

*A chi
ha avuto la pazienza
di aspettare*

Università di Pisa
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale “L.Lazzarino”
Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Ali in flusso subsonico e transonico:
problematiche nella valutazione CFD***

*Wings in subsonic and transonic flow:
problems in CFD evaluation*

Relatori:

Prof. Ing. Giovanni Lombardi

Ing. Marco Maganzi

Candidato:

Marcello Andrenacci

Anno Accademico 2008/2009

Sommarior

Negli ultimi anni, grazie anche agli enormi progressi delle tecnologie informatiche, la fluidodinamica computazionale, CFD, ha ottenuto notevoli successi, sia in ambito accademico che industriale; in questo panorama, il presente lavoro di tesi si propone di individuare un modello, efficace ed efficiente, per lo studio delle ali in flussi subsonici e transonici, attraverso il codice Star-CCM+ analizzando, in particolare, l'evoluzione dei risultati al variare dell'infittimento della griglia di calcolo. Si è partiti dai dati sperimentali, individuando alcune configurazioni notevoli; quindi si è provveduto alla generazione della geometria al CAD. Si è successivamente creato un modello fisico rappresentante il più possibile le condizioni delle prove sperimentali e lo si è verificato, confrontando nel frattempo più generi di mesh. Scelta la griglia, ritenuta più efficiente, è stato apportato un progressivo aumento del numero di celle, andando quindi ad analizzare l'evoluzione dei risultati ottenuti (in termini di C_p , C_L , C_M , C_D). Si è ottenuto un buon accordo con i dati sperimentali, in termini di pressioni e forze di portanza, al netto degli errori attesi; per quanto concerne le forze di resistenza si è osservata la possibilità di aumentare l'accuratezza ottenibile e si sono indicate diverse vie di sviluppo in questo senso.

Abstract

In the last few years, thanks also to the enormous progresses of the informatic technologies, the computational fluid dynamics, CFD, it has obtained remarkable successes, in academic or industrial within; in this panorama, the thesis work is proposed to characterize a model, effective and efficient, for the study of wings in subsonic and transonic flow, through the software Star-CCM+. Analyzing, in particular, the evaluation of the result to varying of the mesh size. We have started from the experimental data, characterizing some remarkable configurations, therefore it has been created the cad model. Successively has been created a physical model which is representative for the experimental tests condition, and it has been verified confronting, meantime, more kinds of mesh. Chosen the more efficient mesh, the number of cells has been increased, analyzing the evolution of the obtained results (in terms of C_p , C_L , C_M , C_D). A good agreement with the experimental data has been obtained, considering the waited errors; about the resistance forces it has been observed the possibility to increase obtainable accuracy and various ways of development have been indicated.

Indice

| | |
|---|------------|
| Sommario | i |
| Abstract | ii |
| Indice | I |
| Indice delle figure | III |
| Indice delle tabelle | VI |
| Simbologia | VII |
| CAPITOLO 1 | |
| INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1 La CFD | 2 |
| 1.1.1 L'importanza della griglia di calcolo | 5 |
| 1.2 Star-CCM+ | 7 |
| 1.2.1 Le griglie di calcolo di Star-CCM+..... | 8 |
| 1.3 Il lavoro svolto | 11 |
| CAPITOLO 2 | |
| LE PROVE IN GALLERIA | 24 |
| 2.1 La galleria | 25 |
| 2.2 L'ala in galleria | 27 |
| 2.2.1 Parametri del flusso in galleria..... | 29 |
| 2.3 Risultati sperimentali | 30 |
| 2.3.1 Errori nei dati sperimentali | 33 |
| CAPITOLO 3 | |
| IL MODELLO PER LA CFD | 35 |
| 3.1 Modello geometrico | 36 |
| 3.2 Modello fluidodinamico | 44 |
| 3.2.1 Modello fisico | 44 |
| 3.2.2 Condizioni al contorno | 46 |
| CAPITOLO 4 | |
| PROVE PRELIMINARI | 63 |
| 4.1 Le griglie di calcolo di Star-CCM+ | 64 |
| 4.1.1 Mesh tetraedrica | 65 |
| 4.1.2 Mesh poliedrica | 66 |
| 4.1.3 Mesh trimmata | 67 |
| 4.2 Verifica del modello | 69 |
| 4.2.1 $\alpha=4^\circ$ M=0.3 | 69 |
| 4.2.2 $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 72 |
| 4.2.3 $\alpha=4^\circ$ M=0.7 | 74 |
| 4.2.4 $\alpha=14^\circ$ M=0.7..... | 76 |

