratteristica*.

Tale parametro dipende dunque dalle caratteristiche del propellente e della combustione e rappresenta una misura dell'energia disponibile per l'accelerazione del flusso nell'ugello.

L'ultimo parametro fondamentale è il rateo di combustione che, come già anticipato, è dato dalla relazione di Vieille e che mette in correlazione tale velocità di combustione e la pressione presente in camera di combustione:

$$r = ap_c^n \quad (2.1.12)$$

Dove a è un coefficiente funzione della temperatura di pre-combustione del propellente, mentre n è l'esponente balistico, che fornisce indicazioni di quanto una variazione di pressione si ripercuota in variazioni di velocità di combustione.

La determinazione di tale legge avviene per via sperimentale; infatti la velocità di combustione r viene determinata applicando un metodo di riduzione dati; quest'ultimo ha bisogno in ingresso di tracce di pressione (P-t) ottenute mediante dei tests a fuoco di motori in piccola scala di caratteristiche note e provati al banco statico in condizioni ambientale conosciute. Non vengono acquisiti altri dati all'infuori di questi poiché non essenziali. Il motore utilizzato viene chiamato, all'interno degli stabilimenti AVIO, BARIA e verrà descritto in dettaglio nel capitolo successivo.

2.2: Il grain e la sua composizione.

I componenti che costituiscono il grano propellente solido possono essere di diverso tipo. Il grano deve soddisfare diversi requisiti, alcuni dei quali possono risultare in contrapposizione tra loro, per cui bisognerà individuare una scelta di compromesso, che dipenderà dalla particolare applicazione. I principali requisiti che il grain deve avere sono:

1. Elevata energia chimica disponibile (alta T_c e quindi elevato I_{sp})
2. Basso peso molecolare dei prodotti di combustione
3. Densità elevata per ridurre il volume della camera
4. Basso valore del rateo di combustione
5. Scarsa sensibilità alle variazioni della temperatura ambiente
6. Scarsa sensibilità alla combustione erosiva
7. Facilità di accensione
8. Prestazioni costanti alla variabilità delle condizioni operative
9. Buone proprietà meccaniche
10. Buona aderenza alle pareti
11. Coefficiente di dilatazione termica il più simile possibile a quello delle pareti
12. Bassa alterabilità per effetto di tempi lunghi di immagazzinamento
13. Buona stabilità in fase di lavorazione
14. Opacità all'irraggiamento
15. Gas di scarico privi di fumi
16. Facilità di approvvigionamento
17. Costi contenuti

Tra quelle appena enunciate le più interessanti risultano essere il basso costo, affidabilità e stivaggio per lunghi periodi (dell'ordine di decine di anni) e sono quelle che inducono all'uso di endoreattori a propellente solido.

Si possono classificare i propellenti solidi come essenzialmente appartenenti a due famiglie: quella dei propellenti solidi omogenei (o a doppia base) e quella dei propellenti solidi eterogenei (o compositi). Di seguito verranno illustrate queste due famiglie e gli elementi di cui sono costituite.

2.2.1: I propellenti solidi omogenei o doppia base.

Sono detti anche *colloidal* e sono costituiti da miscele di esplosivi tenute insieme da un materiale colloidale. Ciascun esplosivo contiene al suo interno il combustibile, l'ossidante (necessari per la combustione) e il legante. Di solito le sostanze utilizzate in questi propellenti sono nitrocellulosa (NC), un ingrediente solido, disciolta nella nitroglicerina (NG), più piccole percentuali di additivi. La nitroglicerina è un esplosivo ad alto potenziale di energia, con eccesso di ossidante ma con scarsa stabilità e caratteristiche meccaniche, mentre la nitrocellulosa ha proprietà opposte ed è un esplosivo più blando.

L'inclusione di additivi è utile per migliorare la stabilità della miscela, le sue proprietà meccaniche o modificare le caratteristiche del processo di combustione (r , T_c , opacità all'irraggiamento, ...). In particolare, l'aggiunta di nerofumo (carbone) aumenta l'opacità all'irraggiamento, evitando così rischi di accensione "lontano" dalla superficie di combustione connessi al riscaldamento del propellente. Le prestazioni possono essere anche migliorate mediante l'aggiunta di ossidanti inorganici quali il perclorato d'ammonio o polveri d'alluminio. Alle due sostanze base può essere eventualmente associata una terza sostanza; in questo caso sarebbe più corretto parlare di tripla-base. Le caratteristiche principali dei propellenti omogenei si possono riassumere come:

- Basso costo, getto non tossico, assenza di fumi, buone proprietà meccaniche, basso n , buon controllo di r .
- Basse prestazioni ($I_{sp}=220$ al livello del suolo) bassa densità ($\rho=1,6$ g/cm³), elevata pericolosità.

In virtù di tali caratteristiche, essi vengono impiegati esclusivamente per applicazioni militari.

2.2.2: I propellenti solidi eterogenei o compositi

Un grano di propellente solido del tipo composito è costituito da cristalli di ossidante finemente dispersi in una matrice di combustione rappresentata da un legante di tipo plastico o gommoso, come l'hydroxil-terminated polybutadiene (HTPB). In generale questo tipo di propellenti è meno pericoloso, sia nella produzione sia nell'utilizzo, rispetto ai propellenti doppia base.

Il rapporto di miscela tra combustibile e ossidante che massimizza le prestazioni è molto vicino a quello stechiometrico (tra 0,5 e 0,05); in particolare il massimo di T_c e I_{sp} si ha per dosature leggermente ricche di combustibile. Poiché i residui chimico-fisici richiesti al propellente (coesività, lavorabilità, resistenza meccanica ed alla detonazione) impongono percentuali di ossidante non superiori all'80-85% è necessario avere propellenti con rapporto stechiometrico il più possibile elevato per poter ottenere prestazioni ottimali con una quantità di legante sufficiente a garantire le suddette caratteristiche. L'utilizzo di rapporti di miscela ricchi evita inoltre l'ossidazione delle pareti dell'ugello. Va comunque sottolineato che dal punto di vista delle proprietà fisico-meccaniche è il rapporto volumetrico tra combustibile e ossidante il parametro fondamentale e non il rapporto di massa; sono quindi preferibili ossidanti ad elevata densità e combustibili a bassa densità che permettono di ottenere contemporaneamente bassi rapporti di miscela e buone caratteristiche del propellente. Le caratteristiche del propellente, dal punto di vista delle prestazioni, dipendono sostanzialmente dall'ossidante. La velocità di combustione è fortemente influenzata dalle dimensioni delle particelle di ossidante disperse nel legante.

Questo composito risulta essere costituito da elementi solidi (cristalli di perclorato di ammonio, polvere d'alluminio) e da elementi liquidi (HTPB). Nel propellente viene poi aggiunto un catalizzatore, detto anche reticolante poiché la procedura di indurimento dell'HTPB prende il nome di reticolazione; infine la sostanza viene posta all'interno di un forno ottenendo il propellente solido.

Nelle ultime tre decadi inoltre questi propellenti solidi eterogenei sono divenuti la classe di propellente più comunemente usata nei razzi. Ne esistono differenti tipi e questi si possono suddividere in:

- *Propellenti compositi convenzionali* i quali contengono comunemente tra il 60 ed il 72% di perclorato di ammonio (AP) come cristalli ossidanti, polvere di alluminio (Al) al 22%, usato come metallo combustibile (così da aumentare l'impulso specifico senza

determinare un aumento eccessivo di peso) e da una percentuale contenuta tra l'8% ed il 16% di un polimero organico elastomerico il quale include anche un plastificante.

- È possibile modificare il propellente eterogeneo in due modi al fine di ottenere prestazioni migliori:
 - Aggiungendo della *nitramina energetica* (HMX o RDX)
 - Aggiungendo un *plastificante energetico* come la nitroglicerina. Alcune volte viene aggiunta assieme a questo anche dell'HMX.
- *Propellenti compositi ad elevata potere energetico* (contenenti elementi di alluminio), sono quei propellenti in cui il materiale elastomerico o plastico e la polvere di alluminio (AP) vengono rispettivamente sostituiti da elementi con elevato potere energetico (come alcuni esplosivi) e HMX. Alcuni di questi sono chiamati elastomeri-modificati contenenti propellenti a doppia base (EMCDB). Molti di questi propellenti sono attualmente ancora sperimentali e teoricamente il loro impulso specifico risulta compreso tra i 270 ed i 275 secondi in condizioni di funzionamento standard.
- *Propellenti compositi a basso potere energetico*, sono i combustibili in cui i cristalli ossidanti sono costituiti da nitrato di ammonio (AN) e non da perclorato d'ammonio (AP). Se viene aggiunta una grande quantità di HMX vi è la possibilità che il propellente generi del fumo con un aumento performance.

Di fatto si ha che i combustibili eterogeni sono quelli usati all'interno dei laboratori di AVIO per effettuare i tests con i motori BARIA.

Nella tabella sottostante sono riportate le caratteristiche di alcuni propellenti solidi attualmente usati.

Propellant Type ^a	I_s Range (sec) ^b	Flame Temperature ^c		Density or Spec. Gravity ^d		Metal Content (wt %)	Burning Rate ^{e,f} (in./sec)	Pressure Exponent ^g <i>n</i>	Hazard Classification ^h	Stress (psi)/Strain (%)		Processing Method
		(°F)	(°K)	(lb/in ³)	(sp. gr.)					-60°F	+150°F	
DB	220-230	4100	2550	0.058	1.61	0	0.05-1.2	0.30	1.1	4600/2	490/60	Extruded
DB/AP/Al	260-265	6500	3880	0.065	1.80	20-21	0.2-1.0	0.40	1.3	2750/5	120/50	Extruded
DB/AP-HMX/Al	265-270	6700	4000	0.065	1.80	20	0.2-1.2	0.49	1.1	2375/3	50/33	Solvent cast
PVC/AP/Al	260-265	5600	3380	0.064	1.78	21	0.3-0.9	0.35	1.3	369/150	38/220	Cast or extruded
PU/AP/Al	260-265	5700	3440	0.064	1.78	16-20	0.2-0.9	0.15	1.3	1170/6	75/33	Cast
PBAN/AP/Al	260-263	5800	3500	0.064	1.78	16	0.25-1.0	0.33	1.3	520/16 (at -10°F)	71/28	Cast
CTPB/AP/Al	260-265	5700	3440	0.064	1.78	15-17	0.25-2.0	0.40	1.3	325/26	88/75	Cast
HTPB/AP/Al	260-265	5700	3440	0.067	1.86	4-17	0.25-3.0	0.40	1.3	910/50	90/33	Cast
PBAA/AP/Al	260-265	5700	3440	0.064	1.78	14	0.25-1.3	0.35	1.3	500/13	41/31	Cast
AN/Polymer	180-190	2300	1550	0.053	1.47	0	0.06-0.5	0.60	1.3	200/5	NA	Cast

^aAl, aluminum; AN, ammonium nitrate; AP, ammonium perchlorate; CTPB, carboxy-terminated polybutadiene; DB, double-base; HMX, cyclotetramethylene tetranitramine; HTPB, hydroxyl-terminated polybutadiene; PBAA, polybutadiene-acrylic acid polymer; PBAN, polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile terpolymer; PU, polyurethane; PVC, polyvinyl chloride.

^bAt 1000 psia expanding to 14.7 psia, ideal or theoretical value at reference conditions.

^cAt 1000 psia.

^dSee page 491.

^e I_s , flame temperature, density, burn rate and pressure exponent will vary slightly with specific composition.

Figura 2.5: Tabella proprietà fisiche dei propellenti solidi

Nella figura sottostante viene riportato un grafico che mostra l'impulso specifico generato da differenti combustibili in funzione del loro rateo di combustione.

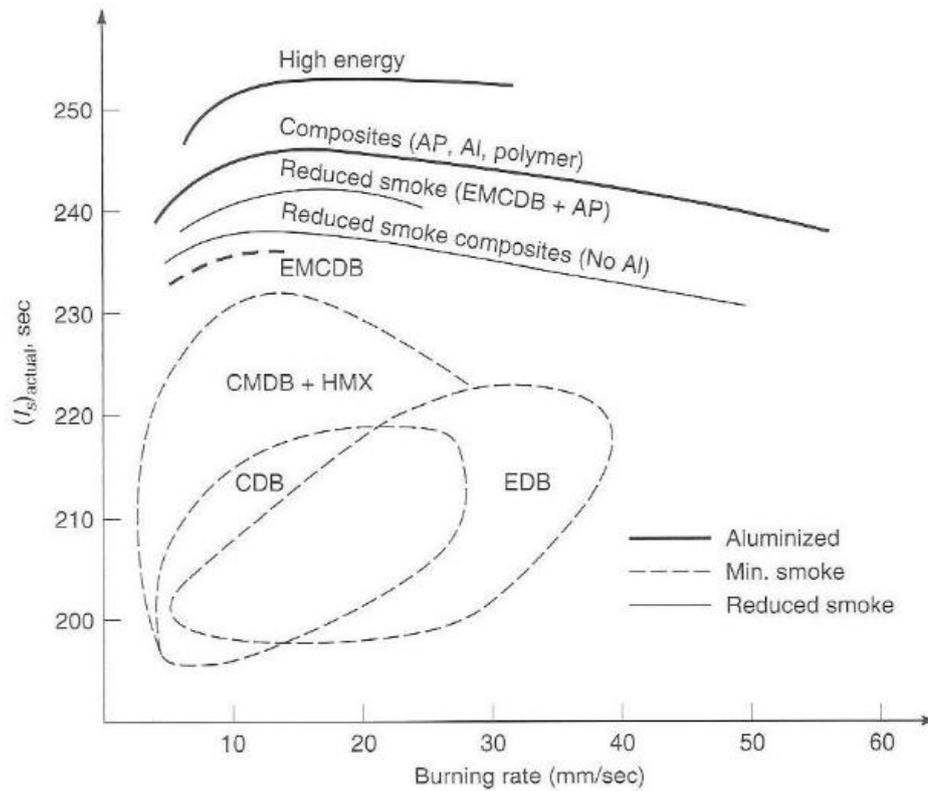


Figura 2.6: Grafico I_s di vari combustibili in funzione del loro relativo rateo di combustione

2.2.3: Gli ossidanti e le sostanze combustibili

Gli ossidanti impiegati nei propellenti solidi eterogenei sono principalmente costituiti da cristalli di sostanze quali il perclorato d'ammonio (AP), il nitrato di ammonio (AN), il perclorato di potassio (KP), il nitrato di potassio (KN), il perclorato di nitronio (NP) e molti altri.

Le sostanze combustibili sono in genere presenti sia sotto forma di leganti sia come additivi. In particolare:

- *Leganti*: costituiscono la struttura che tiene insieme il propellente solido. Si tratta di sostanze organiche di tipo plastico o gommoso quali:
 - Gomme sintetiche (polibutadine: HTPB, PBAN, ...), asfalti, ...
- *Combustibile* (polveri metalliche): presenti fino a costituire il 20 % della massa totale di propellente servono ad incrementare I_{sp} e ρ_p . Si tratta principalmente di :
 - Polveri di alluminio, boro, berillio (il quale però è estremamente velenoso).
- *Caratteristiche principali*:
 - Elevati valori di I_{sp} (fino a circa 290 s nel vuoto) e ρ (circa 1800 kg/m³); n , r , e scarsa sensibilità alle variazioni della temperatura ambiente variano a seconda dei combustibili e ossidanti che costituiscono il propellente.
 - In presenza di polveri metalliche come additivo, si hanno perdite per flusso bifase nell'ugello; moderata o bassa pericolosità.
- *Applicazioni*:
 - Booster, sustainer (cioè per portare il missile sul bersaglio, in applicazioni militari, dopo la fase di accelerazione); questi dispositivi sono molti usati ad alcuni esempi possono essere:
 - Booster Ariane 5 (P230): 14% PB, 18% polveri alluminio, 68% perclorato d'ammonio
 - I tre stadi a solido del Vega (P80, Zefiro e P7).

Nella tabella sottostante vengono riportate le percentuali di combustibili, ossidanti, additivi e collanti all'interno di differenti propellenti.

Double-Base (JPN Propellant)		Composite (PBAN Propellant)		Composite Double-Base (CMDB Propellant)	
Ingredient	Wt %	Ingredient	Wt %	Ingredient	Wt %
Nitrocellulose	51.5	Ammonium perchlorate	70.0	Ammonium perchlorate	20.4
Nitroglycerine	43.0	Aluminum powder	16.0	Aluminum powder	21.1
Diethyl phthalate	3.2	Polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile	11.78	Nitrocellulose	21.9
Ethyl centralite	1.0	Epoxy curative	2.22	Nitroglycerine	29.0
Potassium sulfate	1.2			Triacetin	5.1
Carbon black	<1%			Stabilizers	2.5
Candelilla wax	<1%				

Figura 2.7: Composizione combustibili solidi usati all'interno dei razzi

CAPITOLO 3

IL MOTORE BARIA

*“L’uomo incontra Dio dietro ogni porta
che la scienza riesce ad aprire”*

Albert Einstein

3.1: Descrizione del motore baria

Il motore in piccola scala, denominati motori BARIA dalla società AVIO s.p.a., è a tutti gli effetti un motore a propellente solido in scala ridotta caricato con lo stesso propellente del motore specifico di cui si vuole conoscere la velocità di combustione. La configurazione standard del provino BARIA è costituita da un pesante e resistente involucro esterno, necessario a contenere la pressione di funzionamento, che può essere attrezzato di volta in volta con ugelli aventi diametri differenti con lo scopo di avere diversi livelli di pressione operativa. Attraverso questi due dati sperimentali sarà possibile ricavare la legge di Vieille che lega il rateo di combustione alle pressioni che si generano durante la combustione, determinando i parametri caratterizzanti del propellente. Esso si presenta come una cartuccia con un *liner* metallico esterno ed il propellente all’interno, il quale brucia sia radialmente che assialmente in modo da fornire complessivamente una superficie di combustione neutra.

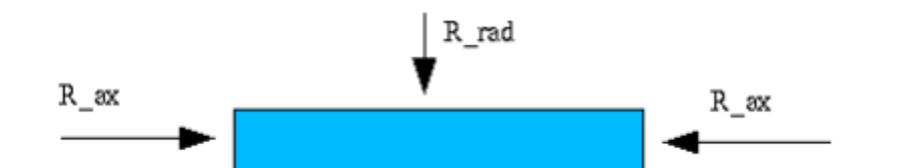


Figura 3.1: Direzioni di combustione del grain all'interno della BARIA

Per ottenere valori di pressione controllati in camera di combustione, si prende il motore dalla camera termostatica a temperatura controllata a cui è preventivamente applicato un sistema di misura della pressione in camera di combustione e fissandolo al banco statico di prova. La legge di Vieille viene identificata effettuando diverse prove con valori di pressione di combustione basse (30 bar) medie (45 bar) ed alte (70 bar) e valutando per ciascuna di queste il valore del rateo di combustione del combustibile. Interpolando i valori ottenuti sulla pressione di combustione e la velocità di combustione mediante una funzione potenza è possibile infine ricavare i coefficienti a ed n della legge di Vieille.

Di seguito viene riportata una sezione del provino BARIA il quale mette in evidenza le parti di cui esso è composto.

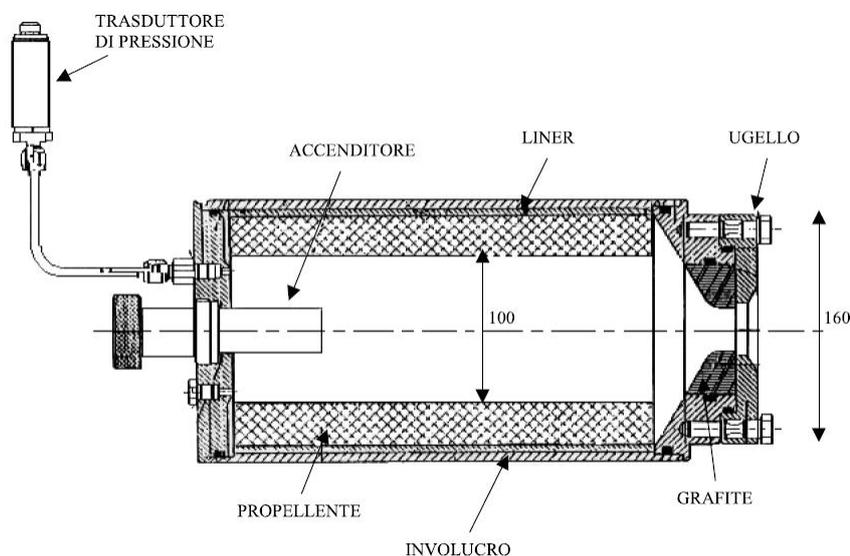


Figura 3.2: Sezione motore in scala ridotta BARIA

Nonostante la loro estrema semplicità di funzionamento e le ridotte dimensioni, si ottengono variazioni notevoli tra i profili teorici attesi e quelli sperimentali riscontrati con modificazioni in termini di rateo di combustione, legati ai cosiddetti *fattori di HUMP o BARF*, che possono determinare discostamenti dalla curva teorica di pressioni del 3÷4%.

Numerosi sono gli elementi che possono generare tali differenze tra i profili di pressione teorico e sperimentale, ma i principali sono certamente:

- Le differenti modalità di produzione della cartuccia di propellente solido, come verrà approfondito nel capitolo seguente, che determina le differenti caratteristiche balistiche del grano durante tutta la durata della combustione.

- Il processo di erosione della sezione di gola dell'ugello, a seguito del fenomeno di ablazione della grafite, che dal punto di vista sperimentale si traduce come un decadimento delle pressioni all'interno della camera di combustione negli ultimi istanti dei test a seguito dell'aumento del diametro di gola.

Tutto questo determina quindi un'inaccuratezza del calcolo del rateo di combustione in quanto si potrebbero introdurre anche dei singoli contributi che risultano in realtà totalmente estranei alla singola prestazione combustiva del propellente. Quindi è necessario capire quali siano agli effetti gli elementi caratterizzanti tale andamento delle pressioni andando ad isolare i vari contributi. Di seguito viene riportata un grafico che mostra come si discostino i profili di pressione sperimentali, rispetto il profilo di pressioni teorico atteso.

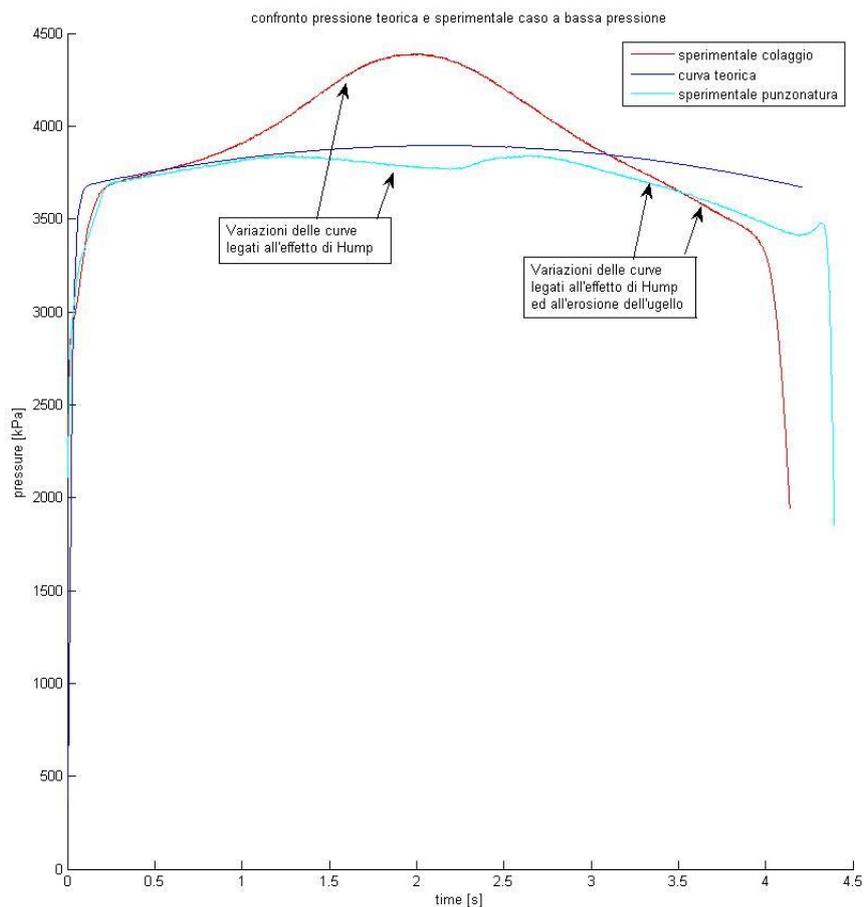


Figura 3.3: Confronto curve pressioni sperimentali e teorico

3.2: Le modalità di produzione del grain

All'interno di questa sezione verranno esaminate nel dettaglio le metodologie di produzione del grain in quanto, come già detto nel paragrafo precedente, rappresentano uno dei principali elementi che determinano il discostamento dei profili di pressione sperimentali da quelli teorici. Come verrà poi esposto nel capitolo successivo vedremo che, a seconda della tipologia di colata che verrà utilizzata, i fenomeni fisici legabili al fattore di hump saranno completamente differenti e, di conseguenza, i profili di pressione ed il rateo di combustione. Le metodologie di produzione dei motori a propellente solido sono principalmente due:

- *Il colaggio (case-bonded)*, che rappresenta la metodologia più usata nella produzione di lanciatori spaziali, perchè teoricamente non ha limiti della grandezza di produzione dei grani, oltre ad essere un processo relativamente economico e permette di lavorare tutte le tipologie di propellente, indipendentemente dalle loro caratteristiche fisiche e reologiche¹. Il propellente solido può essere creato o esternamente in un cilindro apposito e poi caricato² oppure si può sfruttare direttamente la forma del case per la produzione del grano propellente.
- *L'estrusione (cartridge-loaded)*, in cui viene ricavato l'intero grano propellente attraverso la lavorazione di un volume dello stesso materiale ma di dimensioni maggiori rispetto a quelle necessarie, andando ad utilizzare enormi presse e macchinari costosi; tale tipo di lavorazione pone dei limiti alla grandezza del grano che si può ottenere e richiede che il propellente sia abbastanza duttile per potersi sottoporre a tali trattamenti. Solitamente è un sistema produttivo utilizzato in campo militare per la produzione delle munizioni o razzi di piccolo taglio.

¹ Con il termine reologia si definisce la disciplina che studia lo scorrimento e la deformazione dei materiali in seguito all'azione di una forza ed in relazione alla sua intensità, durata di applicazione e velocità di applicazione.

² In questo caso si definisce a cartuccia.

Il riempimento del case dei motori, può avvenire mediante differenti metodologie:

- *Colaggio nel vuoto (vacuum casting)*, che risulta essere la più utilizzata per il processo di riempimento dei grandi motori a solido. Nel complesso l'apparato per questa tipologia di colaggio non differisce enormemente dal colaggio in pressione, come verrà presentato successivamente, ad eccezione del fatto che il case viene inserito all'interno di una camera in cui viene generato il vuoto, mentre il serbatoio risulta essere a pressione ambiente. La differenza di pressione tra i due ambienti permette al propellente di essere colato all'interno della camera di combustione ed il flusso del fluido viene regolato mediante una valvola posta sopra il serbatoio. Il grande vantaggio di questa tipologia di colaggio, è quella di ridurre drasticamente le difettosità interne al grano relative alla creazione di microvuoti, dato che, una volta terminata l'operazione di colaggio, il serbatoio viene riportato alla pressione ambiente facendo collassare le eventuali bolle d'aria formatasi all'interno del grain.

Per via dei vantaggi citati l'azienda AVIO s.p.a., utilizza tale metodologia di riempimento dei motori.

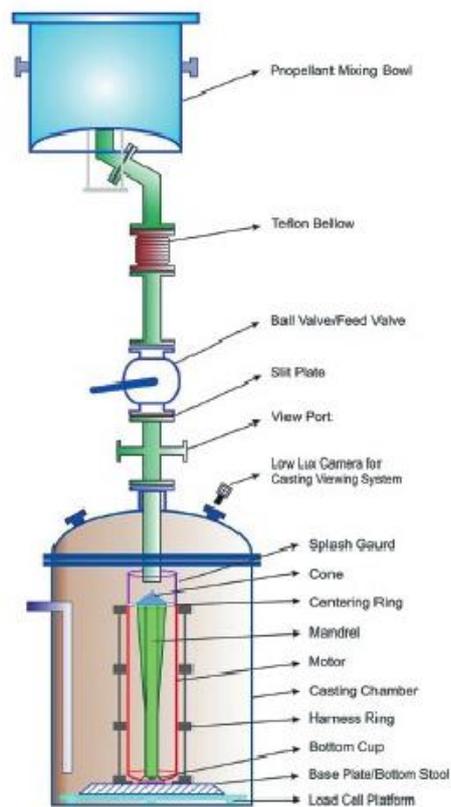


Figura 3.4: Apparato per il colaggio nel vuoto

- *Colaggio a baionetta (bayonet casting)*, viene applicato per lo più in motori di piccole dimensione, per esempio per applicazioni missilistiche, e raramente nel caso di riempimento di booster a propellente solido. Il motivo principale per cui questa tipologia di riempimento non viene utilizzata per motori di grandi dimensioni, ma solo per quelli piccoli, è relativa al fatto che questo processo si utilizzano propellenti con bassa viscosità e con lunghi tempi di reticolazione.

L'impianto di tale colaggio è costituito da un serbatoio riempito di propellente, da un pistone che comprime il fluido e che lo spinge attraverso un tubo, chiamato appunto "baionetta", inserito all'interno del motore e che viene tirato su a man mano che il motore viene riempito.

Questa tecnica, rispetto alla precedente, lascia dei vuoti all'interno del propellente causando, in fase di lancio, delle anomalie di combustione tali da portare anche ad eventuali esplosioni.

Tuttavia quello mostrato in figura viene applicato solamente a motori in cui l'inserimento della spina avviene successivamente alla fase di colaggio. Fermo restando la verosimiglianza con gli apparati dedicati ai motori con il mandrino già in posizione, l'unica variazione, in questo caso, è la mancanza del piano di formazione.

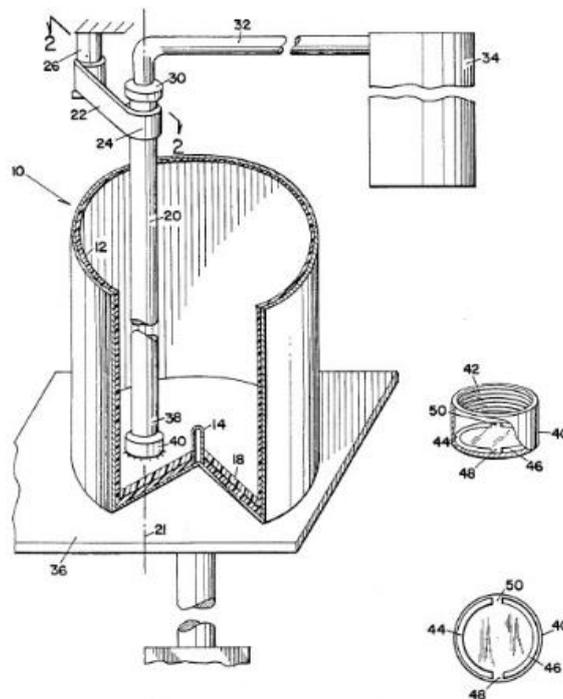


Figura 3.5: Apparato per il colaggio a baionetta

- *Colaggio in pressione (pressure casting)*, insieme a quello a vuoto, è una delle metodologie di riempimento più utilizzate per il riempimento di booster di grandi dimensioni.

