

Elaborato Monografico

**La capsula ARD
e il rientro atmosferico**

GIOSUÈ LONGOBARDO

M53001230

INDICAZIONI PER LO SVILUPPO DELLE ESERCITAZIONI A CASA

Il rispetto di queste indicazioni è tassativo. In presenza di difformità non prenderò in considerazione le relazioni. Ogni cosa riportata va letta con molta attenzione prima di essere sottoposta alla mia attenzione: non conviene 'usare' un docente come correttore di bozze.

STESURA DEL TESTO (CON O SENZA WORD PROCESSOR). E' richiesta un'esposizione strutturata piuttosto che narrativa. Pertanto descrivete sinteticamente ed in sequenza

- lo scopo
- lo sviluppo
- l'applicazione
- le conclusioni

indicando gli strumenti (tecnici, informatici o scientifici) utilizzati per lo sviluppo e la stesura. E' vietato riprodurre, anche in parte, la teoria alla base dell'esercizio: limitatevi all'indicazione bibliografica. La lunghezza, in facciate, del corpo del resoconto del lavoro a casa (escludendo quindi titolo, indice e lista dei simboli) va contenuta al massimo.

INDICAZIONI PARTICOLARI. Il fascicolo che contiene gli esercizi deve essere curato, preciso, elegante, e pertanto

- i risultati numerici vanno riportati con la giusta accuratezza, ponendo ESTREMA attenzione all'aspetto delle cifre significative
- ogni rappresentazione grafica deve essere pertinente
- riportate sempre il sommario dei risultati in quadri sinottici od in opportuni grafici
- **FIGURE/DIAGRAMMI.** Tutto in bianco, nero e toni di grigio (immagini e foto riprese da sorgenti bibliografiche, compresa la rete, potranno essere a colori). Inserite nel testo, numerando e spaziando per bene, nel rispetto e con indicazione delle scale, con una legenda esauriente (=con tutte le indicazioni), senza sovrapporre la legenda ai grafici, con simboli adeguatamente grandi. Il formato deve essere umano e l'assetto verticale. Ogni risultato va commentato (nel testo od anche in didascalia). Il Cd (CD) va indicato in Drag Count e parte sempre da zero (e lo stesso vale per la resistenza). Le polari devono essere ingrandite nelle regioni di bassa resistenza.
- il disegno del profilo: **LE SCALE (!)**, riportate una figura clean della larghezza utile della pagina, il tratto deve essere "corretto"
- evitate per quanto possibile termini in lingua diversa dall'italiano (un termine irrinunciabile di altra lingua va scritto in corsivo), evitando tout court versioni italianizzate di termini di altre lingue
- nella stesura informatica lasciate un spazio bianco dopo i caratteri .,;?!; in stampa lasciare 3.5 cm a sx, 2 cm a dx
- eventuali formule vanno numerate
- non è necessaria (ma può essere utile) la lista dei simboli
- impiegate sempre la terminologia più appropriata
- state attenti ad evitare il costrutto ":(due punti) seguito da una figura o da una tabella"
- **CFD.** Le scale in toni di grigio; congruità dei confronti con Xfoil: parità di Cl, rispetto dei limiti di validità
- Scrivete (e ditel!) sempre "numero di Mach/Reynolds" e non "Mach/Reynolds"

PRESENTAZIONE. Esercizi ed elaborati vanno presentati in un fascicolo non rilegato, indicando in copertina soltanto cognome, nome e matricola, insieme all'elenco di tutti gli esercizi in sviluppo o già convalidati, e riportando in seconda pagina queste INDICAZIONI PER LO SVILUPPO DELLE ESERCITAZIONI A CASA. La forma è da me valutata in modo paritetico rispetto ai contenuti (e dunque leggete ogni cosa con molta attenzione prima di sottopormela).

Indice

1	Il rientro atmosferico e la capsula <i>ARD</i>	7
1.1	La geometria	8
1.2	Le griglie di calcolo	10
1.2.1	Un esempio di griglia non strutturata	10
1.2.2	Un esempio di griglia strutturata	12
1.3	L'analisi dei dati	15
1.3.1	$M = 2$ (griglia non strutturata)	15
1.3.2	$M = 2$ (griglia strutturata)	17
1.3.3	$M = 3$ (griglia non strutturata)	20
1.3.4	$M = 3$ (griglia strutturata)	22
1.4	Conclusioni	25

Elenco delle figure

1.1	Diagramma schematico del piano di volo della capsula <i>ARD</i> per il rientro atmosferico, tratta da [6].	7
1.2	Rappresentazione del dominio di integrazione definito per la capsula <i>ARD</i> , ottenuto nell'ambiente <i>Design Modeler</i> , disponibile nel <i>software</i> Ansys.	8
1.3	Rappresentazione del dominio attorno alla capsula <i>ARD</i> , ottenuto nell'ambiente <i>Design Modeler</i> , disponibile nel <i>software</i> Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo	9
1.4	Rappresentazione della griglia di calcolo non strutturata per la capsula <i>ARD</i> , ottenuta nell'ambiente <i>Meshing</i> del <i>software</i> Ansys.. . . .	11
1.5	Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula <i>ARD</i> , ottenuta nell'ambiente <i>Meshing</i> del <i>software</i> Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo. . .	11
1.6	Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula <i>ARD</i> , ottenuta nell'ambiente <i>Meshing</i> del <i>software</i> Ansys.	13
1.7	Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula <i>ARD</i> , ottenuta nell'ambiente <i>Meshing</i> del <i>software</i> Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo. . .	13
1.8	Rappresentazione delle celle della griglia di calcolo strutturata con <i>aspect ratio</i> circa unitario, per la capsula <i>ARD</i> , ottenuta nell'ambiente <i>Meshing</i> del <i>software</i> Ansys. . .	14
1.9	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	15
1.10	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	16
1.11	Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	16
1.12	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	17
1.13	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	18
1.14	Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	18
1.15	Rappresentazione del <i>contour</i> della temperatura nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	19
1.16	Rappresentazione del <i>contour</i> dell'entropia nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	19
1.17	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	20

1.18	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	21
1.19	Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia non strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	21
1.20	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	22
1.21	Rappresentazione del <i>contour</i> del numero di Mach nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	23
1.22	Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	23
1.23	Rappresentazione del <i>contour</i> della temperatura nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	24
1.24	Rappresentazione del <i>contour</i> dell'entropia nel campo di moto per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente <i>CFD Post</i> , disponibile all'interno del <i>software</i> Ansys.	24

Lista dei simboli

Lettere latine

M	Numero di Mach
Re	Numero di Reynolds
c	Corda di un profilo alare
s	Ascissa curvilinea
l	Portanza del profilo
L	Portanza 3D
d	Resistenza del profilo
D	Resistenza 3D
C_l	Coefficiente di portanza di un profilo alare
C_{l_α}	Coefficiente angolare della retta di portanza
C_d	Coefficiente di resistenza di un profilo alare
C_m	Coefficiente di momento di un profilo alare
$C_{m,f}$	Coefficiente di momento di un profilo alare, calcolato rispetto al fuoco
C_p	Coefficiente di pressione
C_L	Coefficiente di portanza di un'ala
C_D	Coefficiente di resistenza di un'ala
e	Fattore di Oswald
$\frac{W}{S}$	Carico alare
AR	Allungamento alare
$x_{h,f}/c$	Ascissa adimensionale della cerniera del <i>flap</i>
$y_{h,f}/c$	Ordinata adimensionale della cerniera del <i>flap</i>
$x_{h,dp}/c$	Ascissa adimensionale della cerniera del <i>droop nose</i>
$y_{h,dp}/c$	Ordinata adimensionale della cerniera del <i>droop nose</i>
$x_{h,a}/c$	Ascissa adimensionale della cerniera dell'alettone
$y_{h,a}/c$	Ordinata adimensionale della cerniera dell'alettone

Lettere greche

- α Angolo d'attacco
- $\alpha_{0,l}$ Angolo di portanza nulla del profilo
- $\alpha_{0,L}$ Angolo di portanza nulla dell'ala
- δ_f Angolo di deflessione del *flap*
- δ_{dp} Angolo di deflessione del *droop nose*
- δ_a Angolo di deflessione dell'alettone

Capitolo 1

Il rientro atmosferico e la capsula *ARD*

Sulla base del lavoro [5], viene proposta un'analisi del caso di rientro atmosferico per una geometria analoga al progetto di sviluppo noto con il nome *ARD*, *Atmospheric Rentry Demonstrator*, sviluppato dall'agenzia spaziale europea, alla fine degli anni 90', in collaborazione con altre agenzie spaziali nazionali come l'*Aerospatiale* o la *DASA*, [6]. Tale progetto di sviluppo condotto dall'*ESA*, si poneva l'obiettivo di porre le basi per la futura progettazione di veicolo di rientro atmosferico, che fosse in grado di rientrare sulla superficie terrestre trasportando carico pagante ed/o equipaggio. Come esplicitamente descritto in [6], l'obiettivo di tale progetto di sviluppo, si focalizzava, in particolare, sulla validazione dei modelli di *TPS* e di navigazione e controllo. Il piano di volo prevedeva l'utilizzo del lanciatore Ariane V, con decollo nella località di Kourou, in Guiana Francese. Dopo essere stata sganciata dal lanciatore, la capsula iniziava le operazioni di rientro atmosferico, con atterraggio nell'Oceano Pacifico. In figura 1.1 è presentata una schematizzazione sintetica del piano di volo.

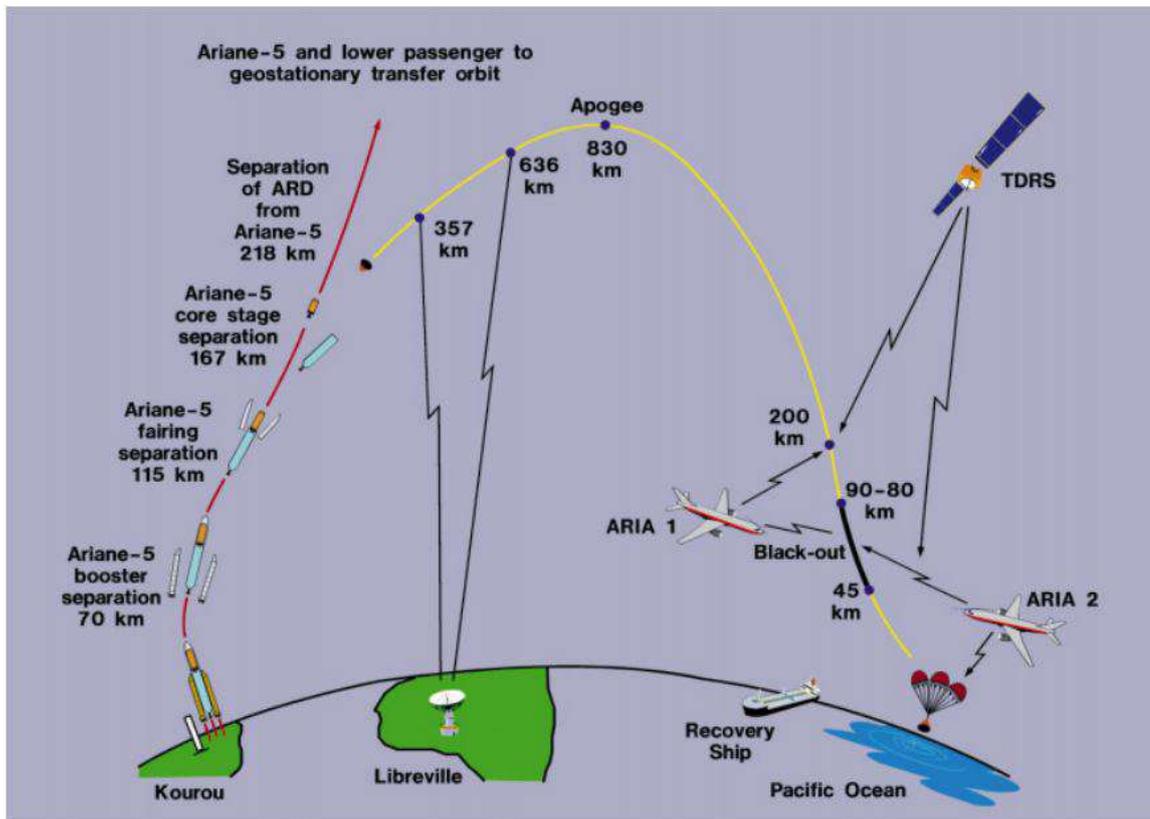


Figura 1.1: Diagramma schematico del piano di volo della capsula *ARD* per il rientro atmosferico, tratta da [6].