| | | |
|-------------------|---|------------|
| 4.3 | Confronto tra le diverse griglie di calcolo..... | 78 |
| 4.3.1 | Confronto tra le mesh per il caso $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 79 |
| 4.3.2 | Confronto tra le mesh per il caso $\alpha=14^\circ$ $M=0.3$ | 81 |
| 4.3.1 | Confronto tra le mesh per il caso $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 83 |
| 4.3.2 | Confronto tra le mesh per il caso $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 85 |
| 4.4 | Risultati e scelta della griglia | 87 |
| CAPITOLO 5 | | |
| | INFITTIMENTO DELLA MESH | 88 |
| 5.1 | Criteri adottati..... | 89 |
| 5.2 | Infittimenti | 91 |
| 5.2.1 | $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 91 |
| 5.2.2 | $\alpha=14^\circ$ $M=0.3$ | 98 |
| 5.2.3 | $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 104 |
| 5.2.4 | $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 110 |
| CAPITOLO 6 | | |
| | CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI..... | 91 |
| 6.1 | Risultati ottenuti..... | 92 |
| 6.2 | Sviluppi futuri..... | 94 |
| | Appendici..... | 96 |
| | Bibliografia..... | 117 |

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| FIGURA 1-1: SCHEMA SOLUZIONI CFD | 3 |
| FIGURA 2-1: SCHEMA DELLA GALLERIA | 25 |
| FIGURA 2-2: SLITTER-PLATES | 28 |
| FIGURA 2-3: C_L PER FLUSSO A $M=0.3$ | 19 |
| FIGURA 2-4: CP SULL'ALA A MACH 0,3 ED INCIDENZA 4° | 31 |
| FIGURA 2-5: CP SULL'ALA A MACH 0.3 ED INCIDENZA 14° | 31 |
| FIGURA 2-6: CP SULL'ALA A MACH 0.7 ED INCIDENZA 4° | 32 |
| FIGURA 2-7: CP SULL'ALA A MACH 0.7 ED INCIDENZA 14° | 32 |
| FIGURA 2-8: ERRORE | 33 |
| FIGURA 2-9: ERRORE DOVUTO ALLA SPLITTER-PLATE IN FLUSSI TRANSONICI | 34 |
| FIGURA 3-1: PUNTI IMPORTATI IN CATIA | 36 |
| FIGURA 3-2: ALA AL CAD | 37 |
| FIGURA 3-3: DOMINIO | 38 |
| FIGURA 3-4: DOMINIO DEL FLUIDO | 38 |
| FIGURA 3-5: MODO DI IMPORTAZIONE | 39 |
| FIGURA 3-6: REGION | 39 |
| FIGURA 3-7: MESH INIZIALE CON PARTICOLARE DELL'ALA E PROPRIETÀ | 39 |
| FIGURA 3-8: VOLUME SHAPE | 40 |
| FIGURA 3-9: PARAMETRI DELLA MESH SUPERFICIALE | 40 |
| FIGURA 3-10: MESH SUPERFICIALE E PARTICOLARE | 41 |
| FIGURA 3-11: PARAMETRI PER LA MESH DI VOLUME | 42 |
| FIGURA 3-12: MESH DI VOLUME POLIEDRICA VARI PARTICOLARI | 32 |
| FIGURA 3-13: MODELLO FISICO | 44 |
| FIGURA 3-14: PRIPRIETÀ DELL'ARIA | 45 |
| FIGURA 3-15: CONDIZIONI INIZIALI PER MACH 0.3 | 46 |
| FIGURA 3-16: CONDIZIONI INIZIALI PER MACH 0.7 | 46 |
| FIGURA 3-17: CONDIZIONI AL CONTORNO | 46 |
| FIGURA 3-18: PARAMETRI DEL FREESTREAM PER $M=0.3$ | 47 |
| FIGURA 3-19: PARAMETRI DEL FREESTREAM PER $M=0.7$ | 47 |
| FIGURA 3-20: PRESSURE OUTLET PER $M=0.3$ | 48 |
| FIGURA 3-21: PRESSURE OUTLET PER $M=0.7$ | 48 |
| FIGURA 4-1: MESH SUPERFICIALE PER $4^\circ M=0.3, 14^\circ M=0.3, 4^\circ M=0.7, 14^\circ M=0.7$ | 65 |
| FIGURA 4-2: MENÙ PER LA SELEZIONE DELLA MESH DI VOLUME | 65 |
| FIGURA 4-3: MESH DI VOLUME SENZA URTO | 66 |
| FIGURA 4-4: MESH DI VOLUME CON URTO | 66 |
| FIGURA 4-5: MESH DI VOLUME SENZA URTO | 67 |
| FIGURA 4-6: MESH DI VOLUME CON URTO | 67 |
