Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale



Progettazione preliminare di un banco prova per ugelli

Relatore: Prof. Gaetano Maria Di Cicca

Correlatori: Prof. Roberto Marsilio Prof. Michele Ferlauto Candidato: Francesca Ortone Matricola 259914

Sommario

Lo scopo di questa tesi è la progettazione preliminare di un banco prova per diverse tipologie di ugelli. Ad una breve parte introduttiva, seguono quattro capitoli. L'introduzione considera lo stato dell'arte di questo tipo di apparati sperimentali, descrive il documento di riferimento [1] e presenta l'ugello che si è deciso di analizzare, l'Aerospike. A seguito di una breve spiegazione circa le motivazioni dietro questa scelta, si prosegue descrivendone la struttura, caratteristiche e principio di funzionamento.

Il primo capitolo si focalizza sulla progettazione vera e propria del banco di prova: dalla scelta dei vari componenti alla descrizione delle loro caratteristiche, dimensionamento, materiali e funzionalità.

Il secondo si concentra su un unico obiettivo: il preciso dimensionamento dell'ugello Aerospike. Dal momento che il procedimento definisce una possibile duplice geometria e un'accurata analisi circa la migliore configurazione da adottare non conduce ad una decisione definitiva, si prosegue la fase successiva continuando ad analizzare entrambe.

Il capitolo successivo si concentra sull'analisi numerica: nella prima parte, utilizzando il software commerciale Ansys Fluent 2020 R2, si svolge uno studio fluidodinamico computazionale bidimensionale consistente nel simulare il funzionamento dell'ugello con quattro differenti rapporti di pressione, mentre, nella seconda, avviene la sua validazione attraverso il confronto con dei risultati analoghi presenti in letteratura.

Il quarto capitolo presenta un'analisi fluidodinamica computazionale 3D. In questo caso, si effettua con due soli rapporti di pressione: il primo necessario a validare il modello, il secondo per analizzare la condizione in cui l'apparato, una volta costruito, si potrebbe trovare ad operare.

Infine la sezione conclusiva, oltre a commentare i risultati ottenuti, si concentra principalmente su due aspetti: le fasi successive a quelle svolte in questa tesi e gli ulteriori obiettivi che l'apparato in questione, una volta realizzato, potrebbe raggiungere.

Abstract

The purpose of this thesis is the preliminary design of a test rig for the analysis of different kinds of nozzles.

It consists of an initial introductory part, followed by four chapters. The initial section focuses on the state of the art of this kind of experimental apparatus, it describes the document [1] and it presents the Aerospike nozzle. There are some short hints about the reasons behind the Aerospike's choice, then there is a description about its structure, characteristics and functioning.

The first chapter focuses on the design of the test rig and it describes the experimental set-up: from the selection of the components to their characteristics, materials, sizes and functions.

The second chapter focuses on one goal: the sizing procedure of the Aerospike nozzle. Since the procedure defines the possibility of a double geometry and since an accurate analysis of the best configuration to adopt does not lead to a definitive choice, it is followed by the next phase whilst continuing to analyse both.

The next chapter focuses on the numerical analysis: in the first part, using the commercial software Ansys Fluent 2020 R2, a 2D fluid-dynamic computational study, consisting in the simulation the nozzle's functioning at four different pressure ratios, is performed, whilst, in the second part, its validation is verified with a comparison with similar results found within the literature.

The fourth chapter presents a 3D fluid-dynamic computational analysis. In this case, it is carried out with only two pressure ratios: the first necessary to validate the model, the second to analyse the condition in which the apparatus, once created, can be found to operate.

Lastly the conclusion, apart from commenting the results that have been obtained, focuses mainly on two aspects: the next phases carried out in this thesis and the further goals that this apparatus, once implemented, could achieve.

Indice

	Ind	lice						Π
	Ele	enco delle figure					1	VII
	Ele	enco delle tabelle					V	ΊΠ
	Intr	roduzione						1
1	Pro	orettazione preliminare del banco di prova						8
1	11	Componenti dell'apparato						8
	1.1	1 1 1 Tubo di alimentazione	•	•	•	•	•	9
		1.1.2 Diffusore	•		•	•		10
		1.1.3 Raddrizzatore di flusso						12
		1.1.4 Presa Pitot						15
		1.1.5 Contrazione di Borger	•	•	•	•		17
		1.1.6 Camera pre-ugello						18
		1.1.7 Campione di prova-Ugello Aerospike						19
		1.1.8 Flange "tradizionali"						19
		1.1.9 Flangia estensimetrica						21
		1.1.10 Trasduttori di pressione						22
		1.1.11 Sostegno dell'apparato						24
	1.2	Apparato finale						26
		1.2.1 Accorciamento dell'apparato						26
		1.2.2 Apparato definitivo				•	•	26
2	Din	nensionamento dell'ugello Aerospike						29
		2.0.1 Procedimento di dimensionamento						31
		2.0.2 Il codice di Angelino						33
		2.0.3 Calcolo della pressione di progetto				•		35
3	Ana	alisi fluidodinamica computazionale 2D dell'ugello Aerospike						37
	3.1	Geometria						38
	3.2	Generazione della mesh						40
	3.3	Setup simulazioni numeriche						40
		3.3.1 Introduzione						40
		3.3.2 Modello fisico						40
		3.3.3 Metodo numerico						41
		3.3.4 Condizioni al contorno						41
		3.3.5 Inizializzazione della simulazione						42
	3.4	Risultati						45
		3.4.1 Grafici di pressione						45

		3.4.2	Grafico Iso-Mach	47
4	Ana	disi flu	idodinamica computazionale 3D dell'ugello Aerospike	53
	4.1	Geom	etria	54
	4.2	Gener	azione della mesh	54
	4.3	Inizial	izzazione della simulazione e risultati	55
		4.3.1	Grafico dell'andamento della pressione sul plug per NPR=4,2 \ldots	55
		4.3.2	Grafico dell'andamento della pressione sul plug per NPR=6,5 \ldots .	56
		4.3.3	Grafico Iso-Mach per NPR=6,5	56
Co	nclu	sioni		59
Bił	oliog	grafia		60
Rin	ngra	ziame	nti	62

Elenco delle figure

1	Apparato sperimentale del documento [1]
2	Trasformazione Bell nozzle-Aerospike nozzle [6]
3	Componenti di un ugello Aerospike [8]
4	Ugello Aerospike toroidale [9]
5	Ugello Aerospike lineare [10]
6	Fenomeno della compensazione dell'altitudine 1 [11]
7	Fenomeno della compensazione dell'altitudine 2 [11]
8	Fenomeno della compensazione dell'altitudine 3 [11]
9	Condizioni di sovraespansione, sottoespansione e progetto [7]
10	Contributi alla spinta [11]
11	Dettaglio della base [11]
1.1	Cad del tubo di alimentazione
1.2	Cad del tubo di alimentazione con flangia di collegamento
1.3	Struttura del tubo corrugato proveniente da [14] 10
1.4	Tabella del tubo corrugato proveniente da [14] 10
1.5	Rappresentazione del diffusore in Solidworks
1.6	Rappresentazione del diffusore con flange in Solidworks
1.7	Vista in sezione del diffusore
1.8	Esempio di raddrizzatore di flusso[15]
1.9	Dimensioni del tubo raddrizzatore provenienti da [16]
1.10	Rappresentazione del tubo raddrizzatore in Solidworks: l'elemento flangiato (a
	sinistra), la vista interna (a destra) 15
1.11	Coefficiente di pressione [16]
1.12	Schematizzazione della presa Pitot da[17] 16
1.13	Rappresentazione delle linee di corrente da [18] 16
1.14	Presa Pitot "Single Point" da[20] 17
1.15	Tabella di installazione della presa Pitot da[20] 17
1.16	Installazione nell'apparato della presa Pitot da[20] 17
1.17	Esempio di contrazione di Borger[22]
1.18	Cad della contrazione di Borger
1.19	Sezione laterale della camera pre-ugello con altezza di gola 5,5 mm 19
1.20	Sezione laterale della camera pre-ugello con altezza di gola 2,55 mm 20
1.21	Il modello di camera e ugello Aerospike dal documento [1] (a sinistra) e un Cad
	dell'assieme camera-ugello (a destra) 20
1.22	Flangia: rappresentazione e quote dal catalogo [23]
1.23	Cad della flangia
1.24	Quote della flangia estensimetrica dal catalogo [25]
1.25	Cad della flangia estensimetrica: vista prospettica (a sinistra), vista dell'interno
	$(a destra) \dots \dots$
1.26	Catalogo trasduttore Kulite XTL-193-190 [27]
1.27	Trasduttore di pressione Kulite da [27] 25

1.28	Amplificatore KSC-2 [28]	23
1.29	Cad sostegno N°1	24
1.30	Cad sostegno N°2	25
1.31	Cad del disco	25
1.32	Sostegno N°2 definitivo	25
1.33	Visualizzazione tubo con raddrizzatore e tubo con Pitot	26
1.34	Dettaglio della flangia di accoppiamento	26
1.35	Cad dell'apparato finale	27
1.36	Vista frontale dell'apparato	28
2.1	Dimensioni caratteristiche [29]	29
2.2	Cad dell'accoppiamento camera-ugello con altezza di gola 5,5 mm	33
2.3	Cad dell'accoppiamento camera-ugello con altezza di gola 2,55 mm	33
3.1	Fasi del programma Ansys Fluent	37
3.2	Ingresso convergente 5.5 mm: campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio	51
0.2	dell'ingresso (a destra)	38
33	Ingresso "becco di pappagallo" 5.5 mm: campo di moto completo (a sinistra)	00
0.0	e dettaglio dell'ingresso (a destra)	38
34	Ingresso convergente 2.55 mm ² campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio	00
0.1	dell'ingresso (a destra)	39
3.5	Ingresso "becco di pappagallo" 2.55 mm: campo di moto completo (a sinistra)	
	e dettaglio dell'ingresso (a destra)	39
3.6	Nomenclatura del campo di moto [7]	39
3.7	Esempio di mesh per ingresso a "becco di pappagallo"	40
3.8	Condizioni al contorno [7]	42
3.9	Condizione di Pressure outlet	43
3.10	Condizione Wall	44
3.11	Condizione di Pressure inlet	44
3.12	Caso con ingresso convergente e altezza di gola 5.5 mm: rappresentazione del-	
	la distribuzione di pressione $\frac{P}{D0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{1}$ con l _{max} la	
	lunghezza ideale del plug per quattro NPR	45
3.13	Caso con ingresso convergente e altezza di gola 2.55 mm: rappresentazione	
	della distribuzione di pressione $\frac{P}{D2}$ in funzione della distanza $\frac{x}{L_{max}}$ con l_{max} la	
	lunghezza ideale del plug per quattro NPR.	46
3.14	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: rappresen-	
	tazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{D_0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{1-x-x}$ con	
	l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR	46
3.15	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 2.55 mm: rappresen-	
	tazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{D_0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{l_{max}}$ con	
	l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR	47
3.16	Caso con ingresso convergente e altezza di gola 5.5 mm: confronto della distri-	
	buzione di pressione $\frac{P}{D_0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{1-x}$ con l_{max} la lunghezza	
	ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e [29] \ldots	47
3.17	Caso con ingresso convergente e altezza di gola 2.55 mm: confronto della distri-	
	buzione di pressione $\frac{P}{D0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{1-x}$ con l_{max} la lunghezza	
	ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e [29]	48
3.18	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5.5 mm: confronto	
	della distribuzione di pressione $\frac{P}{D0}$ in funzione della distanza $\frac{x}{r}$ con l _{max} la	
	lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e [29] $\ldots \ldots \ldots$	48

3.19	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 2,55 mm: confronto	
	della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la	
	lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e [29]	49
3.20	Caso NPR=200 con ingresso convergente e altezza di gola 5,5 mm (a sinistra)	
	e 2,55 mm (a destra): rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in	
	funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l _{max} la lunghezza ideale del plug	49
3.21	Caso NPR=200 con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm (a	
	sinistra) e 2,55 mm (a destra): rappresentazione della distribuzione di pressione	
	$\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug	50
3.22	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 4,2	50
3.23	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 6,5	50
3.24	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 10,1	51
3.25	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 25,1	51
3.26	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 200	51
3.27	Rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 300	52
4.1	Geometria tridimensionale	54
4.2	Struttura della mesh: rappresentazione isometrica (a sinistra) e della faccia	
	laterale (a destra)	54
4.3	Condizione al contorno Wall	55
4.4	Ugello con vetrini laterali	55
4.5	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: confronto	
	della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la	
	lunghezza ideale del plug tra il caso bidimensionale, quello tridimensionale e [29]	56
4.6	Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: confronto	
	della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la	
	lunghezza ideale del plug tra caso tridimensionale e bidimensionale	57
4.7	Caso 3D: rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 6,5	57
4.8	Caso 2D: rappresentazione del Mach con rapporto di pressione: 6,5	58

Elenco delle tabelle

1.1	Dimensioni del diffusore 12
1.2	Dimensioni principali della camera pre-ugello 19
2.1	Dati iniziali
2.2	Casi analizzati
2.3	Comparazione
2.4	Output codice Angelino 35
3.1	Parametri del solutore
3.2	Parametri del metodo numerico
3.3	Condizioni al contorno
3.4	Valori iniziali dei casi analizzati

Introduzione

Viviamo un periodo della Storia in cui continue scoperte e nuovi traguardi, susseguendosi a grandissima velocità, permettono di avvicinarsi sempre più a quei sogni e speranze che, fino a non troppo tempo fa, non soltanto erano solo immaginati ma a volte anche ritenuti impossibili. Alla base di questi grandi progressi c'è sicuramente la ricerca che, sempre più avanzata, metodica, precisa e accurata rappresenta il motore di ogni settore e attività.

