

# INDICE

SOMMARIO .....	5
ABSTRACT .....	7
RINGRAZIAMENTI.....	9
INDICE .....	11
LISTA DEI SIMBOLI .....	15
ABBREVIAZIONI.....	17
LISTA DELLE FIGURE .....	19
LISTA DELLE TABELLE .....	23
AMBITO E OBIETTIVO DELLA TESI.....	13
1.1    Ambito della tesi: l'aerotermodinamica .....	13
1.2    Obiettivo della tesi: simulazione numerica del "gap" heating.....	13
FLUSSO IPERSONICO.....	15
2.1    Definizione di flusso ipersonico.....	15
2.1.1    Strati d'urto sottili.....	15
2.1.2    Strato di entropia .....	16
2.1.3    Flussi ad alta temperatura.....	17
2.1.4    Flussi a bassa densità .....	19
2.2    Interazioni viscoso ipersoniche .....	21
2.2.1    Introduzione .....	21
2.2.2    Interazioni viscoso forti e deboli .....	26
2.2.3    Interazioni onda d'urto ipersonica / strato limite .....	29
2.3    Riscaldamento aerodinamico ipersonico .....	31
2.4    Rientro in atmosfera .....	33
DATI E ESPERIMENTI DI RIFERIMENTO .....	37
3.1    Introduzione .....	37
3.2    Descrizione del lavoro svolto da ESA sul problema del "gap heating" .....	37
II MODELLO MOLECOLARE .....	51
4.1    Introduzione .....	51
4.2    Requisiti per una descrizione molecolare .....	52
4.3    Il gas semplice diluito.....	56
4.4    Proprietà macroscopiche in un gas semplice .....	58
4.5    Grandezze molecolari .....	60
4.6    Effetti di gas reale .....	62

IL METODO DI SIMULAZIONE DIRETTA DI MONTE CARLO (DSMC)	
67	
5.1	Introduzione ..... 67
5.2	Il metodo DSMC ..... 68
5.3	Effetti di gas reale per flussi non reagenti ..... 71
5.4	Il metodo DSMC e il programma DS2G ..... 73
5.5	Lo scopo del programma DS2G..... 76
5.5.1	La geometria..... 76
5.5.2	Il modello del gas..... 76
5.5.3	Interazioni gas-superficie ..... 77
5.5.4	Descrizione generale del programma DS2G..... 77
	SIMULAZIONE NUMERICA DEL “GAP” HEATING ..... 81
6.1	Definizione della geometria del modello..... 81
6.2	Definizione delle condizioni al contorno della corrente libera che investe il modello..... 82
6.3	Calcolo delle variabili termodinamiche..... 83
6.4	Applicazione del programma DS2G ..... 84
6.4.1	Introduzione ..... 84
6.4.2	Modo di operare del programma DS2G..... 84
6.4.2.1	Dati di ingresso generali..... 85
6.4.2.2	Dati di ingresso della corrente..... 85
6.4.2.3	Parametri computazionali..... 86
6.5	Descrizione dei diversi domini computazionali..... 87
6.6	Risultati computazionali ..... 89
6.6.1	Configurazione del flusso per diverse temperature della fessura.. 89
6.6.2	Pressioni e flussi di calore alle pareti per diverse temperature della fessura 91
6.6.3	Risultati sul numero di Knudsen ..... 95
6.7	Analisi dell’indipendenza dei risultati ottenuti dal numero di celle e dal numero di molecole..... 96
6.7.1	Analisi dell’indipendenza dei risultati ottenuti dal numero di celle 97
6.7.2	Analisi dell’indipendenza dei risultati ottenuti dal numero di molecole 102
	ANALISI TERMICA..... 107
7.1	Introduzione ..... 107
7.2	Definizione della geometria e delle condizioni al contorno del modello per l’analisi termica..... 107
7.3	Definizione dei carichi termici..... 109
7.4	Descrizione del programma QuickField..... 111
7.5	Modello numerico utilizzato per l’analisi termica ..... 112
7.5.1	Modello agli elementi finiti..... 113
7.6	Analisi termica ..... 114
7.7	Descrizione dei vari casi analizzati ..... 115

7.8	Risultati dell'analisi termica .....	116
7.8.1	Risultati ottenuti dall'analisi termica utilizzando la griglia 1 .....	117
7.8.2	Risultati ottenuti utilizzando la griglia 2.....	119
7.8.3	Risultati ottenuti utilizzando la griglia 3.....	120
7.9	Analisi dell'indipendenza dei risultati dell'analisi termica dalla griglia utilizzata .....	121
	CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI E QUELLI OTTENUTI DA ESA .....	123
8.1	Confronto tra le distribuzioni di flusso di calore ottenuti con il programma DS2G e quelli ottenuti con il codice di Navier-Stokes nella simulazione numerica eseguita da ESA.....	123
8.2	Confronto tra l'andamento di temperatura calcolata con il programma QuickField e quella calcolata da ESA con il TMM (Modello matematico termico) .....	126
	CONCLUSIONI .....	127
9.1	Attività svolte nel lavoro di tesi .....	127
9.2	Conclusioni .....	127
	BIBLIOGRAFIA .....	129

