

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi comparativa di modi per la misura della
velocità di regressione in endoreattori a propellenti
ibridi**



Relatore:

Prof. Dario Pastrone

Candidato

Irinel Ciprian Tulbure

marzo 2018

SOMMARIO	4
NOMENCLATURA	7
Capitolo 1: Introduzione ai motori ibridi	10
1.1) HYBRID ROCKET ENGINES (HRE)	11
1.2) SINTESI FUNZIONAMENTO DEGLI ENDOREATTORI IBRIDI	13
1.3) VANTAGGI E SVANTAGGI	14
1.4) IL PROBLEMA DELLA BASSA VELOCITA' DI REGRESSIONE	16
1.5) METODOLOGIE PER AUMENTARE LA VELOCITA' DI REGRESSIONE: uso dei combustibili bassofondenti	19
1.6) METODI DI STUDIO	20
2.1) INTRODUZIONE DEI METODI USATI	25
2.1.1 END POINT TECHNIQUE	25
2.1.2 INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE	26
2.1.3 CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE	28
2.1.4 MODELLO BALISTICO	31
2.2) DESCRIZIONE DEL TEST	34
Tabella 4.2.1: condizioni iniziali [2]	35
Capitolo 3: Analisi dei dati	36
3.1 TECNICA END POINT	36
3.2 METODO INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE	38
3.2.1 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA PRESSIONE IN CAMERA DI COMBUSTIONE	38
3.2.2 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI OSSIDANTE	39
3.2.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL DIAMETRO	41
3.2.4 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA VELOCITA' DI REGRESSIONE	42
3.2.5 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI MASSA	44
3.2.6 Gox VS RATE	45
3.3 METODO KUMAR	46
3.3.1 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA VELOCITA' DI REGRESSIONE	46
3.3.2 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI MASSA	47
3.3.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL DIAMETRO	48
3.4 CONFRONTO KUMAR VS HEISTER	49

3.4.1 ANALISI COMPORAMENTO ANOMALO DEL MODELLO KUMAR	52
3.4.2 CONCLUSIONI COMPORAMENTO ANOMALO KUMAR	58
Capitolo 4: Conclusioni	60
Bibliografia.....	62

SOMMARIO

L'obiettivo del lavoro è quello di fare uno studio comparativo sulla misura della velocità di regressione in endoreattori a propellenti ibridi in modo da vedere se, con metodi più diretti e immediati, si riesce ad avere una precisione accettabile riducendo la complessità del problema.

Per questo motivo andremo ad analizzare 3 metodi:

- End point technique
- Integral averaging technique
- Chamber pressure based technique

Gli studi su questi endoreattori sono iniziati per via dei vantaggi che questi offrivano rispetto ai tradizionali endoreattori solidi. I vantaggi principali che hanno portato ad approfondire questo studio sono principalmente una maggiore affidabilità, densità e impulso specifico maggiore e costo di sviluppo minore. Per via di questi vantaggi, ma ovviamente non solo per questi, si sono rivelati una tecnologia promettente per il futuro.

La configurazione di endoreattore più comune è quella che usa un grano solido che fa da combustibile e un gas o un liquido che fa da ossidante. Secondo questa configurazione, il flusso di ossidante può essere controllato tramite valvole o iniettori, mentre il flusso di massa è proporzionale alla velocità di regressione che a sua volta è una funzione non lineare del flusso di massa. Quindi la velocità di regressione gioca un ruolo chiave sia per quanto riguarda le performance dell'endoreattore sia per quanto riguardano i parametri di design. Per cui se si riesce a determinarla nel modo più accurata possibile, permette di avere una

visuale più in dettaglio della dinamica di combustione. Conoscendo la dinamica di combustione istante per istante si riesce a determinare una geometria ottimizzata in modo tale da progettare un endoreattore che rispecchi le richieste di progetto della missione. Invece, se la velocità di regressione non è ottenuta con una certa precisione può portare ad una conoscenza errata della dinamica di combustione e quindi ad una errata determinazione dei parametri di progetto e performance; tutto ciò potrebbe compromettere la missione e quindi alla perdita dei capitali investiti da parte dei clienti.

Successivamente nei prossimi capitoli si andrà a elencare e spiegare i termini usati, una introduzione del metodo da usare e infine si andranno a spiegare i risultati ottenuti e le problematiche incontrate durante lo studio.

Per poter affrontare questo studio sono stati sviluppati opportuni codici in Fortran.

Il primo caso affrontato è stato il caso END POINT che è un metodo molto primitivo ed ha bisogno solo della informazione iniziale e finale. Questo metodo è stato studiato sia per capire la mole di dati che si perdono usando questo metodo in relazione agli altri trattati, ma principalmente viene usato per avere una stima iniziale e successivamente procedere con una raffinazione e ottimizzazione dei parametri.

Il successivo caso che si è studiato è quello dell'INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE, un modello proposto da Heister [4]. Questo metodo è molto più preciso perché tiene conto dell'azione temporale e della evoluzione del test nel tempo. In più si distingue dal precedente in quanto assume una velocità caratteristica C^* costante e la media è fatto su tutti i valori dell'intervallo di integrazione. Poi si è implementato questo modello nel codice Fortran, fornitomi, usando i nostri dati di partenza e in fine si è diagrammati i dati in modo da vedere se l'andamento fosse in accordo con i dati in nostro possesso.

L'ultimo caso studiato è quello della CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE, un modello proposto da Kumar [3]. Questo modello si differenzia dal precedente in quanto non assume la velocità caratteristica costante, ma partendo dalla pressione in camera di combustione la calcola per ogni istante di calcolo. Anche in questo caso, lo si è implementato nel programma Fortran e successivamente diagrammato i dati in modo da poter fare un paragone tra i risultati ottenuti con il modello agli integrali [4]. Però nello studiare questo modello si è scoperti una incongruenza dell'andamento della regressione nella parte finale dell'esperimento che non era in accordo né con la teoria né con i dati sperimentali. Quindi

si è approfondito questo caso cercando di capire il problema che sta alla base di questa imprecisione.

Per terminare, il capitolo conclusivo riassumerà i risultati principali e il confronto tra i metodi.

NOMENCLATURA

- A_b : area di combustione;
- A_p : area di ingresso;
- A_t : area di gola;
- B_f : blowing factor;
- C^* : velocità caratteristica;
- C^*_{exp} : velocità caratteristica sperimentale;
- C^*_{ox} : velocità caratteristica dell'ossidante;
- C^*_{theo} : velocità caratteristica teorica;
- C_f : coefficiente di attrito a parete;
- c_p : calore specifico;
- $D_{p(i)}$: diametro di porta all' i -esimo step;
- $D_{p(i+1)}$: diametro di porta all' i -esimo +1 step;
- \dot{m} : flusso di massa infinitesimo;
- dx : distanza infinitesima;
- G : flusso totale di massa;
- g_c : costante gravitazionale;
- G_{ep} : flusso di massa ottenuto mediante modello END POINT;
- G_{int} : flusso di massa totale ottenuto mediante modello media integrale;
- G_{ox} : flusso totale di ossidante;
- H : entalpia specifica totale;

- h : entalpia specifica;
- HRE: hybrid rocket engine;
- HTPB: hydroxyl-terminated polybutadiene;
- L_f : lunghezza del grano;
- LRE: liquid rocket engine;
- \dot{m} : flusso di massa;
- \dot{m}_{ox} : flusso di massa dell'ossidante;
- \dot{m}_{oxn} : flusso di massa dell'ossidante allo step n-esimo;
- \dot{m}_{ccb} : flusso di massa del catalitico;
- \dot{m}_f : flusso di massa del combustibile
- M : massa;
- Mach: n° di Mach;
- $Mach_w$: numero di Mach a parete;
- MCCB: massa totale del consumable catalytic bed;
- M_f : massa totale di combustibile;
- M'_f : massa totale di combustibile bruciata calcolata al step successivo;
- M_{inert} : massa totale dell'inerte;
- MMH: monometilidrazina;
- M_{ox} : massa totale dell'ossidante;
- n : step temporale;
- OF: oxidizer to fuel ratio;
- p : pressione statica;
- P_c : pressione in camera;
- \dot{r} : velocità di regressione;
- \dot{r}_{ep} : velocità di regressione ottenuta mediante modello END POINT;
- \dot{r}_{int} : velocità di regressione ottenuta mediante modello media integrale;
- R : costante dei gas universale;
- SRE: solid rochet engine;
- t : tempo;
- T : temperatura;
- t_f : tempo finale;
- t_i : tempo iniziale;

- α : coefficiente della regressione;
- β : esponente della regressione della massa totale;
- γ : esponente isoentropico;
- η : efficienza di combustione;
- ρ : densità del gas;
- ρ_f : densità del combustibile;
- w : web distance;

Capitolo 1: Introduzione ai motori ibridi

Nella propulsione spaziale si definiscono sistemi di propulsione ibrida quei sistemi che utilizzano un reagente allo stato solido ed uno allo stato liquido.

Possono presentarsi in due configurazioni:

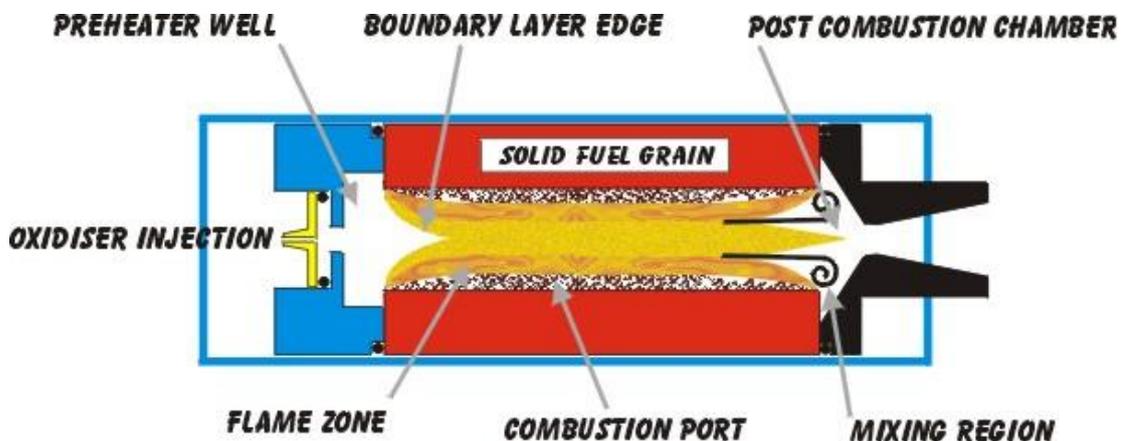
- Classica detta diretta: in questa configurazione si ha un combustibile solido solitamente di forma cilindrica e con esso viene fatto reagire un ossidante in fase gassosa oppure sottoforma di spray liquido.
- Indiretta: questa configurazione presenta un ossidante allo stato solido e di un combustibile allo stato liquido, però questa configurazione presenta un rendimento minore rispetto a quella diretta.

Dopo aver elencato le due tipologie, quella più usata è una soluzione intermedia tra la più semplice degli endoreattori a solido e quella più complessa degli endoreattori a combustibile/ossidante liquido. Più complessa perché richiede serbatoi e un sistema di alimentazione, ma questa configurazione offre maggiore libertà sia in fase di progetto che in fase operativa.

L'endoreattore ibrido inizia a funzionare quando la fiamma di combustione diffonde su tutta la lunghezza del grano. Quindi in base al grano e al flusso interno che si genera si riescono a definire le caratteristiche di combustione e di operatività. Il propellente, dopo l'ignizione

e in seguito al processo di trasmissione del calore dalla zona di fiamma a quella del propellente, viene vaporizzato. Il propellente vaporizzato viene poi trasportato per moti convettivi alla zona di fiamma superiore, mentre l'ossidante per via della diffusione e della turbolenza del flusso viene trasportato alla zona di fiamma. La fiamma è in una ben precisa posizione all'interno dello strato limite determinata dalle condizioni stechiometriche con le quali avviene la combustione. La convezione e la radiazione sono i meccanismi più comuni attraverso i quali avvengono i trasferimenti di calore alla superficie del grano nei endoreattori ibridi. Invece nei propellenti a bassa percentuale di idrocarburi o non metallizzati il meccanismo di trasferimento del calore per convezione risulta essere molto più grande di quello trasferito dalla fase gassosa o dal particolato solido, presente nel flusso, per radiazione.

1.1) HYBRID ROCKET ENGINES (HRE)



La concezione dei primi propulsori ibridi risale agli anni '30 pressoché contemporaneamente sia negli USA che in Germania. In seguito, basandosi su un'idea di Andrussov (1937) vennero effettuate prove presso i laboratori tedeschi della I.G.Farben. Per avere delle prove o degli esiti positivi, usando combustibili come legno, cera con polveri di carbone e combustibili a base di gomme e come ossidante ossigeno liquido LOx si è dovuto aspettare gli inizi degli anni 40'. In quei anni, in seguito a varie prove, si capì uno dei concetti basilare della propulsione ibrida, cioè che la pressione in camera del motore non è dipendente dalla superficie di grano esposta alla fiamma, ma dipende essenzialmente dal flusso di ossidante.

In più venne a galla che la presenza di cricche, fessure, difetti o nella sua lavorazione di inserimento nel serbatoio del grano non creavano nessun pericolo di esplosione come, invece, succedeva nel caso della propulsione solida.

La ricerca di sicurezza fu uno dei fattori predominanti nello sviluppo degli endoreattori ibridi che doveva esistere sia in fase di utilizzo sia a motore spento. Un modo per aumentare la velocità di regressione e quindi le performance in termini di spinta, si è reso possibile grazie a degli studi che hanno confermato che utilizzando dei combustibili bassofondenti (quali la paraffina) si riesce a ottenere dei miglioramenti. Inoltre, la maggior ricerca di lavorare e operare in sicurezza e ad un costo minore, fanno sì che la propulsione ibrida sia una ottima candidata per la propulsione delle generazioni future di razzi o navicelle.

L'idea di base del HRE è quella di immagazzinare in un serbatoio l'ossidante come liquido e il combustibile come solido, ottenendo una struttura che sia meno inclina a esplosioni come lo sono i motori a combustibile solido oppure quelli basati su bi-propellenti liquidi. Il combustibile solido, detto anche grano, è contenuto all'interno della camera di combustione sotto varie forme, quella più comune è quella di un cilindro con un foro passante per tutto il grano che serve a far defluire l'ossidante che accendendosi lo brucia lentamente. Questa struttura viene concepita in modo tale da avere separato l'ossidante dal grano solido così nel caso di un cedimento della struttura non si possa generare una esplosione catastrofica come avveniva nel caso di un cedimento nei motori a combustibile solido. In più la facilità di creazione e la sicurezza con cui il grano può essere ottenuto ha determinato un grande interesse verso questa tipologia di motori. Inoltre, il grano poteva essere anche creato direttamente in sito dove avveniva il lancio senza rischio di esplosioni. Questo fatto facilitava il trasporto e la creazione quindi offriva una riduzione dei costi sia di produzione che manutenzione.

La struttura tipica di un HRE è composta essenzialmente da due serbatoi uno per il combustibile solido e uno per il liquido, un igniter che favorizza l'accensione del propellente liquido, una camera di combustione, solitamente il combustibile solido, cioè il grano, è contenuto in questa sezione, e infine un ugello. Ovviamente all'interno ci sono molte parti piccole come pompe, valvole, iniettori e molti altri che competono al corretto funzionamento del motore.

Un elemento che li ha favorito molto rispetto ai motori a propellenti solidi è il controllo dell'accelerazione che nel caso di quelli solidi una volta accesi non può essere più controllata. Essa ti genera una spinta che dipende principalmente da 3 parametri:

- Tipo di carburante utilizzato;
- Dall'efficienza di combustione;
- Dalla tipologia di ugello.

I motori ibridi, grazie al controllo sulla accelerazione, che è possibile averla gestendo la quantità di ossidante immesso in camera di combustione, sono più adatti a missioni che richiedono una maggiore precisione o un maggiore controllo sui livelli di spinta in base alla necessita. Infine, rispetto ai SRM, il grano solido può essere modificato per aumentarne le performance ad esempio con l'aggiunta di polveri di alluminio.

1.2) SINTESI FUNZIONAMENTO DEGLI ENDOREATTORI IBRIDI

Per prima cosa avviene l'iniezione di ossidante nella camera di combustione. L'ossidante viene iniettato o in fase liquida o gassosa e forma uno strato limite che principalmente risulta essere turbolento su una gran parte della lunghezza del grano solido. All'interno di questo strato limite c'è una fiamma diffusiva che copre tutta la superficie del grano. Il calore generato da questa fiamma si trasmette principalmente per via di moti convettivi e fa evaporare il combustibile che poi va a reagire con l'ossidante. Successivamente l'ossidante è trasportato dalla corrente libera attraverso meccanismi turbolenti convettivi.

I gas caldi generati precedentemente che espandendosi in un ugello che può essere convergente o divergente generano la spinta necessaria.

Infine, si osserva che il funzionamento di un endoreattore ibrido è simile a quella di un endoreattore solido, ma si differenziano molto per quanto riguarda il processo di combustione. In quello ibrido la fiamma è diffusiva, mentre in quello solido è premiscelata.

1.3) VANTAGGI E SVANTAGGI

I motori HRE presentano notevoli vantaggi rispetto ai motori a propellenti solidi SRM. I principali vantaggi sono:

- Affidabilità e semplicità; il sistema di alimentazione è semplificato visto che l'ossidante è liquido;
- Controllo sul flusso di ossidante: grazie al controllo del flusso possiamo decidere la spinta, lo spegnimento del motore o la riaccensione;
- Performance: i motori HRE presentano un maggiore impulso specifico rispetto agli SRM, dovuto ad un propellente solido ad alta densità. Però questo beneficio può essere messo a rischio dal tipo di grano scelto che mi può generare una bassa efficienza volumetrica;
- Ambiente: rispetto agli SRM, gli HRE usano combustibile senza cloro. Paragonati agli LRE, motori a propellenti liquidi, sono presenti propellenti conservabili che non hanno elementi nocivi come MMH (monometilidrazina) e tetrossido di azoto.
- Basso costo: presentando quasi un rischio nullo di esplosione durante il trasporto, la produzione, test e l'immagazzinamento questo si rispecchia in un costo minore di manutenzione e sui sistemi di sicurezza.
- Sicurezza: HRE sono molto più sicuri ed economici degli SRM principalmente perché il combustibile solido è inerte. In più siccome il combustibile solido e l'ossidante sono distanti, serbatoi diversi, e anche fasi diverse, uno solido e l'altro liquido, non presentano quasi mai esplosioni accidentali. In più né i pori, le cricche o imperfezioni possono causare detonazioni improvvise e le accensioni improvvise dell'igniter sono sotto controllo;
- Versatilità del grano; al grano possono essere aggiunti vari elementi che ne migliorino la combustione.