1.1 La geometria

Si intende analizzare il campo di moto attorno ad una geometria analoga a quella del dimostratore *ARD*. Il modello proposto in questa analisi bidimensionale del campo di moto riprende la geometria e le proporzioni indicate in [6]: in particolare, la geometria troncoconica prevede una sezione maestra di circa 2.8m, mentre la dimensione longitudinale del cono è pari a circa 2 metri. In figura 1.2 è possibile visualizzare la schematizzazione del dominio di integrazione. Riguardo la geometria è importante sottolineare che nel caso del modello con griglia strutturata è stato necessario introdurre nel campo di moto una divisione ulteriore dello stesso mediante linee, al fine di consentire una discretizzazione ottimale del campo di moto. Le suddette linee, che dividono il campo di moto in 4 zone, hanno consentito di discretizzare con maggiore accuratezza il dominio, dal momento che sulle stesse è stato possibile inserire una funzione di *Edge Sizing*, come fatto anche sulle linee che definiscono il contorno delle geometria.

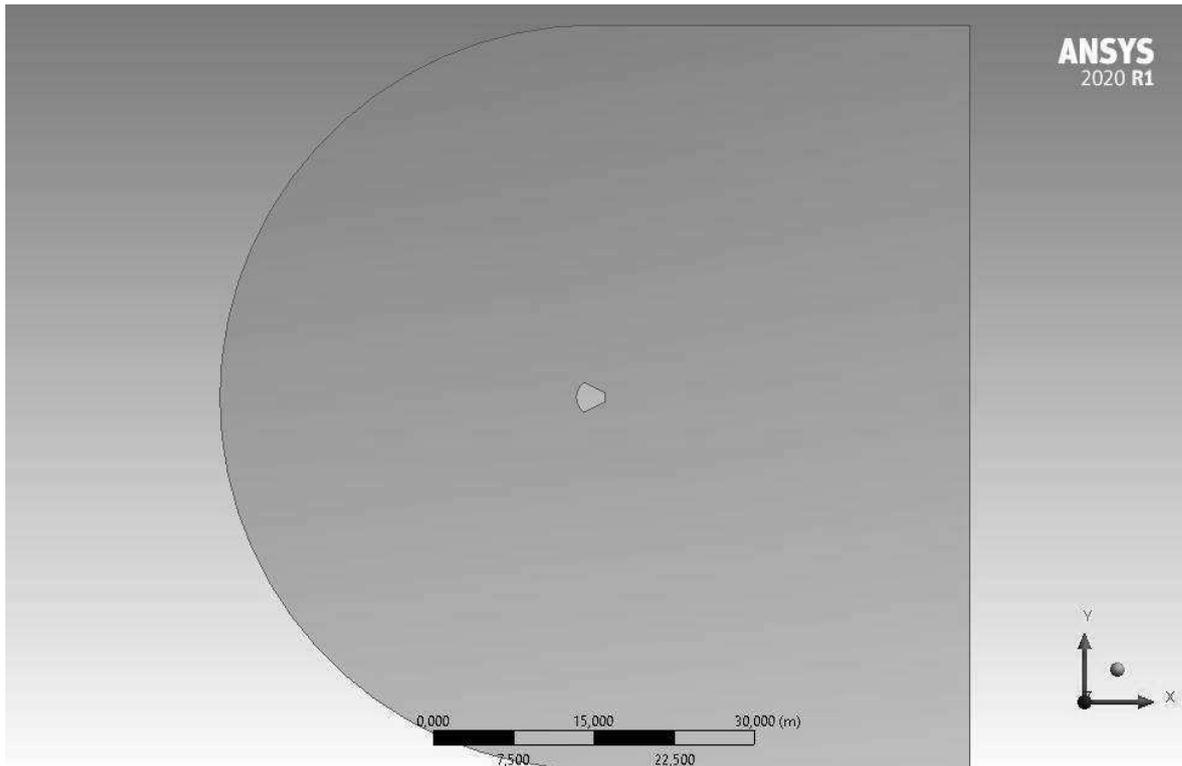


Figura 1.2: Rappresentazione del dominio di integrazione definito per la capsula *ARD*, ottenuto nell'ambiente *Design Modeler*, disponibile nel *software* Ansys.

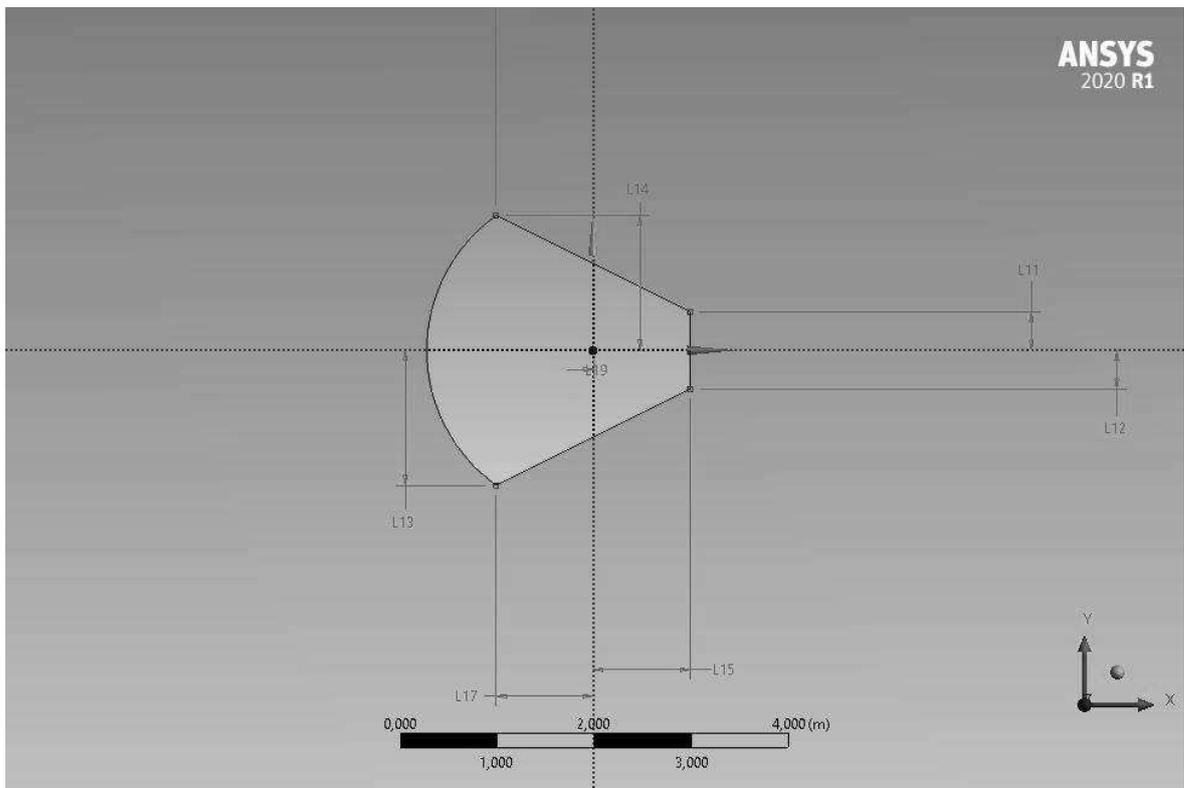


Figura 1.3: Rappresentazione del dominio attorno alla capsula *ARD*, ottenuto nell'ambiente *Design Modeler*, disponibile nel *software* Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo

1.2 Le griglie di calcolo

La geometria presentata nella precedente sezione è stata discretizzata seguendo due approcci alternativi: *mesh* non strutturata e *mesh* strutturata. Il primo dei due approcci, utilizzato anche nelle sezioni precedenti per discretizzare il campo di moto attorno ad un profilo alare, si basa su elementi fondamentali di geometria triangolare, mentre la seconda prevede l'utilizzo di elementi quadrangolari. Nei successivi paragrafi viene presentata un esempio di griglia di calcolo per entrambe i casi di cui sopra.

1.2.1 Un esempio di griglia non strutturata

In questo caso, le impostazioni utilizzate per ottenere la griglia di calcolo, riportate in nelle tabelle 1.4, 1.2, 1.3, sono del tutto simili a quelle utilizzate per il profilo alare B737C.

<i>Method</i>	<i>Triangles</i>
<i>Physics Preferences</i>	<i>CFD</i>
<i>Element Size</i>	1.5m
<i>Defeature Size</i>	1×10^{-5}
<i>Curvature Min Size</i>	1×10^{-5}
<i>Proximity Min Size</i>	5×10^{-5}
<i>Growth Rate</i>	1.20

Tabella 1.1: Tabella riassuntiva delle caratteristiche globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano comprimibile, per la capsula *ARD*.

<i>Max Skeweness</i>	0.799
<i>Nodes</i>	7033
<i>Elements</i>	13338

Tabella 1.2: Tabella riassuntiva dei parametri di qualità globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula *ARD*.

	<i>Number of divisions</i>	<i>Bias Type</i>	<i>Bias Factor</i>
Scudo termico	300	-----	10
Lati del cono	300	-----	10
Testa	2	/	<i>No Bias</i>

Tabella 1.3: Tabella riassuntiva dei parametri dell'*Edge Sizing*, per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula *ARD*.

