

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Aeronautica



Indagine sperimentale di fenomeni di entrainment in combustibili basso-fondenti per la propulsione spaziale di tipo ibrido

Relatore: Luciano GALFETTI
Co-relatore: Matteo BOIOCCHI

Tesi di Laurea di:
Andrea REKAKAVAS

Anno Accademico 2013/2014

*“So di non sapere”
Socrate*

Ai miei genitori, a Cristina

ABSTRACT

The entrainment is a physical phenomenon that concerns the transport of bubbles, droplets and, in general, particles that are spread in a fluid stream. Studies on the entrainment are very important for hybrid rocket motors that use liquefying fuel. These materials form a thin liquid layer. If the liquid film is stressed by aerodynamic forces it becomes unstable and the liquid-gas interface changes shape, forming waves. When the forces acting on the interface are large enough some waves detach from the liquid phase. The liquid structures, which are now in the gas phase, break up in many droplets. The physical properties of the fuel spray define the heat and mass transfer that occurs in the hybrid motors during the combustion process. The meaning of “physical properties” is basically the detach rate of the droplets, their size and their speed. This thesis describes the procedure to measure the diameters of the droplets. The entrainment is reproduced, in frozen conditions, in experimental apparatus which allow the recording of the process thanks to a fast-digital-camera. Pure wax, wax added with 5% of Sebs and wax with 15% of Sebs are the liquid film investigated. Oxygen is the gas used. In the last part of this thesis the results obtained by the frame analysis are reported.

Keywords: HYBRID ROCKET ENGINE, WAX BASED FUELS, ENTRAINMENT, SPRAY CHARACTERIZATION.

SOMMARIO

L'entrainment, in fluidodinamica, è il fenomeno fisico che riguarda il trascinamento di gocce, bolle ed in generale di particelle, disperse in una corrente fluida. Lo studio dell'entrainment ricopre ampio interesse nel campo degli endoreattori ibridi che utilizzano combustibili basso-fondenti. Questi materiali sono in grado di formare un film liquido il quale viene trascinato e perturbato a causa degli sforzi trasmessi dal moto del flusso gassoso ossidante attraverso l'interfaccia liquido-gas. Se le forze sono sufficientemente elevate vengono indotte instabilità nella fase liquida con conseguente distacco e cattura di una frazione di massa liquida da parte della fase gassosa. Le strutture trasportate dal gas a loro volta si disgregano in un insieme di gocce. Le caratteristiche dello spray combustibile, generato in questo modo, regolano i processi di scambio termico e di trasporto di massa che si verificano durante i fenomeni di combustione nei motori ibridi; con i termini “caratteristiche dello spray” si intende il numero di gocce distaccate nell'unità di tempo il loro diametro e la loro velocità. Questa tesi descrive il procedimento per la rilevazione dei diametri delle gocce. In particolare è stato riprodotto il fenomeno dell'entrainment a freddo in impianti sperimentali opportunamente costruiti per permettere la video-ripresa del fenomeno con l'aiuto di una camera digitale ad alta velocità. I materiali usati per la generazione del film liquido sono stati paraffina pura, paraffina additivata con il 5% di Sebs e paraffina legata con il 15% di Sebs. Come flusso gassoso è stato utilizzato ossigeno. La tesi riporta i risultati ottenuti dall'analisi dei fotogrammi ed inquadra i processi di entrainment nel contesto della propulsione spaziale di tipo ibrido.

Parole chiave: ENDOREATTORE IBRIDO, COMBUSTIBILI PARAFFINICI, ENTRAINMENT, CARATTERIZZAZIONE DELLO SPRAY.

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Motivazioni della ricerca	7
1.2	Obiettivi del lavoro	8
1.3	Piano di sviluppo della tesi	8
2	Endoreattori ibridi	9
2.1	Architettura generale di un motore ibrido	9
2.2	Punti di forza della propulsione ibrida	9
2.3	Problematiche principali dei sistemi ibridi	10
2.4	Modelli di combustione	11
2.5	Combustibili polimerici	11
2.6	Combustibili bassofondenti	12
2.7	Tecniche per migliorare la velocità di regressione	14
2.7.1	Approccio chimico	14
2.7.2	Approccio fluidodinamico	14
2.7.3	Combustibili innovativi	14
2.8	Atomizzazione di gocce e formazione di spray combustibili	16
2.8.1	Film liquido	16
2.8.2	Teoria lineare delle instabilità	18
2.8.3	Distacco delle instabilità	21
2.9	Conclusione	21
3	Impianti sperimentali	23
3.1	Progetto e realizzazione del primo banco prova	23
3.2	Descrizione della camera di prova	23
3.3	Sistema di riscaldamento	24
3.4	Supporto e movimentazione della telecamera	26
3.5	Telaio	26
3.6	Sistema di acquisizione e controllo	27
3.7	Mass flow control	27
3.8	Acquisizione delle immagini	27
3.9	Misura della temperatura	28
3.10	Problematiche riscontrate durante la messa a punto della linea	28
3.10.1	Coordinamento MFC FastCamera	28
3.10.2	Preparazione della prova	29
3.10.3	Ripetibilità della prova	29
3.11	Progetto e realizzazione del secondo banco prova	29
3.12	Camera di prova	30
3.13	Iniettore	32
3.14	Modifica del telaio	32
3.15	Sistema di illuminazione	33
3.16	Illuminazione diretta	33
3.17	Retro-illuminazione	33
4	Analisi delle immagini e risultati	39
4.1	Campo di visualizzazione	39
4.2	Instazionarietà del flusso gassoso	39
4.3	Elaborazione digitale e manuale	41
4.4	Paraffina pura	44
4.5	Sebs 5 e Sebs 15	47
4.6	Confronto	47
4.7	Tensione superficiale e viscosità	56
4.8	Flusso di gocce	58

5	Conclusioni e sviluppi futuri	67
5.1	Conclusioni	67
5.2	Sviluppi futuri	67

Elenco delle figure

1	configurazione generica di un sistema ibrido.	9
2	imperfezione nel grano propellente di un motore solido.	10
3	disastro dello Space Shuttle Challenger (1986).	11
4	struttura di una fiamma diffusiva.	12
5	entrainment della paraffina pura.	13
6	combustione reale della paraffina.	13
7	schematizzazione della combustione nei materiali bassofondenti.	13
8	occlusione parziale dell'area di gola A_g	15
9	differenze geometriche tra diversi spray combustibili.	16
10	modello matematico per la stima dello strato liquido.	17
11	modello matematico per la stima dello strato liquido.	19
12	regolarità delle instabilità 1.	19
13	regolarità delle instabilità 2.	20
14	Irregolarità dello strato liquido 1.	20
15	irregolarità dello strato liquido 2.	20
16	stappamento dello strato liquido (paraffina).	21
17	vista esplosa della camera slab.	23
18	camera slab.	24
19	camera interna.	25
20	geometria della camera e del vetrino.	25
21	sistema di movimentazione della telecamera.	26
22	progetto finale del primo banco prova.	27
23	FastCamera13 prodotta dalla FastVision.	28
24	Active Pixel Sensor (APS).	28
25	schema della prima linea sperimentale.	29
26	fotogramma della vasca contieni-combustibile.	30
27	camera contieni-combustibile e portaresistenza.	30
28	disegno preliminare.	31
29	vista esplosa della nuova camera di prova.	31
30	seconda camera di prova.	32
31	vista in sezione dell'iniettore.	32
32	disegno CAD finale del secondo banco prova.	33
33	illuminazione diretta.	34
34	fotogramma 1.	34
35	fotogramma 2.	34
36	retro illuminazione semplice e retro illuminazione focalizzata.	35
37	dinamica dell'entrainment 1.	36
38	dinamica dell'entrainment 2.	36
39	dinamica dell'entrainment 3.	37
40	schema della seconda linea sperimentale.	37
41	primo banco prova, realizzazione finale.	38
42	secondo banco prova, realizzazione finale.	38
43	posizionamento del provino di calibrazione.	39
44	fotogramma del provino di calibrazione e sua elaborazione.	40
45	geometria dello strato liquido imperturbato, dimensione e posizione della finestra di visualizzazione.	40
46	grafico tipico portata-tempo	41
47	thresholding diretto.	42
48	barra dei comandi e logo di ImageJ.	42
49	thresholding locale.	43
50	zone ingrandite.	44
51	gocce formate da centinaia di Pixel.	44

52	gocce formate da unità di Pixel.	45
53	definizione dei contorni con Shapedescriptor1u.	45
54	formazione di gocce fini.	45
55	gocce considerate non a fuoco.	45
56	grafico diametro-velocità per paraffina pura.	46
57	istogramma per paraffina pura.	47
58	grafico diametro-velocità per il Sebs 5.	48
59	grafico diametro-velocità per il Sebs 15.	48
60	istogramma per il Sebs 5.	49
61	istogramma per il Sebs 15.	49
62	rette di regressione per i combustibili analizzati.	51
63	combustione ideale di due spray.	51
64	distribuzione continua e valori discreti per paraffina.	52
65	distribuzione continua e valori discreti per sebs15.	52
66	Confronto tra distribuzioni.	53
67	schematizzazione ideale per la formazione di una struttura tozza.	53
68	dinamica reale per una struttura tozza.	54
69	schematizzazione di una struttura allungata.	55
70	dinamica reale per una struttura allungata.	55
71	grafico tensione superficiale-temperatura [18].	56
72	grafico viscosità-velocità di rotazione.	57
73	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 1.	59
74	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 2.	60
75	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 3.	61
76	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 4.	62
77	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 5.	63
78	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 6.	64
79	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 7.	65
80	meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 8.	66

Elenco delle tabelle

1	dati riferiti al grafico in figura 69 [18].	56
2	flusso di goccioline per paraffina pura.	58
3	flusso di goccioline per Sebs5.	58
4	flusso di goccioline per Sebs 15.	58

1 Introduzione

Fin dall'antichità la volta celeste, le stelle ed il cosmo in generale hanno affascinato l'umanità. La personificazione degli dei con i pianeti, la rappresentazione di cose o animali attraverso insiemi di stelle e i numerosi miti e leggende riguardanti il "cielo" sono tutti esempi di come il mondo antico tentasse di rispondere ai quesiti generati dalla propria curiosità. Il bisogno di conoscere il cosmo ha garantito il progressivo sviluppo di idee, metodi e tecniche che oggi permettono di avere sonde inviate per l'esplorazione dello spazio.

1.1 Motivazioni della ricerca

Attualmente i sistemi che permettono l'accesso allo spazio sono gli endoreattori termochimici: motori che sfruttano la combustione per la generazione della spinta. Questi si possono dividere in tre categorie: solidi, liquidi ed ibridi dove tale distinzione viene effettuata in base allo stato di aggregazione dei reagenti trasportati dai relativi motori. Gli endoreattori ibridi, sebbene teorizzati negli stessi anni degli altri due tipi di propulsori, non hanno avuto un immediato sviluppo per l'insufficienza di conoscenze, maturate in altri campi scientifici, immediatamente fruibili per la costruzione di questi sistemi. Le nozioni di idraulica, artiglieria e balistica [1] hanno permesso agli endoreattori a liquido e a solido di affermarsi rispetto alla tecnologia ibrida. Il divario tecnologico si accentuò durante il secondo conflitto mondiale quando furono effettuati studi per l'utilizzo di razzi solidi come sistemi di ausilio al decollo, e per la costruzione di missili a medio-lungo raggio (con la realizzazione delle V-2). Il solco si ampliò ulteriormente negli anni 60 durante la guerra fredda periodo in cui gli USA e l'URSS concentrarono enormi risorse per "conquistare" l'accesso allo spazio, spinti più da motivazioni politiche (dimostrare la propria superiorità e mettere a punto missili intercontinentali) che scientifiche. Resta il fatto che i primi motori in grado di accedere allo spazio trasportando un payload utile stabilizzandolo in orbita furono endoreattori di tipo solido e liquido. I russi Sputnik I, II e l'americano Explorer I, alla fine degli anni 50 sono stati i primi satelliti circolanti attorno alla terra in orbita bassa (LEO). Il successo di queste missioni fu garantito dai rispettivi lanciatori. In particolare il vettore russo Semerka era un sistema a liquido che sfruttava i reagenti RP1 ed ossigeno liquido, mentre il motore americano Juppiter-C era un sistema a propellente solido. Negli anni successivi (60-80) queste due tecnologie hanno continuato a progredire ed affinarsi. Nello stesso arco temporale furono compiuti passi in avanti anche nel campo della propulsione ibrida specialmente con il programma militare HAST (High Altitude Supersonic Target) [7]. Il progetto prevedeva l'uso di motori ibridi, spinti grazie all'ossidante IRFNA (una miscela stivabile di HNO_3 N_2O_4 e acqua) ed al combustibile PMMA (un polimero), per fungere da bersagli. Grazie alle attività di ricerca ad anche all'HAST si iniziarono ad intuire le caratteristiche distintive e le potenzialità dei reattori ibridi quali la sicurezza, la regolazione della spinta e la stabilità di combustione. Tra 1980 e 1990 si verificarono gravi incidenti riguardanti la propulsione spaziale [6]. Questi si verificarono non solo in atmosfera a vari lanciatori spaziali (tra cui quello dello space shuttle Challenger) [13] ma anche a terra, alla fabbrica PEPCON [12], produttrice dei sali ossidanti usati nei booster dello shuttle. Gli episodi occorsi focalizzarono l'attenzione sulla sicurezza delle missioni spaziali e tale esigenza rinnovò l'impulso per l'ulteriore sviluppo della ricerca nell'ambito della propulsione ibrida. Da allora ad oggi sono stati condotti numerosi studi che hanno permesso di diminuire il gap tra tecnologia solida/liquida e quella ibrida. I lanciatori pesanti quali Soyuz, Ariane V continuano ad essere propulsi da booster per questo il gap non è ancora colmato; tuttavia l'odierno interesse per l'impatto ambientale, la sicurezza, la flessibilità e l'economicità (di un qualsiasi sistema) non fa altro che approvare la propulsione ibrida. Questa applicazione sta riscontrando particolare successo nel campo del turismo spaziale grazie ad i voli suborbitali effettuati dai veicoli Space Ship One e Space Ship Two organizzati dalla società privata Virgin Galactic. L'indipendenza di queste missioni dalle grandi agenzie spaziali (NASA) sta cambiando il "modo" di concepire l'accesso allo spazio, un tempo pensato come esclusiva di missioni governative. Tutto ciò grazie proprio ai ridotti costi ed all'elevata sicurezza dei motori ibridi. Le potenzialità degli ibridi possono essere sfruttate in molte altre missioni quali:

la raccolta di detriti orbitanti, la propulsione civile ipersonica, il trasporto di piccoli satelliti ed anche i trasferimenti orbitali. Il lavoro di ricerca svolto, si inquadra in questo scenario e si propone di dare un contributo agli studi sugli endoreattori ibridi per permetterne un rapido sviluppo ed una veloce affermazione.

1.2 Obiettivi del lavoro

Il problema maggiore che affligge i propulsori ibridi rispetto agli altri due tipi di sistemi è la loro bassa velocità di regressione. Questo parametro quantifica la massa combustibile reagente ed è responsabile delle performance massime ottenibili. La ridotta velocità di regressione è una conseguenza diretta della particolare struttura di fiamma diffusiva che si instaura durante il processo di combustione in un motore ibrido. Seguenti sviluppi su materiali combustibili basso-fondenti, quali le paraffine, hanno messo in luce aumenti significativi in termini di prestazioni in questi tipi di motori. Tali materiali sviluppano uno strato liquido che sotto l'azione del flusso ossidante si instabilizza formando delle goccioline che vengono trasportate nella fase gas. Questo fenomeno definito "entrainment" è il principale responsabile dei miglioramenti osservati rispetto ai combustibili polimerici tradizionali. In particolare le caratteristiche dello spray che partecipa alla combustione come la geometria, la quantità di gocce ed il tempo di formazione sono di interesse per poter capire, quantificare e quindi controllare i complessi fenomeni di combustione che coinvolgono questi materiali innovativi. La ricerca si prefigge, prima lo sviluppo di un impianto sperimentale adeguato per la riproduzione e la ripresa dell'entrainment tramite cinematografia ad alta velocità e, in un secondo momento, lo studio e il confronto degli spray che si generano utilizzando tre differenti tipi di combustibili basso fondenti.

1.3 Piano di sviluppo della tesi

Il presente documento è diviso in cinque capitoli. Nel primo si definiscono gli obiettivi della ricerca, le motivazioni che ne hanno dato impulso e una breve accenno allo sviluppo storico degli endoreattori termo-chimici. Nel secondo vengono descritte le principali caratteristiche di un generico motore ibrido spiegandone i punti di forza e quelli deboli. Nello stesso capitolo vengono anche presentati i modelli matematici per una comprensione base dei fenomeni di combustione che interessano questi motori. Nel capitolo successivo si descrivono i passi compiuti e le inadeguatezze della prima fase progettuale che hanno portato alla costruzione del banco prova successivamente modificato ed adeguato nella configurazione sperimentale finale. Nel capitolo quattro vengono presentate parte delle immagini catturate durante gli esperimenti condotti ed i risultati ottenuti. Nell'ultimo capitolo si espongono le conclusioni della ricerca e si suggeriscono le idee per continuare e migliorare il lavoro proposto.

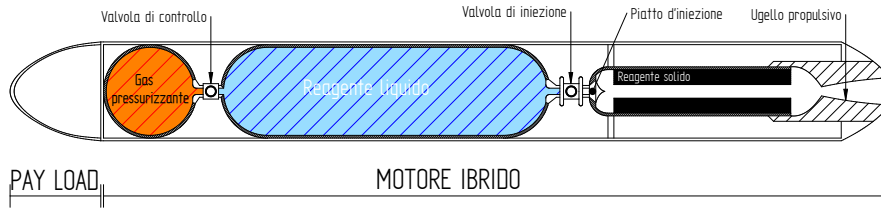


Figura 1: configurazione generica di un sistema ibrido.

2 Endoreattori ibridi

Gli endoreattori termochimici possono essere divisi in tre categorie in base allo stato di aggregazione dei reagenti che partecipano al processo di combustione. Si riconoscono i motori a propellente solido in cui sia il combustibile, tipicamente polimeri additivati con metalli energetici, sia l'ossidante, di solito sali inorganici dispersi nel grano, sono allo stato solido. I motori a liquido invece trasportano gli elementi chimici, stivati in serbatoi, allo stato liquido. Infine nei sistemi ibridi si ha una delle due specie chimiche allo stato solido ed una allo stato liquido. Storicamente la maggior parte degli studi e della ricerca inerente alla propulsione spaziale si è focalizzata principalmente sui motori a propellente solido e sui motori a liquido. Questo è dovuto al fatto che intorno agli anni 30, periodo in cui sono iniziati i primi studi su questi sistemi, le conoscenze rispettivamente di idraulica e di artiglieria potevano essere benissimo sfruttate nella comprensione di questi due tipi di propulsione. I successivi successi di queste due tecnologie ne hanno poi permesso una rapida affermazione rispetto ai motori a ibrido. L'interesse negli ibridi è ritornato nel momento in cui si è sentita la necessità di realizzare sistemi più sicuri (in particolare dopo il disastro del Challenger), in grado di fornire elevate prestazioni propulsive a basso impatto ambientale ed economici da realizzare.

2.1 Architettura generale di un motore ibrido

La struttura di un generico motore ibrido si compone di numerose parti, infatti bisogna pensare alla realizzazione di un serbatoio dove si stiva il reagente allo stato liquido (che può essere sia l'ossidante sia il combustibile) il quale, a seconda della specie chimica contenuta, deve essere opportunamente pressurizzato e controllato in temperatura (si pensi ad esempio ai liquidi criogenici). È necessario disporre un sistema di pompe tubi e valvole che garantiscano il corretto flusso del reagente all'iniettore in cui quest'ultimo elemento provvede alla nebulizzazione del reagente liquido all'interno della precamera; una camera di combustione vera e propria costituita dal porto stesso del grano del materiale solido in cui si instaurano i processi di combustione tra le due specie chimiche e una post-camera, essenziale per permettere il completamento delle reazioni esotermiche. Infine bisogna munire l'intero sistema di un ugello propulsivo grazie al quale è possibile espandere la miscela di gas combusti ricavando una spinta. Lo schema generale di un propulsore ibrido risulta essere più complesso di un sistema a solido in cui si ha solo un ignitore un grano propellente e l'ugello propulsivo, ma la struttura di un ibrido è molto meno complicata rispetto ad un motore a liquido dove invece bisogna progettare e assemblare insieme numerosi sistemi di valvole, pompe linee di pressurizzazione, rigenerazione e raffreddamento.

2.2 Punti di forza della propulsione ibrida

I propulsori ibridi oggi suscitano particolare interesse dal momento che presentano molte attraenti caratteristiche che gli fanno preferire agli altri due sistemi. La qualità principale di questi sistemi è la loro sicurezza intrinseca; il fatto di avere i due reagenti separati evita che si inneschino accensioni accidentali provocate da urti, vibrazioni o altre cause esterne sia durante

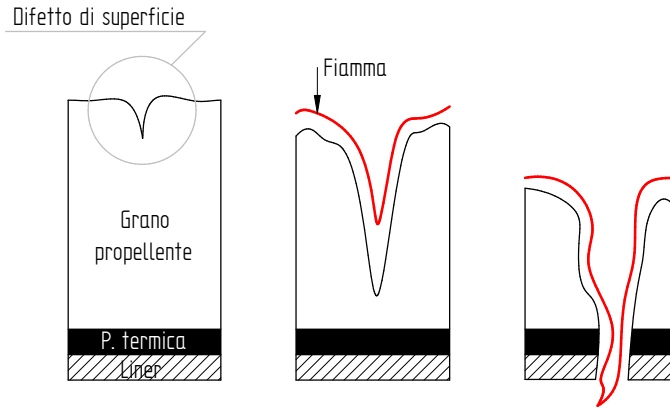


Figura 2: imperfezione nel grano propellente di un motore solido.

Un'imperfezione nel grano propellente di un motore solido può comportare una combustione anomala. L'incorretta posizione della fiamma potrebbe forare la struttura adibita al contenimento ed al supporto del grano.

la missione sia durante le operazioni di manifattura. Un'altra peculiarità di questi motori è la possibilità di poter regolare la portata del reagente allo stato liquido e quindi poter modulare la spinta o anche chiudere completamente l'iniezione nel caso di problemi durante la fase operativa. La fiamma di tipo diffusivo che si instaura nella camera di combustione rende questo sistema insensibile a problemi di manifattura del grano combustibile come cricche fessure, cosa che non potrebbe essere assolutamente tollerata dai motori a solido, dal momento che la fiamma di tipo premiscelato si incuneerebbe in questi difetti provocando la non corretta combustione (figura 2 e 3). La particolare struttura di fiamma che si instaura negli ibridi consente di poter utilizzare una vasta gamma di combustibili; addirittura NASA pensò di poter usare i rifiuti prodotti sulla stazione spaziali e riutilizzarli, con l'aggiunta opportuna di leganti polimerici, come combustibile [1].

2.3 Problematiche principali dei sistemi ibridi

Nonostante i propulsori ibridi abbiano numerosi vantaggi rispetto ai sistemi a propellenti solido e a liquido presentano anche svantaggi. Il principale problema dei motori ibridi è la loro bassa velocità di regressione rispetto ai valori medi riscontrati nei motori a solido. Questo parametro è strettamente legato alla portata di combustibile che sostiene il processo di combustione e dato che la spinta negli endoreattori dipende dalla velocità di espulsione dei gas combusti e dalla loro portata attraverso la sezione di uscita dell'ugello, un incremento nella massa fresca di combustibile che abbandona la superficie di combustione nell'unità di tempo comporta un aumento nella spinta. La portata di combustibile \dot{m}_f viene espressa:

$$\dot{m}_f = \rho_f A_b \dot{r}_f \quad (1)$$

Per massimizzare \dot{m}_f è possibile agire su i tre parametri che governano il flusso di combustibile fresco attraverso l'area di combustione cioè: la densità del materiale combustibile ρ_f , la superficie esposta A_b e la velocità di regressione \dot{r}_f . Il primo parametro citato può essere incrementato operando ricerche sui materiali energetici innovativi; per il secondo si può pensare di realizzare grani combustibili multi-perforati complicando però la manifattura e la geometria del grano stesso. La velocità di regressione \dot{r}_f invece è il parametro più interessante perché contiene in

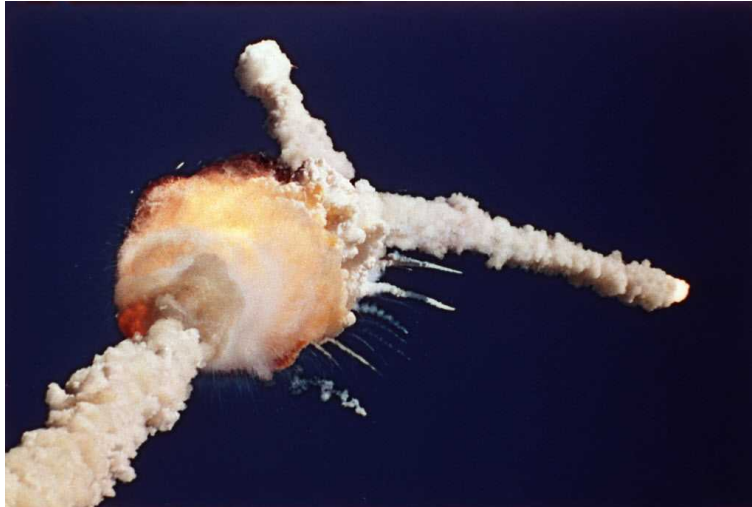


Figura 3: disastro dello Space Shuttle Challenger (1986).

L'esplosione venne provocata dalla combustione anomala di uno dei due booster solidi. La fiamma arrivò a perforare il case del motore solido e successivamente anche il serbatoio del combustibile liquido (H_2). I propellenti solidi sono materiali esplosivi: un minimo errore di impiego può portare a queste conseguenze.

se informazioni relative ai complessi processi fluidodinamici, termici e chimici che avvengono all'interno della camera di combustione. In questi ultimi anni la ricerca si è focalizzata sulla comprensione di questi fenomeni per massimizzare la velocità di regressione e di conseguenza le prestazioni propulsive dei motori ibridi.