Poichè questo elaborato si concentra sulla progettazione preliminare di un banco prova per lo studio di ugelli, ho ritenuto opportuno condurre una ricerca sullo stato dell'arte di questa particolare tipologia di apparati. Concentrandomi prevalentemente sugli studi del nuovo millennio, i risultati trovati sono stati davvero numerosi ed interessanti. Tra questi, tre, sono quelli che secondo me definiscono al meglio l'effettivo grado di sviluppo raggiunto. Il primo [2] è uno studio, svolto nel 2009 al NASA Glenn Research Center, che descrive un impianto di prova per motori a razzo in grado di testare diverse varietà di propellenti a differenti altitudini, il secondo [3], avvenuto al Lampoldshausen Research Centre in Germania nel 2000, ha indagato l'origine di carichi laterali sulle pareti degli ugelli sfruttando non solo sensori di misurazione della pressione ma anche la tecnica Schlieren per la visualizzazione del flusso. Infine il terzo [1], fondamentale per questa tesi, è un articolo relativo ad una ricerca svolta dall'università di Dresden nel 2018. Esso, oltre ad esaminare il comportamento di un ugello Aerospike lineare che utilizza il "Thrust Vectoring", ossia il controllo del vettore di spinta attraverso l'iniezione di fluido secondario, presenta anche le modalità con cui è stato effettuato l'esperimento, riportando una breve descrizione dell'apparato utilizzato per compierlo. Proprio per quest'ultimo motivo, [1], è stato preso come principale documento di riferimento per questo elaborato.

A questo punto l'introduzione prosegue delineando la struttura della tesi. Essa si compone di due sezioni principali: la prima, coincidente con il primo capitolo, ha come oggetto la progettazione preliminare di un banco prova per differenti tipologie di ugelli, la seconda, invece, coincidendo con i rimanenti capitoli, si focalizza totalmente sull'ugello. In particolare, definita la sua tipologia, l'Aerospike, si procede dapprima con un suo dimensionamento, successivamente con delle analisi fluidodinamiche computazionali bidimensionali e tridimensionali, con la loro validazione ed, infine, con un loro commento.

La Figura 1 mostra il banco di prova del documento [1]. Tra i vari componenti che si possono distinguere, il più rilevante è sicuramente l'ugello. Esso, infatti, quale campione di prova, è il componente che deve esser sottoposto alle successive analisi numeriche. Attualmente esistono due grandi tipologie di ugelli: i più tradizionali Bell Nozzle, o ugelli a campana, e i più recenti Aerospike, o ugelli a spina. Il banco di prova, caratterizzato da una completa modularizzazione, può esser facilmente scomposto in più pezzi, garantendo così la piena libertà di rapidi eventuali modifiche, aggiunte o ricambi. In questo modo, nonostante in questa tesi il tipo di ugello che si è deciso di analizzare sia un Aerospike, non si preclude la possibilità di testare e studiare non soltanto differenti tipologie di ugelli ma anche alcune loro particolari modalità di funzionamento e controllo, quali ad esempio, il cosiddetto "Thrust vectoring".

Chiarito questo, prima di addentrarsi, con il primo capitolo, nella progettazione vera e propria, risulta opportuno e, allo stesso tempo utile, soffermarsi un attimo sull'Aerospike. In particolare, dopo una brevissima spiegazione circa la motivazione per la quale la scelta è ricaduta proprio su un ugello a spina, si proseguirà con l'elencare le sue parti fondamentali, le caratteristiche di funzionamento e i suoi vantaggi-svantaggi rispetto all' "antagonista" Bell Nozzle.



Figura 1: Apparato sperimentale del documento [1]

La motivazione principale dietro la scelta riguarda quella che può esser definita la semiattualità del motore: infatti, nonostante le prime serie di test siano state condotte negli anni sessanta dalla Rocketdyne e trent'anni dopo dalla NASA, i principali risultati sono stati raggiunti solo negli ultimi anni e, più precisamente, sia nel settembre del 2003, quando una squadra di ricerca sia accademica che industriale ha completato con successo il volo di collaudo di un motore Aerospike a propellente liquido, che nell'anno successivo, quando, il progetto del Dryden Flight Research Center, che prevedeva il lancio di due razzi a propellente solido, è andato a buon fine. Oltre a questi, NextAero sta tutt'oggi lavorando su Project19 [4], un prototipo di motore Aerospike prodotto con la tecnica dell'Additive Manufacturing ed in grado di sviluppare una spinta a livello del mare di 10 kN. Come si può notare, nonostante i molti anni di ricerche, nuovi studi sono in continuo svolgimento alla ricerca di sempre maggiori progressi ed ulteriori sviluppi.

Un'ulteriore motivo per questa scelta riguarda la mia conoscenza personale: durante il percorso di studi che ho affrontato, l'ugello a campana è stato più volte descritto ed analizzato, al contrario, si è solo brevemente accennato all'Aerospike. Per questo motivo ho trovato molto interessante, e allo stesso tempo utile, lavorare e approfondire questo argomento. E' infatti probabile che, superate ulteriori fasi di ricerca e sviluppo, motori di questo tipo possano diventare di uso comune esattamente come, attualmente, lo sono quelli con gli ugelli a campana [5]. Chiarito ciò, è giunto il momento di presentare l'Aerospike.

Un normale motore a razzo usa un ugello a campana che, guidando l'espansione dei gas combusti, li accelera fino ad ottenere la spinta desiderata. Il problema di questo approccio è che funziona bene soltanto per una determinata pressione atmosferica: se la pressione dell'aria all'uscita dell'ugello è minore di quella di progetto, l'efficienza diminuisce a causa delle componenti radiali del getto, se, viceversa, la pressione esterna è maggiore, si sviluppano turbolenze nel flusso dei gas esausti e vibrazioni meccaniche dell'ugello stesso causate dall'interazione tra l'onda d'urto e lo strato limite turbolento che si sviluppa sulla parete stessa [6]. Per questi motivi, un veicolo a razzo che sfrutta questa tipologia di ugello, vede diminuire l'efficienza dei propri razzi man mano che sale in quota. Proprio per cercare di porre rimedio a queste grandi perdite, è stato sviluppato il concetto di ugello Aerospike. Esso è spesso descritto come un ugello a campana rovesciato e capovolto e, a conferma di ciò, la Figura 2 [6], mostra efficacemente le fasi di passaggio dall'una all'altra configurazione. Avendo tolto il limite della parete, il getto in uscita sarà adattato ad ogni quota grazie all'azione della pressione esterna: l'espansione sarà la migliore possibile, e, di conseguenza, anche la spinta. Nonostante l'efficienza di un ugello Aerospike, ad una data quota, sia minore di quella di un ugello a campana, progettato per funzionare alla medesima quota, per tutte le altre il primo ha un'efficienza maggiore, permettendo, in particolar modo, di risparmiare il 25-30 % di combustibile a basse quote, ossia dove, per ottenere l'accelerazione iniziale, viene consumata la maggior parte del combustibile [7].



Figura 2: Trasformazione Bell nozzle-Aerospike nozzle [6]

Un ugello Aerospike, come mostrato in Figura 3 [8], è formato da tre parti principali:

- iniettori o thruster: gli elementi che rilasciano i gas combusti nell'ambiente esterno;
- spina o plug: una sporgenza lungo la quale espandono i gas combusti espulsi. In base alla sua forma si distinguono due varianti:
 - l'Aerospike toroidale, in Figura 4 [9], presenta una camera di combustione ad anello;
 - l'Aerospike lineare, in Figura 5 [10], presenta una spina a cuneo rastremato;
- base: parte finale della spina presente solo nel caso di troncatura di quest'ultima;



Figura 3: Componenti di un ugello Aerospike [8]





Figura 4: Ugello Aerospike toroidale [9]



Figura 5: Ugello Aerospike lineare [10]

Infine, per parlare del funzionamento di un ugello Aerospike, si descrive il fenomeno della compensazione dell'altitudine, ossia, il diverso comportamento che l'ugello sviluppa alle diverse quote alle quali si può trovare ad operare. A bassa quota, la pressione è alta, perciò, come mostrato dalla Figura 6[11], l'aria, spingendo fortemente i gas di scarico contro la spina, ne determina un getto molto compatto e schiacciato. Si tratta della cosiddetta condizione di sovraespansione caratterizzata dalla formazione di un'onda d'urto sulla spina necessaria a far corrispondere la pressione del getto con quella dell'ambiente circostante. Man mano che l'altitudine aumenta, la pressione diminuisce, con l'effetto dell'aria che si riduce sempre più; conseguentemente, come evidente dalla Figura 7[11] e ancor più dalla 8 [11], i gas di scarico, essendo sempre meno compressi contro la spina, generano getti sempre più allargati e di maggiori dimensioni. In altre parole, il confine del gas si espande verso l'esterno con l'onda d'urto dalla spina stessa.

Una più dettagliata spiegazione viene fornita facendo riferimento alla Figura 9 [7]. Essa mostra le diverse forme del getto per una spina sia ideale che troncata nelle tre possibili condizioni di "lavoro" di un ugello: sovraespansione, sottoespansione e progetto. La sonicità nella sezione di gola è il punto di partenza, uguale per tutti. Nel caso di progetto, denominato anche "design condition", l'ultima onda di espansione proveniente dal labbro dell'ugello colpisce la punta del contorno del plug. Dopo aver superato quest'onda di espansione, la pressione di scarico del getto corrisponde alla pressione ambiente all'altitudine di progetto e lo scarico scorre uniformemente in direzione assiale. La corrispondente pressione di parete è una funzione decrescente monotona.

In condizioni di sottoespansione, il rapporto di pressione supera quello di progetto, quindi è necessaria un'ulteriore espansione sul labbro dell'ugello per far corrispondere la pressione di uscita con quella dell'ambiente. Le onde di espansione aggiuntive non influenzano la spina,

pertanto, il comportamento di un ugello sottoespanso è uguale a quello di progetto.

Infine, quando il rapporto di pressione è inferiore a quello di progetto, si ha la condizione di sovraespansione. In questo caso, l'espansione sul labbro dell'ugello è più debole e l'ultima onda del fascio colpisce il plug. A valle, la geometria della spina genera onde di compressione che, interagendo con il confine del getto, formano un nuovo fascio di espansione. E' proprio questo susseguirsi di urti ed espansioni che permette l'adattamento del flusso con l'ambiente. La Figura 10 [11] mostra come, oltre alla spina, l'altra superficie che interviene, influenzando il comportamento complessivo dell'ugello, è la base. Essa, piatta, e in alcuni casi forata, non solo consente un'ulteriore espulsione dei gas combusti, ma permette anche, come mostra la Figura 11 [11], la generazione di ricircoli sotto di essa. Studi sperimentali e teorici hanno confermato l'esistenza di due possibili regimi di scia agenti sulla base:

- se la pressione ambiente è bassa rispetto a quella di uscita, la scia si dice chiusa. In questo caso la pressione della base, insensibile a quella ambiente, dipende solamente da quella degli iniettori [12];
- se la pressione ambiente è alta la scia si dice aperta e la pressione sulla base può considerarsi in prima approssimazione prossima a quella ambiente [12];

Quindi fino a quando si è a bassa quota la scia è aperta, la pressione sulla base è simile a quella ambiente e la spinta che si genera è positiva. Al contrario oltre ad una certa quota la scia si chiude, si ha un brusco abbassamento della pressione sulla base e di conseguenza la forza che essa genera è negativa ossia frenante.



Figura 6: Fenomeno della compensazione dell'altitudine 1 [11]

Per concludere, si riportano i tre contributi da tenere in conto nel calcolo della spinta totale dell'ugello [13]:

- base: $F_b = (P_b P_a) A_b$
- iniettori: $F_i = [\dot{m}v_i + (P_i P_a)A_i]\cos\delta \cos\delta$ l'angolo tra l'asse dell'ugello e la normale alla sezione di uscita dagli iniettori
- spina: $F_s = \int (P P_a) dA_{\text{perpendicolare}}$

Chiarito ciò, la vera progettazione può avere inizio.



Figura 7: Fenomeno della compensazione dell'altitudine 2 [11]



Figura 8: Fenomeno della compensazione dell'altitudine 3 [11]



Figura 9: Condizioni di sovraespansione, sottoespansione e progetto [7]



Figura 10: Contributi alla spinta $\left[11\right]$



Figura 11: Dettaglio della base $\left[11\right]$

Capitolo 1

Progettazione preliminare del banco di prova

Introduzione

In questo capitolo, con l'aiuto del documento [1], si va a definire la struttura preliminare dell'apparato sperimentale. Per semplificare quanto più possibile una sua futura effettiva e concreta realizzazione si è cercato, nella maggior parte dei casi, di trovare pezzi commercialmente disponibili e quindi facilmente reperibili. A riprova di questo, sono stati inseriti, nella descrizione di quasi tutti i componenti, tabelle, immagini e grafici appartenenti a cataloghi di aziende e imprese alle quali ci si potrebbe facilmente rivolgere per richiederli. Al contrario, per i restanti, diventa necessaria la richiesta di una produzione specifica in laboratorio. In ogni caso, per tutti i componenti, con l'assoluto rispetto di quote e dimensioni, e sfruttando il software di progettazione tridimensionale Solidworks, si è proceduto alla realizzazione di accurati, precisi e dettagliati modelli Cad. In questo modo, a fine capitolo, riunendoli in un unico assieme, si è potuta ottenere una visualizzazione dell'apparato quanto più possibile vicino a quella reale.

1.1 Componenti dell'apparato

I principali componenti del progetto sono:

- 1. tubo di alimentazione;
- 2. diffusore;
- 3. tubo con raddrizzatore di flusso;
- 4. tubo con presa Pitot;
- 5. camera pre-ugello;
- 6. campione di prova consistente in un ugello;

Oltre a questi, pezzi più "classici", ma non per questo di secondari interesse ed importanza, sono: flange, di varie forme e dimensioni che, quali elementi di raccordo permettono il collegamento delle varie parti, sensori di pressione con relativi strumenti di misurazione, numerosi viti e bulloni. Infine, benchè non sia parte integrante del banco di prova, si è progettato un supporto per mantenerlo nella corretta posizione.

Nelle pagine successive segue una breve ma dettagliata descrizione di ognuno di questi.