L'apparato, illustrato nella figura sottostante, è costituito da un serbatoio riempito di propellente a cui viene connesso un tubo per il trasferimento del grain all'interno del motore. Il propellente all'interno del serbatoio viene spinto nel case attraverso un pistone idraulico o attraverso una pressurizzazione con un gas inerte, come per esempio l'azoto. Il flusso di propellente viene regolato attraverso una valvola posta al di sotto del serbatoio. La configurazione più comune non è quella riportata in figura, poiché solitamente il propellente viene colato dall'alto.

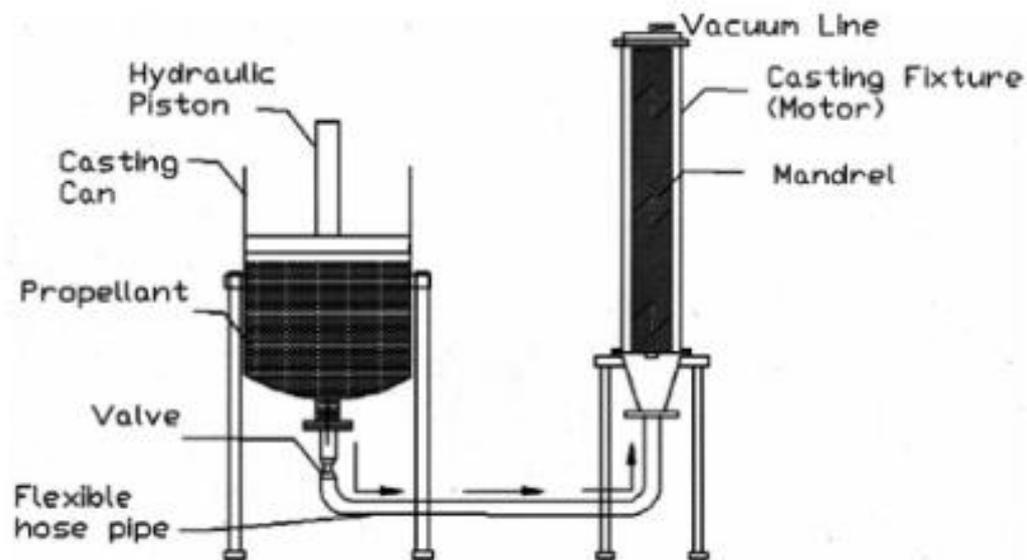


Figura 3.6: Apparato per il colaggio in pressione tramite pistone

Il riempimento del case per il metodo di colaggio, in particolar modo, può essere effettuato con differenti metodologie, ma quelle che andremo a prendere in considerazione sono:

- Il riempimento per colaggio ottenuto con il posizionamento di una spina centrale posta all'interno del motore a razzo (*Cast in place mandrel*), in cui il propellente viene colato mediante l'utilizzo di 27 bocche del diametro di 7 mm utilizzando uno stampo con cavità anulare.

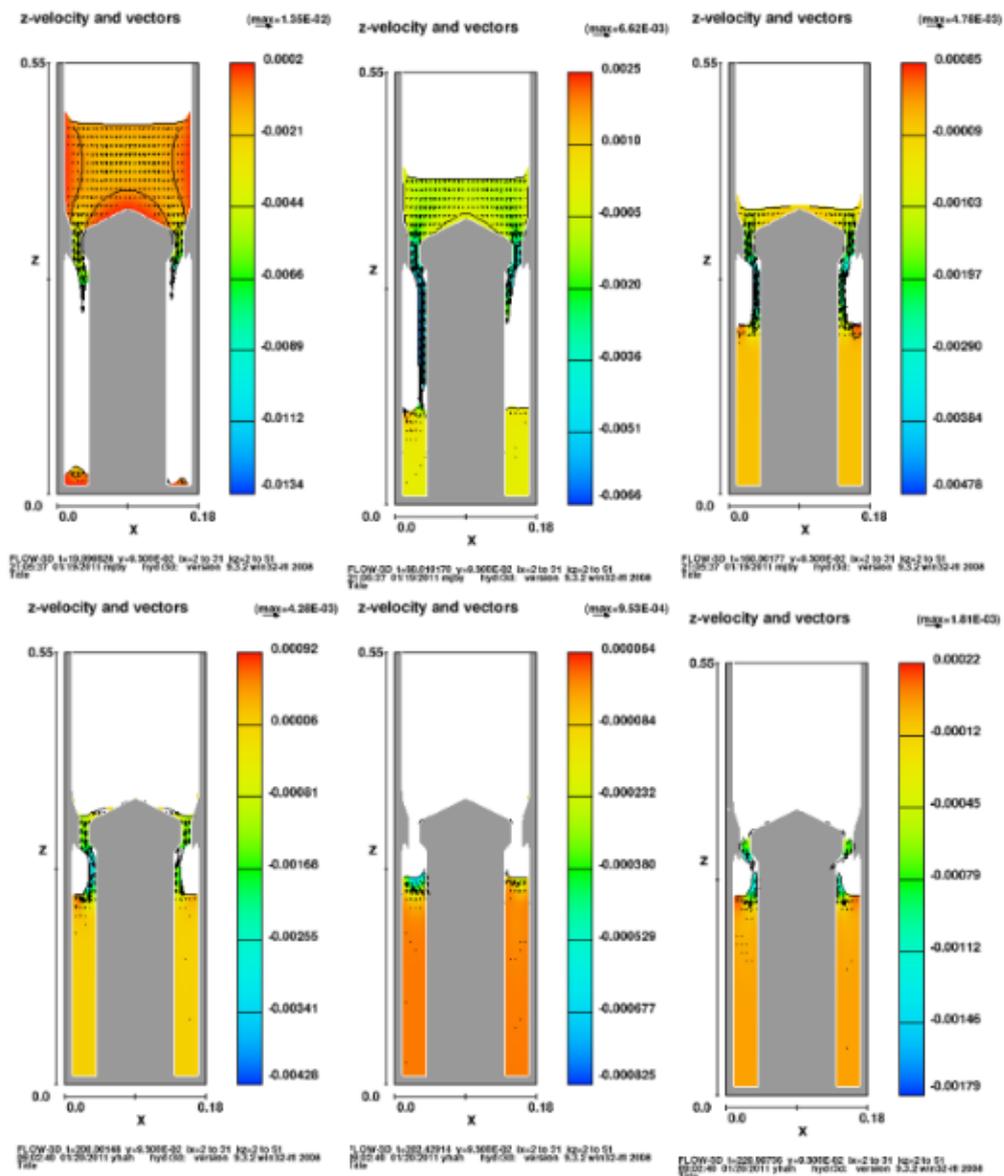


Figura 3.7: Simulazione del processo di colaggio con spina centrale all'interno della BARIA

- Il riempimento ottenuto tramite punzonatura (*Plunged mandrel*), è una metodologia che prevede anzitutto il processo di versamento del propellente all'interno dello stampo con sezione circolare. Successivamente avviene l'introduzione della spina centrale avente raggio di 50mm per effetto gravitazionale per poi essere spinta, attraverso il contributo dato da un pistone idraulico, fino alla parete inferiore della BARIA e posizionata in maniera concorde all'asse di essa. Anche se questo provoca un piccolo spostamento della spina centrale, il propellente ha modo di insediarsi all'interno della cavità ad anello ottenendo la forma del propellente desiderata.

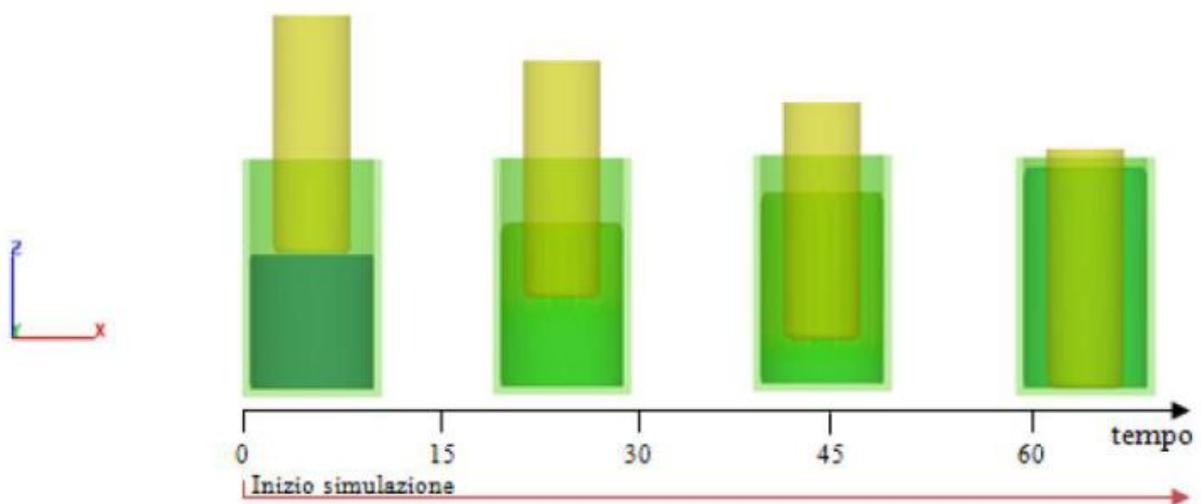


Figura 3.8: Simulazione del processo di punzonatura all'interno della BARIA

CAPITOLO 4

L'EFFETTO DI HUMP ED IL RATEO DI COMBUSTIONE

*“La logica vi porterà da A a B,
ma l’immaginazione vi porterà ovunque”*

Albert Einstein

4.1: Introduzione all’effetto di hump

Numerosi sono i fattori che nella realtà possono intervenire ed alterare il rateo di combustione, e conseguentemente la prestazione propulsiva. Tali anomalie vengono modellate attraverso l’introduzione di relazioni semi-empiriche che prendono il nome di funzioni di *HUMP* o *BARF* all’interno dei simulatori balistici. Tali relazioni costituiscono un tentativo di compensare lo scostamento esistente tra l’andamento teorico del profilo di pressione e quello ottenuto per via sperimentale, senza però di fatto riuscire a capire la natura fisica del fenomeno che sta alla base. Infatti i tradizionali parametri con cui viene caratterizzata la prestazione di un propellente, ossia attraverso la legge di Vieille:

$$r = aP_0^n$$

dove:

- r rappresenta il rateo di combustione, ossia la velocità di combustione delle superfici del grain, misurata in m/s
- P_0 rappresenta la pressione all’interno della camera di combustione, misurata in kPa, o in bar
- a ed n sono parametri caratteristici del propellente che si utilizza. In particolare il primo risulta essere funzione della temperatura e dell’umidità e va a caratterizzare il decadimento del potenziale energetico del propellente con il passare del tempo.

Il secondo, anch'esso elemento caratterizzante del propellente, ci permette di capire se esso ha un comportamento da esplosivo o meno a seconda che tale valore sia rispettivamente maggiore di 1 o minore di 1.

Quindi possiamo capire, come i parametri tradizionali non tengano minimamente in considerazione le inevitabili eterogeneità del rateo di combustione, che possono originarsi a seguito del processo di riempimento del motore.

Quest'ultimi sono ulteriormente aggravati nei motori di grandi dimensioni per via delle modalità di colaggio multi-batch, con il quale vengono costruiti. In tali casi il processo intero di colaggio viene infatti suddiviso in fasi intermedie, in ciascuna delle quali viene riempita una certa frazione del motore. Per quanto in fase di produzione si tenti di uniformare il processo di fabbricazione e lavorazione degli impasti, le variabili in gioco sono molte (temperatura, umidità, tempo di lavorazione, dosaggio, etc) e ciò comporta che ciascun impasto evidenzia delle proprie caratteristiche balistiche. Solitamente, nel calcolo dei parametri balistici, di tali diversità non viene tenuto conto, ma viene applicata una procedura di best-fitting sui dati sperimentali nel loro insieme.

Dallo studio di differenti articoli si evince come le cause dei discostamenti tra profili teorici e sperimentali delle pressioni possano essere diverse e non è quindi possibile capire facilmente quale sia quella predominante nella generazione delle anisotropie di combustione. Di seguito vengono riportate le differenti ipotesi che possano creare queste anisotropie, le quali verranno approfondite nel corso del capitolo:

- *L'orientamento delle particelle all'interno del grain*
- *La segregazione particellare*
- *Separazione tra le fasi*

4.2: L'orientazione delle particelle all'interno del grain

La prima di queste ipotesi è quella relativa all'orientamento del particolato all'interno del propellente solido. Infatti, tramite analisi condotte ai raggi X su diversi campioni di propellenti, diversi gruppi di ricerca hanno notato una correlazione tra il rateo di combustione e l'orientamento interno delle particelle di Alluminio (Al) e Perclorato di Ammonio (AP).

Andiamo dunque a considerare, come esempio iniziale, il flusso in una condotta di Poiseuille supponendo che contenga particelle che si muovono all'interno del fluido e che esse abbiano forma ellittica. La rotazione che ogni singola particella avrà all'interno del fluido, come si suppone avvenga all'interno del nostro fluido in caduta, è costituito dalla sovrapposizione degli effetti di due studi della rotazione della particella:

- Il primo riguarderà uno studio molto semplice di una singola particella isolata, in cui essa presenta la capacità di ruotare fino a raggiungere uno stato di equilibrio finale. Infatti la forma ellittica della particella determina che su essa agisca un momento torcente, che tende a diminuire mano mano che essa tende a disporre la parte allungata del corpo nella direzione del flusso stesso.
- Il secondo riguarda l'effetto ritardante sulla rotazione stessa della singola particella dato dalle particelle nelle posizioni adiacenti ad essa. Infatti all'interno dei sistemi multi-particellari modifica l'angolo di rotazione, ma la tendenza delle particelle è sempre quella di orientarsi lungo la direzione del flusso.

Andando nel dettaglio, definiamo gli angoli Θ_z e Θ_r , rispettivamente come:

- l'angolo tra l'asse di simmetria della BARIA e la direzione della particella nella parte allungata del suo corpo
- l'angolo tra la direzione radiale e la direzione della particella nella parte allungata del suo corpo

Nella figura sottostante vengono riportate, graficamente, le definizioni appena fornite.

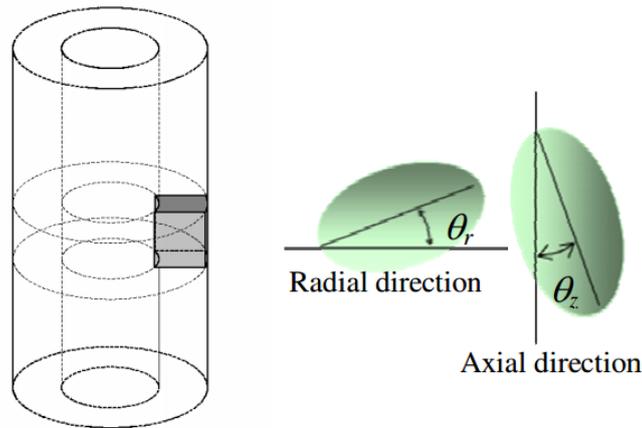


Figura 4.1: Definizione angolo direzione radiale ed angolo direzione assiale

Un primo elemento che può fornire una spiegazione del fatto che l'orientazione determina una variazione del rateo di combustione, lo si può ottenere immaginando la particella come corpo conduttivo. Infatti nel momento in cui essa offra al fronte di fiamma la direzione in cui è maggiormente allungata, la particella non sarà in grado di trasferire calore in profondità, andando dunque ad interagire con una quantità minore di grain determinando un abbassamento locale della velocità di combustione.

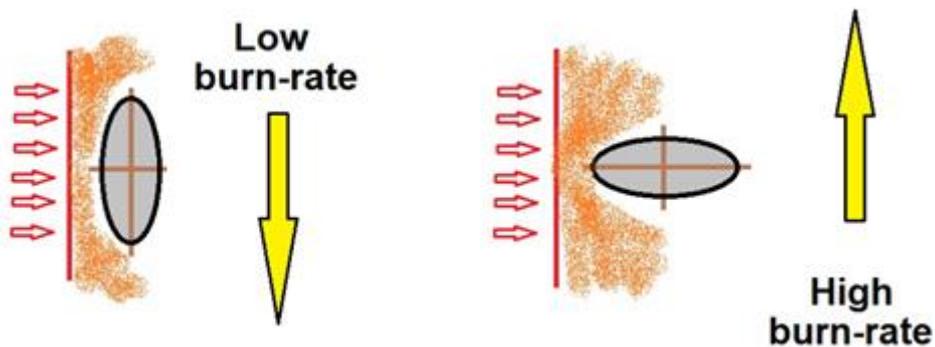


Figura 4.2: Burn-rate in relazione all'orientamento della particella

Quindi, come mostrato nella figura soprastante, quando la particella presenta una direzione allungata in direzione ortogonale al fronte di fiamma, il rateo di combustione locale tenderà a diminuire, mentre quando esso presenta la direzione allungata nella stessa direzione del fronte

di fiamma, avremo che il calore coinvolgerà una quantità maggiore di grain scaldandolo in profondità, e conseguentemente aumentando localmente il rateo di combustione.

Di seguito vengono esposti i risultati degli studi, condotti da T. Shimada ed il suo gruppo di ricerca, in cui vengono mostrate le correlazioni tra il rateo di combustione e l'angolo della particella rispetto alla direzione radiale, ossia rispetto Θ_r , e del rateo di combustione e l'angolo della particella rispetto alla direzione assiale, ossia rispetto Θ_z .

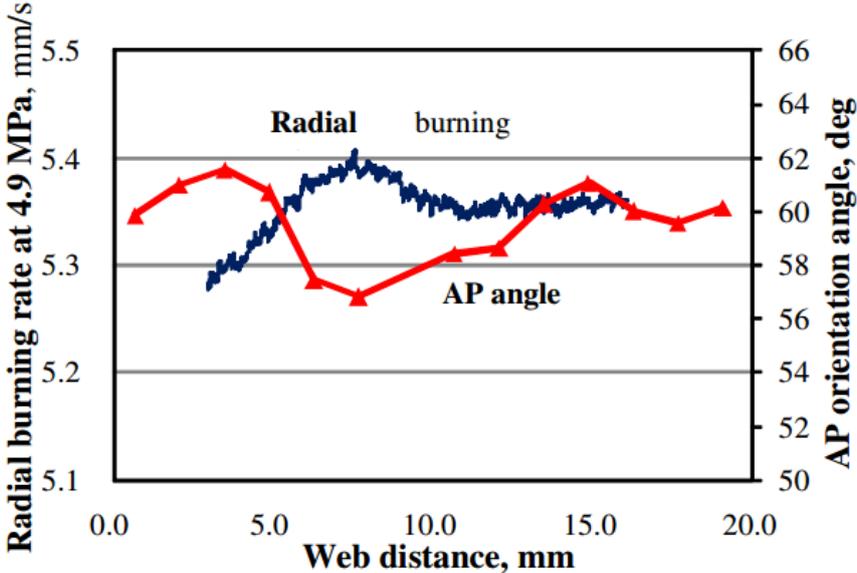


Figura 4.3: Correlazione tra il rateo di combustione e l'angolo della particella rispetto alla direzione radiale

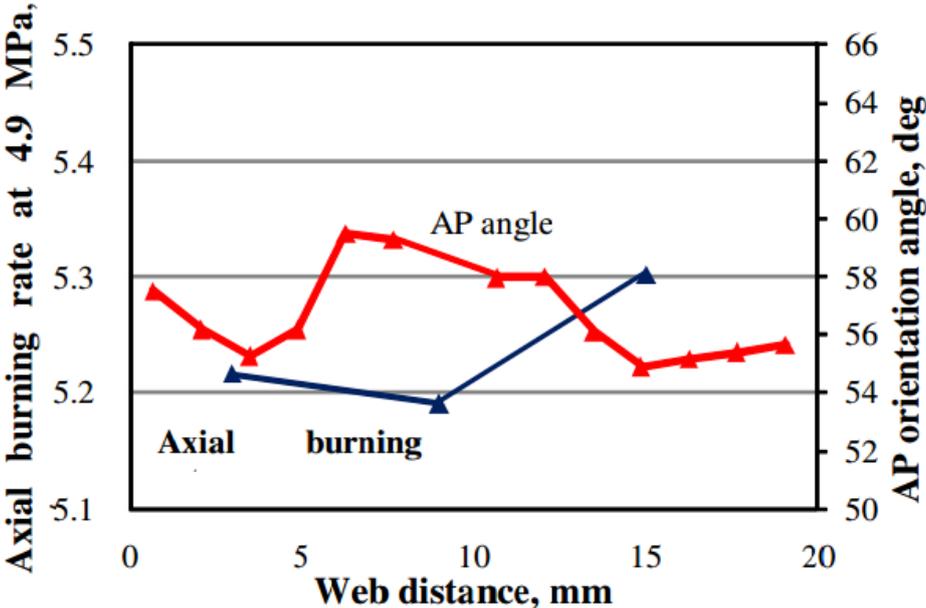


Figura 4.4: Correlazione tra rateo di combustione di combustione e l'angolo della particella in direzione assiale

Un'ulteriore prova di questa correlazione la si riscontra in un altro articolo, in cui sono state condotte delle simulazioni numeriche DNS con il fine di poter studiare la combustione del propellente composito, facendo particolare attenzione all'analisi dell'orientamento delle particelle sulla combustione stessa.

Le simulazioni fatte hanno considerato un campione virtuale di propellente composito, composto dall'80% di Perclorato di Ammonio (AP) e dal 20% di Polibutadine (HTPB), supponendo inoltre che le particelle di AP avessero forma di sferoide prolato. In particolare il AP preso in considerazione sarà di tipo bimodale, ossia sarà composto da particelle con due tipologie di diametri equivalenti³, di 200 e 15 μm , e con differenti disposizioni di propellente all'interno del grain e per differenti valori di *aspect ratio* β ⁴.

La simulazione ha visto coinvolte tre differenti tipologie di impacchettamento delle particelle di cui due ordinate ed una randomica, come riportato di seguito.

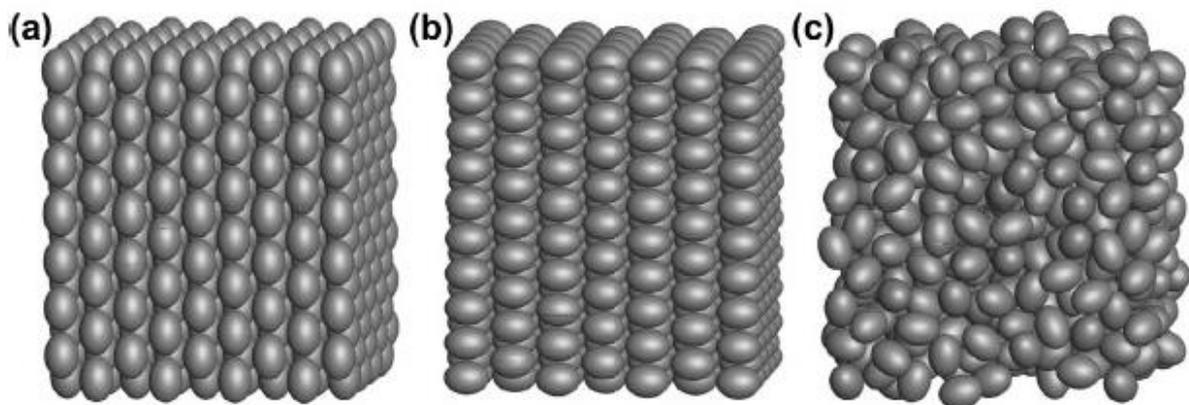


Figura 4.5: Disposizione delle particelle all'interno del propellente solido ($\beta = 1, 3$) dove si ha (a) Ordered (Standing) (b) Ordered (Lying) (c) Random

I risultati ottenuti da tali simulazioni mostrano come l'orientazione di tali particelle, ed il loro *aspect ratio*, vadano ad influire sul rateo di combustione e confermino lo studio svolto da Shimada. Infatti una disposizione di particelle con la parte allungata in direzione parallela al fronte di fiamma, elemento (a), generano un innalzamento locale del rateo di combustione, mentre nel caso in cui la parte allungata fosse in direzione ortogonale alla direzione del fronte di fiamma il rateo di combustione tenderà a diminuire localmente.

³ Si definisce diametro equivalente il diametro della sfera avente un volume pari alla particella ellissoidale

⁴ Si definisce *aspect ratio* il rapporto tra il semiasse maggiore ed il semiasse minore dello sferoide

Nella figure sottostante viene riportato il rateo di combustione in funzione di valori di *aspect ratio* moderati.

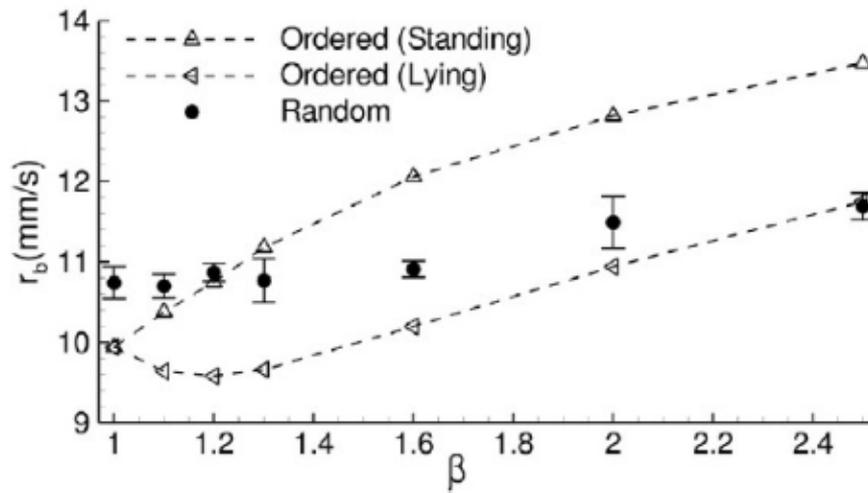


Figura 4.6: Rateo medio di combustione per le tre disposizioni (a,b,c) al variare del parametro β

Quindi, nel grafico soprastante, possiamo notare come tenda a variare il rateo di combustione in funzione della disposizione delle particelle. In particolare per una disposizione randomica, e per valori moderati di β , il rateo di quest'ultimo si mantenga prevalentemente costante.

Un elemento che influirà sull'effetto di Hump, sarà come le particelle sono orientate rispetto al fronte di fiamma. Perciò il rateo di combustione sarà minimo quando l'angolo, che la direzione della particella forma con la direzione ortogonale al fronte di fiamma, sarà 0° , mentre possiamo supporre massimo il rateo di combustione quando tale angolo sarà di 90° .

4.3: La segregazione particellare

La seconda ipotesi legabile all'effetto di Hump, e sulla quale alcuni autori e ricercatori concordano, è che alla base di tale effetto, ci sia il fenomeno della *segregazione particellare*⁵ tra particelle grandi e piccole all'interno del grain.

Infatti, al fine di evitare spazi vuoti all'interno del polibutadine, le particelle di alluminio e di perclorato di ammonio presentano differenti dimensioni in maniera da poter riempire ogni interstizio tra particelle grandi, come riportato nell'immagine di seguito.

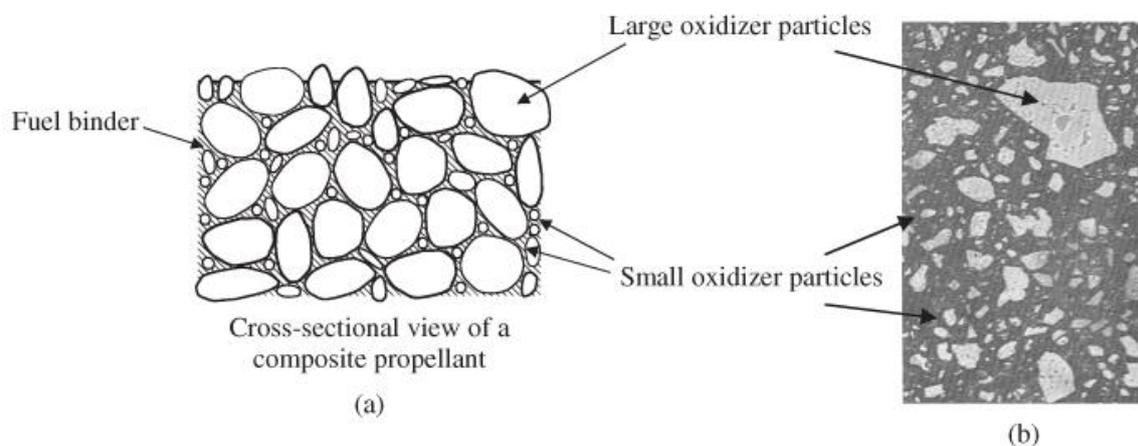


Figura 4.7: (a) Sezione di un propellente composito, (b) fotografia del propellente solido dall'alto di un propellente solido composito

In particolare numerosi esperimenti condotti su flussi canonici, hanno messo in evidenza un'importante correlazione tra lo shear-stress e un effetto di migrazione differenziale connessa con le dimensioni del particolato.

Mediante le differenti metodologie utilizzate per il riempimento del motore si è concluso che:

1. Le particelle fini hanno possibilità di muoversi tra gli interstizi presenti tra le particelle di dimensioni maggiori
2. Le bolle, presenti già all'interno del propellente a seguito del riempimento, tendono ad insediarsi in specifiche zone, con conseguente variazione del rateo di combustione a livello locale.

⁵ Si definisce *segregazione particellare* la tendenza delle singole particelle a muoversi in differenti posizioni all'interno di un unico particolato dovuto a differenti proprietà delle particelle, come la dimensione, la densità, la forma e l'elasticità.

Verranno presentati in particolare i casi della segregazione relativi ai metodi di riempimento della BARIA presentati alla fine del capitolo precedente, ossia tramite colaggio in cui l'inserimento del grain avviene per caduta gravitazionale, e tramite punzonatura, in cui andremo a considerare lo studio di un flusso di Couette tra due superfici piane.

Il primo meccanismo di segregazione che abbiamo considerato, coinvolge le particelle solide in una condizione gravitazionale, in quanto vengono colate all'interno della BARIA.

Lo svolgimento di prove sperimentali, da parte dei ricercatori, per la verifica della segregazione particella sotto la condizione gravitazionale, ha visto l'utilizzo di un contenitore all'interno del quale veniva versata una miscela binaria preparata in diverse porzioni percentuali di grani fini e grani grossi. L'immagine riportata di seguito mostra il contenitore utilizzato per le sperimentazioni della segregazione particellare.

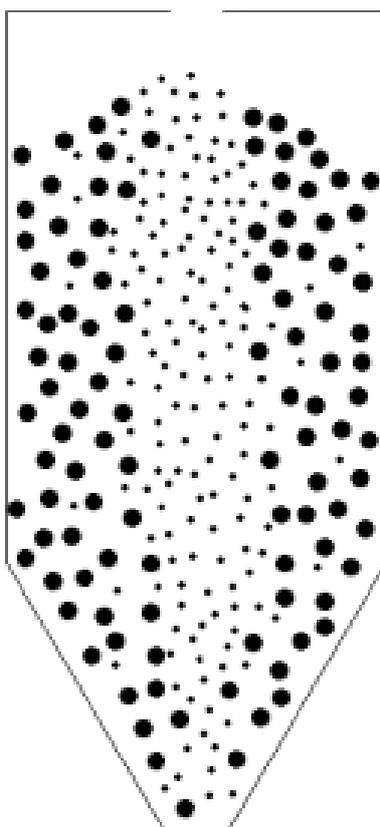


Figura 4.8: Schema del contenitore utilizzato per i test di segregazione particellare

In particolare la ricerca condotta da Mosby et al. definisce tale fenomeno con il termine di *heap segregation*, o segregazione a cumulo, che viene spesso descritta come una forma di segregazione in cui si ha una combinazione di diversi meccanismi di segregazione che interagiscono tra loro. Questi meccanismi sono:

- Il *sifting*, o filtraggio. Questo meccanismo è uno delle cause più comuni della segregazione. Infatti quando le particelle di differenti dimensioni vengono versati all'interno di un contenitore, le particelle più fini tendono a concentrarsi maggiormente sotto il punto di colata e possono filtrare attraverso gli interstizi creati dalle particelle di dimensioni maggiori. Quelle più grandi tendono a disporsi sui bordi del contenitore, come mostrato nella figura 4.9. Questo fenomeno risulta maggiormente evidente quando le particelle nel contenitore presentano un rapporto tra le dimensioni reciproche almeno di tre a uno.
- Il *filtraggio di aria* all'interno del particolato determina una inversione della disposizione delle particelle. In altre parole nel caso di infiltrazioni di aria avremo che le particelle fini tenderanno a disporsi verso l'esterno, quindi più a contatto con le pareti del contenitore, mentre quelle di dimensioni maggiori tenderanno a rimanere al centro, sotto il punto di colata, come mostrato nella figura sottostante.