2.4 Modelli di combustione

I meccanismi di combustione sono alla base delle prestazioni globali di ogni sistema propulsivo termo-chimico. In particolare negli endoreattori chimici le reazioni esotermiche, che avvengono durante il processo di combustione, rilasciano energia sotto forma di calore che viene trasmesso nell'ambiente circostante per conduzione convezione e irraggiamento. Parte di questo calore liberato aumenta la temperatura dei gas combusti e tanto più alta è questa temperatura tanto è maggiore il salto entalpico che è possibile sfruttare nell'ugello di efflusso per la conversione dell'entalpia in energia cinetica. Idealmente sarebbe desiderabile che tutta l'energia prodotta dalla fiamma fosse sfruttata per innalzare la temperatura dei gas combusti, in realtà una quota parte di questo calore viene assorbito da eventuali reazioni di dissociazione, per il riscaldamento dei reagenti, per l'autosostentamento della combustione o dissipato in altri modi. La comprensione dei fenomeni sopra descritti è di fondamentale importanza per il controllo e l'ottimizzazione delle prestazioni del motore.

2.5 Combustibili polimerici

Nei motori ibridi che utilizzano combustibili polimerici, il complesso fenomeno di combustione può essere schematizzato come in figura 4. Quando l'ossidante gassoso viene iniettato all'interno del porto si sviluppa sulla superficie esposta del grano combustibile lo strato limite fluidodinamico in cui la velocità del flusso gassoso passa progressivamente dal valore di regime a zero. Nel momento in cui l'ignitore fornisce l'energia necessaria per l'avviamento della combustione si instaura all'interno dello strato limite il fronte di fiamma. Tale fiamma posizionata a circa il 10-20% dello spessore dello strato limite fornisce calore all'ambiente circostante. Una parte dell'energia termica rilasciata viene trasportata per conduzione, convezione ed irraggiamento alla superficie esposta del grano. Il calore assorbito attraverso l'area esposta innalza la tempera-

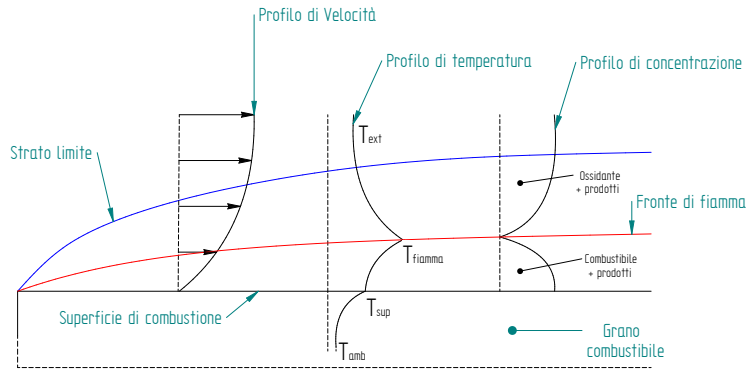


Figura 4: struttura di una fiamma diffusiva.

tura del combustibile che decresce con continuità lungo lo spessore del grano passando da valori superficiali dell'ordine dei 600°C alla temperatura ambiente. Nella zona superficiale del grano la temperatura è tale da rompere i legami delle catene polimeriche portando il combustibile prima al rammollimento e successivamente alla pirolisi. In seguito i vapori di combustibile vengono trasportati, per convezione e per diffusione, verso la fiamma dove si mischiano con l'ossidante. Idealmente la fiamma ha spessore infinitesimo e si genera quando combustibile e ossidante si trovano in condizioni stechiometriche; nella realtà a causa della finita velocità di reazione la fiamma non è una vera superficie ma una regione con spessore finito e delimitato dai limiti di reciproca infiammabilità dei reagenti utilizzati. Le reazioni esotermiche che si sviluppano in questa zona generano prodotti di combustione e calore parte del quale viene trasportato nuovamente sulla superficie di combustione e contribuisce all'autosostentamento del processo appena descritto. Lo strato limite che si sviluppa nei motori ibridi è particolare dato che la superficie solida regredisce immettendo massa combustibile gassificata. Questo strato limite viene definito "soffiato" ed è responsabile del fenomeno definito "bloccaggio". Questo effetto provoca la riduzione del coefficiente di attrito e del flusso termico di ritorno dalla fiamma alla superficie del combustibile. Infatti l'introduzione di massa fresca di combustibile si comporta come una protezione termica che attenua l'ulteriore trasferimento di energia alla superficie esposta del grano con conseguente riduzione dell'iniezione di massa di combustibile in camera. Tale fenomeno risulta accentuarsi tanto più ci si avvicina alla post camera a causa del progressivo accumulo dei gas incombusti e della relativa lontananza della fiamma dalla superficie del grano.

2.6 Combustibili bassofondenti

Particolari materiali combustibili, testati alla fine degli anni 90 [16], hanno messo in luce prestazioni, in termini di impulso specifico e velocità di regressione, molto più elevate se paragonate con le sostanze polimeriche fino ad allora utilizzate nei motori ibridi. L'indagine svolta su questi combustibili "innovativi" si riproponeva di cercare materiali che sottraessero meno calore possibile alla fiamma ovvero elementi in grado di vaporizzare a temperature inferiori rispetto alle formulazioni polimeriche. Per questa ragione solidi criogenici (quali idrogeno, metano, monossido di carbonio) e idrocarburi dal basso peso molecolare (come le paraffine) sono stati presi in considerazione. Queste sostanze hanno espresso un potenziale tale da non poter essere giustificato dalla sola riduzione dell'entalpia di vaporizzazione [2]. I combustibili sopra citati hanno tutti la peculiarità di formare uno strato liquido se opportunamente riscaldati; cosa che non accade nei polimeri (rammolliscono e poi pirolizzano). La formazione del film liquido cambia

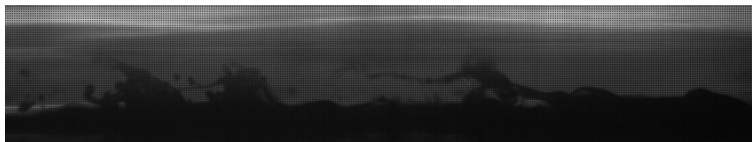


Figura 5: entrainment della paraffina pura.

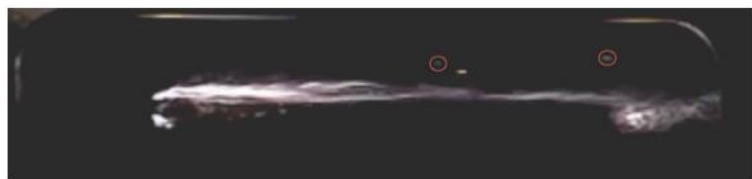


Figura 6: combustione reale della paraffina.

L'immagine è tratta da [17]. Questa è la sovrapposizione di due frame consecutivi: è osservabile la struttura della fiamma diffusiva principale ed il movimento di una gocciolina reagente tra questi due frame. Il combustibile è paraffina.

significativamente il processo di combustione all'interno di un motore ibrido, infatti la superficie del grano esposta alla fiamma fonde e l'interazione tra liquido formatosi ed il gas ossidante dà origine al fenomeno fluidodinamico definito "ENTRAINMENT". L'entrainment è il principale responsabile delle superiori prestazioni osservate, infatti il forte flusso convettivo del gas ossidante, introdotto dagli iniettori nella camera di combustione, genera delle perturbazioni sul pelo libero del liquido e se la velocità del gas è sufficientemente elevata gli sforzi che si trasmettono all'interfaccia liquido-gas sono tali da deformare la superficie stessa. Quest'ultima mostrerà una configurazione irregolare sulla quale è comunque possibile identificare avvallamenti e creste rispetto al piano ideale che divide le due fasi nello stato imperturbato. Alcune di queste strutture a "cresta" possono rompersi generando delle piccole gocce di liquido che si disperdono nella fase gassosa. Questo meccanismo di distacco e frantumazione spiega l'incremento della velocità di regressione notato per questi combustibili rispetto a quelli tradizionali: solo parte del liquido gasifica contribuendo al fenomeno del bloccaggio (come nei combustibili polimerici) in più bisogna considerare la restante massa di combustibile trasportata dalle particelle strappate dalla superficie. La massa di combustibile che reagisce nell'unità di tempo è maggiore rispetto ai processi di ossido-riduzione tradizionali così come il rilascio di calore. Il modificato fenomeno di trasporto di massa e di trasferimento termico influenza la struttura della fiamma, questa è costituita da una zona principale di reazione e da tante fiamme che circondano le gocce di liquido che sono in grado di reagire con l'ossidante. Un confronto visivo tra la fiamma reale sviluppata da combustibili innovativi e la sua schematizzazione è presentato nelle figure 6, 7. Lo studio approfondito dell'entrainment è assolutamente necessario per capire quali sono i parametri che permettono il controllo di questo fenomeno e massimizzarlo.

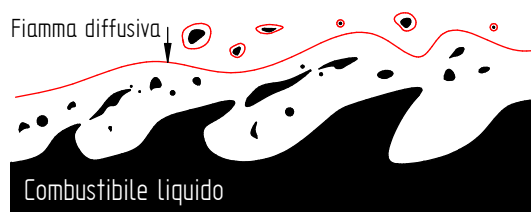


Figura 7: schematizzazione della combustione nei materiali bassofondenti.

2.7 Tecniche per migliorare la velocità di regressione

Il problema principale nei propulsori ibridi è la bassa velocità di regressione se confrontata con i valori tipici dei motori solidi. Questo deriva dalla particolare struttura di fiamma diffusiva in cui il processo di rilascio termico è comandato dai tempi caratteristici che riguardano la vaporizzazione del combustibile, la miscelazione dei reagenti e i tempi delle reazioni chimiche. Molte ricerche concentrano la loro attenzione nel migliorare la velocità di regressione per poter raggiungere dei livelli di \dot{r}_f paragonabili agli endoreattori solidi [15].

2.7.1 Approccio chimico

Una prima tecnica consiste nell'additivare il combustibile con materiali energetici quali polveri metalliche, idruri metallici e sali inorganici. Il vantaggio di usare metalli finemente dispersi consiste nello sfruttare il calore generato dalla loro combustione (reazioni fortemente esotermiche) una volta che questi sono stati igniti. Un primo problema nell'utilizzo dei metalli consiste nel fornire sufficiente energia per innescare le reazioni di ossidoriduzione. Un secondo riguarda la struttura fisica della polvere energetica. Molti metalli infatti presentano sulla propria superficie uno strato di ossido compatto più stabile (termicamente) del elemento metallico stesso. Ne consegue che ogni granello che forma la polvere deve assorbire una quantità di calore sufficiente per la fusione del "guscio" di ossido prima che il metallo possa reagire. Ad esempio un granello di alluminio (T fusione 600°C) deve raggiungere la temperatura di circa 1200°C perché lo strato di allumina (Al_2O_3) si fonda. Il pericolo nell'utilizzo di questa tecnica consiste nella possibilità che i granelli energetici non vengano trasportati vicino alla fiamma e di conseguenza non reagiscano. In questo caso si avrebbe un flusso bifase in cui parte della quantità di moto del getto gassoso è sprecata, attraverso gli sforzi che si generano all'interfaccia gas-particella, nell'accelerare i granelli metallici inerti. Questi possono provocare severi danni all'ugello fluidodinamico se non addirittura tapparne l'area di gola compromettendo l'integrità del motore. L'additivazione mediante idruri metallici è simile all'utilizzo delle polveri con la grande differenza che una molecola idrurica contiene un certo numero di molecole di idrogeno. Quando reagisce un idruro oltre a liberare calore si crea una miscela di prodotti dal basso peso molecolare, proprio per la presenza dell'idrogeno, che risulta facilmente accelerabile. Infine l'uso di sali quali perclorato d'ammonio, nitrato d'ammonio o altri viene sfruttato per ottenere una fiamma premiscelata vicina alla superficie di combustione con lo scopo di ridurre l'entalpia di vaporizzazione richiesta alla fiamma diffusiva principale. Questa tecnica cancella le proprietà di sicurezza dei motori ibridi descritte nel paragrafo 1.2. Di fatto l'utilizzo di sali ossidanti trasforma il motore ibrido in una sorta di motore solido potenziato dal flusso ossidante [1].

2.7.2 Approccio fluidodinamico

Un ulteriore approccio per incrementare la velocità di regressione consiste nel migliorare la fluidodinamica nella camera di combustione. Con il termine "migliorare" si intende instaurare un forte regime turbolento capace di aumentare lo scambio termico, il trasporto di massa ed il miscelamento tra specie chimiche diverse. Tale risultato può essere raggiunto creando geometrie del grano particolari o ancora con l'introduzione di corpi tozzi che però aumentano il peso complessivo del sistema propulsivo. Si può pensare anche di agire sul flusso di ossidante sparato in camera costruendo piatti di iniezione particolari in grado di sviluppare un flusso ossidante elicoidale lungo tutta la perforazione del grano. In questo modo si aumenta il tempo di residenza dell'ossidante in camera di combustione permettendo il completamento delle reazioni chimiche favorendo un maggior rilascio di calore.

2.7.3 Combustibili innovativi

Una terza via, già esposta nel paragrafo 2.6, si è concentrata nella ricerca di materiali combustibili innovativi che permettano l'istaurarsi dell'entrainment. I solidi criogenici, sebbene siano in grado di soddisfare questo requisito, introducono molte complicazioni nel progetto e nella costruzione di un motore ibrido. Sarebbe necessario realizzare sistemi di raffreddamento perché

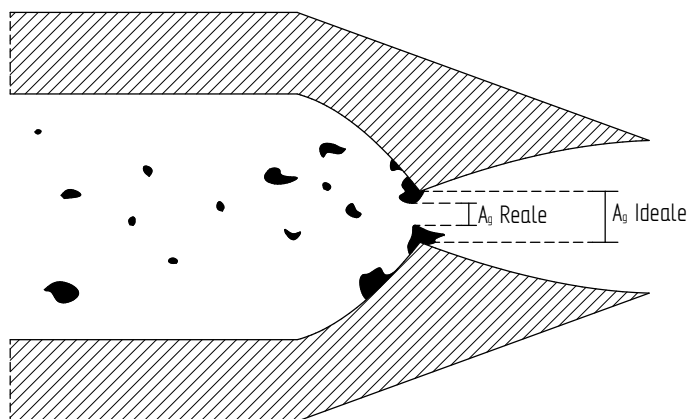


Figura 8: occlusione parziale dell'area di gola A_g .

si mantenga la sostanza allo stato solido, con conseguenti aumenti di costi, ingombri, pesi e riduzione delle performance del motore. Per queste ragioni a, livello pratico, questi combustibili non sono utilizzati. La categoria degli idrocarburi dal basso peso molecolare, quali alcani con numero di atomi di carbonio inferiori a 50, presenta caratteristiche molto interessanti. Come le sostanze criogeniche sviluppano uno strato liquido da poter essere instabilizzato e trascinato, in più risultano solidi a temperatura ambiente. Lo svantaggio maggiore nell'utilizzo degli alcani come le cere paraffiniche o polietilenche consiste nell'avere materiali rigidi e fragili non adatti a sopportare vibrazioni indotte ad esempio dalle accelerazioni del motore. Molte ricerche sono in corso [4] con il fine di migliorare le caratteristiche meccaniche, dove con il termine "migliorare" si intende estendere il campo plastico dei combustibili appena citati, tramite additivazione polimerica. La difficoltà principale nel raggiungere questo obiettivo consiste nel trovare il corretto rapporto tra combustibile e legante. Un eccesso di legante pregiudicherebbe la formazione dello strato liquido, con tutti i vantaggi connessi, mentre una carenza comporterebbe la sicura rottura del grano combustibile. Lo studio congiunto a livello fluidodinamico e meccanico deve essere assolutamente svolto per poter sfruttare al massimo le potenzialità di questi materiali.

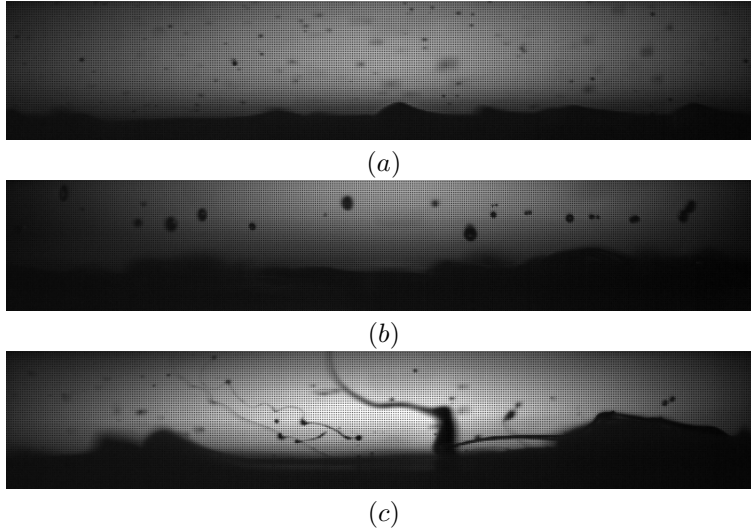


Figura 9: differenze geometriche tra diversi spray combustibili. I fotogrammi (a) e (b) rappresentano due spray combustibili dello stesso materiale liquido (paraffina pura) soggetto a differenti velocità del flusso gassoso. E' facile verificare come entrambi gli spray siano formati da goccioline della stessa forma (approssimabili a sferette), però il primo è più “denso” e più “fine” rispetto al secondo. Dove con “denso” si intende il numero di gocce per volume di riferimento, mentre per “fine” il diametro delle gocce. Lo spray in (c) è di materiale diverso (paraffina + legante polimerico) rispetto a quelli in (a) ed in (b). Le gocce hanno forma allungata e filamentosa (e risulta anche complicato definire un diametro).

2.8 Atomizzazione di gocce e formazione di spray combustibili

Nei processi di ossido-riduzione che coinvolgono i combustibili innovativi le proprietà geometriche dello spray, generato dall'entrainment, sono di fondamentale importanza. Numero, volume e superficie delle gocce distaccate sono strettamente correlati con la massa trasportata vicino alla fiamma, alla quantità di combustibile che vaporizza ed all'efficienza dell'intero processo di combustione. In generale sarebbe desiderabile che le gocce trascinate abbiano le dimensioni più piccole possibili in modo tale da rendere minimi i tempi necessari al riscaldamento, evaporazione e miscelazione di ogni singola particella. Dall'immagine 9 è chiaro come il regime del flusso gassoso ed il tipo di sostanza influenzino fortemente le caratteristiche dello spray combustibile. Al momento non esiste un modello matematico generale in grado di simulare l'intero processo dell'entrainment, (partendo dalla formazione dello strato liquido alla frantumazione delle instabilità in gocce) e quindi in grado di valutare le proprietà dello spray. Tuttavia sono state proposte formulazioni matematiche semplificate, costruite appositamente per avere una prima stima delle principali variabili macroscopiche in gioco nell'entrainment.

2.8.1 Film liquido

Condizione necessaria perché si generi uno spray di combustibile è che questo formi uno strato liquido se riscaldato opportunamente. Una teoria matematica sviluppata da Karabeyoglu [2] permette di predire lo spessore di questo strato in funzione del flusso termico che investe il materiale. In questo modello si considera una lastra piana di combustibile di estensione superficiale infinita in modo tale da poter ridurre il dominio di esistenza del problema da tridimensionale a monodimensionale. Nella configurazione appena descritta si considera lo strato liquido di combustibile già sviluppato e separato dalla fase gassosa e da quella solida da interfacce piane. Ulteriormente si assume che il motore sia a regime e quindi nessun parametro e nessuna variabile che compariranno nella descrizione del fenomeno devono dipendere dal tempo. Quest'ultima ipotesi comporta che la velocità di regressione dell'interfaccia solido-liquido debba essere uguale

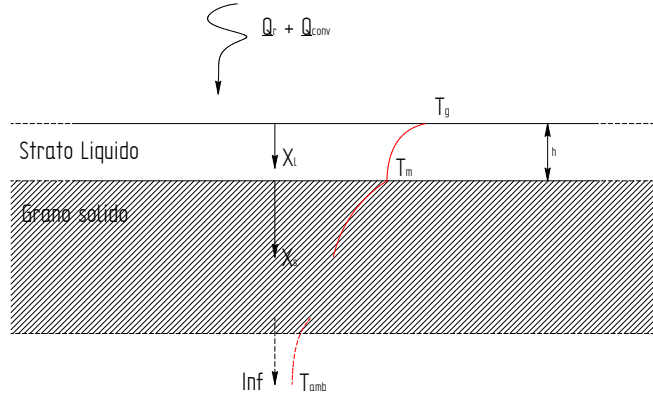


Figura 10: modello matematico per la stima dello strato liquido.

a quella dell'interfaccia liquido-gas altrimenti lo spessore dello strato liquido varierebbe nel tempo. Sempre per semplificare la trattazione non viene considerata la perturbazione dello strato liquido né alcuna rimozione di massa da esso. Formulate queste ipotesi preliminari si considera che il calore fornito dalla fiamma sia trasportato alla fase liquida e a quella solida per convezione e per irraggiamento. Il combustibile solido e quello liquido possono essere considerati due corpi grigi che assorbono parte del calore emesso per radiazione. In particolare il flusso di calore assorbito dalle due fasi può essere espresso come:

$$q_r(x_l) = \dot{Q}_r e^{-a_l x_l} \quad (2)$$

$$q_r(x_s) = \dot{Q}_r e^{-a_l h} e^{-a_s x_s} \quad (3)$$

Dove \dot{Q}_r è il flusso termico radiativo, h lo spessore dello strato liquido ed a_l , a_s il coefficiente di assorbimento radiativo rispettivamente di fase liquida e solida. Il calore assorbito in ogni posizione del liquido e del solido è espresso dalla divergenza del flusso di calore; nel caso monodimensionale questo si riduce a:

$$-\frac{dq_r}{dx_l} = f_l \quad (4)$$

$$-\frac{dq_r}{dx_s} = f_s \quad (5)$$

Considerando che il calore si trasmetta nella fase liquida ed in quella solida solo per conduzione è possibile scrivere l'equazione del calore stazionaria, monodimensionale con termine forzante espresso dalle eq (4) e (5) nei due domini.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{1}{\delta} \frac{dT}{dx} = -\frac{f}{k\rho C} \quad (6)$$

Proprio per le semplificazioni svolte questa risulta una equazione differenziale, ordinaria e lineare che, se corredata delle opportune condizioni al bordo ammette una sola soluzione. Considerando un sistema di riferimento, schematizzato in figura 10, si hanno le seguenti condizioni al contorno: $T(x_s = 0) = T_m$ e $T(x_s \rightarrow \infty) = T_{amb}$ per la fase solida e $T(x_l = 0) = T_v$, $T(x_l = h) = T_m$ per la fase liquida. T_m è la temperatura all'interfaccia solido-liquido (la temperatura di fusione del combustibile), T_{amb} la temperatura ambiente e T_v la temperatura all'interfaccia liquido gas.

Le equazioni differenziali, risolvibili in forma chiusa, permettono di conoscere l'andamento della temperatura all'interno dello strato liquido, $T(x_l)$ e del grano solido $T(x_s)$. Note queste due funzioni si può svolgere un bilancio termico alle interfacce, in particolare tutta l'energia trasportata dalla fase liquida all'interfaccia solido-liquido è uguale al calore trasmesso per conduzione nella fase solida meno la quota parte di energia necessaria per il passaggio di stato del combustibile. Lo stesso bilancio all'interfaccia liquido-gas si esprime imponendo che il calore trasmesso per convezione dal gas sia uguale al calore trasmesso per conduzione nel liquido più l'energia richiesta per il passaggio di fase del combustibile da liquido a vapore. In termini matematici:

$$\lambda_l \frac{dT(x_l)}{dx_l} \Big|_{x_l=h} = \lambda_s \frac{dT(x_s)}{dx_s} \Big|_{x_s=0} - L_m \rho_s \dot{r}_f \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{conv} + \lambda_l \frac{dT(x_l)}{dx_l} \Big|_{x_l=0} - L_v \rho_s \dot{r}_v = 0 \quad (8)$$

Combinando l'equazione (7), (8) insieme ed inserendo i profili termici si ottiene una espressione per non lineare nell'incognita h che rappresenta lo spessore dello strato liquido. Una soluzione in forma chiusa del parametro h non esiste tuttavia metodi iterativi numerici consentono l'approssimazione della profondità del film liquido.

2.8.2 Teoria lineare delle instabilità

L'ulteriore condizione che deve verificarsi perché si sviluppi l'entrainment è che lo strato liquido si instabilizzi. Un primo studio sulla perturbazione dello strato liquido è stato condotto da Karbeyoglu e Cantwell in [3]. Il modello ipotizza la presenza di un campo di moto medio su cui si innesta uno perturbato. La determinazione del campo di velocità medio parte dalla soluzione dell'equazioni di Navier-Stokes delimitate allo strato liquido. Le ipotesi fatte per semplificare il problema sono: bidimensionalità del campo di moto, stazionarietà del fenomeno (ciò implica anche che lo strato del film liquido rimanga costante), indipendenza del campo di pressione dallo spazio, assenza di forze di volume e nessuna asportazione di liquido. L'equazioni di Navier-Stokes per determinare il campo di moto medio diventano:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\mu_l}{\rho_l} \nabla^2 u \quad (9)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\mu_l}{\rho_l} \nabla^2 v \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Dove u e v sono rispettivamente la componente assiale e verticale della velocità. Un'altra semplificazione consiste nel considerare v costante nello spazio ed u variabile solo lungo lo spessore dello strato liquido:

$$u = U(y)$$

$$v = V_l$$

L'unica equazione significativa che rimane è quella relativa alla prima componente che corredata delle seguenti condizioni al bordo, $U(y=0) = 0$ (nessun slittamento), $\mu_l \frac{dU}{dy} \Big|_{y=h} = \tau_g$ (continuità degli sforzi) permette di ottenere la velocità media. Nota la soluzione stazionaria delle equazioni di Navier-Stokes si introducono le perturbazioni che causano la formazione delle instabilità:

$$u = U(y) + \tilde{u}(x, y, t)$$

$$v = V_l + \tilde{v}(x, y, t)$$

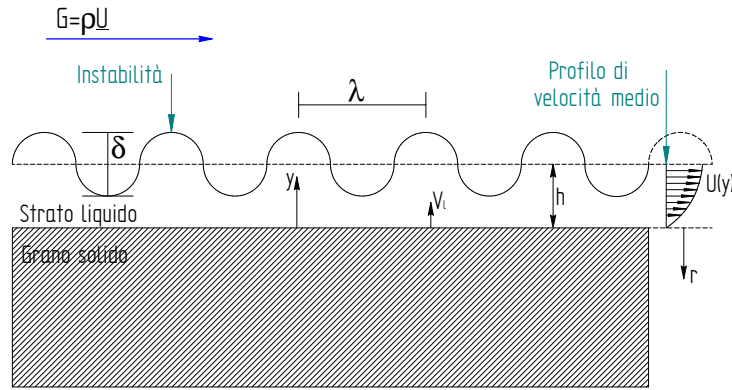


Figura 11: modello matematico per la stima dello strato liquido.