1.1.1 Tubo di alimentazione

Il condotto di alimentazione è un tubo flessibile, corrugato e in acciaio inossidabile. La dimensione del diametro nominale, pari a DN = 1pollice $\cong 25$ mm, è un dato di partenza, fissato dalla presenza, nel laboratorio di costruzione dell'apparato, di tubazioni della medesima grandezza. E' inoltre ricoperto da una singola treccia metallica esterna con funzione di irrobustimento strutturale. Mentre una sua riproduzione Cad è mostrata sia in Figura 1.1 che 1.2, la 1.3 e 1.4 provengono dal catalogo dell'azienda Giorgi Engineering [14]: la prima mostra la struttura interna ed esterna del tubo e la nomenclatura con la quale sono identificati i suoi vari diametri, la seconda, invece, la tabella dalla quale sono stati ricavati i valori di quest'ultimi.



Figura 1.1: Cad del tubo di alimentazione



Figura 1.2: Cad del tubo di alimentazione con flangia di collegamento



Figura 1.3: Struttura del tubo corrugato proveniente da [14]

		RAG GIO DI CURVATURA Bend radius	RAG GIO DI PIEGATURA Bend radius	TUBO TIPC Hose type) G-FLEX N G-FLEX N	TUBO TIPO G-FLEX N1 Hose type G-FLEX N1			
		constant tiexure (mm)	permanent bending (mm)	De (mm)	PN (Kg/cm²)	De (mm)	PN (Kg/cm²)		
1/8"	6,2	55	10	9,6	5	10,8	125		
1/4"	8,3	60	15	12,3	3	13,5	100		
3/8"	10,2	100	18	15,1	2,5	17	64		
1/2"	12,2	140	20	17,7	1,6	19	64		
5/8"	16,2	190	25	22,2	1,6	24	64		
3/4"	20,2	230	30	27,1	1,6	29	50		
1*	25,5	260	40	33,2	1,6	35	50		

Figura 1.4: Tabella del tubo corrugato proveniente da [14]

1.1.2 Diffusore

Il primo vero e proprio componente dell'apparato è un diffusore. Esso consiste in una porzione di tubo divergente. La motivazione per il suo inserimento nella parte iniziale dell'intero apparato è strettamente legata alla sua funzionalità per descrivere la quale si possono sfruttare le equazioni di Hugoniot. Esse descrivono il comportamento di un flusso adiabatico, isoentropico e quasi unidimensionale all'interno di un condotto a sezione variabile:

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1)\frac{du}{u}$$

$$\frac{dA}{A} = \left(\frac{1}{M^2} - 1\right) \frac{d\rho}{\rho}$$
$$\frac{dA}{A} = \left(1 - M^2\right) \frac{dp}{\rho u^2}$$

In particolar modo per un caso subsonico e con aumento di sezione, il flusso all'interno rallenta, mentre aumenta la pressione statica. Questo ha due conseguenze. La prima riguarda la velocità: ricordando che le perdite di carico sono direttamente proporzionali a quest'ultima, risulta evidente come una sua riduzione non può che comportare quella delle perdite. La seconda, invece, interessa la pressione: essa, aumentando lungo il tratto di tubo, genera un gradiente avverso che favorisce la separazione del flusso dalle pareti. Da qui, la necessità di mantenere contenuto l'angolo di divergenza delle pareti.

Chiarito ciò, non resta che fare alcune osservazioni circa le dimensioni finali del componente. In questo progetto, il diffusore permette di passare da un'area di ingresso di $673,91 mm^2$ a una di uscita di 2435,45 mm^2 o, per maggior semplicità, da un diametro interno di 1 pollice ad uno di 2 pollici. La motivazione per la scelta di quest'ultima dimensione è stata influenzata da numerosi fattori, alcuni già precedentemente citati, altri nuovi. Tra questi, sono un esempio, la lunghezza dell'intero banco di prova, le perdite di carico, lo spessore dello strato limite e la separazione del flusso dalle pareti del divergente. Andando un po' più nel dettaglio, è stato necessario limitare la lunghezza dell'apparato, e quindi del diffusore stesso, a causa del luogo nel quale verrà realizzato. Conseguentemente, fissati un'appropriata lunghezza e un angolo di divergenza che garantisca l'assenza o la minima separazione del flusso dalle pareti, il raddoppio del diametro interno della tubazione è stata la soluzione a cui si è arrivati. Raddoppio che ha trovato un'ulteriore conferma nella presa Pitot, altro fondamentale componente del banco di prova. Si è infatti verificato, attraverso numerose ricerche, che il pezzo è più commercialmente disponibile soltanto se il diametro della tubazione, contenente la Pitot, è superiore ai 50 mm. Di conseguenza, imponendo i 2 pollici di diametro, si garantisce la possibilità di facile compera e accoppiamento.

Le Figure 1.5 e 1.6 mostrano il modello 3D ottenuto in Solidworks mentre la Tabella 1.1, ne riassume le sue dimensioni che, infine, sono ancora mostrate dalla vista in sezione nella Figura 1.7. Dal momento che è assolutamente improbabile trovare un pezzo del genere commercialmente disponibile, l'unica possibile soluzione è che la produzione avvenga su specifica richiesta. Da qui, l'importanza di aver creato un Cad con tutte le quote disponibili.



Figura 1.5: Rappresentazione del diffusore in Solidworks



Figura 1.6: Rappresentazione del diffusore con flange in Solidworks

Tabella 1.1: Dimensioni del diffusore

Lunghezza [mm]	140,3
Diametro ingresso [mm]	29,3
Diametro uscita [mm]	55,7
Angolo di divergenza [°]	6,26
Spessore pareti [mm]	3

1.1.3 Raddrizzatore di flusso

E' un elemento, un cui esempio è mostrato nella Figura 1.8 [15], che riduce al minimo gli effetti negativi delle perturbazioni del flusso generando un profilo di velocità più costante e uniforme. In altre parole, riduce gli effetti di vortici e turbolenze raddrizzando il flusso [15]. In questo caso il catalogo di riferimento appartiene alla Oval Corporation [16]. Esso, come mostrato dalla Figura 1.9, riporta una dettagliata tabella con varie dimensioni e quote. Rispettando il modello FS-050, quello con diametro interno di 2 pollici e una lunghezza $L = 600 \ mm$, si ottiene il Cad mostrato dalla Figura 1.10. Il catalogo, inoltre, fornisce la seguente formula:

$$\Delta p = C\rho Q^2$$

Essa permette il calcolo delle perdite di pressione Δp , dovute al passaggio del flusso nel componente, se risultano note:

- la densità ρ del flusso in kg/m^3 ;
- la portata volumetrica Q in m^3/h ;
- il coefficiente di perdita di pressione C;

Poichè si tratta di grandezze note o comunque ricavabili, si è deciso di valutare il beneficio del passaggio da un diametro di 1 pollice ad uno di 2, calcolando e confrontando la caduta di pressione nei due casi. In particolare si definisce:

- caso 1 con diametro mantenuto pari ad 1 pollice ed indicato con pedice 1;
- caso 2 con diametro che passa da 1 a 2 pollici ed indicato con pedice 2;

Il valore del coefficiente di perdita di pressione C, tabellato in Figura 1.11, è fornito dal catalogo dell'azienda. Esso vale:

- $C_1 = 0,0163;$
- $C_2 = 0,00116;$



Figura 1.7: Vista in sezione del diffusore

La portata volumetrica Q è la stessa per entrambi i casi, al contrario, la densità, poichè il flusso è compressibile, varia con la pressione. Conseguentemente, mentre nel caso 1 la pressione può esser considerata pari alle condizioni di serbatoio, nel secondo, il diffusore ha aumentato la pressione del flusso e quindi la sua densità. Di seguito vengono elencati i passaggi per determinare le due densità necessarie per calcolare le due cadute di pressione.

Nel primo caso, la densità, essendo nota la pressione P=6,5 bar e la temperatura $T=18^{\circ}$, viene ricavata sfruttando la legge dei gas ideali:

$$\rho_1 = \frac{P}{RT} = 7,77 \ kg/m^3$$

Ricordando che R è la costante specifica dell'aria pari a:

$$R = 287 \ J/kgK$$

Nel secondo caso, invece, il procedimento è un po' più lungo. La densità ricercata è quella in uscita dal diffusore. Dall'equazione di continuità, indicando con "i" la sezione di ingresso e con "e" quella di uscita, si ha:

$$\rho_e = \frac{\rho_i A_i v_i}{A_e v_e}$$

Quasi tutte queste grandezze sono già note, l'unica da ricavare è la velocità in uscita dal diffusore. Per ottenerla, si utilizza la conservazione della portata:

$$\begin{split} \dot{m_i} &= \dot{m_e} \\ \frac{P_i^{\circ} A_i f\left(M_i\right)}{\sqrt{RT_i^{\circ}}} &= \frac{P_e^{\circ} A_e f\left(M_e\right)}{\sqrt{RT_e^{\circ}}} \end{split}$$

L'ipotesi di flusso isoentropico e adiabatico permette alcune semplificazioni con le quali si arriva a:

$$A_i f\left(M_i\right) = A_e f\left(M_e\right)$$

Conseguentemente, ipotizzando sonica la sezione di ingresso, si ricava la funzione del Mach nella sezione di uscita del diffusore:

$$f\left(M_e\right) = \frac{A_i f\left(M_i\right)}{A_e}$$

A questo punto si conosce il primo membro della seguente equazione:

$$f(M_e) = \frac{\sqrt{\gamma}M_e}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_e^2\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}}$$
13

pertanto, sfruttando un procedimento iterativo, si inserisce nell'espressione un certo valore di M_e fintanto che l'uguaglianza non risulti perfettamente soddisfatta. Ricavato $M_e = 0, 15$, è facile ottenere la velocità:

$$v_e = M_e \sqrt{\gamma RT} = 54,9 \ m/s$$

 $\rho_e = \rho_2 = 13,44 \ kg/m^3$

La densità risulta pertanto:

Conseguentemente, poichè:

 $(\Delta p)_1 = 0,126Q^2$ $(\Delta p)_2 = 0,015Q^2$

si ottiene:

$$(\Delta p)_1 = 8, 12(\Delta p)_2$$

Risultato che conferma il grande vantaggio dell'aver raddoppiato il diametro della tubazione.



Figura 1.8: Esempio di raddrizzatore di flusso[15]

FS Series

DIMENSIONS



.			Dimensio	ons, mm	Ap	oprox. weight (kg)				
	Model	Nom. size (mm)	dØ	dØ L JIS 10 K		JIS 20 K ASME/JPI 150	JIS 30 K ASME/JPI 300			
	FS 020	20(3/4")	21.4	240	2.1	2.2	3.7			
	FS 025	25 (1 [~])	27.2	300	4	4	5			
	FS 032	32(11/4")	35.5	400	4.4	4.6	5.7			
	FS 040	40(11/2")	41.2	480	6	6	8			
	FS 050	50(2)	52.7	600	8	8	10			
'	FS 080	80(3)	78.1	960	17	20	24			
	FS 100	100(4)	102.3	1200	27	31	40			
	FS 150	150(6)	151	1800	66	75	87			
	FS 200	200(8)	199.9	2400	130	140	160			
	FS 250	250(10")	248.8	3000	220	240	270			
	FS 300	300(12)	297.9	3600	340	370	410			
	FS 350	350(14))	333.4	4200	470	510	570			
	FS 400	400(16")	390.6	4800	490	520*				
	FS 500	500(20")	489	6000	870	930*				
	FS 600	600(24")	584.2	7200	1590	1670*				

Figura 1.9: Dimensioni del tubo raddrizzatore provenienti da [16]



Figura 1.10: Rappresentazione del tubo raddrizzatore in Solidworks: l'elemento flangiato (a sinistra), la vista interna (a destra)

Nom. size (mm)	Press. loss coefficient (C)								
20	4.26X10 ⁻²								
25	1.63X10 ⁻²								
32	5.63X10 ⁻³								
40	3.10X10−3								
50	1.16X10 ⁻³								

Press. loss coefficient C

Figura 1.11: Coefficiente di perdite di pressione [16]

1.1.4 Presa Pitot

Come mostrato in Figura 1.12 [17], una presa Pitot, inserita all'interno di un condotto rettilineo, è uno strumento utilizzato per misurare la velocità di un fluido. Presenta due prese: la prima, disposta perpendicolarmente alla corrente, misura la pressione totale, la seconda, disposta parallelamente al flusso, invece misura quella statica. Questo perchè, come descritto dalla Figura 1.13[18], se un ostacolo viene posto in una corrente fluida, le linee di corrente si aprono, generando il cosiddetto punto di arresto (punto O nella Figura 1.13), dove il fluido è appunto in quiete. Al contrario, nella sezione A e nei punti della sezione B a sufficiente distanza dal bordo di attacco della sonda, di modo da non esserne influenzati, la pressione e la velocità risultano essere le stesse [19]. Verificato che il Mach in uscita dal componente precedente risulta inferiore a 0,3, la velocità può esser determinata sfruttando il teorema di Bernoulli per flusso incomprimibile. Partendo dalla sua forma più generale e facendo riferimento alla Figura 1.12:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

è possibile semplificare non solo i due termini relativi all'energia potenziale, in quanto le due prese si trovano alla medesima altezza, ma anche quello corrispondente all'energia cinetica in 2, in quanto il valore di v_2 è nullo nel punto di arresto. Procedendo in questo modo, si ottiene:

$$p^{\circ} = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2$$

che permette di ricavare facilmente la velocità:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p^\circ - p_1)}{\rho}}$$

Detto questo, la Figura 1.14[20] mostra un esempio di Pitot "Single Point" con la quale, essendo la presa posta esattamente al centro del tubo, e pertanto il più lontano possibile dalle pareti e dalle loro interferenze, si determina la massima velocità del fluido al suo interno. Sfruttando questa informazione si può determinare non solo il numero di Reynolds e quindi il regime di moto del fluido, ma anche la sua portata. Il catalogo dell'azienda, la Fuji Electric [20], come riportato dalla Figura 1.15, fornisce inoltre alcune precise istruzioni circa l'installazione e l'orientazione della sonda. Dal momento che l'apparato in questione è rettilineo, l'installazione necessaria è quella della Figura 1.16. Rispettando le indicazioni, poichè:

$$D = 55, 7 mm$$

la lunghezza totale del tubo contenente la presa è:

$$11D = 612, 7 mm$$

con $8D=445,6~\mathrm{mm}$ di tubo davanti la presa e $3D=167,1~\mathrm{mm}$ dietro di essa.