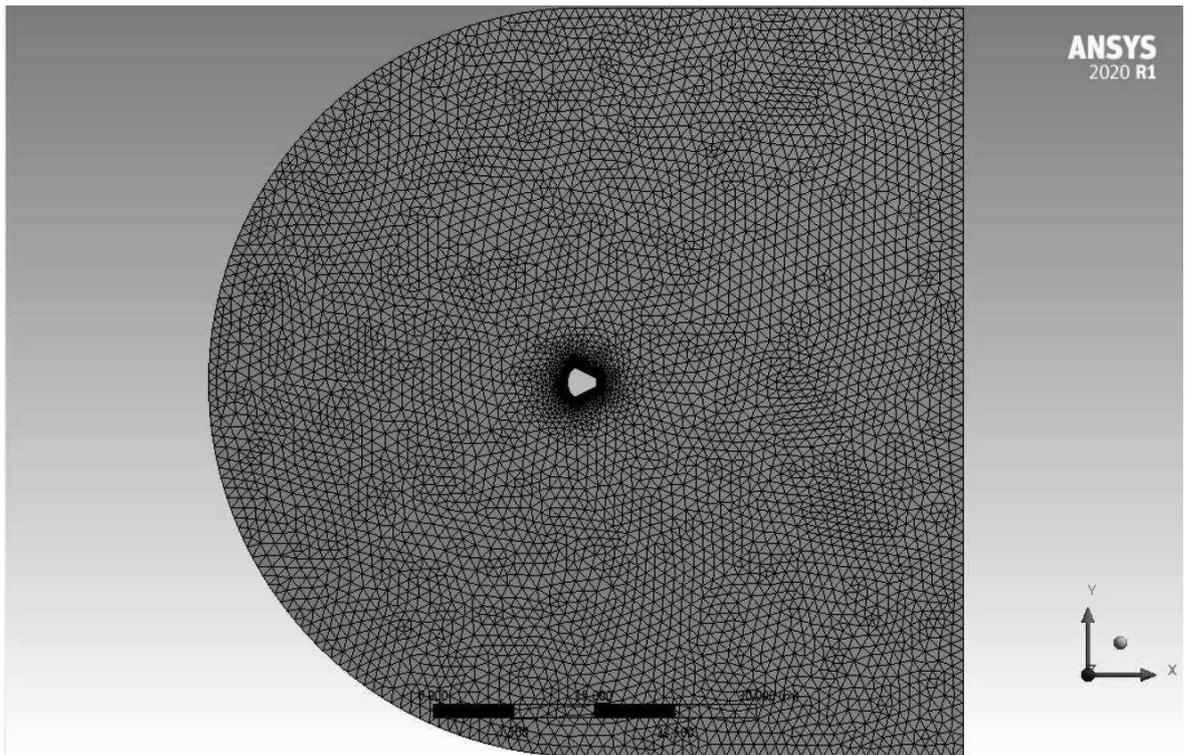


Figura 1.4: Rappresentazione della griglia di calcolo non strutturata per la capsula *ARD*, ottenuta nell'ambiente *Meshing* del *software* Ansys..

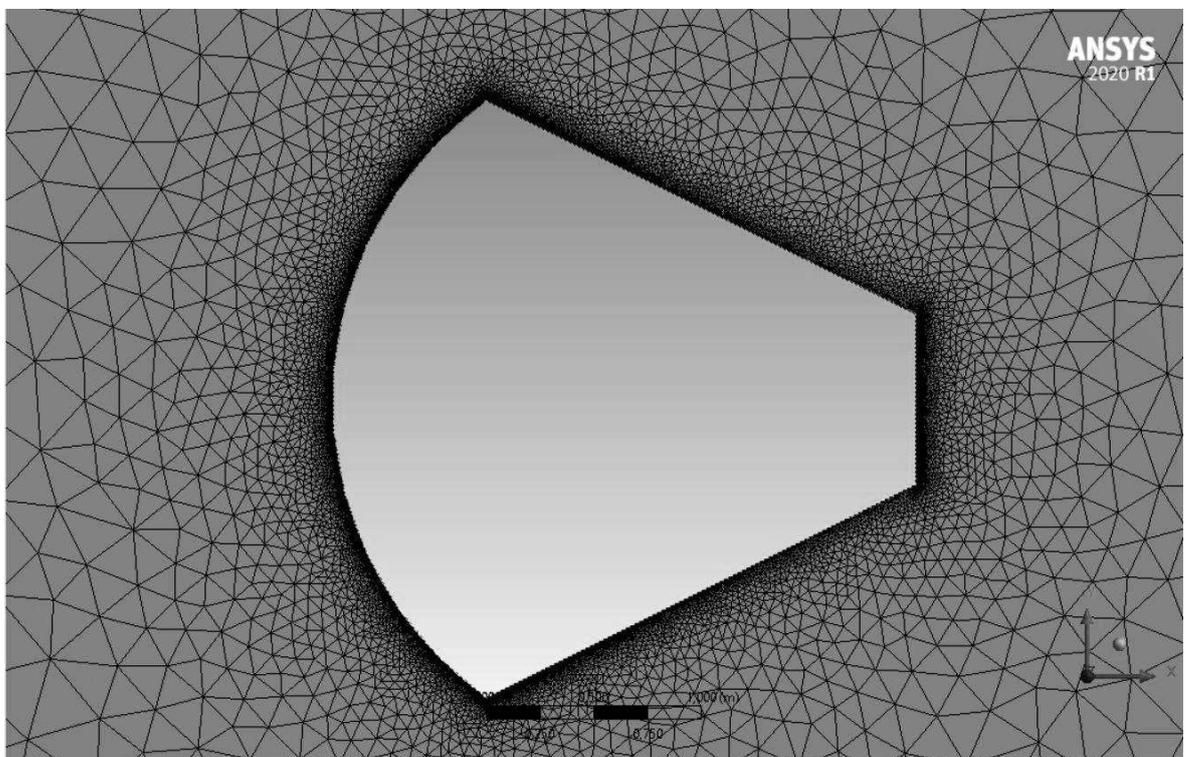


Figura 1.5: Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula *ARD*, ottenuta nell'ambiente *Meshing* del *software* Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo.

1.2.2 Un esempio di griglia strutturata

Riguardo le caratteristiche di una mesh strutturata è bene sottolineare che i parametri di qualità della stessa che si possono analizzare, oltre alla *skewness*, già analizzata nel caso di griglia non strutturata, sono molti. In questo contesto si prenderà in considerazione l'*aspect ratio*, ovvero il rapporto fra il lato lungo e il lato corto del quadrilatero. In generale, si cercherà di valutare, per quanto possibile, il campo di moto attraverso elementi con rapporto fra le dimensioni unitario. In particolare, in figura 1.8 si vede che è stato preferito generare celle quasi quadrate in prossimità del ventre della capsula, data la criticità di tale zona del campo di moto. La zona rappresentata mostra esclusivamente le celle che hanno *aspect ratio* massimo pari a circa 1.001, dunque praticamente unitario. Viceversa si è preferito posizionare le celle più deformate lontano dal corpo, al fine anche di limitare il numero di nodi ed elementi per rendere la risoluzione più agevole. Una possibile evoluzione della griglia di calcolo proposta potrebbe prevedere un differente posizionamento della geometria con associato risparmio nel numero di nodi ed elementi che occorrono per discretizzare il dominio di integrazione. Il posizionamento della geometria nella porzione anteriore del dominio consentirebbe di gestire con maggiore efficienza la memoria a disposizione del calcolatore, o anche infittendo ulteriormente la griglia di calcolo a parità di memoria occupata. Riguardo all'ottimizzazione proposta, il lavoro condotto nel presente elaborato consente, comunque, di valutare l'evoluzione della posizione dell'onda d'urto rispetto allo scudo termico al variare del numero di Mach, e dunque di posizionare opportunamente i limiti del dominio di integrazione.

<i>Physics Preferences</i>	<i>CFD</i>
<i>Element Size</i>	0.3m
<i>Smoothing</i>	High
<i>Transition</i>	Slow
<i>Span Angle Center</i>	Fine
<i>Growth Rate</i>	1.20

Tabella 1.4: Tabella riassuntiva delle caratteristiche globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano comprimibile, per la capsula *ARD*, nel caso di *mesh* strutturata.

<i>Max Skeweness</i>	0.505
<i>Nodes</i>	36156
<i>Elements</i>	36025

Tabella 1.5: Tabella riassuntiva dei parametri di qualità globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano incompressibile, per la capsula *ARD*, nel caso di *mesh* strutturata.

	<i>Number of divisions</i>	<i>Bias Type</i>	<i>Bias Factor</i>
Scudo termico	50	/	<i>No Bias</i>
Lati del cono	35	/	<i>No Bias</i>
Testa	5	/	<i>No Bias</i>
Divisore dominio 1	300	-----	3
Divisore dominio 2	250	-----	3
Divisore dominio 3	500	/	<i>No Bias</i>

Tabella 1.6: Tabella riassuntiva dei parametri dell'*Edge Sizing*, per il caso euleriano incompressibile, per la capsula *ARD*, nel caso di *mesh* strutturata.

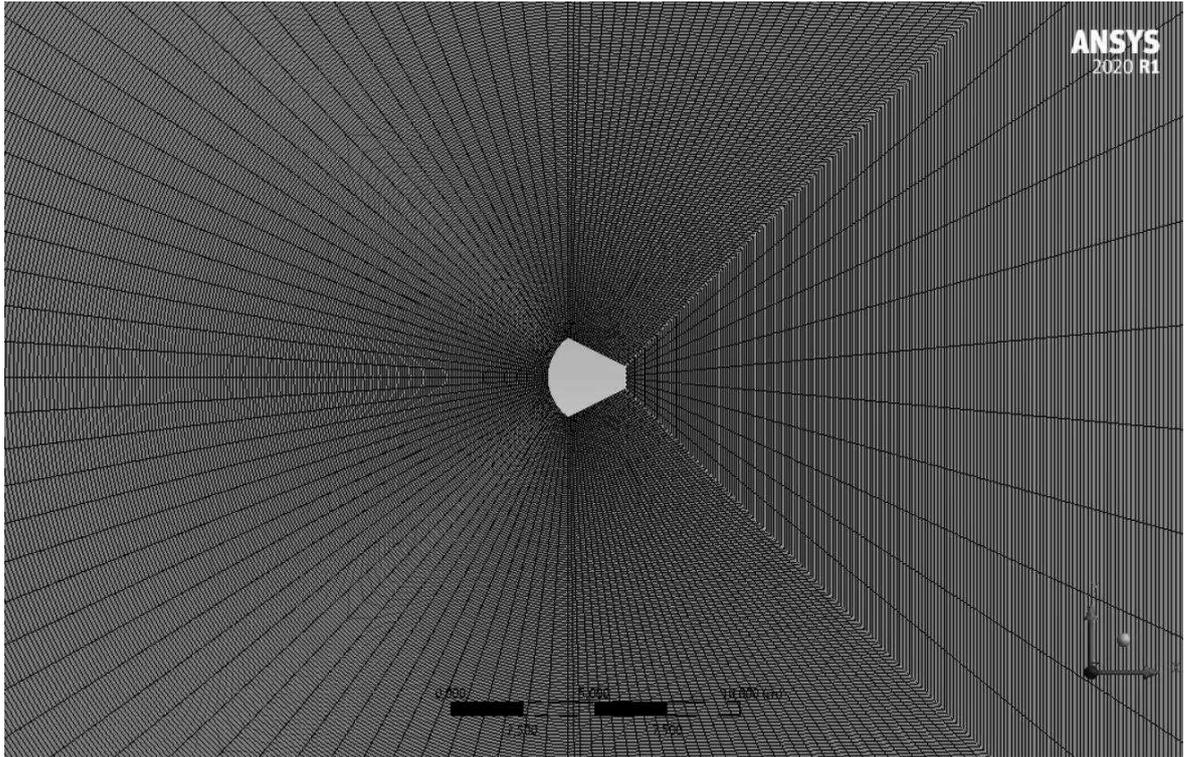


Figura 1.6: Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula *ARD*, ottenuta nell'ambiente *Meshing* del *software* Ansys.