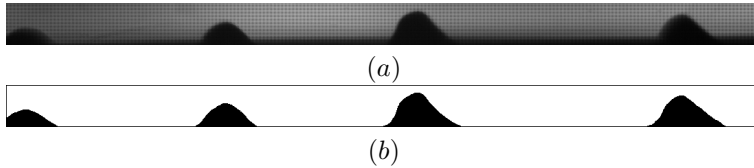


Figura 12: regolarità delle instabilità 1.

Lo strato liquido perturbato è acqua, il cui spessore è 2 mm. In (a) è riportata l'immagine reale mentre in (b) l'immagine binaria. È sorprendente osservare come le onde abbiano altezze e frequenze molto simili tra loro.

$$p = P + \tilde{p}(x, y, t)$$

dove i termini soprastegnati $\tilde{\cdot}$ sono le fluttuazioni di velocità e pressione rispetto ai valori medi. Inserendo le variabili appena definite nelle equazioni di Navier-Stokes mantenendo solo i termini lineari nelle fluttuazioni si ottiene un set di equazioni che può essere studiato introducendo una opportuna funzione di corrente. Questa variabile permette di ridurre il numero di equazioni da studiare da tre ad una sola con l'inconveniente di aumentare l'ordine di derivazione della stessa. Nel lavoro [3] si assume che la superficie liquido-gas assuma una forma armonica così come si ipotizza che anche le perturbazioni abbiano una forma armonica similare.

$$\eta_d(x, t) = \delta [\cos(x, t) + \sin(x, t)] \quad (12)$$

Il modello appena descritto è un primo metodo per affrontare lo studio delle instabilità dello strato liquido e le ipotesi più stringenti riguardano la linearizzazione dell'equazioni perturbate e la loro forma armonica. Questo comportamento "regolare" dello strato liquido è ben verificato quando le velocità del flusso gassoso sono molto basse: nell'ordine delle poche unità di metri al secondo. Come esempio è riportato nelle figure 12 e 13 l'andamento ripetitivo e costante delle instabilità. La situazione cambia moltissimo all'aumentare del flusso instabilizzante: le onde si deformano, si separano e si riaggregano formando un'interfaccia molto irregolare che non può più essere approssimata con una funzione armonica. In questo caso è necessario compiere indagini sperimentali per poter supportare lo sviluppo di modelli matematici più raffinati e complessi.

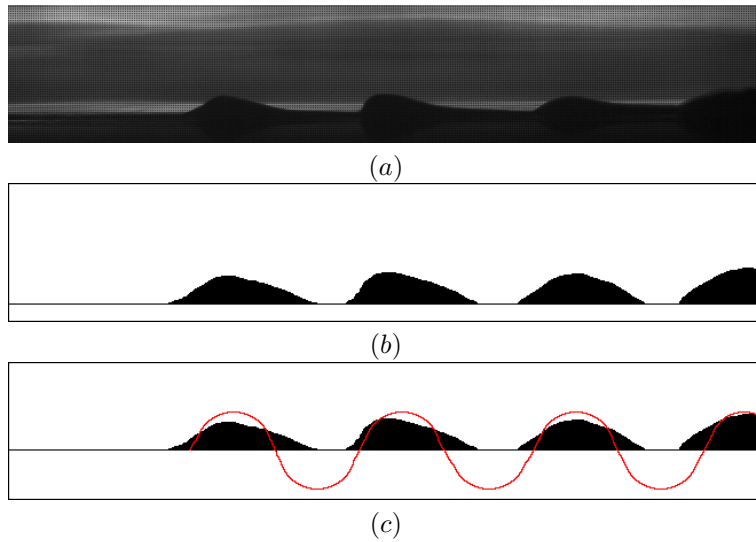


Figura 13: regolarità delle instabilità 2.

Lo strato liquido perturbato è paraffina pura, il cui spessore è 2 mm. In (a) è riportata l'immagine reale, in (b) l'immagine binaria ed in (c) il confronto tra il contorno reale ed una sinusoida. In questo caso l'approssimazione è giustificata.

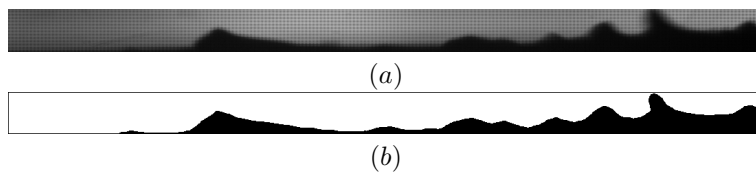


Figura 14: Irregolarità dello strato liquido 1.

Lo strato liquido è acqua di 2 mm. In (a) è riportata l'immagine reale mentre in (b) l'immagine binaria. L'aumentata velocità del flusso rompe la regolarità delle onde.

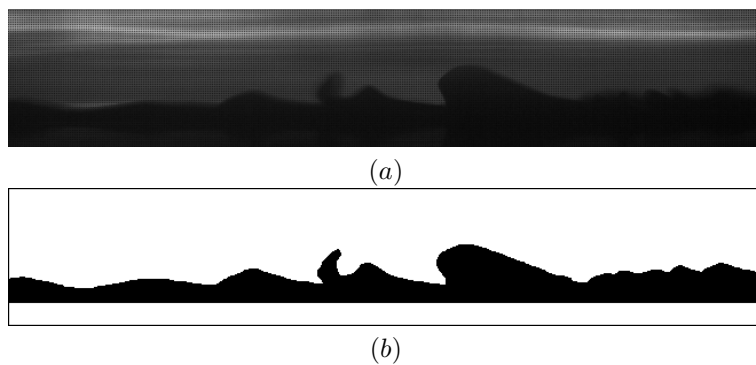


Figura 15: irregolarità dello strato liquido 2.

Lo strato liquido è paraffina pura di 2 mm. In (a) è riportata l'immagine reale mentre in (b) l'immagine binaria.

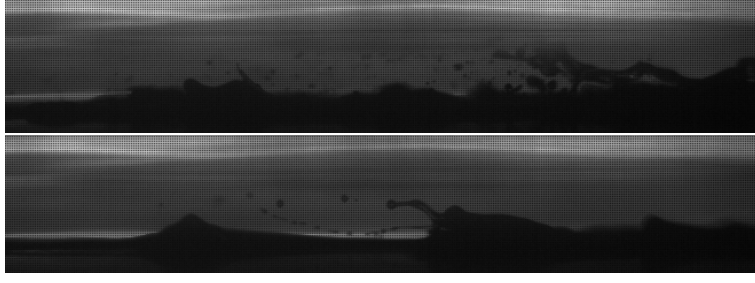


Figura 16: stappamento dello strato liquido (paraffina).

2.8.3 Distacco delle instabilità

Bisogna notare che il modello appena descritto è utile per comprendere il comportamento delle instabilità (sotto opportune ipotesi) e come queste si comportano al variare di opportuni parametri. Il limite principale della formula è che non descrive il fenomeno di frantumazione delle instabilità in strutture che si disperdono nella fase gassosa rompendosi a loro volta in gocce sotto l'azione degli sforzi aerodinamici. Una formulazione numerica per tenere in conto il fenomeno del distacco è complessa infatti oltre alla dinamica delle instabilità bisogna aggiungere relazioni atte a descrivere i meccanismi di frantumazione e in più bisogna modificare anche l'equazione di continuità dal momento che non è più verificata localmente (nella sola fase liquida) ma solo globalmente (fase liquido + gas). Una relazione empirica per il trasferimento di massa dal liquido nel gas è stata proposta da Karabeyoglu [2], [10]:

$$\dot{m}_{ent} = 13.3 [e_0 (X_e)] \dot{m}_l \quad (13)$$

dove $e_0 (X_e)$ è una funzione definita come:

$$e_0 = 1 + e^{-1.06 \cdot 10^{-4} (X_e - 2109)} \quad (14)$$

Invece X_e è una funzione definita nel modo seguente:

$$X_e = \frac{P_d^{\frac{1}{2}}}{\sigma (T_g/T_v)^{\frac{1}{4}}} \quad (15)$$

in cui P_d è la pressione dinamica del gas, σ la tensione superficiale, T_g la temperatura della fase gassosa e T_v la temperatura di vaporizzazione della fase liquida. Un'ulteriore relazione, sempre proposta da Karabeyoglu, semplifica l'equazione (38) mettendo in luce i parametri fondamentali da cui dipende il trascinarsi delle gocce:

$$m_{ent} \propto \frac{P_d^\alpha h_l^\beta}{\mu_l^\gamma \sigma^\pi} \quad (16)$$

Si può notare come la velocità del flusso ossidante (nascosta nel termine P_d) e lo spessore dello strato liquido h_l risultino avere un effetto instabilizzante sul film liquido e quindi benefico per l'entrainment, mentre viscosità μ_l e tensione superficiale σ producono l'effetto contrario. α , β , γ e π sono coefficienti numerici sperimentali [9].

2.9 Conclusione

I paragrafi sopra esposti hanno mostrato le grandi potenzialità dei materiali basso-fondenti rispetto ai quelli tradizionali. Allo stesso tempo hanno evidenziato anche la severa complessità del fenomeni fisici che bisogna considerare per l'applicazione di questi combustibili nel campo della propulsione spaziale. I modelli matematici descritti, sebbene rappresentino una base, sono lontani dal modellare in modo efficace anche solo il fenomeno dell'entrainment in condizioni

di chimica congelata. Tali considerazioni danno una misura chiara della rilevanza della ricerca sperimentale da dover effettuare in questo ambito. Essa rappresenta solo il primo step verso la comprensione completa dei processi espressi. Nello specifico gli studi sui materiali basso-fondenti seguono tre filoni principali:

- Filone “meccanico” → focalizzato sull’analisi delle proprietà delle sostanze innovative, ad esempio: tensione superficiale, viscosità, modulo elastico.
- Filone “fluidodinamico” → concentrato sull’entrainment.
- Filone “propulsivo” → atto a testare la qualità delle performance ottenute nel processo di combustione dei materiali innovativi.

Tutti e tre sono fondamentali per l’avanzamento ed il progresso della scienza e delle tecnologie della combustione. Questa tesi si inquadra nella seconda categoria rivolgendo particolare interesse alla formazione degli spray.

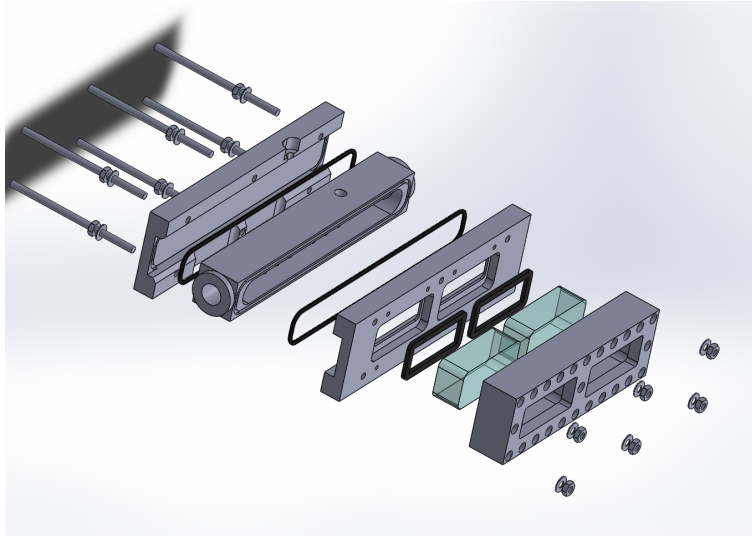


Figura 17: vista esplosa della camera slab.

3 Impianti sperimentali

3.1 Progetto e realizzazione del primo banco prova

Lo studio dei fenomeni fisici che avvengono nei propulsori ibridi necessita la presenza di linee sperimentali dedicate, appositamente progettate per l'indagine da svolgere. La linea sperimentale è un apparato complesso composto da un insieme di sottosistemi cooperanti e interconnessi tra loro. Ogni impianto sperimentale, indipendentemente dalla sua complessità, può essere suddiviso in due macro-parti: il banco prova ed il sistema di acquisizione e controllo. Il banco prova è l'insieme di tutti i componenti che permettono la riproduzione del fenomeno da studiare mentre il sistema di acquisizione e controllo è tutto ciò che permette la regolazione del sistema e la misura delle grandezze fisiche di interesse. L'assenza di un banco prova specifico per lo studio del fenomeno dell'entrainment ha imposto la progettazione e la realizzazione di un nuovo impianto dove poter realizzare i test. La progettazione del banco sperimentale è soggetta a numerosi vincoli i più importanti dei quali sono: gli obiettivi imposti dalla ricerca, lo stadio di sviluppo tecnologico e la disponibilità economica.

3.2 Descrizione della camera di prova

La progettazione del banco prova è partita pensando alla camera dove riprodurre il fenomeno di instabilizzazione del film liquido di combustibile generato da un flusso gassoso. Le specifiche dettate dal fenomeno fisico da studiare hanno imposto alla camera le seguenti caratteristiche: la presenza di una vasca di contenimento del combustibile, la necessità di una mandata ed uno scarico per il passaggio dell'ossidante e la presenza di opportune aperture per permettere le visualizzazioni. La camera di combustione in configurazione slab presente al laboratorio di propulsione spaziale soddisfa tali esigenze. Questa camera di prova (figura 17 e 18) consiste in quattro elementi principali: una piastra inferiore, una piastra superiore, un porta-finestre ed un corpo centrale. Il corpo centrale è dotato di due fori principali per l'iniezione e lo scarico del flusso. La tenuta stagna di questo elemento è garantita da due O-ring inseriti nelle opportune scanalature ricavate sulle piastre e sul componente centrale. La pressione sui due O-ring viene garantita da sei barre filettate e dai relativi dadi che scaricano gli sforzi sulle due piastre consentendo la chiusura ermetica dei tre pezzi. La piastra superiore è dotata anche di due aperture rettangolari sulle quali si possono installare due vetri e il relativo porta-finestre i quali sono resi solidali a tutta la struttura sempre con l'aiuto di O-ring, barre filettate e dadi. La camera slab,

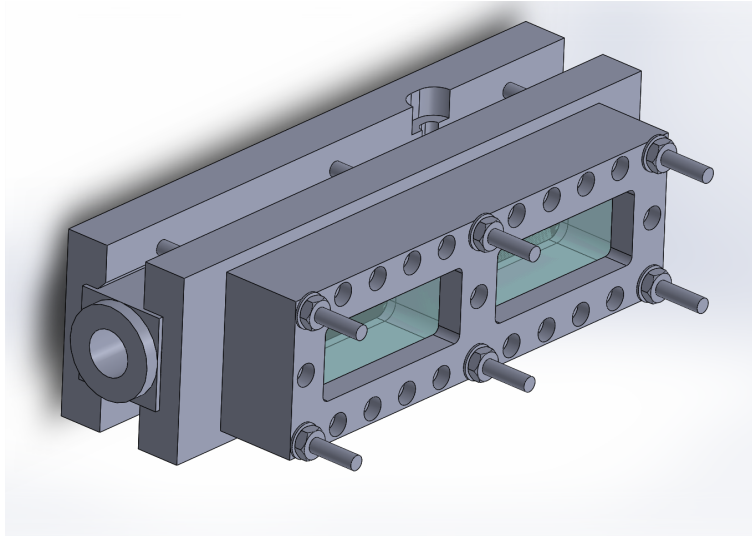


Figura 18: camera slab.

sebbene costituisca un punto di partenza, non può essere utilizzata direttamente per gli scopi di questa ricerca poiché: lo spessore dello strato liquido sarebbe difficile da misurare e l'assenza di un rettificatore che trasformi il flusso da radiale a rettangolare comporterebbe l'introduzione in camera di un flusso fin da subito turbolento. Per queste ragioni la camera slab è stata usata come il contenitore di una nuova in grado di risolvere i problemi esposti in precedenza. Il disegno della nuova camera, riportato in figura 19, evidenzia la presenza di due elementi. Nel primo si nota la geometria interna della camera con la presenza del rettificatore, della vaschetta di contenimento del combustibile, della post-camera e dello scarico. Il secondo elemento rappresenta una lastra di vetro che funge da parete laterale della camera che permette contemporaneamente il contenimento del combustibile e la possibilità di effettuare la ripresa del fenomeno. Esaurita la fase progettuale, in cui tutte le dimensioni ideali degli elementi sono state fissate, si è passati alla realizzazione del primo componente partendo da una trave a sezione rettangolare di alluminio. La barra è stata fresata esternamente per poter essere alloggiata senza interferenza nel porta camera. Successivamente è stata eseguita la sagomatura interna della camera. Infine sono state ricavate due scanalature "contiene silicone" che corrono lungo tutto il profilo interno della camera grazie alle quali è stato reso possibile l'incollaggio con il vetrino.

3.3 Sistema di riscaldamento

I combustibili a base paraffinica esaminati in questa ricerca si presentano allo stato solido a temperatura ambiente. La necessità di studiare il fenomeno dell'entrainment impone la presenza di uno strato liquido di combustibile. L'introduzione di questo ulteriore vincolo obbliga il riscaldamento della camera di prova. L'utilizzo di una soffiante è stato ritenuto il metodo più semplice per raggiungere questo scopo. Il flusso costante di aria calda, opportunamente direzionato, consente il riscaldamento dell'insieme involucro-camera. Per rendere il processo di scambio termico più efficiente è stata progettata e costruita una scatola in legno dentro la quale è stata fissata la camera di prova. In questo modo gli scambi termici verso l'ambiente vengono limitati consentendo un riscaldamento più rapido del combustibile. La parete posteriore della scatola presenta un foro centrale per l'introduzione del flusso caldo più altri quattro utilizzati per il passaggio di barre filettate necessarie al fissaggio della camera di prova alla scatola. La parete frontale presenta un'apertura rettangolare in modo tale da rendere possibile la video-ripresa dell'entrainment. Infine le pareti laterali hanno rispettivamente due fori, due dei quali consentono l'uscita del flusso caldo mentre i restanti permettono l'iniezione e lo scarico del flusso ossidante.

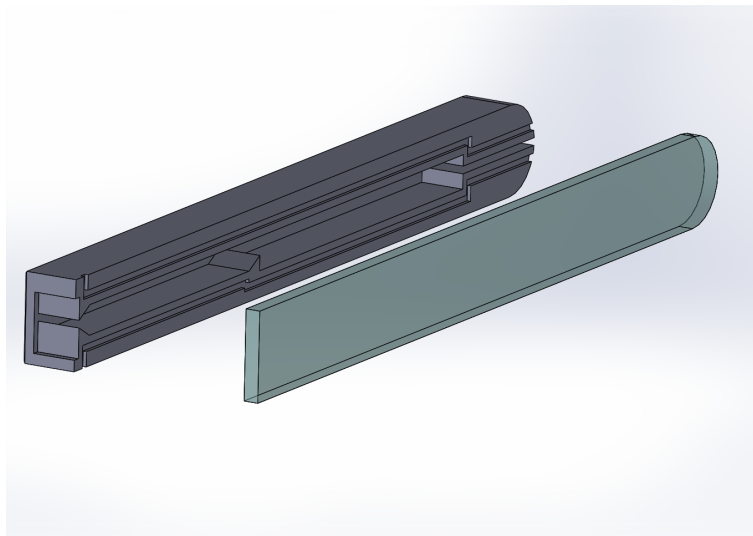


Figura 19: camera interna.

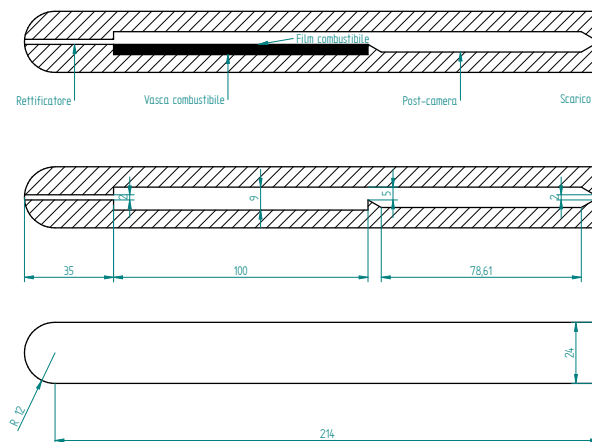


Figura 20: geometria della camera e del vetrino.

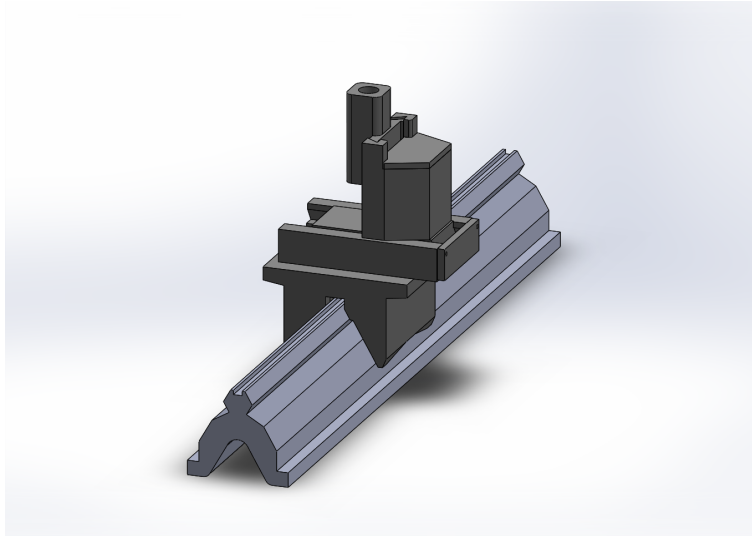


Figura 21: sistema di movimentazione della telecamera.

3.4 Supporto e movimentazione della telecamera

Una volta risolte le criticità relative al riscaldamento, lo sviluppo del banco prova è proseguito affrontando i problemi connessi all'introduzione di una telecamera ad alta velocità necessaria per la ripresa del fenomeno da studiare. Questo apparato presuppone il progetto di una supporto che garantisca il fissaggio ed il corretto posizionamento del sensore della videocamera stessa rispetto alla camera di prova. Il supporto deve anche permettere la movimentazione su tre assi coordinati della videocamera in modo tale da consentire il posizionamento del sensore in ogni punto di interesse della camera di prova ed una corretta calibrazione dell'insieme videocamera-sensore. Il sostegno che è stato utilizzato è raffigurato in figura 21. Esso è composto da due elementi: il primo è una rotaia in alluminio lunga 500 mm sulla quale scorre il secondo elemento. Quest'ultimo pezzo affranca la videocamera alla rotaia e contemporaneamente ne permette lo spostamento lungo i due assi restanti tramite due viti di regolazione.

3.5 Telaio

I tre elementi principali del banco prova, cioè camera di prova soffiante e videocamera, devono essere resi solidali in modo tale che eventuali vibrazioni casuali, ad esempio introdotte dal flusso generato dalla soffiante, influiscano in modo limitato sulle visualizzazioni. Per il sostegno dei sottosistemi in questione è stato ideato un telaio la cui configurazione finale è riportata in figura 22. Il telaio è formato da 13 travi di alluminio cave a sezione rettangolare 40 x 80 x 2 mm imbullonate tra loro. Sulle due travi longitudinali di base si innesta una struttura centrale che costituisce l'alloggiamento per la scatola contenente la camera di prova. Una seconda struttura formata da quattro travi una piastra ed i relativi giunti formano la base di appoggio per la soffiante. Infine due travi opportunamente forate permettono l'ancoraggio e la movimentazione di massima dell'insieme supporto mobile-telecamera. Il telaio è stato completato aggiungendo sei piedini regolabili atti all'appoggio dell'impianto al terreno. Da ultimo sono stati aggiunti alla camera di prova i collegamenti idraulici ed il relativo tubo per l'immissione del flusso ossidante. La linea sperimentale utilizza ossigeno gassoso immagazzinato in bombole ad alta pressione (180-200 bar) successivamente portata a 20 bar da un riduttore posto subito a valle della bombola.

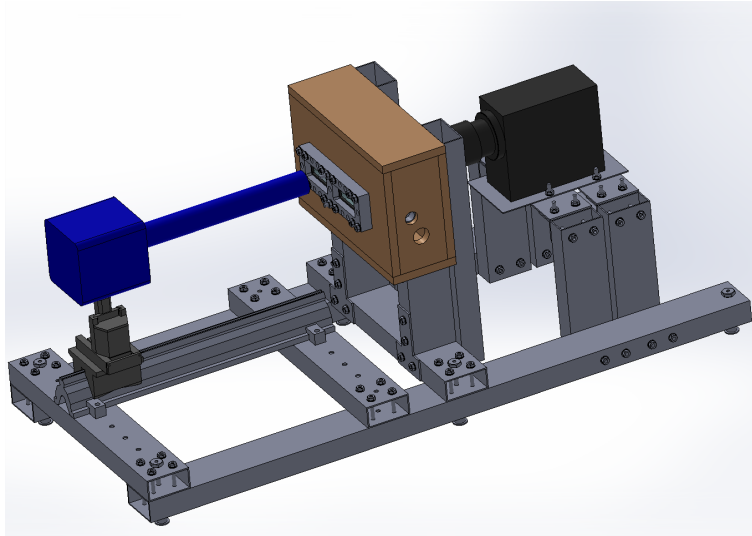


Figura 22: progetto finale del primo banco prova.

3.6 Sistema di acquisizione e controllo

La realizzazione della linea sperimentale è proseguita corredando il banco prova del sistema di acquisizione e controllo cioè di tutti gli apparati necessari per il monitoraggio e la misura delle grandezze fisiche di interesse. Nel caso specifico le quantità fisiche regolabili risultano essere la portata massica del flusso di ossigeno e la temperatura del combustibile liquido. La necessità di misurare i diametri delle gocce di combustibile strappati dal film liquido impone la presenza di una telecamera ed il relativo software per l'acquisizione delle immagini.