Figura 1.12: Schematizzazione della presa Pitot da[17]



Figura 1.13: Rappresentazione delle linee di corrente da [18]



Figura 1.14: Presa Pitot "Single Point" da[20]



Figura 1.15: Tabella di installazione della presa Pitot da^[20]



Figura 1.16: Installazione nell'apparato della presa Pitot da[20]

1.1.5 Contrazione di Borger

E' un condotto convergente caratterizzato, di norma, da una sezione di ingresso circolare ed una di uscita quadrata o rettangolare. Nonostante non sia impiegato nell'attuale progetto, si è ugualmente deciso di descriverlo brevemente in quanto è uno di quei componenti che potrebbero essere inseriti in uno dei possibili sviluppi futuri. Il documento [21] fornisce la seguente equazione polinomiale del quinto ordine che, noti il diametro di ingresso (Hi), l'altezza della sezione di uscita (Ho) e la lunghezza (L), permette di ottenere il profilo del Borger:

$$y = \left(-6\left(\frac{x}{L}\right)^5 + 15\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 10\left(\frac{x}{L}\right)^3\right)(H_i - H_o) + H_i$$
17

Un'ulteriore parametro caratteristico è il rapporto di compressione, in questo caso chiamato anche rapporto di contrazione C:

$$C = \frac{A_{\rm ingresso}}{A_{\rm uscita}}$$

Il documento [21] riporta che 6 < C < 9 risulta un ottimo intervallo entro cui definire tale parametro. La Figura 1.17 dal documento [22] mostra il componente all'interno di un reale apparato sperimentale mentre la 1.18 il semplice Cad.

La spiegazione per l'assenza del pezzo, poichè strettamente correlata al dimensionamento dell'ugello Aerospike, viene fornita nel capitolo seguente, proprio dedicato a questo argomento.



Figura 1.17: Esempio di contrazione di Borger^[22]



Figura 1.18: Cad della contrazione di Borger

1.1.6 Camera pre-ugello

La camera pre-ugello è a forma parallelepipeda: da una parte vi si collega direttamente l'ugello Aerospike, dall'altra, vi è l'ultima flangia di collegamento. Come meglio chiarito nel capitolo successivo, al termine del dimensionamento sono due le possibili configurazioni dell'ugello Aerospike e, conseguentemente, due sono le camere ad esso collegate. La Tabella 1.2 riporta le loro principali dimensioni mentre le Figure 1.19 e 1.20 le riportano più in dettaglio.

	Camera ugello ht= $5,5 \text{ mm}$	Camera ugello $ht=2,55 mm$
Larghezza [mm]	69,7	77,56
Altezza [mm]	169,15	86,52
Lunghezza [mm]	50	25

Tabella 1.2: Dimensioni principali della camera pre-ugello



Figura 1.19: Sezione laterale della camera pre-ugello con altezza di gola 5,5 mm

1.1.7 Campione di prova-Ugello Aerospike

In questa tesi, il campione di prova è rappresentato da un ugello Aerospike di tipo lineare e troncato al 40% della sua lunghezza ideale (l_{max}) . Nonostante questo lavoro si focalizzi solamente sull'ugello Aerospike, l'apparato è progettato anche per lo studio di altri campioni di prova: modificando infatti la parte finale ed inserendo, qualora opportuna, la contrazione di Borger, l'accoppiamento e il funzionamento risulterebbero in ogni caso garantiti e affidabili. La figura 1.21 mostra il campione di prova: a sinistra, quello completo e dettagliato del documento [1], a destra, il semplice Cad. A differenza degli altri componenti, la cui progettazione è avvenuta in questo capitolo, l'Aerospike verrà dimensionato completamente nel successivo. Questo perchè il procedimento è molto più lungo e articolato.

1.1.8 Flange "tradizionali"

L'apparato consta di più flange, accoppiate o singole, di diverse dimensioni e del tipo "a collarino a saldare di testa". Come mostrato dalla Figura 1.22, ricavata da una sezione del catalogo dell'azienda Raccorveneta [23], tutte le flange appartengono alla normativa UNI EN 1092-1 PN6. Essa, partendo da un determinato diametro nominale DN, permette di ricavare tutte le quote necessarie a generare un dettagliato e preciso modello Cad di cui la Figura



Figura 1.20: Sezione laterale della camera pre-ugello con altezza di gola 2,55 mm



Figura 1.21: Il modello di camera e ugello Aerospike dal documento [1] (a sinistra) e un Cad dell'assieme camera-ugello (a destra)

1.23, è un esempio. Per maggior chiarezza si specifica che, in questo progetto, i due diametri nominali utilizzati sono: DN=25 per la prima flangia a contatto con il tubo di alimentazione e DN=50 per tutte le successive causa la maggiorazione del diametro apportata dal diffusore. Un ulteriore aspetto riguarda le informazioni fornite dal catalogo: oltre alle dimensioni delle varie parti della flangia, sono presenti anche il numero e il tipo di viti da utilizzare per completare al meglio l'accoppiamento.



Flange a collarino a saldare di testa UNI EN 1092-1 PN6 ex UNI 2280-57 PM6

DN	Ø TUBO	41			-				14					Vie.	NRM	Ke.
	150	150		-	150					- T	Ľ *	1 ° 1				
10	17,2	18	75	50	26	35	28	12	6	2	-4	1,8	11	M10	-4	0,5
15	21,3	225	80	- 55	30	-40	30	12	6	2	-4	2,0	11	M10	-4	0,5
29	26,9	28	90	65	38	50	32	14	6	2	4	2,3	11	M10	-4	0,5
25	35,7	345	100	75	42	60	36	14	6	2	4	2,6	11	M10	4	1.0
32	42,4	435	120	90	55	70	35	14	- 6	2	- 6	2,6	54	M12	-4	1,0
40	48,3	49,5	130	100	62	80	38	- 14	7	3	6	2,6	54	M12	-4	1,5
50	60,3	61.5	140	110	74	90	38	14	8	3	6	2,9	54	M12	-4	1.5
65	76,1	77	160	130	88	110	38	- 14	9	3	6	2,9	- 14	M12	-4	2,0
80	88.9	90	190	150	102	128	42	16	10	3	8	3.2	18	M16	4	3.0

Figura 1.22: Flangia: rappresentazione e quote dal catalogo [23]



Figura 1.23: Cad della flangia

1.1.9 Flangia estensimetrica

Oltre alle precedenti flange "tradizionali", l'apparato consta anche di una "estensimetrica". Essa è una cella di carico, ossia un componente elettronico impiegato per misurare una forza applicata su un oggetto che, in questo preciso caso, risulta essere la spinta generata dall'ugello Aerospike. In altre parole questo trasduttore, misurando la variazione del segnale elettrico causato dalla deformazione che la forza produce sul componente stesso, è in grado di determinarne l'intensità[24]. In particolare, si necessita di una cella in grado di misurare sforzi meccanici relativi a compressione e trazione. Nonostante i pezzi commercialmente disponibili siano molti, la ricerca ha comportato alcune difficoltà dovute alla dimensione del foro centrale della flangia. Non si è infatti riuscito a trovare alcun tipo di modello che disponeste di un diametro interno di 55,7 mm ossia esattamente uguale a quello di uscita del componente precedente tale flangia. Per quanto riguarda il campo di misura invece il modello HC 2001 dell'azienda S2TECH [25] risulta adeguato. In particolare, come mostrato in Figura 1.24, l'intervallo da 0 a 50 kg risulta ottimale per la spinta di circa un centinaio di Newton dell'ugello. Il componente dunque richiederebbe una produzione specifica. Con riferimento al disegno riportato in Figura 1.24 e utilizzando le necessarie dimensioni è stato ottenuto il preciso Cad,

riportato in Figura 1.25.



MODELLO	CAMPI DI MISURA	DIMENSIONI (mm)				
		D	Α	н	В	С
HC 2001 (AI)	0 a (20) - 50 - 100 - 200 - 300 Kg	50	10,1	26	34	44
HC 2001 (Fe)	0 a 500 - 1000 Kg	50	10,1	26	34	44
HC 2002 (Fe)	0 a 2 Ton	80	30,1	27,5	57	67
RC5	0 a 5 Ton	80	50,1	29,5	68	80
RC10	0 a 10 - 15 Ton	88	50,1	31	66,1	66,1
RC30	0 a 30 Ton	110	80,1	31	97	97
HC 7050 (Fe)	0 a 50 Ton	130	52,2	65	101	108

Figura 1.24: Quote della flangia estensimetrica dal catalogo [25]



Figura 1.25: Cad della flangia estensimetrica: vista prospettica (a sinistra), vista dell'interno (a destra)

1.1.10 Trasduttori di pressione

Oltre alla flangia estensimetrica, l'apparato consta di altri sensori: i trasduttori di pressione. Quali sensori, sono dei dispositivi che rilevano la pressione e la trasducono in un segnale in uscita tipicamente elettrico [26]. Con riferimento al documento [1] e conoscendo la massima pressione ammessa nell'apparato, si è deciso di utilizzare trasduttori Kulite della serie XTL-193-190 (M). Questi, con incorporata la più recente tecnologia di rilevamento della pressione e una costruzione ultra miniaturizzata, sono ideali per applicazioni in cui lo spazio è limitato[27]. Mentre la Figura 1.27 mostra un loro esempio, la 1.26 elenca le loro caratteristiche tra le quali la "Pressure Range" e il voltaggio di alimentazione. Per quanto riguarda l'inserimento nell'ugello: il plug è dotato di una serie di fori di misurazione della pressione aventi una posizione centrale su di esso. Questi fori sono realizzati con un diametro di 0,5 mm perpendicolare alla superficie e distano 7 mm l'uno dall'altro. Come raccomandato dal catalogo del trasduttore, per massimizzare la sua capacità di misurazione, è consigliato l'utilizzo di un amplificatore-filtro KSC-2. Esso, compatto e robusto, presenta una tensione di eccitamento programmabile ottimale per il controllo dei sensori di pressione [28]. Una suo esempio è mostrato in Figura 1.28. Infine, per garantire il collegamento trasduttore-amplificatore, vengono utilizzati opportuni tubicini in teflon.

	Pressure Range	0.7 10	1.0 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	140 BAR 2000 PSI	
	Operational Mode	Abs	olute			Ab	solute, Sealed	Gage			
	Over Pressure		2 Times Rated Pressure								
5	Burst Pressure		3 Times Rated Pressure Most Conductive Liquids and Gases - Please Consult Factory (All Media May Not Be Suitable With O-Ring Supplied)								
R	Pressure Media	Most Co									
	Rated Electrical Excitation		10 VDC								
	Maximum Electrical Excitation		12 VDC								
	Input Impedance					1000 Ohr	ms (Min.)				
	Output Impedance		1000 Ohms (Nom.)								
	Full Scale Output (FSO)		100 mV (Nom.)								
	Residual Unbalance		± 5 mV (Typ.)								
1	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability		± 0.1% FSO BFSL (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.) Infinitesimal								
5	Resolution										
0	Natural Frequency of Sensor Without Screen(KHz) (Typ.)	175	200	240	300	380	550	700	1000	1400	
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	1.0x10 ⁻³	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	1.5x10⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵	
	Insulation Resistance					00 Megohm N	/lin. @ 50 VDC	;			
	Operating Temperature Range				-65	°F to +400°F (-55°C to +204	°C)			
ITAI	Compensated Temperature Range				-40	°F to +350°F (-40°C to +175	°C)			
ME	Thermal Zero Shift					± 1% FS/10	00°F (Typ.)				
RON	Thermal Sensitivity Shift					± 1% /100	0°F (Typ.)				
N	Linear Vibration				1	0-2000 Hz Sin	e, 100g. (Max	.)			
ш	Mechanical Shock				20g I	alf Sine Wave	11 µ sec. Dur	ation			
	Electrical Connection				4 Conduc	tor 26 AWG S	hielded Cable	36" Long			
ICAL	Weight				4	Grams (Nom.)	Excluding Cat	ole			
HYS	Pressure Sensing Principle	Fully	Active Four Ar	m Wheatston	e Bridge Diele	ctrically Isolate	ed Silicon on S	ilicon Patente	d Leadless Te	chnology	
<u>a</u>	Mounting Torque				1	5 Inch-Pounds	(Max.) 1.7 N	m			

Figura 1.26: Catalogo trasduttore Kulite XTL-193-190 [27]



Figura 1.27: Trasduttore di pressione Kulite da [27]



Figura 1.28: Amplificatore KSC-2 [28]

1.1.11 Sostegno dell'apparato

L'ultimo elemento che si presenta svolge una funzione portante. E' infatti il sostegno su cui, verticalmente, poggia l'intero apparato. Durante la sua fase di progettazione sono stati pensati e realizzati due possibili modelli: il primo, riportato in Figura 1.29, ricorda le rampe di lancio per razzi, per il secondo invece, come dimostra la Figura 1.30, si è preso come riferimento il semplice cavalletto per videocamere.

La scelta finale è ricaduta sul secondo modello poichè, a parità di risultato, presenta un minor peso e maggior facilità di montaggio. Rispetto a quello mostrato in Figura 1.30 sono state apportate alcune piccole modifiche: innanzitutto le gambe hanno una sezione circolare cava per garantire una maggior resistenza, inoltre per evitare che, sotto il peso dell'apparato, le gambe possano flettersi si è aggiunto, per ognuna di queste, un'asta di controventatura ed, infine, per garantire un ottimale accoppiamento con la struttura dell'apparato, il disco che unisce le tre gambe non è completo ma, come mostrato dalla Figura 1.31, risulta tagliato. In questo modo, infatti, si può inserire o rimuovere il sostegno senza dover toccare nessun altro elemento. La Figura 1.32 mostra il sostegno nella sua forma finale.