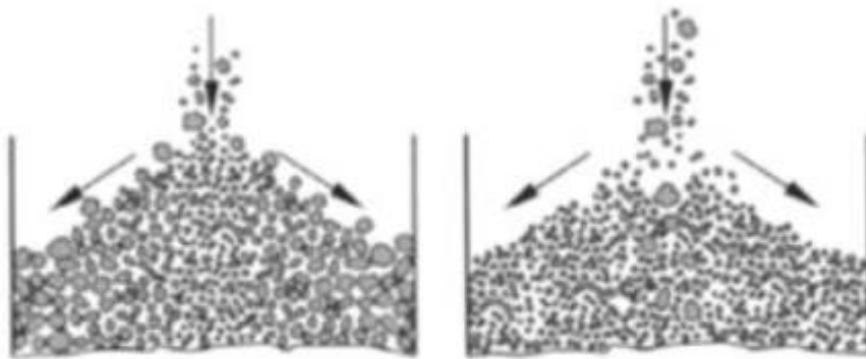


Figura 4.9: Segregazione particellare nel caso di *sifting* e *rolling* a sinistra, e per filtrazione di aria a destra

- Il *repose angle*, o angolo di riposo delle particelle legato al fenomeno, non trascurabile, che l'attrito delle particelle esercitano l'una sull'altra e che incide fortemente sui meccanismi di segregazione radiale. Ad ogni materiale ed in base al fatto che le particelle di un medesimo materiale siano più fini o meno, si associano

differenti angoli di riposo come riportato nell'immagine sottostante, che mostra la definizione di angolo di riposo e come esso vari per differenti elementi.

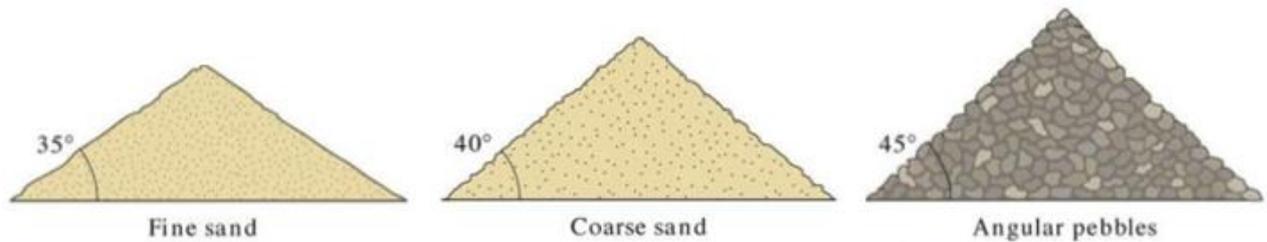


Figura 4.10: Angoli di riposo per differenti materiali

In particolare considerando una miscela di due differenti materiali, viene calcolata la differenza fra i due angoli di riposo dei materiali. Se tale differenza angolare fosse superiore a 2° , si manifesta un intenso fenomeno di segregazione, anche se non vi è una forte diversità sulle dimensioni dei materiali coinvolti, che come detto è di 3 a 1. Di seguito viene riportata un immagine che mostra proprio questo fenomeno di segregazione.

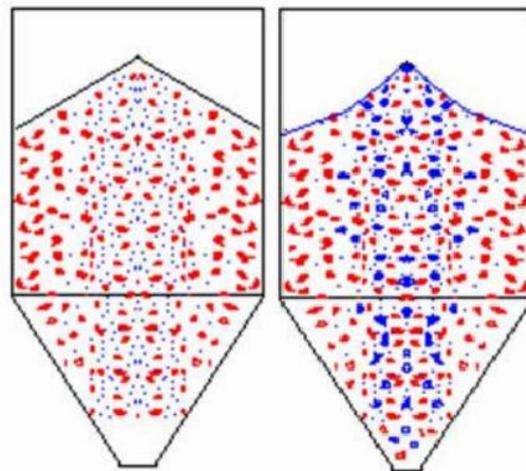


Figura 4.11: Variazione dell'angolo di riposo nel caso in cui la differenza angolare dei materiali sia minore di 2° (a sinistra) e di 2° (a destra)

- Il *trajectory effects*, o effetto della traiettoria, che si manifesta quando viene predisposto un piano inclinato sul quale scivolano le particelle che formano l'ammasso e quindi al variare del materiale e della massa del grano, si associa un certo attrito che comporta diverse velocità di movimento. Infatti le particelle fini presentano

maggiore resistenza rispetto a quelle grandi e di conseguenza aventi una velocità minore rispetto a quelle grandi. Questo determina un posizionamento delle particelle fini in prossimità del piano, mentre quelle grandi avranno un posizionamento distante dal piano, come riportato nell'immagine sottostante.

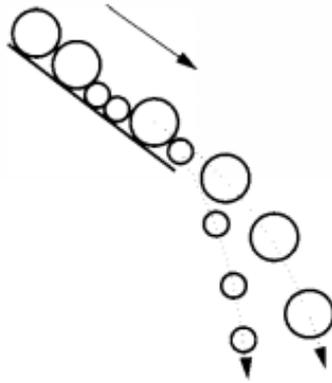


Figura 4.12: Effetto della traiettoria sulla segregazione particellare

- La *fluidification effect*, o effetto di fluidificazione si verifica nella segregazione verticale. Questo effetto descrive che i grani spessi tendano a depositarsi sul fondo del recipiente, mentre quelli fini formano uno strato nella parte superiore.
- *Dynamic effects*, o effetti dinamici. Quest'ultimo effetto spiega come l'elasticità della particella possa modificare l'addensamento particellare nei dintorni del punto di colata. In altre parole questo effetto della segregazione spiega come l'elasticità vada a modificare l'addensamento, in quanto se una particella urta la sommità della pila viene a generarsi una superficie piatta. La particella si posiziona sulla superficie se non possiede sufficiente elasticità, mentre, in caso contrario si andrà a depositare all'estremità del cumulo.

Il secondo meccanismo di segregazione preso in considerazione rappresenta il caso della punzonatura, in cui le particelle sono soggette al campo tensionale definito da Couette.

Gli esperimenti condotti sono stati di due tipologie:

- Nella prima tipologia vediamo una prova sperimentale in cui sono presenti due cilindri coassiali, di cui uno posto in rotazione ed il secondo fisso.

- Nella seconda tipologia, che risulta essere anche la più interessante per noi, la prova sperimentale viene svolta andando a movimentare due pareti parallele, le quali si muovono con una velocità costante in versi opposti.

Nella prima tipologia si è riscontrato che per un fluido monomodale, le particelle tendano ad addensarsi nelle zone con un shear stress basso, mentre per un flusso bimodale la movimentazione in tali zone risulta essere maggiore per le particelle di dimensioni maggiori rispetto a quelle di dimensioni minori.

Nella seconda tipologia il campo di moto presenta una velocità che tende a variare in maniera costante da una parete fino all'altra, ma al suo interno viene generato uno stato tensionale che costante non è. In questo caso, il comportamento del flusso di particelle è determinato da un insieme di fattori come:

- la capacità delle pareti di trasmettere il moto alle particelle
- le proprietà delle particelle in gioco, come l'attrito della superficie, la forma, la dimensione e la densità delle particelle
- la distanza tra le pareti
- l'effettivo valore del rateo di tensione.

Le simulazioni svolte da Liu e Rosato prevedevano un dominio computazionale definito da un volume di controllo rettangolare con una condizione periodica su ogni lato ed in cui le particelle all'interno del dominio possedevano grandezze monodimensionali. Esse venivano rappresentate tramite delle sfere di vetro e di mezze sfere in prossimità della parete, soggette al solo campo tensionale. La condizione iniziale prevedeva che le particelle venissero inserite in modo del tutto randomico, ma tali da soddisfare la condizione di *frazione solida*⁶ media scelta. Andando a verificare il moto di una particella di diametro piccolo d e di una particella di diametro più grande D , esterne dalla regione centrale, l'analisi dei risultati ha messo in mostra come, le particelle di dimensioni maggiori tendano ad accentrarsi rimanendo intrappolate nella zona centrale del canale. Questo risultato è maggiormente evidente man mano che il rapporto tra le dimensioni delle due particelle, definito come $\Phi = D/d$, tende ad aumentare.

⁶ Si definisce *frazione solida* il rapporto tra il volume occupato dalle particelle ed il volume disponibile all'interno del volume di controllo del fluido

Di seguito viene riportato l'insieme di grafici che mostrano come all'aumentare della dimensione le particelle più grandi tendano ad addensarsi verso la zona centrale. In particolare i grafici riportati sono adimensionalizzati in maniera tale che, in ordinata il termine 0 rappresenta la parete interna, mentre il termine 1 rappresenta la parete esterna

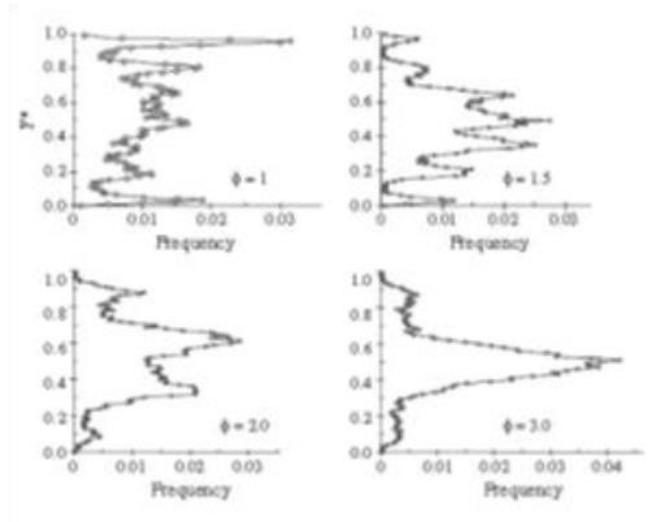


Figura 4.13: Addensamento delle particelle nella zona centrale al variare del rapporto delle dimensioni delle particelle

Il tempo in cui queste particelle tendano a raggiungere la zona centrale, dipende sia dalla variabile Φ , sia dalla velocità con cui le pareti si muovono ed indicata con U .

Di seguito viene riportato il grafico che mostra proprio la correlazione temporale al variare della velocità U e del rapporto Φ .

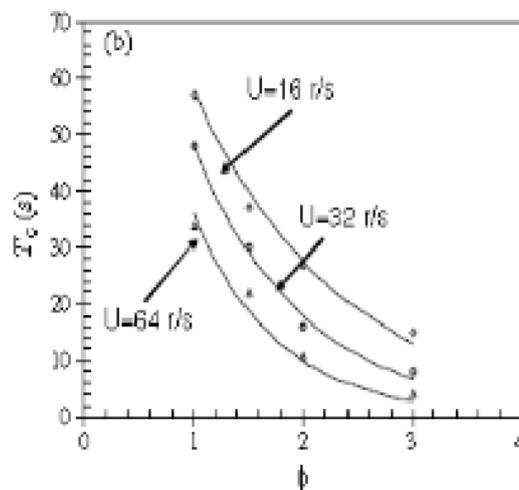


Figura 4.14: Tempo impiegato dalle particelle per raggiungere la mezzeria del canale in funzione della velocità e del rapporto delle dimensioni delle particelle

Dal grafico riportato nella pagina precedente in basso, possiamo notare come, per un valore costante di Φ il tempo con cui le particelle tendono ad accentrarsi diminuisca man mano che la velocità delle pareti aumenta, mentre considerando una velocità costante, si nota come all'aumentare del rapporto Φ il tempo di accentrimento tenda a diminuire.

Il modello di migrazione può essere interpretato matematicamente come una diffusione locale, in cui il flusso netto è la somma di due flussi parziali sempre connessi allo shear-stress all'interno del particolato.

Il primo effetto è dovuto al gradiente della frequenza delle collisioni tra il particolato e dunque allo shear-rate:

$$N_c = -K_c \phi a^2 \nabla(\dot{\gamma} \phi)$$

L'altro dovuto al gradiente di viscosità:

$$N_\eta = -K_\eta a^2 \frac{\dot{\gamma} \phi^2}{\eta(\phi)} \nabla[\eta(\phi)]$$

Dove:

“a” rappresenta il diametro della particella

$\dot{\gamma}$ è lo shear-rate

ϕ è la frazione volumetrica di fase solida

$\eta(\phi)$ è la viscosità della sospensione intesa come funzione della frazione solida

K_c e K_η sono due costanti sperimentali

Per modellare la variazione di viscosità indotta dalla variazione di concentrazione si fa riferimento al modello di Krieger, riassumibile tramite la relazione:

$$\eta = \eta_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$$

Dove:

η rappresenta la viscosità intrinseca della sospensione, definita come: $[\eta] = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_s}{\phi \eta_s}$

ϕ_m rappresenta la frazione volumetrica di fase solida in corrispondenza del massimo impacchettamento

η_s è la viscosità relativa alla sola fase liquida

Dalle relazioni presentate, si nota come il flusso particellare, e quindi la mobilità delle particelle, sia funzione di proporzionalità diretta con le dimensioni delle particelle stesse. Questo spiega perché la tendenza del particolato a migrare nelle zone a basso shear-stress, abbia tendenza più marcata nelle particelle di grandi dimensioni.

Quest'ultima si ripercuote sul rateo di combustione, come dimostrato dagli studi condotti da W.Cai et al., su due diverse formulazioni di propellente, in cui le particelle di perclorato di ammonio presentano differenti dimensioni. In particolar modo per particelle piccole, la velocità di combustione dimostra un tendenziale incremento relativamente a quelle con dimensioni maggiori, come riportato dai grafici della distribuzione del calore riportati di seguito.

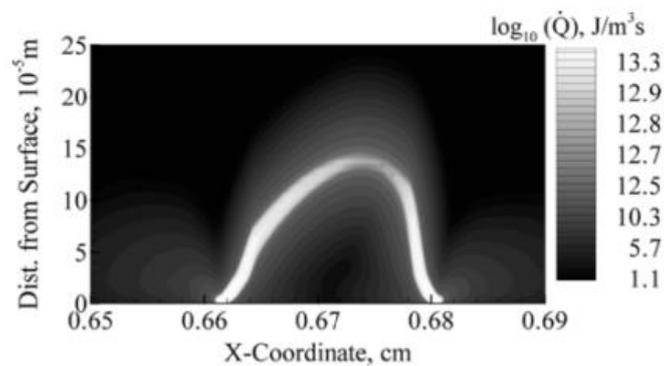


Figura 4.15: Distribuzione del rateo di calore ($p=100\text{atm}$, AP/HTPB: 70/30 e $d_{ap} = 200\mu\text{m}$)

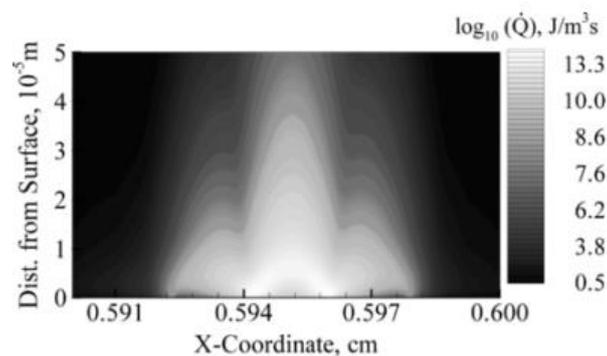


Figura 4.16: Distribuzione del rateo di calore ($p=100\text{atm}$, AP/HTPB: 70/30 e $d_{ap} = 20\mu\text{m}$)

Dai grafici riportati nella pagina precedente, possiamo notare come per particelle grandi il rateo di calore sia meno distribuito e più basso rispetto a quello delle particelle più piccole andando a diminuire di conseguenza il rateo di combustione.

4.4: La separazione tra le fasi

In letteratura sono presenti molti studi volti ad indagare un ulteriore effetto che genera delle anisotropie sul rateo di combustione. Nell'ambito di ricerca viene fatto riferimento molto spesso ad una "organizzazione" interna del flusso a strati, definita anche *layer model*, *casting striation*, *rainbow effect* o *separazione tra le fasi liquida e solida*, in quanto generalmente la fase liquida rappresentata dal legante in genere mostra un minor potere combustivo rispetto alla fase solida.

Da analisi effettuate ai raggi X su campioni di propellente inerte, è emerso come vi sia localmente, soprattutto nelle vicinanze delle pareti e all'interfaccia tra le colate, un generale impoverimento del particolato. Uno degli studiosi che ha sviluppato la tesi della separazione delle fasi, G. Uhric, verificò tale fenomeno a seguito di una particolare tecnica di colaggio, in cui il motore veniva posto in rotazione durante il riempimento. Infatti durante il colaggio si identificò una stratificazione del propellente con conseguente formazione di strati in cui il propellente è ricco di legante e strati in cui vi è una maggiore concentrazione di perclorato di ammonio. Quindi è pratica comune legare questa morfologia delle stratificazioni, ed in particolare il loro angolo di inclinazione rispetto al fronte di fiamma, alla eterogeneità del rateo di combustione locale.

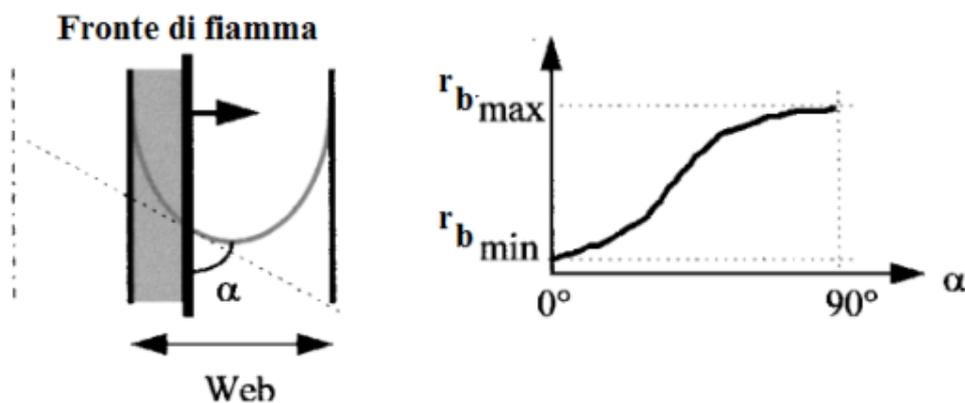


Figura 4.17: Interpretazione grafica della eterogeneità del rateo di combustione al variare dell'angolo delle stratificazioni rispetto al fronte di fiamma

Il motivo di ciò è legato al fatto che la fiamma incontra una maggiore percentuale di HTPB rispetto al perclorato. Quest'ipotesi era stata inizialmente formulata poiché colando il

propellente all'interno di un contenitore, sempre posto in rotazione, era emersa questa stratificazione del materiale colato, come riportato nelle immagini sottostanti.

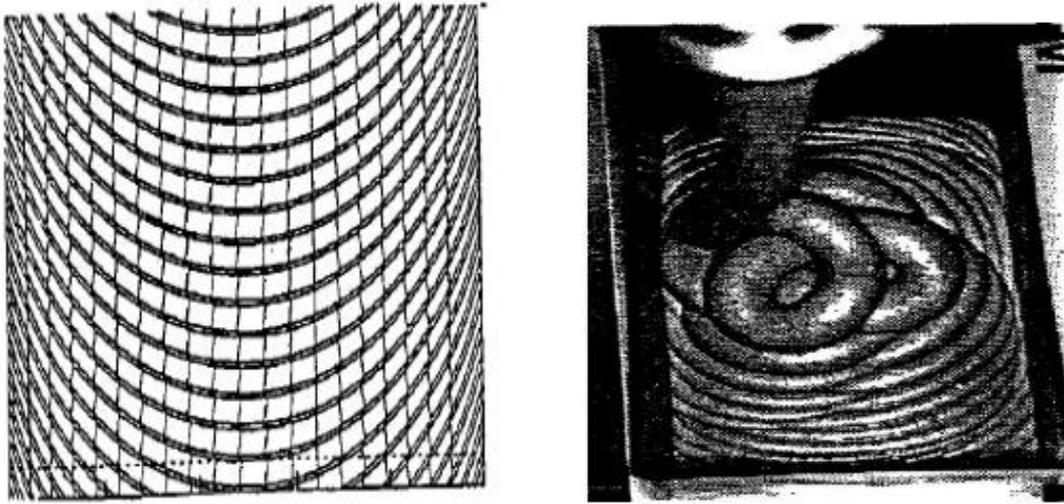


Figura 4.18: Ricostruzione grafica delle striature (figura a sinistra), vista dall'alto del processo di colaggio (figura a destra)

Il progetto di questa tesi si è però al momento focalizzato solamente sui due punti precedentemente enuncianti in quanto al momento il simulatore sviluppato presso il laboratorio Hangar di Forlì non prende in considerazione tale fenomeno di separazione delle fasi liquida e solida.

Di fatto allo stato attuale, nell'industria dei motori a propellente solido, il fenomeno di anomalia del rateo di combustione viene modellato attraverso funzioni ricavate per via sperimentale, che vanno a compensare lo scostamento tra i dati teorici e quelli ottenuti per via sperimentale. Tali relazioni analitiche, che verranno brevemente illustrate, non comprendono la natura fisica di questo fatto, ma modellano unicamente il rateo medio di combustione lungo la direzione radiale.

La prima relazione che andiamo ad illustrare descrive la pressione generata dai gas presenti nella camera di combustione:

$$p_0 = \left(\frac{(\rho_g - \rho_0) \cdot A_b \cdot a \cdot c^*}{A^*} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

La seconda relazione di tipo sperimentale che andiamo ad illustrare descrive il rateo di combustione e considera anche un fattore correttivo così da poter rappresentare un andamento del rateo teorico il più possibile vicino a quello sperimentale e di conseguenza un andamento delle pressioni in camera di combustione più realistico. Questa relazione sarà del tipo:

$$r_b = f_{comp} \cdot S.F. \cdot e^{\sigma(T_p - T_{ref})} \cdot (a \cdot p_0^n)$$

Dove il fattore correttivo, è rappresentato da:

$$f_{correttivo} = f_{comp} \cdot S.F. \cdot e^{\sigma(T_p - T_{ref})}$$

I termini all'interno delle due relazioni di tipo empirico assumono il seguente significato:

p_0 , misurata in Pascal [Pa], rappresenta la pressione in camera di combustione

ρ_0 , misurata in [Kg/m³], rappresenta la densità dei gas presenti nella camera di combustione

ρ_g , misurata in [Kg/m³], rappresenta la densità del grain

A_b , misurata in [m²], rappresenta la superficie di grain che sta bruciando nell'istante considerato

I termini "a" ed "n", che sono due coefficienti sperimentali

A^* , misurata in [m²], che è l'area di gola dell'ugello

c^* , misurata in [m/s], che è la velocità caratteristica del propellente

r_b , che rappresenta il rateo di combustione medio del propellente

"S.F.", che considera gli effetti del fattore di scala tra la baria ed il motore reale

T_p , misurata in [°C], è la temperatura di firing del propellente

T_{ref} , misurata in [°C], è una temperatura di riferimento

σ , misurata in [1/°C], è un parametro che identifica la sensibilità termica del propellente

f_{comp} è il fattore di compensazione precedentemente citato.

L'ultimo fattore che abbiamo citato è un fattore di tipo sperimentale. Esso viene ricavato andando a considerare l'andamento delle pressioni teorico in camera di combustione, ossia nel caso in cui il propellente bruci in maniera uniforme in tutti i punti, e viene indicato con

p_{th} , e con l'andamento delle pressioni misurato durante le prove sperimentali, che viene indicato con p_{re} . La prima relazione presentata all'interno del paragrafo può quindi essere scritta come:

$$p_{th} = (K \cdot a_{th})^{\frac{1}{1-n}}, \quad p_{re} = (K \cdot a_{re})^{\frac{1}{1-n}}$$

Dove:

$$K = \frac{\rho_g S_b c^*}{A^*}$$

a_{th} è il coefficiente teorico della legge di Vielle e viene ricavato attraverso un metodo opportuno di riduzione dei dati. Infatti se si considera la legge di Vielle, che lega rateo di combustione e pressione in camera di combustione, privati dei termini correttivi legati al fattore di scala, di Hump e della sensibilità termica. Ossia la legge di Vielle teorica sarà:

$$r_b = a_{th} p_0^{nth}$$

Quindi per poter calcolare il valore teorico di a e di n andiamo a misurare il valore del rateo di combustione medio (\bar{r}_b), come il rapporto tra lo spessore del web bruciato, diviso per il tempo che il provino impiega per bruciare completamente (t_b). Andiamo a calcolare il valore di pressione medio, definito come \bar{p}_0 , come rapporto tra l'integrale della pressione della prova eseguita e il tempo di combustione totale. Effettuando varie prove possiamo quindi ottenere una serie di coppie di pressione media e rateo medio, $\bar{p}_0 - \bar{r}_b$ così da poter ricavare i termini ignoti (a_{th} e n) per ricercare una soluzione nel senso dei minimi quadrati.

a_{re} si ottiene semplicemente come prodotto tra il valore di a teorico ed il termine correttivo che è costituito dai termini di fattore di scala, sensibilità termica e f_{comp} .

Il fattore f_{comp} possiamo ottenerlo andando a rapportare le equazioni di p_{0th} e p_{0re} e applicando a tale relazione la funzione di logaritmo, così da ottenere:

$$\frac{p_{0re}}{p_{0th}} = \frac{(K \cdot a_{0re})^{\frac{1}{1-n}}}{(K \cdot a_{0th})^{\frac{1}{1-n}}} \rightarrow \ln \left(1 + \left(\frac{p_{0re}}{p_{0th}} - 1 \right) \right) = \frac{1}{1-n} \ln \left(1 + \left(\frac{a_{0re}}{a_{0th}} - 1 \right) \right)$$

Sviluppando con la serie di Taylor l'espressione appena ricavata nella pagina in basso precedente, otteniamo:

$$\ln\left(1 + \left(\frac{p_{ore}}{p_{oth}} - 1\right)\right) = \frac{1}{1-n} \ln\left(1 + \left(\frac{a_{ore}}{a_{oth}} - 1\right)\right) \rightarrow \frac{p_{ore}}{p_{oth}} - 1 = \frac{1}{1-n} \cdot \left(\frac{a_{ore}}{a_{oth}} - 1\right)$$

Indicando con $f_{comp} = \frac{a_{ore}}{a_{oth}}$ possiamo ricavare l'espressione del fattore di compensazione:

$$\frac{p_{ore}}{p_{oth}} - 1 = \frac{1}{1-n} \cdot \left(\frac{a_{ore}}{a_{oth}} - 1\right) \rightarrow f_{comp} = (1-n) \cdot \left(\frac{p_{ore}}{p_{oth}} - 1\right) + 1$$

CAPITOLO 5

I CODICI DI SIMULAZIONE NUMERICA

“Lo scienziato nel suo laboratorio non è solo un tecnico, è anche un bambino davanti a fenomeni della Natura che lo affasciano come un racconto di fate”

Marie Curie

5.1: Introduzione ai codici di simulazione numerica

Al fine di poter simulare i fenomeni fisici legabili al fattore di hump per le due tipologie di colaggio studiate, si sono utilizzati due simulatori, che andremo ad esporre più nel dettaglio all'interno di questo capitolo, i quali ci hanno permesso di ottenere l'andamento delle pressioni all'interno della camera di combustione. I due simulatori utilizzati sono:

- Flow3D: simulatore fluidodinamico utilizzato per la simulazione del colaggio all'interno della BARIA, sia per il caso di punzonatura che per il caso di colaggio.
- Mappe di orientazione e concentrazione: sono degli script sviluppati in ambiente MATLAB per poter ottenere delle mappe da caricare all'interno del simulatore, partendo dal file “.txt” che possiamo ottenere da Flow3D.
- Simulatore 2D: un simulatore sviluppato in ambiente MATLAB dai ricercatori dell'università di Bologna presso il laboratorio Hangar di Forlì. Permette di ottenere, gli andamenti di erosione combustiva del propellente, il rateo di combustione sulla superficie del propellente e la pressione in camera di combustione, partendo da dati noti del propellente e dell'ugello forniti dalla ditta AVIO s.p.a.. Scopo del simulatore è quello di poter diminuire i test fatti tramite le BARIA e utilizzare questo dispositivo, con un notevole abbattimento dei costi per l'azienda.

5.2: Flow3D

Per lo svolgimento delle simulazioni riguardanti il riempimento della BARIA è stato utilizzato il programma di fluidodinamica computazionale Flow3D il quale ha un'interfaccia user-friendly rispetto al programma Fluent, per quanto riguarda la griglia di calcolo, e tale software è specializzato per le simulazioni di natura tridimensionale.

La scelta del simulatore fluidodinamico è stata effettuata andando a verificare quale tra questi rispondeva meglio alle caratteristiche ricercate. Infatti il programma doveva essere in grado di fornire in tempi brevi la simulazione fluidodinamica di un fluido monofasico; effettuando un confronto delle caratteristiche dei programmi, si è scelto di utilizzare il programma di Flow3D. Di seguito vengono riportati i vantaggi e gli svantaggi dei due programmi citati.

	Vantaggi	Svantaggi
FLUENT	<ul style="list-style-type: none"> • Presenza di una documentazione molto dettagliata di tutti i metodi numerici disponibili al suo interno • Possibilità di simulare più di due fluidi contemporaneamente • Vasta gamma di metodi numerici offerti ed adattabili ad ogni esigenza di simulazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempi di calcolo molto lunghi • Richiede una particolare accortezza nella generazione della mesh al fine di evitare fenomeni di diffusione del propellente

Figura 5.1: Analisi del software Fluent

	Vantaggi	Svantaggi
FLOW3D	<ul style="list-style-type: none"> • Implementa al suo interno sistema di <i>meshing</i> automatico e intuitivo • Grazie alla tecnica pseudo-vof non è necessario che la mesh si adatti perfettamente alla geometria • Tempi di calcolo ridotti 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di simulare al più due fluidi

Figura 5.2: Analisi del software Flow3D

Pregio di questo programma è quello di utilizzare una tecnica chiamata pseudo-VOF, la quale non richiede che la mesh si adatti perfettamente alla geometria, semplificando notevolmente tale fase.

Infatti un metodo VOF (Volume Of Fraction) lavora da un punto di vista fisico con la densità del materiale contenuto in esso. Questa metodologia (VOF) considera un sistema in cui sono presenti “n” fluidi e suddivide il fluido in porzioni di volumi che verranno identificate con V . Indicando con V_i la frazione di volume dell’ i -esimo fluido presente all’interno della porzione di volume V considerato, possiamo definire come “*volume fraction*” α_i , con la seguente quantità:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V}$$

In cui valgono ovviamente le seguenti proprietà:

- $\alpha_i = \begin{cases} = 0 & \text{se nella cella non è presente il fluido } i - \text{esimo} \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1 & \text{se è presente una porzione di fluido } i - \text{esimo} \\ = 1 & \text{se la cella è piena di fluido } i - \text{esimo} \end{cases}$
- $\sum_i \alpha_i = 1$
- $V_i = \iiint \alpha_i dV$
- $M_i = \iiint \rho_i \alpha_i dV$, dove M_i si intende la massa del fluido i -esimo contenuto nella cella considerata
- $M = \sum_i M_i$

Da cui discendono le seguenti relazioni:

$$\rho = \frac{1}{V} \sum \iiint \rho_i \alpha_i dV,$$

$$\mu = \frac{1}{V} \sum \iiint \mu_i \alpha_i dV$$

Ogni fluido al suo interno obbedisce all'equazione di continuità, che possiamo riscrivere come:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \vec{u}) = 0$$

Andando a moltiplicare l'equazione di continuità per il volume V e dividendo per la massa M della volume considerato, otteniamo l'equazione di avvezione per le "volume fraction":

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \text{div}(\alpha_i \vec{u}) = 0$$

Si tenga presente che normalmente per questo set di equazioni si utilizza una discretizzazione con il metodo dei volumi finiti che nella sua forma conservativa assicura la conservazione della massa di fluido, data la linearità della relazione tra α e ρ .