3.7 Mass flow control

La regolazione del flusso di ossigeno viene effettuata mediante un controllore elettronico della portata massica posizionato sul circuito di alimentazione dell'ossidante. Tale regolatore modula l'apertura dell'elettrovalvola a vite che a sua volta comanda il valore della portata massica nella linea. Il sistema elettro-meccanico appena descritto si interfaccia con l'utente tramite il software dedicato installato su un personal computer. Grazie al programma l'utente è in grado di stabilire il tracciato di portata massica ideale da utilizzare durante la prova. L'elettronica del componente, una volta noto questo profilo espresso in punti percentuali del fondo scala, ne confronta il valore con il segnale in feedback ed effettua la regolazione. La necessità di avere un controllore veloce genera l'inconveniente di una sovra-elongazione del profilo reale di portata in corrispondenza di variazioni di ampiezza eccessive del tracciato ideale. Il software consente anche all'utente di immagazzinare i dati relativi ai tracciati della portata massica ideale e reale in dei txt-files grazie ai quali è possibile a posteriori conoscere indicativamente la velocità del flusso in camera di prova.

3.8 Acquisizione delle immagini

La ripresa delle immagine è stata effettuata utilizzando la FastCamera13 della FastVision a disposizione nel laboratorio di propulsione spaziale. Il cuore di questa camera digitale è l'active pixel sensor (APS) cioè un circuito integrato composto da una matrice di elementi di materiale semiconduttivo che svolgono la funzione di fotorivelatore. L'intensità luminosa che investe l'APS viene catturata dagli elementi semiconduttivi ognuno dei quali trasforma il segnale luminoso in un segnale in volt. Ogni elemento dell'APS è corredato di un amplificatore che elabora il segnale in modo opportuno consentendo ad un altro chip la conversione del segnale in volt in



Figura 23: FastCamera13 prodotta dalla FastVision.

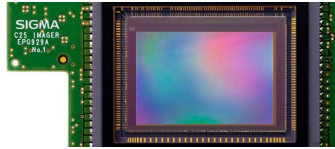


Figura 24: Active Pixel Sensor (APS).

un dato digitale. La FastCamera13 è in grado di ricostruire l'immagine reale in una finestra composta da al massimo 1280×1024 pixel. In questa configurazione il sensore consente di catturare 500 fotogrammi per secondo fino a raggiungere un massimo di 500000 fotogrammi al secondo nel caso si usi un solo pixel per la descrizione dell'immagine. Come il mass flow control system anche la FastCamera13 è fornita di un software dedicato attraverso il quale l'utente può controllare i parametri di interesse quali: il frame rate, la messa a fuoco, il tempo di esposizione dell'otturatore digitale (cioè il tempo di attivazione dell'APS), il numero di frame da memorizzare, la risoluzione dell'immagine e la modalità di trigger. Una volta compiuta la prova il filmato viene salvato nella memoria interna della telecamera come una sequenza di immagini .TIFF. Queste possono essere trasferite sul computer dedicato alla camera digitale attraverso un cavo USB ed elaborate in un secondo momento.

3.9 Misura della temperatura

La temperatura del combustibile non è stata controllata in modo attivo. In un primo momento è stato pensato di introdurre nel progetto della linea sperimentale un termostato in grado di regolare la temperatura comandando l'accensione e lo spegnimento della soffiante. Al posto di complicare ulteriormente la linea sperimentale è stato deciso di usare una termocoppia di tipo K per rilevare la temperatura del combustibile subito prima di effettuare la prova. Nella figura 42 e 25 è possibile notare rispettivamente l'impianto sperimentale reale ultimato ed il disegno schematico della linea.

3.10 Problematiche riscontrate durante la messa a punto della linea

3.10.1 Coordinamento MFC FastCamera

Durante la fase di messa a punto dell'impianto sperimentale sono state riscontrate numerose criticità. La prima problematica che si è dovuto affrontare è stata la sincronizzazione della videocamera con il mass flow. La coordinazione dei due sistemi è fondamentale dal momento che è necessario associare ad ogni fotogramma una velocità media. I due sistemi devono poter partire nello stesso istante così conoscendo il frame rate ed il tracciato portata-tempo è possibile raggiungere lo scopo. Per far questo è stato sfruttato il trigger remoto della FastCamera13 cioè la possibilità di far partire l'acquisizione delle immagini grazie ad un segnale elettrico (un'onda quadra da 5 volt) lanciato da un computer diverso da quello adibito al controllo della camera digitale. Grazie ad un cavo BNC, una basetta di acquisizione, una scheda di acquisizione in grado di fornire segnali output ed il software LabView è stata possibile collegare la videocamera al computer del mass flow e programmare lo "start" contemporaneo.

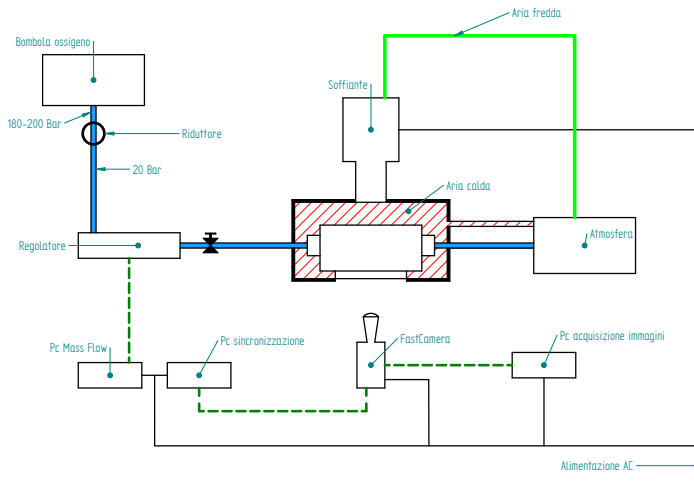


Figura 25: schema della prima linea sperimentale.

3.10.2 Preparazione della prova

La difficoltà nella preparazione e nella calibrazione della prova è stato un altro problema affrontato. L'unico modo per raggiungere, dall'esterno, la vaschetta di contenimento è passare attraverso il foro di scarico della postcamera. Questo ha una sezione rettangolare di 15 x 2 mm ed ha impossibilitato l'introduzione di un provino di carta millimetrata necessario per regolare la messa a fuoco e per la conversione pixel-millimetri. Per la stessa ragione anche l'iniezione stessa del combustibile è stata resa complessa. Si è pensato di regolare la messa a fuoco dell'obiettivo empiricamente prendendo come limiti il vetro di copertura e la parete di fondo della camera. Per avere la possibilità di effettuare le misure attraverso immagini invece si è presa come lunghezza di riferimento la larghezza della camera. Infine il posizionamento del combustibile è stato effettuato attraverso una siringa di vetro dotata di un ago sufficientemente lungo per raggiungere la vasca.

3.10.3 Ripetibilità della prova

Ulteriori complicazioni sono state notate durante le prime prove. L'esigenza di avere una descrizione precisa dell'entrainment ha reso necessario impostare tempi di esposizione del sensore digitale dell'ordine delle unità di microsecondi e frame rate dell'ordine delle migliaia di fotogrammi al secondo. Le immagini che ne derivano sono totalmente nere perché l'intensità luminosa ambientale non è sufficiente per la ripresa. Sono state aggiunte al banco prova fonti luminose artificiali con le quali non è stato comunque possibile raggiungere i valori di esposizione e frame rate indicati in precedenza. Alcune riprese condotte a 250 fps con esposizione di 3000 microsecondi hanno evidenziato chiaramente come le immagini siano "mosse" e non sfruttabili per alcuna elaborazione. In più, una volta concluso un esperimento, è indispensabile pulire il vetro interno della camera dalla paraffina solidificata rimasta appiccicata. Per il lavaggio del vetrino è necessario estrarre la camera interna smontando la parete frontale della scatola, l'intero involucro porta-camera ed infine rimuovere il silicone che unisce le due parti della camera interna. Il tutto deve essere rimontato per fare la prova successiva. Nella figura 26 è riportato un fotogramma ottenuto con questo impianto.

3.11 Progetto e realizzazione del secondo banco prova

A causa di tutte queste complicazioni e limitazioni dell'impianto sperimentale è stato deciso di progettare un secondo banco prova che resolvesse la maggior parte dei problemi sopra citati.

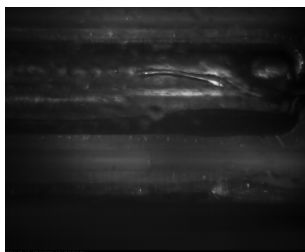


Figura 26: fotogramma della vasca contieni-combustibile.

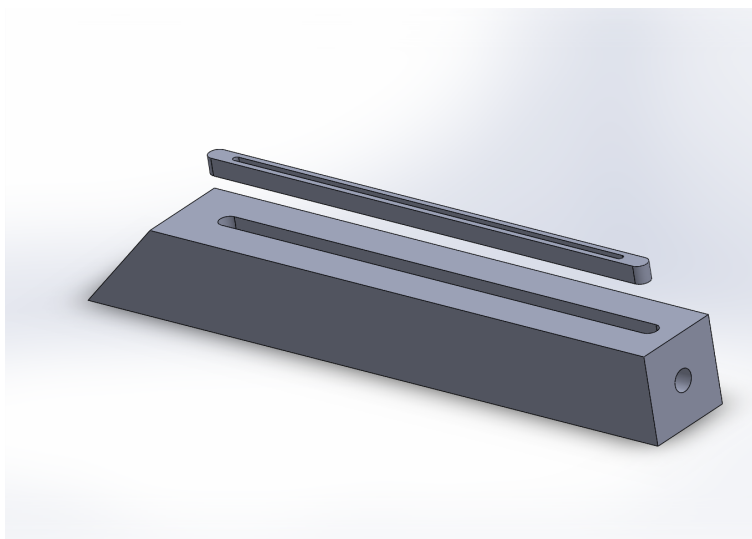


Figura 27: camera contieni-combustibile e portaresistenza.

3.12 Camera di prova

Come per il primo banco prova anche per il secondo si è partiti ideando la camera di prova. Questa è stata progettata in modo tale da rispettare i vincoli principali dettati dalla prima camera, tenendo conto delle problematiche riscontrate. Le idee guida del progetto sono state due: cambiare il metodo di riscaldamento del combustibile e permettere l'illuminazione artificiale del sistema da più direzioni. Il disegno preliminare della camera è presentato in figura 27. Questa è costituita da due elementi (figura 28). Il componente più grande è una trave di dimensioni 40 x 40 x 300 mm con una scanalatura sulla faccia superiore, atta a contenere la vasca combustibile, e con un foro centrale sulla sezione quadrata necessario per l'inserimento di una resistenza elettrica a cartuccia. Il secondo elemento è la vasca-combustibile vera e propria. Essa è una barra di dimensioni 8 x 8 x 230 mm con una scanalatura centrale che si innesta nel canale del primo componente. L'aver diviso in due elementi la camera di prova concede la possibilità di progettare vasche combustibili con geometrie diverse. Questo ha consentito la variazione dello spessore del film liquido di combustibile cosa che non si sarebbe potuta fare sulla linea originale. In particolare sono state realizzate tre vasche con uguale geometria ad eccezione della profondità, rispettivamente di 1 mm, 2 mm e 3 mm. Il passo successivo per il completamento del progetto è stato pensare al confinamento del flusso ossidante. Per lo scopo è stato realizzato un tubo in plexiglas grazie al quale sarebbe stato possibile la ripresa del fenomeno e l'illuminazione da più direzioni. Il plexiglass però non resiste a temperature superiori a 70 gradi per questa ragione sono state create dei pannelli isolanti di balsa per evitare il contatto diretto con l'elemento metallico. Nelle figura 29 e 30 sono mostrati i disegni completi delle nuove camera di prova.

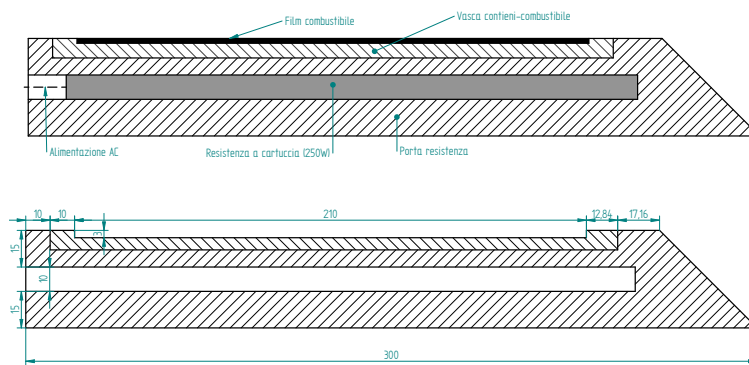


Figura 28: disegno preliminare.

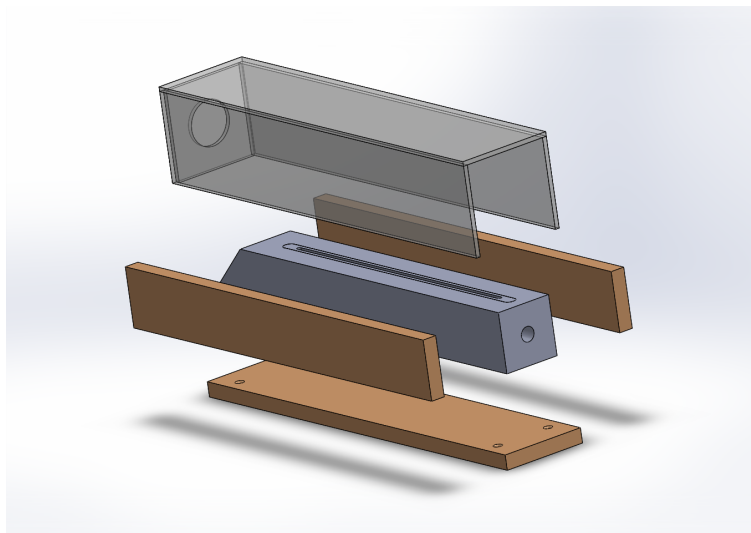


Figura 29: vista esplosa della nuova camera di prova.

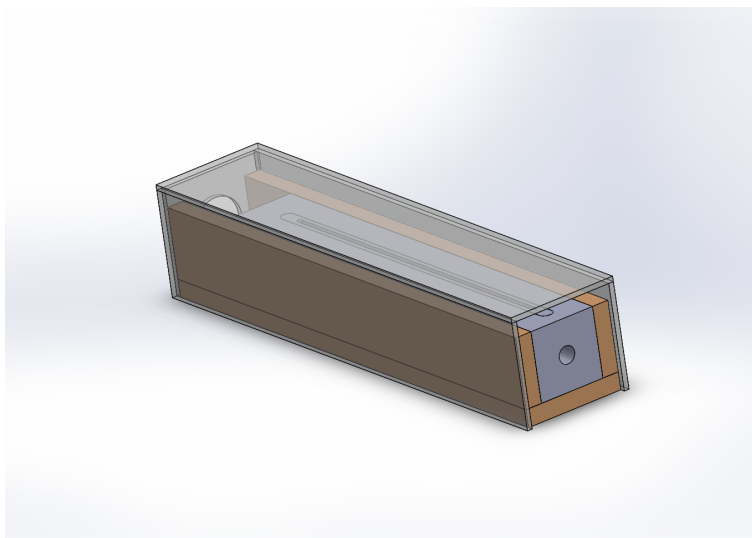


Figura 30: seconda camera di prova.

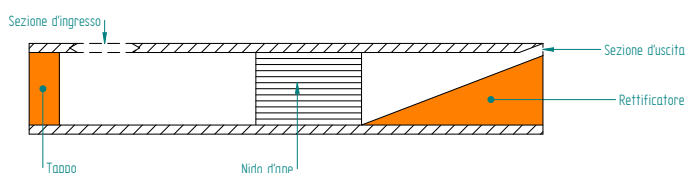


Figura 31: vista in sezione dell'iniettore.

3.13 Iniettore

Da ultimo ci si è concentrati sull'ideazione dell'iniettore del ossidante. Questo componente è formato da un tubo rettangolare con dimensioni esterne 60 x 30 mm, e spessore 3 mm. Una delle due estremità è stata tappata grazie ad una tavoletta di legno opportunamente sagomata e siliconata per evitare ogni trafilamento del gas. In seguito sulla parete superiore del tubo è stato creato un foro filettato grazie al quale è possibile raccordare l'iniettore con la linea dell'ossidante. All'interno del tubo è stata inserita una griglia a nido d'ape per consentire al flusso di regolarizzarsi è di seguito a questa una rampa sagomata in modo da trasformare la sezione di passaggio con continuità da 54 x 24 mm a 54 x 3 mm.

3.14 Modifica del telaio

Camera di prova ed iniettore sono stati fissati ad una base di compensato rendendo tutti gli elementi solidali tra loro. Anche il telaio di partenza è stato modificato. In particolare è stata eliminata la struttura centrale in cui era alloggiata la prima camera. La camera nuova è stata fissata sulla piastra che era adibita a reggere la soffiante. Da ultimo le due barre reggi-telecamera sono state avvicinate alla nuova camera. Nelle figure 32 e 42 è possibile vedere rispettivamente il disegno CAD e la realizzazione finale del secondo banco prova.

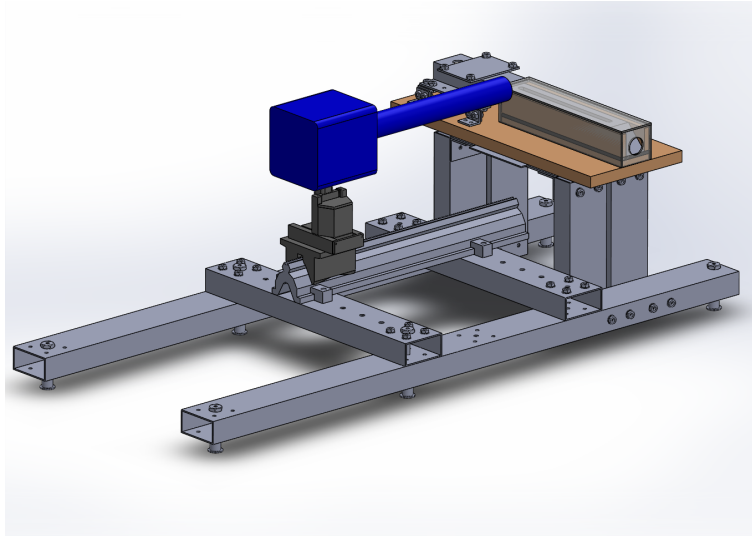


Figura 32: disegno CAD finale del secondo banco prova.

3.15 Sistema di illuminazione

La maggior parte del tempo dedicato per la messa a punto del nuovo impianto sperimentale ha riguardato la scelta della fonte luminosa, il suo posizionamento ed il settaggio dei parametri relativi alla videocamera. Per la regolazione dell'impianto è stato deciso di usare acqua al posto della paraffina per non riscaldare la camera.

3.16 Illuminazione diretta

Inizialmente le riprese di prova sono state condotte con una lampada ad incandescenza alogena alimentata in corrente alternata in grado di fornire 2200 lumen. Questa è stata posizionata a fianco della telecamera direzionando il flusso luminoso sulla zona di ripresa come indicato in figura 33. Alla videocamera è stato imposto di catturare 1000 fotogrammi ogni secondo con una esposizione di 333 microsecondi. L'immagine riportata in figura 34 mostra come le impostazioni della camera digitale siano insufficienti per la cattura del fenomeno. Allora è stato aumentato il frame rate e ridotta l'esposizione progressivamente per avere una definizione dell'immagine migliore. Le prove hanno messo in evidenza che il limite (in questa configurazione) per avere un'immagine con un contrasto sufficiente per l'individuazione dei contorni sia 250 microsecondi. Come si nota in figura 35 anche in questo caso è possibile riprendere in modo efficace solo le instabilità di Helmholtz.

3.17 Retro-illuminazione

E' stato deciso di cambiare il posizionamento della lampada in modo tale da retro-illuminare la camera come si può notare in figura 36. Grazie a questo accorgimento è stata possibile la cattura dei fotogrammi in modalità shadow. Questa tecnica consente alla maggior parte del flusso luminoso di entrare direttamente nell'obiettivo. Nel momento in cui un qualsiasi elemento attraversa il fascio (ad esempio una goccia di combustibile) si crea una variazione di intensità luminosa locale nel fascio di luce (un'ombra) che dipende dalla geometria del corpo. (In realtà l'ombra generata dipende anche dal campo luminoso, tuttavia se le dimensioni della fonte di luce sono molto più grandi degli elementi in esame allora è possibile ritenere l'ombra dipendente solo dalla geometria. La lampada ha una lunghezza caratteristica di decine di centimetri mentre le gocce combustibili si ritengono avere diametri dell'ordine dei micron. L'utilizzo della tecnica shadow è giustificato.) I miglioramenti sono riportati nella figura 37. Dalle immagini è possibile

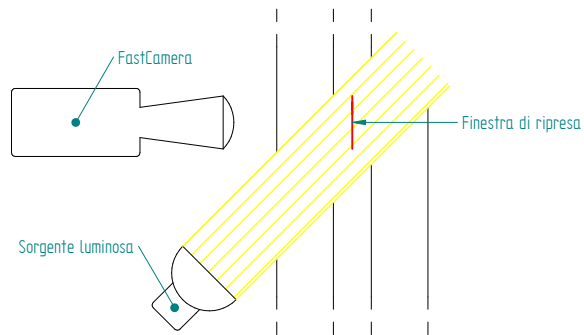


Figura 33: illuminazione diretta.

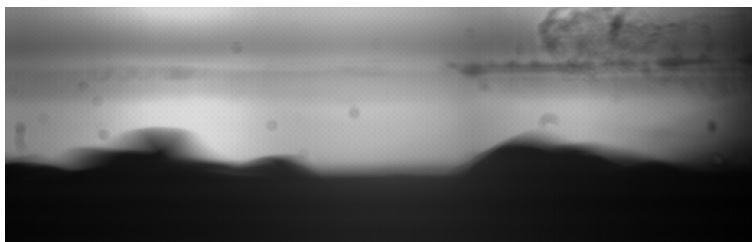


Figura 34: fotogramma 1.

L'immagine è stata catturata in illuminazione diretta con tempo di esposizione di 333 microsecondi. E' possibile distinguere in modo approssimato solo le instabilità dello strato liquido.

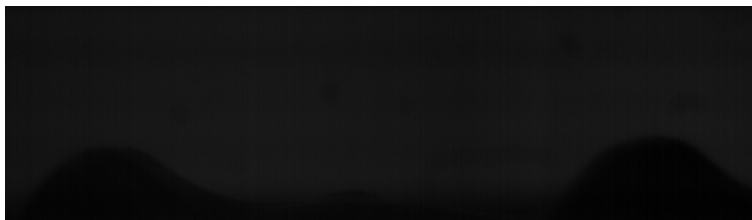


Figura 35: fotogramma 2.

L'immagine è stata catturata in illuminazione diretta con tempo di esposizione di 150 microsecondi. Le instabilizzazioni sono definite ma l'immagine risulta molto scura. Non è ancora visibile la frantumazione delle creste in gocce.

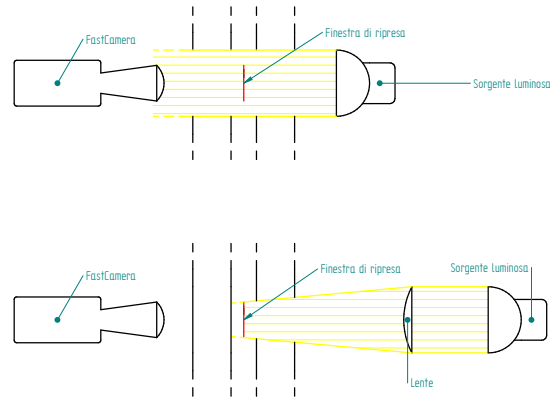


Figura 36: retro illuminazione semplice e retro illuminazione focalizzata.

intuire il distacco delle creste nel flusso gassoso. Il fenomeno risulta ancora troppo veloce per il valore di esposizione adottato. Si è reso necessario la sostituzione della lampada con una più potente. In particolare è stata scelta una sorgente luminosa alimentata in corrente alternata in grado di fornire 8000 lumen. I valori di frame rate e di esposizione sono stati spinti rispettivamente a 3000 fps e a 6 microsecondi. Nella sequenza di immagini 38 è possibile vedere finalmente in modo chiaro la dinamica con cui un'instabilizzazione si frantuma nel flusso gassoso in uno spray di gocce. Una volta noto il valore minimo di esposizione per la corretta ripresa del fenomeno (6 microsecondi) si è cercato di migliorare ulteriormente i fotogrammi. In particolare ci si è concentrati su tre obiettivi: aumentare ancora la luminosità per migliorare il contrasto liquido-gas, aumentare l'ingrandimento dell'immagine per poter visualizzare meglio le gocce e ridurre ulteriormente l'esposizione per ottenere delle gocce "ferme" sul fotogramma.

Il primo obiettivo è stato raggiunto introducendo tra lampada e camera di prova una lente con lo scopo di convogliare la maggior parte della luce sul piano di ripresa riducendone la dispersione. L'ingrandimento è stato compiuto aggiungendo all'obiettivo due tubi macro da 20 e 5 mm. Infine si è scesi con l'esposizione a 5 micro secondi. L'ultimo ostacolo che si è dovuto superare riguarda la lampada stessa. Questa, essendo alimentata in corrente alternata, è in grado di fornire un'intensità luminosa variabile il cui picco è raggiunto solo in corrispondenza del massimo valore del segnale di tensione (220 Volt). Il segnale di tensione (nel caso di corrente alternata) è rappresentabile come una armonica con una frequenza di 50 Hz, la FastCamera campionando a 3000 Hz (framerate) è in grado di catturare queste fluttuazioni. Il risultato comporta avere alcuni fotogrammi con contrasti marcati ed altri molto meno. Per questa ragione è stata sostituita la fonte luminosa precedente con una lampada da 400 Watt, in grado di fornire 16000 lumen, alimentata in corrente continua. All'intera linea sperimentale è stato aggiunto anche un alimentatore in grado di fornire i 36 Volt ed 11 Ampere per il funzionamento della lampadina. Grazie a questa ultima modifica è stato possibile diminuire l'esposizione a 2 micro secondi ottenendo delle immagini, riportate in figura 39, che si prestano infine all'analisi.