Ovviamente gli HRE non presentano solo vantaggi, ma presentano anche alcuni svantaggi che sono:

- Una più bassa risposta alla spinta: per via del ritardo della trasmissione del calore dal igniter al grano solido, l'accensione e la risposta alla spinta è più lenta rispetto agli LRE dove subito all'accensione si ha spinta;

- Mixture ratio variabile: la velocità di regressione dipende principalmente dal flusso di massa e dal rapporto flusso di massa e area di ingresso A_p . Durante la combustione A_p aumenta determinando una diminuzione della velocità di regressione. Dall'altro lato anche l'area di combustione A_b aumenta di conseguenza. Questi due fenomeni, l'area di ingresso da un lato A_p e l'area di combustione A_b dall'altro, non vanno di pari passo e conducono ad una variazione del flusso di massa anche se si cerca di tenere costante il flusso di massa dell'ossidante. Quindi il mixture ratio varia e ciò influenza negativamente la performance. Questo problema può essere arginato usando dei sistemi di iniezione dell'ossidante ottimizzati ma tutto ciò si rispecchia notevolmente sulla complessità del sistema;
- Performance: gli HRE non possono raggiungere l'alto impulso specifico raggiunto dal bipropellente criogenico del LRE (liquid rocket motor) e ha un impulso di densità specifica minore comparato con gli SRM;
- Mescolamento ossidante-combustibile inefficiente: parte del combustibile alla fine della camera di combustione potrebbe non mescolarsi con l'ossidante e quindi uscire senza prima avere rilasciato la sua energia chimica. Gli HRE presentano una efficienza di combustione media più bassa rispetto agli LRE e SRM. Si possono aggiungere dei sistemi aggiuntivi che favoriscano il mescolamento e impediscano l'uscita del combustibile senza aver lasciato la sua energia ma questo va poi a influenzare il peso a vuoto del motore.
- Velocità di regressione del combustibile bassa: il grano solido più usato come combustibile presenta una velocità di regressione più bassa di circa un ordine rispetto ai propellenti solidi e questo fa sì che per ottenere la stessa spinta si ha bisogno di una superficie di combustione più grande e quindi dimensioni maggiori. I limiti di tutto ciò è retto dai fenomeni fisici della trasmissione del calore dalla fiamma alla superficie del combustibile. Di conseguenza gli HRE presentano una densità di spinta minore e un più grande rapporto lunghezza su diametro.

La sicurezza, il basso costo, l'affidabilità e i vantaggi nelle performance fanno del propulsore ibrido, in conclusione, un ottimo candidato al futuro utilizzo nel campo spaziale. Le possibili applicazioni sono nuovi sistemi di lancio per le prossime generazioni ad esempio i booster o sistemi frenanti per atterraggi su altri pianeti (lander). Altre possibili usi sono il trasporto passeggeri supersonico in atmosfera e il turismo spaziale in particolare li studi e i test sulla navicella Spaceship I e II hanno dimostrato la fattibilità di quest'ultimo.

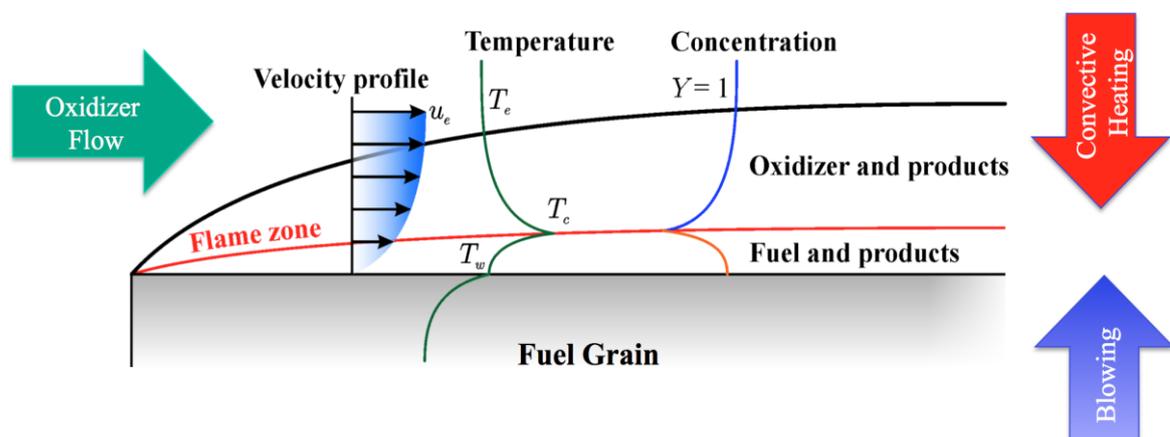
L'effettiva possibilità di impiego dei propulsori ibridi risiede nella possibilità di controllare la spinta a piacimento e questo fatto lo rendono molto adatti nel caso in cui si ha necessità di cambiare traiettoria.

Questa tecnologia è ancora soggetta a molti studi in quanto si ha una scarsa conoscenza di ciò che avviene nelle varie fasi di combustione. La capacità di studiare al meglio e comprendere le varie fasi di combustione sono molto importanti per riuscire a migliorare le prestazioni di questi motori e renderli sempre più una soluzione alternativa ai due suoi rivali, il motore a propellente solido e liquido.

Dopo aver elencato i principali vantaggi e svantaggi degli HRE, rimane da trattare il vero problema di questi tipi di motori che è appunto la bassa velocità di regressione del grano, che sarà anche l'oggetto di studio di questa tesi. Ovviamente questo problema è molto studiato e ci sono vari metodi di studio che hanno affrontato questo tema cercando di ridurre l'impatto negativo che una velocità di regressione bassa ha sul motore. Nel prossimo capitolo tratteremo più in dettaglio questo problema.

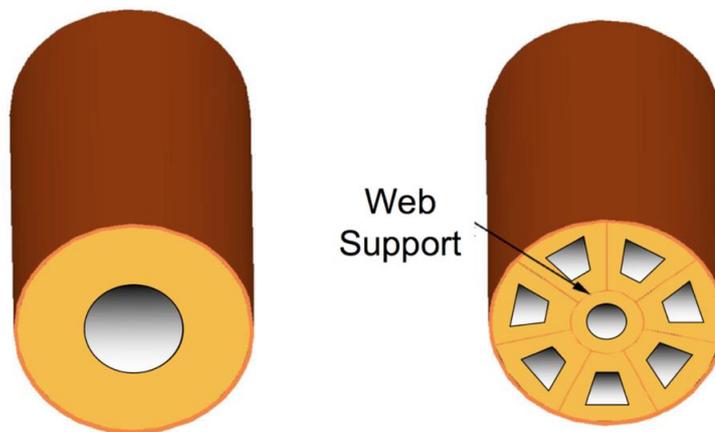
1.4) IL PROBLEMA DELLA BASSA VELOCITA' DI REGRESSIONE

Il principale problema degli HRE è la bassa velocità di regressione, dovuta al fatto che il principio di combustione si basa su lento meccanismo di consumazione del grano, di una bassa evaporazione e diffusione di mescolamento dei gas, come si evince dalla figura di seguito:



Schema profilo di combustione in un endoreattore ibrido

Questo problema si ha perché la fiamma non è vicina al grano, come ad esempio lo è negli SRM. Il fatto di avere la zona di combustione più vicina al grano fa sì che gli SRM presentano una velocità di regressione di un ordine maggiore rispetto agli HRE. Se si fa un paragone in termini di numeri se la velocità di regressione in un SRM è di 1.0 cm/s negli motori ibridi usando un combustibile HTPB (polibutadiene con radicali ossidrilici terminali) si può avere una velocità di regressione dell'ordine di 0.1 cm/s. Per compensare a questa bassa velocità una soluzione sarebbe l'aumento della area di combustione del grano e usare dei grani multi-porta rispetto a quelli a singola porta.



Mono-porta vs multi-porta

Il motivo per cui si predilige il grano multi porta è perché aumentando la area di combustione si riesce ad aumentare anche la velocità di regressione.

Il maggior problema del grano multi porta è che avendo più cavità per aumentare l'area di combustione a parità di volume rispetto al singolo si riesce a caricare meno combustibile. A parte il problema del volume di combustibile caricato emergono anche altri problemi per il grano multi porta come ad esempio la produzione, dato che ci sono forme diverse bisogna produrre il grano in segmenti e poi inserirlo nella struttura che a sua volta deve essere progettata in modo da poterlo ricevere e quindi tutto ciò crea un aumento di complessità della struttura nonché un possibile aumento di peso. In più non è facile far sì che in ogni porta la combustione avvenga allo stesso istante. Se in una porta la combustione è più veloce rispetto alle altre l'ossidante tende a seguire la via dove incontra meno resistenza e quindi si può avere una di flusso di massa di ossidante alle varie porte. Inoltre, se una porta brucia più velocemente il grano si consuma più in fretta e se finisce prima delle altre porte c'è il rischio che porti ad uno spegnimento prematuro del motore che può generare una perdita notevole di grano non bruciato. Piccole variazioni di pressione da porta a porta possono portare a un

degradamento strutturale del grano e probabile rottura del grano con eventuale perdita di pezzi di esso. A parte i danni possibili all'ugello, il risultato dell'aumento medio del rapporto O/F porta a una riduzione dell'impulso specifico e un aumento del grado di erosione della gola dell'ugello.

Grande rilevanza ha anche la selezione dei componenti del grano solido che a sua volta ha una notevole importanza sulla velocità di regressione, che risulta funzione del calore di gassificazione richiesto per convertire il combustibile dallo stato solido a quello gassoso.

In un HRE la velocità di regressione dipende principalmente dall'accoppiamento dell'aerodinamica delle cavità del grano e dello scambio di calore che si instaura sulla superficie dello stesso. La regione di combustione primaria, sita sopra il grano, è stata dimostrata essere limitata ad una regione molto stretta, all'interno dello strato limite sul grano solido. Lo sviluppo dello strato limite e le caratteristiche di regressione del grano sono influenzati da:

- Flusso di ossidante nelle cavità e lunghezza delle cavità del grano;
- Composizione chimica del grano;
- Pressione;
- Temperatura dei gas.

Le relazioni che legano lo scambio di calore tra la fase solida e gassosa dipendono dal tipo di regime che si instaura nello strato limite cioè se esso è turbolento o laminare.

La quantità di flusso di calore emesso dal combustibile è molto influenzata dalla sua composizione chimica. Ad esempio, se il combustibile presenta al suo interno particelle metalliche aggiunte oppure ha una grossa percentuale di idrocarburi una gran parte del flusso di calore è dovuta alla radiazione emessa dalla nube di particelle di ossido metallico emesso o di parti solide prodotte durante la combustione.

La velocità locale di regressione è molto influenzata dal livello di turbolenza del flusso di gas nelle cavità del grano. La presenza di vortici locali o zone di ricircolo adiacenti alla superficie del grano favoriscono l'aumento erosione del grano in tali aree e quindi l'aumento della velocità di regressione locale.

1.5) METODOLOGIE PER AUMENTARE LA VELOCITA' DI REGRESSIONE: uso dei combustibili bassofondenti

Un metodo per aumentare la velocità di regressione risiede nell'utilizzo dei combustibili bassofondenti, che rispetto ai combustibili tradizionali a base polimerica, offrono notevoli vantaggi. Infatti, i combustibili a base polimerica hanno velocità di regressione più elevate, dovute al maggior flusso di massa di combustibile, rispetto alle formulazioni classiche, e quindi consentono di incrementare le prestazioni del propulsore, riducendone le dimensioni.

Questi incrementi della velocità sono dovuti al fatto che sulla superficie di regressione si genera uno strato di combustibile fuso. Se questo strato risulta essere abbastanza liquido, e quindi avere basse viscosità e basse tensioni superficiali, grazie all'azione del flusso di ossidante questo strato fuso diventa instabile creando una condizione nella quale piccole goccioline di combustibile vengono catturate nel flusso. Questo comportamento lo si ha principalmente nelle cere paraffiniche e le cere a base di Polyethylene PE, che non sono tossiche o pericolose in quanto i loro prodotti di combustione sono principalmente H₂O e CO₂. Questo fenomeno di cattura è detto Entrainment e ha come vantaggio un aumento della velocità di regressione del combustibile. Quando questo fenomeno si avvia il flusso di massa, che arriva dalla superficie di regressione, risulta essere composto da una miscela di vapori e particelle liquide. L'aumento della velocità di regressione è causato principalmente da due fattori:

- Dato che il flusso gassoso, proveniente dalla superficie di regressione, si riduce, il parametro di soffiamento si riduce e di conseguenza l'effetto di bloccaggio del trasferimento convettivo del calore alla superficie di regressione si riduce. Per dare una idea del fenomeno basta pensare che il parametro di soffiamento nei combustibili polimerici tradizionali, che è un valore compreso tra 5 e 20, produce una riduzione del calore trasmesso compreso tra le 3 e le 6 volte del calore totale, invece nei combustibili che presentano il fenomeno dell'entertrainment questa riduzione diventa meno di 2 volte, per cui si ha un notevole miglioramento;
- Le goccioline che sono catturate, non assorbono il calore di gassificazione che è più alto ma, assorbono quello di liquefazione che è più basso rispetto a quello di gassificazione.

Questo meccanismo, dell'entertainment, risulta descrivibile come una iniezione spray continua su tutta la lunghezza del foro del grano dove la maggior parte della vaporizzazione del combustibile la si ha attorno alle particelle, che partendo dallo strato fuso raggiungono la fiamma. Grazie a questo fenomeno, che non è limitato dal trasferimento diffusivo di calore, si riesce a raggiungere velocità di regressione superiori rispetto agli HRE tradizionali che invece, appoggiandosi solo sulla vaporizzazione del combustibile, risultano essere limitati dal calore che arriva al grano per sola diffusione.

Grazie all'uso dei bassofondenti è possibile eliminare la configurazione a fori multipli ottenendo un risparmio sia in termini di costi sia in una molto minore difficoltà della creazione del grano solido, in quanto basta un singolo foro, riducendo anche il rischio di frattura e di residui incombusti a fine combustione.

1.6) METODI DI STUDIO

I metodi classici utilizzati per lo studio della velocità di regressione si dividono principalmente in 2 categorie:

- Metodi diretti;
- Metodi indiretti.

I metodi diretti sono quei metodi che permettono di avere una misura immediata del parametro desiderato tramite strumenti capaci di fornire tali risultati. Alcuni di questi metodi sono:

- Ultrasuoni: è un metodo che si basa sull'uso di onde a frequenze molto elevate, 20kHz. Il vantaggio di usare frequenze molto alte è che le onde avendo una lunghezza d'onda molto piccola possono essere riflesse anche da superfici dell'ordine di grandezza della loro lunghezza d'onda;
- X-Ray: i raggi x sono una piccola porzione dello spettro elettromagnetico con lunghezze d'onda comprese tra 10 nanometri e 1/1000 di nanometro. Il vantaggio è lo stesso degli ultrasuoni, cioè avendo lunghezze d'onda molto basse possono essere riflesse da oggetti di dimensioni simili alle lunghezze d'onda impiegate.

I metodi indiretti sono quei metodi che partendo da delle assunzioni e passando per dei calcoli matematici forniscono una stima molto più precisa dell'andamento della velocità di regressione nonché anche un suo andamento nell'arco temporale. Questi metodi che andremo poi a definire più chiaramente nei successivi capitoli sono:

- End point technique: si basa nel dare una stima media prendendo solo in considerazione il punto iniziale e finale dell'esperimento. In particolare, otteniamo un valore medio.
- Integral averaging technique: partendo da delle assunzioni base si cerca di dare un andamento della velocità di regressione mediata nel tempo.
- Chamber pressure based technique: metodi che si basano sull'uso della pressione in camera di combustione per il calcolo della velocità di regressione
- Internal ballistics model: basato sulla conservazione della quantità di moto, massa e energia.

Capitolo 2:

Descrizione dei metodi di misura

Molti studiosi hanno affrontato questo problema proponendo vari metodi e tecniche come ad esempio misurare lo spessore del grano o del diametro di porta tramite tecniche di risonanza ad ultrasuoni e tecniche fotografiche per avere foto del processo di combustione. Tutto ciò è stato la base per i futuri studi degli scienziati che hanno iniziato ad affrontare il problema della regressione su una base temporale in modo da avere delle misure istante per istante, ma questo si riusciva ad applicare solo ad endoreattori piccoli e il passaggio a dimensioni reali portava ad avere numerose difficoltà. Comunque, tutto ciò richiedeva un personale molto qualificato e strumenti costosi e molto spesso, soprattutto per i fondi, questo creava notevoli problemi.

Con il passare del tempo e maturando una conoscenza sempre più approfondita del problema nonché uno sviluppo della tecnologia si è arrivati ad avere dei metodi di studio soddisfacenti, ma molto spesso la accuratezza non era accettabile oppure se si voleva una precisione più alta i costi diventavano troppo alti. Per cui gli esperimenti ritornavano su valori della velocità di regressione mediati nel tempo misurando la massa di combustibile bruciato; ovviamente questo andava bene per uno studio preliminare, ma mancava delle informazioni legate allo sviluppo nel tempo che si è dimostrato successivamente avere un impatto

notevole. Infatti, durante la combustione non solo si ha combustione del grano, ma anche del diametro di porta, il flusso di ossidante e il mixture ratio cambiano e quindi fanno sì che l'interpretazione del valore della velocità di regressione basandosi solo su un fenomeno diventi rischiosa.