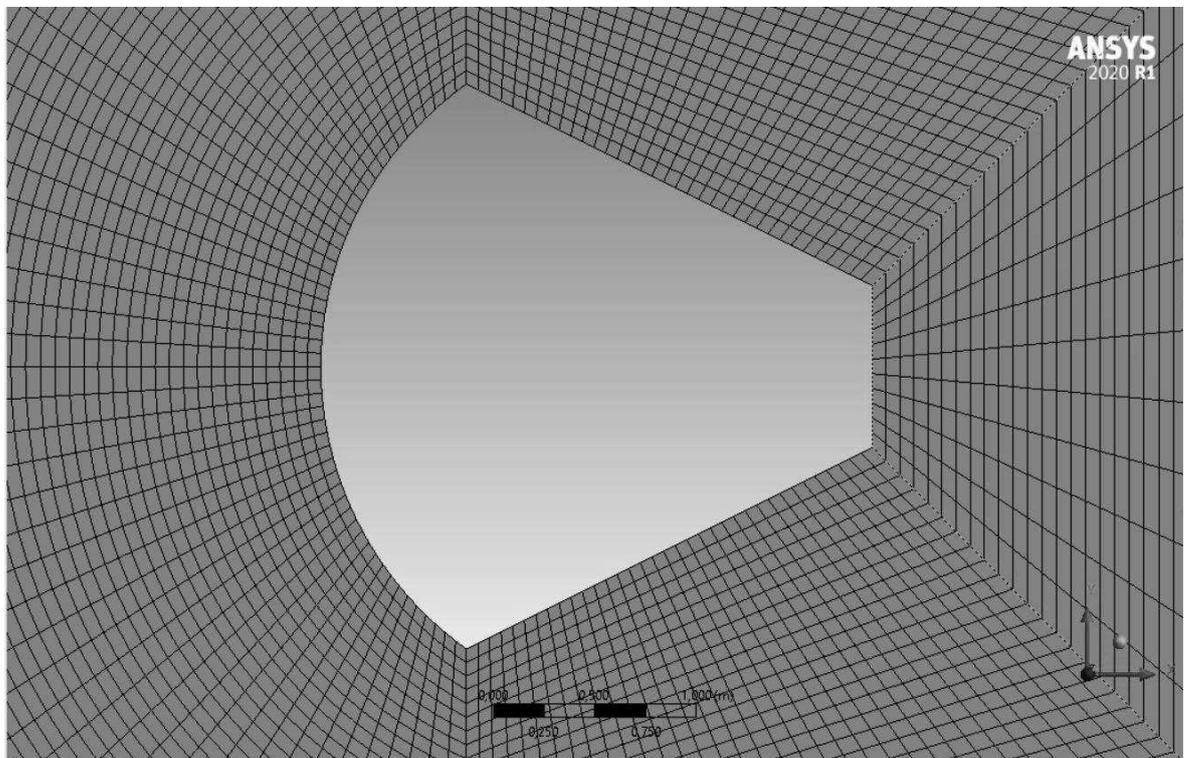


Figura 1.7: Rappresentazione della griglia di calcolo strutturata per la capsula *ARD*, ottenuta nell'ambiente *Meshing* del *software* Ansys. Ingrandimento in prossimità del corpo.

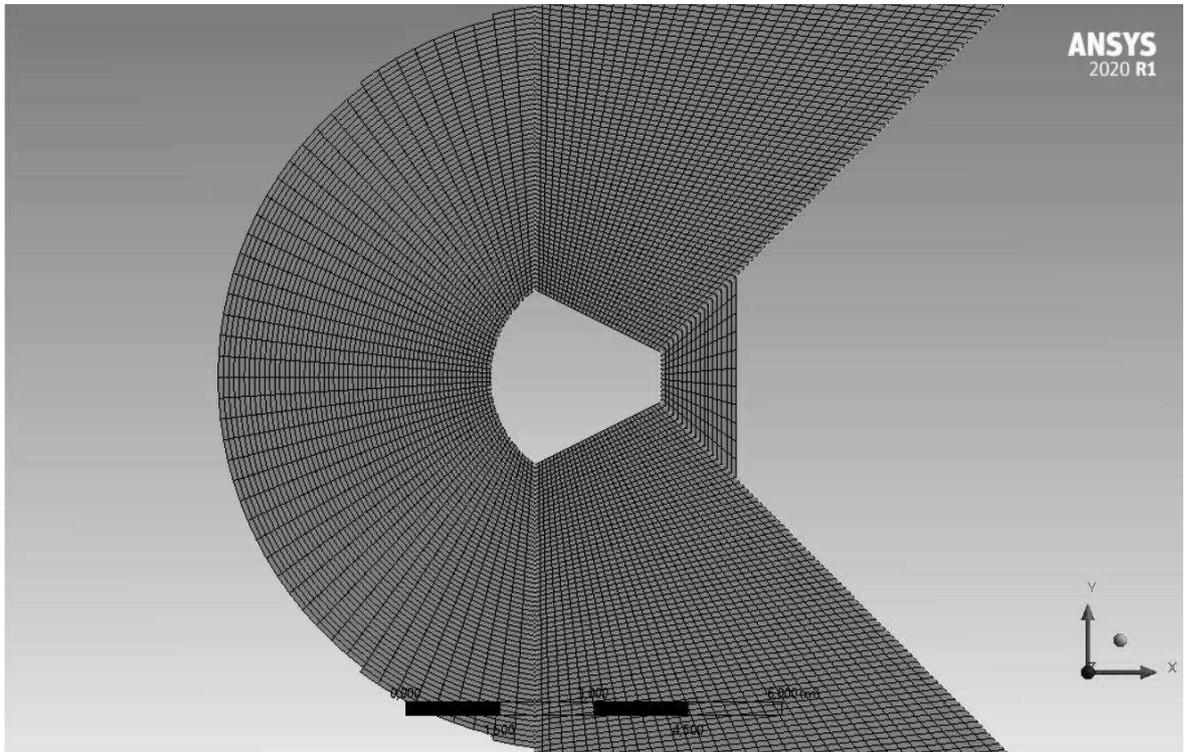


Figura 1.8: Rappresentazione delle celle della griglia di calcolo strutturata con *aspect ratio* circa unitario, per la capsula *ARD*, ottenuta nell'ambiente *Meshing* del *software* Ansys.

1.3 L'analisi dei dati

Lo scopo di questa analisi è quello di valutare le differenze indotte dall'utilizzo di diverse griglie di calcolo e anche di verificare la fenomenologia di onda d'urto staccata in prossimità della zona ventrale della capsula. Tutti i casi in analisi prevedono sempre la condizione $\alpha = 0^\circ$ e l'utilizzo di solutore di tipo *density based*.

1.3.1 $M = 2$ (griglia non strutturata)

