

Negli ultimi venti anni il costo dei carburanti ha subito un notevole aumento con un significativo impatto sui costi del trasporto aeronautico. Inoltre, la Comunità Europea ha lanciato una politica di salvaguardia dell'ambiente in cui viviamo introducendo severi vincoli sull'emissione di gas inquinanti, quali l'anidride carbonica e gli ossidi di azoto e sui rumori emessi dai futuri aerei commerciali. Secondo le direttive emesse del gruppo ACARE (Advisory Council for Aerospace Research in Europe), gli aerei di nuova generazione dovranno avere caratteristiche tali da ridurre le emissioni di ossidi di azoto del 80 per cento e le emissioni di anidride carbonica del 50 per cento, mentre il rumore dovrà essere ridotto di 10 EPNdB (equivalente a dimezzare il rumore emesso da un aereo costruito con la tecnologia degli anni 2000). Da qui la forte richiesta dell'industria aeronautica per lo sviluppo di nuove tecnologie mirate alla riduzione di qualsiasi forma di resistenza aerodinamica, cosicché da assicurare una conseguente riduzione di carburante e di emissione di gas inquinanti. Si prevede che qualsiasi miglioramento aerodinamico ottenuto attraverso un miglioramento dell'efficienza dell'aereo abbia, come conseguenza indiretta, un miglioramento dell'emissione di rumore. Infatti, l'eliminazione di qualsiasi separazione del flusso su componenti dell'aereo ottenuta migliorando per esempio l'integrazione pilone-ala-nacelle, come pure un miglioramento dell'integrazione dell'ala-fusoliera o del piano di coda-fusoliera, eccetera, abbia definitivamente effetti benefici sul rumore emesso.

Ovviamente, il contributo maggiore al raggiungimento di questi obiettivi verrà dallo sviluppo di nuovi motori a basso consumo di carburante e, quindi, a bassa emissione di inquinanti, come nel caso del *Geared Turbo Fan* e del *Counter Rotating Open Rotor*, ma questo non sarà sufficiente. In questo contesto, ogni tecnologia capace potenzialmente di migliorare l'efficienza di un aereo ha ricevuto nuova attenzione. Tecniche di controllo del flusso come *macro and micro vortex generators*, *riblets*, *synthetic jets*, *plasma actuators*, *unsteady blowing*, *steady and unsteady suction*, *micro-roughness elements*, *morphed structures*, *gurney flaps*, *winglets*, *trapped vortex*, solo per citare alcune delle più popolari, hanno ricevuto un nuovo impulso allo sviluppo e alla ricerca. Alcune di queste tecniche sono oggi comunemente usate su aerei, come per esempio i *macro and micro vortex generators* o come le *winglets*, mentre altre ancora hanno un basso *Technological Readiness Level* (TRL) per cui necessitano di ulteriori studi ed esperimenti.

Dato il forte interesse del CIRA (Centro Italiano di Ricerca Aerospaziale) per queste tecniche di controllo del flusso, alcune di esse sono state studiate sia attraverso simulazioni numeriche che tecniche sperimentali, come per esempio *unsteady blowing* [1], oppure *synthetic jets* usati per il controllo della separazione del flusso [2], [3], la tecnica dell'intrappolamento di vortici per aumentare la portanza e ridurre la resistenza aerodinamica ([4], [5], [6], [7]), o l'uso dei *plasma actuators* per il controllo del *buffeting* e la riduzione dell'intensità dell'onda d'urto [8], [9]. Tra queste tecniche, la più interessante è certamente quella dei *trapped vortex*. Questa tecnica ha ispirato lo studio condotto in questa tesi, e cioè, lo studio delle instabilità che si innescano in una cavità. La presenza di vortici nei flussi intorno a corpi aerodinamici o nei flussi interni, tali come accade nelle camere di combustione, ha certamente un effetto a volte negativo e indesiderato (per esempio i vortici che si staccano dal flap di un aereo e che causano sia una separazione turbolenta che rumore, oppure una separazione del flusso con scia vorticoso accompagnata da una conseguente perdita di portanza e aumento di resistenza come accade nel caso di una ala in stallo) ed altre volte positivo come accade nelle camere di combustione dove, in generale, i vortici aiutano a stabilizzare la fiamma. Ad ogni modo, sia i meccanismi che generano i vortici e sia i modelli teorici per la loro simulazione sono ancora oggetto di studio perchè non del tutto noti. L'idea di intrappolare un vortice in una cavità presente in un profilo alare è interessante perchè potrebbe avere due effetti positivi, cioè produrre un aumento di portanza dovuto all'aumento di circolazione introdotta dalla presenza del vortice e, allo stesso tempo, una riduzione di resistenza dovuta alla soppressione o al ritardo della separazione di flusso (riduzione di resistenza di pressione). Questo concetto è tanto più vero quanto maggiore è lo spessore massimo del profilo alare. Ovviamente, la cavità deve avere una particolare forma e deve essere correttamente posizionata sulla superficie dorsale del profilo, nella regione del bordo di uscita. Al CIRA (Centro Italiano di Ricerca Aerospaziale) sono stati eseguiti alcuni studi teorici e sperimentali per investigare le potenzialità di questa tecnica nell'aumentare la portanza e ridurre la resistenza. La principale conclusione è stata che questa tecnica funziona quando il vortice ruota e si posiziona nel centro della cavità. Questo risultato può essere ottenuto solo attraverso l'utilizzo della suzione che stabilizza la presenza del vortice, ma molti dei benefici vengono persi per via del costo della suzione. La principale ragione per cui il vortice senza suzione viene espulso è da attribuirsi ad alcuni meccanismi di instabilità che si innescano nella cavità.