Perciò per i motivi sopra citati, è consigliabile una misurazione basata sulla variazione istante per istante della velocità di regressione.

Su questa base c'è una altra classe di metodi per ottenere una velocità di regressione mediata sullo spazio, che sono basate su tecniche interne di ricostruzione balistica. Questi metodi assumono una efficienza di combustione media oppure cercano di definirla in seguito misurando la spinta del motore, e sono basati sulla semplice assunzione di riuscire a ottenere il bilancio delle masse all'interno della camera di combustione in ogni istante della combustione. Solitamente, sono necessarie delle misure post-test della rimanente massa del combustibile, però una misura in tempo reale non è possibile. Una altra tecnica è stata sviluppata basandosi sulla misura delle frequenze usando la tecnica della camera di Helmholtz per determinare il volume occupato dai gas dovuti alla combustione in modo da determinare una misura istantanea della variazione del diametro di porta, e successivamente, della velocità di regressione.

Questa nuova tecnica balistica usata per determinare il tempo della velocità di regressione mediata sullo spazio parte dalla misura del time history del flusso di massa di ossidante e dalla pressione nella camera di precombustion e aft-mixing. L'idea alla base di questo metodo è che il salto di pressione nel diametro iniziale di combustione è legato al flusso totale e alla quantità di calore aggiunta con il processo di combustione. Il principale vantaggio di tale metodo è che non assume una unica costante per definire la efficienza di combustione, invece la sua evoluzione durante la combustione è determinata senza far ricorso alla spinta del motore che permetterebbe soltanto una misura standard della pressione della camera di combustione. In particolare, negli ibridi, nei quali la misura teorica delle performance è limitata alla diffusione del propellente, quindi stimare la variazione dell'efficienza di combustione è un fatto molto importante, perché potrebbe permettere di capire il perché si ha l'allontanamento dai valori ideali e potrebbe portare a capire come agire per poterla ottimizzare al meglio.

Questa nuova tecnica è stata approfondita dal professore Dario Pastrone e dal research consultant Carmine Carmicino [2] per studiare la velocità di regressione in un endoreattore a propellenti ibridi.

Il mio obiettivo si basa nel partire dai loro risultati e applicando altri modelli di studio, che richiedono un costo computazionale minore, ricavare la velocità di regressione e vedere se i risultati ottenuti in questa maniera siano comparabili con quelli ottenuti nel ref [2].

In questo capitolo ci occuperemo dello studio della velocità di regressione grazie alla analisi mediante linguaggio FORTRAN. Come primo step di analisi si userà il metodo END POINT che è un metodo base; non ha bisogno di moltissimi dati e analisi ma, ha bisogno solo del punto iniziale e finale ed è come se si facesse una media tra il valore iniziale e finale. Successivamente rifaremo tutta l'analisi mediante il modello proposto da Heister, INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE [4]; questo è un modello più dettagliato e richiede uno studio più approfondito. In particolare, questo modello ci fornisce un andamento dei dati in relazione alla evoluzione temporale dell'esperimento ma, fa una assunzione molto importante per l'analisi che è l'assunzione della velocità caratteristica C^* costante. Avere informazioni sullo sviluppo temporale è molto importante sia per il calcolo della velocità di regressione che per poter stimare la performance e il design del motore. Infine, per avere un confronto con il modello agli integrali, si applicherà il modello proposto da Kumar, CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE [3], un modello molto simile a quello proposto da Heister ma con la differenza che in questo caso la velocità caratteristica è assunta come funzione del rapporto ossidante su fuel. Questo modello risulta essere molto più preciso in quanto tiene conto del fatto che la velocità caratteristica C^* è funzione del parametro OF e non è una costante come è stata assunta da Heister.

2.1) INTRODUZIONE DEI METODI USATI

2.1.1 END POINT TECHNIQUE

Questo metodo si basa su una valutazione di larga scala calcolando la velocità di regressione attraverso la media tra il valore iniziale e il valore finale.

Questa tecnica usa l'informazione iniziale e finale del diametro di porta in modo da determinare una velocità di regressione \dot{r}_{ep} e un flusso di massa G_{ep} tramite le formule:

$$\dot{r}_{ep} = \frac{D_{pf} - D_{pi}}{2(t_f - t_i)} \quad (1)$$

$$G_{ep} = \frac{M_{ox} + M_f + M_{CCB}}{(t_f - t_i)0.25\pi \left(\frac{D_{pf} - D_{pi}}{2}\right)^2} \quad (2)$$

D_{pf} indica il diametro di porta finale raggiunto dopo la combustione, mentre il D_{pi} indica quello iniziale di partenza prima della combustione. Il t_i e t_f indicano rispettivamente il tempo iniziale e finale. Per decidere quale sia il tempo finale e iniziale non è una questione facile e la scelta si basano alcuni aspetti sperimentali. Per determinare il tempo iniziale si sceglie il tempo al quale la pressione in camera di combustione inizia a salire. Si sceglie questo dato perché questo fenomeno sta a indicare che la combustione è iniziata. Si potrebbe determinare il tempo di inizio (t_i) anche dalla variazione di flusso o dalla pressione di ugello ma dai test è emerso che la miglior scelta sia quella quando aumenta la pressione in camera. Allo stesso modo il tempo finale (t_f) è determinato sempre tenendo conto della pressione in camera perché la pressione in camera si riflette sul raffreddamento del grano come una conseguenza della diminuzione del flusso di ossidante. Invece nella seconda formula M_{ox} , M_f , M_{CCB} indicano rispettivamente la massa di ossidante, di combustibile e igniter dove CCB sta a indicare (consumable catalytic bed). Un fatto che bisogna precisare è che la massa dell'igniter essendo molto piccola rispetto a quella dell'ossidante e del combustibile la possiamo trascurare, quindi nel nostro caso assumeremo che $M_{CCB} = 0$.

Questo metodo è molto semplice e non ha bisogno di analisi molto complicate. È importante notare che basta solo la conoscenza del valore iniziale e finale. Per test brevi di combustione,

gli errori dovuti alla variazione temporale dei parametri del motore sono considerati accettabili. Invece, per test più lunghi di combustione, li errori dovuti alla variazione temporale dei parametri non sono più accettabili visto che la velocità di regressione e il flusso di massa sono funzioni non lineari del diametro di porta e sono molto influenzati dallo sviluppo temporale della combustione nonché dalla variazione del diametro. Quindi per poter usare questo metodo bisogna usare tempi brevi di combustione. In più anche gli effetti dovuti allo sviluppo transitorio dello strato termico sono trascurati. In alternativa a questo metodo si possono usare altri metodi che misurano la velocità di regressione come una funzione del tempo.

2.1.2 INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE

Questa tecnica [4] prevede l'uso di una velocità caratteristica C^* costante ottenuta tramite integrazione dell'andamento della pressione in camera e delle masse usando l'equazione:

$$C^* = \frac{\int_{t_i}^{t_f} P_c A_t g_c dt}{M_{ox} + M_f + M_{CCB} + M_{inert}} \quad (3)$$

Al denominatore si possono notare la presenza delle masse, $M_{ox}, M_f, M_{CCB}, M_{inert}$ rispettivamente di ossidante, combustibile, del catalitico CCB e dell'inerte. Anche in questo caso la massa del catalitico CCB è considerata nulla perché trascurabile rispetto alle altre.

Al numeratore abbiamo la pressione in camera P_c , l'area di gola A_t , e la costante gravitazione g . Noi abbiamo usato questa formula per ottenere una velocità C^* che useremo come fissa.

Visto che la OF, rapporto ossidante su combustibile, varia durante la combustione, quindi la C^* non è strettamente costante ma allo stesso modo questo metodo la assume come fissata e mediata sul totale dei valori. In più la OF può essere calcolata tramite la formula:

$$OF = \frac{M_{ox}}{M_{inert} + M_f + M_{CCB}} \quad (4)$$

Anche in questa formula abbiamo al denominatore la massa di ossidante M_{ox} , mentre al denominatore le altre masse, inerte, combustibile e CCB.

Una volta nota la C^* si può calcolare il flusso di massa totale ($G_n(t)$) e la velocità di regressione ($r_n(t)$) come una funzione del tempo e dello step n-esimo:

$$G_n(t) = \frac{\dot{m}_{ox_n} + \dot{m}_{CCB} + r_{n-1}L_f\pi(2r_{n-1}dt + D_{p_{n-1}})\rho_f}{L_f\pi(2r_{n-1}dt + D_{p_{n-1}})\rho_f} \quad (5)$$

$$r_n(t) = \frac{\frac{P_{c_n}A_{t_n}g_c}{C^*} - \dot{m}_{ox_n} - \dot{m}_{CCB} - \dot{m}_{inert}}{L_f\pi(2r_{n-1}dt + D_{p_{n-1}})\rho_f} \quad (6)$$

In queste due formule con \dot{m}_{ox_n} si indica il flusso di massa istantaneo dell'ossidante, \dot{m}_{CCB} flusso di massa del catalitico, r_{n-1} si indica la velocità di regressione all'istante precedente, con L_f la lunghezza del grano, con D_p il diametro di porta e con ρ_f la densità del combustibile. Mentre con P_{c_n}, A_{t_n} si indicano rispettivamente la pressione in camera e l'area di gola all'istante n-esimo mentre g è la costante gravitazionale. Anche in questo caso, siccome la massa del catalitico $M_{CCB}=0$ di conseguenza anche il flusso di massa del catalitico è nulla, per cui assumeremo anche in questo caso che $\dot{m}_{CCB} = 0$.

Il diametro di porta è determinato via integrazione della velocità di regressione $r\Delta t$, ed essa è sfasata di un intervallo temporale nel determinare il diametro di porta da usare poi successivamente nella equazione ($G_n(t)$). Usando un passo temporale piccolo, e.g. 3ms, l'errore generato risulta essere trascurabile. Il valore istantaneo del flusso di ossidante (\dot{m}_{ox}) è ottenuta dal salto di pressione tra l'ugello e la camera, oppure dai dati sperimentali.

Nell'implementazione si è assunto come costante il flusso di massa di entrambi gli inerti e del sistema di accensione. Mentre gli inerti fluiscono durante tutto il processo di combustione, la determinazione della fine del sistema di accensione (*igniter*) è più problematica per via di usarne uno consumabile. Si è assunto che il sistema di accensione sia tutto consumato, dove nel diagramma c'è un picco di variazione della pressione e i test hanno confermato che è una buona assunzione. In più il sistema di accensione occupa un 1-3 % della massa totale quindi sul totale è un valore relativamente basso.

Usando questo metodo, l'intero andamento dei valori della velocità di regressione e del flusso di massa rispetto al tempo. L'influenza del tempo è ottenuta mediante integrazione diretta:

$$r_{int} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} r_n(t) dt}{\int_{t_i}^{t_f} dt} \quad (7)$$

$$G_{int} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} G_n(t) dt}{\int_{t_i}^{t_f} dt} \quad (8)$$

Anche in questo caso i valori della velocità di regressione e del flusso totale di massa risultano essere ottenuti di nuovo come una media. Però ora rispetto all'end-point dove usavo solo il risultato iniziale e finale, in questo caso si farà una media integrando su tutti i valori compresi tra il tempo iniziale e finale dell'intervallo di integrazione, quindi si avrà una precisione migliore.

Questo processo è più complicato del semplice metodo end point, ma fornisce una misura in funzione del tempo che è molto più utile nella determinazione della performance del motore. Il valore di C^* è fatto convergere in modo da essere compatibile con la massa espulsa dall'ugello, tramite questo approccio automaticamente forziamo la convergenza del consumo di carburante al valore misurato. Infine, si verifica che il diametro finale di porta sia in accordo con quello ottenuto dalle misurazioni e in più si è verificato che questa misura si valida indifferentemente dal test.

2.1.3 CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE

In questo metodo la pressione della camera di combustione è usata per determinare la velocità di regressione [3] e da essa si può ottenere l'andamento completo del grafico velocità di regressione vs flusso di massa totale. Alcuni parametri come, la portata dell'ossidante useremo i dati già in nostro possesso e in più useremo un valore iniziale di C^*

in modo da ottenere il primo valore da usare nella iterazione. Rispetto agli altri due metodi si differenzia in quanto il metodo End Point è soltanto una media tra un valore iniziale e uno finale, il metodo agli integrali [4] è sempre una media ma a differenza dell'End Point è una media su tutti i valori dell'intervallo di integrazione inoltre si basa su una assunzione base che è la C^* costante. Questo metodo, proposto da Kumar [3], parte dalla misurazione della pressione in camera e poi dalle caratteristiche geometriche e dalle formule risale alla C^* e poi in fine alla velocità di regressione.

Le formula che stanno alla base di questo metodo sono:

$$\dot{m}_f = \frac{P_c A_t}{C^*} - \dot{m}_{ox} \quad (9)$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{m}_f}{\pi \rho_f D_p L_f} \quad (10)$$

$$G_{ox} = \frac{4\dot{m}_{ox}}{\pi d_p^2} \quad (11)$$

$$D_{p(i+1)} = D_{p(i)} + 2\dot{r}\Delta t \quad (12)$$

Per ottenere l'andamento della velocità di regressione \dot{r} vs flusso di ossidante G_{ox} ho usato la seguente procedura implementata in un codice FORTRAN:

1. Assumere un valore iniziale di η e OF^*
2. Con la conoscenza di OF calcolare C_{theo}^*
3. Calcolare la $\dot{m}_f(t)$ noto OF e $\dot{m}_{ox}(t)$ noto \dot{m}_{ox} e sapendo che $\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ox}}{OF}$

Note:

*La oxidizer to fuel ratio usata $OF = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{stochiometrico}}$ per cui avre una $OF_{stochiometrica}$

4. Calcolare il flusso di massa del combustibile $\dot{m}'_f(t)$, grazie alla conoscenza del valore della pressione in camera di combustione ($P_c(t)$), e del valore della velocità caratteristica teorica C_{theo}^* dallo step 3 e η dallo step 1, usando:

$$\dot{m}'_f(t) = \frac{P_c(t)A_t}{\eta C_{theo}^*} - \dot{m}_{ox}(t) \quad (13)$$

5. La nuova O/F ratio è ottenuta mediante la conoscenza della $\dot{m}_{ox}(t)$ e $\dot{m}'_f(t)$ dallo step 4, usando:

$$OF(t) = \frac{\dot{m}_{ox}(t)}{\dot{m}'_f(t)} \quad (14)$$

6. La nuova $OF'(t)$ sostituisce la vecchia OF dello step 1 e $\dot{m}'_f(t)$ sostituisce $\dot{m}_f(t)$ dello step 2. Il processo è ripetuto per ottenere la nuova $\dot{m}'_f(t)$. Il processo va ripetuto fino a che si verifica tale condizione $|\dot{m}'_f(t) - \dot{m}_f(t)| * \Delta t \leq 5 * 10^{-5} kg$, se questa si verifica andare allo step 7. Altrimenti cambiare $OF'(t) = OF(t) - [OF'(t) - OF(t)] * [\dot{m}'_f(t) - \dot{m}_f(t)]$ e tornare allo step 2.
7. La convergenza ad ogni step temporale del flusso di massa ($\dot{m}'_f(t)$) è integrato sul tempo totale e la massa totale di combustibile usato la ottenuta mediante integrazione $M'_f = \int \dot{m}'_f(t) dt$. Questo valore è confrontato con l'effettivo valore della massa di combustibile persa durante il tempo di combustione (M_f). Se $|M_f - M'_f| \leq 1 * 10^{-4}$ andare step 8. Altrimenti cambiare il valore di η in accordo con la formula $\eta = \eta - 0.05 * (M_f - M'_f)$ e andare allo step 2.
8. Usando questa $\dot{m}'_f(t)$ calcolare la velocità di regressione tramite la formula $\dot{r} = \frac{\dot{m}_f}{\pi \rho_f D_p L_f}$. Successivamente calcolare la $G_{ox} = \frac{4\dot{m}_{ox}}{\pi D_p^2}$ e il nuovo diametro di porta $D_{p(i+1)} = D_{p(i)} + 2\dot{r}\Delta t$.

2.1.4 MODELLO BALISTICO

Questo modello è quello usato e approfondito nella analisi della velocità di regressione da parte di Carmicino e Pastrone [2] e dai risultati da essi ottenuti che sono partito nella analisi usando metodi alternativi, elencati prima, per ottenere la velocità di regressione con un costo computazionale minore. Rispetto agli altri metodi e soprattutto rispetto al precedente [3], questo modello parte dal calcolo della pressione in camera, poi calcola anche il rendimento e quindi per ogni step calcola i valori necessari per ottenere la C^* al momento i -esimo e allo stesso modo anche il rendimento. Di seguito descriverò in breve questo modello che è descritto più in dettaglio nell'articolo [2].

Questo modello si basa sulla conservazione della quantità di massa, momento e energia scritte in relazione a una camera a sezione costante cilindrica con iniezione di massa da degli iniettori sulle pareti e trasmissione di calore dalla combustione del propellente. Queste equazioni sono state scritte in modo da essere in relazione all'entalpia totale, numero di Mach, temperatura statica, velocità e densità.

Considero due sezione di area infinitesima poste a distanza dx . In questa sezione il combustibile è iniettato con un flusso di massa pari a $d\dot{m} = \rho_f \dot{r} \pi D dx$, dove ρ_f è la densità del combustibile, \dot{r} è la velocità di regressione che è assunta costante su tutto l'asse del grano, così che il flusso di massa per unità di lunghezza è $\dot{m}_b = d\dot{m}/dx$ che a sua volta è costante. Solo per semplicità si considera il processo di riscaldamento come quello derivante da un gas perfetto ($p = \rho RT$). L'energia dQ viene aggiunta al flusso principale dai prodotti della pirolisi del combustibile e dalla sua combustione con l'ossidante, $dQ = H_b d\dot{m}$, dove $H_b = h_b + u_b^2/2$ è l'entalpia totale creata per effetto della pirolisi, h_b è il potere calorifico e $u_b^2/2$ è l'energia cinetica.