| FIGURA 4-7: MESH DI VOLUME SENZA URTO | 68 |
| FIGURA 4-8: MESH DI VOLUME CON URTO | 68 |
| FIGURA 4-9: MESH DI VOLUME SENZA URTO | 68 |
| FIGURA 4-10: MESH DI VOLUME CON URTO | 68 |
| FIGURA 4-11: $\alpha=4^\circ M=0.3$ DORSO | 70 |
| FIGURA 4-12: $\alpha=4^\circ M=0.3$ VENTRE | 70 |
| FIGURA 4-13: CP PER IL CASO $\alpha=4^\circ M=0.3$ | 70 |
| FIGURA 4-15: FLUSSO NEL PIANO DI SIMMETRIA | 46 |
| FIGURA 4-16: LINEE DI FLUSSO | 46 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4-16: $\alpha=14^\circ$ M=0.3 DORSO..... | 72 |
| FIGURA 4-17: $\alpha=14^\circ$ M=0.3 VENTRE..... | 72 |
| FIGURA 4-18: CP PER IL CASO $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 73 |
| FIGURA 4-19: EVOLUZIONE DELLO STRATO LIMITE..... | 73 |
| FIGURA 4-20: $\alpha=4^\circ$ M=0.7 DORSO..... | 74 |
| FIGURA 4-21: $\alpha=4^\circ$ M=0.7 VENTRE..... | 74 |
| FIGURA 4-22: CP PER IL CASO $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 75 |
| FIGURA 4-23: MACH NELLA SEZIONE AL 4%..... | 75 |
| FIGURA 4-24: MACH NELLA SEZIONE AL 30%..... | 75 |
| FIGURA 4-25: MACH NELLA SEZIONE AL 60%..... | 75 |
| FIGURA 4-26: MACH NELLA SEZIONE AL 97%..... | 75 |
| FIGURA 4-27: $\alpha=14^\circ$ M=0.7 DORSO..... | 76 |
| FIGURA 4-28: $\alpha=14^\circ$ M=0.7 VENTRE..... | 76 |
| FIGURA 4-29: CP PER IL CASO $\alpha=14^\circ$ M=0.7..... | 77 |
| FIGURA 4-31: ZONA CON STRSTO LIMITE SEPARATO..... | 52 |
| FIGURA 4-31: CONFRONTO DEL C_p TRA LE DIVERSE MESH $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 79 |
| FIGURA 4-32: CONFRONTO NELLA CONVERGENZA DEL C_L PER $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 79 |
| FIGURA 4-33: CONFRONTO MESH $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 80 |
| FIGURA 4-34: CONFRONTO DEL C_p TRA LE DIVERSE MESH $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 81 |
| FIGURA 4-35: CONFRONTO NELLA CONVERGENZA DEL C_L PER $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 81 |
| FIGURA 4-36: CONFRONTO MESH $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 82 |
| FIGURA 4-37: CONFRONTO DEL C_p TRA LE DIVERSE MESH $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 83 |
| FIGURA 4-38: CONFRONTO NELLA CONVERGENZA DEL C_L PER $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 83 |
| FIGURA 4-39: CONFRONTO MESH $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 84 |
| FIGURA 4-40: CONFRONTO DEL C_p TRA LE DIVERSE MESH $\alpha=14^\circ$ M=0.7..... | 85 |
| FIGURA 4-41: CONFRONTO NELLA CONVERGENZA DEL C_L PER $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 85 |
| FIGURA 4-42: CONFRONTO MESH $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 86 |
| | |
| FIGURA 5-1: RISULTATI SUL C_L PER $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 91 |
| FIGURA 5-2: RISULTATI SU C_D E C_M PER IL CASO $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 92 |
| FIGURA 5-3: RESISTENZA $\alpha=4^\circ$ M=0.3..... | 93 |
| FIGURA 5-4: ANDAMENTO DEL PARAMETRO QUALITY..... | 94 |
| FIGURA 5-5: ANDAMENTO DEL PARAMETRO SKEWNESS..... | 94 |