#### APPENDICI<sup>(\*)</sup>

- Listati dei programmi DS2G
- Visualizzazione delle distribuzioni di temperatura e di numero di Mach relativi alle seguenti distribuzioni di temperatura nel gap: 500K; 700K; 900K; 1100K.
- Visualizzazione delle griglie 2 e 3 utilizzate per l'analisi termica.
- Visualizzazione delle distribuzioni di temperatura nel modello numerico alla fine dell'intervallo considerato nella analisi termica

<sup>(\*)</sup>In formato elettronico



## LISTA DEI SIMBOLI

### Simboli latini

$\bar{C}$	velocità molecolare media
$e$	energia per unità di massa
$k$	costante di Boltzmann
$Kn$	numero di Knudsen
$M_\infty$	numero di Mach della corrente incidente
$m$	massa di una molecola
$n$	<i>number density</i>
$N$	numero di Avogadro
$N_c$	numero di collisioni per unità di tempo per unità di volume
$p$	pressione statica locale
$p_0$	pressione totale della corrente incidente
$R_a$	costante dell'aria
$R_e$	numero di Reynolds
$T$	temperatura statica locale
$T_0$	temperatura totale della corrente incidente

### Simboli greci

$\rho$	densità
$\rho_0$	densità totale
$\delta$	spaziatura molecolare media
$\lambda$	cammino libero medio
$\nu$	frequenza di collisione per molecola
$1/\nu$	tempo di collisione media
$\tau$	tempo di rilassamento vibrazionale
$\sigma$	sezione trasversale di collisione



## **ABBREVIAZIONI**

DLR	German Aerospace Centre
EADS/LV	European Aeronautics Defence and Space Company/Launch Vehicles
ESA	European Space agency
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales
NAL	National Aerospace Laboratory
NASDA	National Space development Agency of Japan
FC	Flow Condition
HYFLEX	HYpersonic FLight EXperiment
L3K	6 MW arc heated facility of DLR
TC	Thermocouple
TPS	Thermal Protection System



# LISTA DELLE FIGURE

## Capitolo 1

Fig. 1.1 : Visualizzazione del veicolo Hyflex

## Capitolo 2

Fig. 2.1 : Schematizzazione dello strato d'urto sottile a numeri di Mach ipersonici

Fig. 2.2 : Schematizzazione dello strato di entropia su un corpo affusolato con il muso smussato a velocità ipersonica

Fig. 2.3 : Schematizzazione dello strato d'urto a elevata temperatura su un corpo smussato a velocità ipersonica

Fig. 2.4 : Schematizzazione del profilo di temperatura in uno strato limite di un flusso ipersonico

Fig. 2.5 : Schematizzazione delle distribuzioni di pressione su una lastra piana: (a) flusso non viscoso; (b) flusso viscoso

Fig. 2.6 : Schematizzazione delle zone di interazione viscosa forte e debole su una lastra piana

Fig. 2.9 : Schematizzazione delle regioni a elevata temperatura nel campo di flusso su un corpo di rientro

Fig. 2.10 : Schematizzazione di un velo di plasma intorno a un corpo

Fig. 2.11 : Schematizzazione di un campo di flusso non adiabatico e radiante intorno a un corpo

## Capitolo 3

Fig. 3.1 : Visualizzazione della disposizione delle termocoppie sopra la superficie del veicolo

Fig. 3.2 : Visualizzazione del modell di piastrella del Hyflex montata sul contenitore

Fig. 3.3 : Schema bidimensionale della distribuzione delle termocoppie

- Fig. 3.4 : Schema del sensore di flusso di calore con termocoppie integrate  
Fig. 3.5 : Storia della temperatura superficiale misurata per un punto sulla superficie del sensore  
Fig. 3.6 : Sviluppo della temperatura misurato dentro il sensore di flusso di calore  
Fig. 3.7 : Storia della temperatura del gap misurata 10mm sotto la superficie del modello  
Fig. 3.8 : Storia della temperatura misurata al fondo della fessura  
Fig. 3.9 : Griglia 2D con configurazioni del gap trasversale  
Fig. 3.10: Distribuzione di temperatura alla parete: distribuzione a gradino e distribuzione lineare  
Fig. 3.11: Distribuzioni del flusso di calore calcolate per la fessura secondo le due griglie calcolate  
Fig. 3.12: Visualizzazione del TMM (modello matematico termico) usato per l'analisi termica  
Fig. 3.13: analisi termica – confronto con i dati dei test T04/T05/T06/T07/T08