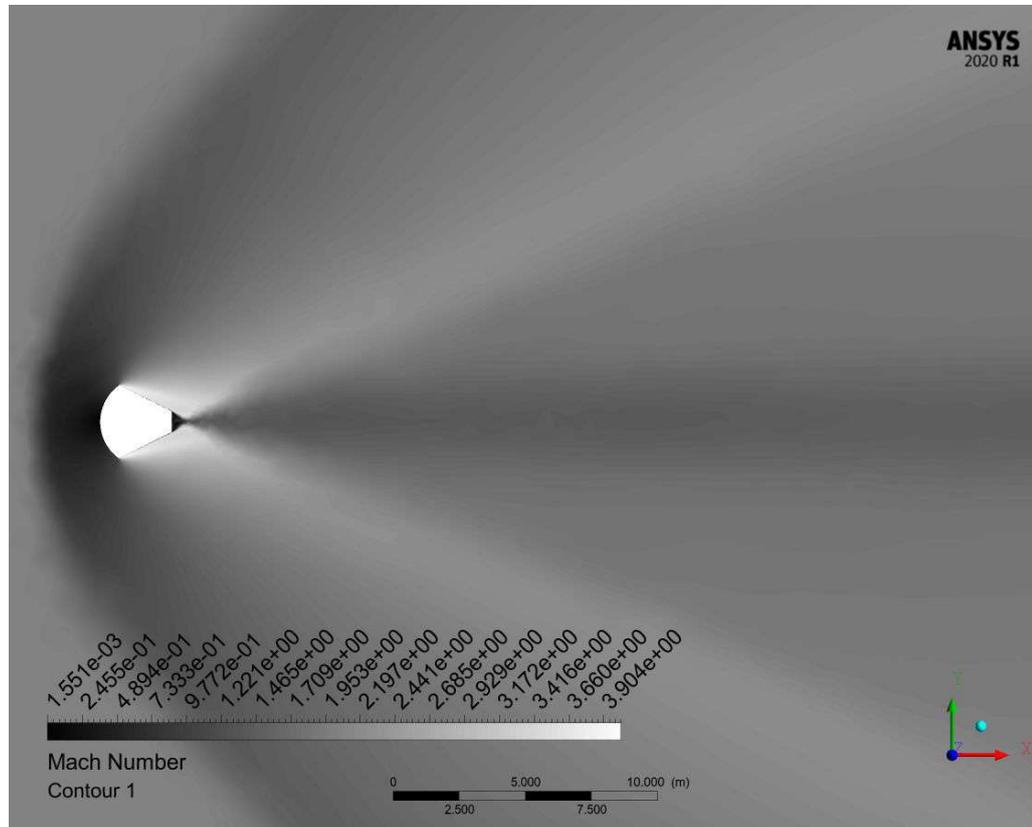


Figura 1.9: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

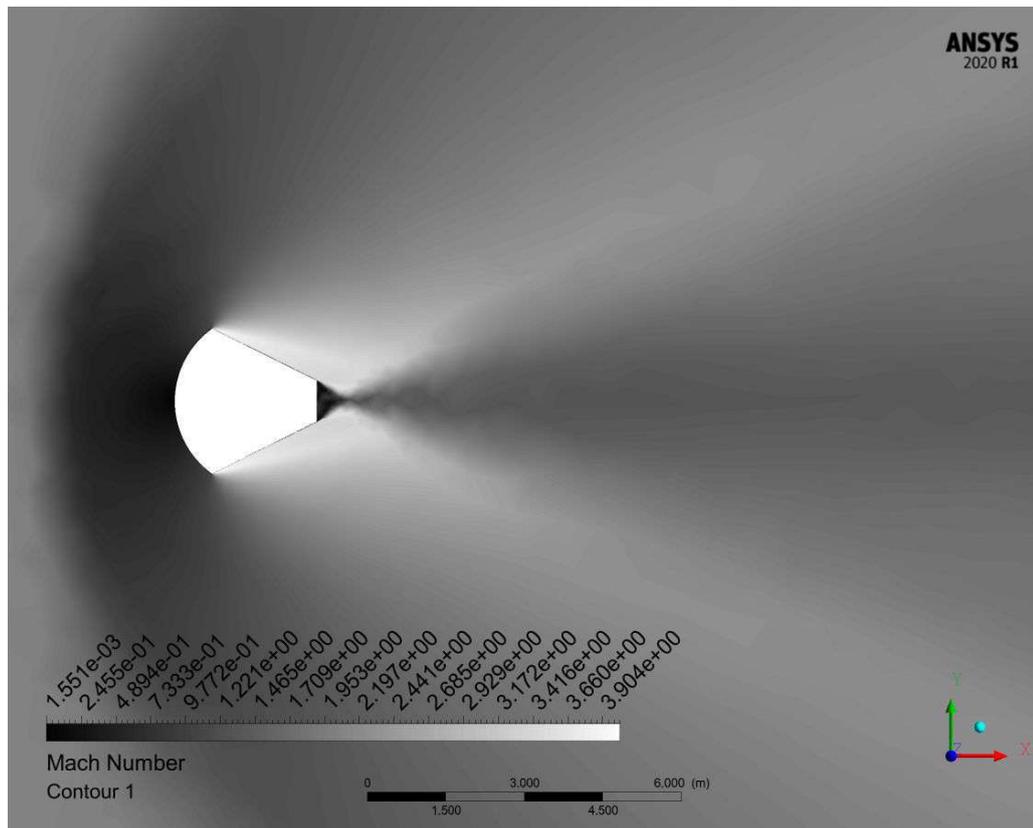


Figura 1.10: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

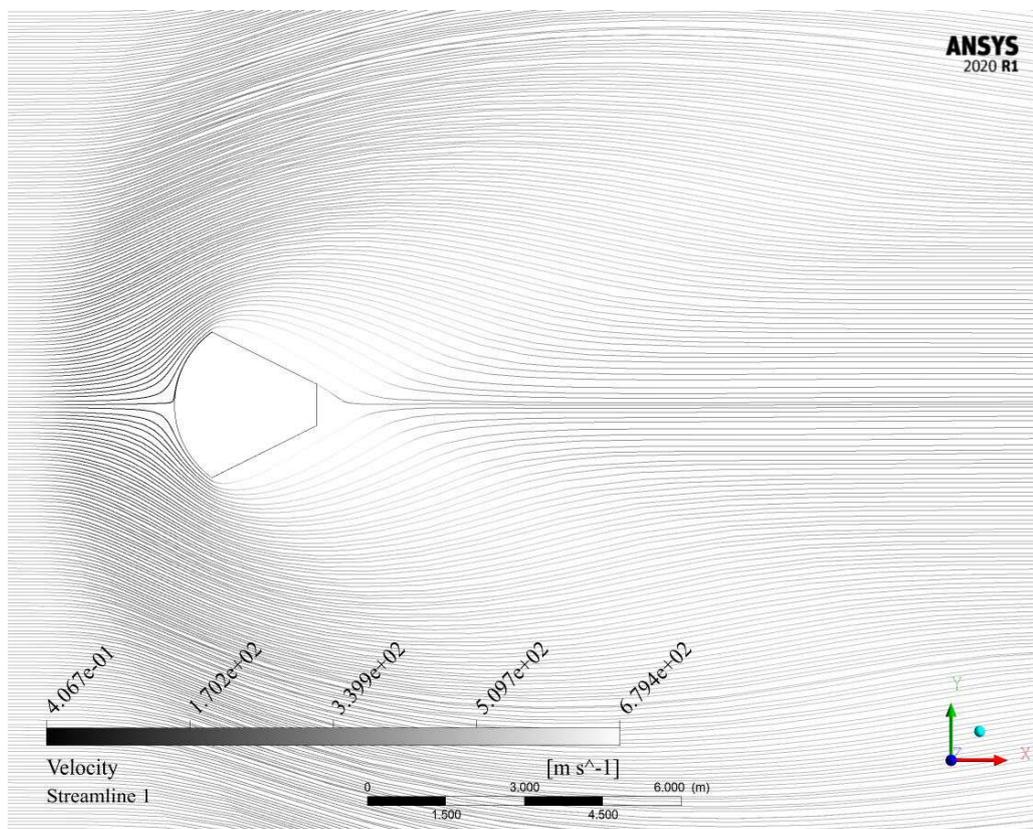


Figura 1.11: Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

1.3.2 $M = 2$ (griglia strutturata)

Nel caso delle griglie strutturate viene proposta un'ulteriore analisi riguardo l'evoluzione di temperatura ed entropia all'interno del dominio di integrazione. Riguardo l'analisi del campo delle temperature, nonostante le simulazioni proposte non modellino gli sforzi viscosi, e dunque gli incrementi di temperatura ad essi associati, è comunque possibile valutare gli effetti dell'urto curvo sulla mappa delle temperature. Riguardo la struttura del campo di moto, la presenza di un'onda d'urto obliqua, tipica dei corpi tozzi immersi in campi di moto in regime di moto supersonico, induce una struttura del campo rotazionale, con annessa presenza di un certo gradiente di entropia non nullo all'interno del campo: la rappresentazione del *contour* di entropia consente di cogliere questo aspetto della fisica del problema.