Nei metodi pseudo-VOF l'equazione di avvezione delle "volume fraction" viene calcolata solamente nelle celle contenenti il fluido di interesse, che nel nostro caso sarà il propellente, con un notevole risparmio di costo computazionale, vantaggi in termini di accuratezza e di diminuzione della memoria allocata.

Altro elemento pratico di questa tipologia, motivo che ha spinto ulteriormente ad utilizzare Flow3D, è rappresentato dall'utilizzo di schemi di avvezione di ordine elevato per determinare le interfacce dei volumi di controllo. Attraverso l'equazione di Navier-Stokes viene calcolata la velocità con il quale si muove il volume contenente il liquido e di seguito il volume viene redistribuito sulle celle attraversate dal volume di fluido. In particolare questo metodo utilizza degli schemi di avvezione con metodi numerici di ordini elevati per identificare il contorno di volume del fluido movimentato come l'unione della superficie della mesh di calcolo, definita inizialmente, e la superficie libera del fluido permettendone di adattare la mesh. Questo può avvenire anche per metodi VOF, ma richiederebbe un cambiamento sostanziale della struttura dei programmi esistenti che lavorano con tale principio, determinando un elevato rischio di instabilità numeriche.

La pagina principale del programma vede la possibilità di caricare differenti file salvati all'interno del portfolio personale e mostra i risultati che si ottengono durante la simulazione. All'interno di essa è presente anche una finestra che mostra se il passo scelto è adeguato, affinché la simulazione non vada in una condizione di instabilità numerica; in caso contrario viene regolato nuovamente il passo affinché l'errore numerico che si commette rimane limitato determinando quindi una condizione di stabilità del sistema stesso.

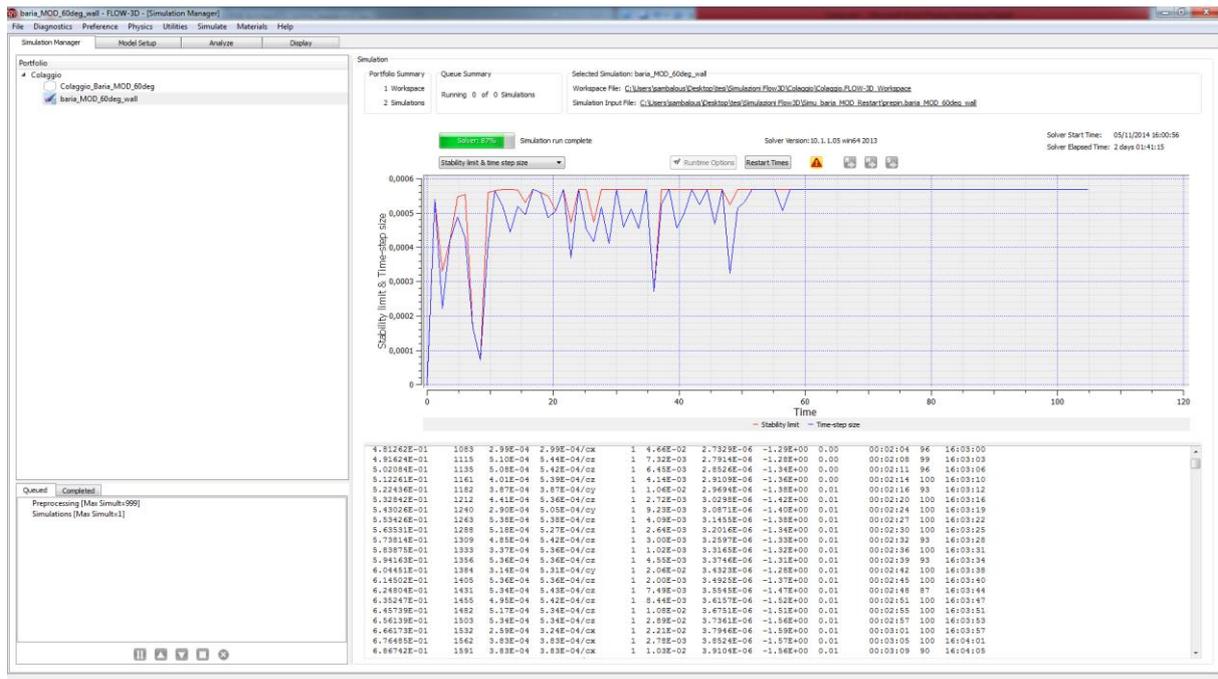


Figura 5.1: Pagina del Simulation manager di Flow3D

All'interno del programma la geometria, a cui verrà applicata la mesh, può essere introdotta all'interno del programma in due modi differenti:

- Il primo metodo è quello di creare la geometria direttamente all'interno del programma Flow3D, mediante la somma di geometrie semplici che il programma mette a disposizione.
- il secondo metodo, quello utilizzato per la simulazione, è quello di creare la geometria mediante un programma di CAD e caricarla al suo interno in formato ".STP".

Quando all'interno del programma viene inserita la geometria il programma, in maniera del tutto automatica, genera attorno ad essa un blocco a forma di parallelepipedo.

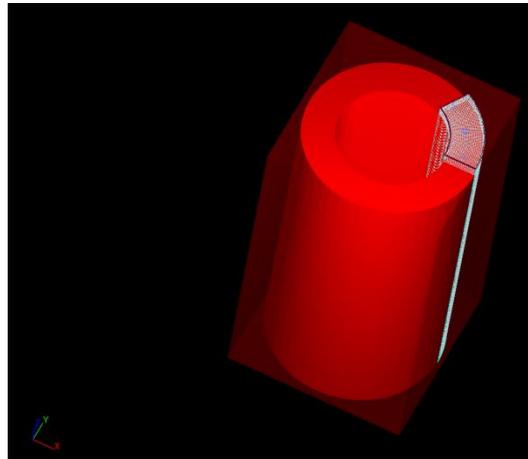


Figura 5.2: Generazione del blocco attorno alla geometria

Quindi tramite la tecnica pseudo-VOF, illustrata brevemente prima, la mesh non si deve adattare perfettamente alla geometria, semplificando molto la fase di meshing.

A seguito del caricamento della geometria è necessario andare a specificare la tipologia di geometria caricata, che nel nostro caso sarà un solido, ed indicarla come sottocomponente complementare. In tal modo il blocco rappresenta una specie di stampo in cui la sua forma è rappresentata dalla geometria caricata precedentemente.

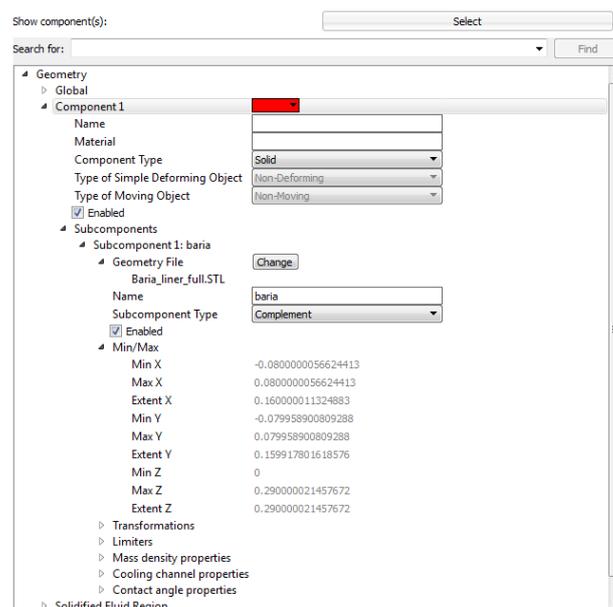


Figura 5.3: Impostazione tipologia componente e sottocomponente

Fatto questo si procede alla generazione della mesh; all'interno del software è possibile scegliere una generazione della mesh di due tipologie, cilindrica o cartesiana, andando a suddividere il blocco principale che andiamo a considerare in sotto-blocchi in modo da inserire eventuali infittimenti della griglia in una direzione piuttosto che in un'altra. In particolare all'interno del nostro componente vengono introdotte anche le posizioni delle bocche di colata, come mostrano le immagini sottostanti.

Mesh type: Cylindrical

Mesh block: Select mesh blocks

Search for: Find

- Mesh - Cylindrical
 - Mesh block 1
 - Name
 - Size of Cells: 0,0015
 - Total Cells
 - X direction
 - Total Cells
 - Mesh Plane 1: 0,05
 - Cell Size
 - Cell Count
 - Mesh Plane 2: 0,08
 - Cell Size
 - Y direction
 - Total Cells
 - Mesh Plane 1: 0
 - Cell Size: 0,04
 - Cell Count
 - Mesh Plane 2: 60
 - Cell Size: 0,04
 - Z direction
 - Total Cells: 100
 - Mesh Plane 1: 0
 - Mesh Plane 2: 0,3
 - Boundaries
 - X Min: W
 - X Max: W
 - Y Min: S
 - Y Max: S
 - Z Min: W
 - Z Max: P

Shallow water mesh block

Figura 5.4: Impostazione della tipologia di mesh

Di seguito viene mostrato l'infittimento della griglia rispetto ad una direzione

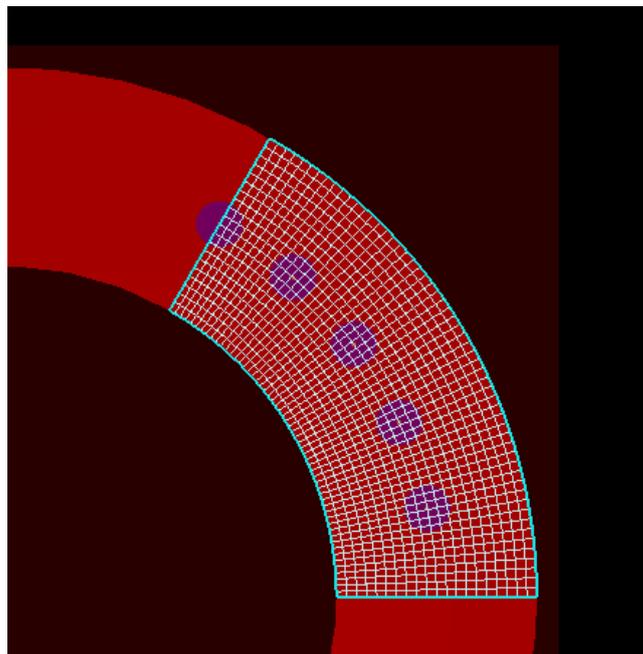


Figura 5.5: Mesh uniforme su tutto il dominio considerato

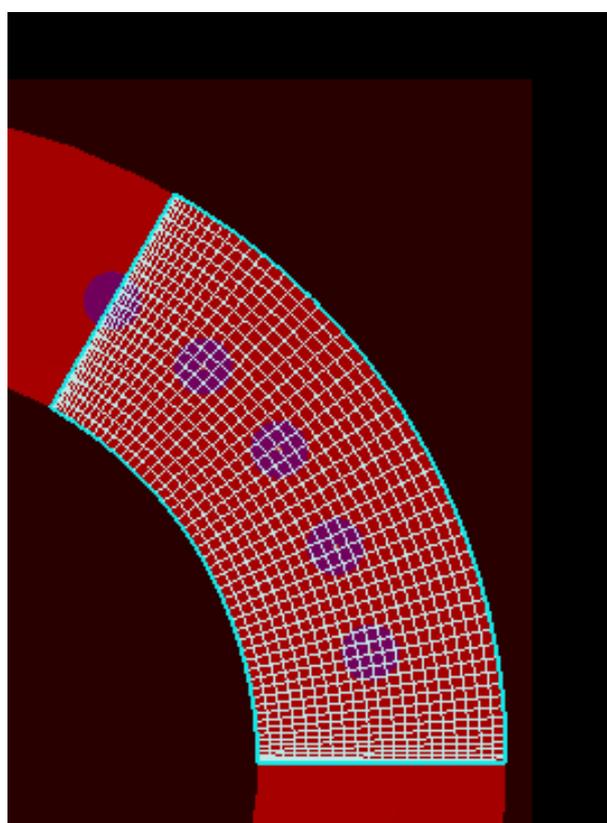


Figura 5.6: Variazione della mesh in direzione tangenziale per avere valori meno precisi al centro e più precisi sulle condizioni al contorno

La tipologia di mesh scelta varia a seconda della tipologia di colata che andiamo ad esaminare, infatti:

- nel caso del colaggio del propellente con la presenza della spina centrale durante il colaggio, la tipologia di mesh scelta è stata quella cilindrica, proprio perché, data la forma della baria, essa determinava una precisione maggiore di quella cartesiana.
- nel caso del colaggio con il procedimento di punzonatura, la mesh cilindrica non è stata applicata, anche se preferibile per lo stesso motivo enunciato nella metodologia di colaggio appena esposta. Il motivo è che nella prima parte della colata, all'interno della BARIA, non è presente la spina centrale, andando a generare un punto di singolarità al centro del case stesso, perciò motivo viene scelta una mesh di tipo cartesiano nel caso della punzonatura.

Successivamente, una volta definita la mesh, vengono impostati i modelli di viscosità e turbolenza, la presenza di sorgenti di massa, e la presenza dell'accelerazione gravitazionale e di un sistema di riferimento non inerziale.

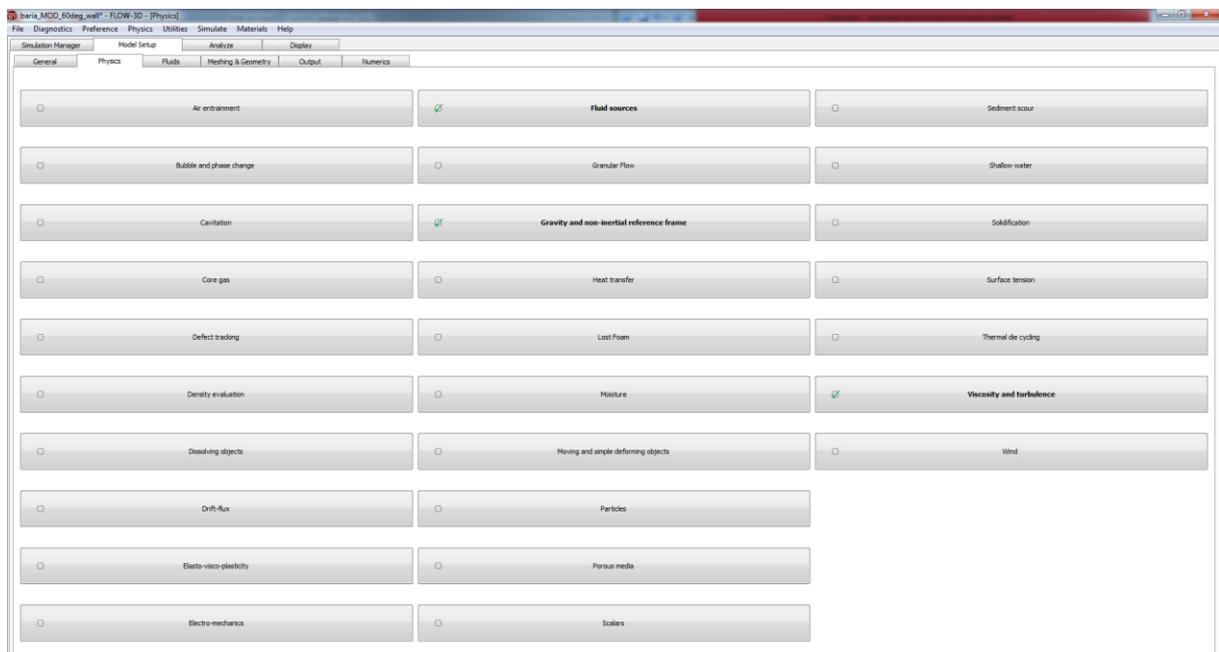


Figura 5.7: Impostazione degli elementi fisici

Successivamente vengono imposte all'interno del software le proprietà di viscosità e di densità del materiale colato.

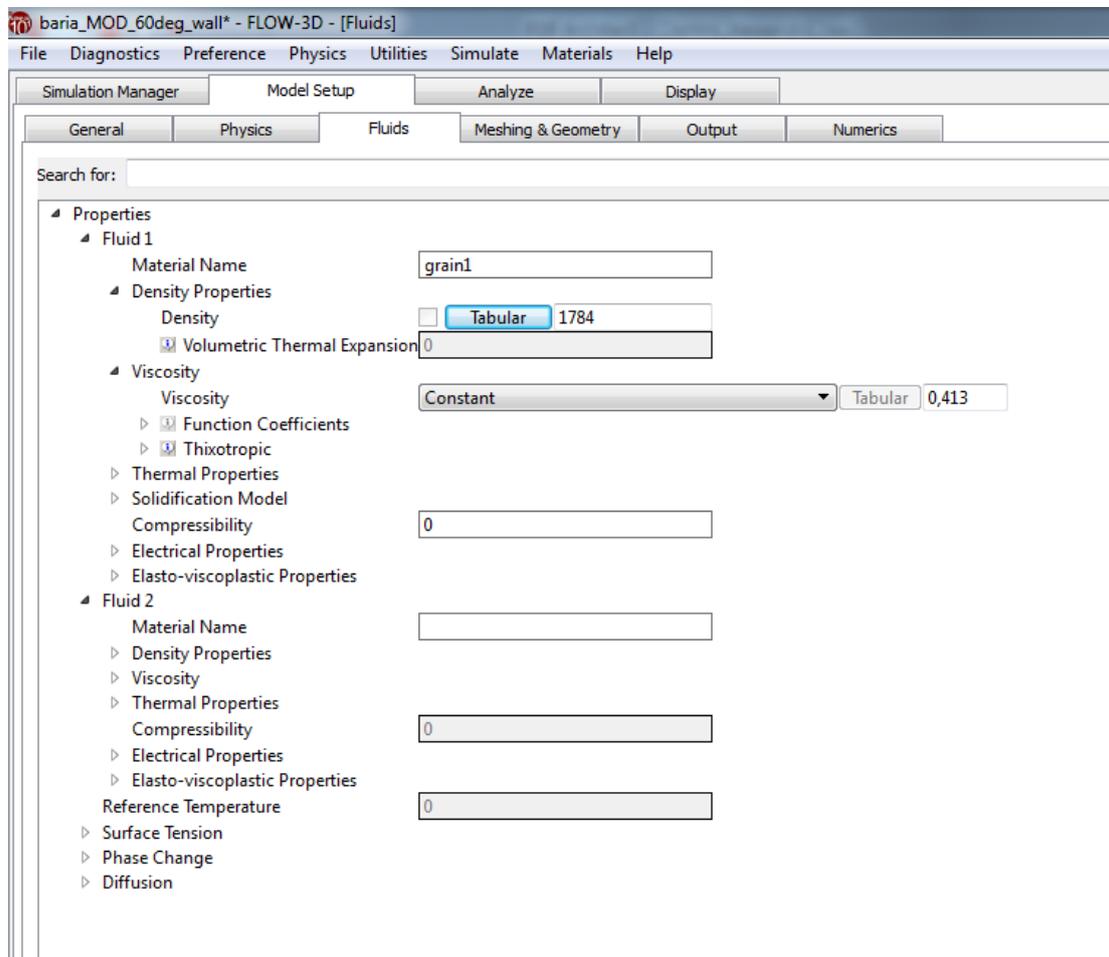


Figura 5.8: Impostazione proprietà del materiale

Vengono impostate le condizioni al contorno

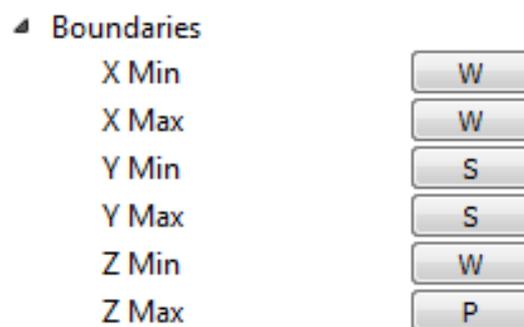


Figura 5.9: Definizione delle condizioni al contorno

Le condizioni al contorno che utilizzate sono:

- per le coordinate di X Min, X Max e Z Min, che rappresentano rispettivamente la coordinata più vicina alla spina centrale. Le coordinate più vicine alle pareti della BARIA e la coordinata che rappresenta il fondo della camera di combustione della BARIA, presentano delle condizioni di Wall (W) di no slip condition del flusso, in cui imponiamo che le celle in prossimità di questo valore abbiano una velocità media nulla
- per le coordinate Y Min e Y Max, che rappresentano le coordinate ai bordi della sezione considerata, è stata posta una condizione di simmetria del fluido, in maniera tale che lo scambio di particelle all'interno di ogni singolo volume fosse sempre costante
- per la coordinata Z Max, che rappresenta il punto a cui sono poste le bocche di colata. Si pone una condizione di pressione costante, indicata con P, che è rappresentata dalla pressione presente all'interno della BARIA nella fase di colaggio.

Di seguito viene riportata un'immagine che mostra le condizioni al contorno sulla geometria stessa.

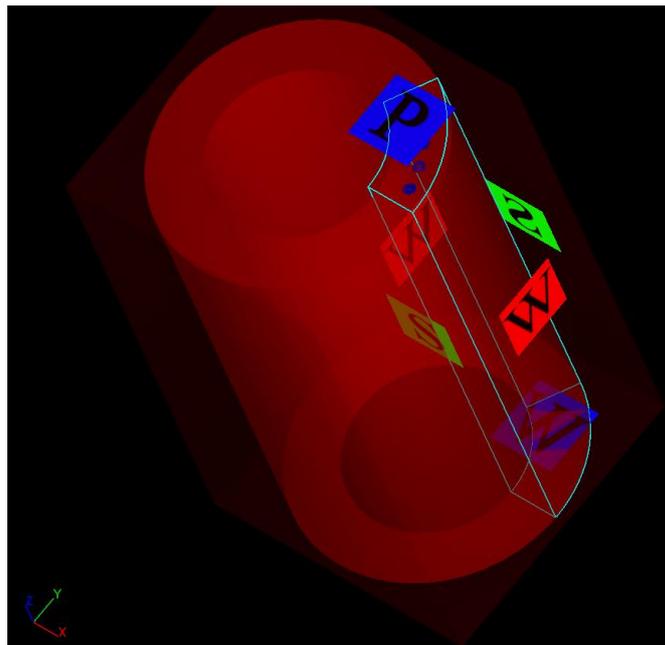


Figura 5.10: Condizioni al contorno poste sulla geometria

Successivamente vengono imposti i limiti sullo step temporale, i criteri di convergenza ed i metodi di numerici da utilizzare.

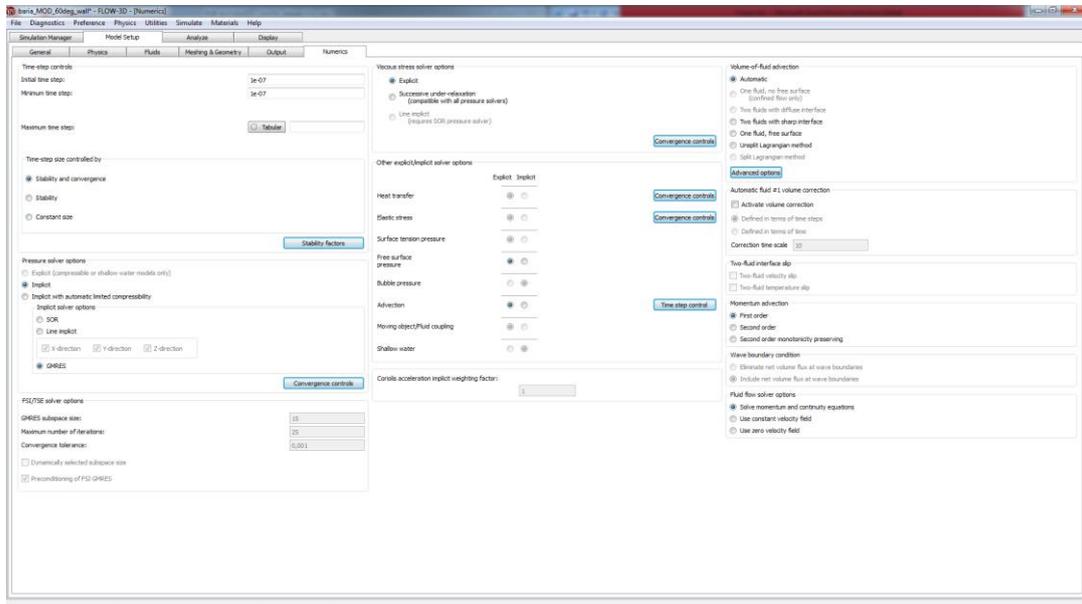


Figura 5.11: Impostazione metodi numerici

Vengono definiti il tempo finale della prova, il tipo di fluido, che nel nostro caso sarà di tipo incompressibile, il numero di fluidi coinvolti, la tipologia di come determinare le superfici di controllo e le unità di misura.

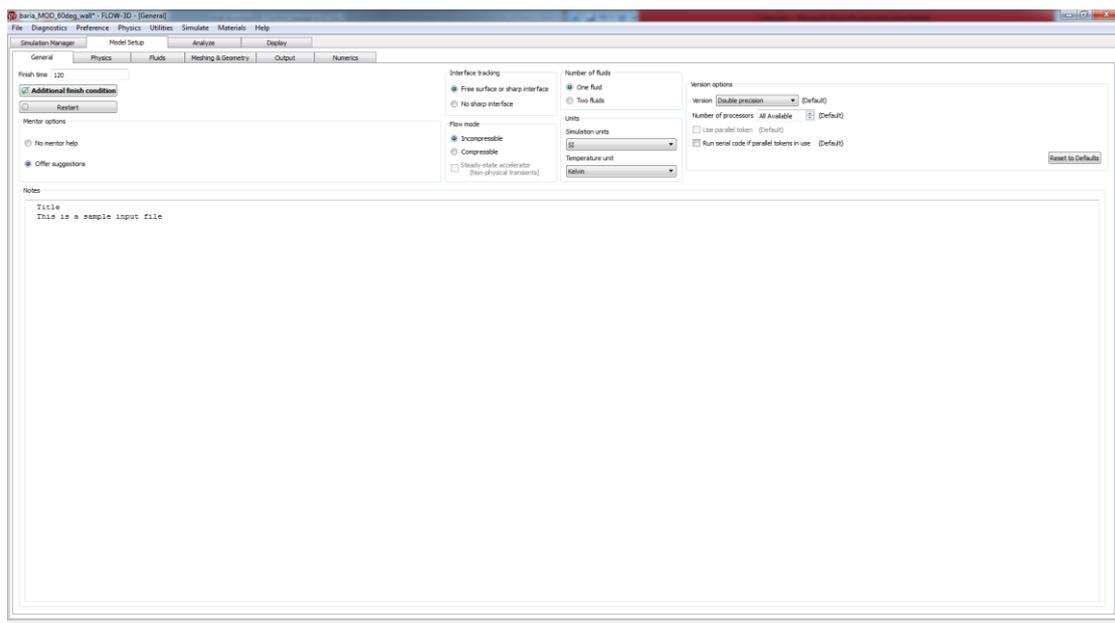


Figura 5.12: Impostazioni temporali e frazioni di riempimento della BARIA

In particolare si possono definire delle condizioni aggiuntive in cui è possibile decidere se la simulazione deve terminare al termine temporale prefissato o rispetto alla percentuale di riempimento della BARIA.

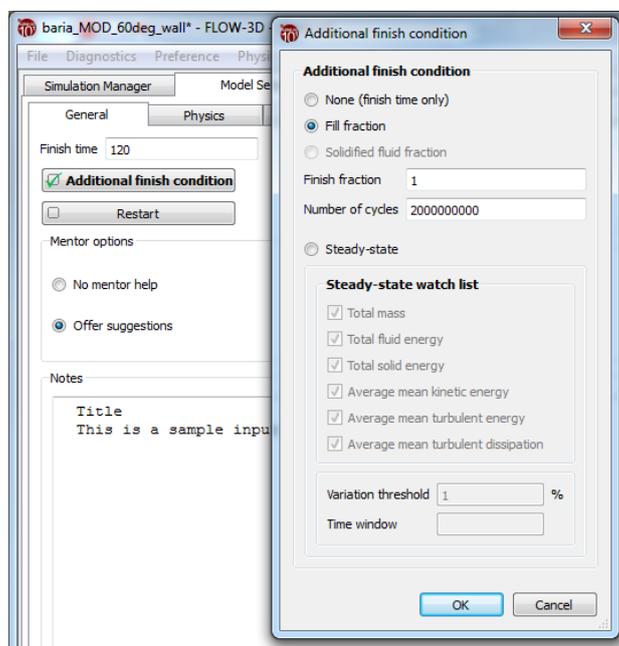


Figura 5.13: Impostazioni proprietà aggiuntive per il termine della prova fluidodinamica

Infine è possibile scegliere quali dati la simulazione deve restituire in funzione del tempo o della percentuale di riempimento della BARIA.

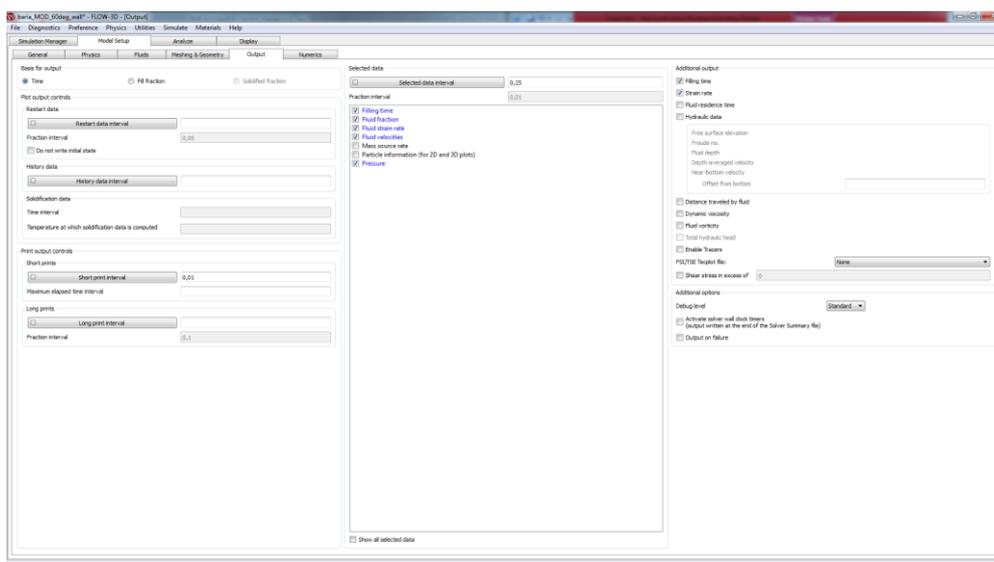


Figura 5.14: Definizione dati di uscita dalla prova in CFD

È possibile, tramite i tab analyze e display, selezionare tutti i frame della colata effettuata e salvare, tramite un file “.txt”, tutte le grandezze legate a velocità, posizione delle particelle eccetera, per poi visualizzare l’andamento di riempimento del tramite display, come riportato di seguito.