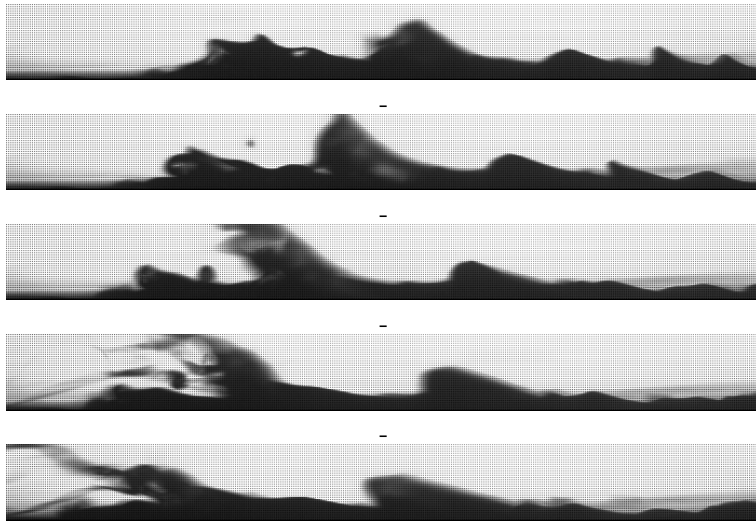


Figura 37: dinamica dell'entrainment 1.

La sequenza dei fotogrammi è stata catturata in tecnica shadow. I contrasti delle immagini sono molto più marcati. E' visibile in modo approssimato la frantumazione delle instabilità.



Figura 38: dinamica dell'entrainment 2.

I fotogrammi sono stati catturati in tecnica shadow. Il tempo di esposizione del sensore digitale alla luce è di 6 microsecondi. I contrasti sono poco marcati ma la frantumazione delle instabilità è visualizzata in modo efficace.

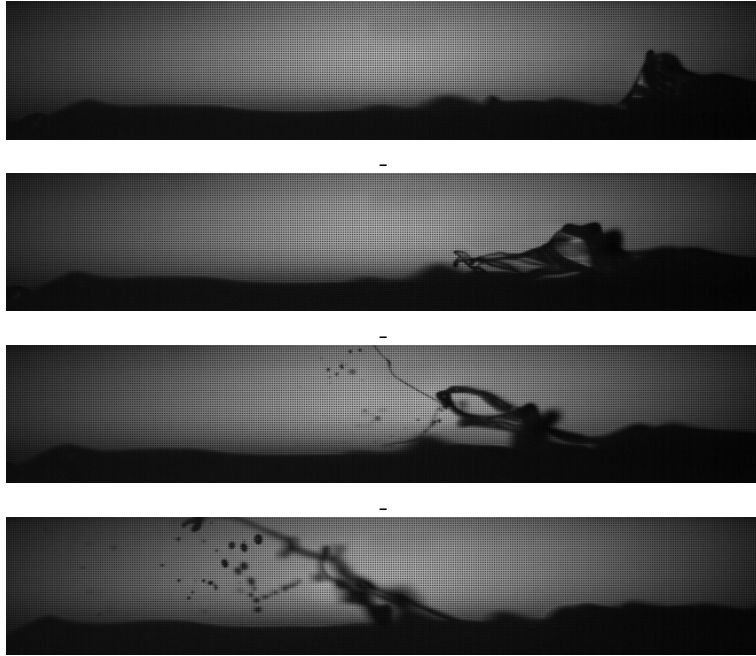


Figura 39: dinamica dell'entrainment 3.
 Fotogrammi catturati in tecnica shadow. Il tempo di esposizione del sensore digitale alla luce è di 2 microsecondi. La fonte luminosa è alimentata in corrente continua e fornisce un flusso di 16000 lumen. Il frame rate impostato alla FastCamera e di 3000 fps.

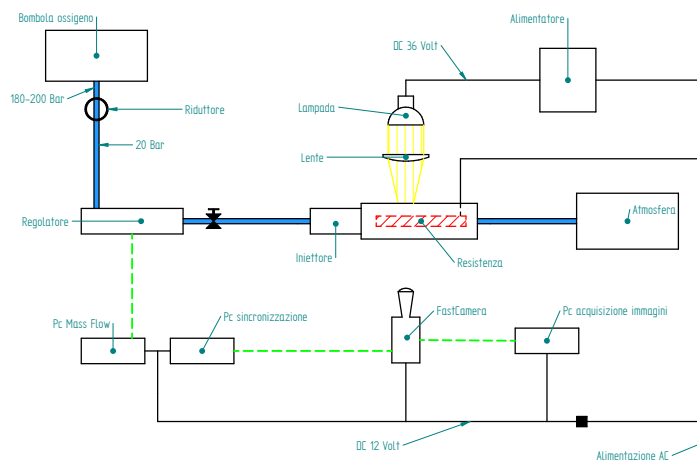


Figura 40: schema della seconda linea sperimentale.

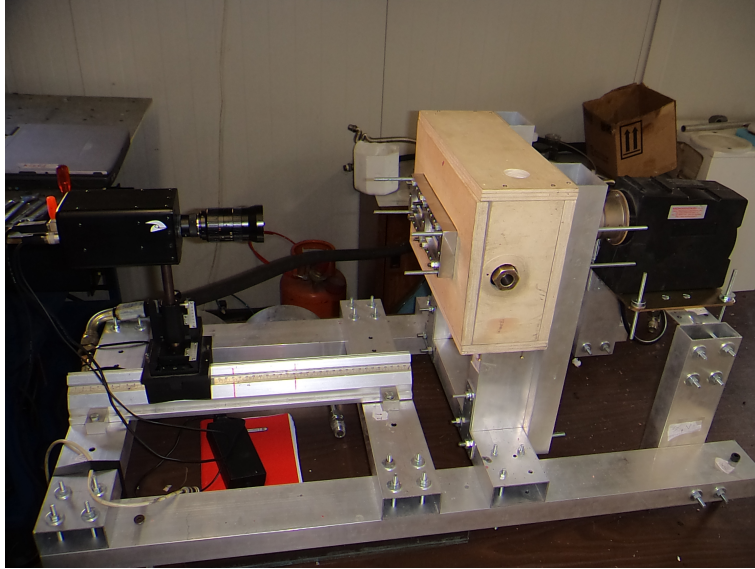


Figura 41: primo banco prova, realizzazione finale.

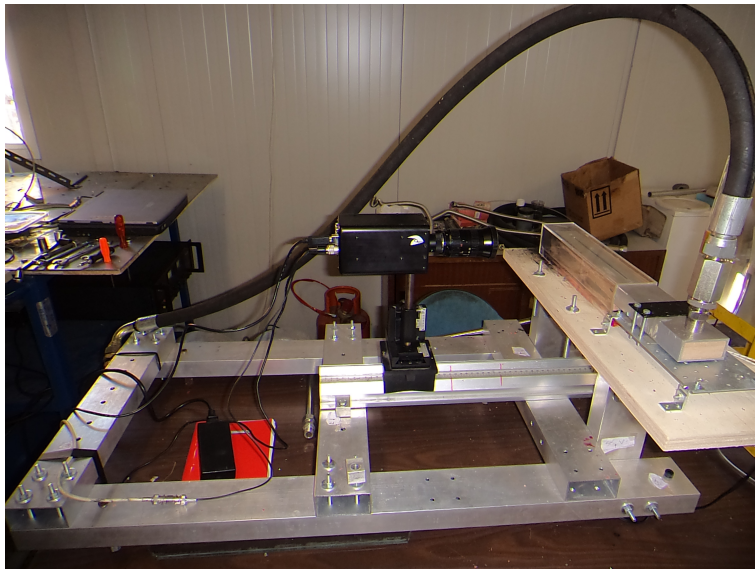


Figura 42: secondo banco prova, realizzazione finale.

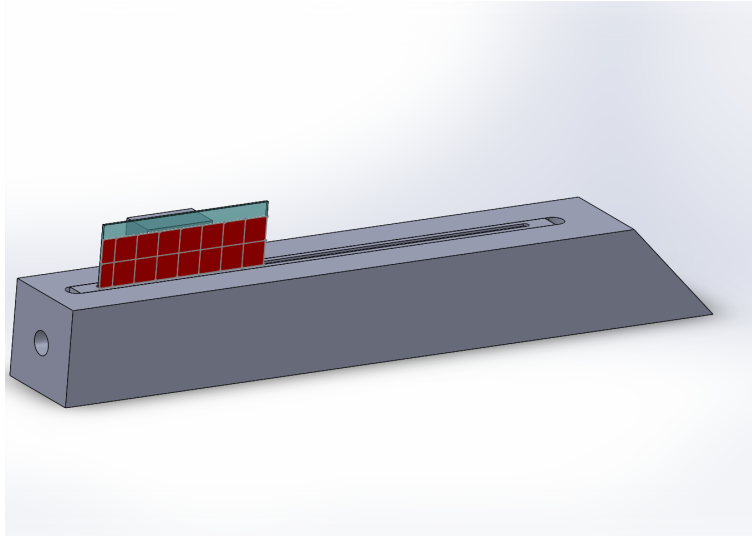


Figura 43: posizionamento del provino di calibrazione.

4 Analisi delle immagini e risultati

4.1 Campo di visualizzazione

I fotogrammi ottenuti per l'analisi non riguardano l'intera camera porta combustibile. Questa come indicato nel capitolo 2 ha una lunghezza di 200 mm di conseguenza non è stato possibile effettuare riprese che siano sufficientemente ingrandite, per osservare chiaramente la formazione delle gocce, ed allo stesso tempo in grado di coprire tutta la lunghezza dello strato liquido. Le dimensioni della finestra di visualizzazione è stata fissata considerando l'area che il fascio luminoso concentrato permette di coprire. Usando un obiettivo con diaframma completamente aperto (apertura massima $f/1,8$ su una lente di 75 mm) ed impostando un tempo di esposizione dell'APS di $2\ \mu\text{s}$ si ottiene una finestra con risoluzione massima di $700 \times 120\text{ Pixel}$. Ogni misura proveniente dai fotogrammi salvati risulterà essere in Pixel ; si rende necessario la conversione di questi in unità di lunghezza del sistema internazionale. Il passaggio *Pixel – millimetri* è stato ottenuto grazie ad un provino di carta millimetrata ripreso prima di effettuare i test. Grazie al provino è stato possibile avere una lunghezza di riferimento ed ottenere la seguente relazione:

$$1\text{ Px} = 20,8\ \mu\text{m}$$

le dimensioni fisiche della finestra sono di circa $14,5 \times 2,5\text{ mm}$. Nota la relazione di trasformazione e la dimensione dell'area di ripresa è necessario deciderne il posizionamento. In figura 45 si può osservare come la finestra di ripresa sia stata piazzata subito sopra lo strato liquido e a 50 mm dall'inizio della vaschetta. Tale scelta è stata effettuata per tenersi a distanza dal bordo di attacco mantenendosi comunque nella prima parte della vasca. In questo modo le riprese non sono influenzate eccessivamente dagli effetti di bordo né sono sporcate dal trasporto a valle di gocce combustibili fuori fuoco. Il piano di ripresa è stato posizionato al centro della vaschetta perché è stato osservato nelle riprese di messa a punto che le instabilità si frantumano all'incirca in questa zona.

4.2 Instazionarietà del flusso gassoso

Il flusso gassoso utilizzato per generare le instabilità è ossigeno introdotto attraverso una sezione rettangolare di dimensione $60 \times 3\text{ mm}$ che si mantiene costante per tutta la lunghezza della vasca. La portata massica dell'ossigeno è controllato dal mass flow control il quale è in grado di fornire un flusso massimo di $9,81\text{ g/s}$. La velocità (mediata sulla portata) massima raggiungibile è di:

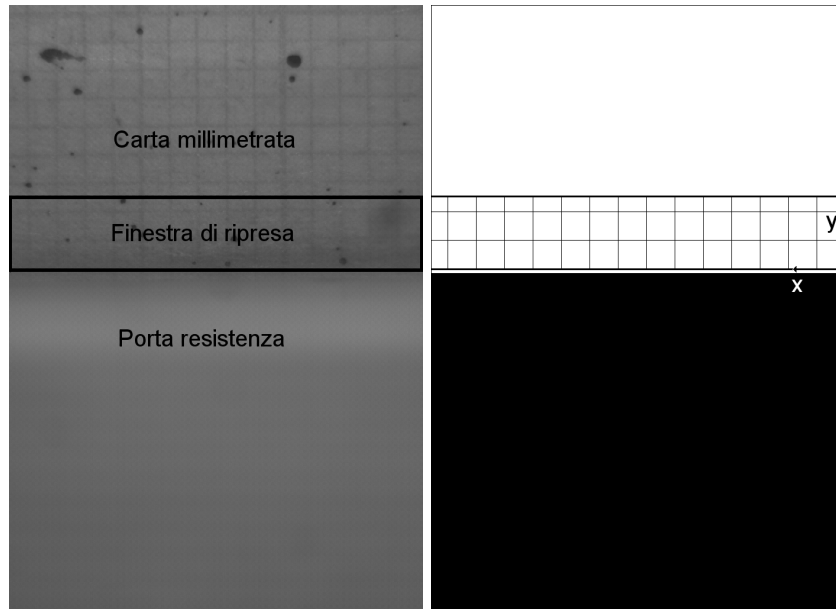


Figura 44: fotogramma del provino di calibrazione e sua elaborazione. L'immagine ha risoluzione di 700×1024 Pixel. La conversione Pixel-millimetri è stata eseguita sulla lunghezza dell'immagine catturata.

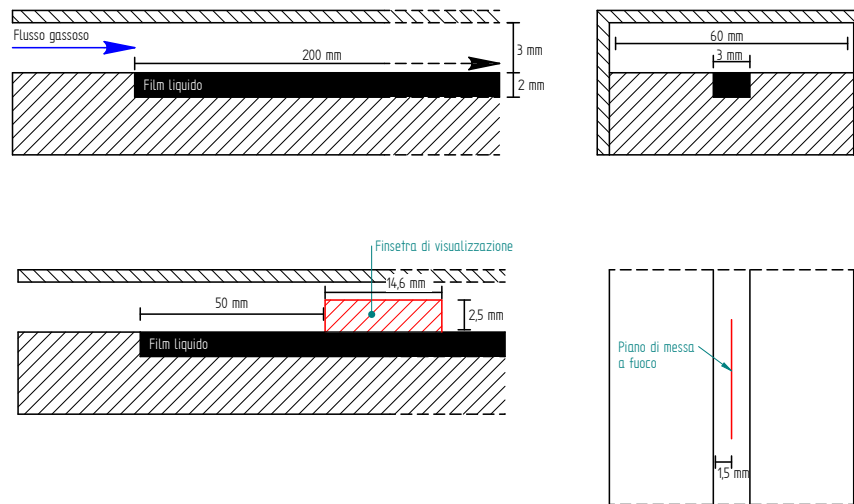


Figura 45: geometria dello strato liquido imperturbato, dimensione e posizione della finestra di visualizzazione.

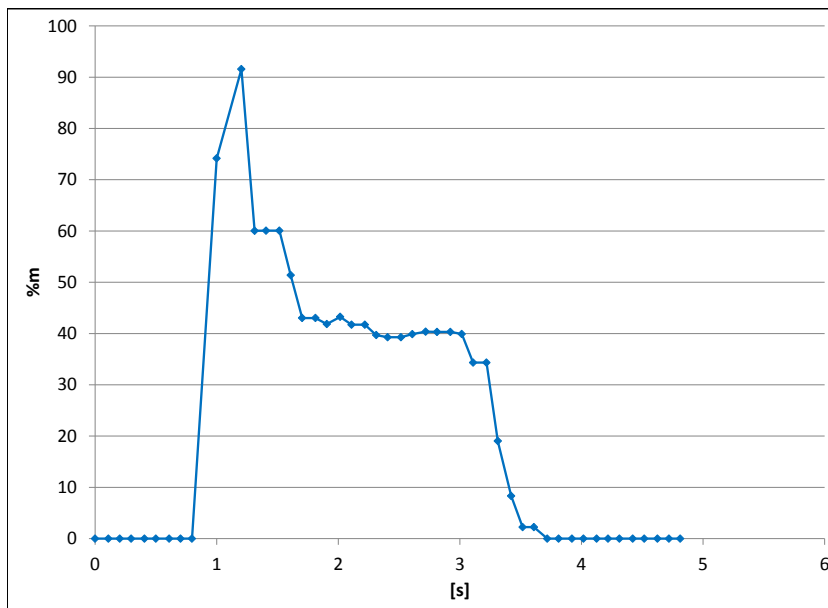


Figura 46: grafico tipico portata-tempo
La condizione di regime si raggiunge dopo 1,8 secondi quando il fenomeno è già avvenuto.

$$V_{max} = \frac{\dot{m}}{\rho_{O_2} S} \approx 38 \frac{m}{s}$$

quindi la velocità all'interno della camera può essere modulata in un intervallo da 0 a 38 m/s . Il mass flow control system è stato sincronizzato con la fast-camera così da garantire lo “start” contemporaneo nell’acquisizione della portata e dei fotogrammi. Conoscendo la frequenza di campionamento della fotocamera è stato possibile risalire all’istante di tempo in cui è stato catturato ciascun fotogramma; avendo a disposizione anche il tracciato portata-tempo è stato associato a ciascun frame anche un valore di portata massica e quindi di velocità. Tutto questo è stato fatto perché le prove condotte hanno messo in luce che la vasca porta-combustibile si svuota in un intervallo di tempo medio di 0,2 – 0,3 s. Osservando un tracciato portata-tempo tipico di una prova, riportato in figura 46, è subito chiaro che il MFCS non ha una dinamica sufficientemente veloce che garantisca una portata costante durante l’esecuzione della prova. Il flusso di ossigeno svuota completamente la vasca prima che si assesti ad una condizione di regime. Tutte le prove sono state condotte in condizioni instazionarie in cui il flusso ossidante accelera instabilizzando il film combustibile fintanto che questo resta nella vasca. Questo comporta che ad ogni frame di una stessa prova è associata una velocità diversa.

4.3 Elaborazione digitale e manuale

Tutti gli esperimenti sono stati condotti nella configurazione illustrata precedentemente. L’analisi delle immagini è stata svolta con l’aiuto del software libero *ImageJ*. Inizialmente è stato pensato di elaborare i fotogrammi sfruttando il programma *ShapeDescriptor1u* (integrato in *ImageJ*). Questo software è in grado di riconoscere i contorni in modo automatico e di fornire, in termini di pixel, i valori geometrici principali quali area perimetro diametro e form factor delle regioni di pixel racchiuse dallo stesso contorno. L’idea di base consiste nell’applicare *ShapeDescriptor1u* alle regioni di pixel appartenenti alle gocce combustibili. Il primo problema nell’applicare questo schema consiste nell’aver immagini esclusivamente in bianco e nero. Le immagini acquisite sono in tonalità di grigio; in particolare (essendo i fotogrammi ad 8 bit) ogni

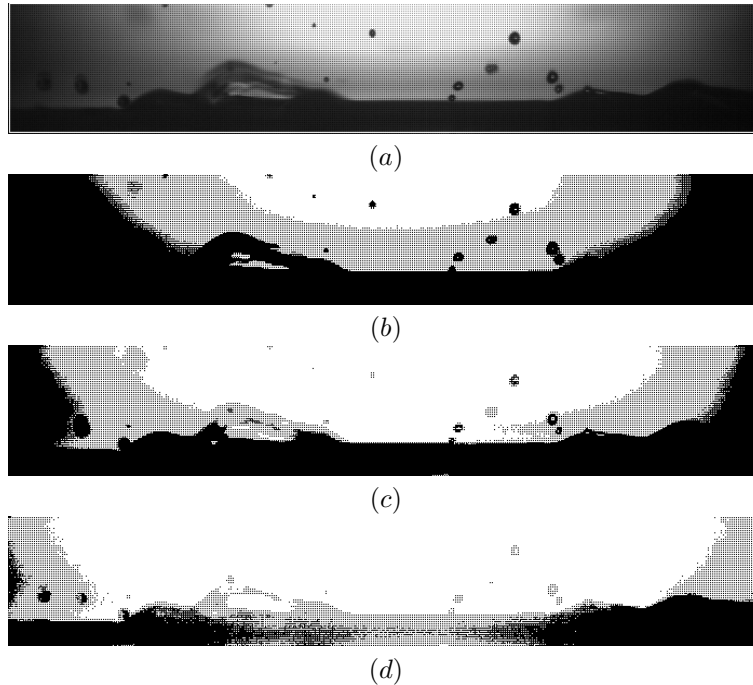


Figura 47: thresholding diretto.

La sequenza mostra gli effetti dei diversi valori di soglia sull'immagine originale (a). In (b) si notano le gocce centrali ma non quelle laterali. In (c) ed in (d) avviene il contrario. Si nota anche come tutti i frame elaborati siano disturbati da "rumore": pixel neri che non appartengono alle gocce nè allo strato liquido. Questi pixel descrivono gli "aloni" luminosi introdotti dalla disuniformità del fascio luminoso.

pixel può assumere 256 intensità di grigio diverse (2^8): al colore bianco è associato il numero 255, al nero il numero 0 ed ai grigi un valore naturale compreso tra questi. Per trasformarle in bianco e nero è necessario impostare, per ogni fotogramma utile, un valore di soglia cioè un numero naturale N compreso tra 0 e 255 grazie al quale è possibile dividere i valori delle tonalità di grigio in due insiemi: i valori uguali o superiori ad N vengono trasformati in neri i rimanenti in bianchi. In questo modo si ottiene un immagine binaria. Le immagini acquisite non consentono di utilizzare il thresholding diretto perché il background di queste non è uniforme. Dalla figura 47(a) si osserva come lo sfondo sia più chiaro al centro e come rapidamente si scurisca alle estremità. Nelle figure 47(b), 47(c), 47(d) sono riportati questi effetti. Per trasformare in modo corretto le immagini è necessario suddividerle in macro regioni in cui lo sfondo non subisca variazione d'intensità eccessive ed applicare per ogni area il valore di soglia corretto. La risoluzione dell'immagine è un secondo problema che ha complicato l'analisi. Le gocce di combustibile più grandi (formate da decine di pixel) presentano un contorno che approssima

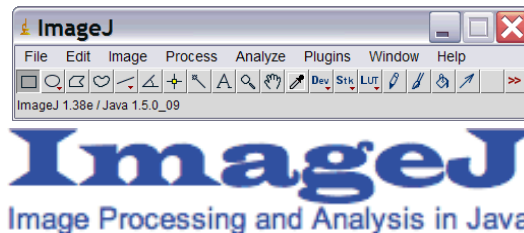


Figura 48: barra dei comandi e logo di ImageJ.

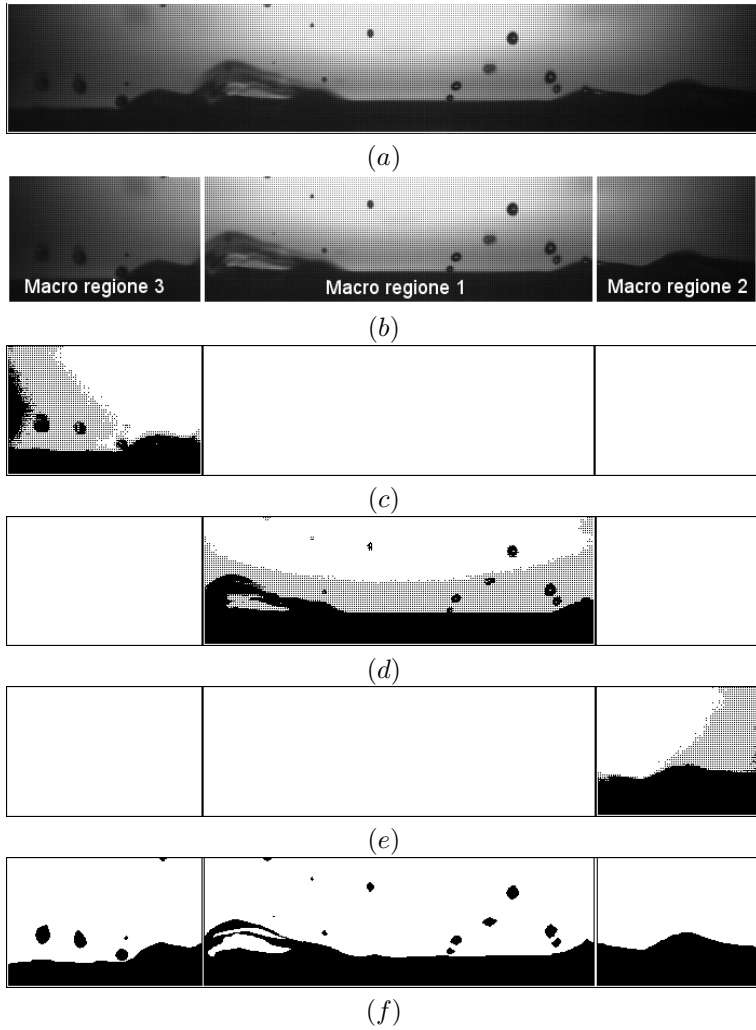


Figura 49: thresholding locale.

E' necessario comunque ritoccare i bordi ed eliminare il rumore manualmente. Il fotogramma (f) rappresenta l'immagine binaria finale.

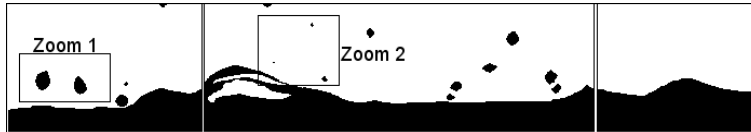


Figura 50: zone ingrandite.