Figura 1.29: Cad sostegno $\mathrm{N}^{\circ}1$



Figura 1.30: Cad sostegno $\mathrm{N}^{\circ}2$



Figura 1.31: Cad del disco



Figura 1.32: Sostegno $\mathrm{N}^{\circ}2$ definitivo

1.2 Apparato finale

1.2.1 Accorciamento dell'apparato

Terminata la descrizione dei singoli componenti, è finalmente possibile accoppiarli. Come già affermato, l'apparato, anzichè essere posizionato orizzontalmente, come si suole normalmente, è posto verticalmente per permettere il corretto funzionamento della flangia estensimetrica. Proprio per questo motivo è stato necessario limitare la lunghezza di alcune sue parti. In particolare, due sono stati i componenti sui quali si è deciso di operare: il tubo contenente il raddrizzatore di flusso e quello con la presa Pitot, fino ad ora di lunghezza rispettivamente pari a 600 e 612,7 mm. Per procedere con una loro diminuzione si è osservato che le lunghezze consigliate nei due cataloghi sono riferite al pezzo considerato isolato. Al contrario, poichè nell'apparato progettato i due componenti sono collegati attraverso una flangia, le lunghezze della tubazione necessaria al raddrizzatore e al Pitot possono essere "fuse", permettendo così un certo guadagno di spazio. Per meglio comprendere ciò che è stato fatto basti osservare le Figure 1.33 e 1.34. Nella prima appaiono per intero entrambi i tubi per permettere di visualizzare l'esatta posizione occupata sia dal raddrizzatore che dalla sonda Pitot; la seconda, invece, riporta in dettaglio la flangia di accoppiamento tra i due tubi. Da entrambe si può osservare come, effettivamente, tubo con raddrizzatore, flangia e tubo con sonda Pitot siano uno il proseguimento dell'altro, pertanto, pur tagliando una parte del tubo con raddrizzatore, sia la flangia che quello contenente la sonda Pitot gli permettono ugualmente di raggiungere i 600 mm di lunghezza richiesti. Allo stesso modo, nonostante il taglio di parte del tubo antecedente la presa Pitot, la lunghezza di 445,6 mm è garantita dalla solita flangia e dal tubo con raddrizzatore. Con questi accorgimenti, l'altezza totale dell'apparecchio viene ridotta di 376 mm raggiungendo una dimensione finale di 1781 mm, appropriata per un laboratorio.



Figura 1.33: Visualizzazione tubo con raddrizzatore e tubo con Pitot



Figura 1.34: Dettaglio della flangia di accoppiamento

1.2.2 Apparato definitivo

Risolto anche il problema relativo alle dimensioni, il progetto del banco di prova risulta completo. Mentre la Figura 1.35 mostra il Cad finale nel quale sono stati inseriti alcuni componenti

di dettaglio e rifinitura come viti e bulloni, la 1.36 mostra la vista frontale dell'apparato completa delle quote relative alle altezze dei suoi principali componenti.

A questo punto, il capitolo successivo si concentra sul procedimento di dimensionamento dell'ugello.



Figura 1.35: Cad dell'apparato finale



Figura 1.36: Vista frontale dell'apparato

Capitolo 2

Dimensionamento dell'ugello Aerospike

Come per la struttura dell'apparato il documento [1] è stato il documento preso a modello, allo stesso modo, l'articolo [29], lo è per l'ugello. [29] è una breve presentazione circa il design di due spine appartenenti ad un ugello Aerospike lineare. Essa, oltre a contenere complete informazioni sulle dimensioni del componente, riporta anche importanti grafici circa l'andamento della pressione sulla spina dell'ugello. Proprio questi, attraverso diretto confronto, permetteranno la validazione dei risultati che si otterranno dalle simulazioni numeriche che verranno effettuate.

Questo spiega il motivo per cui alcune caratteristiche dell'ugello, riportate in Figura 2.1, sono simili, e a volte uguali, a quelle del documento [29]. Chiarito ciò, i dati di partenza del



Figura 2.1: Dimensioni caratteristiche [29]

progetto in questione sono riassunti nella Tabella 2.1.

Sfruttandoli, si è calcolata la massima portata attraversante l'apparato. Essa è quella che rende critico il tubo di alimentazione e può essere ottenuta, dopo aver imposto M = 1, nella cosiddetta funzione del Mach:

$$f(M) = \frac{\sqrt{\gamma}M}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}}$$

Tabella	2.1:	Dati	ini	zial	i

P _{ambiente} [Pa]	101325
$P^{\circ}[Pa]$	650000
$T^{\circ}[K]$	288
$A_{tuboalimentazione} \ [mm^2]$	506,70
R [J/Kg K]	287
γ	1,4

$$\dot{m} = \frac{P^{\circ}Af\left(M\right)}{\sqrt{RT^{\circ}}}$$

A questo punto si considera la proporzione che relaziona l'area di gola e la portata dell'ugello del documento [29], indicate con il pedice F, con quelle dell'ugello che si vuole dimensionare:

$$A_{\text{gola}}: \dot{m} = A_{\text{golaF}}: \dot{m_F}$$

e si ricava l'unica incognita:

$$A_{\rm gola} = \frac{\dot{m} * A_{\rm golaF}}{\dot{m_F}}$$

L'area ottenuta, nel caso di un ugello Aerospike lineare, risulta rettangolare, perciò, imponendone l'altezza, si ricava la base che altro non è che la larghezza dell'intero componente.

	CASO 1	CASO 2	Festip
Area gola [mm ²]	395,51	395,51	3000,00
Altezza gola [mm]	$5,\!50$	2,55	7,00
Larghezza gola [mm]	$35,\!96$	77,55	214,30
Larghezza/Altezza	6,54	30,41	30,62
Area Ratio	12,65	12,65	12,65
Area uscita $[mm^2]$	5003,21	5003,21	$37952,\!53$
Altezza uscita [mm]	139,15	64,52	$177,\!10$
Numero di Reynolds-hgola	$1{,}25\mathrm{E}{+}05$	$5,79E{+}04$	$1,\!66\mathrm{E}{+}05$
Numero di Reynolds-Didraulico	$4,33E{+}05$	2,24E+05	$6,\!43\mathrm{E}\!+\!05$

Tabella 2.2: Casi analizzati

Come si evince dalla Tabella 2.2 sono stati presi in considerazione due casi: il primo con un'altezza di gola pari a 5,5 mm, l'altra di soli 2,55 mm. Paragonando i vari valori con la colonna appartenente all'ugello del documento [29], si possono fare alcune considerazioni:

- un'altezza di gola di 5,5 mm permette, in un'ottica di produzione dell'apparato, una costruzione più semplice. Essa infatti, pur rimanendo sempre una grandezza dell'ordine dei mm, risulta essere più del doppio dell'altra; di conseguenza, a parità di lavorazione, il componente di dimensioni maggiori avrebbe sicuramente un grado di accuratezza maggiore;
- la larghezza è limitata, allo stesso tempo, però, l'esempio concreto di un ugello con spessore di soli 20 mm, riportato dal documento [1], rassicura sulla completa realizzabilità del pezzo;
- l'Area Ratio è il parametro costante in entrambi i casi considerati; poichè la sezione di gola è anch'essa la stessa allora lo è anche quella di uscita;

- un'altezza della sezione di uscita maggiore faciliterebbe un'eventuale costruzione del provino aumentando lo spazio a disposizione per eventuali strumenti di misurazione o altro;
- il rapporto adimensionale tra larghezza e altezza permette di valutare quanto un'approssimazione bidimensionale nell'analisi di un flusso risulti più o meno accurata. Sicuramente sotto questo punto di vista il caso 1 con una minor larghezza è sfavorito;
- il secondo parametro adimensionale di cui si è tenuto in conto è il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

Per poterlo determinare è necessaria la conoscenza della cosiddetta lunghezza caratteristica, in questo caso pari all'altezza di gola, della velocità nella sezione di gola e della viscosità cinematica del flusso. Mentre la velocità è ricavata come output delle simulazioni numeriche, la viscosità cinematica è determinabile nota la temperatura. In particolare, per questo progetto, stimando una temperatura di 20°, la si è valutata pari a 1,51E-05 m^2/s . Come si evince dalla tabella solo nel primo caso il valore si avvicina a quello del [29], nell'altro invece risulta di un ordine di grandezza inferiore. Il numero di Reynolds però può anche esser determinato sfruttando il cosiddetto diametro idraulico. Esso è definito nel modo seguente:

$$D_{\text{idraulico}} = \frac{4S}{p}$$

con S la superficie della sezione di gola e p il suo perimetro. Come si può osservare dai risultati riportati in tabella, il Reynolds calcolato in questo modo è maggiore in quanto i diametri idraulici che si ottengono nei due casi sono maggiori delle altezze di gola sfruttate nel calcolo precedente;

Detto questo, si può facilmente notare come, per certi aspetti, sia il caso uno ad avvicinarsi maggiormente al modello [29], mentre per altri, lo faccia di più il secondo. Proprio per l'impossibilità di una scelta definitiva si è deciso di proseguire mantenendo entrambi i casi.

2.0.1 Procedimento di dimensionamento

In questa sezione si descrive il procedimento seguito per l'ottenimento dei risultati mostrati nella precedente Tabella 2.2.

Innanzitutto una puntualizzazione circa la definizione delle due altezze di gola. Mentre la scelta di 2,55 mm è stata il risultato del compromesso tra il volere il rapporto adimensionale larghezza/altezza uguale a quello del documento [29] e la minima altezza di gola che può esser ottenuta con accuratezza in laboratorio, quella di 5,5 mm lo è stato tra il raggiungimento del medesimo numero di Reynolds del documento [29] e la larghezza dell'ugello che, se troppo piccola, potrebbe causare problemi nell'installazione degli strumenti di misurazione.

Partendo dall'altezza della sezione di gola, se ne determina la larghezza b:

$$b_{\rm gola} = \frac{A_{\rm gola}}{h_{\rm gola}}$$

Questo permette di stimare il primo rapporto adimensionale:

$$\left(\frac{h}{b}\right)$$

Sfruttando nuovamente il documento [29] si impone il mantenimento del medesimo Cluster Area Ratio AR:

$$AR = \frac{A_E}{A_{\text{gola}}} = 12,65$$

e di conseguenza si ricavano l'area e l'altezza di uscita:

$$A_E = \frac{AR}{A_{\text{gola}}}$$
$$h_E = \frac{A_E}{b_{\text{gola}}}$$

L'ugello però non è ancora totalmente dimensionato, per definire il profilo della spina e la lunghezza ideale (ossia quella senza troncamento), si usa il codice Matlab di Angelino [30] che sfrutta il metodo delle caratteristiche. Esso richiede come input:

- l'altezza di gola pari a 5,5 o 2,55 mm;
- il cluster Area Ratio pari a 12,65;
- il rapporto tra i calori specifici noto come γ e pari a 1,4;

e fornisce come output i valori, comparati a quelli del [29], riassunti nella Tabella 2.3:

	Festip	Caso 1	Caso 2
$M_{ m uscita}$	$4,\!19$	$4,\!19$	4,19
Lunghezza ideale (l_{max}) [mm]	360,00	$282,\!90$	131,16
Tilt angle $[\circ]$	67,84	68,18	68,18

Tabella 2.3: Comparazione

A questo punto non rimane che chiarire il discorso relativo all'accoppiamento tra la camera pre-ugello e il resto dell'apparato. Come affermato nel precedente capitolo, la contrazione di Borger, presente nel banco di prova del documento [1] non viene utilizzata. Questo come conseguenza della differente dimensione dei due apparati: mentre in quello del documento [1] risulta necessario procedere con una riduzione della sezione principale, in quello in progettazione non occorre, dal momento che, la larghezza di entrambi gli ugelli è maggiore di quella che si otterrebbe all'ingresso della camera pre-ugello se si imponesse la presenza del tratto convergente. In altre parole, risulterebbe completamente inutile restringere la sezione per poi doverla riallargare subito dopo per poter garantire il corretto accoppiamento tra camera-ugello; accoppiamento mostrato nelle Figure 2.2 e 2.3.