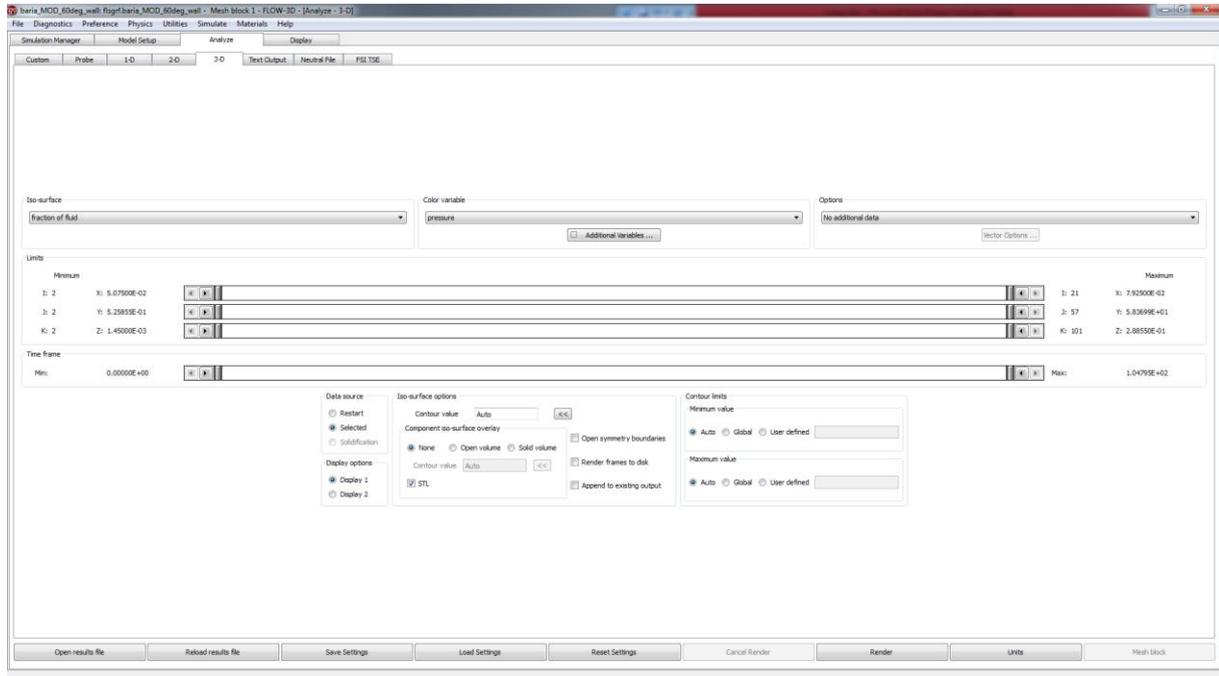


Figura 5.15: Definizione del tempo di render della prova

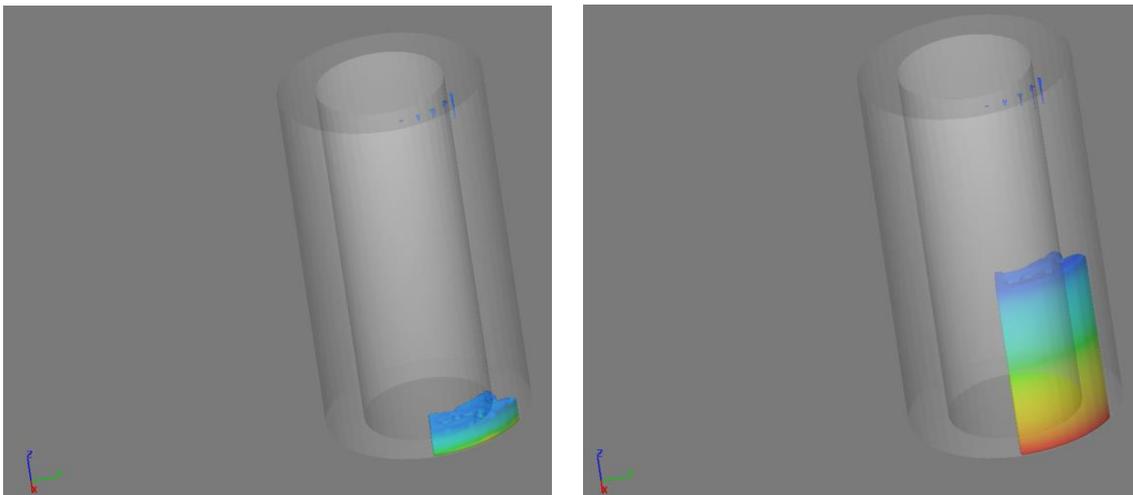


Figura 5.16: Render della colata in due istanti differenti e che mostrano l'andamento della pressione

5.3: I file di letture e la creazione delle mappe in MATLAB

Il procedimento per l'ottenimento delle mappe di concentrazione della segregazione particellare e dell'orientamento delle particelle, per il procedimento di punzonatura e di colaggio, sono tra loro molto simili. Infatti il programma Flow3D, permette di ottenere in uscita un file con estensione “.txt” che, tramite un file matlab, permette di ottenere dei file con estensione “.mat” contenenti i dati della simulazione. Questi verranno caricati in sequenza rispettivamente nei programmi per la determinazione della segregazione e del colaggio, per poi essere caricati all'interno di un secondo script MATLAB che ci permetterà di ottenere le mappe di concentrazione e punzonatura. Di seguito vengono riportati due schemi a blocchi rappresentativi di questa sequenza.

Schema a blocchi per la segregazione.

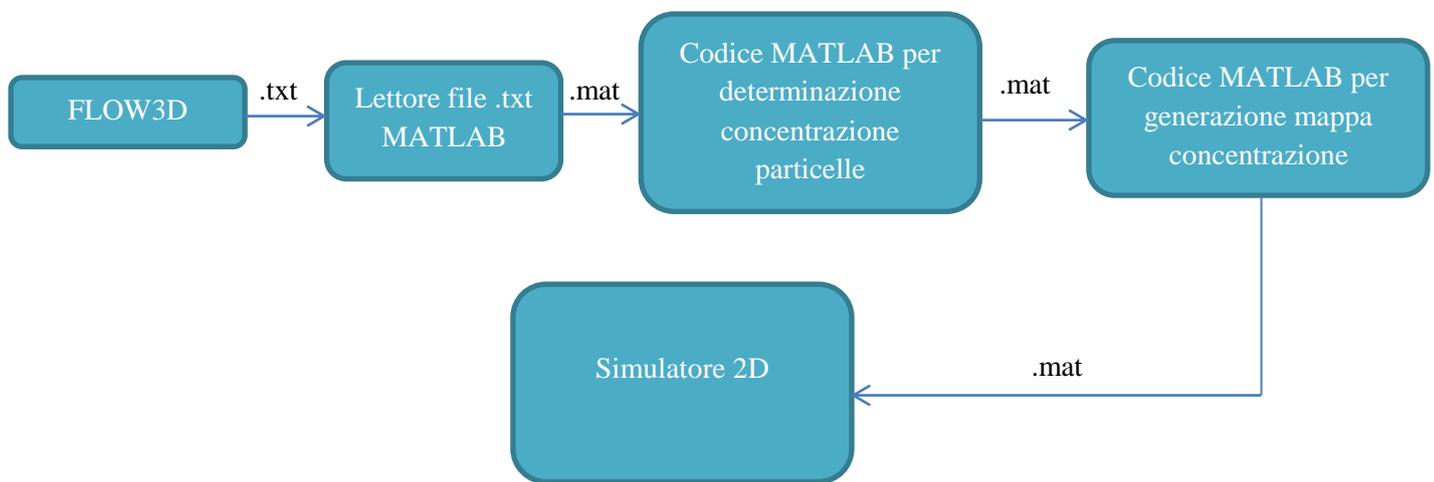


Figura 5.17: Schema a blocchi segregazione particellare

Schema a blocchi per l'orientazione.

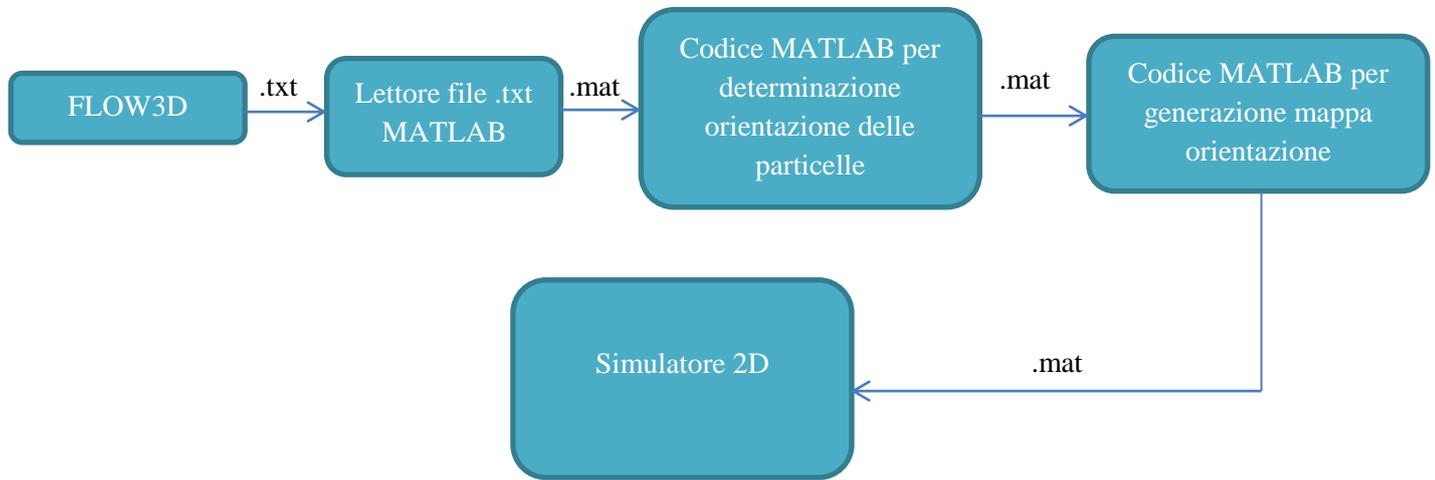


Figura 5.18: Schema a blocchi orientazione particellare

I codici implementati per entrambi i metodi di riempimento contengono le informazioni che ci interessano, sia relativi alla concentrazione che all'orientazione delle particelle, e questi, come verrà illustrato, vengono aggiornati basandosi sui risultati relativi al campo di moto, forniti dalle simulazioni di Flow3D. Entrambi i codici seguono il processo che viene riassunto di seguito:

1. Caricamento dei dati derivanti dalla simulazione fluidodinamica: come già affermato viene effettuata la scrittura di un algoritmo ad hoc in cui il file di estensione “.txt” proveniente da Flow3D, possa essere riconvertito in un formato leggibile da MATLAB, ossia in un file di estensione “.mat”
2. Si definiscono i punti di controllo: sulla base delle dimensioni fisiche del campo fluidodinamico, vengono generati dei punti di controllo su una griglia di tipo cartesiano, che globalmente ricoprirà il nostro dominio geometrico. Ovviamente alcuni di questi punti tenderanno a cadere al di fuori del dominio di calcolo, i quali costituiranno dei nodi “deattivati”, ossia dei nodi che non parteciperanno allo scambio di informazioni riguardanti la concentrazione o l'orientazione con quelli interni al

dominio. Allo stesso modo si considerano dei nodi “deattivati” quelli in cui ancora non vi sarà alcuna traccia di propellente, come riportati nell’immagine sottostante.

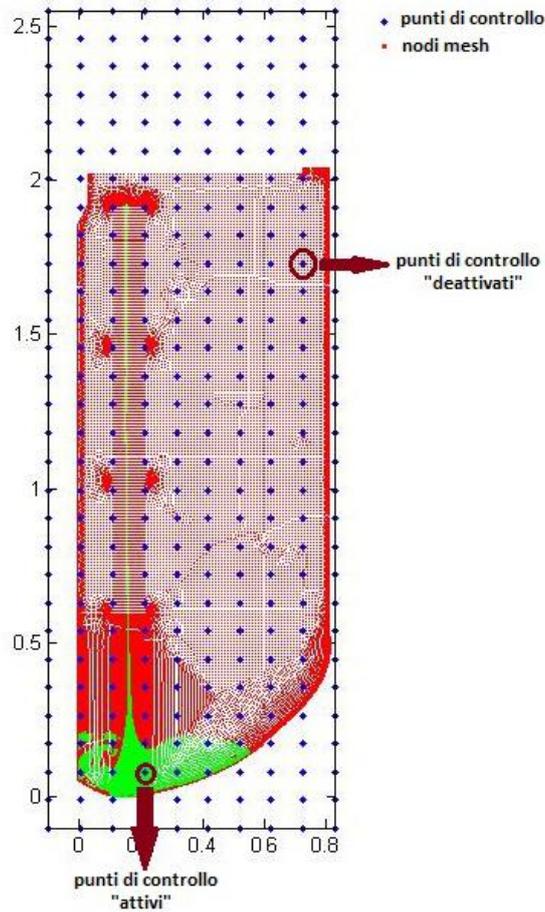


Figura 5.19: Rappresentazione dei punti di controllo "attivi" e "deattivati" e fuori dal dominio

3. Definizione delle probes: questi elementi sono punti del dominio che subiranno una successiva movimentazione sulla base dei dati ricavati dalle simulazioni in CFD, e ad ogni iterazione esse coincideranno con i punti di controllo. I valori di velocità con cui queste probes tendono a muoversi sono ottenuti mediante interpolazione dei valori contenuti nei nodi della mesh.
4. Inizializzazione del valore della concentrazione e dell'orientazione: nel primo caso, si assegna un valore di concentrazione pari ad 1 per semplicità. Invece, nel secondo caso, le orientazioni delle particelle vengono inizializzate allineandole alla direzione del vettore di velocità, ottenuta interpolando le due componenti di essa attraverso i valori, risultanti dalla simulazione fluidodinamica, contenuti nei nodi della mesh.

5. Movimentazione probes: in questa fase le probes, per ogni singolo istante di tempo e supponendo che il campo di moto rimanga costante, vengono “forzate” a seguire il campo di velocità. Questa fase di movimentazione è funzionale alla successiva fase di interpolazione del valore di concentrazione o di orientazione nei punti di controllo. Tale fase si rende peraltro necessaria per poter seguire opportunamente l’evoluzione del fronte di colata.
6. Interpolazione valori di concentrazione o riorientamento delle particelle: in questa fase viene effettuata un’interpolazione del valore di concentrazione sui punti di controllo. A questo scopo si effettua una media pesata delle concentrazioni delle probes limitrofe al punto di controllo considerato. Nel caso dell’orientazione viene ricalcolata la direzione locale del flusso, viene ricalcolato l’angolo tra la direzione attuale del flusso e della particella, l’asse di rotazione per ogni particella e l’inerzia con le quali esse tendono ad allinearsi nel flusso.
7. Re-inizializzazione delle probes: valida per gli istanti temporali successivi al primo ed in cui la concentrazione viene posta pari a quella del ciclo precedente e poi ricalcolata mediante l’interpolazione dei valori. Lo stesso procedimento si applica al caso dell’orientazione. Questo elemento verrà esposto in maniera più dettagliata nei prossimi paragrafi.
8. Aggiornamento dei valori insiti nelle sonde: dipendono dal tipo di codice e si basano su formulazioni matematiche che legano la variabile da aggiornare ad una caratteristica del flusso.

5.3.1: Il codice per il calcolo dell'orientazione particellare

Il codice per la determinazione dell'orientazione delle particelle, permette di determinare la mappa dell'orientazione delle particelle all'interno del grain, che andrà caricato all'interno del simulatore per poter simulare l'effetto di Hump legato a questo fenomeno.

I dati della simulazione sono relativi ad un sistema di riferimento di tipo cilindrico, quindi sarà necessario andare a convertire questi dati in un sistema di riferimento di tipo cartesiano. All'interno del codice è inserito un controllo relativo al numero di sonde presenti, così da poter effettuare i calcoli su un numero sufficiente di particelle. In tal caso definiremo ogni probes mediante una terna di versori da cui poi sarà possibile determinare l'orientazione delle particelle.

La tendenza naturale di quest'ultime sarà quella di disporsi lungo le linee di flusso durante tutta la fase di colata, anche se questo non avviene in maniera istantanea. Infatti ogni singola particella possiederà una propria inerzia che la farà opporre alla rotazione. Conseguentemente, in ogni istante temporale, la particella compirà solo una parte della rotazione per poi raggiungere la direzione delle linee di flusso. Questo nella realtà non accade, in quanto la particella tenderà solamente a coprire una parte della differenza angolare che esiste tra la direzione della particella e quella delle linee di flusso.

Le metodologie numeriche per l'implementazione di questa inerzia e per la definizione dei nuovi angoli, sono numerose ed una delle prime utilizzate è rappresentata dalla legge sperimentale, che determina l'angolo effettivo spazzato dalla particella:

$$\theta_p^{new} = k_1(\theta_f - \theta_p^{old}) + k_2 \left[\frac{\pi}{2} + (\theta_f - \theta_p^{old}) \right]$$

Dove:

θ_p^{old} e θ_p^{new} rappresentano rispettivamente gli angoli nell'istante precedente e nell'istante attuale della particella rispetto alla terna cartesiana.

θ_f rappresenta l'angolo di orientamento del fluido rispetto alla terna cartesiana.

I termini k_1 e k_2 rappresentano delle costanti di proporzionalità legate rispettivamente alla componente di *shear-rate* e di *expansion-rate*. In particolare il fattore k_1 possiamo definirlo tramite una legge esponenziale, rappresentata dal rapporto delle norme tra lo *shear-rate* e di uno *shear-rate* di riferimento.

Questa legge possiamo scriverla come:

$$k_1 = \left(\frac{\|\dot{\gamma}\|}{\|\dot{\gamma}_{ref}\|} \right)^n$$

La legge implementata all'interno del programma, risulta però essere una legge più semplificata, in cui l'orientazione risulta essere influenzata dal solo campo di velocità in cui la particella risulta essere immersa. In tal caso la legge che si è implementata all'interno dello script è:

$$\theta_p^{new} = \theta_p^{old} \pm \left(\frac{V_{tot}}{V_{ref}} \right) (\theta_f - \theta_p^{old})$$

Dove:

V_{tot} corrisponde al modulo della velocità totale del flusso locale alla particella considerata

V_{ref} corrisponde al modulo di una certa velocità di riferimento, la quale deve essere scelta in maniera conforme al campo di velocità caratteristico.

Al fine di evitare delle instabilità numeriche all'interno del programma, viene stabilita una condizione tale per cui se questo rapporto assumesse valori maggiori o uguali ad uno, esso sarà sempre pari ad uno; in altre parole l'inerzia della particella si annullerà andando a determinare un posizionamento di questa lungo la direzione del flusso stesso. Nel caso in cui

il rapporto di queste velocità fosse nullo, avremmo che la particella non ha alcuna rotazione e quindi la posizione vecchia viene mantenuta anche per la nuova.

Di seguito viene riportato l'andamento di tale rapporto di velocità; in ascissa abbiamo tale rapporto ed in ordinata abbiamo il suo valore efficace, dove si può notare come la legge sia di tipo lineare e di come per rapporti maggiori di uno essa venga saturata.

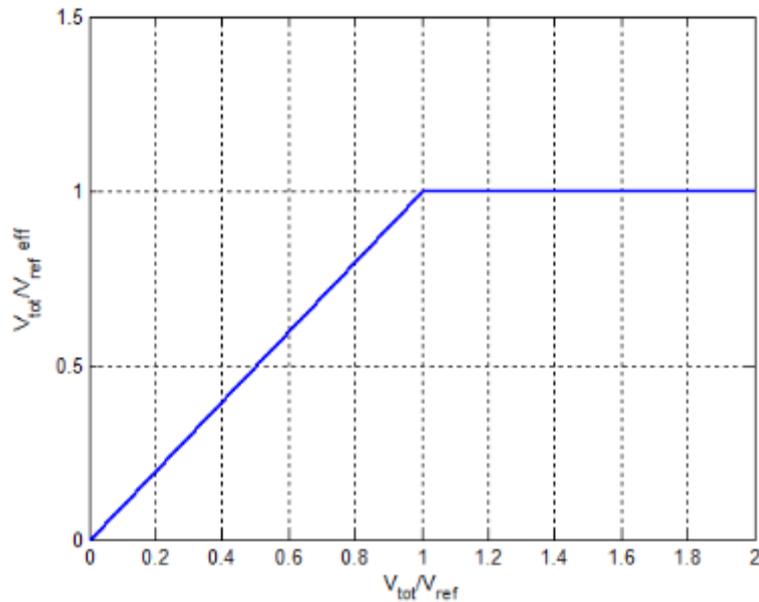


Figura 5.20: Andamento rapporto velocità legge lineare

L'allocatione delle nuove particelle all'interno del flusso viene invece svolto mediante due fasi distinte:

- La prima è la verifica dell'esistenza di nuove sonde adiacenti a quelle già esistenti all'interno del grain nell'istante prima
- La seconda è la verifica se tali sonde fossero già attive all'istante precedente. In caso negativo si inizializza la sonda orientandola esattamente con la direzione del flusso, mentre in caso affermativo il valore associato alla sonda sarà dato da una media pesata rispetto alla distanza dal punto considerato.

5.3.2: Il codice per il calcolo della concentrazione particellare

Il codice per la determinazione della concentrazione particellare presenta già un sistema di riferimento cartesiano da cui possiamo ottenere, a livello quantitativo, il grado di spostamento delle particelle, da cui ricaveremo la concentrazione particellare in funzione della posizione delle sonde.

Si ipotizza che il particolato sia monodimensionale ed in tal caso, a differenza del codice per la determinazione dell'orientazione, associamo ad ogni probes attiva un determinato valore di concentrazione, per semplicità posto pari ad 1.

I primi step di questo codice di calcolo sono analoghi a quelli implementati nel codice dell'orientamento, in cui adremo ad interpolare i valori di griglia con quelli delle probes ed in cui interpoleremo ogni singolo valore della velocità con la griglia da noi posta. Una volta compiutisi va ad effettuare l'interpolazione dei dati di concentrazione per le sonde nella nuova posizione. Questo passaggio può provocare l'associazione di un valore di concentrazione non finito, pertanto si effettua un processo di correzione tramite una media pesata delle concentrazioni all'istante precedente, relative alle particelle immediatamente adiacenti. Per la fase di aggiornamento si ripetono le stesse fasi presentate nel caso dell'orientazione delle particelle, in cui la prima è la verifica dell'esistenza di nuove sonde adiacenti a quelle già esistenti all'interno del grain nell'istante prima.

La seconda è la verifica se tali sonde fossero già attive all'istante precedente. In caso negativo si inizializza la concentrazione sempre pari ad 1, mentre in caso affermativo si ricercano tutte le particelle adiacenti. Idealmente si tratta di una configurazione che presenta una determinata sonda al centro di un cubo e quelle adiacenti, che sono quelle posizionate sui vertici di esso.

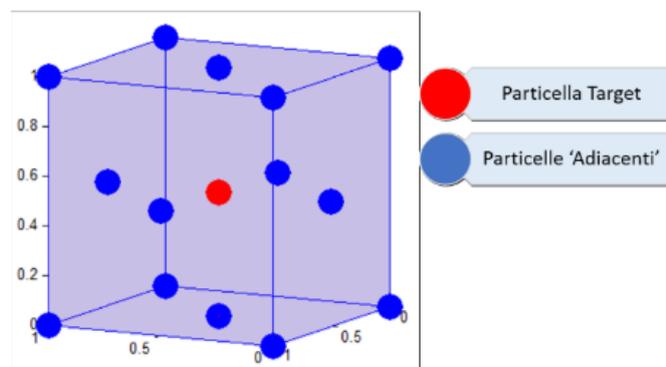


Figura 5.21: Determinazione particelle adiacenti alla particella target per la determinazione dello scambio particellare

Una volta calcolate le distanze è possibile calcolare il valore della concentrazione e quindi ottenere il suo aggiornamento, che corrisponderà alla stima della capacità di movimentazione delle particelle solide immerse nel propellente.

La legge implementata all'interno del programma descrive il nuovo valore di concentrazione particellare, all'interno del dominio di fluido, definito da un certo numero di probes, come:

$$C_{part}^{new} = C_{part}^{old} + F\Delta\tau dt, \quad \Delta\tau = \sum_{i=1}^m (\tau_{n_i} - \tau_p) / \Delta x_{n_i}$$

In cui definiamo:

C_{part}^{new} la concentrazione delle particelle all'istante di tempo attuale

C_{part}^{old} la concentrazione delle particelle all'istante di tempo precedente

F un fattore opportunamente scelto per quantificare la sensibilità allo scambio particellare rispetto al campo tensionale e che normalmente risulta essere compreso tra $10^{-7} - 10^{-9}$

n_i corrisponde al numero di particelle adiacenti alla particella selezionata e che sono impegnate nell'azione di spostamento particellare

$\Delta\tau$ che corrisponde alla somma delle variazioni dello stato tensionale fra il punto analizzato (τ_p) ed i punti adiacenti (τ_{n_i}), rapportato rispetto alla distanza reciproca di ogni singola probes adiacente con quella target (Δx_{n_i}), così che lo scambio con le sonde risulti essere più realistico

dt identifica la differenza temporale che esiste tra due frames.

Infine viene effettuato un controllo per verificare il principio di conservazione della massa, affinché all'interno del dominio non vi sia né la creazione né l'eliminazione di particelle. Nel caso questo principio non venga rispettato è inserito all'interno del programma in fattore correttivo, proporzionale al valore medio di concentrazione rilevato.

5.4: Il Simulatore 2D

L'ultimo insieme di script che vengono utilizzati sono rappresentati dal simulatore 2D, che ci permette di ottenere una simulazione di tutti i principali parametri all'interno di un motore a propellente solido. In particolare il file “.mat” che otteniamo dai codici per la determinazione dell'orientazione e per la determinazione della concentrazione particellare, sono delle mappe che vengono caricate all'interno del programma stesso. Di seguito lo schema a blocchi mostra il funzionamento del simulatore 2D.

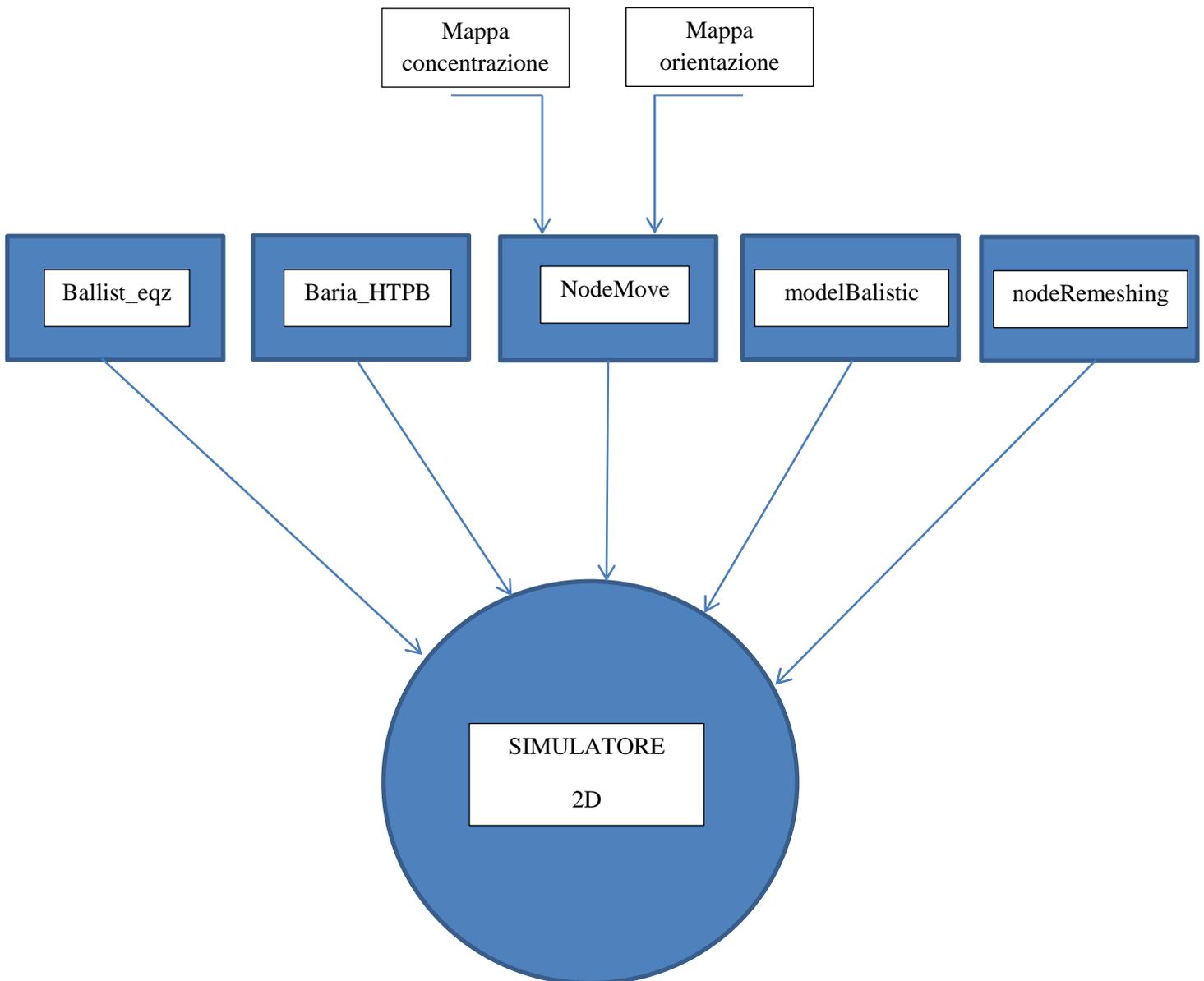


Figura 5.22: Schema a blocchi del Simulatore 2D

Andando ad implementare all'interno dello script "NodeMove" le mappe ottenute, ed utilizzando le leggi per la modellazione dell'effetto di Hump che verranno introdotte nel prossimo capitolo, possiamo ottenere, andando a modificare i parametri F_{min} ed F_{max} delle leggi empiriche utilizzate, per modellare il profilo di pressione e di combustione del nostro grain. In particolare tramite lo script "BARIA_HTPB" è possibile anche modellare l'erosione dell'ugello e le tempistiche da cui tale erosione inizia e di quanto sarà l'erosione della sezione di gola al termine della combustione al fine di modellare, come detto nel capitolo 3, la parte finale del profilo di pressione.

CAPITOLO 6

ANALISI DEI RISULTATI

*“Io non ho fallito duemila volte nel fare una lampadina; semplicemente ho
Trovato millenovecento-novantanove modi su come non va fatta una lampadina”*

Thomas Alva Edison

6.1: Introduzione al simulatore

La parte svolta all'interno degli script utilizzate si integra al simulatore 2D a livello di balistica, andando a considerare sia l'erosione dell'ugello sia per la definizione delle mappe di concentrazione e di orientazione delle particelle all'interno del grain, come riportato nel capitolo precedente.

Di seguito viene riportato uno schema a blocchi che mostra come questi parametri entrino all'interno del simulatore 2D.