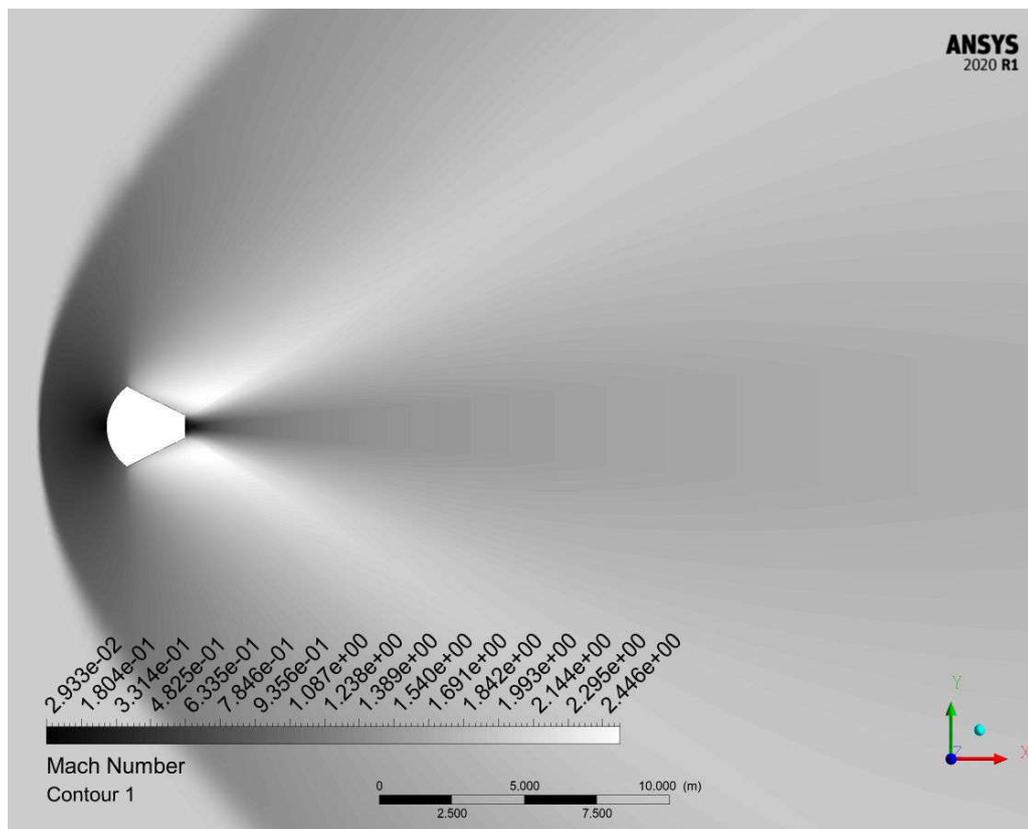


Figura 1.12: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

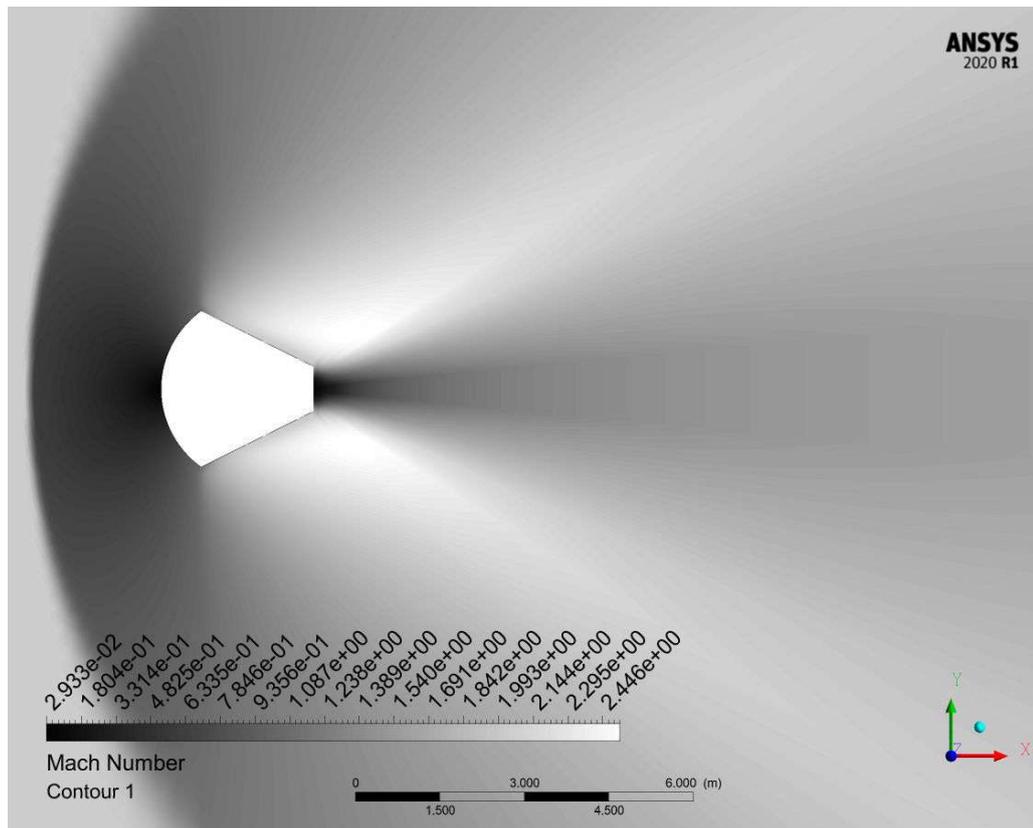


Figura 1.13: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

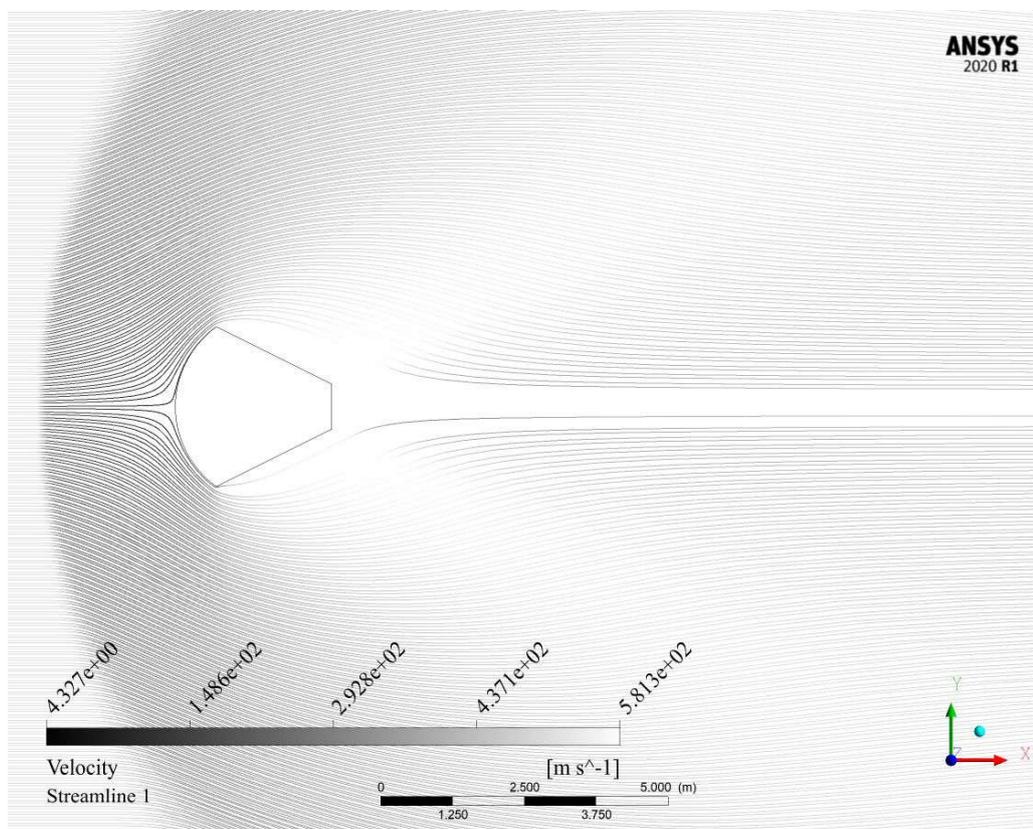


Figura 1.14: Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

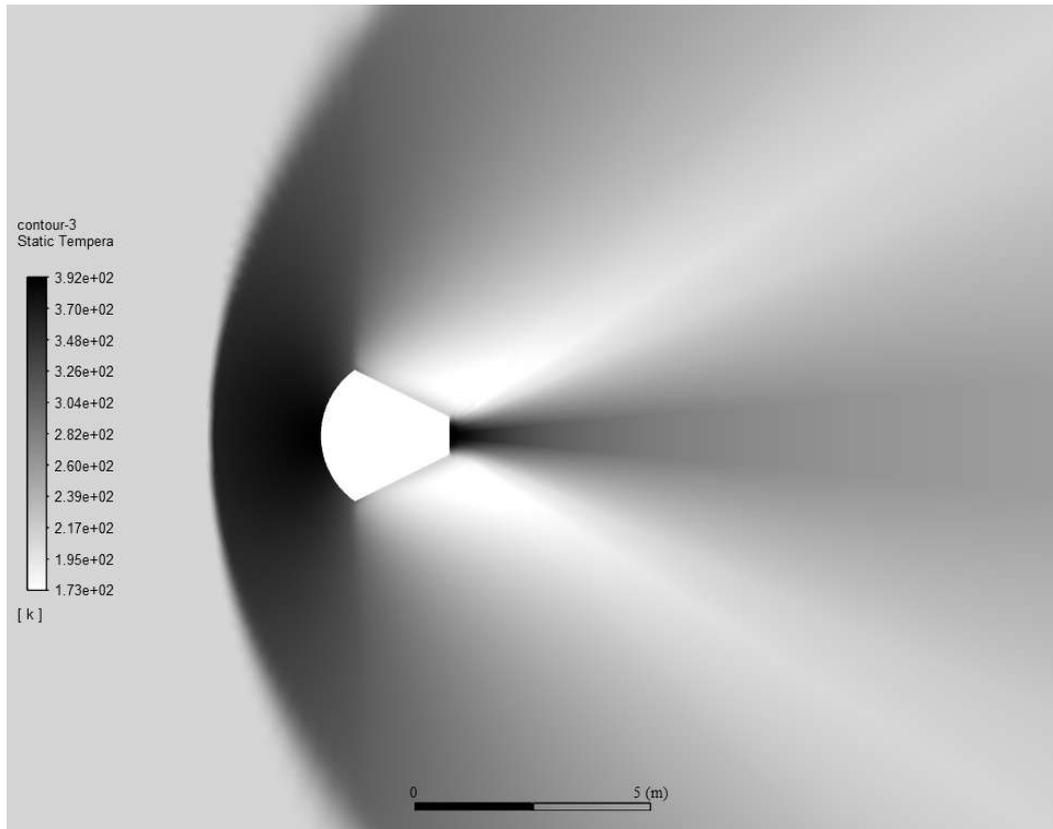


Figura 1.15: Rappresentazione del *contour* della temperatura nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

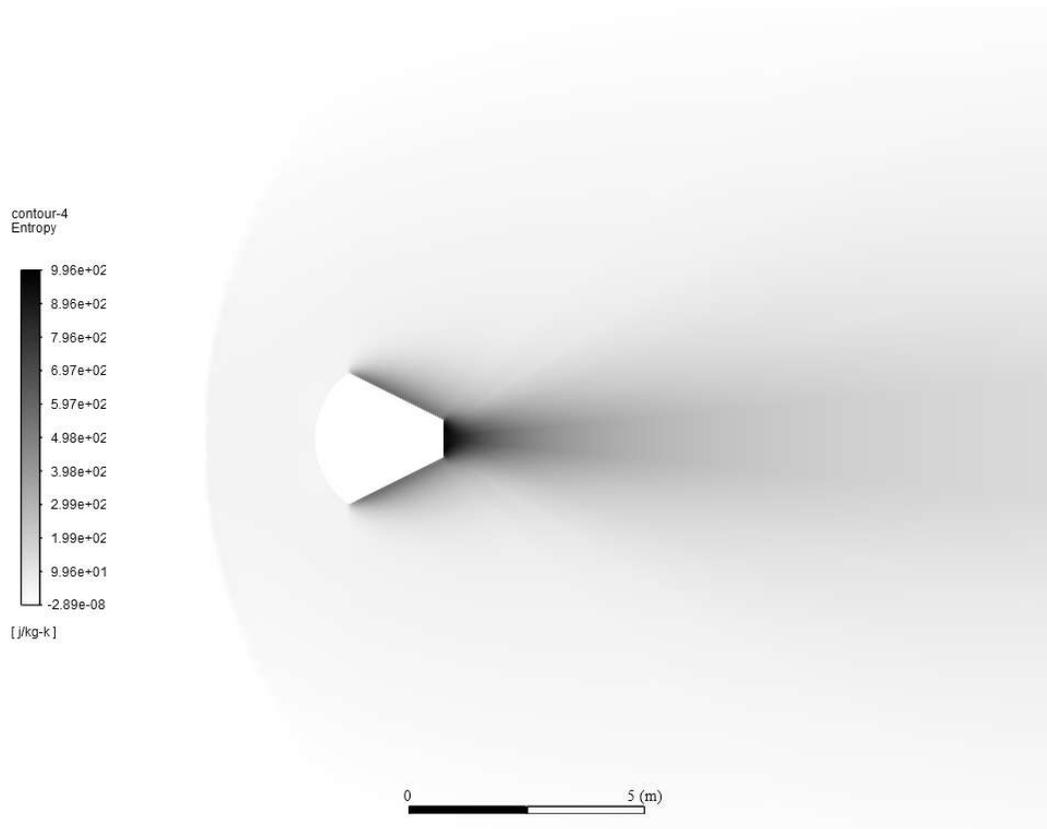


Figura 1.16: Rappresentazione del *contour* dell'entropia nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 2$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

1.3.3 $M = 3$ (griglia non strutturata)