Figura 2.2: Cad dell'accoppiamento camera-ugello con altezza di gola 5,5 mm



Figura 2.3: Cad dell'accoppiamento camera-ugello con altezza di gola 2,55 mm

2.0.2 Il codice di Angelino

In questa sezione si è deciso di riportare il codice che, inserito in Matlab, ha permesso di ricavare il profilo della spina dell'ugello. E' stato trovato nell'articolo [30]. Il codice originale è riportato completamente qui di seguito. Esso però è stato sviluppato per ugelli Aerospike di tipo anulare, di conseguenza, per adattarlo a quello di tipo lineare, è stato necessario intervenire nella parte iniziale modificando il modo con cui viene calcolata sia l'area di gola che quella di uscita. Più precisamente, si è passati dal calcolare le sezioni da circolari a rettangolari. La correttezza di questa modifica è ovviamente stata verificata: introducendo nel codice modificato i tre dati di input del documento [29], si è verificato che gli output coincidessero con quelli forniti dal documento stesso. A questo punto, introducendo i dati del progetto fino ad ora ricavati, sono stati ottenuti i nuovi valori riassunti nella Tabella 2.4.

```
1 A_t = pi*((t_diam/2)^2); % throat area
```

```
A_e = AR * A_t;
```

```
3 r_e = sqrt(A_e/pi);
```

```
M_e=AR2Mach(AR,gamma);
   nu_e = Mach2Prandtl(M_e,gamma);
\mathbf{5}
   N = 1000000;
  M_vals = linspace(1,M_e,N);
7
   AR_vals = Mach2AR(M_vals,gamma);
  nu_vals = Mach2Prandtl(M_vals,gamma);
9
   mu_vals = Mach2Mangle(M_vals);
11
   alpha_vals = nu_e-nu_vals+mu_vals;
   % non-dimensional values
  l_nondim_vals = (1-sqrt(1-(AR_vals.*(1-(eta_b.^2)).*M_vals
13
   .*(sin(alpha_vals)./AR))))./sin(alpha_vals);
15 r_nondim_vals = 1-(l_nondim_vals.*sin(alpha_vals));
   x_nondim_vals = l_nondim_vals.*cos(alpha_vals);
  y_nondim_vals = l_nondim_vals.*sin(alpha_vals);
17
   Length_nondim = max(x_nondim_vals)-min(x_nondim_vals);
  % dimensional values
   l_vals = l_nondim_vals.*r_e;
  r_vals = r_nondim_vals.*r_e;
21
   x_vals = x_nondim_vals.*r_e;
  y_vals = y_nondim_vals.*r_e;
23
   Length = Length_nondim.*r_e;
  %Plotting
25
   figure
  plot(r_nondim_vals, x_nondim_vals);
   xlabel('r/r e')
  ylabel('x/r_e')
29
   figure
  plot(x_nondim_vals,y_nondim_vals,0,0,'o');
31
   xlabel('x/r_e')
  ylabel('y/r_e')
33
   figure
  plot(r_vals,x_vals,0,0,'o');
35
   xlabel('r')
  ylabel('y')
37
   fprintf('Exit_Mach_number_=_%g_\n',M_e)
  fprintf('Length_{\sqcup}=_{\sqcup}%g_{\sqcup}[in]_{\sqcup} \setminus n', Length)
39
   fprintf('Cowl_USeperation_u=_U%g_u[in]_u \n_u \n', min(l_vals))
  fprintf('Flow_Turn_Angle_=u%gu[deg]u\n',nu_e*180/pi)
41
   \% Create a text file containing coordinates for input in CAD
43
   n = 500;
   m = N/n;
   p = length(x_vals);
45
   x = x_vals(1:m:p);
   y = y_vals(1:m:p);
\overline{47}
   z = zeros(1,n);
49
   A = [x; y; z];
   fileID = fopen('Aerospike_spina.txt','w');
  fprintf(fileID,'%6.10fu%12.10fu%12.10f\n',A);
   fclose(fileID);
  % Description: Sub-program Uses the secant method to find the Mach number
53
   % associated with a given Prandtl-Meyer angle.
   function M = Prandtl2Mach(nu,gamma)
55
   MOu = 6; % first initial guess (upper bound)
  M01 = 1.25; %second initial guess (lower bound)
57
   maxits = 50; % maximum number of iterations
   tolerance = 0.000001; % tolerance
   i = 0; % initialize i
  f1 = sqrt((gamma+1)/(gamma-1)); % constant function of gamma
61
   f2 = sqrt((gamma-1)/(gamma+1)); % constant function of gamma
   f = f1*atan(f2*sqrt((Mou^2)-1))-atan(sqrt((Mou^2)-1))-nu; % Prandtl-Meyer function
63
   j = abs(f); % initialize j which checks how close to zero our current guess gets us
   while j>tolerance && i<=maxits
65
      f = f1*atan(f2*sqrt((M01<sup>2</sup>)-1))-atan(sqrt((M01<sup>2</sup>)-1))-nu;
      k = f1*atan(f2*sqrt((MOu<sup>2</sup>)-1))-atan(sqrt((MOu<sup>2</sup>)-1))-nu;
67
      y = (MOl * k - MOu * f) / (k - f);
      MOl = MOu;
69
      MOu = y;
      f = f1*atan(f2*sqrt((M0u^2)-1)) - atan(sqrt((M0u^2)-1)) - nu;
71
      j = abs(f);
      i = i+1;
73
   end
   M = MOu;
75
   end
```

```
%Converting Mach number to Prandtl-Mever angle
77
     function [nu] = Mach2Prandtl(M,gamma)
    f1 = (gamma+1)/(gamma-1);
79
    f_2 = 1/f_1:
    nu = sqrt(f1).*atan(sqrt((f2.*((M.^2)-1))))-atan(sqrt((M.^2)-1));
81
     end
    \% Getting the Mach angle from Mach number function [mu] = Mach2Mangle(M)
83
     function [mu] = Mach2Mangle(M)
    mu = asin(1./M);
85
     end
    % Mach number to area ratio (AR)
87
     function [AR] = Mach2AR(M,gamma)
    f1 = 2/(gamma+1);
89
    f2 = (gamma - 1)/2;
91
    f3 = (gamma+1)/(gamma-1);
    AR = sqrt((1./(M.^2)).*((f1.*(1+(f2.*(M.^2)))).^f3));
    end
93
     % Area ratio to Mach number
    function [M] = AR2Mach(AR,gamma)
95
    f1 = 2/(gamma+1);
97
    f2 = (gamma - 1)/2;
    f3 = (gamma+1)/(gamma-1);
    MO = 4;
99
    M = MO;
    Function = (1/(M^2))*((f1*(1+(f2*(M^2))))^f3)-(AR^2);
101
    Tolerance = 0.0001;
    maxits = 200;
103
    J = abs(Function);
105
    i = 1;
     while J>Tolerance && i<=maxits
        Function = (1/(M<sup>2</sup>))*((f1*(1+(f2*(M<sup>2</sup>))))<sup>(f3)</sup>)-(AR<sup>2</sup>);
107
        dFunction = (f3/(M^2))*((f1*(1+(f2*(M^2))))^{(f3-1)})
        *2*f2*f1*M + (-2/(M<sup>3</sup>))*((f1*(1+f2*(M<sup>2</sup>)))<sup>(f3)</sup>);
109
        y = M-(Function/dFunction);
        M = y;
111
        Function = (1/(M<sup>2</sup>))*((f1*(1+(f2*(M<sup>2</sup>))))<sup>(f3)</sup>)-(AR<sup>2</sup>);
        J = abs(Function);
113
        i = i+1;
115
     end
     end
```

Altezza gola [mm]	5,5	2,55
Tilt angle [°]	$68,\!17$	$68,\!17$
At $[mm^2]$	395,5	395,5
$Ae[mm^2]$	5003,1	5003,1
he [mm]	139,15	64,51
Spessore [mm]	35,95	77,55
$M_{ m uscita}$	4,18	4,18
Lunghezza ideale [mm]	282,9	131,1

Tabella 2.4: Output codice Angelino

2.0.3 Calcolo della pressione di progetto

Un'ultima operazione, a completamento della definizione dell'ugello, riguarda il calcolo della condizione di progetto. Nella sezione dedicata alla descrizione dell'Aerospike, si è spiegato, a grandi linee, ciò che accade sulla sua spina nelle diverse condizioni di funzionamento; ora, si procede da un punto di vista numerico. Il procedimento ha inizio considerando le relazioni della conservazione della portata tra la sezione di gola "t" e quella di uscita "E":

$$m_t = m_E$$

$$\frac{P_t^{\circ} A_t f\left(M_t\right)}{\sqrt{RT_t^{\circ}}} = \frac{P_E^{\circ} A_E f\left(M_E\right)}{\sqrt{RT_E^{\circ}}}$$

L'ipotesi di flusso isoentropico e adiabatico permette alcune semplificazioni con le quali si arriva a:

$$A_t f\left(M_t\right) = A_E f\left(M_E\right)$$

Conseguentemente si ricava la funzione del Mach nella sezione di uscita:

$$f\left(M_E\right) = \frac{A_t f\left(M_t\right)}{A_E}$$

A questo punto si conosce il primo membro della seguente equazione:

$$f(M_E) = \frac{\sqrt{\gamma}M_E}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_E^2\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}}$$

pertanto, sfruttando un procedimento iterativo, si inserisce nell'espressione un certo valore di M_E fintanto che l'uguaglianza non risulti perfettamente soddisfatta. Si ottengono due possibili risultati: il primo, essendo subsonico, viene subito scartato, il secondo invece con valore $M_E = 4, 19$, risultando supersonico, è accettabile. Oltre ad essere un valore accettabile, essendo anche il medesimo risultato ottenuto in precedenza con il codice di Angelino, rappresenta un'ulteriore conferma della correttezza del procedimento adottato fino a questo momento. Per concludere non occorre far altro che considerare la relazione tra pressione statica, quella totale e numero di Mach:

$$\frac{P^{\circ}}{P_E} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_E^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

dalla quale è facile ottenere la pressione di ristagno di progetto:

$$P^{\circ} = 200 \ bar$$

Portata a termine questa prima parte progettuale, lo step successivo consta di una fase numerica.

Capitolo 3

Analisi fluidodinamica computazionale 2D dell'ugello Aerospike

Introduzione

Questo capitolo prevede la realizzazione di un modello atto allo svolgimento di alcune analisi fluidodinamiche bidimensionali, ottenute mediante l'utilizzo del software commerciale Ansys Fluent R2 2020, la loro validazione, attraverso il confronto con l'articolo [29] e un loro commento. Ansys Fluent è dotato di un foglio di lavoro denominato Workbench nel quale si può definire, step by step, lo schema della propria simulazione. La Figura 3.1 mostra le cinque fasi principali qui sotto riassunte brevemente:

- Geometry: la definizione del dominio fisico che si vuole analizzare;
- Mesh: la griglia di calcolo che discretizza lo spazio continuo;
- Setup: le impostazioni dei parametri della simulazione;
- Solution and Results: la rappresentazione dei risultati ottenuti;



Figura 3.1: Fasi del programma Ansys Fluent

Nelle sezioni successive ognuno di questi punti verrà analizzato in maniera più dettagliata.

3.1 Geometria

La realizzazione del modello parte con la definizione della geometria. Essa, in questo caso, può esser suddivisa in due parti:

- la zona interna, quella attraverso cui il fluido raggiunge la gola dell'ugello;
- la zona esterna che, contenendo il campo di moto attorno il plug dell'ugello, rappresenta l'effettiva regione di studio;

Mantenendo uguale il campo di moto esterno, si è deciso di considerare due possibili ingressi: il primo, definito da questo momento in poi "ingresso a becco di pappagallo", riprende esattamente l'ingresso del documento [29]; l'altro, invece, rappresentato da un semplice convergente, favorisce il raggiungimento della sonicità in gola. Inoltre, poichè nel capitolo precedente si sono ottenute due possibili altezze di gola, si è deciso di analizzarle entrambe con i diversi ingressi, ottenendo perciò quattro possibili accoppiamenti. Proprio le Figure 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 li mostrano, per intero e con dettaglio dell'ingresso.





Figura 3.2: Ingresso convergente 5,5 mm: campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio dell'ingresso (a destra)



Figura 3.3: Ingresso "becco di pappagallo" 5,5 mm: campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio dell'ingresso (a destra)



Figura 3.4: Ingresso convergente 2,55 mm: campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio dell'ingresso (a destra)



Figura 3.5: Ingresso "becco di pappagallo" 2,55 mm: campo di moto completo (a sinistra) e dettaglio dell'ingresso (a destra)

In conclusione di questo primo step, la Figura 3.6 [7] mostra il campo di moto: sia la parte interna che il perimetro sono stati frazionati, però, mentre l'interno è stato suddiviso in diverse regioni per facilitare la successiva generazione della mesh, è stato necessario suddividere e denominare il contorno per, come si vedrà in seguito, assegnare a ciascun segmento una precisa condizione al contorno.



Figura 3.6: Nomenclatura del campo di moto [7]

3.2 Generazione della mesh

La mesh è una griglia di calcolo che, discretizzando lo spazio continuo, permette di applicare dei metodi di risoluzione iterativi al fine di risolvere le equazioni di Navier-Stokes ed ottenere così la risoluzione del campo di moto attorno ad un corpo. Tanto più le celle che formano la griglia sono piccole e regolari, tanto più precisa e corretta è la soluzione a cui si arriva. La Figura 3.7 mostra, a titolo d'esempio, la mesh ottenuta per l'ingresso a "becco di pappagallo". E' costituita da circa 65000 celle non equamente distribuite in quanto occorre generare una griglia più fitta e accurata laddove il campo di moto risulta essere di maggior interesse; al contrario laddove il fluido è quasi uniforme o fermo si possono accettare senza grandi problemi delle celle di dimensioni maggiori. Questo è necessario dal momento che, tanto maggiore è il numero di discretizzazioni, tanto più alto è sia il costo computazionale che il tempo necessario per arrivare ad una soluzione.



Figura 3.7: Esempio di mesh per ingresso a "becco di pappagallo"

3.3 Setup simulazioni numeriche

3.3.1 Introduzione

Le simulazioni numeriche sono state svolte imponendo quattro rapporti, definiti anche NPR, tra la pressione totale in ingresso $P_c = P^{\circ}$ e quella in uscita P_a , pari a quella ambiente. Di questi, tre sono stati utilizzati, confrontandoli con quelli del documento[29], per uno scopo di validazione. Il quarto caso, invece, rappresenta la "condizione di lavoro" del banco di prova progettato.

3.3.2 Modello fisico

Il primo passo riguarda la definizione di un modello fisico in grado di descrivere la fisica del problema. Più precisamente si sfruttano equazioni matematiche per modellizzare determinati fenomeni in particolari condizioni [32]. In Ansys Fluent ciò è avvenuto inizializzando il solutore. La Tabella 3.1 riassume i parametri generali che il programma richiede di impostare. Innanzitutto si è definito il tipo di fluido, aria, e il suo comportamento, gas ideale. Inoltre si è optato per un solutore Density-Based in quanto più accurato nel caso di flusso compressibile ad alta velocità. Per quanto riguarda la turbolenza: dal momento che si tratta di un fenomeno per lo più caotico e che quindi cambierebbe da un caso all'altro non è necessario conoscerlo nei più piccoli dettagli. Pertanto, risolvere le equazioni da un punto di vista statistico è sufficiente nella maggior parte dei casi, incluso quello in questione. Da qui la necessità di risolvere delle equazioni che, in qualche modo, modellano il contributo delle fluttuazioni turbolente sul flusso medio. Il numero e il tipo di equazioni differenziali aggiuntive e accoppiate a quelle di conservazione definiscono il modello. In particolare, senza andare troppo nel particolare, quello utilizzato in questa tesi è il modello Spalart-Allmaras. Esso, caratterizzato da una sola equazione di chiusura, ha il vantaggio non solo di essere a basso costo computazionale ma anche di comportarsi bene con i problemi di aerodinamica esterna e in presenza di flussi con elevati gradienti di pressione [33].