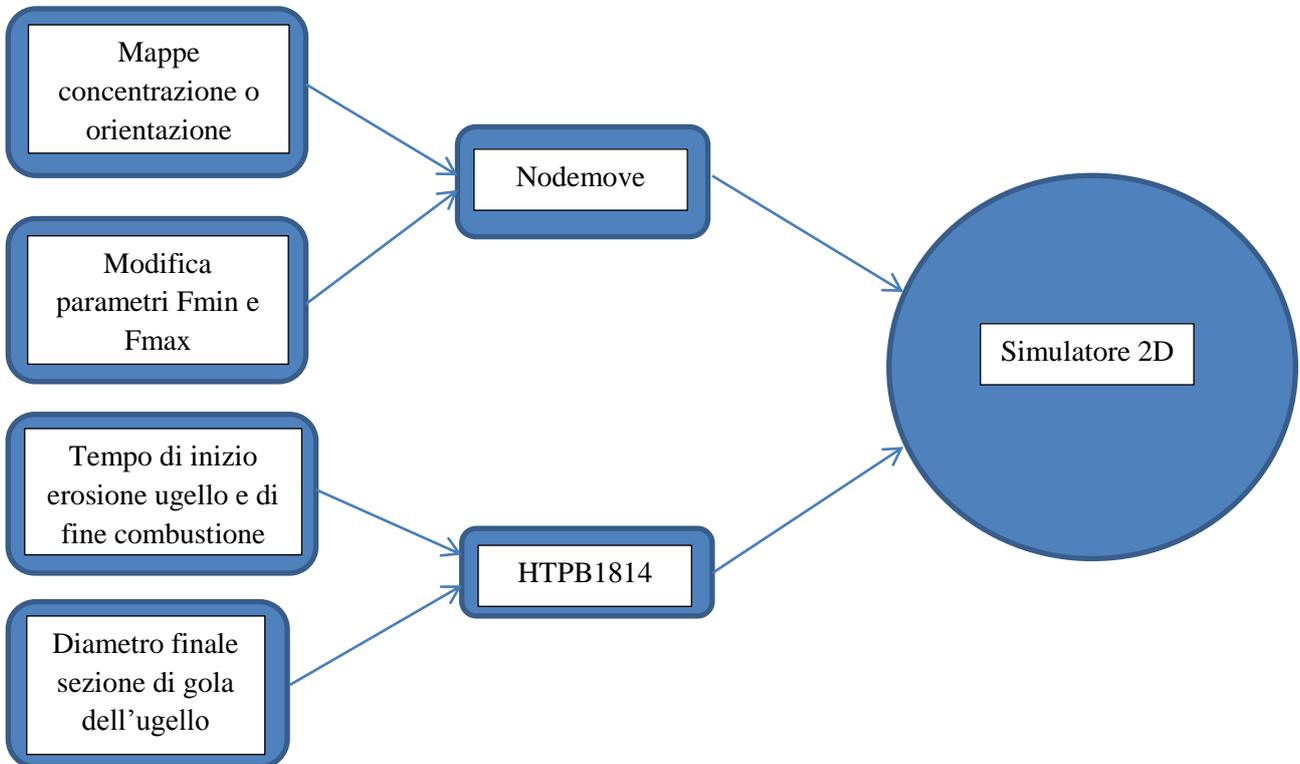


Figura 6.1: Schema a blocchi ingresso dati nel Simulatore 2D

Andando ad impostare il diametro di eroso durante la combustione il tempo di inizio e di erosione e fine combustione è possibile andare a modellare la parte finale dei profili di pressione. Questa erosione in particolare si riferirà ad un valore medio di diametro eroso all'interno di un ugello in grafite zero-dimensionale. Questi parametri vengono inseriti all'interno della function "HTPB_1814" al fine di andare a modificare sia il profilo di pressione, sia il rateo di combustione che l'erosione del grain all'interno della camera di combustione.

Le mappe di concentrazione, come riportato nello schema a blocchi della pagina precedente, mostrano come i dati relativi alle concentrazione ed orientazione delle particelle vengano caricate ed in combinazione con i parametri che regolano il fattore di Hump, F_{min} e F_{max} , generare una combustione eterogenea lungo tutto il grain generando quindi gli andamenti dei profili di pressione relativi alle due colate.

Verranno riportati nei prossimi paragrafi, in maniera più dettagliata, questi elementi necessari per la definizione dei profili di pressione.

6.2: L'erosione dell'ugello

Come introdotto all'interno del terzo capitolo, l'erosione dell'ugello, assieme al fattore di Hump, rappresenta uno degli elementi cardine che, durante tutto il processo di combustione, determina l'andamento dei profili di pressione, in particolar modo negli istanti finali della combustione. Infatti se all'interno del simulatore non venisse implementato questo fenomeno di erosione avremmo una sostanziale differenza tra gli andamenti reali e quelli simulati, come riportati nell'immagine di seguito.

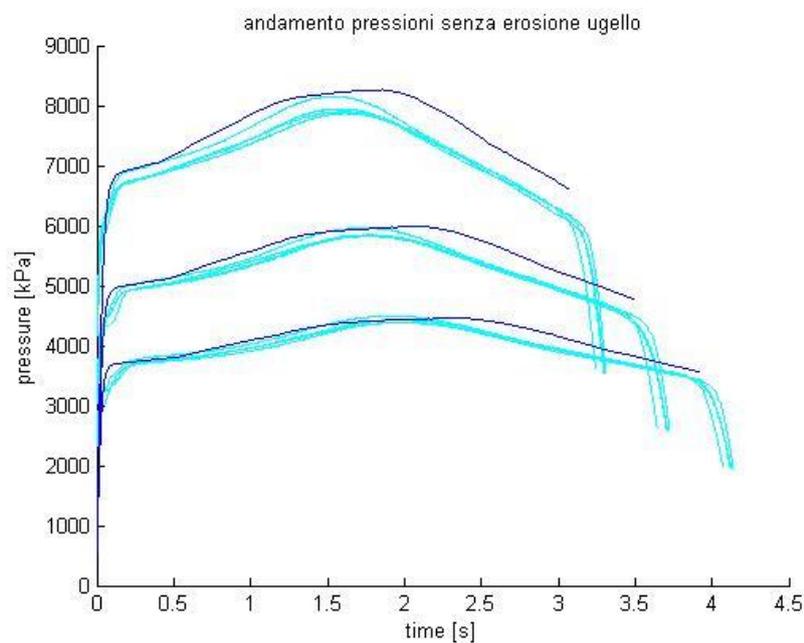


Figura 6.2: Andamento pressioni nel caso di colaggio senza erosione della sezione di gola dell'ugello

Come è possibile notare dai grafici sopra riportati, che mostrano l'andamento di pressione in un caso di riempimento della BARIA con il metodo di colaggio, parte necessaria è rappresentata dall'erosione dell'ugello nella parte finale della combustione.

Di fatto, il fenomeno di combustione erosiva che si genera sulla sezione di gola dell'ugello, determina variazioni sul rateo di combustione e, conseguentemente, anche sui profili di pressione stessi in quanto non avremo più il valore di sezione di gola originario che permette, ma avremo una sezione maggiore. Per far sì che all'interno delle BARIA il valore delle pressioni medie in camera di combustione sia di 30, 45 e 60 bar, vengono rispettivamente

utilizzati degli ugelli in grafite aventi sezioni di gola pari a quelli riportati nella tabella sottostante.

Pressione media camera di combustione [bar]	Sezione di gola dell'ugello [mm]
30	27.3
45	25
60	22,7

Tabella 6.3: Andamento pressioni senza erosione della sezione di gola dell'ugello

Quindi al variare della sezione di gola la pressione media in cameraa di combustione tenderà a variare e mano a mano che una sezione di gola tenderà ad erodersi chiaramente il valore della pressione in camera di combustione tenderà a diminuire.

In particolare la dinamica dell'erosione dell'ugello, risulta essere caratterizzata da una formulazione empirica, in cui la regressione è legata ad una legge quadratica del tipo:

$$R_p = a * p_m^2 + c$$

Questa formulazione, ricavata da studi svolti sui moduli dello Z9-QM1 da altri studenti e nella mia tesi triennale, hanno dimostrato come questa correlazione fosse la migliore possibile, in quanto questa determina una curva che risulta essere monotona crescente e che quindi farà aumentare il rateo di erosione solo quando avremo un aumento della pressione in camera di combustione, come riportato nel grafico sottostante.

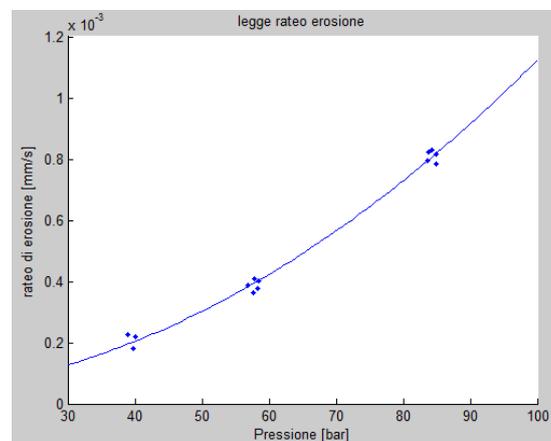


Figura 6.4: Rateo di erosione dell'ugello in funzione della pressione media in camera di combustione

Un'altra legge analizzata fu:

$$R_p = a * p_g^2 + b * p_g + c$$

la quale però non soddisfaceva i criteri richiesti in quanto al diminuire delle pressione in camera di combustione presentava un aumento del rateo di erosione dell'ugello, in quanto tale velocità di erosione sarà maggiore in corrispondenza di valori maggiori di pressione in camera di combustione.

In particolare, all'interno delle formule definiamo come:

R_p il rateo di erosione dell'ugello misurato in mm/s

P_g il valore della pressione medio in camera di combustione misurato in bar.

In tal caso però i valori sono ottenuti andando a variare all'interno del simulatore sia i parametri di istante di inizio di erosione, sia del diametro che il nostro ugello presenterà all'istante finale, in quanto questi rappresentano dei valori medi di erosione per ottenere la validazione delle mappe, ma in futuro sarà possibile effettuare l'implementazione di tale formulazione empirica per l'erosione dell'ugello.

In particolare riportiamo di seguito i valori percentuali di inizio dell'istante di erosione e della erosione del diametro dell'ugello, per il caso del riempimento tramite punzonatura e del colaggio.

Punzonatura						
Pressione media [bar]	D_in [mm]	D_fin [mm]	D_er%	t_in_erosione [s]	t_fin_combustione [s]	t_er_%
30	27,3	27,5	0,73	2,5	3,9	35,9
45	25	25,8	2	2	3,7	45,9
60	22,7	23,3	2,6	1,6	3,3	51,5

Tabella 6.5: Dati caratteristici della punzonatura

Colaggio						
Pressione media [bar]	D_in [mm]	D_fin [mm]	D_er%	t_in_erosione [s]	t_fin_combustione [s]	t_er_%
30	27,3	27,7	1,47	2,2	3,9	51,2
45	25	25,5	2	1,8	3,5	48,6
60	22,7	23,3	2,6	1,8	3,1	41,9

Tabella 6.6: Dati caratteristici della colaggio

Come mostrato all'interno delle tabelle, la combustione erosiva risulterà essere molto più accentuata nel caso di alta pressione.

6.3: Il caso della punzonatura

Il primo caso che prenderemo in considerazione è rappresentato dal caso di riempimento della BARIA tramite la metodologia della punzonatura. Come già descritto, questa metodologia di riempimento è caratterizzata dal fatto che il grain viene colato all'interno del case senza che al suo interno sia presente alcuna spina, la quale verrà successivamente inserita all'interno del case con il grain andandolo a modellare.

Da studi precedentemente svolti, si è dimostrato come l'effetto di Hump, in tale caso di riempimento, sia legato alla segregazione delle particelle grosse e fini all'interno del grain anziché all'orientazione di queste rispetto al fronte di fiamma. Ottenuta tale variabile di interesse si ottiene la mappatura, che consiste nella creazione di una mappa, definita lungo la direzione radiale e assiale della BARIA, ed al cui interno vengono riportati le informazioni trasportate dalle probes mediate lungo le varie sezioni.

In base a tali valori la funzione di amplificazione, che sarà anch'essa una matrice, assume un determinato valore per ogni punto del propellente e che modificherà il valore di rateo di combustione puntualmente. Quando questo fattore di amplificazione sarà maggiore di 1 avremo un incremento del rateo di combustione rispetto a quello teorico, e quindi del valore di pressione, mentre quando sarà inferiore ad 1 avremo un decremento rispetto al valore teorico. Scegliendo i parametri dei valori limiti, maggiori di uno e minori di uno, possiamo andare a ricreare gli avvallamenti caratteristici dell'andamento di pressione in questione.

In tal caso la legge che regola la funzione di amplificazione è di tipo lineare e presenta la seguente forma:

$$f_{hump} = f_{amp_{max}} + \frac{f_{amp_{min}} - f_{amp_{max}}}{x_{max} - x_{min}}(x - x_{min})$$

Dove:

f_{hump} è il valore attuale della funzione di amplificazione

x corrisponde al valore attuale della concentrazione particellare relativa al processo di riempimento scelto

$f_{amp_{min}}$, $f_{amp_{max}}$, x_{min} e x_{max} sono rispettivamente i valori scelti come limite superiore ed inferiore della funzione di amplificazione ed i valori minimi e massimi assunti dalla

concentrazione delle particelle per caratterizzare il fenomeno di Hump all'interno della BARIA.

Una modifica apportata al programma è stata realizzata poiché originariamente questo presentava un errore iniziale, legata alla presenza di un gradino, come riportato nelle immagini sottostanti.

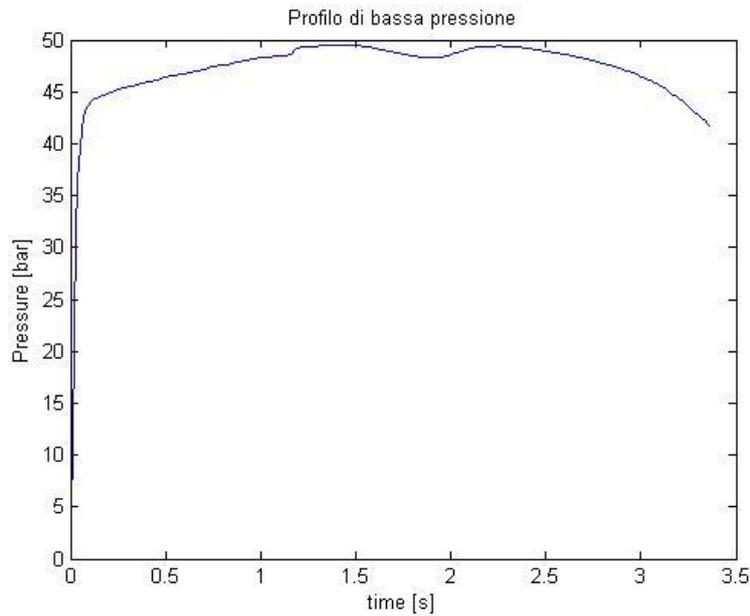


Figura 6.7: Andamento bassa pressione con errore

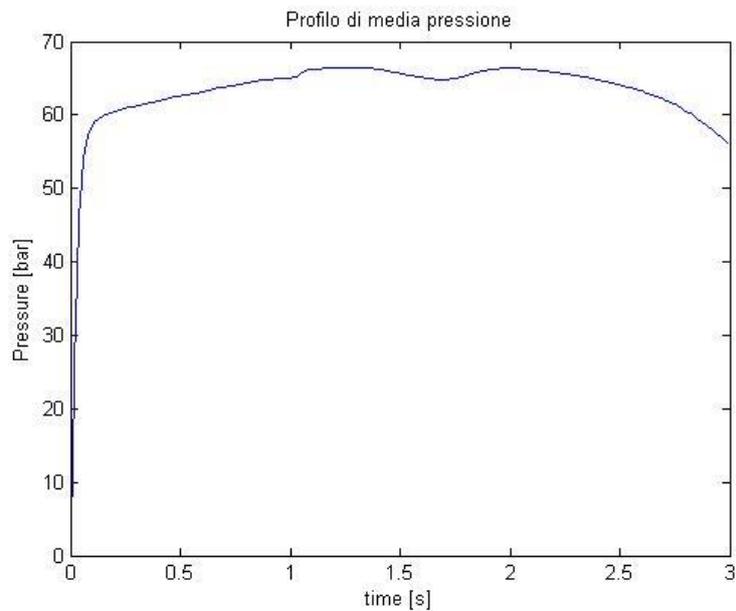


Figura 6.8: Andamento media pressione con errore

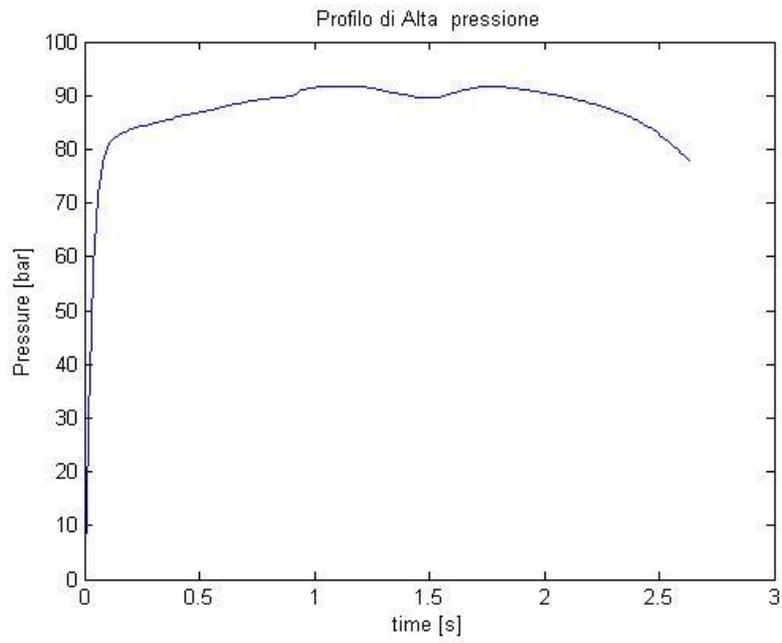


Figura 6.9: Andamento alta pressione con errore

Di seguito vengono riportati i grafici in cui viene messo in evidenza l'errore all'interno dei grafici.

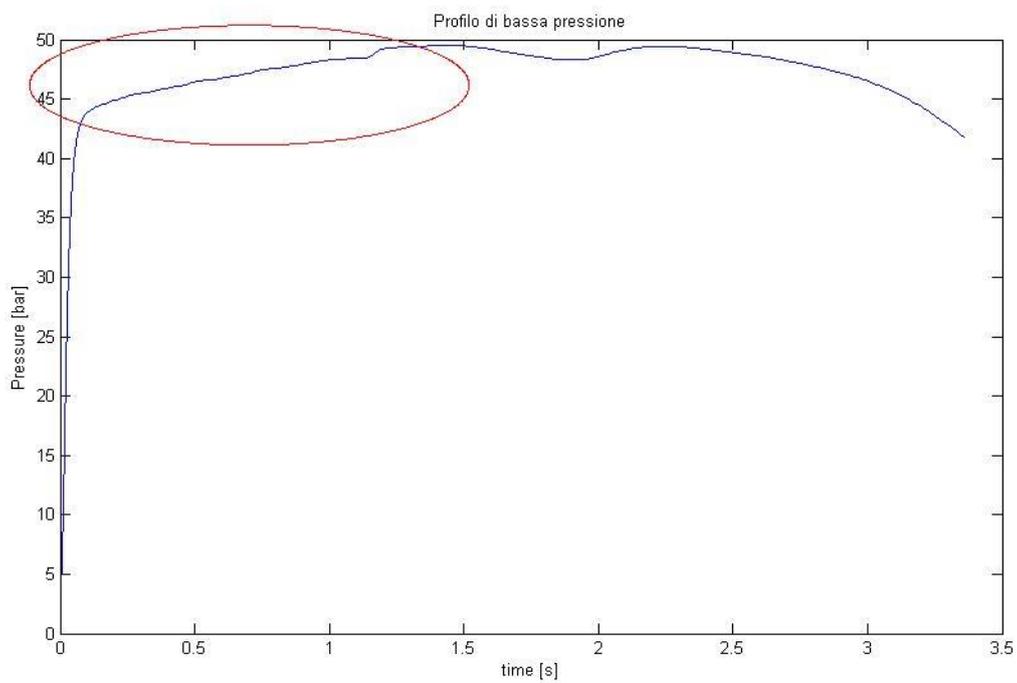


Figura 6.10: Evidenziazione dell'errore nel profilo di bassa pressione

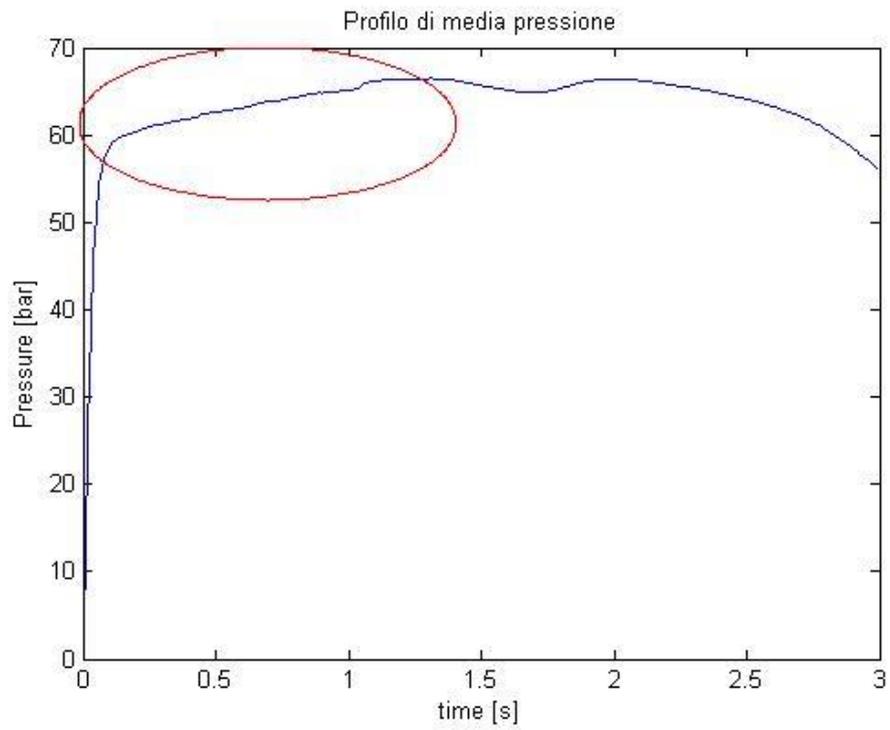


Figura 6.11: Evidenziazione dell'errore nel profilo di media pressione

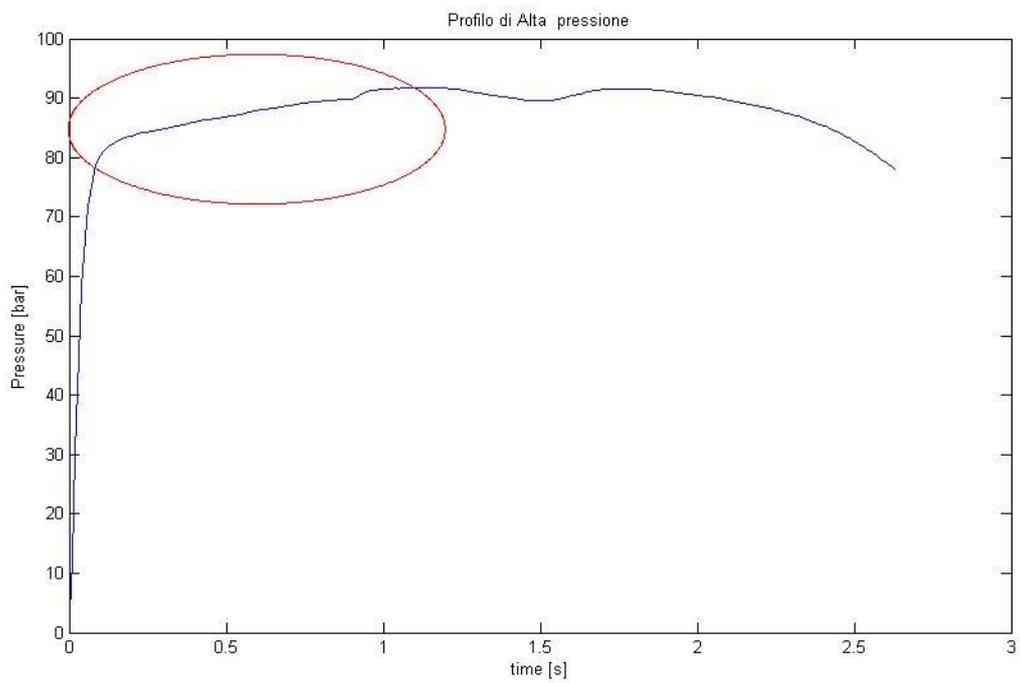


Figura 6.12: Evidenziazione dell'errore nel profilo di alta pressione

Di seguito vengono riportati i grafici in cui si mostra come questo errore sia stato corretto.

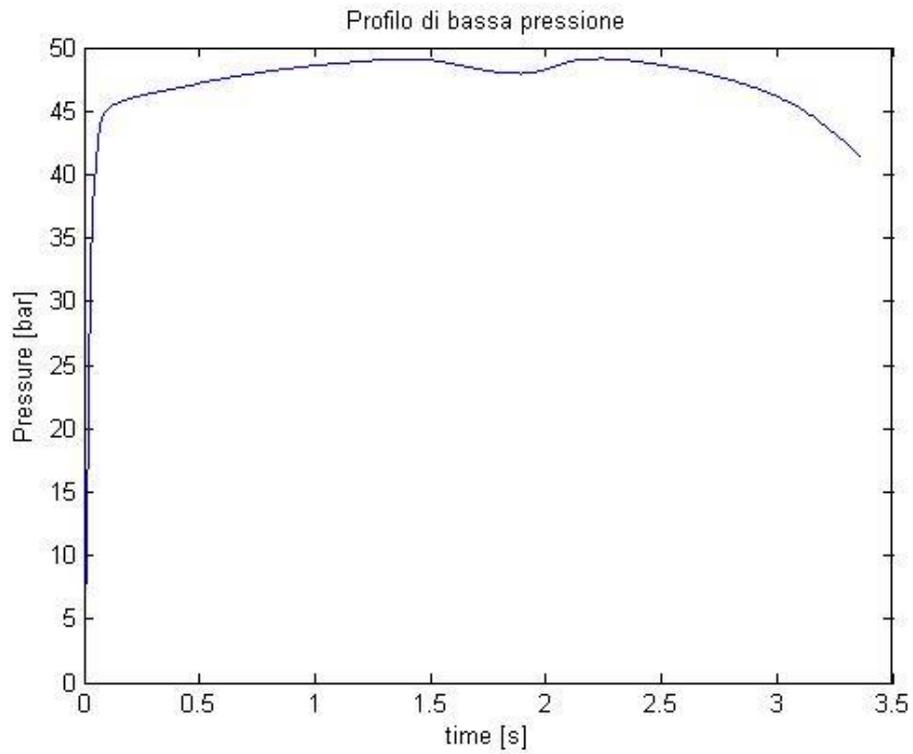


Figura 6.13: Andamento profilo di bassa pressione con correzione dell'errore

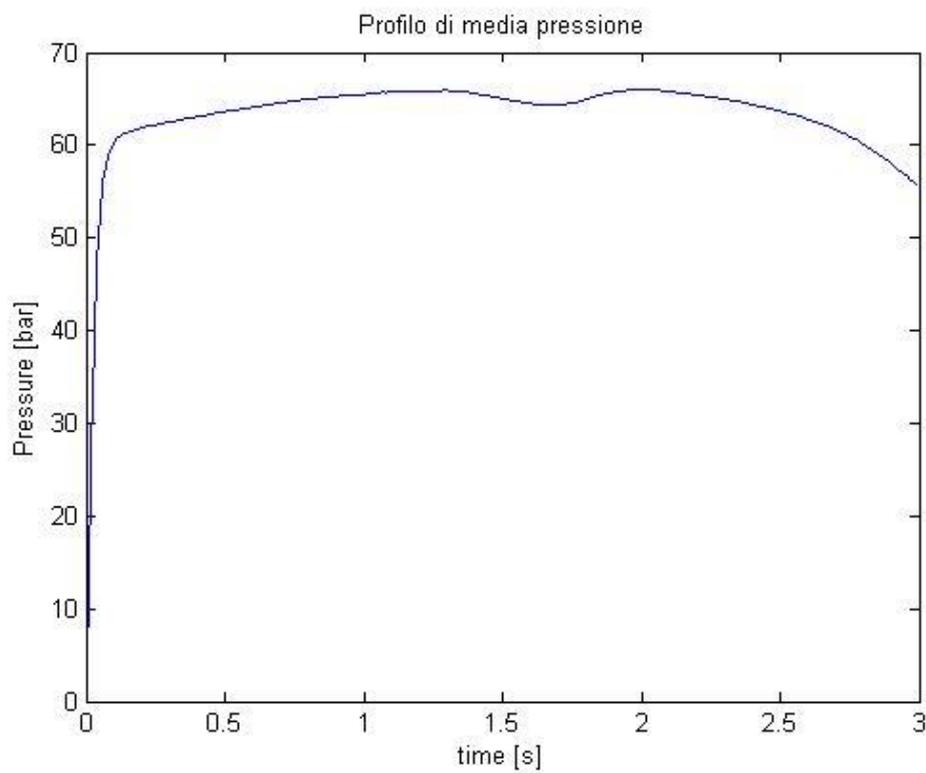


Figura 6.14: Andamento profilo di media pressione con correzione dell'errore

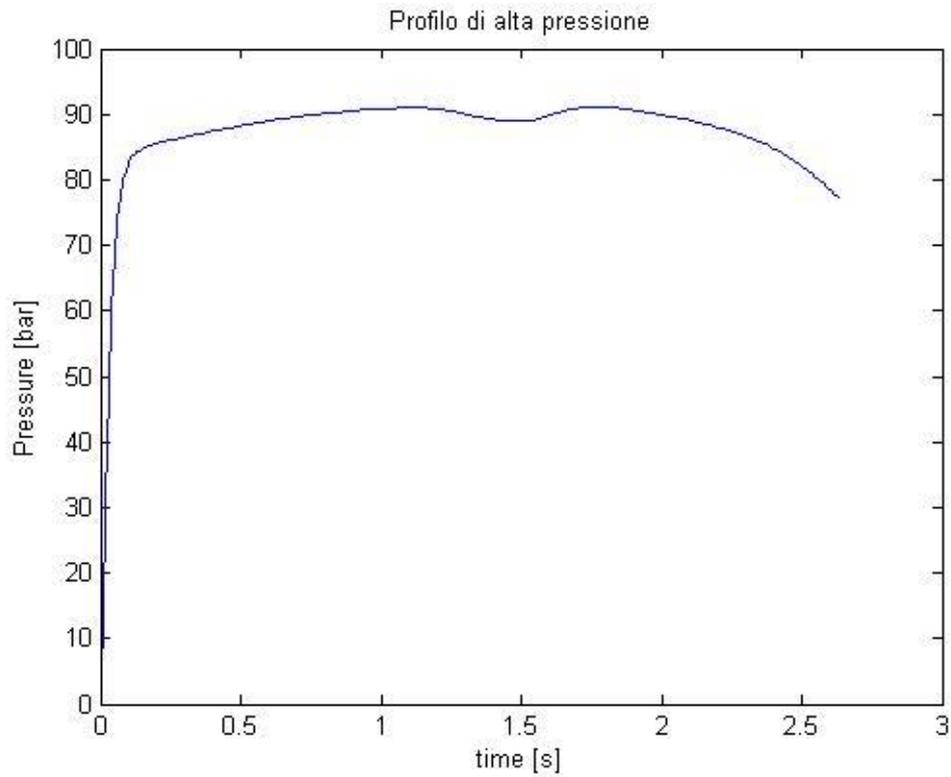


Figura 6.15: Andamento profilo di alta pressione con correzione dell'errore

Di seguito viene riportato il grafico che mostra come i grafici, senza l'erosione dell'ugello

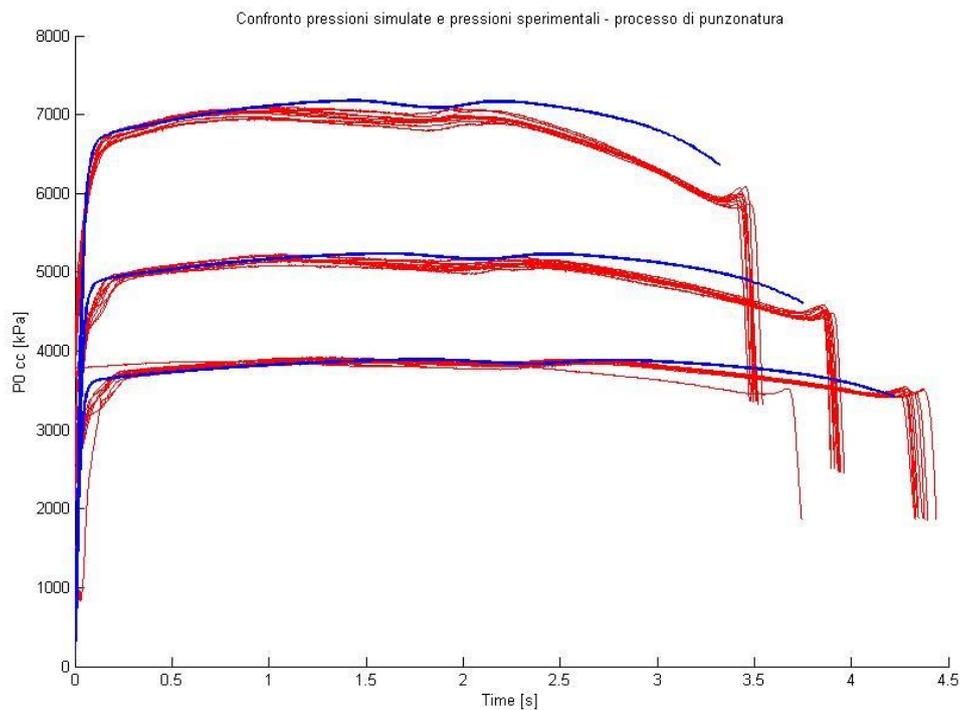


Figura 6.16: confronto pressioni simulate e sperimentali senza erosione dell'ugello

Quindi, come possiamo notare nei grafici riportati in fondo alla pagina precedente, seppur le curve sperimentali presentano un andamento corretto, non risultano essere esatte nella parte finale proprio a causa della mancanza di erosione dell'ugello. Di seguito viene riportato un'ingrandimento di tale parte.