Ora poichè qualunque mezzo di trasporto, dalle auto ai treni, dalle navi agli aerei, ha sulla sua superficie esterna delle cavità, a volte dovute a necessità legate al moto del veicolo stesso, come nel caso delle ruote di un'auto o per il carrello di un aereo, altre volte dovute alla necessità di installazione

di strumentazione oppure legati al lancio di oggetti (baie per il lancio di provvisye, paracadutisti, eccetera) come accade nel caso di aerei di trasporto merci o di salvataggio. In tutti questi casi, la presenza della cavità innesca disturbi acustici con vibrazioni che si autoeccitano e che possono causare danni strutturali dovuti a fatica oppure forte aumento della resistenza aerodinamica. Un semplice esperimento che evidenzia questo fenomeno acustico è l'apertura di un finestrino di una che corre. Si nota immediatamente un rumore con forti fluttuazioni che aumentano di intensità all'aumentare della velocità (e perciò del numero di Reynolds) questo perchè la cabina passeggeri funziona come un risonatore di Helmholtz. Questo fenomeno diventa ancora più drammatico nel caso di aerei laddove sono presenti carrelli oppure sportelli ventrali (come nel caso di aerei che hanno la necessità di lancio di oggetti durante il volo come un Canadair per il lancio d'acqua, veicoli di salvataggio per il lancio di vettovaglie, aerei militari per il lancio di materiale di supporto, eccetera), ma anche in tutti quei casi in cui le cavità sono usate come tecnica di controllo del flusso come accade nel caso delle cavità che intrappolano vortici. In tutti quei casi è necessario sopprimere le oscillazioni e, a questo scopo, si possono usare delle tecniche di controllo del flusso passive o attive. Ma allo scopo di identificare la tecnica più efficiente è necessario conoscere e capire i meccanismi che innescano il fenomeno e questa è stata la principale ragione dello studio di questa tesi, cioè identificare quali tipi di instabilità si sviluppano nei flussi su cavità aperte, poichè solo in questo modo si può identificare una tecnica del controllo del flusso, che con una spesa minima di energia, elimina questi fenomeni indesiderati. Non c'è dubbio che se si è in grado anche di calcolare la regione più sensibile a possibili perturbazioni strutturali, la cosiddetta sensibilità strutturale, questo sarà utile nel trovare la posizione ottimale dove piazzare e integrare i sistemi per il controllo del flusso. Gli studi sono stato concentrati sulla instabilità che si innescano in cavità 2.5D (chiamate in questo modo per l'analogia con l'ala infinita a freccia), cioè, la cavità avente dimensione infinita nella direzione dell'apertura e sulla cavità puramente 3D. A questo scopo, sono state condotte analisi di stabilità globale e sensibilità strutturale per una cavità quadrata (larghezza e profondità uguali) quando è investita da un flusso alla Couette e sia quando è investita da uno strato limite alla Blasius. Queste analisi sono poi state condotte anche nel caso di cavità chiusa. Le simulazioni numeriche per tutti e tre i casi sono state eseguite utilizzando un *codice open source* agli elementi finiti (noto come *FreeFem*). Queste simulazioni hanno permesso di calcolare l'analisi di stabilità globale, la sensibilità strutturale e di visualizzare in tutti e tre i casi la regione del *wavemaker*, cioè, la regione del campo di moto più sensibile ad ogni variazione strutturale nel sistema che governa il moto. L'analisi dei risultati ha mostrato che in entrambi i casi di cavità aperta e chiusa, la regione del *wavemaker*, è sempre tutta contenuta nella cavità. Poichè il numero d'onda in direzione dell'apertura così come il numero di Reynolds basato sulla velocità media lungo la linea di corrente che connette i due spigoli della cavità, erano, in media, gli stessi per i tre casi investigati, si è ipotizzata l'esistenza di un singolo meccanismo che innesca l'instabilità in cavità di tipo 2.5D (aperte o chiuse che siano). Questo tipo di instabilità si verifica ad un numero di Reynolds inferiore a quello di una cavità pura 2D ed è causato da una biforcazione stazionaria del tipo *Pitch Fork*.