#### Capitolo 4

- Fig. 4.1: Limiti del numero di Knudsen sui modelli matematici  
Fig. 4.2: Schematizzazione di una collisione tra due sfer dure spheres di diametro  $d$

#### Capitolo 5

- Fig. 5.1: Schematizzazione di una tipica regione di flusso  
Fig. 5.2: Rappresentazione di un tipico arrangiamento delle regioni  
Fig. 5.3: Files associati con il programma DS2G

#### Capitolo 6

- Fig.6.1: schematizzazione del modello bidimensionale analizzato  
Fig.6.2: Griglia completa per il dominio computazionale: la dimensione delle celle è stata aumentata per permetterne la visualizzazione.  
Fig. 6.3: Mappa del numero di Mach: il numero di Mach minimo 0.469; il massimo 7.032  
Fig. 6.4: Mappa della Temperatura: la temperatura minima è 361.672K; la massima è 3947.228K

- Fig.6.5. Confronto tra profili di pressione per diverse temperature del gap. Tutti i casi sono stati realizzati con la stessa griglia.
- Fig.6.6: Confronto tra profili di flusso di calore per diverse temperature del gap. Tutti i casi sono stati realizzati con la stessa griglia.
- Fig.6.7: Ingrandimento della zona della griglia
- Fig.6.8: Ingrandimento fatto alla parete a monte della griglia
- Fig.6.9: Primo piano del fondo della griglia
- Fig.6.10: Mappa del cammino libero medio cammino libero medio minimo  $4.630937E-5$ ; massimo  $2.627E-4$ .
- Fig.6.11: Analisi dell'indipendenza dalla griglia per il profilo di pressione
- Fig.6.12: Ingrandimento nella zona della fessura
- Fig.6.13: primo piano alla parete a monte della fessura
- Fig.6.14: Analisi dell'indipendenza dalla griglia per il profilo di flusso di calore
- Fig.6.15: Ingrandimento della zona della fessura
- Fig.6.16: Primo piano alla parete a monte della fessura
- Fig.6.17: Primo piano nel fondo della fessura
- Fig.6.18. Indipendenza dal numero di molecole per il flusso di calore.
- Fig.6.19: Ingrandimento della zona della fessura
- Fig.6.20: Primo piano alla parete a monte della fessura
- Fig.6.21: Primo piano alla parete a valle della fessura
- Fig.6.22: Primo piano nel fondo della fessura

## Capitolo 7

- Fig.7.1: modello bidimensionale utilizzato per l'analisi termica
- Fig.7.2: schematizzazione dei modi di trasmissione del calore del modello.
- Fig.7.3: modello bidimensionale utilizzato per la definizione dei carichi termici
- Fig.7.4: Modello agli elementi finiti utilizzato per l'analisi termica. Il numero di nodi è 10188
- Fig.7.5: visualizzazione dei punti 1 e 2. Questi punti si trovano in corrispondenza della termocoppia TC8, la quale, nell'esperienza di riferimento, era posizionata al centro del triangolo situato nel fondo del gap.
- Fig.7.6 Distribuzione della temperatura dopo 180 secondi nel modello agli elementi finiti relativo alla griglia 1
- Fig.7.7 Distribuzione della temperatura dopo 590 secondi nel modello agli elementi finiti relativo alla griglia 1
- Fig.7.8 Andamento della temperatura nell'intervallo di tempo considerato nella simulazione in due punti distinti vicini alla posizione della termocoppia TC8 (situata nel fondo del gap). Caso con la griglia 1.
- Fig.7.9: Distribuzione della temperatura dopo 180 secondi nel modello agli elementi finiti relativo alla griglia 2

Fig.7.10 Distribuzione della temperatura nel modello agli elementi finiti avente la griglia 3 dopo 180 sec.

Fig.7.9: Confronto degli andamenti della temperatura nell'intervallo di tempo nei punti 1 e 2 per le tre griglie utilizzate nell'analisi termica.

## Capitolo 8

Fig.8.1 Ingrandimento del confronto tra le distribuzioni di Net Energy ottenuti con il programma DS2G e quelli ottenuti da ESA con il codice di Navier-Stokes

Fig.8.3:Primo piano alla parete a valle del gap

Fig.8.4: Primo piano nel fondo del gap

Fig.8.5 Confronto tra gli andamenti di temperatura ottenuti con il programma QuickField e quelli ottenuti da ESA con il TMM.

## **LISTA DELLE TABELLE**

### Capitolo 3

Tab.3.1: Matrice delle prove

### Capitolo 6

Tabella 6.1: condizioni a contorno della corrente libera

### Capitolo 7

Tab.7.1: valori medi calcolati di flusso di calore per ogni parte in cui è stato suddivisa la superficie superiore del modello bidimensionale.

Tab.7.2 Caratteristiche termiche di conducibilità e di emissione dei materiali costituenti il modello, utilizzate per la simulazione del campo termico del modello.