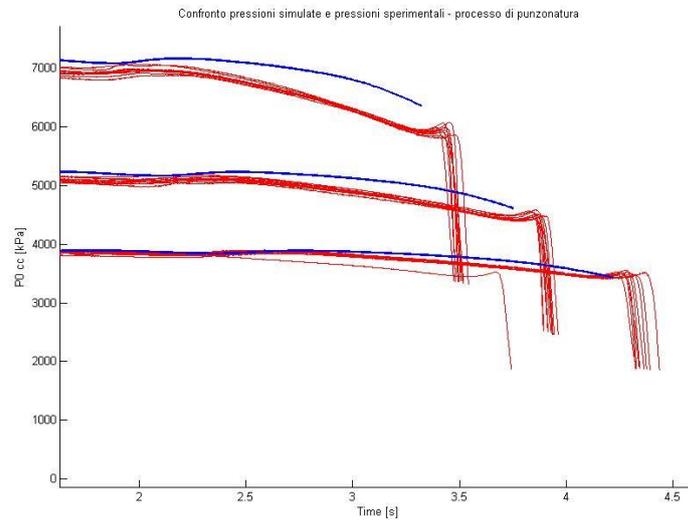


Figura 6.17: Ingrandimento parte finale dei profili di pressione

Andando ad impostare l'erosione dell'ugello possiamo notare come migliori il comportamento dell'andamento della pressione, come riportato di seguito.

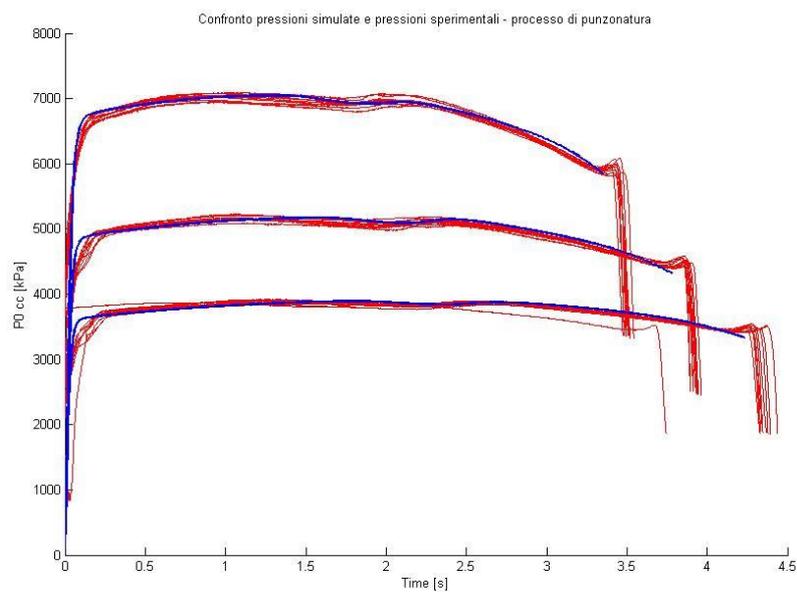


Figura 6.18: Andamento pressioni con erosione dell'ugello

Di seguito viene riportato l'ingrandimento della parte finale dei profili di pressione con l'erosione dell'ugello.

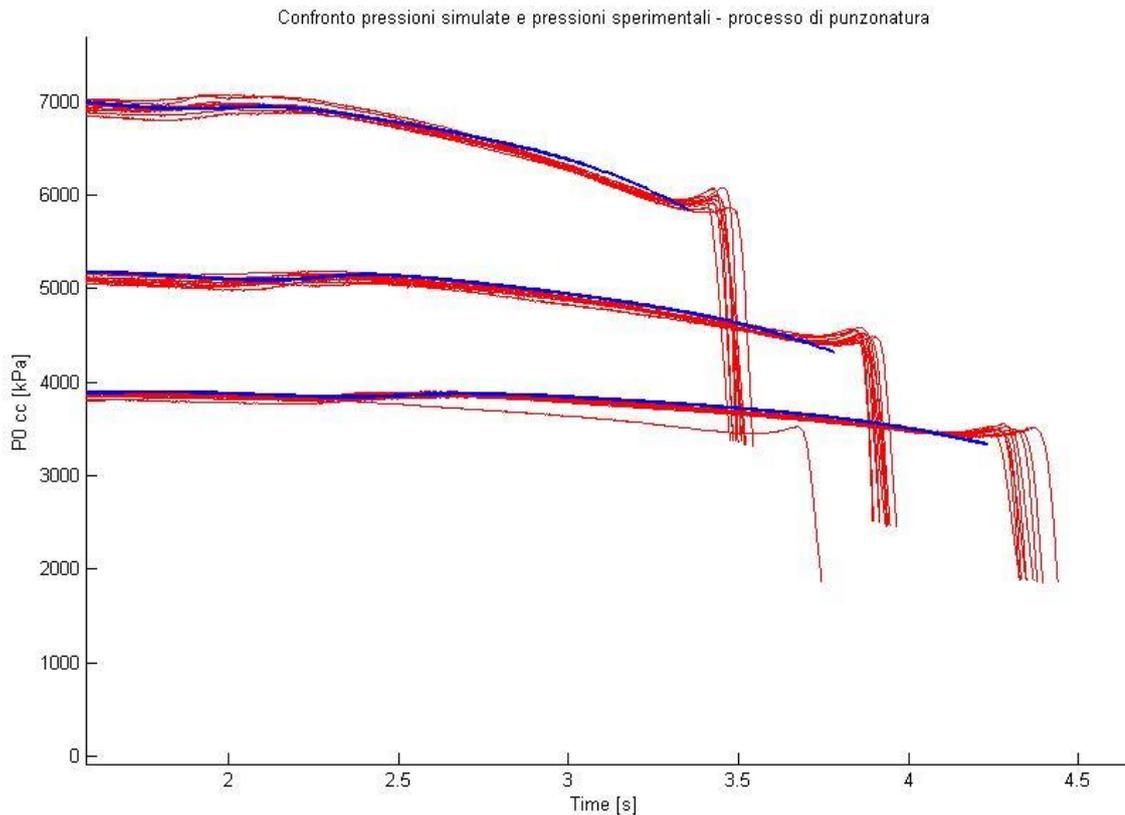


Figura 6.19: Evidenziazione della parte finale dei profili di pressione

Possiamo quindi notare come l'andamento delle pressioni risultino rappresentare correttamente in quanto le curve tendono a sovrapporsi, quasi perfettamente, alle curve sperimentali, eccetto per piccolo incremento della pressione ed un andamento della curva parabolico nella parte finale e che non viene modellata dal codice.

6.4: Il caso del colaggio

Il secondo caso che prenderemo in considerazione è rappresentato dal caso del riempimento della BARIA tramite la metodologia del colaggio, che, come già descritto in precedenza, è caratterizzata dal fatto che il grain viene colato all'interno del case in cui sarà presente una spina centrale.

Da studi precedentemente svolti, si è dimostrato come l'effetto di Hump, in tale caso di riempimento, sia legato all'orientazione delle particelle rispetto al fronte di fiamma, anziché alla segregazione particellare. Ottenuta tale variabile di interesse si ottiene la mappatura, che consiste nella creazione di una mappa, definita lungo la direzione radiale e assiale della BARIA, ed al cui interno vengono riportati le informazioni trasportate dalle probes mediate lungo le varie sezioni.

In base a tali valori la funzione di amplificazione, che sarà anch'essa una matrice, assume un determinato valore per ogni punto del propellente e che modificherà il valore di rateo di combustione puntualmente. Quando questo fattore di amplificazione sarà maggiore di 1 avremo un incremento del rateo di combustione rispetto a quello teorico, e quindi del valore di pressione, mentre quando sarà inferiore ad 1 avremo un decremento rispetto al valore teorico. Scegliendo i parametri dei valori limiti, maggiori di uno e minori di uno, possiamo andare a ricreare gli avvallamenti caratteristici dell'andamento di pressione in questione.

In tal caso la legge che regola la funzione di amplificazione è di tipo lineare e presenta la seguente forma:

$$f_{hump} = f_{amp_{min}} + (f_{amp_{max}} - f_{amp_{min}}) \cos \theta$$

Dove:

f_{hump} è il valore attuale della funzione di amplificazione

$f_{amp_{min}}$, $f_{amp_{max}}$, sono rispettivamente i valori scelti come limite superiore ed inferiore della funzione di amplificazione

θ rappresenta l'angolo tra la direzione assiale e la direzione della particella.

La mappa delle orientazioni che otteniamo dai programmi presenta un andamento come riportato di seguito.

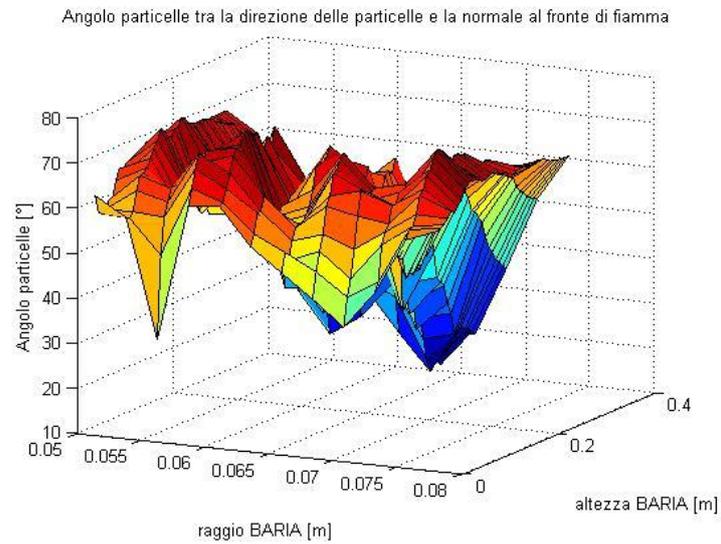


Figura 6.20: Mappa orientazione delle particelle

A seguito di tale mappatura, i profili di pressione che si ottengono si discostano notevolmente dagli andamenti di pressione sperimentali.

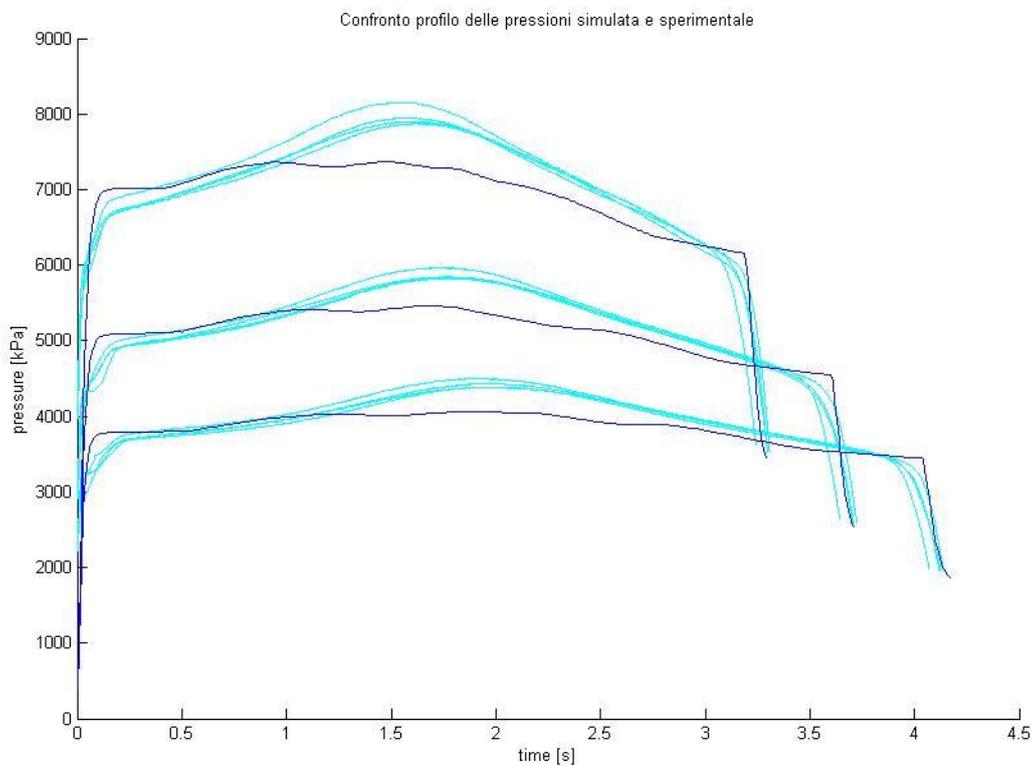


Figura6.21: Andamento profilo delle pressioni sperimentali e simulate

Questo discostamento è legato proprio all'orientazione delle particelle nella parte centrale.

Di fatto la rotazione delle particelle all'interno del programma risulterà essere regolata da due passi:

- Il primo: il calcolo l'angolo di rotazione calcolato tramite la formulazione presentata nel capitolo precedente, in cui avremo la differenza tra la direzione del flusso e la direzione attuale della particella, moltiplicata per l'inerzia di quest'ultima
- Il secondo: mediante il calcolo della matrice di rotazione ottenuta mediante il metodo dell'asse e dell'angolo di Eulero.

La ragione di tali angoli, risiede nel calcolo dell'angolo di rotazione delle particelle poiché queste tenderanno ad allinearsi lungo le linee di flusso. In particolare maggiore sarà il modulo della velocità sulla linea di flusso considerata e maggiore sarà l'intensità della rotazione della particella. Le ipotesi fatte e su cui si è lavorato sono state:

- Si è considerato ogni singolo strato di orientazione delle particelle lungo tutta l'altezza della BARIA. Successivamente ogni singolo strato è stato disposto lungo tutta l'altezza della baria andando a sostituire tutti gli strati con quello preso in considerazione. Questo ci ha permesso di verificare se, all'interno della mappa ottenuta, esistesse una mappa che permettesse di ottenere dei profili di pressione simulati simili a quelli sperimentali
- Inserire un valore di soglia al di sotto del quale fermare la rotazione delle particelle, così da evitare che anche la più piccola velocità potesse influire sulla rotazione
- Variare il valore della velocità di riferimento in maniera tale da variare l'inerzia delle singole particelle

Le mappe di orientazione ottenute applicando, la prima ipotesi presentata, mostrano come gli strati di orientazione più bassi, e quindi più lontani dalle bocche di colata, come gli andamenti non rispecchino assolutamente gli orientamenti previsti, come riportato dalle immagini sottostanti.

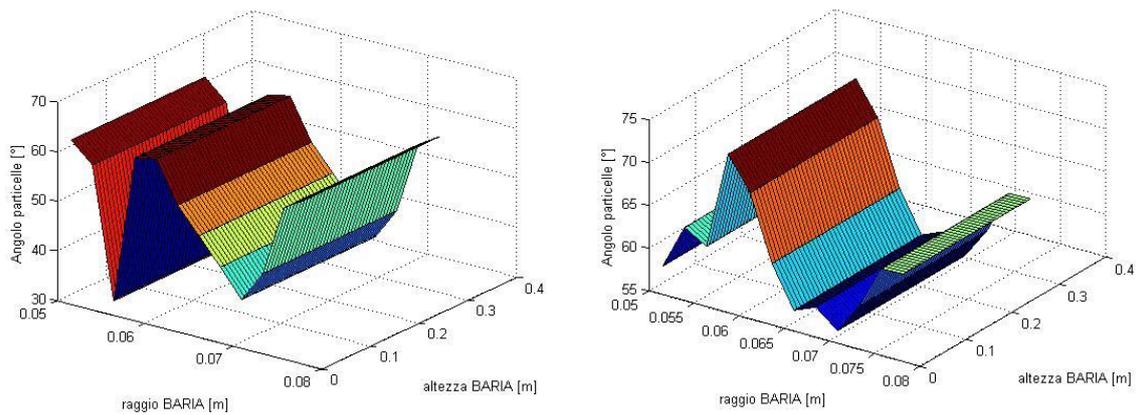


Figura 6.22: Orientazione delle particelle nelle sezioni alle quote $h=0,01m$ e $h=0,0315m$

I relativi andamenti risulteranno essere:

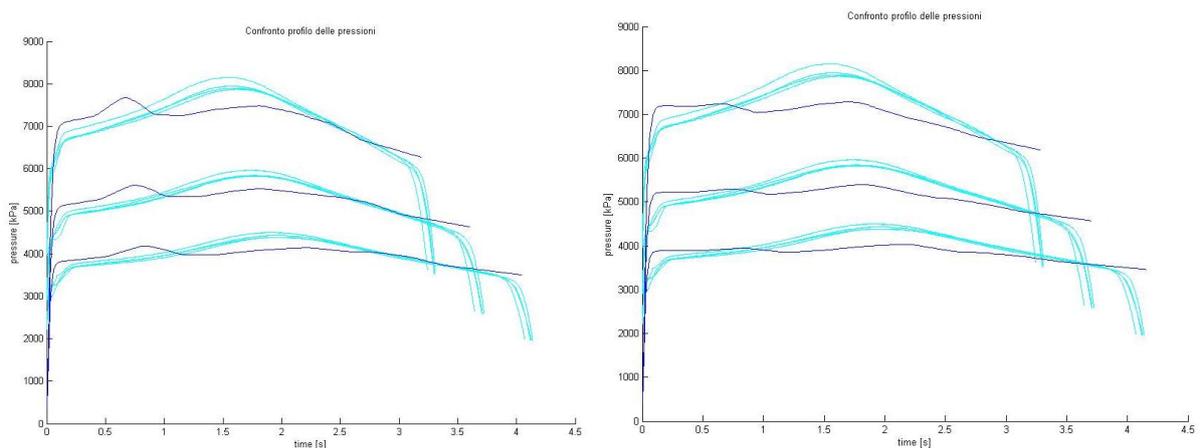


Figura 6.23: Confronto pressioni relativi agli orientamenti alla quota $h=0,01m$ e $h=0,0315m$

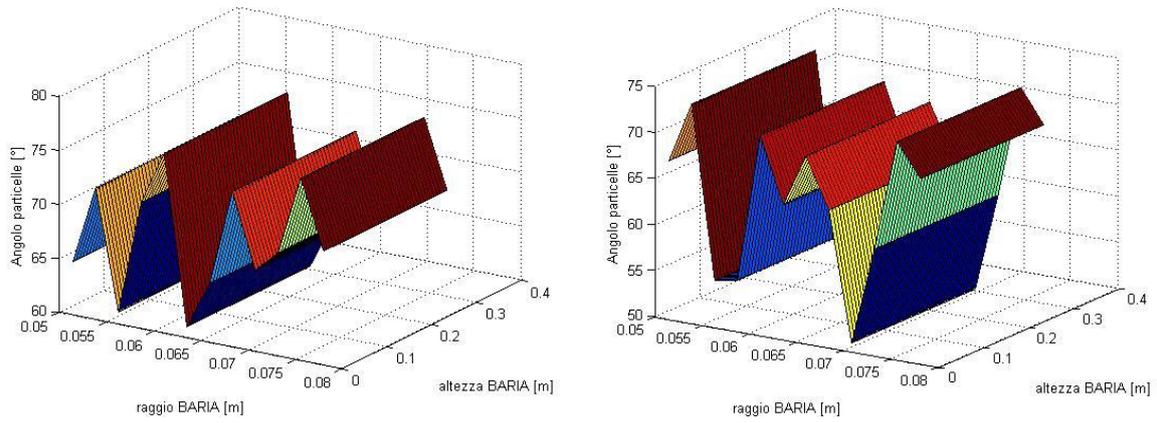


Figura 6.24: mappa orientazione particelle alle quote h=0,0746m e h=0,1177m

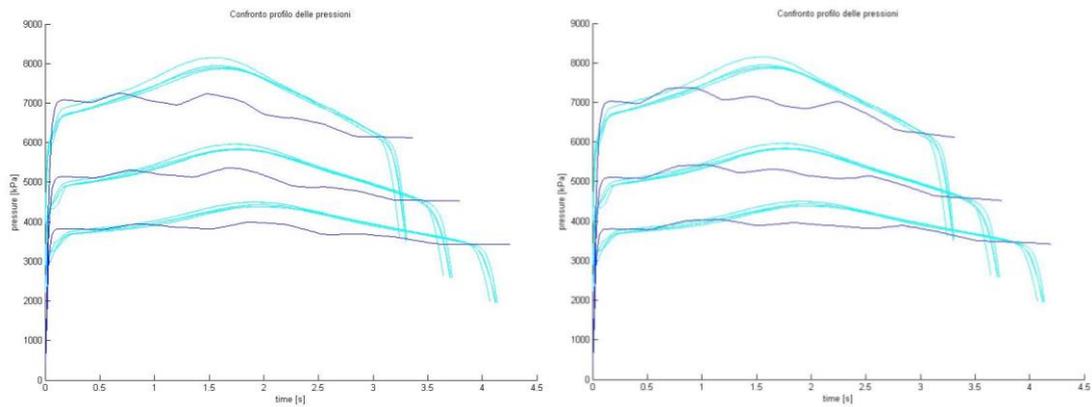


Figura 6.25: Confronto pressioni relativi agli orientamenti alla quota h=0,0746m e h=0,1177m

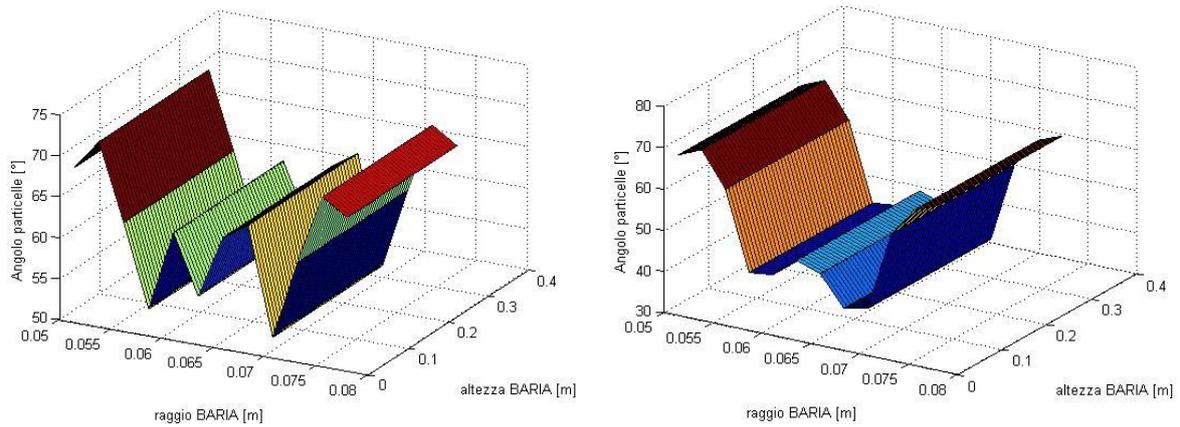


Figura 6.26: mappa orientazione particelle alle quote h=0,1751m e h=0,2038m

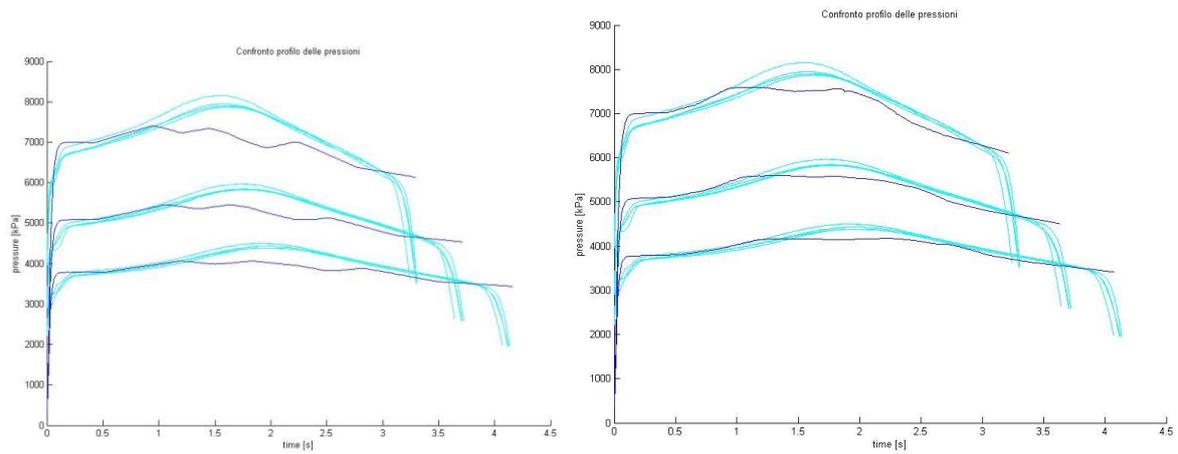


Figura 6.27: Confronto pressioni relativi agli orientamenti alla quota $h=0,1751\text{m}$ e $h=0,2038\text{m}$

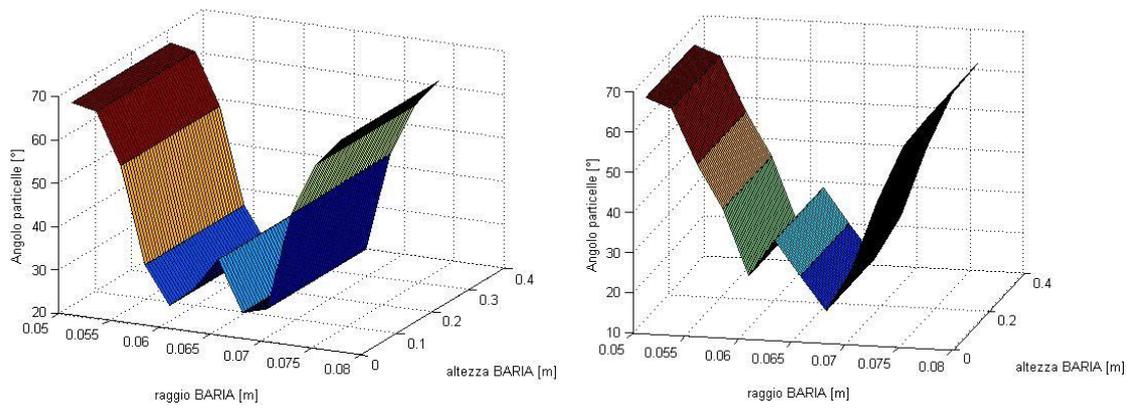


Figura 6.28: mappa orientazione particelle alle quote $h=0,2397\text{m}$ e $h=0,2541\text{m}$

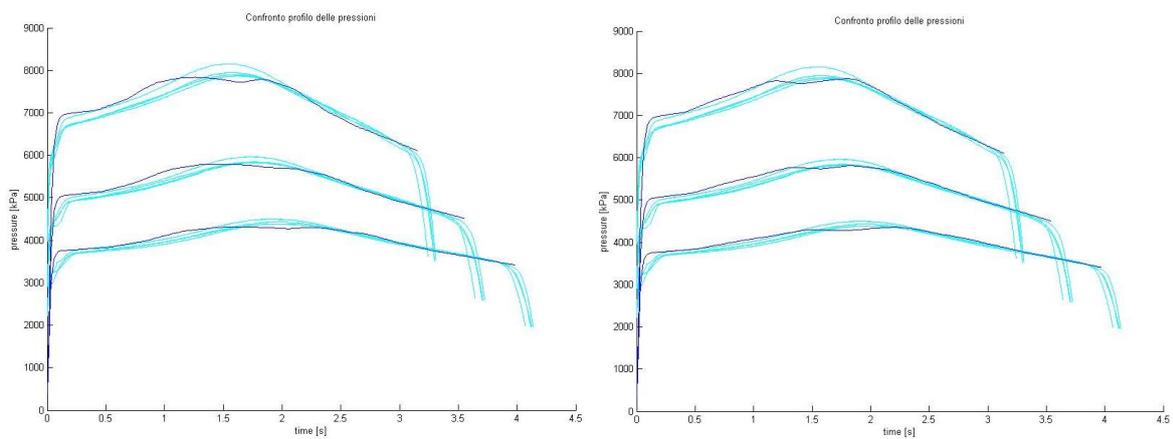


Figura 6.29: Confronto pressioni relativi agli orientamenti alla quota $h=0,2397\text{m}$ e $h=0,2541\text{m}$

Come è possibile notare all'interno dei grafici riportati nelle pagine precedenti, mano a mano che la sezione considerata da estendere su tutta la BARIA, si avvicina alle bocche di colata l'orientazione delle particelle tende ad avvicinarsi a quella ricostruita e quindi l'andamento migliora. Questo fenomeno probabilmente risulta essere legato al processo di colata ed alla presenza delle bocche di colata stesse. Infatti, andando ad esaminare i differenti livelli, possiamo notare come i livelli inferiori presentino un errore notevole nell'orientazione, mentre quelli più vicini alle bocche di colata presenti degli andamenti ragionevolmente vicini a quelli corretti. Avendo considerato all'interno del processo di colaggio un fluido monofase, probabilmente la causa di questi andamenti è legata proprio al fatto che le particelle si influenzino durante tale processo e quindi esistono delle differenti velocità a livello locale soprattutto in corrispondenza del punto delle bocche di colaggio determinando quindi che la velocità e la rotazione delle particelle siano presenti solamente nei primi istanti della colata e che essa risulti ininfluenza negli altri istanti della colata. Questa supposizione viene fatta proprio andando a considerare i grafici riportati precedentemente in quanto, essendo la rotazione a diverse altezze della BARIA, il propellente che si troverà nella zona più bassa tenderà a ruotare maggiormente rispetto a quello colato da minor tempo e che risulta essere presente nella zona più vicina alle bocche di colata.