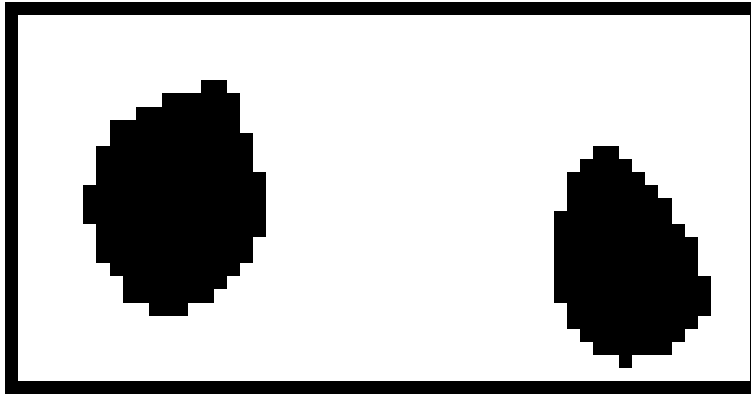


Figura 51: gocce formate da centinaia di Pixel.

bene quello reale; al contrario le gocce piccole (formate da unità di pixel), una volta processate, mostrano dei bordi che non sono assolutamente quelli reali. In alcuni casi le gocce più fini hanno un contrasto insufficiente per poter essere distinte dallo sfondo e le loro informazioni geometriche vengono perse nella fase di pre-processing. La risoluzione al problema consiste nel migliorare l'ingrandimento, in questo modo è possibile mantenere le dimensioni fisiche della finestra di visualizzazione aumentando i pixel che la compongono (si aumentano i dot per inch). Non è stato possibile mettere in pratica questa soluzione dal momento che l'obiettivo a disposizione era già settato in condizioni di zoom massimo. Anche l'aggiunta di ulteriori tubi macro è stata scartata perché l'immagine sarebbe stata troppo scura per qualsiasi tipo di analisi. Da ultimo è stato notato che solo il processo di trasformazione delle immagini richiede eccessivo tempo: le immagini di interesse per ogni prova sono in media 400; ogni frame va diviso almeno in tre macro regioni per impostare i corretti valori di threshold, di conseguenza se si analizzano M filmati il numero di operazioni da effettuare manualmente sono:

$$\text{Operazioni} = 1200 \cdot M$$

in più le immagini che ne risultano hanno sempre del "rumore" residuo costituito da pixel neri (figura 49) che vanno cancellati (prima di usare *ShapeDescriptor1u*) facendo attenzione a non scambiare il rumore per delle gocce fini. Per tutti questi motivi è stato deciso di usare un altro metodo più rapido nell'analisi dei fotogrammi che consiste nel misurare direttamente le gocce strappate dal film liquido senza pre-processare le immagini. Le misure sono state eseguite e memorizzate sempre con *ImageJ* grazie al distance-tool. Il rilevamento diretto dei diametri delle goccioline liquide consente di ridurre i tempi di analisi. Di contro non esiste più una convenzione rigida ed automatica con la quale è distinguibile in modo univoco quali gocce sono a fuoco e quali no. Tale distinzione è labile e lasciata all'operatore che svolge le misure (figura 55).

4.4 Paraffina pura

Sono state condotte dieci riprese riguardanti questo tipo di combustibile tutte eseguite nelle stesse condizioni operative discusse nel paragrafo 1. Le "migliori" tre sono state analizzate; migliori nel senso di luminosità dell'immagine, di quantità di gocce distaccate e di quantità

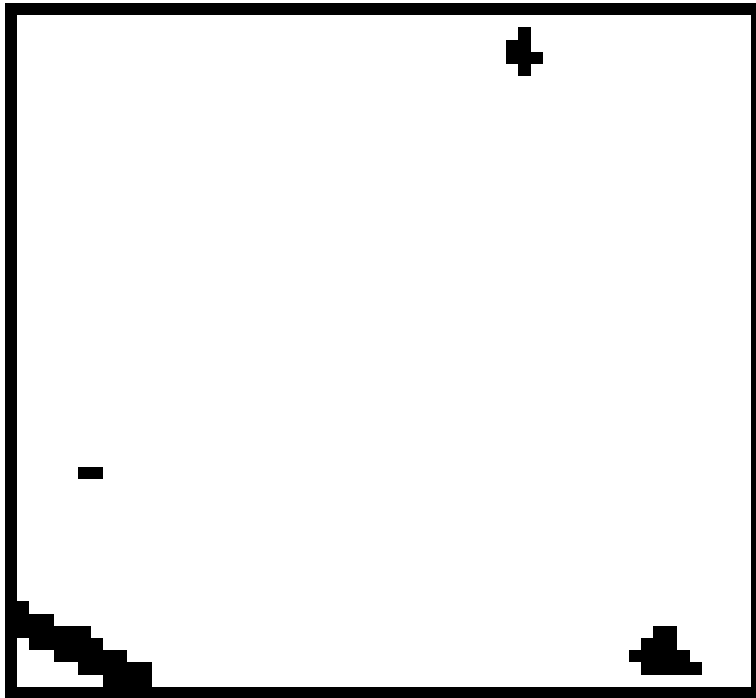


Figura 52: gocce formate da unità di Pixel.
La descrizione dei contorni non è fedele alla realtà.

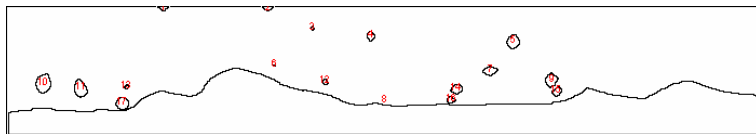


Figura 53: definizione dei contorni con Shapedescriptor1u.

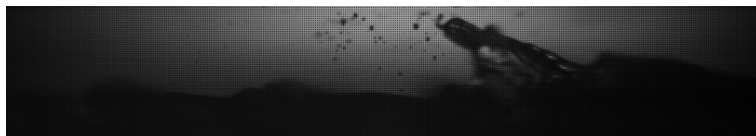


Figura 54: formazione di gocce fini.
L'uso del thresholding locale non è in grado di riprodurre fedelmente le gocce distaccate.

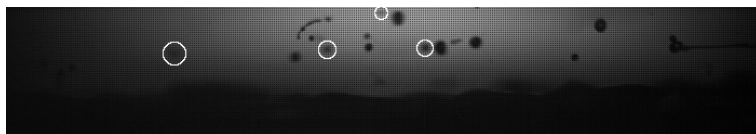


Figura 55: gocce considerate non a fuoco.

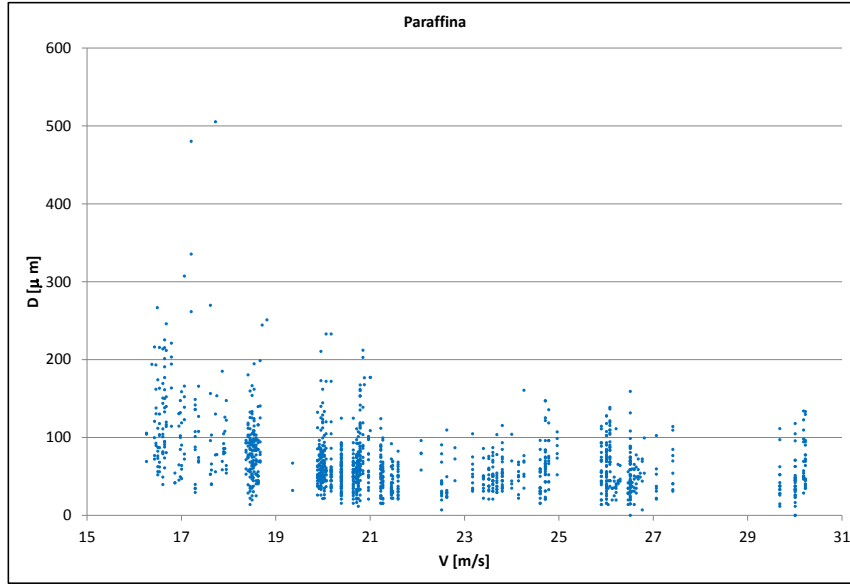


Figura 56: grafico diametro-velocità per paraffina pura.

di gocce sul piano della messa a fuoco. Grazie a questi tre filmati sono stati rilevati 1348 dati (diametri) i quali sono stati correlati con la velocità media del flusso (variabile frame per frame). In questo modo è stato possibile costruire un grafico a dispersione riportato in figura 56. Le stesse misure sono state utilizzate per la realizzazione di un istogramma per la valutazione statistica dei dati a disposizione. In particolare è stato calcolato valore atteso $E(D)$ e lo scarto quadratico medio σ come:

$$E(D) = \sum_{j=1}^m D_j p(D_j)$$

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^m [D_j - E(D)]^2 p(D_j)$$

dove $p(D_j)$ è la frequenza di occorrenza relativa alla variabile aleatoria in esame. Per determinare $p(D_j)$ è stato diviso il dominio di appartenenza della variabile aleatoria continua D in j intervalli. E' stato deciso di dividere il dominio $\{0, +\infty\}$ in questo modo: $\{(0, 10) [10, 20) [20, 30) \dots\}$ (i valori sono in micron). In seguito è stato conteggiando il numero di gocce M_j il cui diametro appartiene ad I_j . Dividendo M_j per il numero totale N dei campioni raccolti si ottiene la frequenza di occorrenza relativa all'intervallo j . Ora ogni intervallo è associato alla propria frequenza di occorrenza. Per l'utilizzo delle formule sopra scritte è necessario che ad ogni $p(D_j)$ sia associato un unico diametro D_j e non un intervallo di valori. Questo accade perché si è trattato D come una variabile aleatoria discreta quando in realtà è continua. Tuttavia per poter conoscere il valore atteso e la dispersione (rispetto alla media) di una variabile casuale continua è necessario sapere a priori la sua curva di probabilità. Per continuare l'analisi è stato deciso di usare il valore baricentrale \bar{D}_j di ogni intervallo. Usando le formule si ha per lo spray di paraffina la seguente caratterizzazione:

$$\bar{D}_{wax} = 68,5 \pm 38,1 \mu m$$

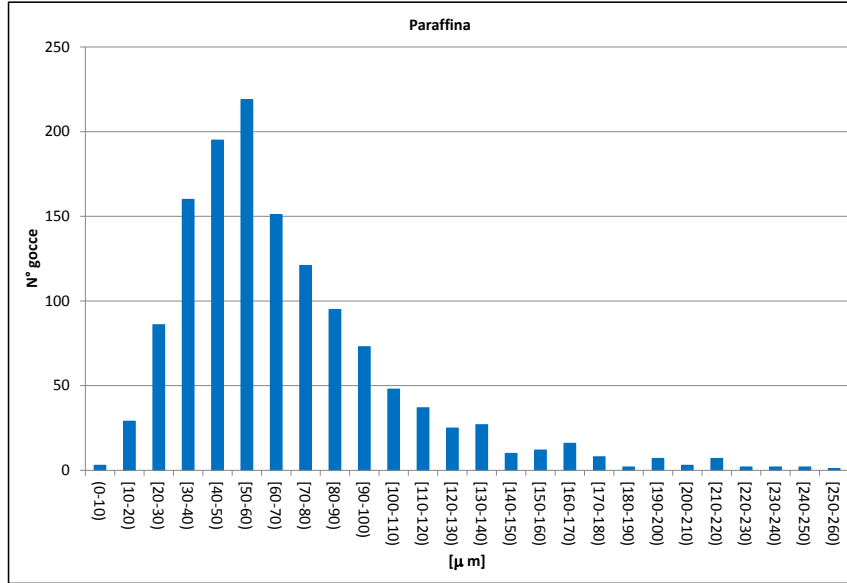


Figura 57: istogramma per paraffina pura.

4.5 Sebs 5 e Sebs 15

Le medesime misure, nelle stesse condizioni operative sono state svolte per altri 2 materiali: paraffina legata con il 5% di polimero Sebs (Stirene-Etilene-Butadiene-Stirene) e paraffina legata con il 15% dello stesso polimero. Per ogni combustibile sono state condotte 10 prove. Le tre migliori sono state analizzate ed hanno fornito per il Sebs5 e Sebs15 rispettivamente 1163 e 591 dati. I risultati sono espressi nelle figure 58, 59, 60, 61, mentre l'analisi statistica ha portato i seguenti risultati:

$$\overline{D}_{Sebs5} = 50,6 \pm 20,3 \mu m$$

$$\overline{D}_{Sebs15} = 40,3 \pm 11,9 \mu m$$

4.6 Confronto

Osservando i tre grafici si può notare che il distacco delle gocce per la paraffina pura e per quella additivata con il 5% di Sebs si verifichi per velocità intorno ai 16 m/s. Per il combustibile contenente il 15% di polimero invece la frantumazione delle onde in gocce inizia a circa 23 m/s. Un'ulteriore differenza che si può osservare è la dispersione maggiore che si ha nel primo grafico. La rottura delle instabilità nel film liquido di paraffina pura genera uno spray di gocce i cui diametri sono in un range di valori più ampi rispetto ai combustibili legati. In particolare per velocità vicine comprese tra 16 e 18 m/s si ha la dispersione massima: la goccia più grande di paraffina ha diametro di circa mezzo millimetro mentre quella più piccola di 20 micron. I combustibili legati invece presentano un comportamento meno disperso in cui quasi tutti i diametri delle gocce sono sotto i 100 micron. Una possibile spiegazione di questo comportamento è da ricercare nei diversi valori di viscosità e tensione superficiale dei vari materiali. Lo strato liquido di paraffina pura ha la possibilità di creare gocce più grandi perché le forze di coesione interne (quantificabili attraverso i parametri di viscosità e tensione superficiale) sono più basse rispetto ai combustibili additivati. Quando il film liquido si instabilizza si creano delle onde (instabilità di Helmholtz) che si deformano sotto l'azione del flusso gassoso. Queste cambiano

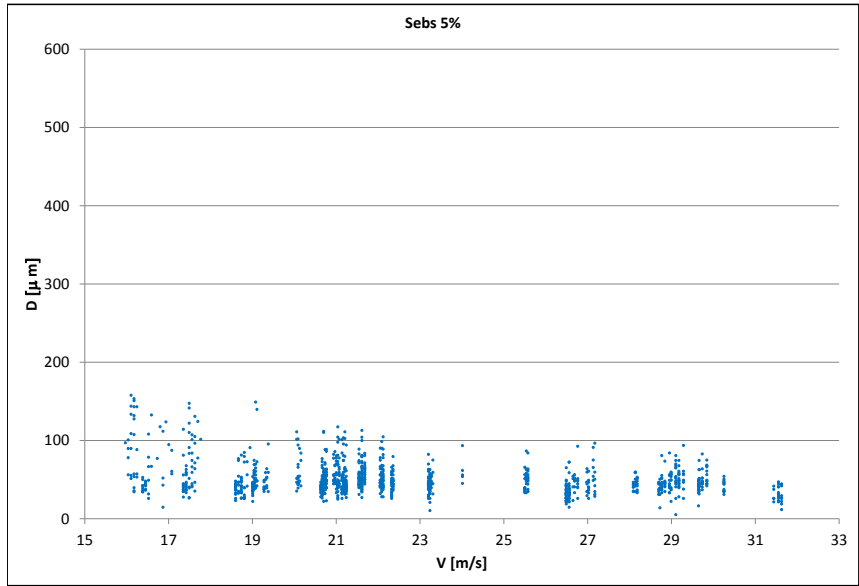


Figura 58: grafico diametro-velocità per il Sebs 5.

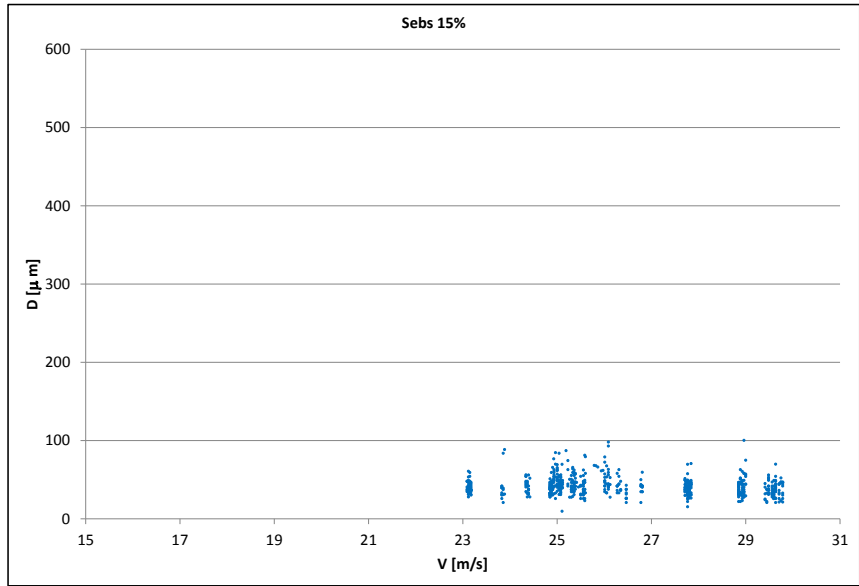


Figura 59: grafico diametro-velocità per il Sebs 15.

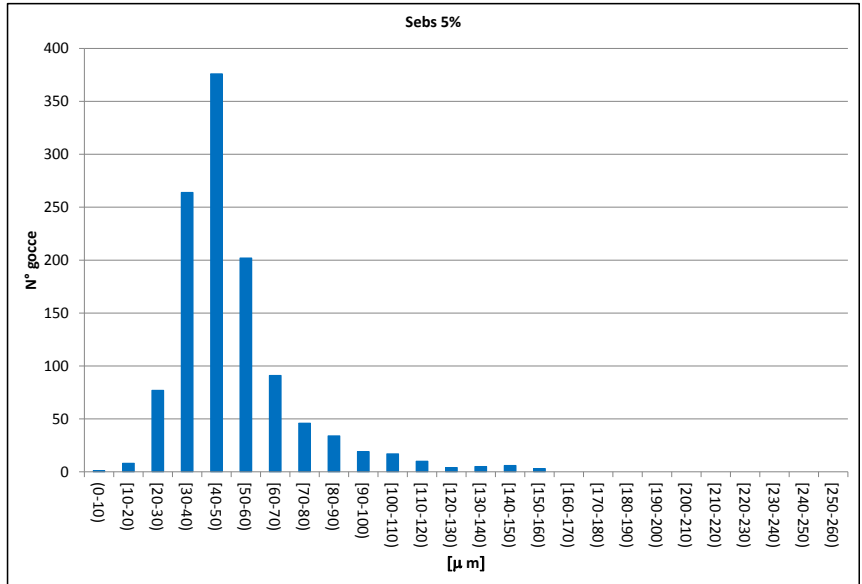


Figura 60: istogramma per il Sebs 5.

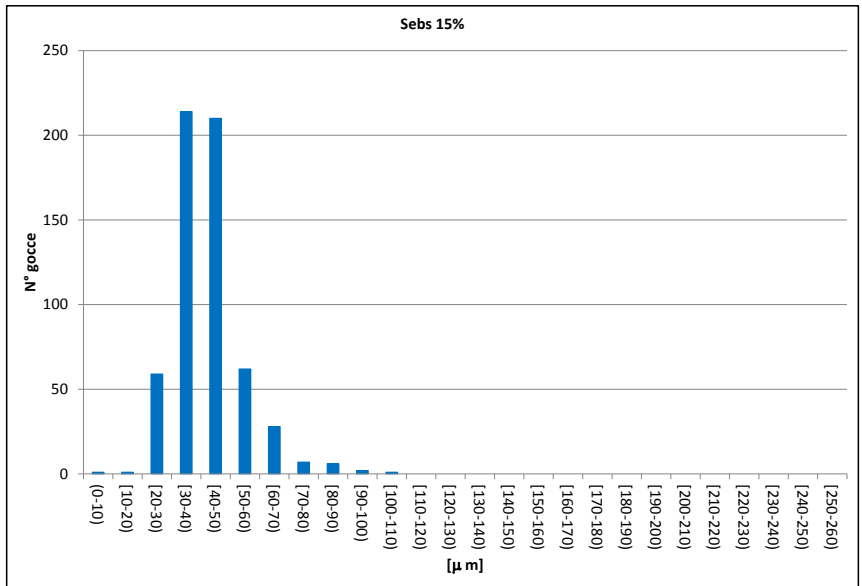


Figura 61: istogramma per il Sebs 15.

forma creando delle strutture che si distaccano dallo strato liquido. Se le forze di coesione interne sono “deboli” le strutture che si distaccano risulteranno tozze mentre se sono “forti” le strutture tenderanno a rimanere ancorate al film liquido, allungandosi nella fase gassosa prima del distacco. E’ molto più probabile che una struttura tozza si disgreghi nel flusso in gocce grandi piuttosto di una struttura a “filamento” che darà origine a gocce più piccole. Per i processi di ossidoriduzione è preferibile che lo spray combustibile sia il più fine possibile. Infatti dati due insiemi di gocce reagenti di uguale massa ma con diverso diametro medio, la potenza termica (cioè il calore rilasciato nell’unità di tempo) risulterà più elevata nello spray con diametro medio più piccolo. Questo avviene perché la superficie esposta alla fiamma è maggiore e di conseguenza anche il combustibile che vaporizza e reagisce è maggiore. Quindi da un punto di vista strettamente geometrico lo spray migliore da usare in combustione, nelle condizioni esaminate, risulterebbe il Sebs15. Un altro fattore da tenere in conto è la quantità di massa distaccata dallo strato liquido, quantificabile attraverso il numero di strutture trasportate nel gas e dalla facilità (inteso come intervallo di tempo richiesto) con cui queste si rompono in gocce. Per ciascuno dei tre grafici è stata calcolata una retta di regressione utile per avere un andamento di massima dei diametri in funzione della velocità. Il grafico mostra come le dimensioni delle gocce diminuiscano, per tutte e tre le formulazioni, all’aumentare della velocità del flusso ossidante. Questo è un comportamento da attendersi perché gli sforzi aerodinamici agenti alle interfacce liquido-gas dipendono dalla velocità e più questa è elevata più le forze aerodinamiche sono intense e di conseguenza anche il loro effetto disgregante. Di seguito sono riportate le equazioni delle rette:

$$D_{wax} = -3,86 \cdot \bar{V}_{O_2} + 154,59$$

$$D_{Sebs5} = -1,41 \cdot \bar{V}_{O_2} + 82,94$$

$$D_{Sebs15} = -1,08 \cdot \bar{V}_{O_2} + 65,77$$

Si propongono tre distribuzioni di probabilità continue basate sui valori di media e varianza calcolati in precedenza. La funzione utilizzata per la paraffina pura è la curva gamma [11] (il dominio di appartenenza di questa distribuzione va da 0 ad infinito, quindi rispondente ai valori dei diametri che è possibile misurare, in più approssima bene i valori discreti calcolati a partire dall’istogramma della paraffina) che ha la seguente forma:

$$f(D) = D^{k-1} e^{-\frac{x}{\vartheta}} \vartheta^{-k} \frac{1}{\Gamma(k)}$$

dove D è il diametro, k e ϑ i parametri con i quali si definiscono media e varianza e $\Gamma(k)$ la funzione “gamma”. Valore atteso e varianza in questa distribuzione sono calcolabili come:

$$E(D) = k\vartheta$$

$$\sigma^2 = k\vartheta^2$$

avendo già calcolato questi valori è stato possibile trovare $k \approx 3,23$ e $\vartheta \approx 21,19$. La funzione gamma invece ha espressione :

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$$

ed è stato valutato numericamente $\Gamma(k) \approx 2,5$. In figura 64 viene esposto il confronto tra la funzione distribuzione continua ed i valori discreti di probabilità normalizzati con la lunghezza degli intervalli del relativo istogramma. Per il Sebs 15 invece si è osservato che la distribuzione gamma non descrive bene l’andamento delle probabilità discrete mentre quella normale è molto

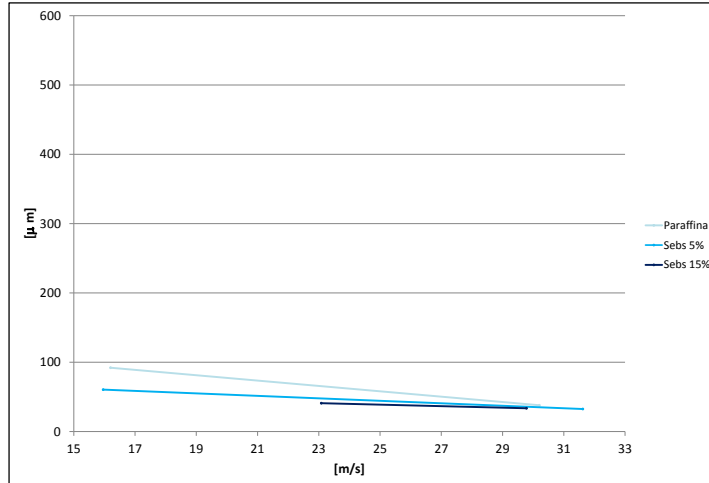


Figura 62: rette di regressione per i combustibili analizzati.

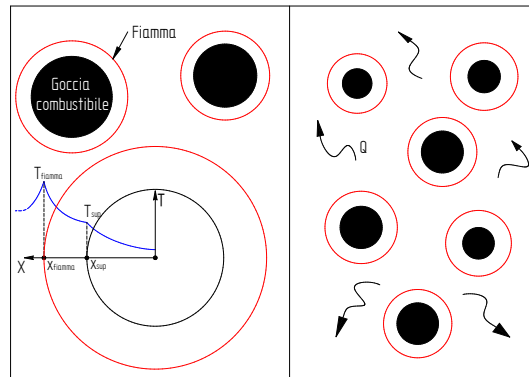


Figura 63: combustione ideale di due spray.

Le caratteristiche geometriche degli spray sono fondamentali nei processi di combustione. Dalla figura si nota come a parità di area la superficie esposta alla fiamma sia maggiore nello spray fine quindi anche la massa che evapora e reagisce è più alta.

più fedele a questi dati (una distribuzione normale ammette che i diametri possano avere valori negativi e nulli, tuttavia la funzione probabilità così costruita ha valori talmente bassi sull'asse negativo da poter essere trascurati). In figura 65 è riportato il confronto. Infine per il combustibile Sebs 5 né la distribuzione normale né quella gamma descrivono bene l'andamento della probabilità discreta. E' stata approssimata la distribuzione con una spline passante per i valori discreti. (Bisogna notare che non è una distribuzione ma un tentativo di approssimazione). Le due funzioni e la spline sono state riportate in unico grafico per un confronto visivo (figura 66).

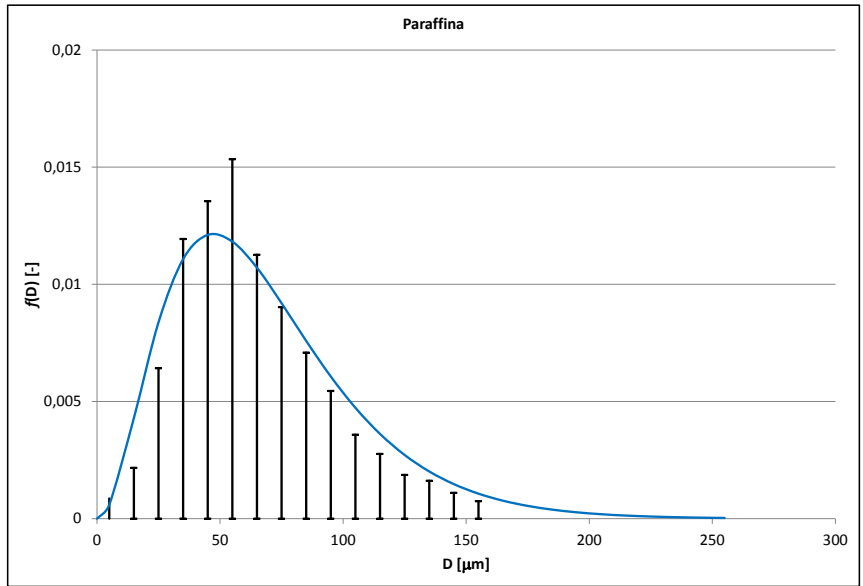


Figura 64: distribuzione continua e valori discreti per paraffina.