Partendo dal bilancio di energia espressa in termini di entalpia totale, ipotizzando che la derivata temporale sia piccola e quindi può essere trascurata si ottiene:

$$(\dot{m} + d\dot{m})(H + dH) = \dot{m}H + d\dot{m}H \Rightarrow d\dot{m}H + \dot{m}dH = d\dot{m}H_b \quad (15)$$

Dove il flusso totale di massa è espresso in termine di OF complessiva ottenuta nella camera di postcombustione: $OF = \frac{\dot{m}_{ox}}{\dot{m}_f}$ dove $\dot{m} = \dot{m}_{ox} + \dot{m}_b x = \dot{m}_{ox} \left(1 + \frac{1}{OF} x\right)$.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{H_b - H \dot{m}}{dx} = (H_b - H) \frac{\dot{m}_b}{m} \quad (16)$$

Inoltre, l'energia viene assunta costante lungo la lunghezza del grano, questa assunzione ci permetti di dire che l'equazione (16) può essere integrata analiticamente, tra in il grano all'ingresso e la generica sezione per ottenere:

$$H = H_b - (H_b - H_1) \frac{\dot{m}_{ox}}{m} \quad (17)$$

Dove H_1 sta a indicare l'entalpia totale all'ingresso del grano.

Introducendo il numero di Mach $Mach = \frac{u}{\sqrt{\gamma RT}}$, dove γ è l'esponente isoentropico, possiamo scrivere le equazioni del numero di Mach derivate nello spazio:

$$\begin{aligned} \frac{2dM}{Mdx} = & \frac{\gamma M^2}{1 - M^2} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right) 4 \frac{C_f}{D} + 2 \frac{1 + \gamma M^2}{1 - M^2} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right) \frac{1d\dot{m}}{\dot{m}dx} + \\ & + \frac{1 + \gamma M^2}{1 - M^2} \frac{1dH}{c_p T dx} - \frac{1 + \gamma M^2}{1 - M^2} \frac{1M_w}{M_w dx} - \frac{1d\gamma}{\gamma dx} \end{aligned} \quad (18)$$

In questa equazione C_f è il coefficiente di attrito a parete, che può essere collegato alla velocità di regressione attraverso un bilancio di energia sulla superficie che sia vera l'analogia di Reynolds [11], producendo la relazione:

$$C_f = \frac{2\rho_f \dot{r}}{B\rho u} \rightarrow 4 \frac{C_f}{D} = \frac{2\dot{m}_b}{B\dot{m}} \quad (19)$$

Dove B_f è il blowing factor, per esempio la differenza di entalpia tra la fiamma e la parete.

In fine la variazione della temperatura dei gas può essere calcolata tramite la differenza di entalpia totale, $dH=c_p dT+du^2/2$, esprimendo la velocità dei gas in termini del numero di Mach e considerando che le proprietà termodinamiche variano lungo l'asse del grano:

$$\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right) c_p \frac{dT}{dx} = \frac{dH}{dx} - \frac{1}{2} T M^2 \frac{d(\gamma R)}{dx} - \gamma R T M \frac{dM}{dx} \quad (20)$$

Qui, per esprimere la variazione del peso molecolare e del coefficiente isoentropico lungo l'asse del grano si fa una approssimazione lineare; il calore specifico a pressione costante è calcolato secondo la relazione $c_p = \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \right] \frac{R}{Mach_w}$.

Il sistema di due equazioni differenziali eq. (18) e eq. (20) possono essere integrate usando la eq. (16) se si hanno i dati necessari, e.g: diametro interno del grano, lunghezza del grano, condizioni al contorno all'ingresso ($x=0$), miscela di gas, peso molecolare e esponente isoentropico entrambe sia all'ingresso che all'uscita, flusso di massa dell'ossidante, la velocità di regressione e il potere calorifico del carburante “ h_b ”.

Con il numero di Mach ottenuto dai calcoli e la temperatura in ogni sezione lungo l'asse del grano, si possono calcolare tutti i parametri termodinamici per una sezione di ingresso assegnata; in particolare la pressione statica è ottenuta da:

$$p = p_1 \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ox}} \frac{M_1}{M} \sqrt{\frac{T}{T_1}} \sqrt{\frac{\gamma_1 M_{w1}}{\gamma M_w}} \quad (21)$$

Una volta assegnato l'OF alla sezione di ingresso e alla sezione di uscita del grano, tutte le proprietà termodinamiche su tutta la lunghezza del grano sono calcolate e di conseguenza tutti gli altri calcoli possono essere implementati.

2.2) DESCRIZIONE DEL TEST

In questo paragrafo si descriverà lo svolgimento del test nonché il processo di raccolta dati e come sono stati usati per lo studio in esame [2]. Prima di tutto riportiamo uno schema del motore usato in questo esperimento con le nomenclature delle varie parti.

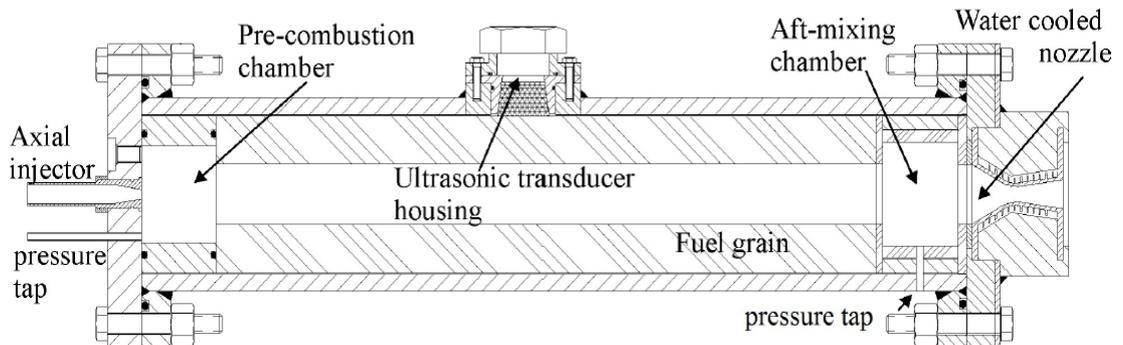


Figura 4.2.1: dettaglio motore usato per l'esperimento [2]

La camera di combustione è assialsimmetrica: è lunga 720 mm e ha un diametro interno di 133 mm. Queste 2 camere sono poste prima e dopo il grano (pre and aft combustion chamber); la camera di pre-combustione è lunga 65 mm e ha un diametro interno di 80 mm; la camera di post-combustione ha una lunghezza di 65 mm e un diametro di 90 mm. Un ugello convergente-divergente raffreddato ad acqua con un diametro di gola di 16 mm e una ratio di area 2,44, fatto di lega di rame assicura una lunga durata di combustione senza che si verifichi il processo di erosione della gola. L'accensione del motore avviene tramite una cartuccia pirotecnica accesa tramite un impulso elettrico. Nella camera la pressione viene misurata tramite due trasduttori capacitivi, Setra model 280E, collocati nella pre e post camera.

Con riferimento al test è stato bruciato un singolo grano di HTPB tramite iniezione di ossigeno gassoso nella porta attraverso un ugello subsonico di forma conica. Il flusso di massa dell'ossigeno è stato misurato grazie a un tubo di Venturi nella condizione choked. I segnali analogici sono stati campionati a 10 kHz, convertiti in digitali con una risoluzione a 16 bit e analizzati e registrati da National Instruments (NI) SCXI interconnesso con un PC tramite un card di acquisizione dati NI 6034 E PCI. I segnali di flusso di pressione e ossigeno sono stati mediati abbassandogli fino a 100 Hz.

Un trasduttore ultrasonico è stato posto a metà della camera per misurare lo spessore del grano e la velocità di regressione in funzione del tempo di combustione tramite una tecnica di risonanza a ultrasuoni.

Per avere dei valori di partenza che successivamente saranno raffinati la velocità di regressione è stata determinata, inizialmente, con il classico metodo della perdita di massa-combustibile, ad esempio valutare il diametro di porta finale dalla massa di combustibile bruciata, e la velocità di regressione come una differenza tra diametro finale e iniziale diviso per il tempo di combustione. L'efficienza di combustione media è stata calcolata tramite un equilibrio chimico CEA code alla effettiva pressione media misurata nella camera di post combustione e la media oxidize to fuel ratio $OF = \frac{\dot{m}_{ox}}{\dot{m}_f}$.

Ora elenco di seguito i dati iniziali:

Initial port diameter,	Grain length, mm	Oxygen mass flow rate, kg/s	Regression rate, mm	Port diameter mm	Mixture ratio	Prechamber pressure, atm	Postchamber pressure, atm	Combustion efficiency, %
21.5	570	0.0718	0.66±0.020	43.1	1.58±0.03	10.2	10.0	97.6±0.8

Tabella 4.2.1: condizioni iniziali [2]

Capitolo 3: Analisi dei dati

Dopo che si è descritto lo svolgimento dell'esperimento passiamo ad illustrare i dati ottenuti usando i metodi prima elencati. Avendo usato un codice FORTRAN per l'analisi dei dati, i risultati saranno espressi tramite grafici. Per l'elaborazione dei dati in grafici si è usato il programma microsoft office excell. Quindi in questo capitolo si illustreranno i grafici ottenuti nelle varie casistiche e situazioni.

3.1 TECNICA END POINT

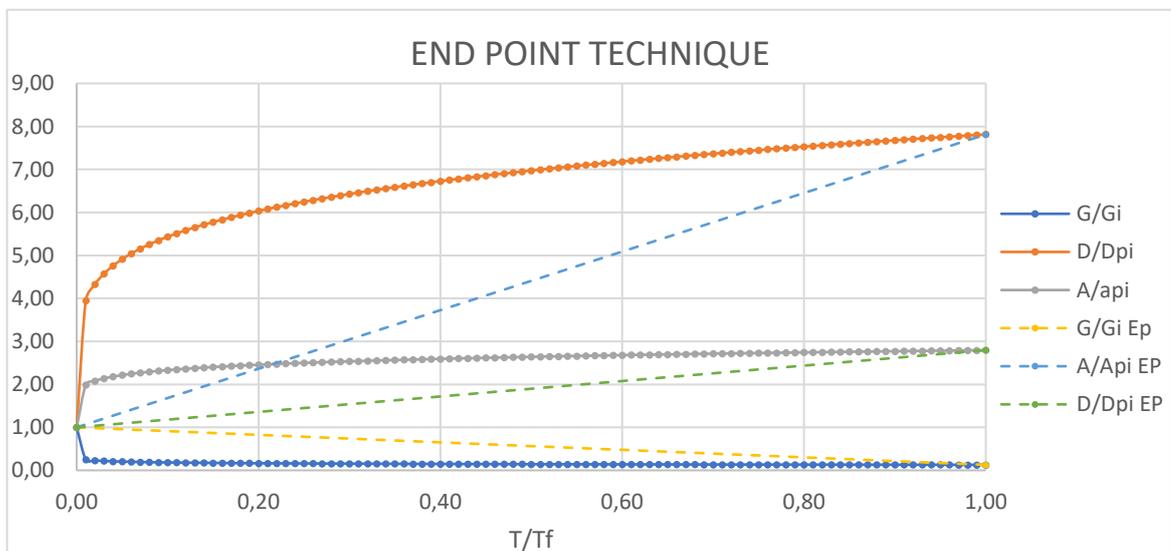


Grafico 3.1.1: andamento modello end point

In questo diagramma si mostrano i risultati ottenuti mediante tecnica End Point. Questa tecnica è la più semplice in quanto richiede solo la conoscenza del punto iniziale e finale, quindi risulta buona per avere dei valori iniziali su cui si andrà successivamente a raffinare i calcoli.

Avendo solo a disposizione il punto iniziale e finale e non tenendo conto di come variano i vari parametri nel tempo, questo metodo ci fornisce solo un punto di partenza. Sappiamo che in questo esperimento la variazione del diametro è fortemente dipendente dal tempo come anche la velocità di regressione. Questi fatti, se non si fanno studi più approfonditi, si riversano sulla determinazione delle performance del motore.

Nel diagramma sono rappresentati in linea continua la variazione dei parametri rispetto ad un tempo adimensionato, mentre con linea tratteggiata sono rappresentati l'andamento dei parametri calcolati tramite tecnica END POINT. Si evince subito che la tecnica END POINT si perde del tutto il parametro tempo e approssima tramite delle rette lineari l'andamento dei valori.

Di seguito elenco il valore della velocità di regressione ottenuto mediante questa tecnica:

$$\dot{r}_{ep} = \frac{D_{pf} - D_{pi}}{2(t_f - t_i)} = \frac{(60,1 - 21,5)mm}{2 * 28,5s} = 0,677 \frac{mm}{s} \quad (22)$$

Ovviamente si nota che la differenza con il valore ottenuto mediante il metodo degli integrali, 0,663 mm/s è minima. Se valutiamo l'errore in % si ha una differenza del circa 5%. Però con il metodo end point non si ha nessuna informazione legata alla variazione nel tempo e siccome ci sono dei parametri dipendenti dal tempo trascurare questa variazione può portare a errori significativi nella determinazione delle performance del motore.

3.2 METODO INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE

3.2.1 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA PRESSIONE IN CAMERA DI COMBUSTIONE

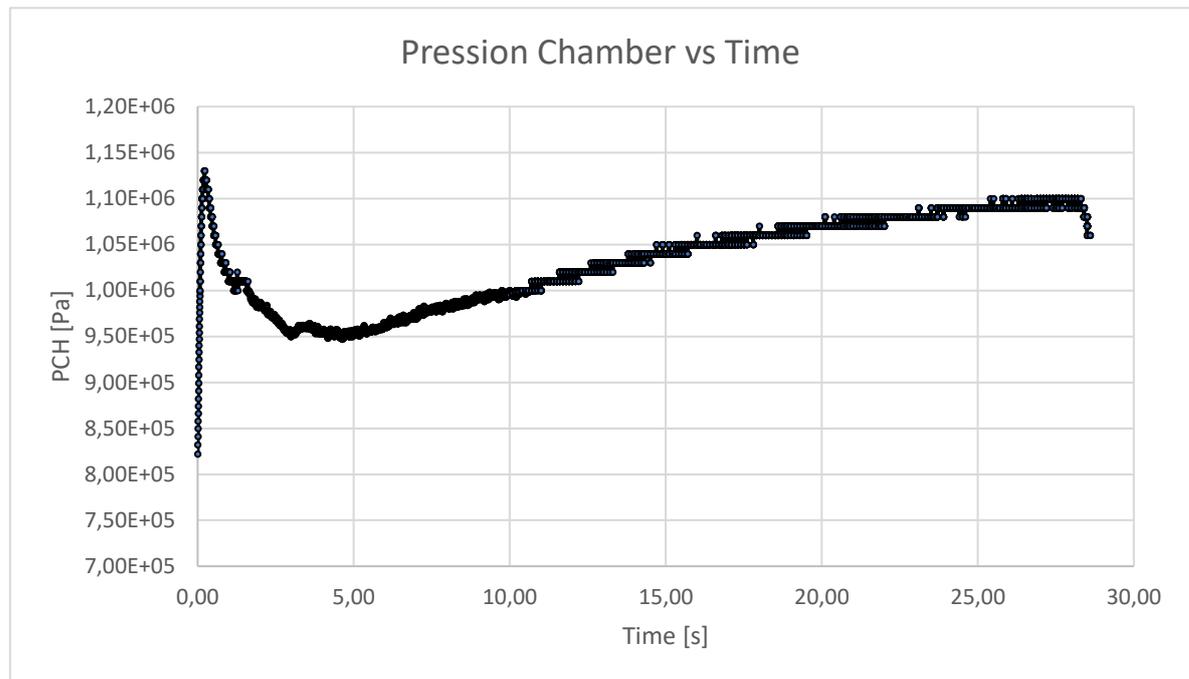


Grafico 3.2.1.1: pressione in camera di combustione vs tempo

Questo grafico mostra l'andamento della pressione in camera di combustione in funzione del tempo. Sull'asse delle ascisse è rappresentato il tempo di combustione mentre sull'asse delle ordinate i valori della pressione in camera di combustione.

Si può notare come alla accensione la pressione raggiunge il picco massimo, dovuto al combustibile usato come catalizzatore per l'accensione, ma anche al fatto che all'inizio la velocità dei gas sarà maggiore per via che la sezione trasversale è minore. Dopo questo picco si può notare che la pressione scende anche perché l'area della sezione trasversale aumenta, ma ad un certo punto riprende ad aumentare per via del tempo di resilienza dei gas in camera e a fine combustione verso i 28,5 secondi si nota una diminuzione netta.

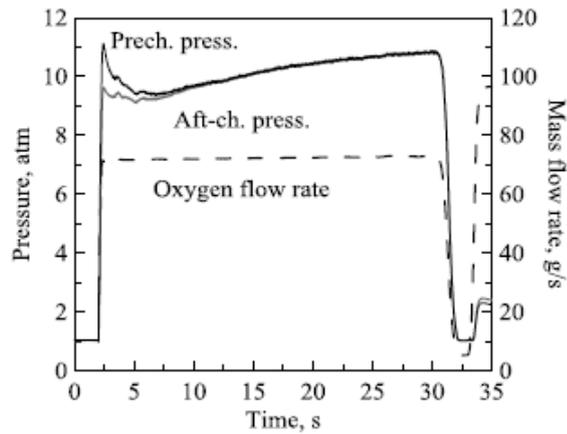


Grafico 3.2.1.2: evoluzione temporale della pressione e del flusso di ossigeno [2]

Confrontando il grafico ottenuto con il me con il grafico ottenuto con il metodo internal ballistics [2] si può notare che l'andamento è pressoché simile. Nel metodo analizzato si nota, a differenza di quello balistico, che la pressione di partenza e il picco massimo sono più alti, ma come media di pressione in camera si attesta sulle 10 atm come anche nel caso del modello balistico.