Altro elemento influenzante il profilo delle curve risulta essere legato al rateo di erosione dell'ugello.

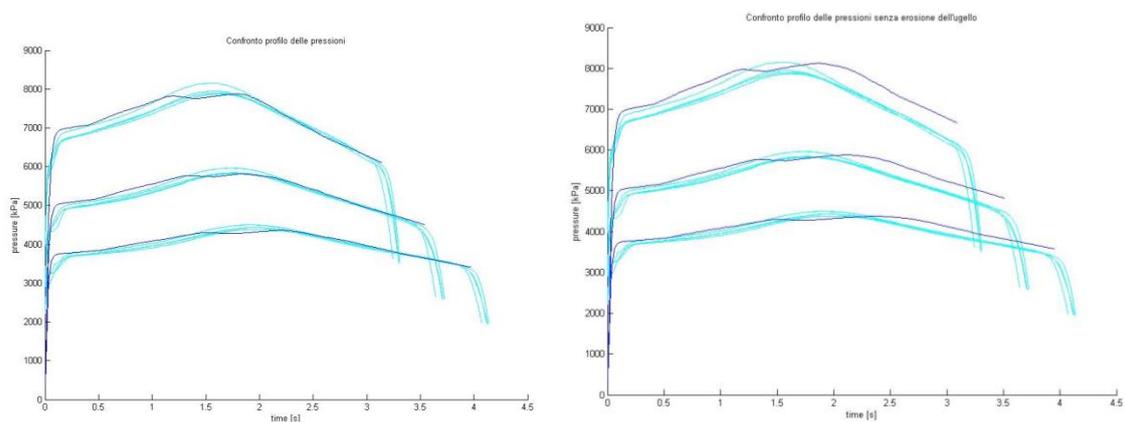


Figura 6.30: Confronto profili di pressioni con e senza erosione dell'ugello

Infatti nel caso in cui questo parametro non venga impostato si può notare un notevole discostamento nella parte finale del grafico, come riportato nei grafici soprastanti.

La seconda ipotesi verificata, al fine di migliorare le curve, è stata quella di utilizzare un limitatore della rotazione delle singole particelle andando ad impostare un limite inferiore al di sotto del quale si è imposta una rotazione nulla delle particelle. Per fare ciò si sono considerate una decina di particelle ad un'altezza all'interno della BARIA e per un valore differente in direzione radiale all'interno di un singolo piano, in quanto possiamo supporre che l'andamento di esse sia pressoché uguale per tutti i piani. Andando a selezionare un piccolo insieme randomico di particelle si è anzitutto ottenuto il modulo della velocità di ognuna di esse al variare del tempo andando a verificare al di sotto di quale soglia la velocità potesse generare una rotazione pressoché ininfluenza.

Di seguito viene riportato il grafico che mostra i moduli di velocità delle particelle considerate al variare del tempo e con la linea tratteggiata si è indicata la soglia prescelta.

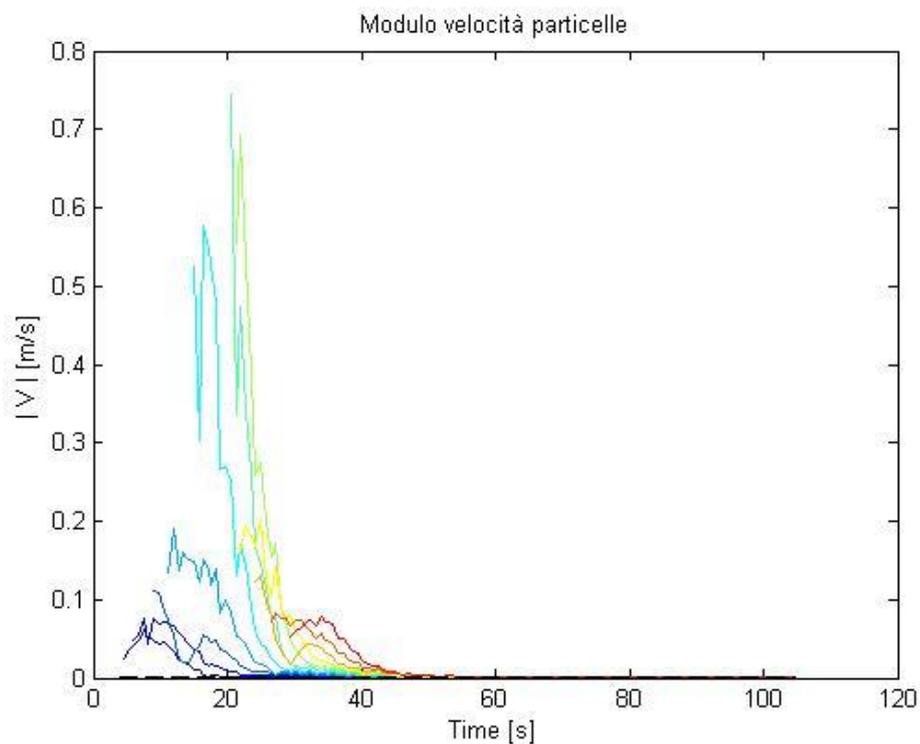


Figura 6.31: Modulo delle velocità delle particelle selezionate

Di seguito viene riportata un'immagine che mostra un ingrandimento della soglia e dei moduli di velocità.

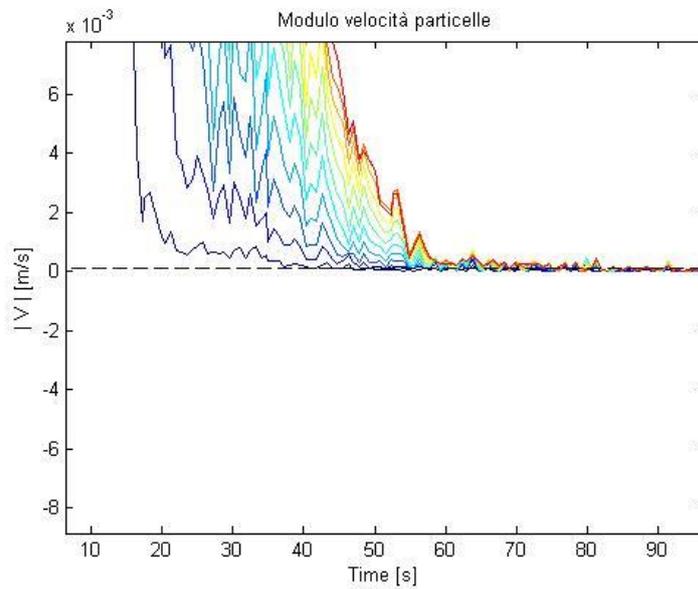


Figura 6.32: Ingrandimento grafico modulo delle velocità ed evidenziazione della soglia

Una volta ottenuto il valore di velocità di soglia, questo è stato riportato all'interno dei grafici relativi all'orientazione delle medesime particelle, per poter verificare se il limite impostato fermasse la rotazione delle particelle in una zona in cui ognuna di esse aveva terminato l'orientazione, come mostrato nel grafico sottostante.

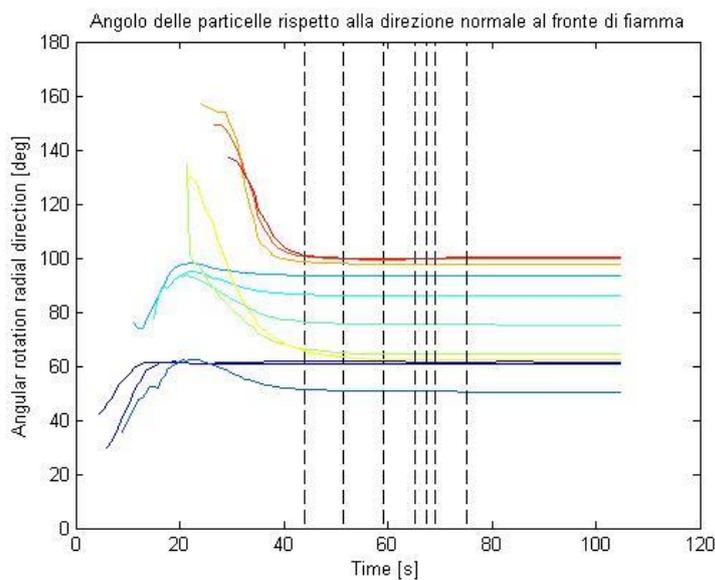


Figura 6.33: Angoli delle particelle e soglie definite per ogni singola particella

Questa metodologia aveva il duplice scopo di:

- Migliorare i profili di pressione
- Alleggerire a livello numerico la computazione delle rotazioni, e di conseguenza, delle orientazioni di ogni singola particella all'interno del grain

Impostando un valore limite della velocità si creava una soglia per ogni singola particella; confrontando i grafici ottenuti tra i profili di pressione con una certa soglia ed il profilo senza soglia, non si ottenevano variazioni apprezzabili dei profili di pressione.

Di seguito viene riportato il grafico relativo ai profili di pressione con le soglie di velocità inferiori scelte, che sono 1/100, 1/1000 ed 1/10000, ed il profilo di pressione senza alcuna soglia.

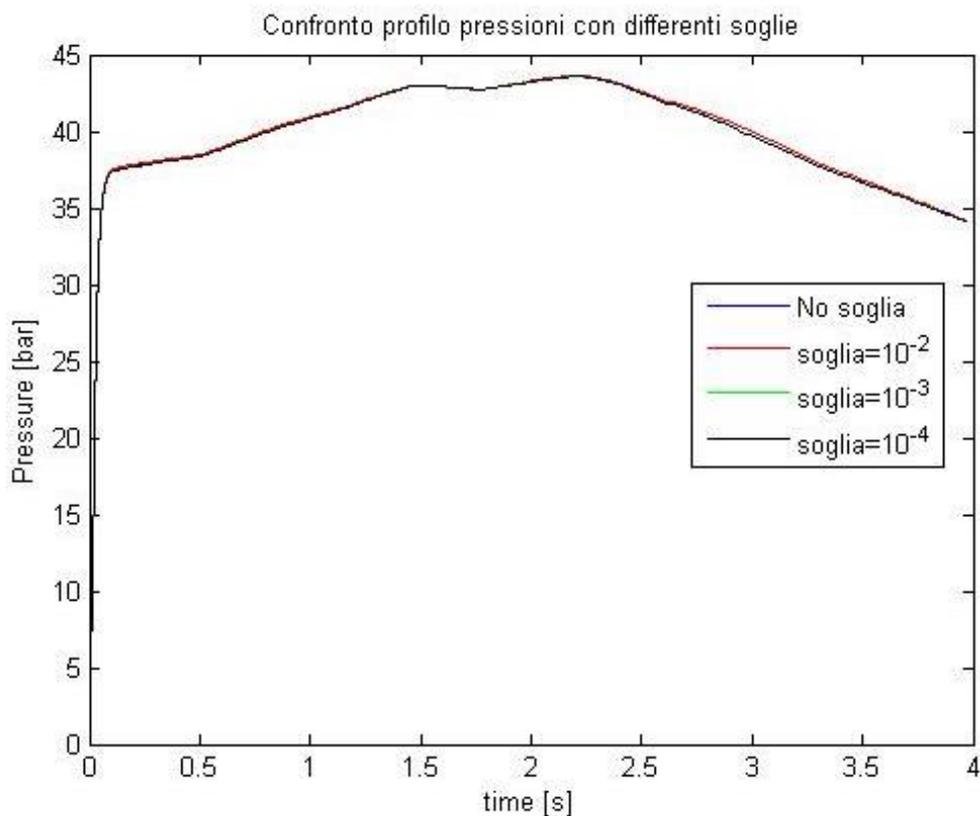


Figura 6.34: Confronto profili di pressione con differenti soglie e curva senza soglia

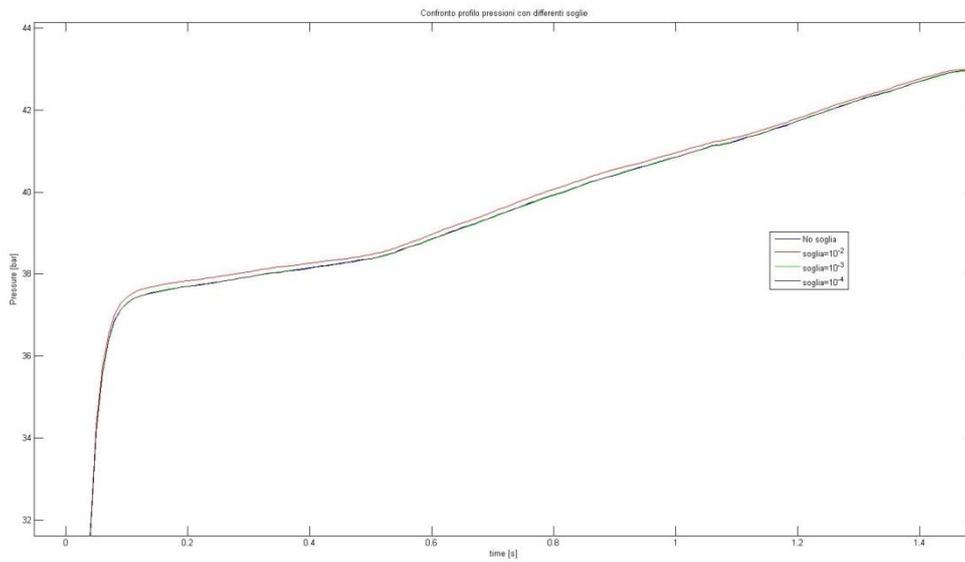


Figura 6.35: Confronto profili di pressione con differenti soglie e curva senza soglia parte iniziale

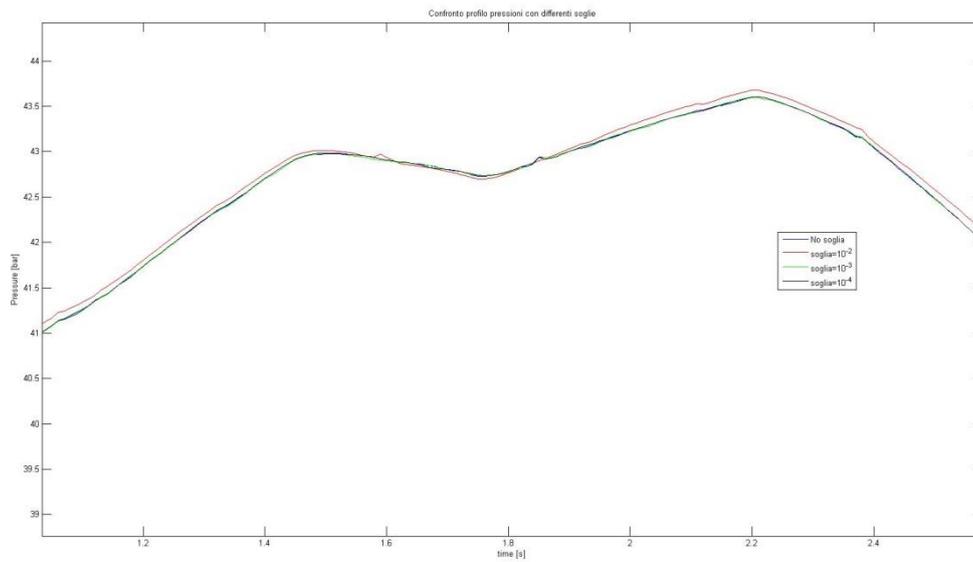


Figura 6.36: Confronto profili di pressione con differenti soglie e curva senza soglia parte centrale

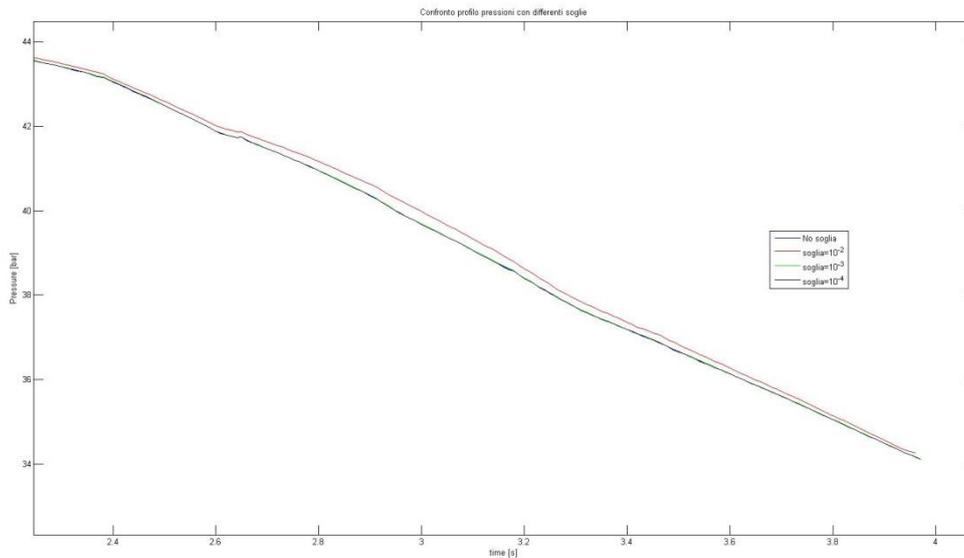


Figura 6.37: Confronto profili di pressione con differenti soglie e curva senza soglia parte finale

Andando a confrontare le curve si è notato come l'impostazione di una soglia non generi nè una variazione apprezzabile tra i profili di pressione senza alcuna soglia ed i profili di pressione in cui venga impostata, nè un notevole alleggerimento a livello computometrico durante l'esecuzione del programma, per tali motivi questo approccio non è stato implementato.

Infine l'ultima ipotesi che si è andati a verificare riguarda la variazione dell'inerzia delle particelle legata al parametro della velocità di riferimento.

Sono state testate 6 differenti velocità di riferimento, come riportato nella tabella sottostante.

Colaggio	
V_{ref} [m/s]	5
	2
	0,8
	$2 \cdot 10^{-1}$
	$2 \cdot 10^{-2}$
	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabella 6.38: Valori della velocità di riferimento utilizzate

Di seguito vengono riportati i grafici in cui vengono poste a confronto le curve con le differenti velocità di riferimento.

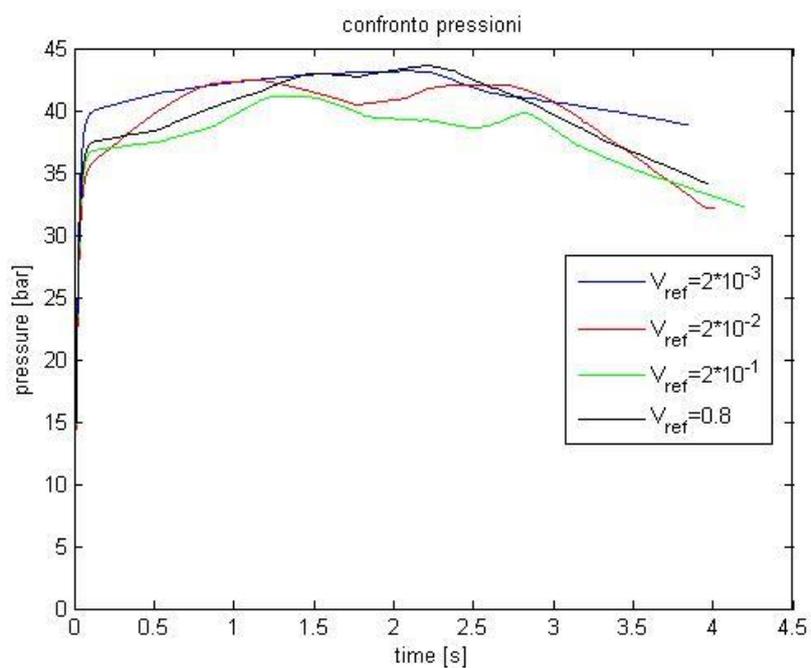


Figura 6.39: Grafico profilo di pressioni con velocità di riferimento basse

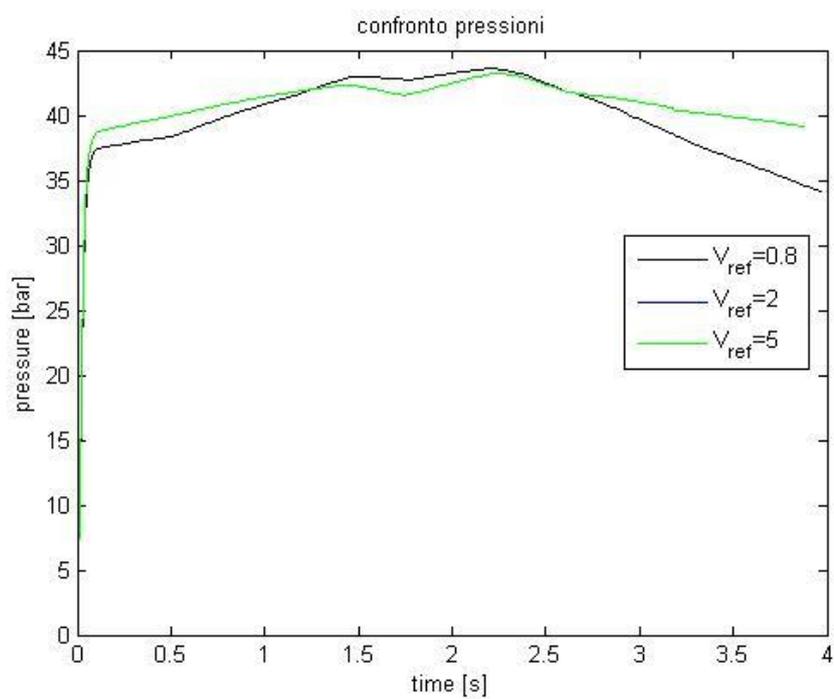


Figura 6.40: Grafico profilo di pressioni con velocità di riferimento alte

All'interno del grafico 6.39, possiamo notare come al diminuire delle velocità di riferimento utilizzate le curve di pressione tendano a non seguire più il modello delle pressioni di colaggio sperimentale. Questo fenomeno è legato al fatto che l'inerzia delle particelle tende a diminuire, in quanto il termine della velocità di riferimento risulta essere al denominatore facendo tendere il rapporto al valore limite massimo pari ad 1. Quindi più il valore della velocità di riferimento sarà basso, più le particelle saranno influenzate a ruotare maggiormente anche a seguito di piccole perturbazioni all'interno del campo di moto e per piccolissime velocità. In particolare la curva blu all'interno del grafico mostra come, per velocità di riferimento eccessivamente piccole, il profilo di pressione non segua più il quello che ci si aspetterebbe in quanto la rotazione delle particelle avverrebbe anche a seguito di rumore bianco e quindi la più piccola perturbazione permette alla particella di ruotare.

All'interno del grafico 6.45, sono state poste a confronto le curve con il più alto valore della velocità di riferimento. In particolare possiamo notare come per velocità di riferimento superiori ad 1 il grafico si sovrapponga esattamente. Questo è legato ad un'eccessiva inerzia della particella che rende praticamente nulla la rotazione in quanto il rapporto tra la velocità e la velocità di riferimento tenderà a zero, non permettendo alla particella di effettuare alcuna rotazione rispetto alle condizioni iniziali con cui essa fuoriesce dalle bocche di colata.

Questo risultato ci mostra come per valori eccessivamente piccoli o eccessivamente grandi di velocità di riferimento le informazioni vengano perse ed in particolare la velocità di riferimento migliore risulta essere pari a $V_{ref} = 0.8$ che corrisponde circa al valore massimo del modulo di velocità delle particelle relative alle linee di flusso con intensità maggiore.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti all'interno di questo elaborato dimostrano come, le bibliografie consultate per la creazione dei programmi e degli script e la comprensione fisica delle fenomenologie delle differenti colate, abbiamo messo in evidenza quali fossero effettivamente i principali fenomeni legabili all'effetto di Hump che determina l'andamento dei profili mostrati.

Infatti si è visto come nel caso del riempimento del motore tramite il metodo di punzonatura, il fenomeno reologico di disposizione delle particelle di differenti dimensioni e la loro concentrazione in differenti punti del motore, sia cruciale alla generazione di questo fenomeno. Nel caso del riempimento tramite la metodologia del colaggio si è visto come, particelle di forma ellittica, tendano a ruotare, secondo le linee di flusso e secondo le intensità delle velocità e in cui, se l'angolo tra la direzione della particella e la direzione radiale risultasse pressoché nullo, determinano un aumento del rateo di combustione. Mentre per le particelle più vicine alle pareti si è dimostrato come questo fenomeno sia nettamente inferiore, legato al fatto che l'angolo tra direzione della particella e la direzione radiale risulti essere maggiormente accentuato; predisponendo la particella in direzione ortogonale al fronte di fiamma e non permettendo l'interazione con una maggiore quantità di grain.

Confrontando le simulazioni ottenute con i dati sperimentali forniti dalla ditta AVIO s.p.a. si è poi potuto confermare come l'andamento delle pressioni simulate sia simile all'andamento delle pressioni sperimentali per il caso della punzonatura. Questo non accade perfettamente nel caso del colaggio in quanto questo metodo fornisce dei risultati in linea con la sperimentazione, ma che non spiegano pienamente gli andamenti sperimentali.

Questi discostamenti, sono causati da:

- 1) Il fatto che le particelle, nel fluido monofasico considerato, continuano a ruotare risentendo del getto nel punto di colata. Questo si perpetua anche per gli strati inferiori per ogni istante di tempo.
- 2) Non sono stati considerati altri elementi che potrebbero essere utili per la determinazione dell'orientazione corretta

Quindi possibili sviluppi futuri riguarderanno il miglioramento del codice legato alla determinazione delle rotazioni, al fine di poter includere tutti i fenomeni fisici per ottenere un grafico che possa approssimare in maniera migliore i profili di pressione sperimentali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

G.P. Sutton, O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, Seventh Edition, A. Wiley Interscience Publication

P.G. Hill, C.R. Peterson, *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, Second Edition, Reprinted by Addison-Wesley Publishing Company, 1992

Ing. Roberto Bertacin, *Modellazione Tridimensionale del processo di Combustione di un razzo a Propellente solido*, Tesi di dottorato, Università di Bologna, 2013

M. Straccia, *Analisi di campioni inerti di propellente solido mediante microtomografia ad X*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Anno Accademico 2011/2012

L.Zama, *Studio del Processo di Produzione di un Motore a Solido in Piccola Scala*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Anno Accademico 2013/2014

A. Jommi, *Studio e Ricostruzione delle Distribuzioni Granulometriche Interne al Grano in Motori a Propellente Solido*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Anno Accademico 2013/2014

B. Brauers, B. Goorden, M. Angelone, E. Gautronneun, *Qualification and Production of the VEGA Solid Rocket Motor Igniters*, AIAA paper 2009-5322, 45th Joint Propulsion Conference & Exhibit, Denver, Colorado, August 2009

V. Berardi, *Operatore gradiente in coordinate curvilinee*, Dipartimento Interateneo di Fisica, Università e Politecnico di Bari, 2007

F. Maggi, L.T. DeLuca, A. Bandera, V.S. Subith, A. Annovazzi, *Burn-rate Measurement on Small-scale Rocket Motors*, Defence Scienze Journal, Vol. 56, No. 3, July 2006, pp. 353-367, DESIDOC

<http://docenti.unicam.it/tmp/3608.pdf>

K. Kitagawa, T. Shimada, H. Hasegawa, M. Fukunaga, H. Miyachi, *Correlation of Midweb Anomaly with Microstructure of Composite Propellant*, AIAA paper 2010-7165, 46th Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, July 2010

<http://wiley-vch.e-bookshelf.de/products/reading-epub/product-id/651765/title/Applications%2Bof%2BTurbulent%2Band%2BMulti-Phase%2BCombustion.html>

W.Cai, P. Thakre, V. Yang, *A Model of AP/HTPB Composite Propellant Combustion in Rocket-Motor Environments*, Combust. Sci. and Tech. 180: 2143-2169, (2008)

K. Johanson, *Why is Understanding Segregation Mechanisms so Important?*, Material Flow Soluzioni Inc.

J. Mosby, S.R. de Silva, G.G. Enstad, *Segregation of Particulate Materials – Mechanisms and Testers*, Kona, No. 14, 1996, pp. 31-43

D.B. Hastie, P.W. Wypych, *Experimental Investigation Into Segregation of Bulk Solids During Gravity Falling od Storage Bins*, Australia

<https://www.flow3d.com/home/resources/cfd-101/modeling-techniques/vof-whats-in-a-name>

M. Sabattini, *Sviluppo di un modello zero-dimensionale del processo di erosione di ugelli in grafite*, Università di Bologna, Anno Accademico 2010/2011

RINGRAZIAMENTI

E mo? Finalmente siamo giunti al traguardo per il sollievo di tanti e la felicità di tutti! Perché iniziare con la domanda “E mo?”? Rispondo a questa domanda con un’altra, forse non è chiaro?

Anzitutto desidero ringraziare il professor Ponti per la possibilità di svolgere tale tesi e perché nonostante gli innumerevoli impegni fosse sempre disponibile ad aiutarmi e consigliarmi nuove strade da esplorare durante tutta la tesi.

Ringrazio Roberto per tutti i consigli fornitimi nel poco tempo che ha trascorso in laboratorio e di cui se ne sente la mancanza ad ogni livello.

Ringrazio la mia famiglia per tutto il sostegno e per quello che sono oggi, per avermi guidato ed insegnato con pazienza infinita formando la persona che sono oggi. Soprattutto ringrazio i miei nipoti che si mettevano al mio fianco a fare i compiti assieme a me, continuando a domandarmi se avessi finito.... adesso bimbi vi posso dire che ho finito i compiti, possiamo giocare!

Ringrazio la mia morosa Giorgia, che nonostante le mie tensioni, le mie uscite ogni tanto poco felici con le mie battutacce ed il pesante periodo di tesi, mi ha sempre sorretto, dato il coraggio di fare e non buttarmi giù quando qualcosa non mi riusciva e di come insieme affrontiamo le sfide e cresciamo. Sono fortunato a poter avere accanto te, TI AMO. Ma soprattutto grazie dei “book”!

La famiglia Guerra/Perazzini che mi ha accolto e mi accoglie ogni giorno, in una maniera unica ed incredibile.

Gli amici di Rimini, che sono una quantità innumerevole! Nonostante la mia scostanza magari nella mia presenza, mi avete dimostrato come la nostra amicizia vada al di là di questo e di come assieme si cammini crescendo ogni giorno.

A Lilia ed Egidio, per la loro amicizia e per il fatto che non ci si limiti ad imparare le cose a pappardella, ma si vada a fondo nello studio alla scoperta di ciò che ci circonda.

Agli amici di Forlì per gli anni stupendo trascorsi, nel tempo trascorso qui.

Ai Cagnoloni del mio appartamento “ottomatti”, per gli anni in appartamento. Ci sarebbero infinite cose da dire ed una sola tesi non basterebbe per tutto. Grazie per i momenti insieme siete unici.

Agli “+ o - ingegneri” per tutte le risate e le serate passate in compagnia e per le battute che penso capiamo solamente noi!

Ai magici ed unici Lindy Garage! Per l’allegria e per lo sfogo e le serate in compagnia ballando lindy hop, anche se non sono granché come ballerino!

Grazie mille a tutti e concludo questi ringraziamenti citando Antoine de Saint-Exupéry:

“Se vuoi costruire una barca, non radunare uomini per tagliare legna, dividere i compiti e impartire ordini, ma insegna loro la nostalgia per il mare vasto e infinito”

Perciò signori e signore il viaggio ha inizio, vento in poppa perché, come ogni giorno, ma a maggior ragione oggi, si riparte per una nuova avventura alla scoperta di tutto ciò che ci circonda e ci meraviglia senza mai stufarci, grazie a Dio!

Matteo Sabattini

Forlì 14/07/2016