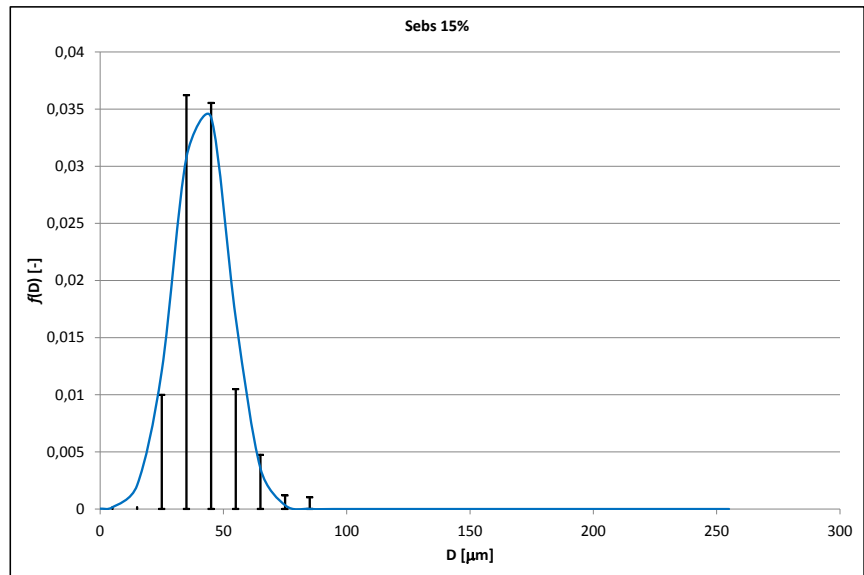


Figura 65: distribuzione continua e valori discreti per sebs15.

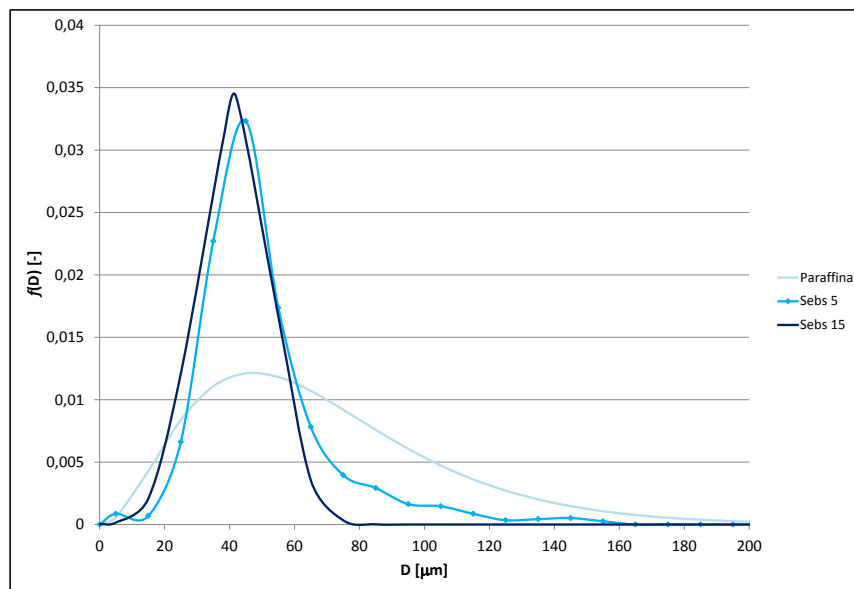


Figura 66: Confronto tra distribuzioni.



Figura 67: schematizzazione ideale per la formazione di una struttura tozza.



Figura 68: dinamica reale per una struttura tozza.
Il diametro della goccia che si forma è di circa $300 \mu\text{m}$. Lo strato liquido è paraffina pura. La velocità media del flusso è di 18m/s .

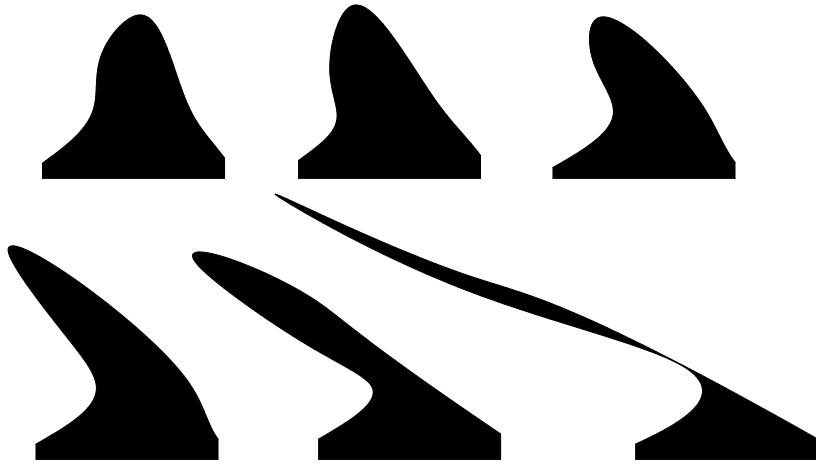


Figura 69: schematizzazione di una struttura allungata.

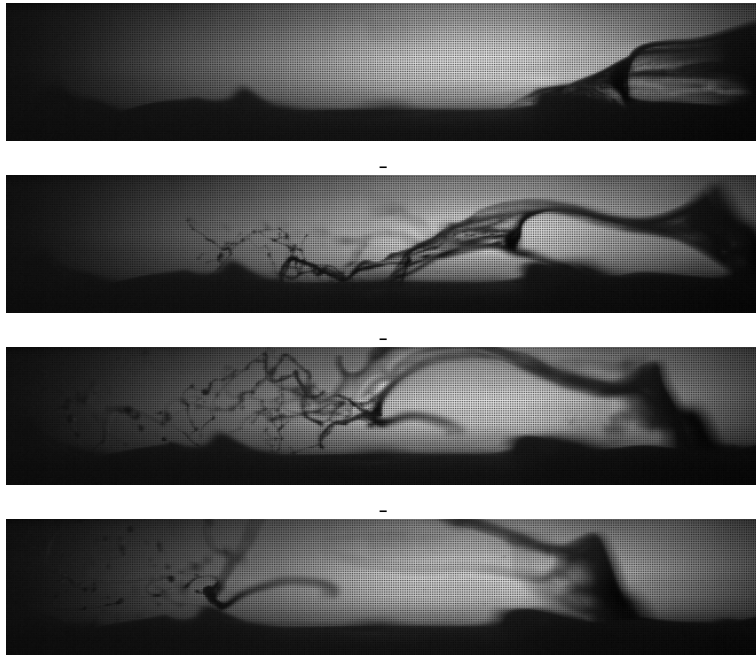


Figura 70: dinamica reale per una struttura allungata.
Le gocce che si formano hanno diametri dell'ordine dei $40 \mu\text{m}$. Lo strato liquido è paraffina legata con il 15% di Sebs. La velocità media del flusso è di 24 m/s .

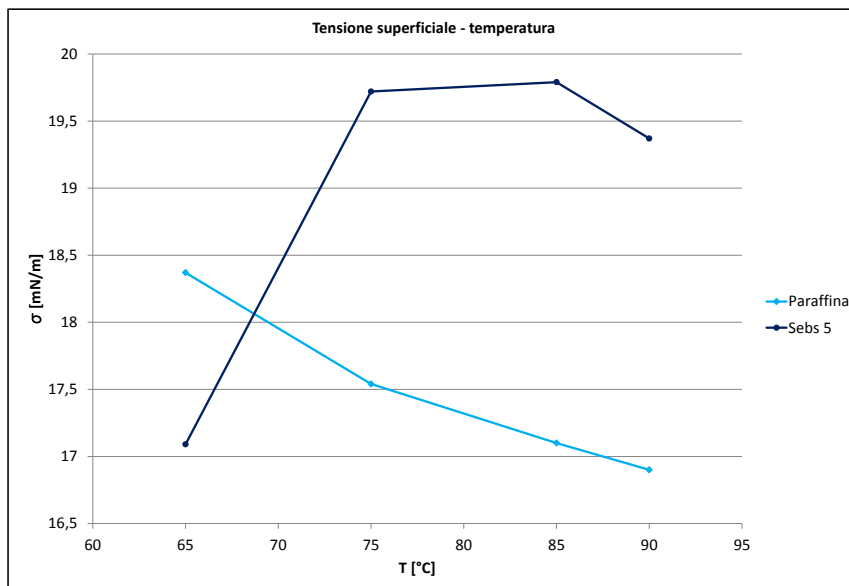


Figura 71: grafico tensione superficiale-temperatura [18].

Temperatura: T [°C]	T.sup paraffina: σ_{wax} [mN/m]	T.sup Sebs 5: σ_{Sebs5} [mN/m]
65	18,37	17,09
75	17,54	19,72
85	17,1	19,79
90	16,9	19,37

Tabella 1: dati riferiti al grafico in figura 69 [18].

4.7 Tensione superficiale e viscosità

Oltre agli sforzi aerodinamici indotti del flusso gassoso allo strato liquido molte altre forze entrano in gioco nel meccanismo di trascinamento. Da un punto di vista estremamente semplificato una sola instabilità può essere comparata ad un sistema meccanico massa-molla-smorzatore forzato. In entrambi i casi è possibile ravvisare delle analogie: nel sistema semplificato la massa in esame è eccitata da forzanti esterne e limitata dalle forze interne di richiamo della molla e dello smorzatore. La singola onda è perturbata dalle forze esterne aerodinamiche a cui si oppongono le tensioni superficiali e gli sforzi viscosi (rispettivamente la molla e lo smorzatore del modello semplice). Queste ultime due influenzano pesantemente la forma delle instabilità e delle strutture trascinate dal flusso. Come già fatto notare nel paragrafo precedente un combustibile con viscosità alta tenderà a ad avere oscillazioni ondose smorzate e quindi più difficilmente frantumabili rispetto ad uno con viscosità più bassa (a parità di condizioni instabilizzanti). La formazione dello spray di Sebs 15 a più alte velocità del flusso, rispetto agli altri due materiali testati, è una prova di quanto appena scritto. La caratterizzazione delle proprietà di viscosità e di tensione superficiale è un altro obiettivo su cui si sta focalizzando la ricerca propulsiva ibrida. Vengono riportati nelle figure 71 e 72 i risultati [18] (ottenuti presso il laboratorio di caratterizzazione termo-meccanica del Politecnico di Milano) di tensione superficiale e viscosità di alcuni materiali usati in questa tesi. Mancano i dati relativi alla tensione superficiale del Sebs 15 e della viscosità della paraffina pura e del Sebs 15 per i limiti tecnologici imposti dagli impianti usati. I grafici mostrano come la temperatura sia un'altra variabile da dover tenere in considerazione. Le prove di visualizzazione sullo strato liquido di paraffina e Sebs 5 sono state condotte tutte a circa 70 gradi; dalla figura 71 si nota come i diversi valori di tensione superfi-

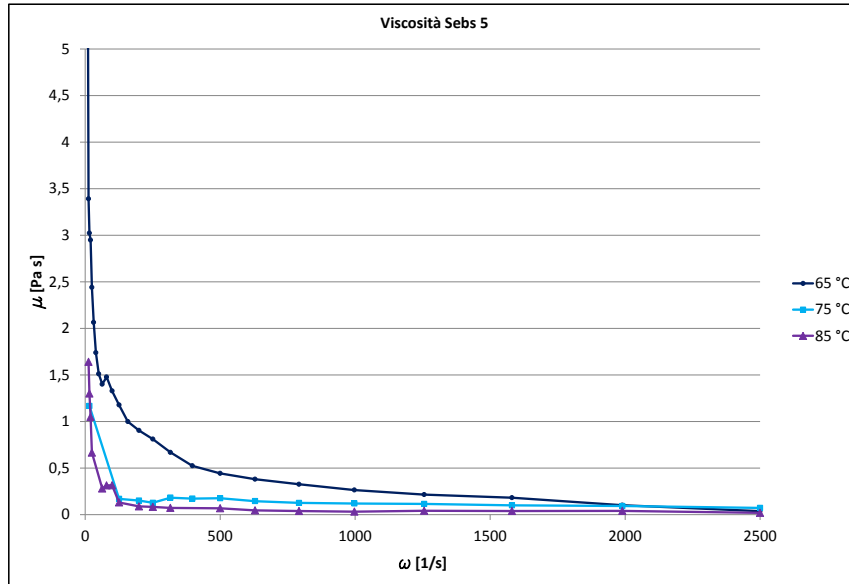


Figura 72: grafico viscosità-velocità di rotazione.

ciale (anche se molto simili) siano uno dei fattori che influenzano le caratteristiche geometriche dei due spray esposte nel precedente paragrafo.

Paraffina	Prova 1	Prova 2	Prova 3
N gocce [-]	523	621	537
\bar{S}_{wax} [mm^2]	30,83	36,61	31,66
\bar{V}_{wax} [mm^3]	0,704	0,836	0,723

Tabella 2: flusso di goccioline per paraffina pura.

Sebs 5	Prova 1	Prova 2	Prova 3
N gocce [-]	516	483	393
\bar{S}_{Sebs5} [mm^2]	16,60	15,54	12,64
\bar{V}_{Sebs5} [mm^3]	0,280	0,262	0,213

Tabella 3: flusso di goccioline per Sebs5.

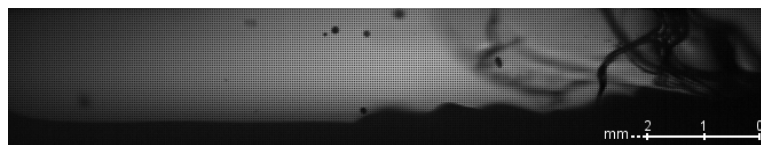
4.8 Flusso di gocce

Per quantificare il numero di gocce che si distaccano dallo strato limite è stato pensato di posizionare una sezione ideale alla fine della finestra di visualizzazione, cioè a 700 Pixel 14,5 mm, e di conteggiare le particelle liquide che attraversano tale area. Per poter fare un confronto tra vari combustibili è stato deciso di partire nel conteggio quando la prima o le prime gocce attraversano la sezione e di continuare il conto prendendo in considerazione i 300 frame successivi, ovvero un intervallo di tempo di un decimo di secondo da quando avviene il primo attraversamento (frame rate 3000 Hz). Sono stati presi in esame tre filmati per ogni combustibile. In questo caso tutte le gocce che attraversano la sezione sono state contate, anche quelle non a fuoco perché in questo tipo di rilevazione la geometria non è importante. Le gocce che non vengono considerate sono tutte quelle che non passano per la sezione ideale cioè le gocce che si distaccano dopo questa, quelle che escono dal lato superiore della finestra di ripresa o che impattano sullo strato liquido prima dell'attraversamento. Il risultato del conteggio è riportato nelle tabelle seguenti. Si nota come il numero di gocce trasportate dalla fase gassosa sia più alto per la paraffina e sebs 5 se confrontato con il sebs 15. Il flusso di goccioline è un indice che mostra come lo strato limite dei materiali meno viscosi sia più facilmente instabilizzabile e quindi migliore da usare nei processi di combustione dato che la massa trascinata per entrainment e la superficie esposta è maggiore. Bisogna osservare che quest'ultimo parametro è stato determinato considerando tutte le gocce perfettamente sferiche ed utilizzando il diametro medio che caratterizza ciascuno spray. I valori di viscosità e tensione superficiale influiscono anche sul tempo di formazione dello spray. Nelle sequenze di immagini (da 73 a 80) sono riportate, per ogni combustibile, i frame relativi al distacco ed alla frantumazione di alcune strutture. La differenza non è marcata per la paraffina ed il sebs 5 mentre è evidente se si confrontano questi due materiali con il sebs 15. Infatti, per i primi due combustibili, il processo di deformazione delle onde, il distacco delle creste e la formazione delle gocce avviene in 5-6 frame cioè in circa 2 millesimi di secondo. Per la paraffina caricata con il 15% di polimero, invece si nota un comportamento diverso: il distacco delle instabilità genera filamenti resistenti alle azioni aerodinamiche; non è stato possibile determinare un tempo di disgregazione perché questi filamenti escono dalla finestra di ripresa prima della loro rottura completa.

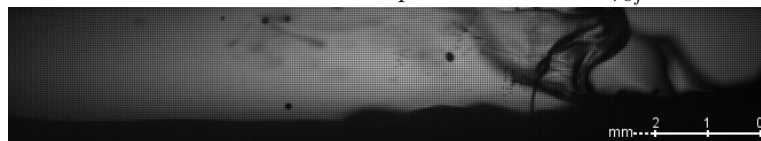
Sebs 15	Prova 1	Prova 2	Prova 3
N gocce [-]	198	162	175
\bar{S}_{Sebs15} [mm^2]	4,04	3,30	3,57
\bar{V}_{Sebs15} [mm^3]	0,054	0,044	0,047

Tabella 4: flusso di goccioline per Sebs 15.

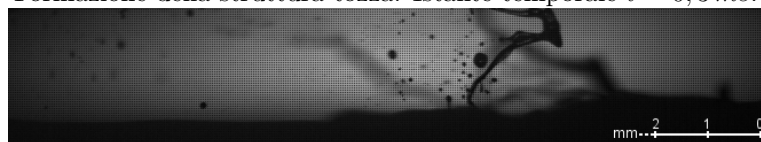
Sequenza 1. Strato liquido perturbato: paraffina pura.



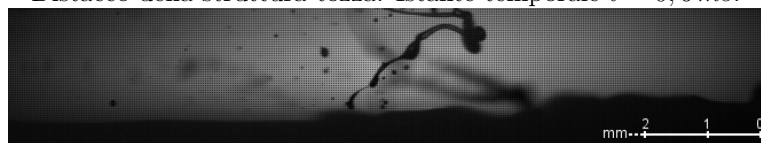
Deformazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



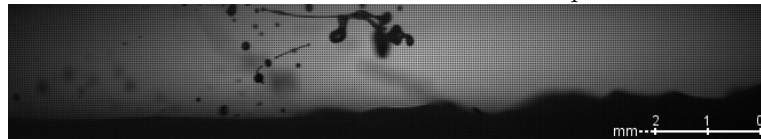
Formazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



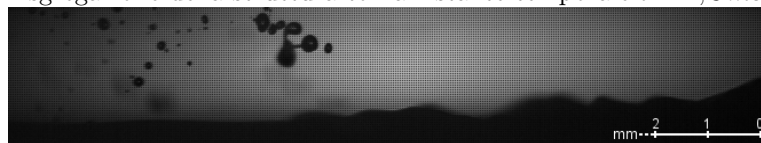
Distacco della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



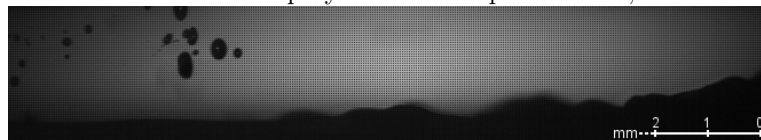
Deformazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



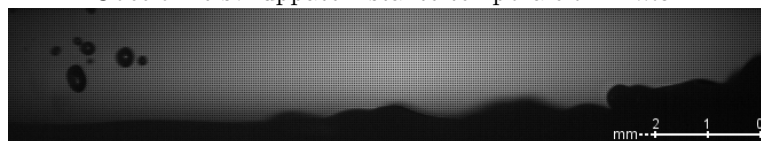
Disgregazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



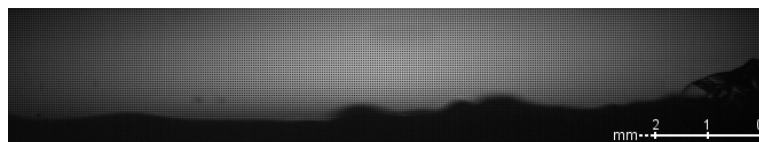
Goccioline sviluppate. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



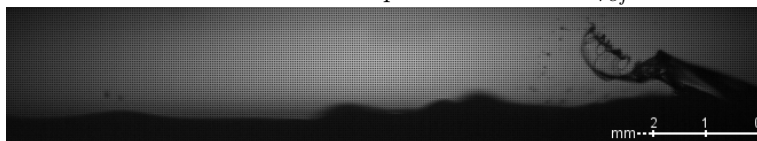
Trascinamento delle goccioline a valle. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$

Figura 73: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 1.

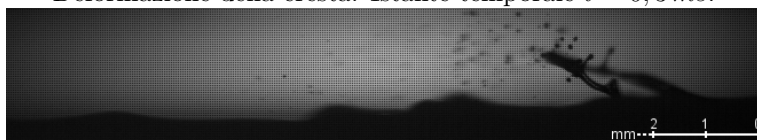
Sequenza 2. Strato liquido perturbato: paraffina pura.



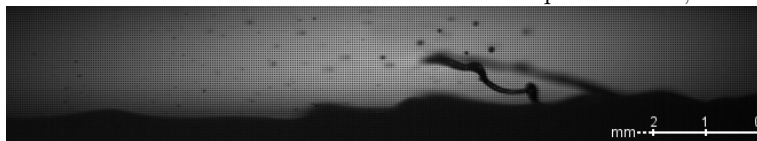
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



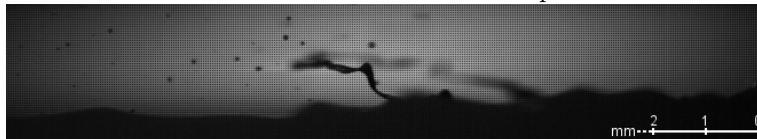
Deformazione della cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



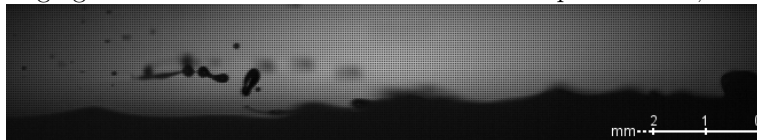
Formazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



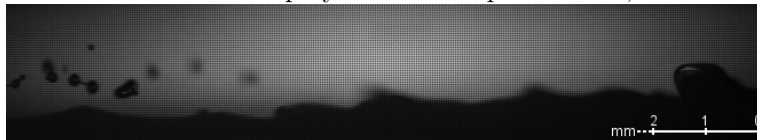
Distacco della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



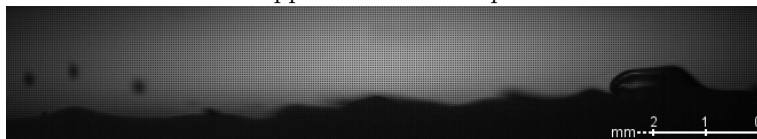
Disgregazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



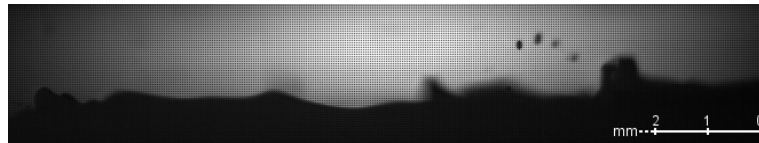
Goccioline sviluppate. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



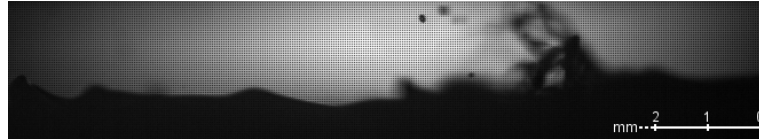
Goccioline trasportate a valle. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$.

Figura 74: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 2.

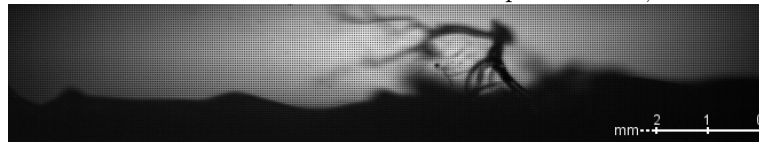
Sequenza 3. Strato liquido perturbato: paraffina pura.



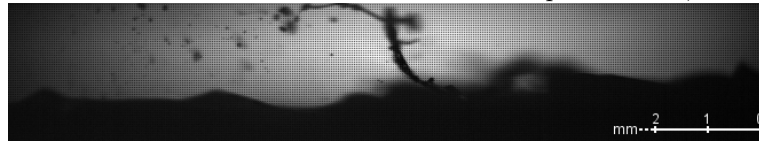
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



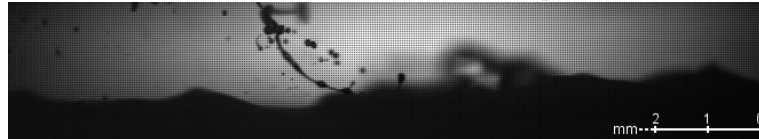
Deformazione della cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



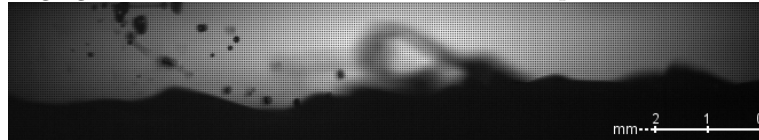
Formazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



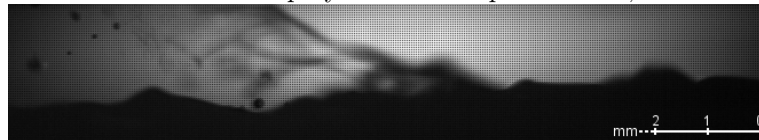
Distacco della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



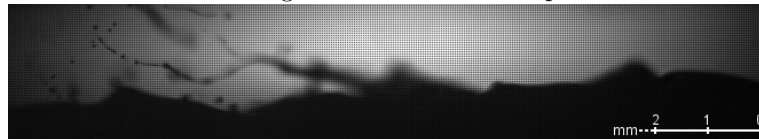
Disgregazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



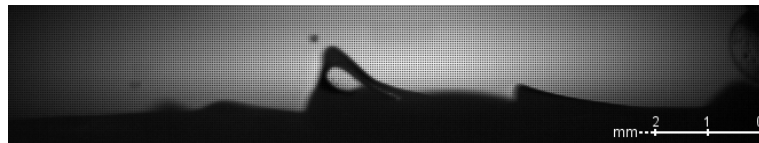
Trascinamento delle goccioline. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



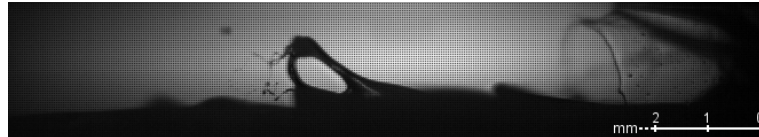
Formazione di una struttura fuori dal piano di messa a fuoco.