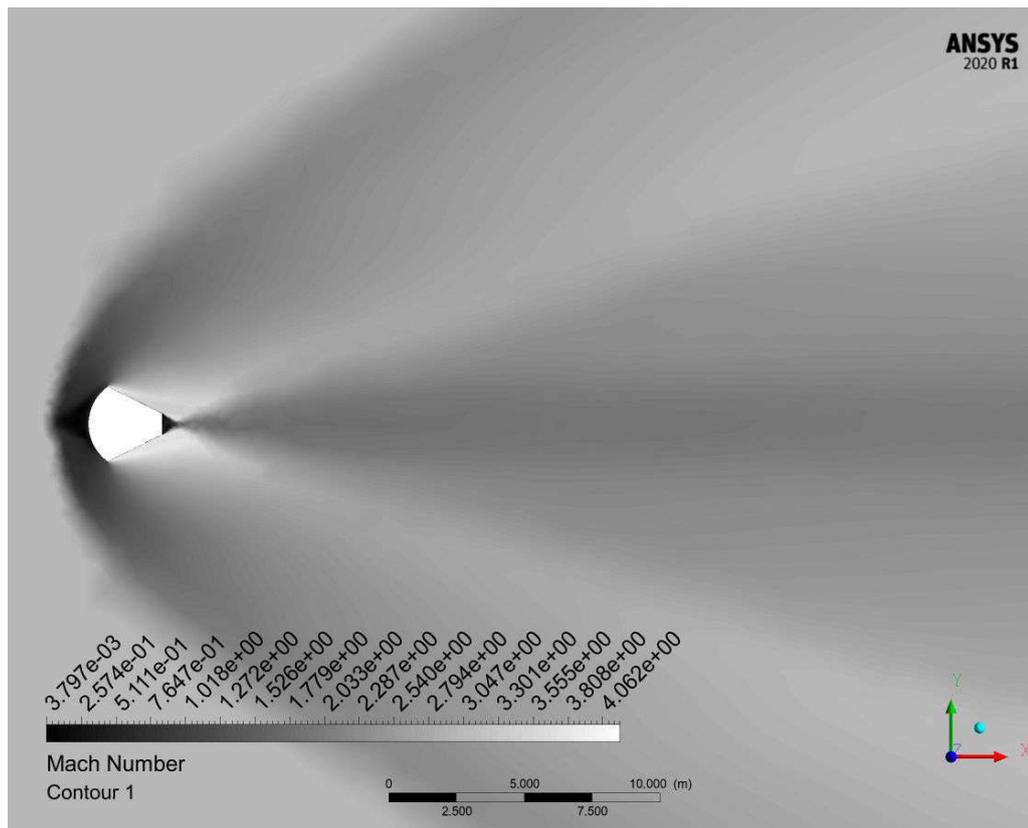


Figura 1.17: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

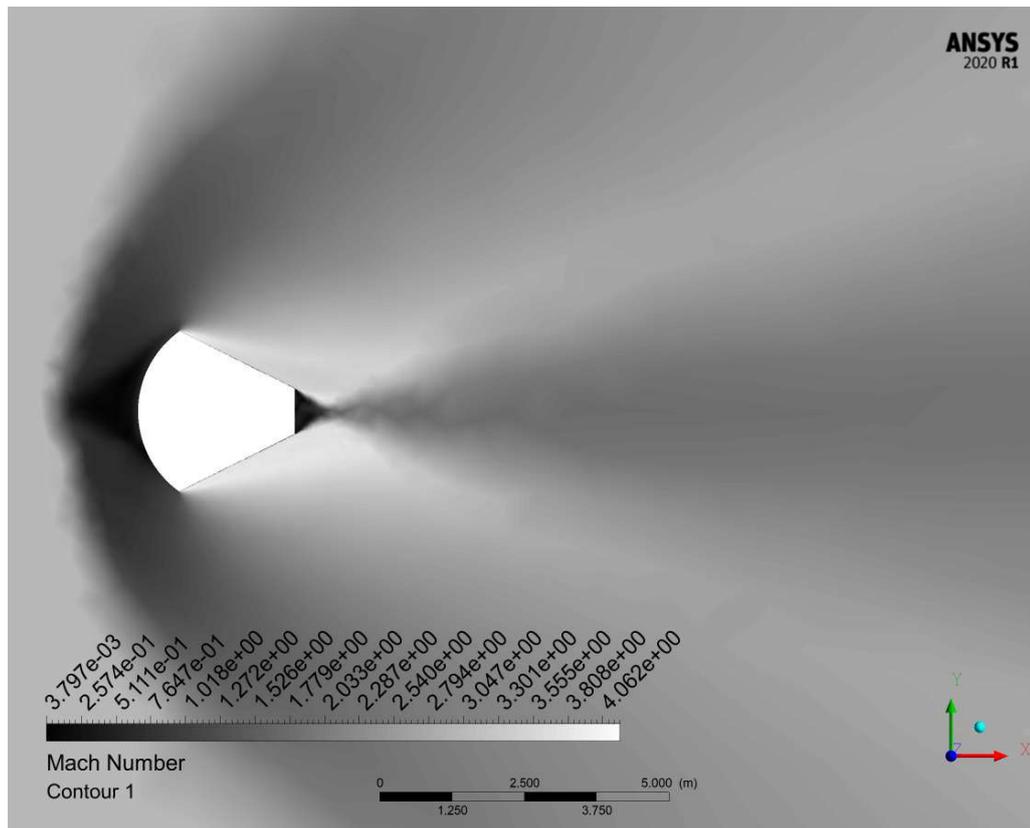


Figura 1.18: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

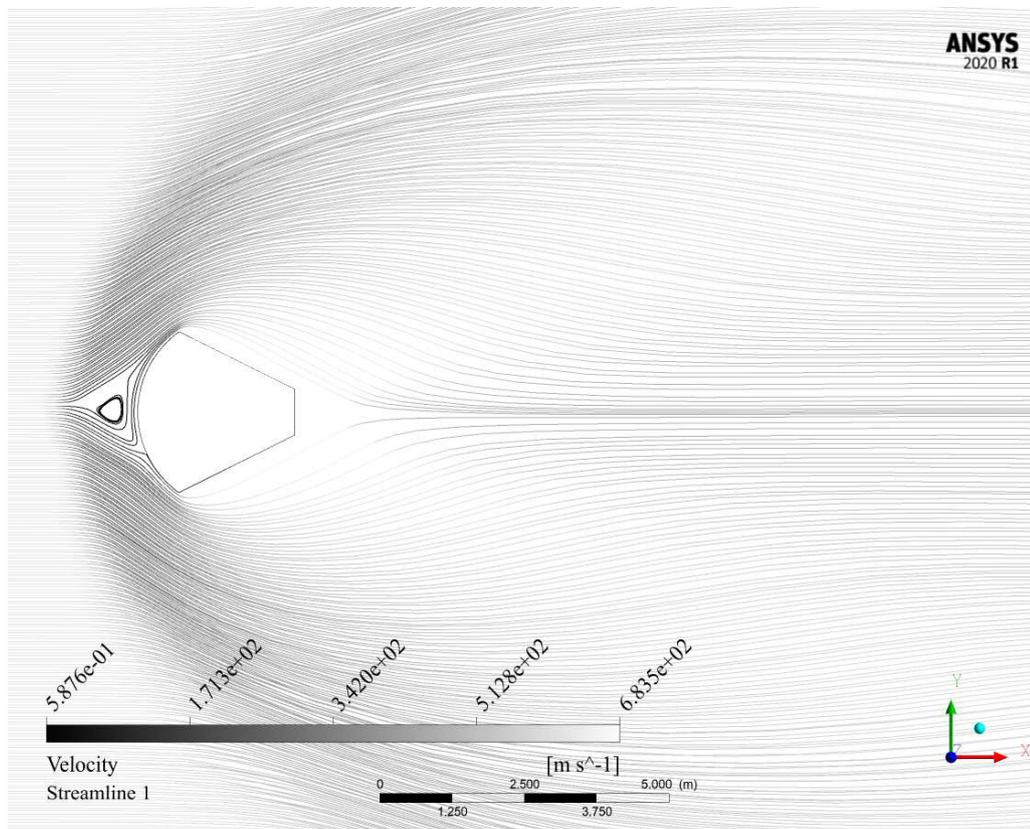


Figura 1.19: Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia non strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

1.3.4 $M = 3$ (griglia strutturata)

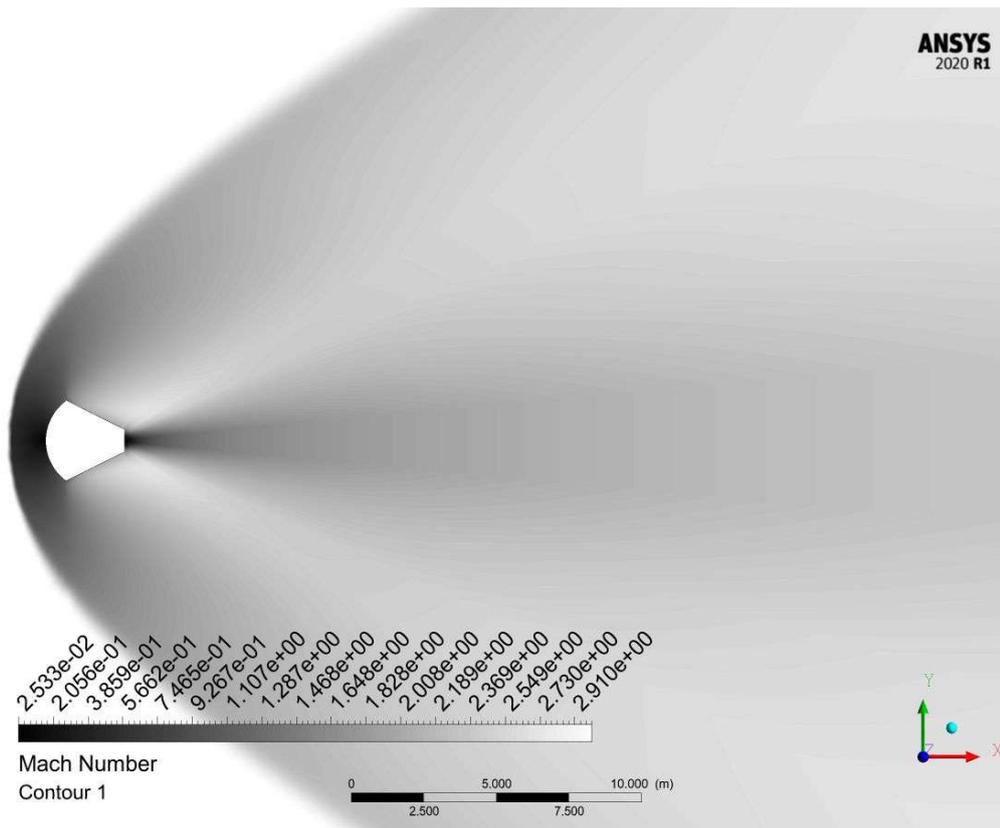


Figura 1.20: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

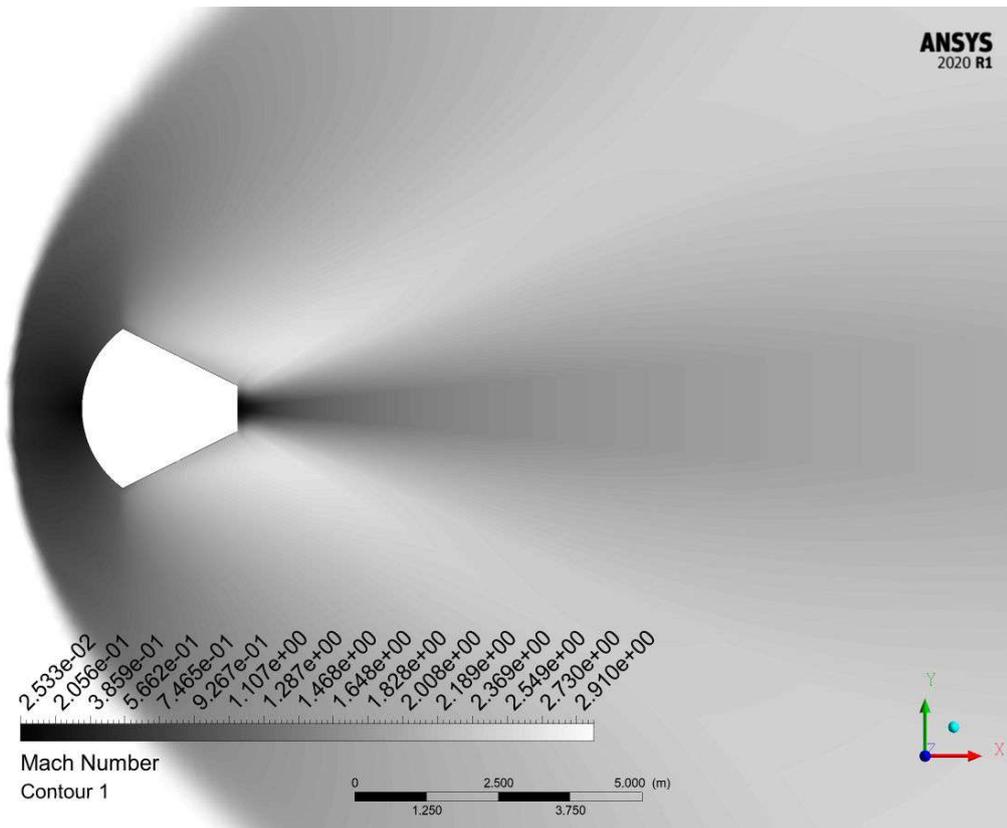


Figura 1.21: Rappresentazione del *contour* del numero di Mach nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

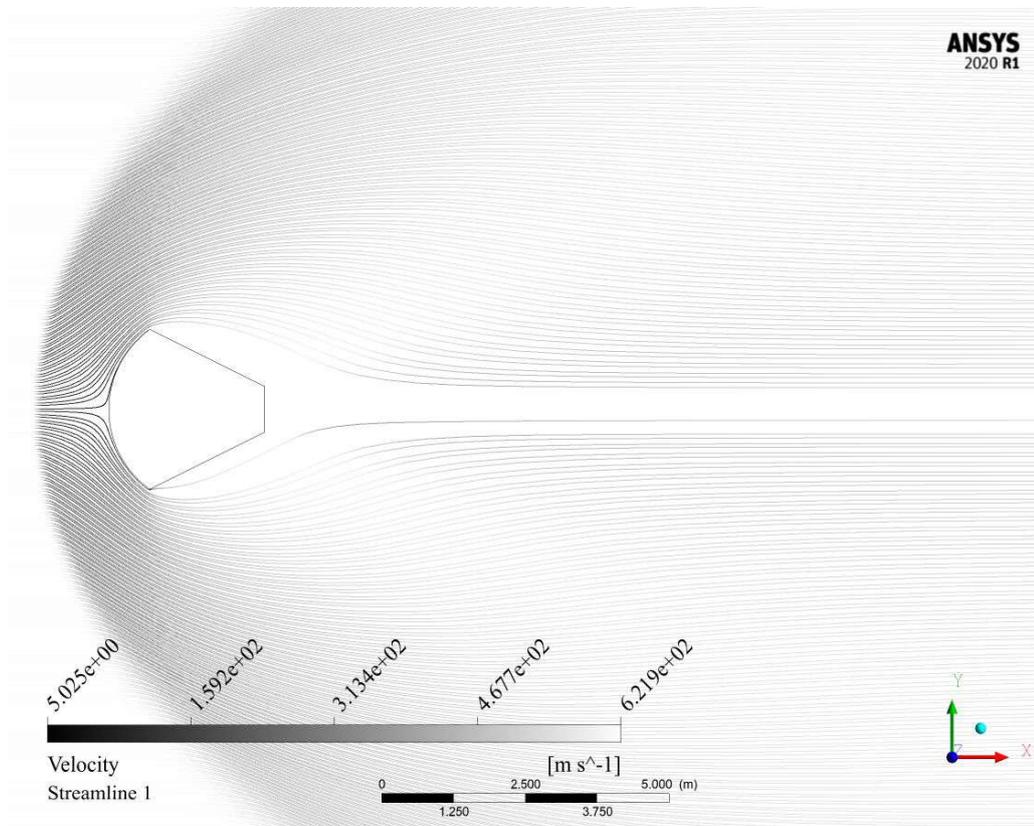


Figura 1.22: Rappresentazione delle linee di corrente nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