3.2.2 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI OSSIDANTE

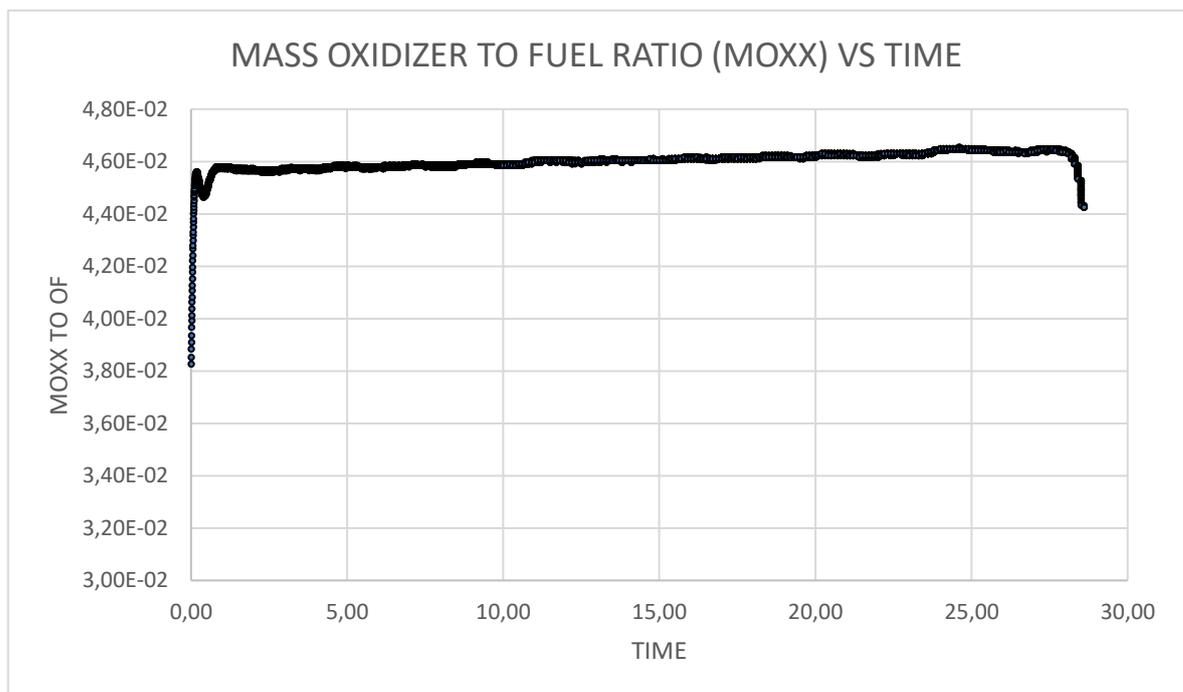


Grafico 3.2.2.1: massa di ossidante vs fuel ratio

Questo grafico studio l'andamento del mass oxidizer to fuel ratio vs time, ugualmente a prima, sull'asse delle ascisse rappresento il tempo mentre sull'asse delle ordinate la MOXX TO OF.

In questo diagramma notiamo come l'andamento di tale parametro a parte i valori iniziali che per via dell'accensione sono un po' variabili subito dopo l'accensione ($\approx 2s$) si porta sul valore costante $4,60 \cdot 10^{-2}$ e poi si mantiene pressoché costante fino a fine test.

Confrontando i valori ottenuti con il metodo proposto di Heister si nota che in questo caso si ha un andamento costante a parte i primi 2 secondi iniziali, mentre nel grafico ottenuto in ref [2] l'andamento è fortemente dipendente dal tempo si nota una dipendenza temporale molto marcata. Riporto di seguito una andamento qualitativo dei risultati ottenuti dal professore Pastrone:

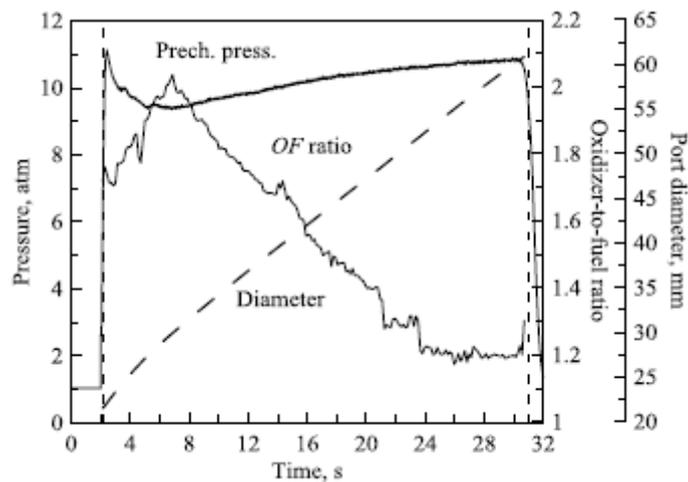


Grafico: 3.2.2.2: evoluzione temporale del OF e del diametro in relazione alla pressione in camera [2]

3.2.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL DIAMETRO

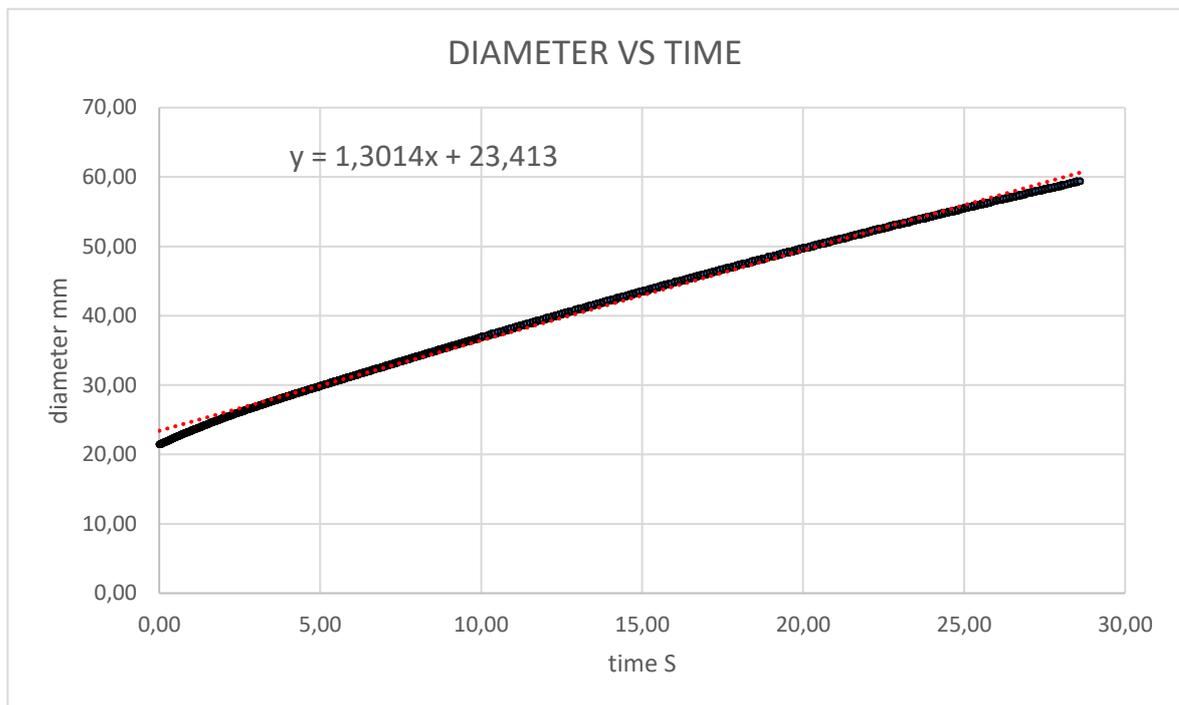


Grafico 3.2.3.1: diametro vs tempo

Questo diagramma si valuta l'andamento del diametro, asse delle ordinate, in relazione del tempo, asse delle ascisse. Si nota che il diametro durante il test presenta un andamento quasi lineare come lo conferma anche la linea di tendenza. L'andamento del grafico rispecchia molto bene l'andamento di quello ottenuto in ref [2], come si può notare anche dal grafico 3.5.

3.2.4 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA VELOCITA' DI REGRESSIONE

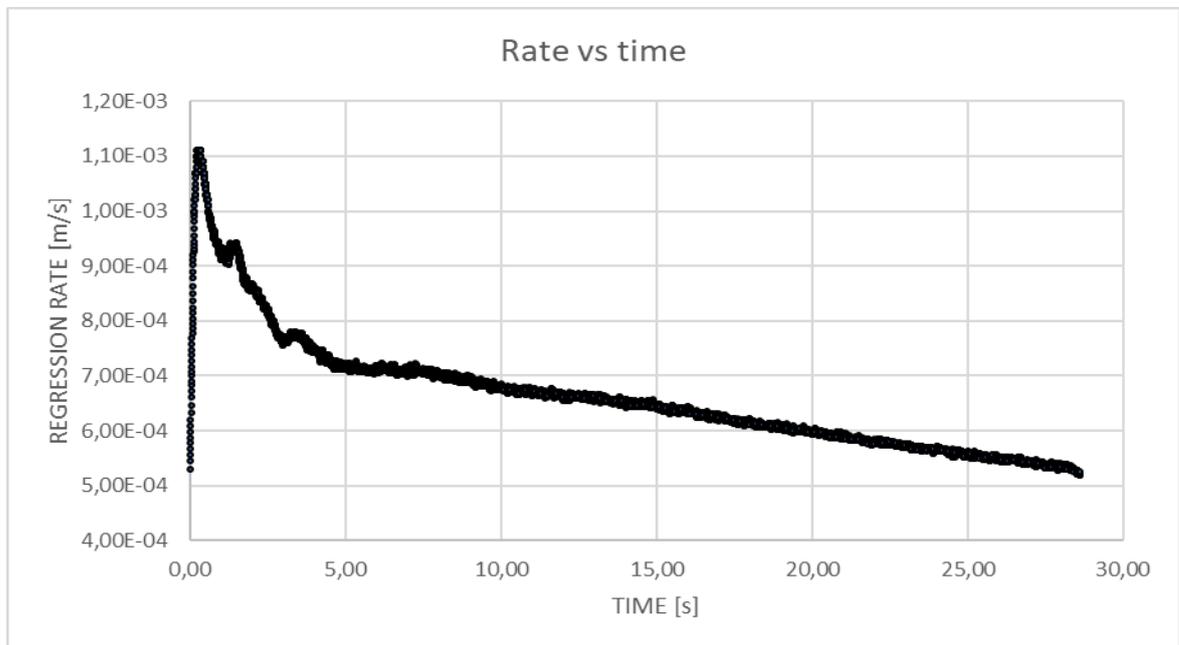


Grafico 3.2.4.1: velocità di regressione vs tempo

Valutando la velocità di regressione in funzione del tempo, applicando il metodo degli integrali proposto da Heister, e assumendo la C^* costante questo fa che i valori iniziali e finali presentano una velocità di regressione più bassa di quello che si aspetterebbe.

In questo grafico si nota come all'inizio sia molto alta e poi via via che il materiale si sta consumando diventi più bassa. Questo fatto può essere determinato anche dal fatto che all'inizio a sezione trasversale di combustione è piccola quindi si ha una regressione del grano più rapida e poi man mano che la sezione aumenta anche la velocità di regressione diminuisca.

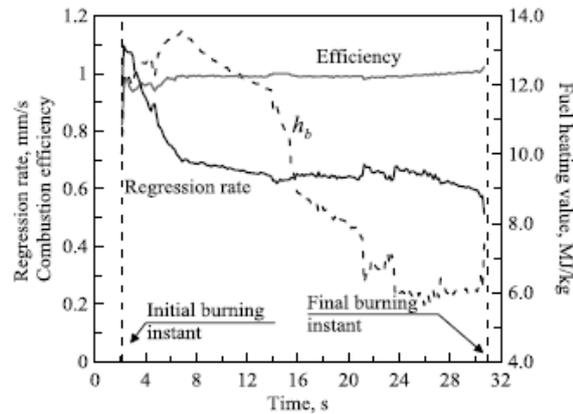


Grafico 3.2.4.2: evol. temp. della v di regressione, efficienza di combustione e del potere calorifico del combustibile

Facendo un confronto con i risultati ottenuti nello studio precedente si può notare che l'andamento della velocità di regressione per i valori iniziali è simile al metodo degli integrali, ma appena superati i secondi iniziali presenta un andamento più "costante" mentre nel caso del metodo a integrali si aveva quella diminuzione continua fino ad arrivare a valori molto bassi ai tempi finali.

Se consideriamo l'andamento medio della velocità di regressione con il metodo proposto da Heister abbiamo ottenuto un valore di 0,663 mm/s che è simile a quello ottenuto tramite il metodo balistico più dettagliato.

3.2.5 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI MASSA

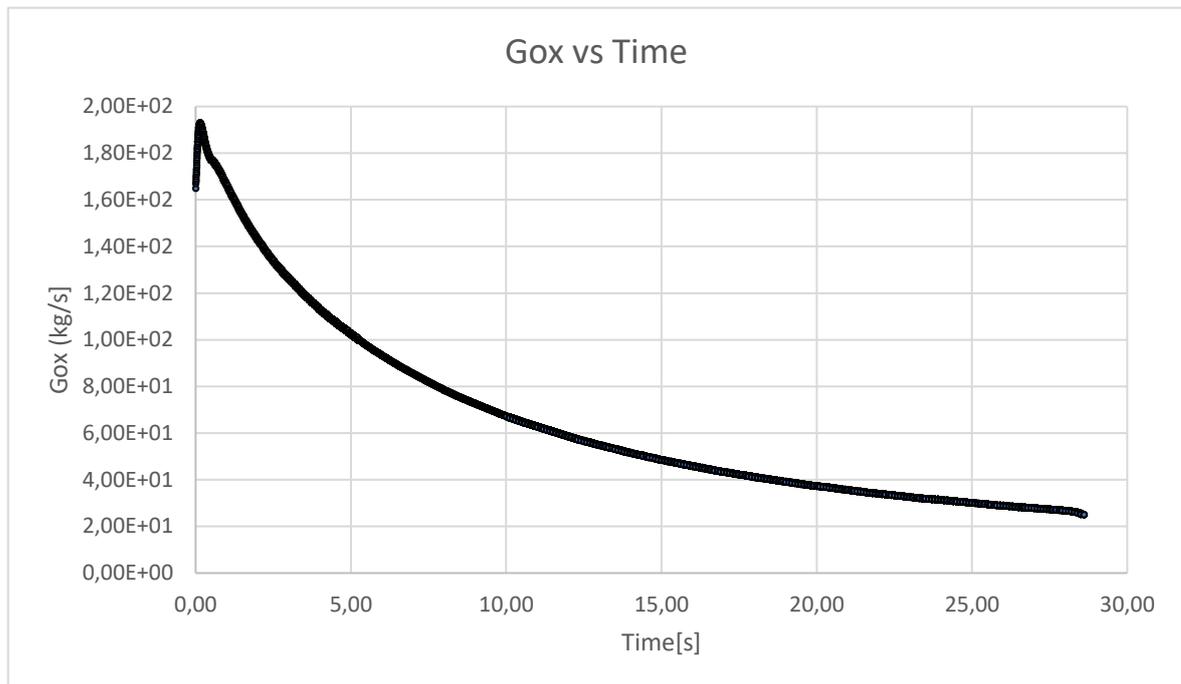


Grafico 3.2.5.1: flusso di massa totale vs tempo

Questo grafico mostra l'andamento del flusso di massa in funzione del tempo. Questa curva mostra il suo andamento non lineare introdotto dalla proporzionalità del flusso totali di massa a D_p^{-2} (diametro di porta). Questa dipendenza quadratica dal diametro di porta giustifica la scelta migliore di usare il metodo degli integrali rispetto al metodo end point in quanto si riesce ad apprezzare anche le variazioni geometriche dovute all'avanzare del test nel tempo.

Uno dei principali benefici di questo metodo sta nel fatto che riesce a fornire un meccanismo atto a determinare la sensibilità della velocità di regressione sul flusso di massa in un solo test. Questa informazione è affidabile se la durata del test è lunga abbastanza (>10 s) sapendo che la fase iniziale di accensione occupa pochissimo tempo.

3.2.6 Gox VS RATE

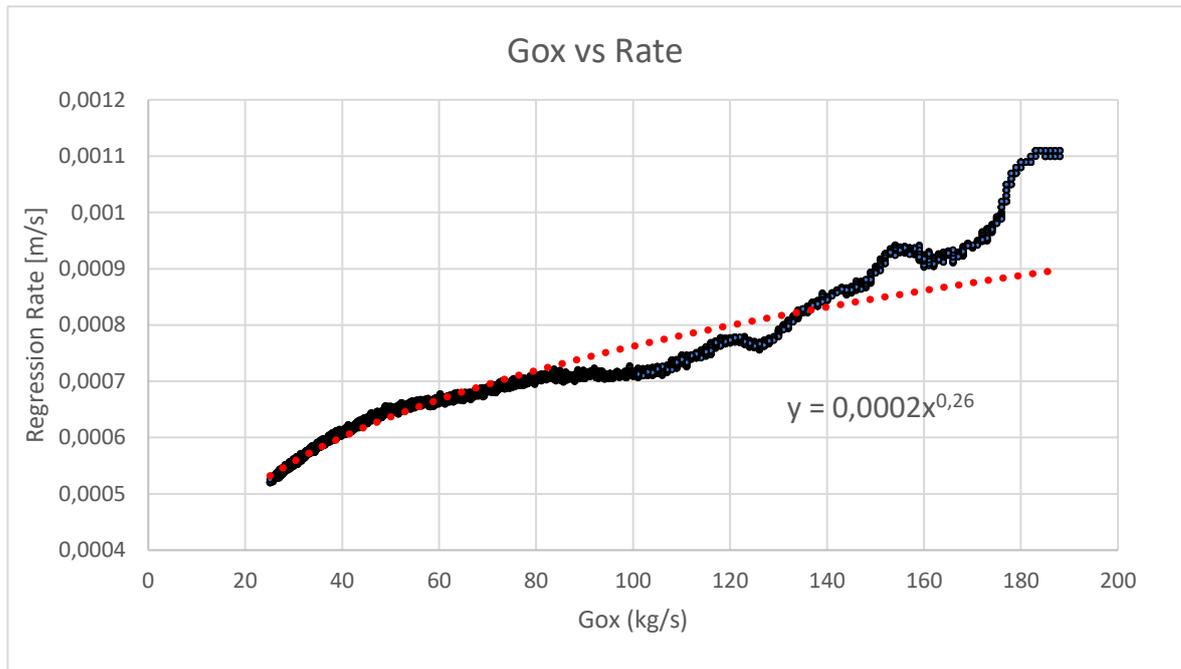


Grafico 3.2.6.1: flusso di massa totale vs velocità di regressione

Questo digramma riporta l'andamento della velocità di regressione in funzione del flusso di massa totale e si nota che all'inizio si ha un incremento lieve per via dell'igniter e una volta che si è consumato si arriva a uno stato quasi stazionario e poi successivamente inizia ad aumentare ancora. Il metodo degli integrali si rivela essere una buona scelta in quanto provvede a fornire una accurata misura della velocità di regressione in relazione al flusso di massa totale perché il diametro di porta e la regressione sono i parametri che maggiormente variano in questa zona.