| FIGURA 5-6: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 4%..... | 95 |
| FIGURA 5-7: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 30%..... | 95 |
| FIGURA 5-8: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 60%..... | 96 |
| FIGURA 5-9: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 97%..... | 96 |
| FIGURA 5-10: LINEE DI FLUSSO..... | 71 |
| FIGURA 5-12: EVOLUZIONE DELLO STRATO LIMITE CON GLI INFITTIMENTI..... | 97 |
| FIGURA 5-11: VORTICITÀ..... | 72 |
| FIGURA 5-13: RISULTATI SUL C_L PER IL CASO $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 98 |
| FIGURA 5-14: RISULTATI SU C_D E C_M PER IL CASO $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 99 |
| FIGURA 5-15: RESISTENZA $\alpha=14^\circ$ M=0.3..... | 100 |
| FIGURA 5-16: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 4%..... | 101 |
| FIGURA 5-17: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 30%..... | 101 |
| FIGURA 5-18: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 60%..... | 102 |
| FIGURA 5-19: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 97%..... | 102 |
| FIGURA 5-20: VISUALIZZAZIONE DEL COEFFICIENTE DI PRESSIONE..... | 102 |
| FIGURA 5-21: EVOLUZIONE DELLA VORTICITÀ E LINEE DI FLUSSO..... | 103 |
| FIGURA 5-22: RISULTATI SUL C_L PER IL CASO $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 104 |
| FIGURA 5-23: RISULTATI SU C_D E C_M PER IL CASO $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 105 |
| FIGURA 5-24: RESISTENZA $\alpha=4^\circ$ M=0.7..... | 106 |
| FIGURA 5-25: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 4%..... | 107 |
| FIGURA 5-26: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 30%..... | 107 |
| FIGURA 5-27: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 60%..... | 108 |
| FIGURA 5-28: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 97%..... | 108 |
| FIGURA 5-29: CP SUL DORSO DELL'ALA..... | 109 |
| FIGURA 5-30: CP SUL VENTRE DELL'ALA..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 5-31: VISUALIZZAZIONE DEL CAMPO DI VELOCITÀ..... | 84 |
| FIGURA 5-32: NUMERO DI MACH NEL CAMPO..... | 84 |
| FIGURA 5-33: RISULTATI SUL C_L PER IL CASO $\alpha=14^\circ M=0.7$ | 110 |
| FIGURA 5-34: RISULTATI SU C_D E C_M PER IL CASO $\alpha=14^\circ M=0.7$ | 111 |
| FIGURA 5-35: RESISTENZA $\alpha=14^\circ M=0.7$ | 112 |
| FIGURA 5-36: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 4%..... | 112 |
| FIGURA 5-37: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 30% | 113 |
| FIGURA 5-38: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 60% | 113 |
| FIGURA 5-39: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NELLA SEZIONE AL 97% | 114 |
| FIGURA 5-40: EVOLUZIONE DELL'URTO CON GLI INFITTIMENTI | 114 |
| FIGURA 5-41: COEFFICIENTE DI PRESSIONE NEL CAMPO | 114 |
| FIGURA 5-43: STREAMLINE | 115 |
| FIGURA 5-42: CAMPO DI VELOCITÀ | 90 |
| | |
| FIGURA 6-1: VERIFICA FINALE | 93 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|-----|
| TABELLA 2-1: PERFORMANCE DELLA GALLERIA..... | 26 |