Fluent Fluid Material	Air
Density	Ideal Gas
Solver	Density-Based
2D Space	Planar
Viscous Model	Spalart-Allmaras (1 eqn)

Tabella 3.1: Parametri del solutore

3.3.3 Metodo numerico

Realizzato il modello geometrico, costruita la mesh e definito il modello fisico, si prosegue con l'impostazione del metodo numerico. In mancanza di una soluzione analitica delle equazioni di Navier-Stokes, la fluidodinamica computazionale sfrutta il concetto di discretizzazione del dominio, ossia suddivide lo spazio di interesse in una griglia di elementi finiti all'interno dei quali il calcolatore risolve iterativamente le equazioni inerenti al problema. Pur esistendo tre possibili metodi (differenze finite, elementi finiti e volumi finiti), Ansys Fluent, come molti altri software commerciali, sfrutta quello ai volumi finiti. Con esso le equazioni differenziali alle derivate parziali che compongono il problema vengono integrate su di un volume discreto detto cella. La Tabella 3.2 riassume le scelte impostate: il metodo numerico sfruttato è quello Upwind del secondo ordine con formulazione implicita mentre, come tipo di flusso, si è lasciato il Roe-FDS, quello predefinito dal programma Fluent e consigliato per la maggior parte dei casi [34].

Tabella 3.2: Parametri del metodo numerico

Formulation	Implicit
Flux Type	Roe-FDS
Flow Discretization	Second Order Upwind
Turbolent Viscosity Discretization	Second Order Upwind

3.3.4 Condizioni al contorno

Per ottenere un'accurata soluzione è fondamentale imporre appropriate condizioni al contorno, in quanto esse determinano il modo in cui il flusso si svilupperà all'interno del dominio. In altre parole, ogni "Boundary Condition" specifica il comportamento delle varie superfici al passaggio del flusso e sono quindi una componente critica al fine di ottenere una soluzione accettabile. Una volta costruita la mesh, il programma assegna di default a ciascuna superficie la caratteristica di "No Slip and No Moving Wall"; è perciò necessario modificare le impostazioni su quelle con comportamenti differenti. La Figura 3.8 [7] e la Tabella 3.3 mostrano quelle imposte nelle successive simulazioni. Segue una loro breve descrizione:

- Pressure-inlet: hanno questa condizione le superfici attraversate dal flusso in ingresso, con pressione nota. Sono richiesti, come valori da inserire, la "Gauge Pressure" in questo caso uguale alla pressione totale e i parametri relativi alla turbolenza [31].
- Pressure-outlet: hanno questa condizione le superfici attraversate dal flusso in uscita, con pressione nota. Sono richiesti, come valori da inserire, la "Gauge Pressure" in questo caso uguale alla pressione totale, i parametri relativi alla turbolenza e il trattamento del "Reverse Flow", assente una volta che la soluzione ha raggiunto la convergenza [31].
- Symmetry: utilizzata per le superfici che sono di simmetria per la soluzione. In loro corrispondenza Fluent assume gradienti normali nulli per qualsiasi variabile e una velocità perfettamente parallela [31].
- Wall: utilizzata per indicare la presenza di una parete con caratteristiche di adiabaticità e rugosità standard [31].



Figura 3.8: Condizioni al contorno [7]

Denominazione perimetro	Condizione al contorno
Inlet	pressure inlet
Plug	wall
Base	wall
Symmetry	symmetry
Outlet	pressure outlet
Free Stream	pressure outlet
Wall	wall

Tal	bella	3.3:	Condizioni	al	contorno
-----	-------	------	------------	----	----------

3.3.5 Inizializzazione della simulazione

La Tabella 3.4 riporta non solo il numero delle casistiche che si andranno ad analizzare, ma anche i valori delle condizioni al contorno che devono essere impostati per poter inizializzare correttamente una simulazione. Inoltre, le Figure 3.9, 3.10 e 3.11 mostrano come tale impostazione debba essere effettuata nel software Ansys Fluent.

Caso	NPR = Pc/Pa	T° Inlet[K]	P° In	llet [Pa] $ P^{\circ}$ Outlet [Pa		t [Pa]	P° Free Stream		n [Pa]		
1	4,2	300	32	4240	0			0			
2	6,5	300	557	7287,5	0			0			
3	10,1	300	922	2057,5	0			0			
4	25,1	300	244	1932,5	0						
	Pressure Outlet							×			
	Zone Name										
	outlet	outlet									
	Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS										
	Bac	kflow Reference	Absolute		Cattura	rettangolare	-				
		Gauge P	ressure	(pascal) 0				•			
	Pi	Pressure Profile Multiplie				1					
	Backflow Direction	Backflow Direction Specification Method				Normal to Boundary					
	Backflov	v Pressure Specif	fication	Total Pressure				-			
	Prevent Rever	se Flow									
	Average Press	ure Specification	ı								
	Target Mass F	low Rate									
	Turbulence										
		Specification Method Turbulent Viscosity Ratio									
	Backflow Tu	urbulent Viscosity	y Ratio	50				-			
	Acoustic Wave Model										
	 Off Non Reflecting 										
	Apply Close Help										

Tabella 3.4: Valori iniziali dei casi analizzati

Figura 3.9: Condizione di Pressure outlet

In riferimento alla terza colonna della Tabella 3.4 occorre specificare che, avendo imposto nel programma una pressione operativa pari a quella ambiente, i valori che vi appaiono sono stati ridotti di 101325 Pa, ossia della cosidetta "Operating Pressure". Ecco spiegato il motivo per cui nelle ultime due colonne anzichè avere 101325 Pa appare il valore nullo. A questo punto, dopo aver impostato il numero delle iterazioni che si vuole che il calcolatore computi, è possibile avviare la simulazione vera e propria.

📧 Wall						×
Zone Name						
plug						
Adjacent Cell Zone						
surface_body						
Momentum Thermal Radiatio	n Species	DPM	Multiphase	UDS	Potential	Structure
Wall Motion Motion						
Stationary Wall I Relate I	tive to Adjace	nt Cell Zone				
O Moving Wall						
Shear Condition						
No Slip						
○ Specified Shear						
○ Specularity Coefficient						
O Marangoni Stress						
Wall Roughness						
Roughness Models	Sand-Grain	Roughness				
 Standard 	Roughness Height (m) 0					
O High Roughness (Icing)	Roughness Constant 0.5					



Figura 3.10: Condizione Wall

ential UDS
ential UDS
*
•
+
•
•

Figura 3.11: Condizione di Pressure inlet

3.4 Risultati

I risultati ottenuti sono presentati mediante una serie di grafici: alcuni descrivono la distribuzione di pressione sul plug dell'ugello, altri permettono la visualizzazione del numero di Mach sull'intero dominio di calcolo.

3.4.1 Grafici di pressione

Per visualizzare al meglio l'andamento della pressione sulla parete del plug e per rendere un'eventuale comparazione degli andamenti il più facile possibile, è risultato opportuno adimensionalizzare entrambi gli assi di riferimento: quello delle ascisse rispetto alla lunghezza del plug ideale l_{max} (ossia senza alcuna troncatura), l'altro rispetto alla pressione totale di ingresso. Ricordando inoltre che l'Operative Pressure è stata imposta pari a quella ambiente, è stato necessario aumentare i risultati ottenuti di 101325 Pa prima di tracciare i vari grafici. Le Figure 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 sono i grafici ottenuti per entrambi gli ingressi e le altezze di gola. Sono di due tipi:

- sui primi quattro compaiono quattro andamenti coincidenti con i differenti NPR definiti precedentemente;
- sugli ultimi quattro compaiono sei andamenti: tre sono ricavati dalle simulazioni, i restanti dall'articolo sperimentale [29]. Paragonandoli a due a due è stato possibile trovare una conferma circa la validità del modello costruito e utilizzato;



Figura 3.12: Caso con ingresso convergente e altezza di gola 5,5 mm: rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR.

Osservando e confrontando a due a due i risultati sperimentali e quelli ottenuti con le simulazioni, si può affermare che, per entrambe le configurazioni ma soprattutto per quella con ingresso convergente, gli andamenti per NPR=10,1 e NPR=25,1 sono quasi totalmente coincidenti. Peggiori sono invece i risultati ottenuti per NPR=4,2: l'ingresso convergente presenta di nuovo un comportamento migliore, mentre, nell'ingresso convergente, è evidente il disallineamento tra la posizione sia dei minimi che dei massimi. Un'ultima condizione che



Figura 3.13: Caso con ingresso convergente e altezza di gola 2,55 mm: rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR.



Figura 3.14: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR.

si è deciso di graficare è quella di progetto, coincidente con il caso NPR = 200. Ciò che ci si aspettava era un andamento iperbolico e, a riprova della validità e correttezza del metodo, le Figure 3.20, 3.21 mostrano che effettivamente quello che si è ottenuto è, per tutti i casi, un ramo di iperbole.



Figura 3.15: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 2,55 mm: rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug per quattro NPR.



Figura 3.16: Caso con ingresso convergente e altezza di gola 5,5 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e i risultati sperimentali di [29]

3.4.2 Grafico Iso-Mach

La seconda tipologia di immagini che si è deciso di riportare rappresenta l'andamento del numero di Mach sull'intero campo di moto. A titolo di esempio, si riporta, per NPR crescenti, il caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm. In particolare si ha:

- la Figura 3.22 per NPR = 4,2;
- la Figura 4.8 per NPR = 6,5;
- la Figura 3.24 per NPR = 10,1;



Figura 3.17: Caso con ingresso convergente e altezza di gola 2,55 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e i risultati sperimentali di [29]



Figura 3.18: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e i risultati sperimentali di [29]

- la Figura 3.25 per NPR =25,1;
- la Figura 3.26 per NPR = 200;
- la Figura 3.27 per NPR = 300;

L'ultimo caso, mai riportato in precedenza, è stato aggiunto per fornire una rappresentazione della condizione di getto sottoespanso.

Innanzitutto è opportuno osservare che, per ciascuno degli NPR analizzati, il flusso raggiunge



Figura 3.19: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 2,55 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra la simulazione bidimensionale e i risultati sperimentali di [29]



Figura 3.20: Caso NPR=200 con ingresso convergente e altezza di gola 5,5 mm (a sinistra) e 2,55 mm (a destra): rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug

la condizione di sonicità M = 1 in gola. Questo è necessario per garantire l'espansione, l'accelerazione e pertanto la generazione di spinta, da parte del flusso, da quel punto in poi. Inoltre si può facilmente notare come la forma del getto, a seconda dell'NPR, subisca un continuo cambiamento di forma e dimensione: riprendendo in parte ciò che è stato affermato nell'introduzione, il getto può essere: sovraespanso, apparendo compresso contro la parete del plug, adattato, quando assume una direzione parallela all'asse dell'ugello, massimizzando quella che è la spinta generata o, infine, sottoespanso se si allarga dal plug verso l'esterno.



Figura 3.21: Caso NPR=200 con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm (a sinistra) e 2,55 mm (a destra): rappresentazione della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug



Figura 3.22: Rappresentazione del Mach con NPR=4,2



Figura 3.23: Rappresentazione del Mach conNPR=6,5



Figura 3.24: Rappresentazione del Mach con NPR=10,1



Figura 3.25: Rappresentazione del Mach con NPR=25,1



Figura 3.26: Rappresentazione del Mach con NPR=200



Figura 3.27: Rappresentazione del Mach con NPR=300

Capitolo 4

Analisi fluidodinamica computazionale 3D dell'ugello Aerospike

Per completare lo studio numerico si è deciso di svolgere un'analisi tridimensionale. Questo nonostante il fatto che, la versione Student del programma Ansys Fluent, come quella di molti altri, presenta un'importante limitazione riguardante la mesh e, più precisamente, il numero massimo di elementi da cui essa può esser costituita (512000 celle). Se da una parte, ricordando che per un singolo piano, nell'analisi 2D, erano state necessarie circa 65000 celle, 512000, per un corpo 3D, risulta un numero davvero esiguo, dall'altra il costo computazionale sale con estrema velocità. Basti pensare che il tempo necessario alla simulazione, è passato dalle poche decine di minuti del caso precedente a qualche ora. Conseguentemente, non disponendo di uno strumento abbastanza potente e veloce, si è deciso di svolgere due sole simulazioni, a NPR=4,2 e NPR=6,5, per un unico caso, quello con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm. La prima di queste, a scopo di validazione, la seconda, per avere dei risultati inerenti alla condizione in cui l'apparato si troverà realmente ad operare. La tipologia di ingresso, a becco di pappagallo, e l'altezza di gola, di 5,5 mm, sono state il risultato di un preciso ragionamento in quanto: la prima permette di aderire completamente alla configurazione geometrica del documento [29], per quanto riguarda la seconda, la motivazione è leggermente più lunga. Come per la prima scelta, lo scopo è quello di avvicinarsi quanto più possibile all'ugello del documento [29]: come riportato nel secondo capitolo però, non si ha un'unica possibile scelta. Un'altezza di 2,55 mm infatti comporterebbe il medesimo parametro adimensionale altezza su larghezza ma un differente numero di Reynolds, mentre per l'altezza di 5.5 mm la situazione è esattamente l'opposta. Optando per la seconda opzione si è deciso di privilegiare il numero di Reynolds.

Prima di cominciare occorre spiegare un'ulteriore scelta riguardante l'ugello. Nonostante nella realtà il componente non presenti delle pareti laterali che confinerebbero il getto impedendogli un'espansione in quella direzione, durante l'inizializzazione della simulazione il dominio di calcolo è stato modellizzato come se queste pareti fossero effettivamente presenti. La motivazione è di nuovo legata al sopracitato limite del programma, in quanto, se si volesse simulare l'ugello privo di pareti laterali occorrerebbe definire una geometria del campo di moto del flusso molto più larga. Solo in questo modo infatti, data la grande distanza tra l'ugello e le pareti del box che lo avvolgerebbero, si potrebbe imporre su di esse la condizione al contorno di pressure outlet=pressione ambiente. Questa operazione però, richiedendo milioni di celle, sforerebbe il numero di elementi di cui si dispone. Al contrario, imponendo la presenza di pareti attorno l'ugello, la condizione al contorno di "Wall" è facilmente impostabile e, soprattutto, non richiede un allargamento del dominio di calcolo. Chiarito ciò, segue la descrizione dei passaggi eseguiti per costruire la nuova simulazione.

4.1 Geometria

La Figura 4.1 mostra la geometria: la forma, identica al caso bidimensionale, è il dominio di calcolo mentre la tridimensionalità è definita dalla profondità ossia dalla larghezza dell'ugello.