3.3 METODO KUMAR

Adesso passiamo ad analizzare un secondo metodo, il metodo proposto da Rajiv Kumar e P.A Ramakrishna [3] che si basa sullo studiare la velocità di regressione sfruttando la pressione in camera di combustione.

A differenza del metodo degli integrali[4] dove si è assunto la velocità caratteristica C^* come una variabile costante, in questo modello la velocità caratteristica non è più costante ma presenta una legge di variazione sviluppata in un programma fortran derivata dal metodo balistico [2] e usando la pressione in camera.

Per poter fare un paragone con i risultati ottenuti tramite il metodo agli integrali riporteremo i 3 grafici di studio di questo modo e nel prossimo paragrafo ci sarà un confronto diretto tra i risultati ottenuti mediante questo modello e quello agli integrali.

3.3.1 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA VELOCITA' DI REGRESSIONE

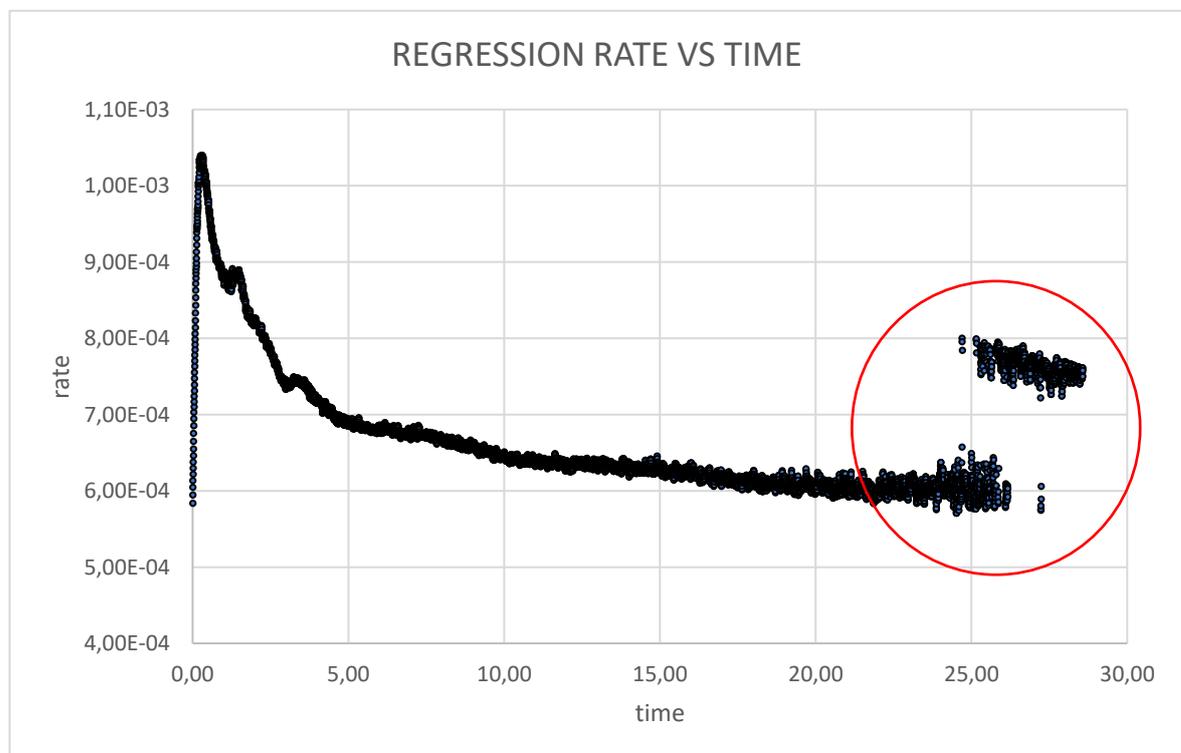


Grafico 3.3.1.1: velocità di regressione vs tempo

In questo grafico si nota come all'inizio la regression rate sia molto alta e poi via via che il materiale si sta consumando diventi più bassa. Questo fatto può essere determinato anche

dal fatto che all'inizio la sezione trasversale di combustione è piccola quindi si ha una regressione del grano più rapida e poi man mano che la sezione aumenta anche la velocità di regressione diminuisce. In più si nota che nella parte finale, cerchiata in rosso, sono presenti dei valori che si discostano dalla soluzione come se la soluzione oscillasse tra più di una soluzione possibile. Questo fatto sarà poi analizzato successivamente mostrando come per certi tempo la soluzione sia unica e che più ci si avvicina al tempo di circa 25 secondi la soluzione diventi molteplice.

Facendo una prova a C^* fissato come in Heister si nota che la parte finale di oscillazioni non si presenti più.

3.3.2 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL FLUSSO DI MASSA

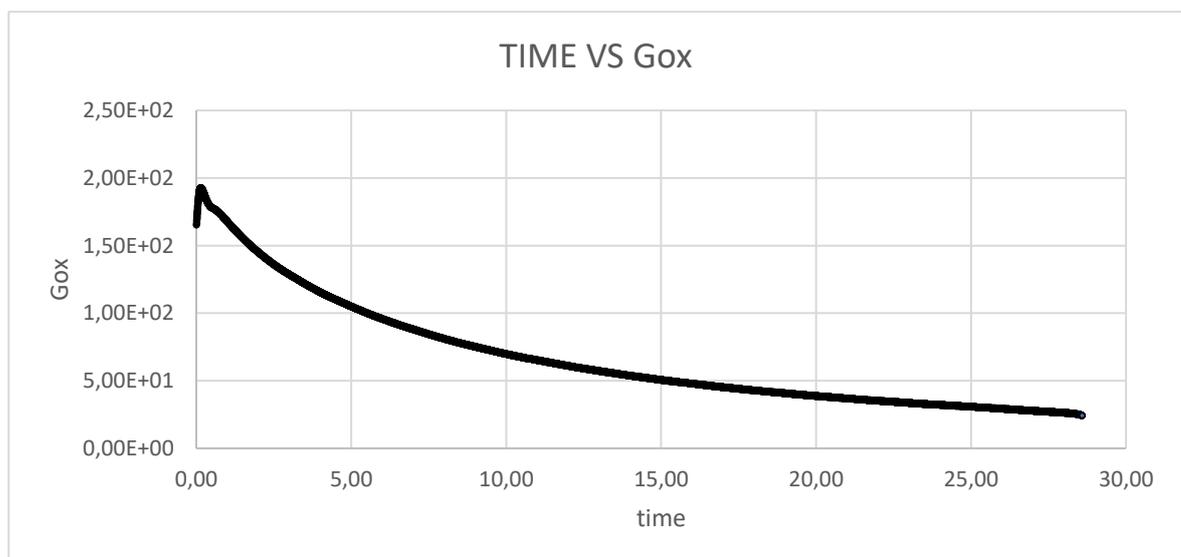


Grafico 3.3.2.1: tempo vs flusso totale di massa

Questo diagramma mostra l'andamento non lineare del flusso totale di massa e la sua forte dipendenza dal tempo.

3.3.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DEL DIAMETRO

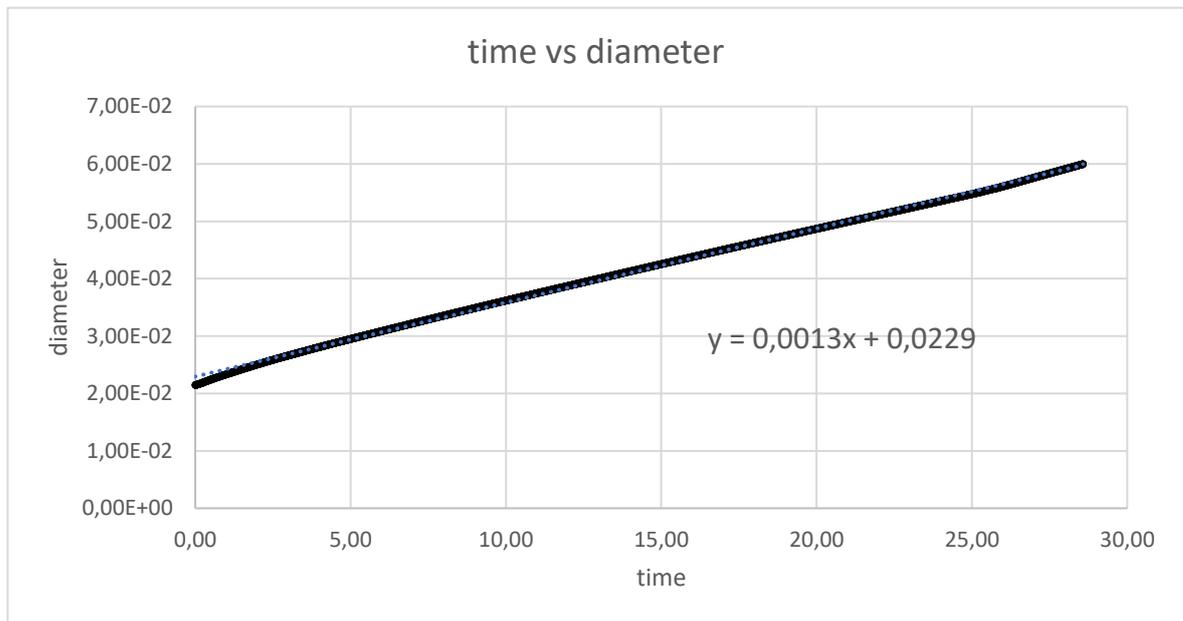


Grafico 3.3.3.1: tempo vs diametro

In questo diagramma si valuta l'andamento del diametro, asse delle ordinate, in relazione del tempo, asse delle ascisse. Si nota che il diametro durante il test presenta un andamento quasi lineare come lo conferma anche la linea di tendenza. L'andamento del grafico rispecchia molto bene l'andamento come ottenuto in rif [2]. Quello che si può notare a prima vista che in questo caso, rispetto al modello agli integrali, l'approssimazione tramite linea di tendenza lineare e quasi coincidente con la soluzione segno a indicare che il diametro presenta una variazione lineare rispetto al tempo.

3.4 CONFRONTO KUMAR VS HEISTER

Dopo aver indicato i risultati dei vari metodi, ora confrontiamo i risultati ottenuti dai due modelli principali il modello proposto da Heister “INTEGRAL AVERAGING TECHNIQUE” e quello proposto da Kumar “CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE”.

Di seguito si riporta i 3 grafici principali di confronto che sono:

- Confronto sulla regression rate
- Confronto sul flusso di massa totale Gox
- Confronto sull'andamento del diametro.

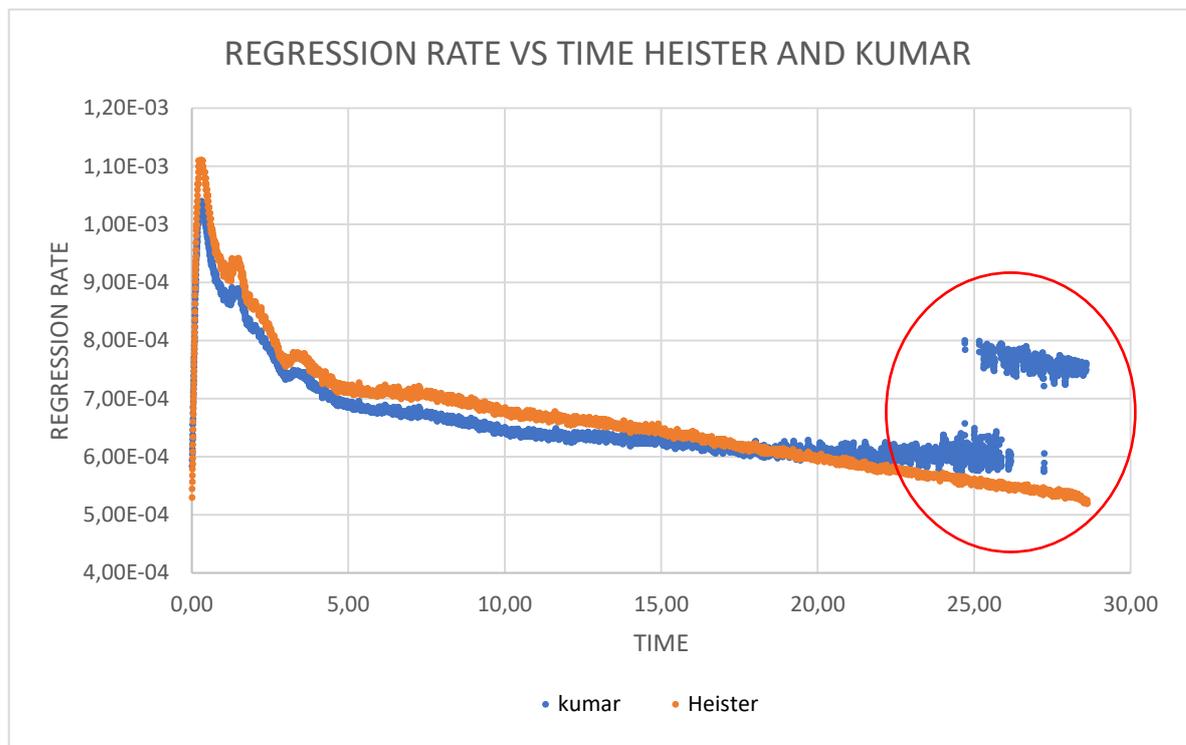


Grafico 3.4.1: velocità di regressione vs tempo

Come si evince da questo grafico i due metodi presentano un andamento simile. Per i primi 19 secondi Heister presenta valori più alti rispetto a Kumar, invece oltre i 19 secondi è Kumar ad avere i valori più alti. Il tratto più ambiguo è la parte finale del metodo proposto da Kumar dove vediamo la soluzione oscillare tra più valori possibili come se la soluzione non fosse unica. Approfondendo lo studio nella parte finale, che farò vedere in seguito, si è evidenziato che a partire da circa 25 secondi la soluzione non è più unica ma molteplice. Questo si è scoperto fosse dovuto al fatto che Kumar ha assunto una C^* variabile e nella

parte finale la soluzione, in base alla C^* , non è unica; mentre nel metodo agli integrali [4] assumendo C^* come parametro costante non si ha questo problema.

Infatti, a conferma di ciò, abbiamo fatto girare il programma di Fortran per quanto riguarda il modello di Kumar settando il parametro C^* come costante, anzi imponendolo uguale a quello che abbiamo usato per il modello agli integrali. Facendo ciò si è notato che la parte finale dove oscillava è sparita e presentava un andamento praticamente simile a quello ottenuto da Heister.

Nel grafico di seguito si può osservare che l'andamento è uguale a quello del metodo agli integrali [4]:

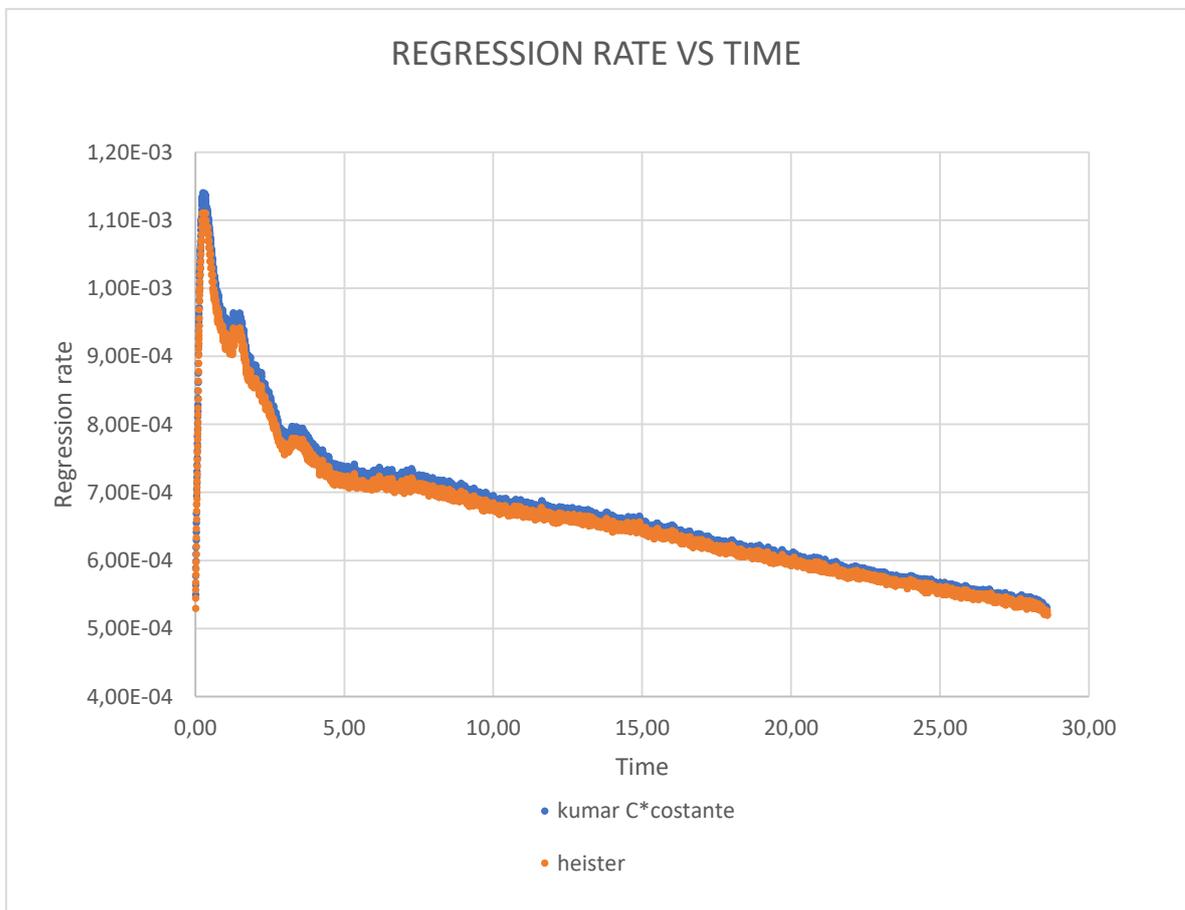


Grafico 3.4.2: velocità di regressione a C^* costante

Invece per quanto riguarda gli ultimi 2 grafici non c'è molto da dire si evince che i due metodi coincidono e presentano risultati quasi sovrapponibili.