| TABELLA 2-2: CARATTERISTICHE DELL'ALA..... | 27 |
| TABELLA 2-3: COORDINATE ADIMENSIONALI DELLE PRESE DI PRESSIONE..... | 28 |
| TABELLA 2-4: PARAMETRI DEL FLUSSO..... | 29 |
| TABELLA 2-5: RISULTATI SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE INTEGRALI..... | 30 |
| TABELLA 2-6: ERRORE SPERIMENTALE SUL CP..... | 33 |
| | |
| TABELLA 3-1: CARATTERISTICHE DEL FLUSSO INDISTURBATO..... | 46 |
| | |
| TABELLA 4-1: PARAMETRI COMUNI MESH SUPERFICIALE..... | 64 |
| TABELLA 4-2: PARAMETRI DELLA MESH SUPERFICIALE..... | 64 |
| TABELLA 4-3: PARAMETRI MESH TETRAEDRICA..... | 66 |
| TABELLA 4-4: PARAMETRI MESH POLIEDRICA..... | 67 |
| TABELLA 4-5: PARAMETRI MESH TRIMMATA IN COORDINATE DI LABORATORIO..... | 67 |
| TABELLA 4-6: MESH DI VOLUME TRIMMATA SECONDO LA DIREZIONE DEL FLUSSO..... | 68 |
| TABELLA 4-7: CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI PER LA SIMULAZIONE $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 69 |
| TABELLA 4-8: CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI PER LA SIMULAZIONE $\alpha=14^\circ$ $M=0.3$ | 72 |
| TABELLA 4-10: CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI PER LA SIMULAZIONE $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 74 |
| TABELLA 4-11: CONFRONTO CON DATI SPERIMENTALI PER LA SIMULAZIONE $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 76 |
| TABELLA 4-12: CONFRONTO MESH $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 79 |
| TABELLA 4-13: CONFRONTO MESH $\alpha=14^\circ$ $M=0.3$ | 81 |
| TABELLA 4-14: CONFRONTO MESH $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 83 |
| TABELLA 4-15: CONFRONTO MESH $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 85 |
| | |
| TABELLA 5-1: PARAMETRI MODIFICATI..... | 89 |
| TABELLA 5-2: PROGRAMMA DI INFITTIMENTI..... | 89 |
| TABELLA 5-3: RISULTATI DELL'INFITTIMENTO NEL CASO $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 91 |
| TABELLA 5-4: RESISTENZA $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 93 |
| TABELLA 5-5: RISULTATI DELL'INFITTIMENTO NEL CASO $\alpha=14^\circ$ $M=0.3$ | 98 |
| TABELLA 5-6: RESISTENZA $\alpha=4^\circ$ $M=0.3$ | 100 |
| TABELLA 5-7: RISULTATI DELL'INFITTIMENTO NEL CASO $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 104 |
| TABELLA 5-8: RESISTENZA $\alpha=4^\circ$ $M=0.7$ | 106 |
| TABELLA 5-9: RISULTATI DELL'INFITTIMENTO NEL CASO $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 110 |
| TABELLA 5-10: RESISTENZA $\alpha=14^\circ$ $M=0.7$ | 111 |

Simbologia

| | | |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| V | [m/s] | Velocità del flusso |
| ρ | [kg/m ³] | Densità del flusso |
| μ | [kg/m*s] | Viscosità dinamica |
| a | [m/s] | Velocità del suono |
| p | [Pa] | Pressione |
| p₀ | [Pa] | Pressione totale |
| M | [-] | Numero di Mach |
| Re | [-] | Numero di Reynolds |
| α | [gradi] | Angolo di incidenza |
| δ | [m] | Spessore dello strato limite |
| C_L | [-] | Coefficiente di portanza |
| C_M | [-] | Coefficiente di momento |
| C_D | [-] | Coefficiente di resistenza |
| C_p | [-] | Coefficiente di pressione |