Figura 4.1: Geometria tridimensionale

4.2 Generazione della mesh

La Figura 4.2 mostra la Mesh: a sinistra una rappresentazione isometrica, a destra il dettaglio di una delle sue facce: quella laterale. Per ottenere dei risultati quanto più possibile accurati si è discretizzato il dominio con tutte le celle a disposizione infittendo le zone di maggior interesse e rilevanza.

Per quanto riguarda l'identificazione delle superfici del volume: i nomi della maggior parte sono uguali a quelli della precedente simulazione con la sola differenza che, mentre qui si tratta effettivamente di superfici, prima erano dei semplici contorni 1D. Tra queste si ricordano: inlet ad indicare l'ingresso, outlet per l'uscita, plug per la spina, base per la superficie della spina che è stata troncata, symmetry ad indicare l'area di simmetria del corpo, wall per le pareti che contornano l'ingresso ed, infine, free stream per indicare una parte di fluido non a contatto con pareti. Ad esse si aggiungono le cosiddette laterali walls. Come indicato nella Figura 4.3, queste coincidono con le due superfici laterali del campo di moto tridimensionale che, come mostrato della Figura 4.4, nella realtà potrebbero essere rappresentate da due paratie avvolgenti l'ugello. Come anticipato nell'introduzione, a queste si attribuisce la condizione al contorno di "Wall".



Figura 4.2: Struttura della mesh: rappresentazione isometrica (a sinistra) e della faccia laterale (a destra)



Figura 4.3: Condizione al contorno Wall



Figura 4.4: Ugello con vetrini laterali

4.3 Inizializzazione della simulazione e risultati

Il Setup, risultando identico a quello bidimensionale, non viene descritto, al contrario si riportano qui di seguito i vari risultati ottenuti. Dapprima ovviamente quelli del caso NPR=4,2, solo in seguito alla loro validazione, quelli con NPR=6,5.

4.3.1 Grafico dell'andamento della pressione sul plug per NPR=4,2

Per permettere un preciso confronto si è proceduto alla costruzione di grafici del tutto simili a quelli della simulazione bidimensionale che, ricordiamo, riportavano tutti gli andamenti in un unico grafico con gli assi cartesiani adimensionalizzati. La Figura 4.5 mostra il risultato ottenuto. Essa riporta tre andamenti: quello della simulazione numerica bidimensionale, quello di quella tridimensionale e quello rappresentante il risultato ottenuto dalla prova sperimentale all'interno del progetto Festip. Per quanto concerne la simulazione 3D è opportuno un chiarimento: per poter procedere con una corretta comparazione si è dovuta scegliere un'unica sezione longitudinale dell'ugello tridimensionale da cui ricavare la distribuzione di pressione. La scelta è ricaduta su quella centrale di modo da limitare, quanto più possibile, l'influenza delle pareti laterali. Chiarito ciò, il risultato ottenuto è molto buono in quanto i tre andamenti risultano molto somiglianti: la pressione, causa la forte espansione del flusso, decresce repentinamente nella parte iniziale della spina, mentre assume un valore più o meno costante nella porzione successiva. Ad una più attenta osservazione, si possono riconoscere alcune piccole differenze nella posizione di alcuni picchi di pressione. Questo però non dovrebbe essere un grande problema in quanto differenze così piccole potrebbero essere dovute a leggeri cambiamenti nei fasci di espansione.



Figura 4.5: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra il caso bidimensionale, quello tridimensionale e quello sperimentale del documendo [29]

4.3.2 Grafico dell'andamento della pressione sul plug per NPR=6,5

In seguito ai buoni risultati ottenuti con NPR=4,2, è stato possibile procedere con il caso successivo. Anche in questo caso, come mostrato dalla Figura 4.6, gli andamenti, comunque molto simili, si differenziano soprattutto per la posizione di alcuni loro picchi.

4.3.3 Grafico Iso-Mach per NPR=6,5

Per fornire un'ulteriore informazione si è deciso di riportare, in Figura 4.7, anche l'andamento del Mach. Questo permette un'ulteriore comparazione con la Figura 4.8 rappresentante la medesima situazione ma nel caso 2D. In entrambi viene raggiunta la sonicità in gola, poi il getto, a causa del basso rapporto di pressione, si sviluppa principalmente contro la parete del plug, supera la base, davanti la quale si forma una zona di ricircolo a bassissima velocità, poi, infine, prosegue il suo "cammino" verso valle. Concentrandosi invece sulle differenze si può notare che: nel caso bidimensionale la porzione del getto di colore rosso, indicante un flusso con Mach di circa 1,91, è abbastanza spessa nell'intera zona contro la parete del plug e anche leggermente dopo la sua troncatura, al contrario, in quello tridimensionale il colore rosso tende all'arancione. Ciò significa che quest'ultimo getto, che appare anche più compattato contro la parete stessa della spina, è caratterizzato da un Mach inferiore. Una possibile spiegazione



Figura 4.6: Caso con ingresso a becco di pappagallo e altezza di gola 5,5 mm: confronto della distribuzione di pressione $\frac{P}{P^{\circ}}$ in funzione della distanza $\frac{x}{lmax}$ con l_{max} la lunghezza ideale del plug tra caso tridimensionale e bidimensionale

potrebbe riguardare la presenza, nel caso 3D, delle pareti laterali: esse infatti, generando uno strato limite, dissipano una parte di energia del flusso, generando, di conseguenza, una piccola diminuzione di velocità e quindi di Mach.



Figura 4.7: Caso 3D: rappresentazione del Mach con NPR=6,5



Figura 4.8: Caso 2D: rappresentazione del Mach con NPR=6,5

Conclusioni

La progettazione preliminare del banco di prova per ugelli è stata portata a termine con attenzione e scrupolosità: tutti i componenti, inizialmente semplicemente elencati, sono stati accuratamente descritti, dimensionati e disegnati in Solidworks. La loro riproduzione, quanto più accurata possibile, ha permesso, come ultimo step, di presentare un Cad completo dell'apparato finale. La ricerca di alcuni componenti ha comportato alcune difficoltà, ciononostante si è sempre cercato di trovare i migliori compromessi e soluzioni.

Per quanto riguarda la sezione delle simulazioni numeriche, i risultati ottenuti sono stati molto soddisfacenti. Sia nel caso bidimensionale che in quello tridimensionale, la comparazione con risultati riportati in letteratura, ha permesso la loro completa e assoluta validazione. In questo modo, appurato il corretto funzionamento del modello, si è potuta eseguire l'analisi a NPR=6,5 che ha permesso di ricavare il possibile andamento del getto dell'ugello nelle condizioni in cui l'apparato, una volta costruito, si troverebbe ad operare. Sicuramente, disponendo di strumenti di calcolo più potenti e veloci, lo studio 3D andrebbe ulteriormente approfondito nei vari altri casi dal momento che, uno spessore maggiore, come quello del caso con altezza di gola 2,55 mm, potrebbe portare a differenti risultati.

Detto questo, con uno sguardo verso il futuro, si possono immaginare alcuni eventuali ulteriori sviluppi che il progetto in questione potrebbe avere: grazie alla modularità con cui è stato pensato l'apparato, figura la possibilità di ampliare l'analisi non ad uno ma a più ugelli diversificati non soltanto per le dimensioni ma anche per la tipologia. Inoltre, nonostante in questo lavoro non si sia mai parlato di "Thrust Vectoring", il controllo della spinta, e quindi della traiettoria di un razzo, è un fenomeno che è diventato di primario interesse. Anche in questo caso le modifiche da apportare non risulterebbero né lunghe né troppo laboriose. Si potrebbe infatti pensare di predisporre all'interno dell'ugello un piccolo condotto con il quale generare un'iniezione secondaria di flusso fuoriuscente dal plug stesso e, per determinarne l'effetto, sostituire la flangia estensimetrica adatta alla misura della sola compressione e trazione con una in grado di sopportare anche la flessione.

Infine le righe finali non possono che riguardare la concreta realizzazione del progetto. Sebbene lo scopo di questo elaborato sia stato una progettazione preliminare di un banco di prova, ogni passo compiuto e decisione presa, sono sempre stati fatti con un occhio di riguardo verso le fasi successive e alla loro modalità di attuazione. Da qui l'accurata attenzione per ogni tipo di dettaglio: dalla ricerca dei singoli componenti alla definizione delle loro necessarie dimensioni. Tutto questo con la speranza che, una volta completato ed in funzione, garantisca risultati quanto più possibili vicini a quelli ottenuti dalle varie simulazioni numeriche effettuate.

Bibliografia

- [1] Sieder-Katzmann, J., Propst, M., Stark, R., Schneider, D., General, S., Tajmar, M., Bach, C. (2019). ACTIVE-Experimental set up and first results of cold gas measurements for linear aerospike nozzles with secondary fluid injection for thrust vectoring. Proceedings of the 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences.
- [2] Meyer, M. L., Arrington, L. A., Kleinhenz, J. E., Marshall, W. M.(2012). Testing of a liquid oxygen/liquid methane reaction control thruster in a new altitude rocket engine test facility. National Aeronautics and Space Administration Washington, NASA/TM-2012-217643.
- [3] Frey, M., Stark, R., Cieaki, H., Quessard, F., Kwan, W. (2000). Subscale nozzle testing at the P6. 2 test stand. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.
- [4] https://www.nextaero.com.au 10-10-2020
- [5] Zucrow M.J. and Hoffmann J.D. (1976). Gas Dynamics. Wiley, New York, Vol. 1.
- [6] https://it.quora.com/Come-funziona-un-motore-Aerospike-lineare 10-10-2020
- [7] Marsicovetere, M. (2019) Applicazioni della vettorizzazione fluidica ad un aerospike lineare. Diss. Politecnico di Torino.
- [8] https://everydayastronaut.com/aerospikes/ 10-10-2020
- [9] Monaldi, A. (2014) Design di un ugello di tipo Aerospike e della linea sperimentale per la sua validazione. Diss. Politecnico di Milano.
- [10] https://aerospacecue.it/ugelli-aerospike-tecnologia-futuro/20752/ 10-10-2020
- [11] https://www.youtube.com/watch?v=-SGIiO1APigt=224s 10-10-2020
- [12] Carmicino, C. (2002) Alcuni aspetti della balistica interna di un endoreattore a propellenti ibridi e del comportamento di ugelli a spina troncata. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale, Università di Napoli.
- [13] https://it.scribd.com/document/318367311/Dispense-Motori-Per-Aeromobili 14-10-2020
- [14] https://www.giorgiengineering.com 10-10-2020
- [15] https://www.emerson.com 11-10-2020
- [16] https://www.oval.co.jp/english 7-07-2020
- [17] https://www.tecnovaht.it/pitot/ 10-10-2020

- [18] Mazzoldi, P., Nigro, M., Voci, C. Elementi di Fisica, Meccanica-Termodinamica. Edyses, 2007
- [19] De Angelis, E. (2016). Corso di fluidodinamica. Università di Bologna.
- [20] https://www.fujielectric.fr 10-10-2020
- [21] Bell, J.H., Mehta, R.D. (1988). Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels. NASA Ames Research Center: Moffett Field, CA, USA.
- [22] Stark, R., Strauss, F., General, S., Schneider, D. (2019). Experimental Study on Shock Pattern and Noise Emission of a Rocket Nozzle Exhaust Jet. In 32nd international Symposium on Shock Waves (ISSW32).
- [23] https://www.raccorveneta.com 5-09-2020
- [24] http://www.sinergica-soluzioni.it/blog/.celle-di-carico-cosa-sono-e-come -funzionano-n113 5-10-2020
- [25] http://www.s2tech.it/ 5-10-2020
- [26] http://www.hbm.com 12-10-2020
- [27] http://www.kulite.com 21-08-2020
- [28] http://www.kulite.com/assets/media/201 12-10-2020
- [29] Hagemann, G., Immich, H., Van Nguyen, T., Dumnov. G.E. (1988). Advanced Rocket Nozzles. Journal of Propulsion and Power, vol. 14.
- [30] Bani, A. A. (2016). Design and analysis of an axisymmetric aerospike supersonic micronozzle for a refrigerant-based cold-gas propulsion system for small satellites.
- [31] Grella, S., Marchetti, L. (2014) Valutazione del flusso intorno ad una GT con diversi codici di calcolo. Diss. università degli studi di Pisa.
- [32] https://www.engineering3d.it/metodo-cfd-fluidodinamica.html 16-10-2020
- [33] Ghisu, T. (2017) Introduzione alla turbolenza. Corso di modellazione di sistemi a fluido. Università di Cagliari.
- [34] https://www.afs.enea.it Ansys Fluent User's Guide 10-10-2020.
- [35] Iuso, G. (2018) Corso di gasdinamica. Politecnico di Torino.

Ringraziamenti

Innanzitutto desidero ringraziare i Prof. Gaetano Maria Di Cicca, Roberto Marsilio e Michele Ferlauto per gli indispensabili consigli, la supervisione del lavoro e la grande disponibilità accordatami per tutto questo periodo. Inoltre ringrazio Elisa, cara amica e compagna di studio, la prima a consigliarmi ed aiutarmi in qualunque momento e su qualsiasi cosa. Grazie ancora a tutti coloro che mi sono sempre stati vicini: dai "colleghi" Serena, Alessandro, Giacomo, Federico, Silvia ed Emanuele che ho avuto la fortuna di incontrare e con i quali ho condiviso questi bellissimi anni di università, agli amici della palestra Giulia, Nicolò e Rocco con i quali ho condiviso fatiche ma anche e soprattutto gioie e puro divertimento. Infine, dedicando la stesura di questa tesi alla mia famiglia, voglio ringraziare tutti loro: GRAZIE ai miei genitori non solo per avermi dato l'opportunità di vivere al meglio questa magnifica esperienza, non solo di studio, ma anche di vita, ma ancora per avermi insegnato ad agire sempre secondo coscienza, educazione e lealtà verso gli altri, GRAZIE ai miei fratelli che, mi auguro, stiano avendo e avranno un'avventura ugualmente incredibile ed, infine, GRAZIE ai miei nonni, che, sempre premurosi ed affettuosi, occupano un posto speciale nel mio cuore. Un'avventura è giunta al termine ma la prossima è già li che mi attende e io non vedo l'ora di scoprire dove mi porterà.