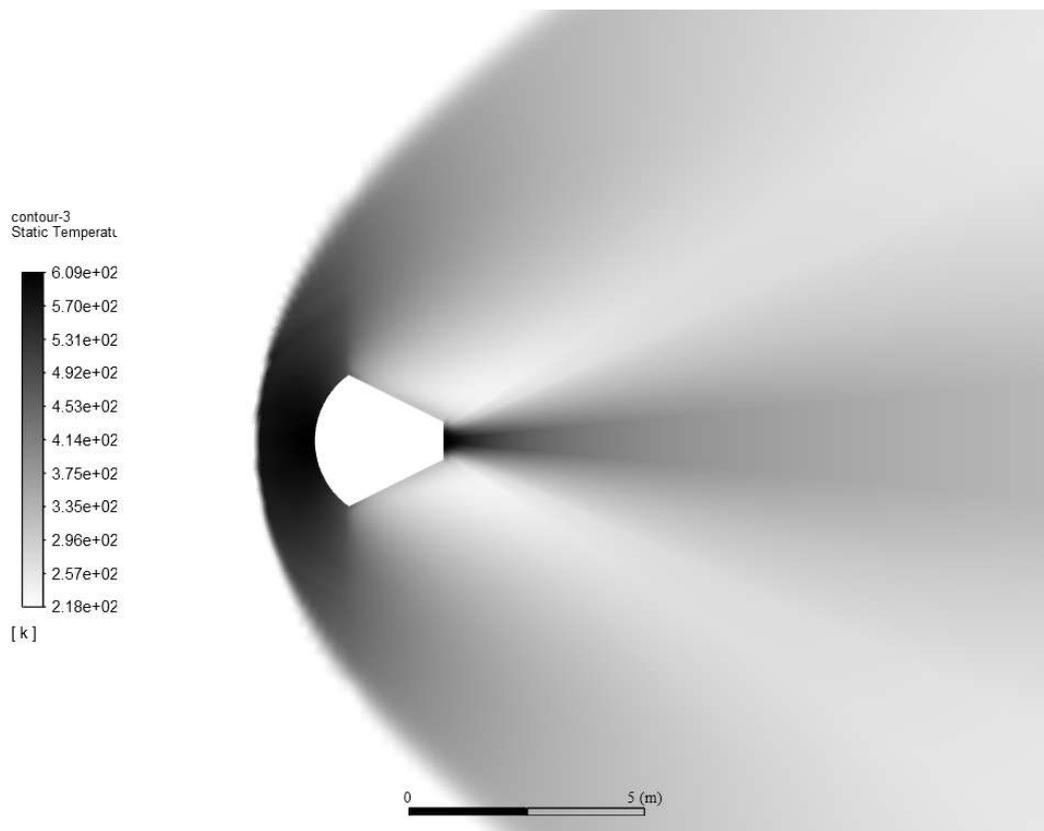


Figura 1.23: Rappresentazione del *contour* della temperatura nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

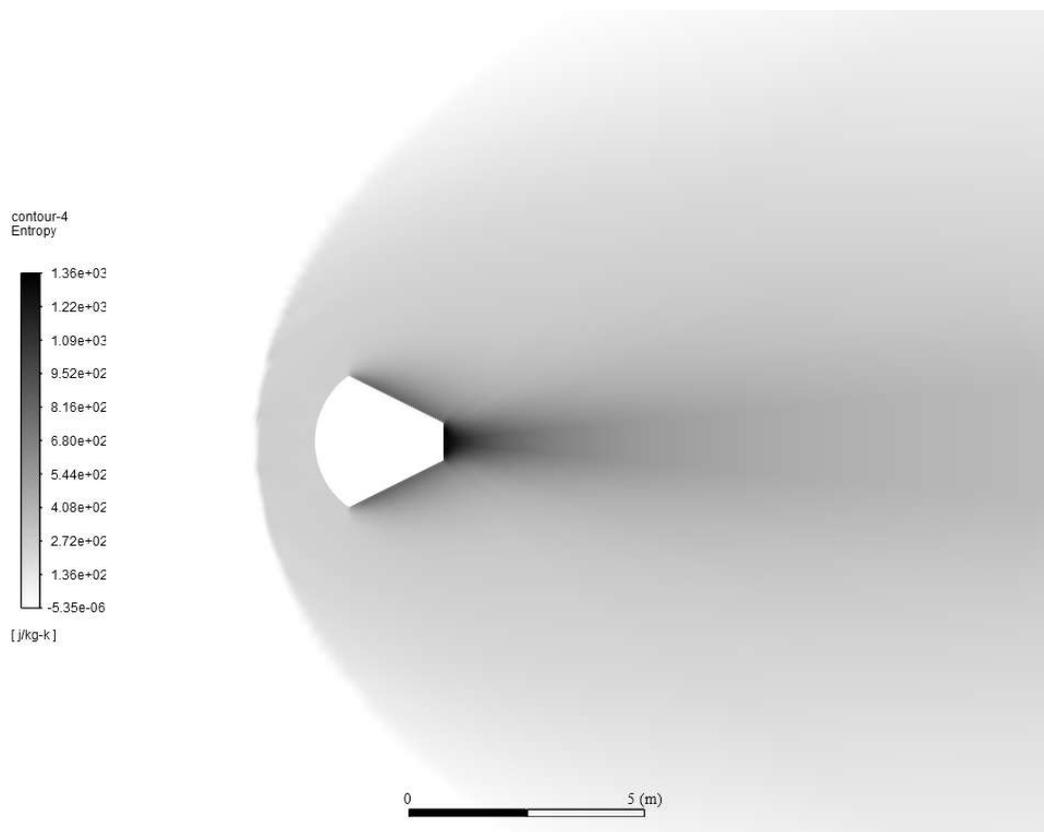


Figura 1.24: Rappresentazione del *contour* dell'entropia nel campo di moto per la capsula *ARD*, nel caso di griglia strutturata. Ingrandimento in prossimità della geometria. $M = 3$. Rappresentazione ottenuta mediante l'ambiente *CFD Post*, disponibile all'interno del *software* Ansys.

1.4 Conclusioni

Prima di commentare le immagini presentate nei capitoli precedenti è bene sottolineare che le informazioni riguardo temperatura e pressione a cui si sono eseguite le simulazioni sono state ricavate a partire dai valori di temperatura e pressione standard, concordi con il piano di volo della capsula, mostrato in [4]. Nonostante ciò, è evidente che, trascurando i fenomeni viscosi ed aerotermochimici, l'evoluzione della temperatura nelle simulazioni non rappresenta l'effettiva evoluzione del suddetto parametro nel campo di moto reale. Valutando il profilo di evoluzione del numero di Mach in funzione della quota, [4], le simulazioni mostrate in questo contesto, che fanno riferimento ai casi $M = 2$ e $M = 3$, vedono la capsula impegnata nelle ultime fasi del rientro, la quota è di circa $10km$. La scelta di tali condizioni per le simulazioni si basa essenzialmente sul fatto che la capsula ha ormai oltrepassato la condizione di massimo flusso termico.

Il valore di riferimento per la temperatura è sinteticamente riportato in tabella 1.7.

<i>quota</i>	10000m
<i>temperatura</i>	218K

Tabella 1.7: Tabella riassuntiva dei parametri dell'atmosfera utilizzati per condurre la simulazione in ipotesi di atmosfera standard ISA, alla quota di $10km$.

Riguardo le immagini presentate nelle sezioni precedenti, è possibile ritrovare alcune fenomenologie tipiche dei campi di moto transonici attorno a geometrie tozze immerse in correnti asintotiche supersoniche: l'onda d'urto appare normale in prossimità del ventre della capsula, per poi incurvarsi allontanandosi dall'asse di simmetria della geometria. L'urto diventa contestualmente meno intenso e la corrente viene deviata con un angolo variabile, passando dalla condizione di urto normale ad urto obliquo. L'incremento del numero di Mach comporta un sostanziale avvicinamento dell'onda d'urto al corpo. E' evidente che l'aspetto di sollecitazione termica gioca un ruolo cruciale nel dimensionamento di tali dispositivi di rientro. L'analisi condotta in questo contesto, dunque, potrebbe essere estesa al caso viscoso con interazione chimica: l'onere computazionale associato a tale problema sarebbe sostanzialmente più elevato ma non modificherebbe significativamente l'analisi di interazione con l'onda d'urto. Tali considerazioni diventano sempre più significative all'avvicinarsi delle condizioni di massimo flusso termico a parete, per cui, i fenomeni aerotermochimici diventano sempre più rilevanti e la dissociazione delle molecole gioca un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle grandezze termofluidodinamiche caratteristiche.

Riguardo l'utilizzo di differenti griglie di calcolo possiamo notare come il caso di *mesh* strutturata fornisca una visualizzazione dei fenomeni di urto più chiara e distinguibile.

Riguardo le immagini riportate nelle figure 1.11, 1.14, 1.19, 1.22, la scelta di riportare l'evoluzione delle linee di corrente in prossimità del corpo è stata fatta al fine di visualizzare la modifica dell'angolo di deviazione della corrente con l'urto allontanandosi dal corpo: tale andamento risulta piuttosto evidente se si confronta l'evoluzione della linea di corrente posizionata sull'asse di simmetria, che appare perfettamente normale alla tangente locale del corpo.

All'interno del campo di moto descritto dai *contour* del numero di Mach, presentati nelle figure 1.20, 1.12, 1.17, 1.9, è possibile individuare la porzione del campo di moto subsonica, che rende il campo di moto transonico, nonostante il numero di Mach della corrente sia ampiamente oltre il limite $M_\infty = 1$.

Confrontando le immagini rappresentate in figura 1.23 e in figura 1.15 possiamo notare che l'incremento del numero di Mach induce un incremento della massima temperatura che si ottiene nel campo di moto. Il valori sono sinteticamente riportati in tabella 1.8.

M_∞	T_{max}
2	392K
3	602K

Tabella 1.8: Tabella riassuntiva dei massimi valori di temperatura ottenuti per diversi numeri di Mach per la capsula ARD, alla quota di $10km$, ottenuti tramite il software Ansys.

E' bene notare che sebbene il salto di temperatura appaia intenso per entrambe i casi, soprattutto per il secondo, siamo comunque al di sotto delle temperature caratteristiche di innesco del grado di libertà vibrazionale (e dunque anche al di sotto delle temperature di dissociazione) di entrambe le specie chimiche che compongono l'aria. Tale considerazione ci consente di validare la scelta di escludere dalle nostre simulazioni qualsiasi tipologia di interazione chimica. Come detto in precedenza, dalle figure 1.24, 1.16 è possibile notare un gradiente di entropia allontanandosi dal piano di simmetria della capsula, che rende il campo di moto rotazionale.

Elenco delle tabelle

1.1	Tabella riassuntiva delle caratteristiche globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano comprimibile, per la capsula <i>ARD</i>	10
1.2	Tabella riassuntiva dei parametri di qualità globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula <i>ARD</i>	10
1.3	Tabella riassuntiva dei parametri dell' <i>Edge Sizing</i> , per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula <i>ARD</i>	10
1.4	Tabella riassuntiva delle caratteristiche globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano comprimibile, per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di <i>mesh</i> strutturata.	12
1.5	Tabella riassuntiva dei parametri di qualità globali della griglia di calcolo, per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di <i>mesh</i> strutturata.	12
1.6	Tabella riassuntiva dei parametri dell' <i>Edge Sizing</i> , per il caso euleriano incomprimibile, per la capsula <i>ARD</i> , nel caso di <i>mesh</i> strutturata.	12
1.7	Tabella riassuntiva dei parametri dell'atmosfera utilizzati per condurre la simulazione in ipotesi di atmosfera standard ISA, alla quota di <i>10km</i>	25
1.8	Tabella riassuntiva dei massimi valori di temperatura ottenuti per diversi numeri di Mach per la capsula <i>ARD</i> , alla quota di <i>10km</i> , ottenuti tramite il software <i>Ansys</i> . . .	25

Bibliografia

- [1] de Nicola, C., (2020), *Appunti per un corso di aerodinamica degli aeromobili*, -, Napoli
- [2] Monti, R., Savino, R., (2003), *Aerodinamica*, Liguori Editore, Napoli
- [3] Carlomagno, G. M., (2009), *Elementi di gasdinamica*, Liguori Editore, Napoli
- [4] Monti, R., Zuppardi, G., (2012), *Elementi di aerodinamica ipersonica*, Liguori Editore, Napoli
- [5] Gervasio, F., (2020), *Il rientro atmosferico*, -, -, Napoli
- [6] Wilson, A., (1998), *The atmospheric reentry demonstrator*, -, -, -.