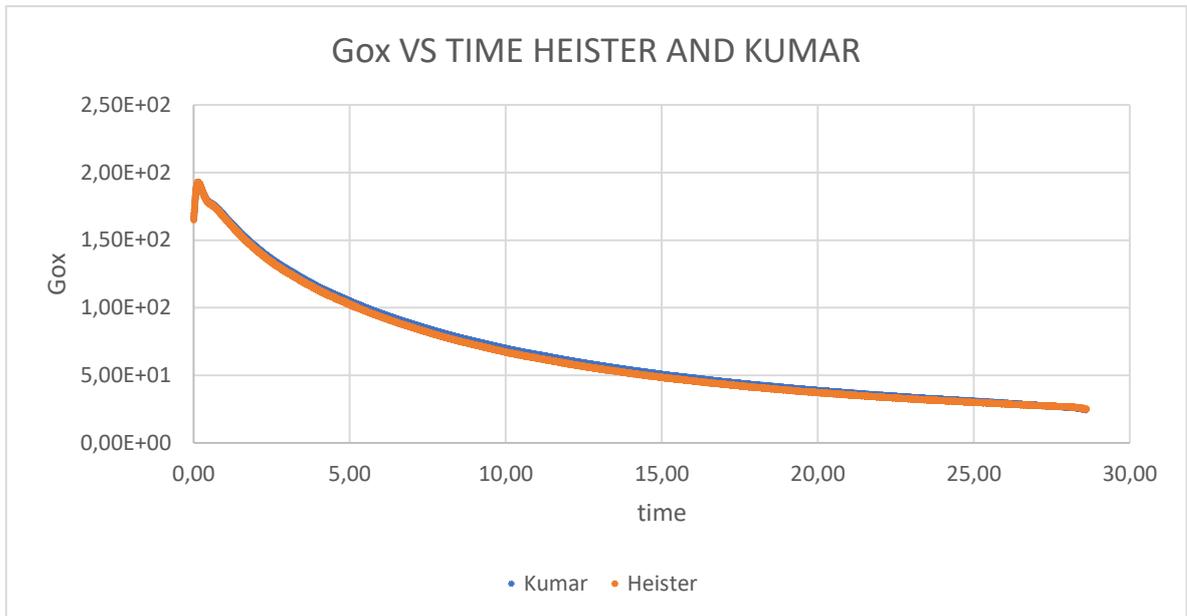


Grafico 3.4.3: flusso di massa totale vs tempo

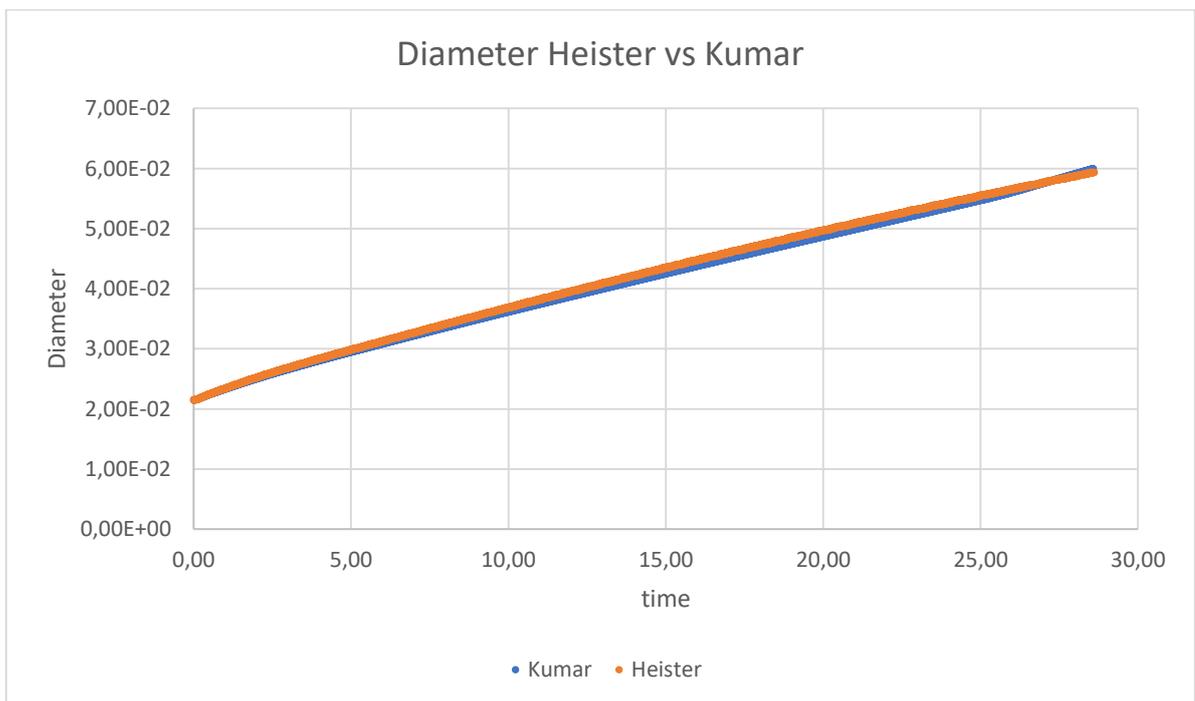


Grafico 3.4.4: diametro vs tempo

3.4.1 ANALISI COMPORTAMENTO ANOMALO DEL MODELLO KUMAR

Dopo che si è osservato un andamento ambiguo nella parte finale del grafico della REGRESSION RATE VS TIME nel modello proposto da Kumar, CHAMBER PRESSURE BASED TECHNIQUE, si è approfondito i calcoli cercando di capire il perché si presenti quella soluzione oscillante come se ci fosse più di una soluzione. Approfondendo i calcoli, come si poteva evincere dai grafici presentati prima, si è visto che questo oscillare è dovuto al fatto che il modello studiato da Kumar usava una velocità caratteristica C^* dipendente dai parametri, mentre quello studiato da Heister usava una C^* costante e fissata. Però sappiamo dagli studi che il parametro C^* è molto legato alle variazioni geometriche, al rendimento e al tempo. Quindi nel metodo agli integrali, studiato da Heister, assumendo una C^* costante e fissata si è bypassato questo problema della dipendenza molteplice. Però c'è da precisare che questo andamento oscillante della velocità di regressione si ha solo nella parte finale mentre all'inizio tutto va per il verso giusto.

Per illustrare questo problema si è deciso di prendere la formula della velocità di regressione, usata da Kumar, e studiarne separatamente il numeratore e il denominatore e vedere quante intersezioni presentano le due curve possibili; se l'intersezione è unica la soluzione è unica se invece è molteplice la soluzione è molteplice.

La formula, usata nel programma fortran, in questione è la seguente:

$$mf1 = \pi \rho_f d_p L_g * rate; \quad mf2 = \frac{Pnoz * Ag}{ETA * C *_{theo}} - \dot{m}_{ox}$$

In queste due formule abbiamo elencato le due soluzioni di portata e dove dalla loro intersezione si evince se la soluzione è unica. Cioè la soluzione è unica dove i due valori sono uguali $mf1=mf2$. In questo caso $mf1$ indica la portata prodotta, ed è una retta crescente, mentre $mf2$ è la portata espulsa che nei grafici è una curva che scende o sale in base al tempo considerato.

Di seguito presentiamo dei grafici presi per step temporali diversi, in modo da evidenziare come la soluzione da unica diventi molteplice.

- Tempo 5 secondi

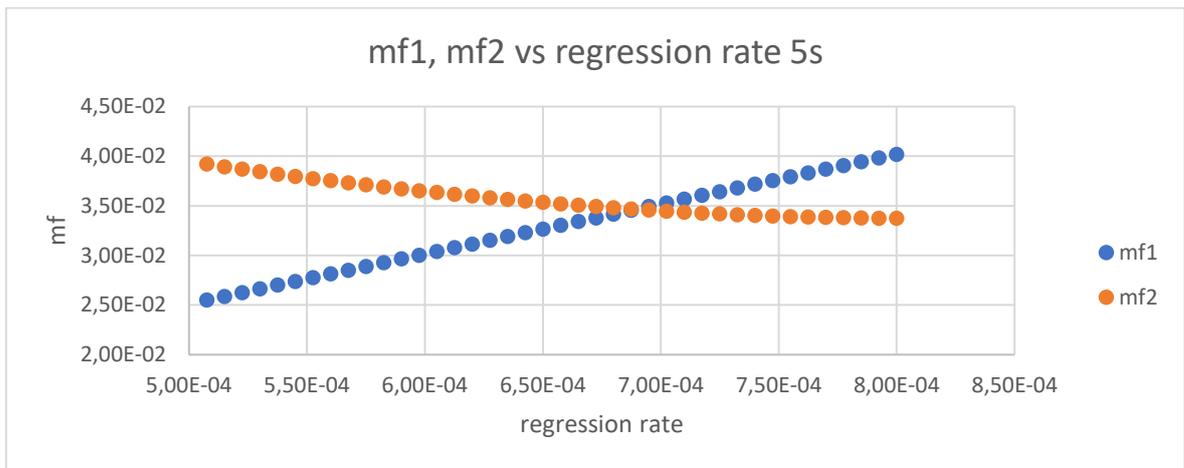


Grafico 3.4.1.1: andamento delle due soluzioni di flusso di combustibile vs regression rate

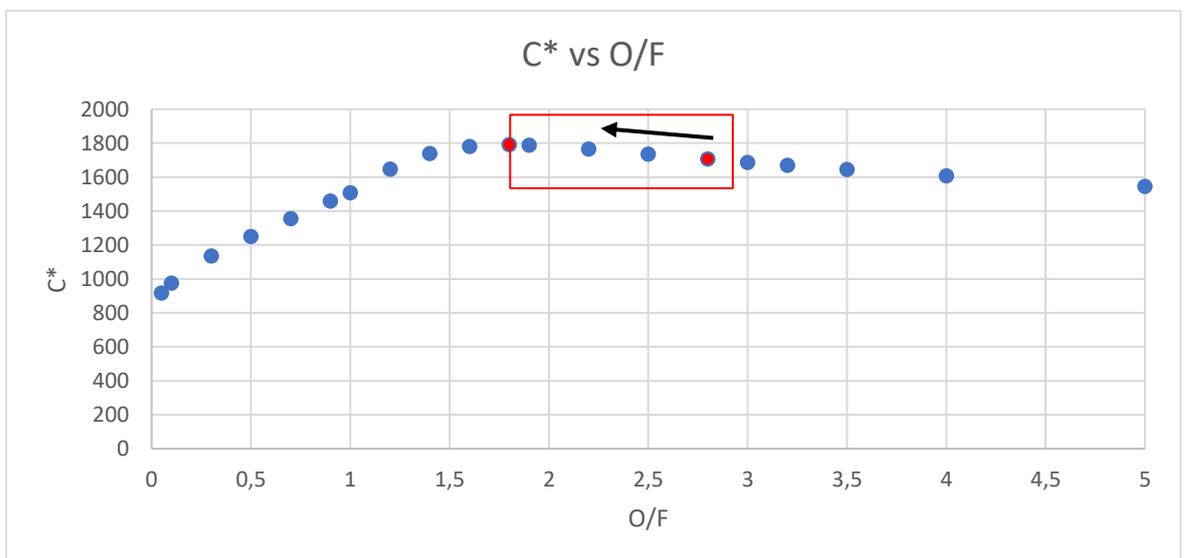


Grafico 3.4.1.2: velocità caratteristica vs ossidante/fuel

In questo step iniziale si può osservare che siamo ai valori di OF superiori a quelli che massimizza i valori di C^* . Aumentando la velocità di regressione diminuisce mf_2 e quindi OF scende. di conseguenza C^* cresce per altro tale crescita è sempre più debole man mano che si avvicina al valore del suo massimo. In questo istante comunque la variazione di C^* è ancora sensibile nel campo di velocità di regressione di interesse. Quindi mf_1 e mf_2 sono due curve ben distinte con una unica soluzione chiaramente individuabile. Per cui si ha una soluzione simile a quella dei metodi agli integrali [4], poiché la variazione di C^* è lieve.

- Tempo 16 secondi



Grafico 3.4.1.3: andamento delle due soluzioni di flusso di combustibile vs regression rate

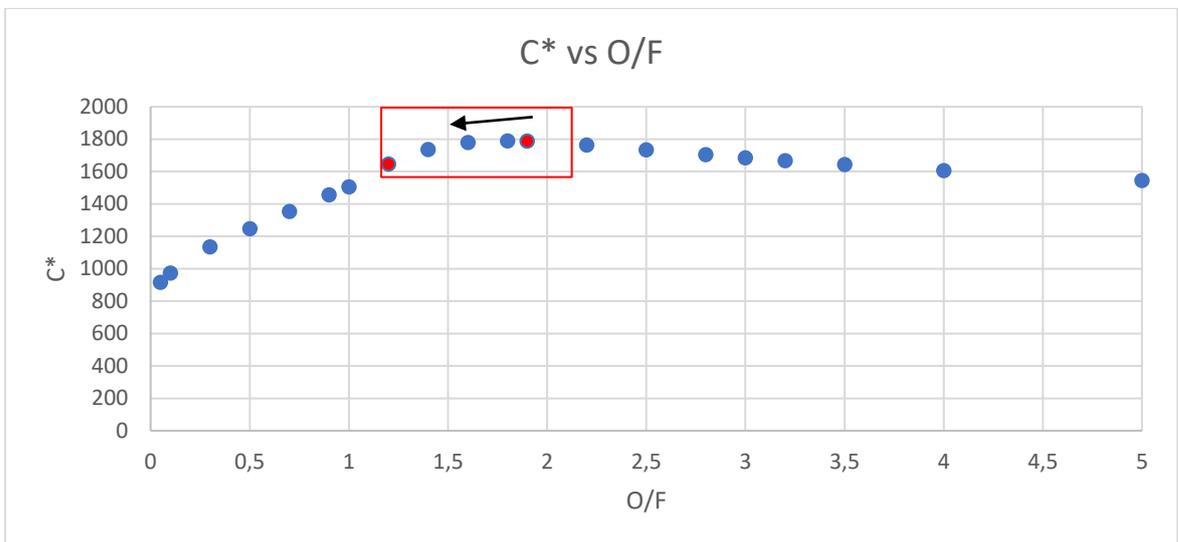


Grafico 3.4.1.4: velocità caratteristica vs ossidante/fuel

Andando a studiare uno step temporale successivo si nota come le due curve tendono ad avvicinarsi pur rimanendo ancora distinte. Ovviamente questo avvicinarsi è dovuto al fatto che la C^* varia di più rispetto alla condizione precedente. Infatti, la C^* al diminuire di O/F in un primo istante rimane costante ma quando la O/F scende ancora arriviamo alla sinistra del plateau e quindi presenta una variazione più netta (ci troviamo a sinistra del picco di C^* nel diagramma C^* vs O/F). Per cui la curva $mf1$ è sempre la stessa, mentre la curva $mf2$ all'inizio è piatta poi tende a salire perché la derivata di C^* è diventata positiva. Però siccome la derivata è positiva, ma piccola, allo stesso modo la soluzione è unica e ben distinta.

- Tempo 20 secondi



Grafico 3.4.1.5: andamento delle due soluzioni di flusso di combustibile vs regression rate

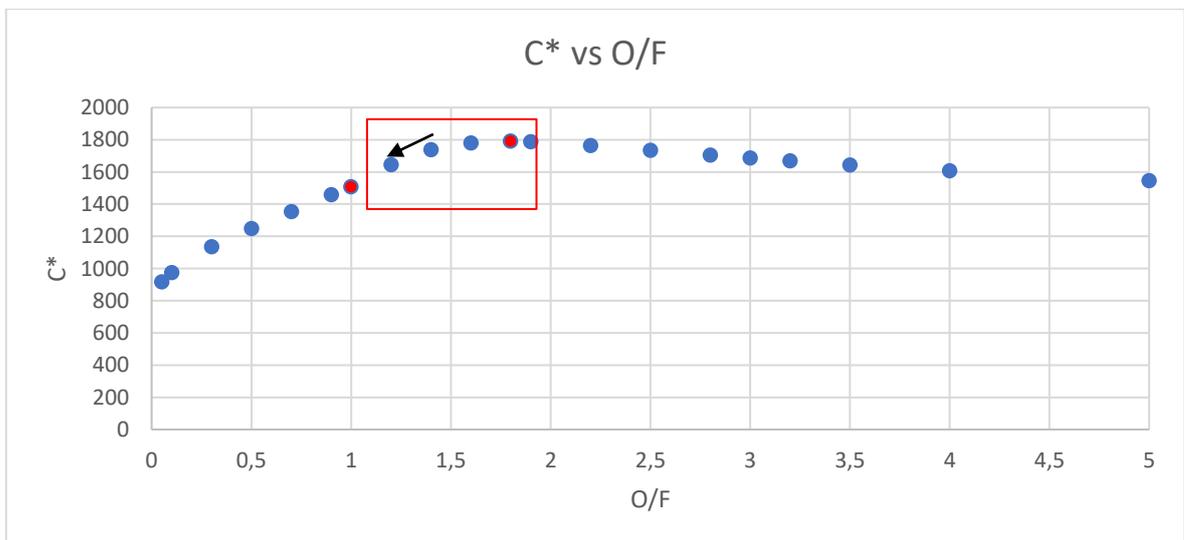


Grafico 3.4.1.6: velocità caratteristica vs ossidante/fuel

Anche in questo la C^* si trova in una zona dove OF diminuisce più velocemente e di conseguenza la curva mf2 ne risente molto più, dato che la derivata di C^* è diventata leggermente positiva, si nota che tende a salire più velocemente. Però anche se l'influenza della variazione di C^* è molto più accentuata comunque si può vedere dal grafico 3.4.1.5 che la soluzione è ancora unica.