Figura 75: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 3.

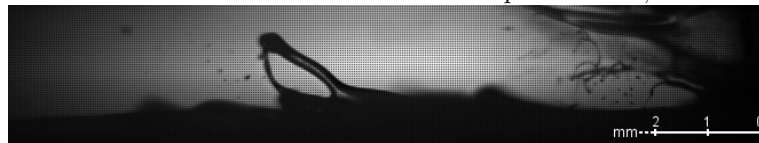
Sequenza 4. Film perturbato: paraffina 95% + Sebs 5%.



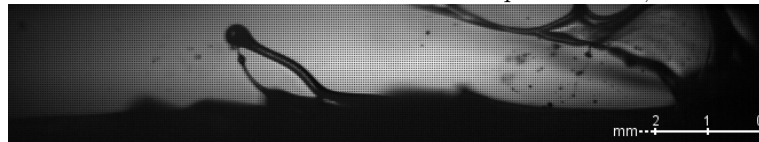
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



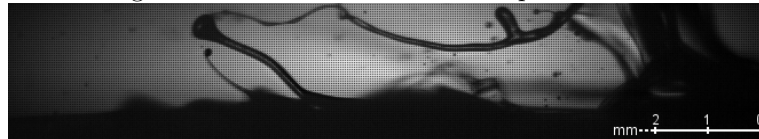
Deformazione delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



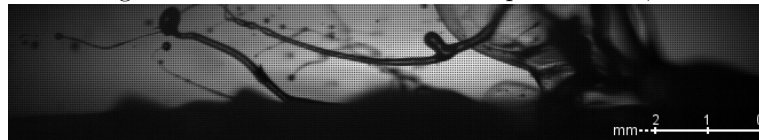
Deformazione delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



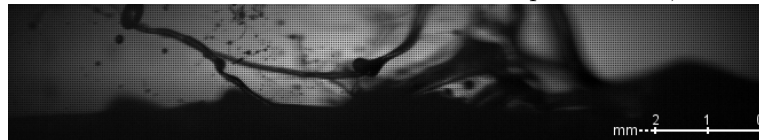
Allungamento delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



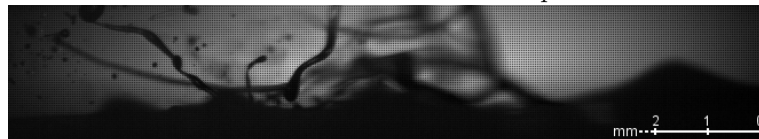
Allungamento delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Primo distacco delle strutture. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



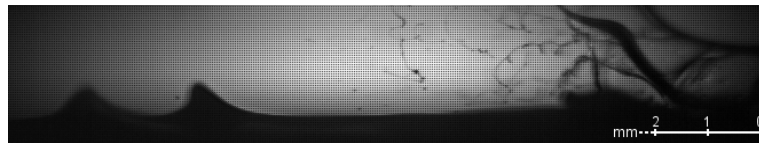
Trascinamento delle strutture. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



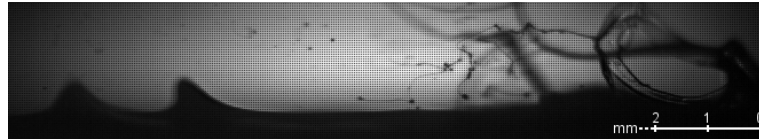
Incompleta formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$

Figura 76: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 4.

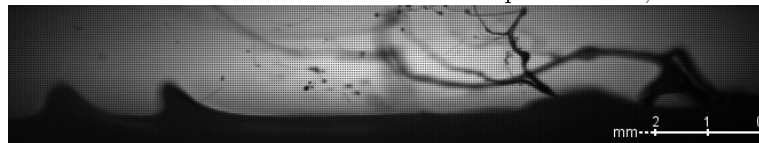
Sequenza 5. Film perturbato: paraffina 95% + Sebs 5%.



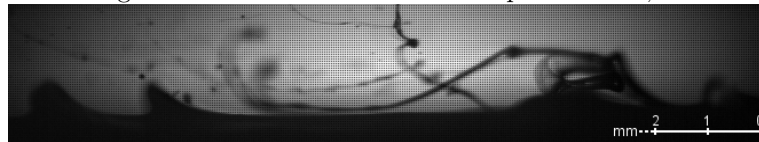
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



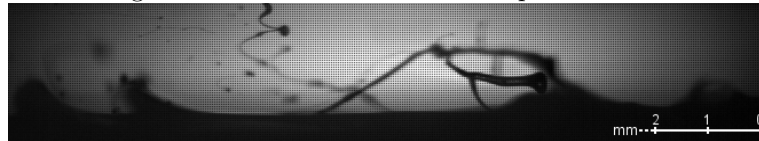
Deformazione delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



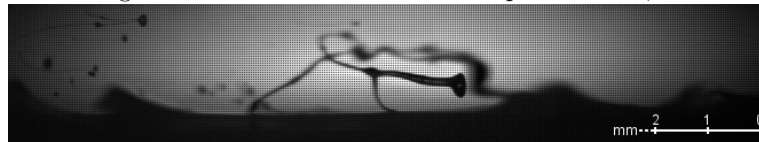
Allungamento delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



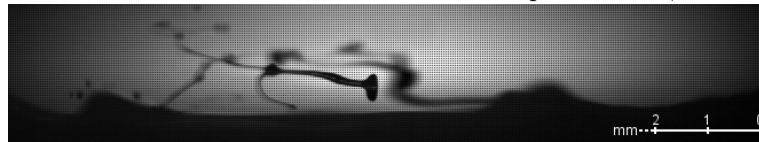
Allungamento delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



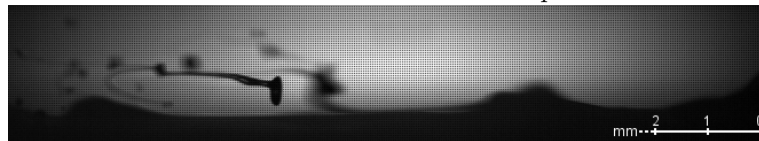
Allungamento delle creste. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Primo distacco delle strutture. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



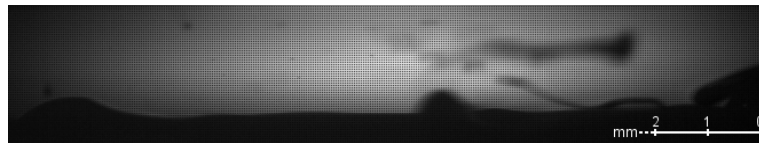
Trascinamento delle strutture. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



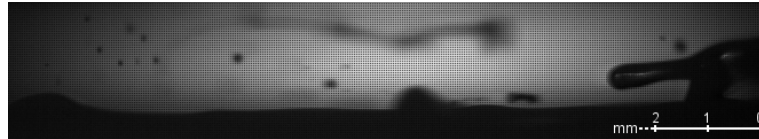
Incompleta formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$

Figura 77: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 5.

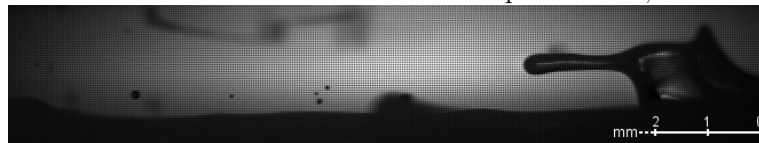
Sequenza 6. Film perturbato: paraffina 95% + Sebs 5%.



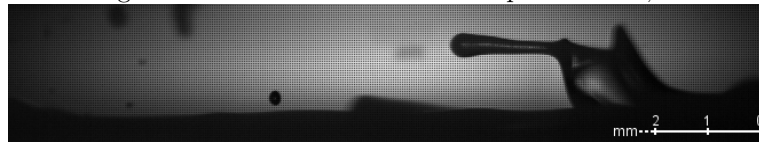
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



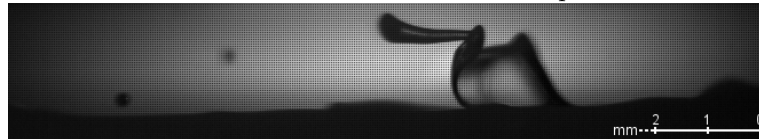
Deformazione della cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



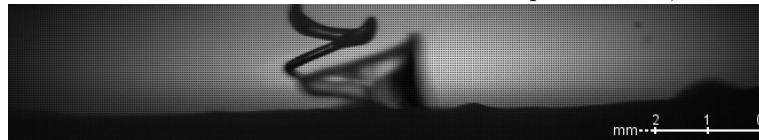
Allungamento delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



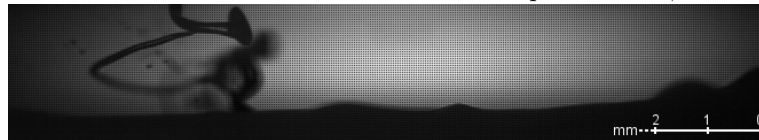
Formazione della struttura tozza. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



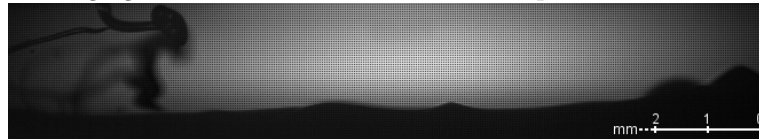
Trascinamento della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Primo distacco delle strutture. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



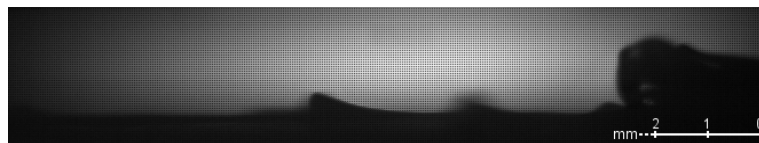
Disgregazione della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



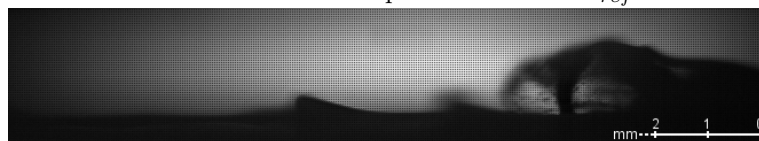
Incompleta formazione dello spray. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$

Figura 78: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 6.

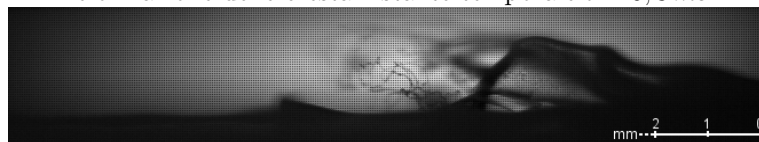
Sequenza 7. Film perturbato: paraffina 85% + Sebs 15%.



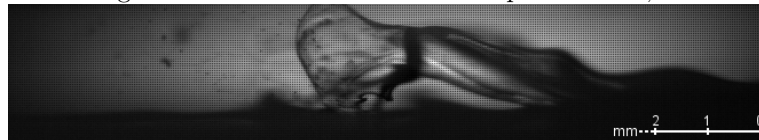
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



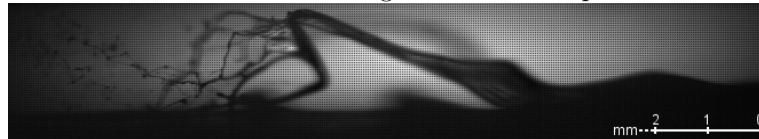
Deformazione delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



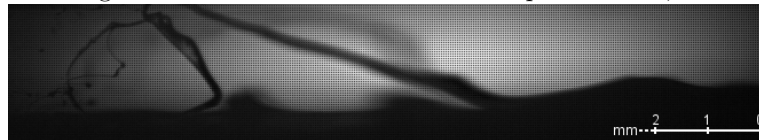
Allungamento delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



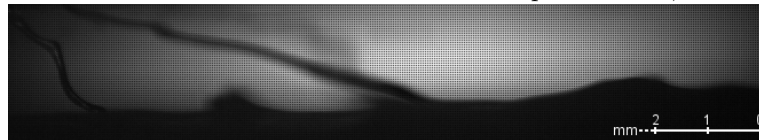
Formazione della struttura allungata. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



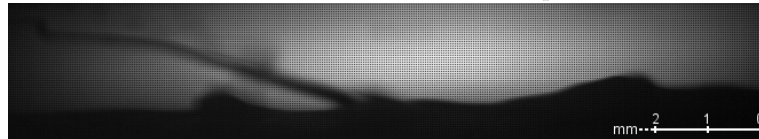
Allungamento della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Primo distacco della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



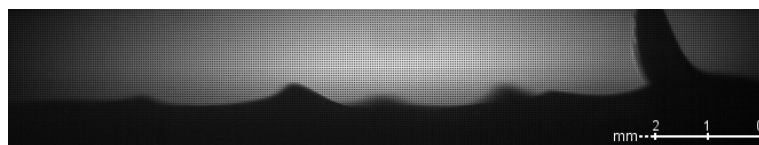
Trascinamento della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



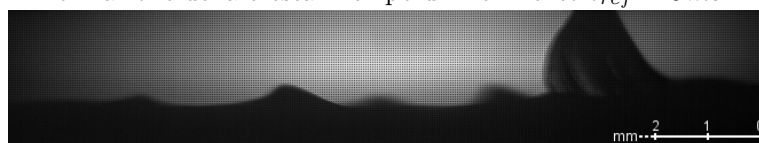
Persistenza del filamento. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$

Figura 79: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 7.

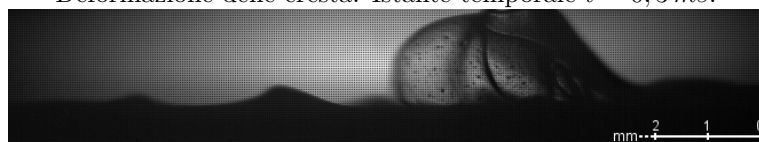
Sequenza 8. Film perturbato: paraffina 85% + Sebs 15%.



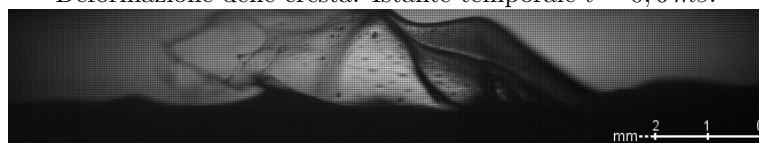
Formazione della cresta. Tempo di riferimento $\tilde{t}_{ref} = 0 \text{ ms}$.



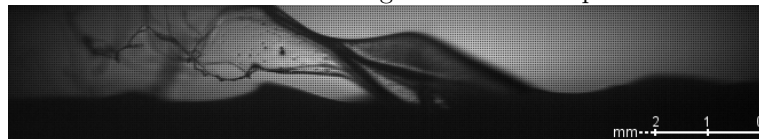
Deformazione delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,3 \text{ ms}$.



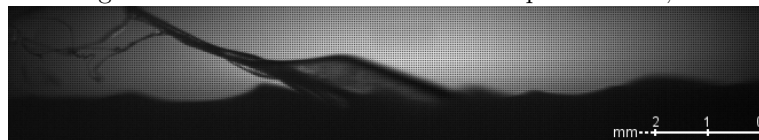
Deformazione delle cresta. Istante temporale $\tilde{t} = 0,6 \text{ ms}$.



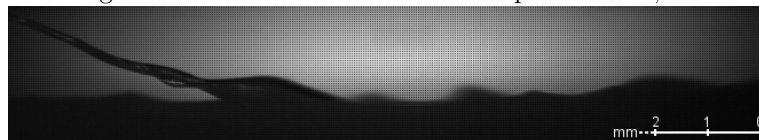
Formazione della struttura allungata. Istante temporale $\tilde{t} = 1 \text{ ms}$.



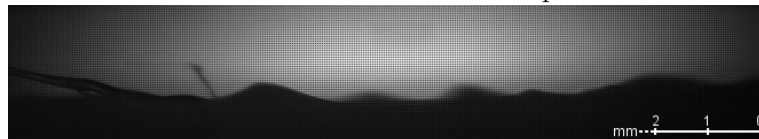
Allungamento della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 1,3 \text{ ms}$.



Elongazione della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 1,6 \text{ ms}$.



Trascinamento della struttura. Istante temporale $\tilde{t} = 2 \text{ ms}$.



Persistenza del filamento. Istante temporale $\tilde{t} = 2,3 \text{ ms}$.

Figura 80: meccanismo di generazione dello spray combustibile. Esempio 8.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

5.1 Conclusioni

L'intero lavoro descritto in questa tesi è stato svolto per poter visualizzare il fenomeno dell'entrainment utilizzando una Fast-Camera. Prima di raggiungere questo obiettivo è stato necessario progettare un impianto sperimentale dedicato, costruirlo e metterlo a punto. Completata questa fase è stato possibile indagare il comportamento dello strato liquido di tre diversi combustibili sottoposti all'azione instabilizzante di un flusso gassoso. I tre materiali indagati sono stati paraffina pura e paraffina rinforzata rispettivamente con il 5% ed il 15% di polimero Sebs. Il film liquido è stato instabilizzato accelerando ossigeno gassoso. L'attività di analisi delle immagini si è focalizzata sul principio di formazione dello spray combustibile dei tre materiali indagati. E' stato messo in evidenza come per tutte e tre le sostanze le gocce si formano a partire dalle instabilità di Helmholtz. Queste sono onde formate dalle forze trasmesse all'interfaccia liquido-gas generate dal flusso gassoso. Gli sforzi aerodinamici hanno l'effetto di trascinare a valle le onde liquide e di deformarle. La modifica di forma delle instabilità produce delle "strutture" che possono essere strappate dal flusso di ossigeno e disgregate in un insieme di goccioline. La geometria di queste "strutture" è influenzata dalle forze di coesione interne del combustibile liquido cioè dai suoi valori di tensione superficiale e viscosità. A loro volta le "strutture" distaccate influenzano le caratteristiche dello spray che si forma da esse. In particolare è stato notato come nei materiali più viscosi (Sebs15) le basi delle instabilità tendano a rimanere ancorate allo strato liquido mentre le creste si deformano in filamenti ("strutture allungate") nel flusso gassoso. Al contrario per combustibili meno viscosi (paraffina pura e Sebs5) la rottura delle creste porta a delle "strutture tozze". In generale, da "configurazioni tozze" è possibile che si creino goccioline più grandi rispetto a quelle originate da "conformazioni allungate". La dimensione delle gocce dipende dalla dinamica di frantumazione di queste strutture, in particolare dall'intensità delle forze aerodinamiche le quali sono funzione della velocità del flusso di ossigeno. Le prove condotte sulla paraffina pura hanno evidenziato come bassi sforzi aerodinamici (cioè bassi flussi gassosi) consentano la formazione di gocce con diametri più grandi rispetto a regimi più intensi del flusso gassoso. Per il Sebs 5 è stato riscontrato lo stesso comportamento ma con una dispersione minore sui valori dei diametri. Infine per il Sebs 15 il fenomeno del distacco e rottura avviene per valori del flusso ossidante maggiore rispetto agli altri due elementi. In conclusione le "strutture" che si distaccano da combustibili poco viscosi (paraffina) risultano essere tozzi, questi a seconda delle forze agenti possono disgregarsi in spray fini (forze elevate) o in spray grossolani (forze basse). Per combustibili viscosi (Sebs 15) si formano filamenti che si disgregano in gocce piccole. E' stata svolta un'analisi statistica che conferma i concetti espressi in precedenza. Da un punto di vista strettamente geometrico il combustibile migliore sembra essere il Sebs 15 dal momento che le gocce hanno diametro medio minore rispetto a quelli degli altri materiali investigati. In realtà non conta solo il diametro degli spray ma anche il numero di gocce distaccate ed il tempo con cui queste si formano. Considerando anche questi parametri è stato notato che il materiale più indicato per i processi di combustione è la paraffina pura perché l'instabilizzazione del suo strato liquido forma un numero di gocce più elevato (anche se con diametro più grande) il che si traduce in una maggiore massa trasportata per entrainment.

5.2 Sviluppi futuri

In questo paragrafo sono descritti eventuali sviluppi futuri. Il primo obiettivo a cui si deve pensare è il miglioramento delle immagini: come prima cosa si consiglia di usare camere digitali più performanti, che permettano le seguenti modifiche: ampliare la finestra di ripresa, avere un campo di messa a fuoco più ampio, incrementare il frame-rate (disponendo di una memoria interna della camera più capiente). Come secondo sviluppo si ritiene opportuno cambiare l'impianto di illuminazione: intensità luminose più elevate di quelle a disposizione comporterebbero immagini con contrasti accentuati; luci stroboscopiche o da teatro possono essere provate per verificare questi aspetti. L'impiego di "macro-obiettivi" è un altro aspetto che dovrebbe portare benefici in termini di risoluzione dei fotogrammi consentendo di avere contorni (liquido-gas) più

definiti anche per gocce piccole. La scrittura di un algoritmo in grado di analizzare le immagini in modo automatico permetterebbe di elaborare un numero di filmati enormemente più grande, in confronto all'analisi manuale, in un tempo molto più breve e garantirebbe una mole di dati sicuramente superiore. Come traguardo a lungo termine è lecito pensare di modificare l'intero banco prova per effettuare riprese dell'entrainment in presenza di combustione.

Riferimenti bibliografici

- [1] L.T. De Luca. Problemi energetici in propulsione aerospaziale. Politecnico di Milano, 2007.
- [2] M.A. Karabeyoglu, D. Altman, B.J. Cantwell. Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part1, General Theory. Stanford University. Journal of Propulsion and Power, 2002.
- [3] M.A.Karabeyoglu, B.J Cantwell.Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part2, Stability of Liquid Films. Journal of Propulsion and Power, 2002.
- [4] M. Boiocchi, P. Milova, L. Galfetti, L. Di Landro, A.K. Golovko. A wide characterization of paraffin-based fuels mixed with styrene-based thermoplastic polymers for hybrid propulsion. 5th European Conference For Aeronautics and Space Sciences (EUCASS).
- [5] G. Zilliac, M.A Karabeyoglu. Hybrid Rocket Fuel Regression Rate Data and Modeling. 42th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006.
- [6] I.S Chang, E.J Tomei. Solid Rocket Failures in World Space Launches. 41th AIAA Joint Propulsion Confernece and Exhibit, 2005.
- [7] D. Altman. Hybrid Rocket Development Hystory. 27th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1991.
- [8] G. Marxman, C. Wooldridges, R. Muzzy. Fundamentals of Hybrid Boundary Layer Combustion. AIAA Heterogeneous Combustion Conference, 1963.
- [9] R.A Gater, M.R.L. L'Ecuyer. Entrainment and Depositions Rates in a Dispersed-Film Flows. International Journal of Multiphase Flow 13, 1970.
- [10] M.J Chiaverini, K.K Kuo, A. Peretz, G.C. Harting. Regression-Rate and Heat-Transfer Correlations for Hybrid Rocket Combustion. AIAA journal, 2001.
- [11] E. Babinsky, P.E Sojka. Modeling size distributions. Progress in Energy and Combustion Science, 2002.
- [12] NASA, NSC (NASA SAEFTY CENTER). From Rockets to Ruins. System Failure Case Study, 2012.
- [13] NASA. Space Shuttle: Challenger Launch Information. www.nasa.gov/mission_archives/shuttle.
- [14] D. Altman, R. Humble. Hybrid Rocket Propulsion System. Space Propulsion Analysis and Design, 1995.
- [15] K. Shin, C. Lee, S.Y. Chang. The Enanchement of Regression Rate of Hybrid Rocket Fuel by Various Methods. AIAA journal, 2005.
- [16] D. Gramer, E. Rice, W. Knuth, C. St. Clair. Experimental Investigation of a Metallized Criogenyc Hybrid Rocket Engine. AIAA Paper 98-3509, 1998.
- [17] A. Chandler, E. Jens, B. J. Cantwell, G. Scott Ubbard. Visualizations of the Liquid Layer Combustion of Paraffin Fuel for Hybrid Rocket Engine. AIAA paper 12-3961, 2012.
- [18] M.T. Mazzotta. “Caratterizzazione reologica e meccanica di combustibili basso-fondenti a base paraffinica per la propulsione ibrida”. Tesi di Laurea in Ingegneria Aeronautica, Politecnico di Milano, anno accademico 2013-14.

Ringraziamenti

In primo luogo ringrazio i miei genitori e mia sorella per avermi continuamente sostenuto durante tutto il tempo trascorso al politecnico.

Mille grazie anche a Stefano Bianchi, che mi ha fornito tutto l'alluminio di cui avevo bisogno e Luca Litterio, per avermi aiutato nello svolgimento degli esperimenti (e per le incredibili lampade).

Desidero ringraziare il professore Luciano Galfetti, Matteo e tutte le persone del SPLAB: Christian, il signor Giovanni, Stefano, Marco e Filippo per tutti gli spunti e soprattutto tutte le idee che mi hanno fornito grazie alle quali è stato possibile realizzare questa tesi.

Grazie agli amici dell'uni: Dani, Dani, Andre, Raoul, Jean, Ste, Marco, Silvia, Ale per aver reso mooolto più divertenti le lezioni al poli (e per tutte le sfide a briscola, scopa, ...); agli amici Joe, Bob, Teo, Brian, Rob, Riccardo per tutti i sabati e le domeniche.

Da ultimo esprimo estrema riconoscenza alla stufetta elettrica numero 1, numero 2 alla stufetta ad olio (gentilmente procurata da Marco) le quali hanno garantito la mia sopravvivenza durante tutto il periodo invernale.