- Tempo 24,68 secondi

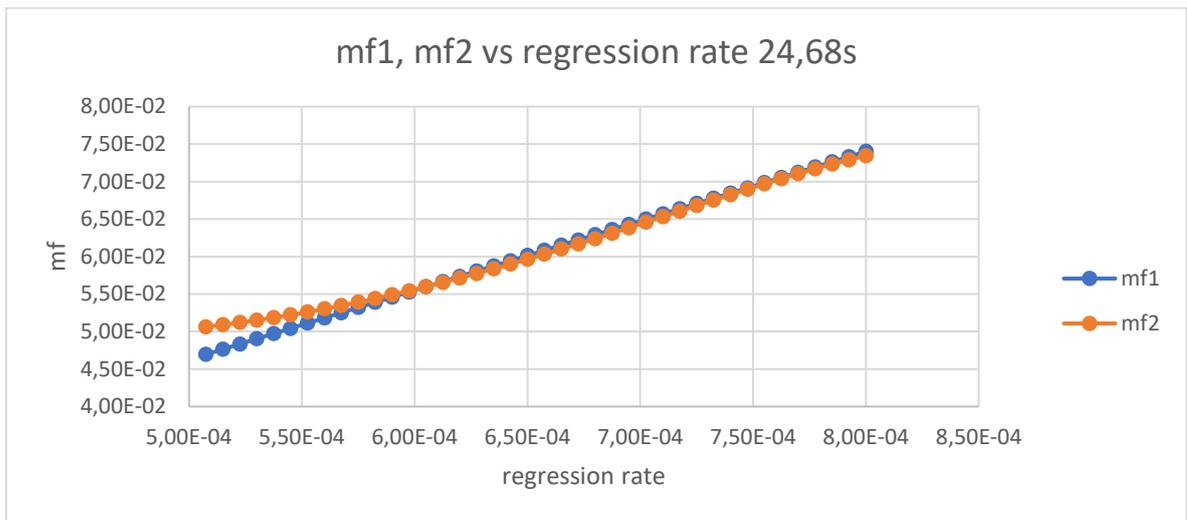


Grafico 3.4.1.7: andamento delle due soluzione di flusso di combustibile vs regression rate

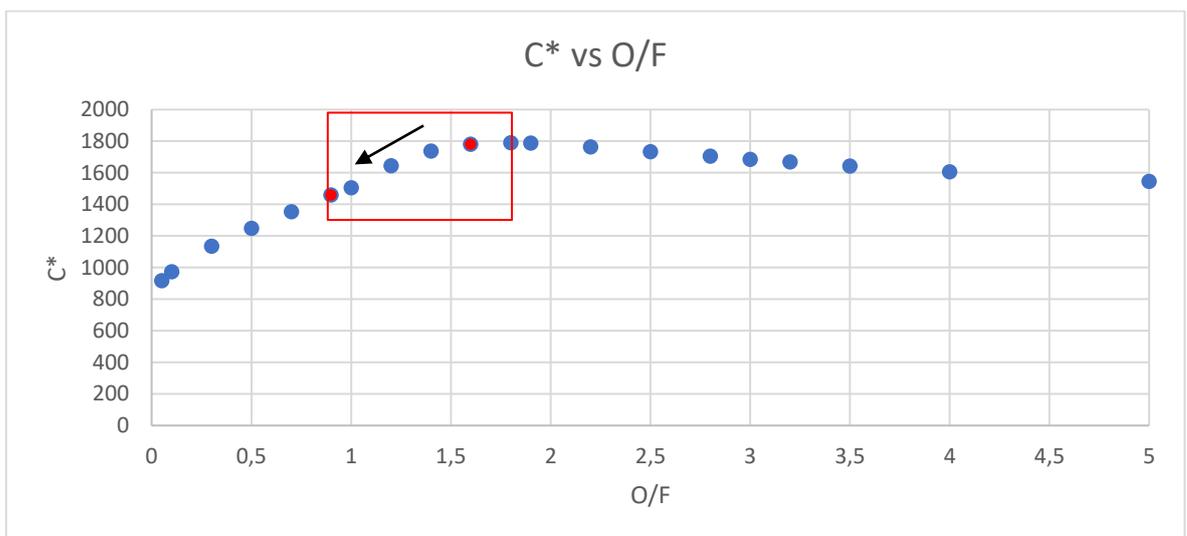


Grafico 3.4.1.8: velocità caratteristica vs ossidante/fuel

In questo caso come nel precedente, la OF è in un range in cui scende più velocemente e ciò si rispecchia sulla C^* che scende anche essa più velocemente. Di conseguenza la curva mf2 sale più velocemente e **la soluzione non è più unica**, mentre la curva mf1 è sempre la stessa. Questo perché la derivata di C^* è positiva e non più leggermente positiva quindi la curva mf2 sale molto più velocemente.

- tempo 28 secondi



Grafico 3.4.1.9: andamento delle due soluzioni di flusso di combustibile vs regression rate

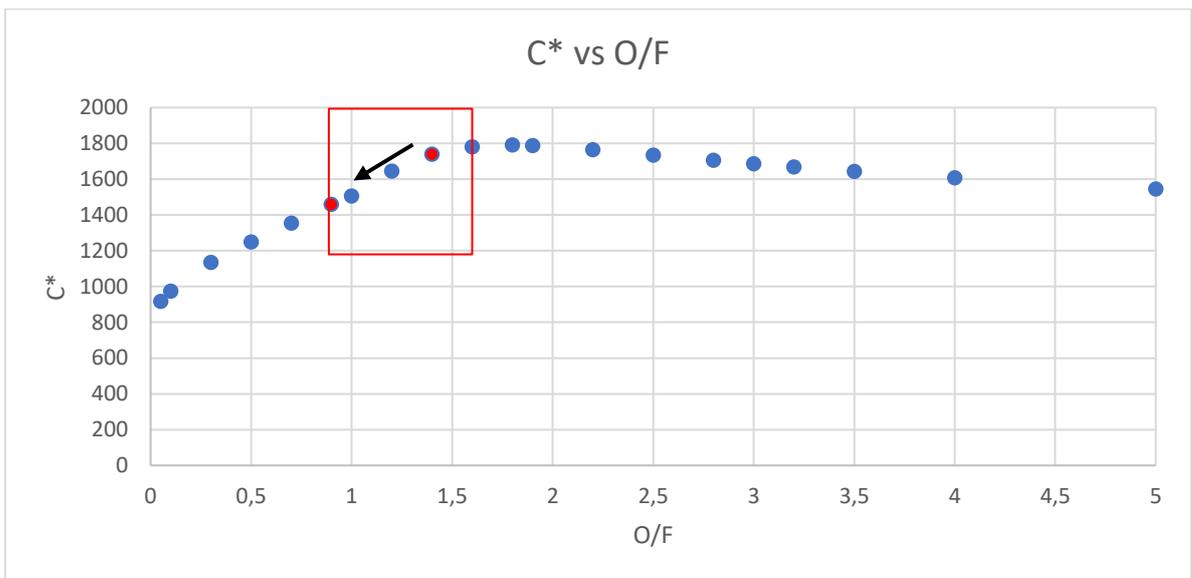


Grafico 3.4.1.10: velocità caratteristica vs ossidante/fuel

Analizzando gli ultimi 3 step presi in considerazione, si nota come all'aumentare della regression rate e di conseguenza alla diminuzione della O/F si evince dalle zone evidenziate che la C^* star non è più costante ma diminuisce. Questo fatto che la C^* presenti una diminuzione più marcata porta alla ambiguità della soluzione cioè la curva mf2 sale più velocemente e va a sovrapporsi alla curva mf1 che è sempre la stessa, una retta crescente.

3.4.2 CONCLUSIONI COMPORTAMENTO ANOMALO KUMAR

Osservando i 6 diagrammi precedenti si nota come all'inizio del test e fino ai 20 secondi la soluzione sia ben distinta una sola intersezione, poi si osserva con l'avanzare del tempo che la soluzione che rappresenta il flusso di combustibile mf2 si avvicina sempre più alla soluzione rappresentata dal omonimo mf1, che è fissa, fino a quando, come si osserva nel grafico a 3.4.1.7, si sovrappone in più punti creando quella ambiguità di soluzione che si osservava nel grafico 3.4.1 regression rate vs time. Nei grafici fatti a istanti successivi di tempo si può notare come le due linee si intersecano in più punti senza generare una soluzione unica.

Andando poi a fare uno studio dell'andamento della C^* , ordinate, in funzione del rapporto O/F, ascisse, si arriva a spiegare questo andamento anomalo. In particolare, si nota a inizio esperimento non c'è questo problema perché, come si può notare dal grafico C^* vs O/F 3.4.1.2, si ha un C^* star pressoché costante quindi due soluzioni distinti. Man mano che si avanza nel tempo il rapporto O/F scende e questo porta ad una diminuzione di C^* . Questa variazione a tempi elevanti diventa molto più evidente e quindi si ha una C^* star variabile come si può vedere, ad esempio, nel grafico 3.4.1.10 dove nel caso studiato, evidenziato in rosso, si nota come la C^* non sia più nel tratto in cui la sua variazione è lieve. Al diminuire della regression rate la O/F la C^* scende anche essa e siamo a sx del plateau dato dal diagramma C^* vs O/F. Riassumendo brevemente tutto dipende dalla pendenza della soluzione diagrammata che è legata alla derivata di C^* . Finché la derivata di C^* è piccola o negativa allora la soluzione è unica (la curva mf1 che è sempre crescente e la curva mf2 è decrescente quindi è certo che si ha una soluzione unica), appena la derivata diventa positiva o grande la soluzione non è più unica (curva mf1 sempre crescente e ora la curva mf2 cresce a sua volta quindi in base alla derivata può crescere più velocemente e sovrapporsi in più punti). Quindi finché siamo in un certo range di OF abbiamo una soluzione unica, appena usciamo da tale range la soluzione non è più unica.

Andando a vedere la soluzione proposta da Heister con C^* costante si nota che la soluzione è sempre unica in quanto avendo assunto C^* come costante, il denominatore che dipende da C^* , il fattore mf2 è una retta e quindi l'intersezione è unica. Infatti, facendo una prova con i dati di Kumar e assumendo costante la C^* otteniamo:

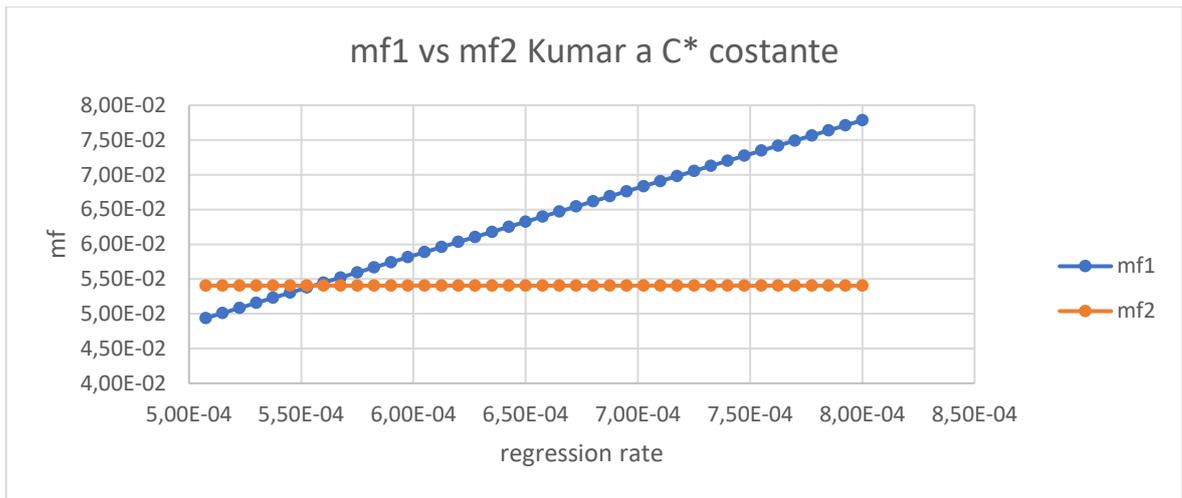


Grafico 3.4.2.1: andamento delle due soluzioni di flusso di combustibile vs regression rate a C^* costante

Capitolo 4:

Conclusioni

Dopo aver eseguito gli studi si può affermare che i 3 metodi di per sé hanno una base simile, ma poi in funzione delle assunzioni fatte si differenziano per risultati e precisione.

Il primo caso studiato è il modello End Point che è il più semplice ed è una media di due valori, uno iniziale e uno finale. Viene utilizzato per avere una idea di partenza.

Il secondo caso studiato è il modello agli integrali [2] che a differenza del modello End Point, che usa solo il valore iniziale e finale per fare la media, usa tutti i valori contenuti nell'intervallo di tempo di integrazione. In più, si basa anche su una ipotesi fondamentale che è quella di assumere la velocità caratteristica C^* costante. Si noti che anche se si ottiene una soluzione più precisa rispetto al modello End Point, l'assumere C^* costante porta ad avere una semplificazione dei calcoli in quanto la C^* è, in realtà, dipendente dal tempo.

Il terzo caso studiato è quello basato sulla pressione in camera di combustione [3]. Rispetto al modello agli integrali non assume un C^* costante, ma la calcola ad ogni passo sfruttando la pressione in camera. Da questo modello, utilizzando la pressione in camera di combustione e poi la conoscenza della geometria e dei parametri di combustione, si riesce a risalire ad una velocità di regressione più precisa, calcolando la C^* istante per istante. Però, pur calcolando la C^* ad ogni passo, dopo un certo istante temporale la C^* diminuisce troppo e porta ad avere più di una soluzione come si è visto dal grafico 3.4.1.

Se si va ad analizzare questo modello in un diagramma C^* vs O/F si nota che a tempi iniziali è quasi come il modello agli integrali [2] cioè la C^* varia ma è pressoché costante, come si può notare dal grafico 3.4.1.2, ma, al trascorrere del tempo e arrivando ai tempi finali la variazione di C^* diventa molto più netta, come si può notare dal grafico 3.4.1.10, e quindi si arriva al problema delle soluzioni molteplici.

Andando ad analizzare questo aspetto si è arrivati alla conclusione che finché la derivata di C^* è piccola o negativa si ha una soluzione unica, invece nel caso in cui la derivata sia positiva o non più piccola la soluzione non è più unica come si può vedere nel grafico 3.4.1.7.

L'obiettivo di questo studio era quello di confrontare i risultati ottenuti con metodi alternativi per il calcolo della velocità di regressione. Dai studi fatti applicando i modelli prima discussi si è riusciti ad ottenere dei risultati accettabili con un calcolo computazionale più ridotto rispetto al modello di rif [2] che è il modello di riferimento. Ovviamente il modello di rif [2] è quello più preciso in quanto non fa assunzioni ma ottiene tutto tramite calcoli, iterazioni e test, ma ha un costo computazionale molto più elevato.

Di seguito elenco in una tabella la regression rate media ottenuta nei vari modelli partendo dal modello meno preciso a quello più preciso:

Modello	Regression rate \dot{r} [mm/s]
End point technique	0,667
Integral averaging technique ref [4]	0,663
Combustion chamber pressure-based technique ref [3]	0,664
Modello di riferimento, ref [2]	0,660

Tabella: 4.1 confronto risultati

Si vede che mediamente i 3 modelli danno risultanti molto simili, cambia solo la terza cifra decimale. Però si hanno molte più assunzioni e ipotesi che semplificano notevolmente i calcoli rispetto al modello di riferimento.

Bibliografia

- [1] A. B. Wright, A. Tomany, A. M. Wright., M. K.; Pressure Measurement in the Post-Combustion Section of a Hybrid Rocket Motor, AIAA A99-31294, 1999;
- [2] Carmine Carmicino and Dario Pastrone, Pressure-Measurement Based Estimation of Fuel Regression Rate in Hybrid Rockets, AIAA 2016-5067, 2016;
- [3] RajivKumar, P.A.Ramakrishna; Measurement of regression rate in hybrid rocket using combustion chamber pressure, Acta Astronautica 103 (2014) 226-234, 2014;
- [4] E.J.Wernimont* and S. D. Heistert, Reconstruction Technique for Reducing Hybrid-Rocket Combustion Test Data, Journal Of Propulsion and Power vol 15 n°1, 1999;
- [5] Aircraft and Rocket Propulsion, BJ Cantwell, slides lesson Stanford university, chapter 11;
- [6] D. Pastrone, Approaches to Low Fuel Regression Rate in Hybrid Rocket Engines. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF AEROSPACE ENGINEERING, vol. Volume 2012 .- n. Articl. ISSN 1687-5966;
- [7] D. Altman, *Hybrid Rocket Development History*, AIAA 91-2515, 1991;
- [8] R.J. Kniffen, B. McKinney, and P. Estey, Hybrid Rocket Development at the American Rocket Company, AIAA 90-2762, 1990;
- [9] E. Farbar; J. Louwers Cesaroni and T. Kaya, Investigation of Metallized and Nonmetallized Hydroxyl Terminated Polybutadiene/Hydrogen Peroxide Hybrid Rockets, Journal of Propulsion and Power vol 23 n°2, 2007;
- [10] O. Božić, D. Pörrmann*, D. Lancelle*, A. Hartwig, Program Ahres And Its Contribution To Assess Features And Current Limitations Of Hybrid Rocket Propulsion, IAC-12-C4.2.8, 2012;
- [11] Marxman, G.A. and Gilbert, M., "Turbulent boundary layer combustion in the hybrid rocket", Ninth International Symposium on Combustion, Academic Press, New York, pp. 371-383, 1963.