La cavità cubica è stata investigata eseguendo una serie di costose simulazioni numeriche usando un metodo spettrale agli elementi finiti che combina la grande accuratezza dei metodi spettrali e la flessibilità dei metodi agli elementi finiti nell'approcciare geometrie complesse. Anche in questo caso, il codice utilizzato è *open source* ed i calcoli sono stati eseguiti sul *cluster* Fermi, disponibile presso il CINECA, usando 4000 e 8000 processori in parallelo. Sia la stabilità globale che la sensibilità strutturale sono state eseguite al variare del numero di Reynolds.

Da questi risultati preliminari è stato possibile dedurre alcune congetture e in particolare

- L'instabilità in cavità cubica si verifica a causa di una biforcazione instazionaria di *Hopf*,
- Le instabilità che si innescano in cavità cubiche sono esterne alla cavità stessa,
- L'instabilità cubica ha una similitudine con quelle studiate da Sipp and Lebedev [10], cioè, esse sono del tipo *Wake Mode*, e quindi è molto simile a quella che si verifica in una cavità puramente 2D.

È necessario sottolineare che queste conclusioni sono valide solo nel caso di cavità cubica, perchè è facile che una variazione nella dimensione della cavità in direzione dell'apertura possa innescare un differente tipo di instabilità. È presumibile che un aumento della larghezza della cavità rispetto alla lunghezza, cioè un aumento dell' *Aspect Ratio*, possa innescare un altro tipo di instabilità. Comunque, per completare questo studio e confermare queste conclusioni preliminari saranno eseguite ulteriori simulazioni 3D. Per completare in modo esaustivo questo lavoro, sarebbe anche auspicabile progettare un esperimento ad hoc mirato a verificare e confermare i risultati numerici ottenuti sino ad oggi.

- [1] F. Nicolosi, D. P. Coiro, E. F. Bellobuono and R. Donelli. Improving aircraft endurance through turbulent separation control by pulsed blowing. *Journal of Aircraft*, 45, No 3:9901001, 2009.
- [2] G. M. di Cicca, R. S. Donelli, G. Iuso. *Flow Field development of an axisymmetric synthetic jet*, Firenze, Settembre 2005. AIMETA.
- [3] F. de Gregorio, G. M. Di Cicca, G. Iuso, R. S. Donelli. Effects of 2d synthetic jet orientation on a turbulent boundary layer. ISCHIA, April 2006. Workshop Ercoftac, ERCOFTAC.
- [4] Pierluigi Iannelli Raaele S. Donelli, Fabrizio De Gregorio. *Flow separation control by trapped vortex*. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Knopf, 2010.
- [5] R.S. Donelli, P. Iannelli, A. Iollo, L. Zannetti, S. Chernyschenko. *Flow models for vortex cell. sono stati eseguiti* AIAA journal, 47(2), February 2009.
- [6] F. De Gregorio, G. Iuso, D. Lasagna, R.S. Donelli, *Effects of a trapped vortex cell on thick wing profile*. EXPERIMENTS IN FLUIDS, 51(5):13691384, 2011.
- [7] R. Kerminbekov, R. Donelli, F. De Gregorio, O.R. Tutty, M. Buffoni and E. Rogers. *Control of flow with trapped vortices: Theory and experiments*. International Journal of Flow Control, 5(2), June 2013
- [8] F. De Gregorio, P. Leyland, P. Ott, C. Hollenstein, R.S. Donelli, A. Marino, P. Peschke. *High voltage pulsed dbd on the aerodynamic performance and on the shock buffet*. JOINT ERCOFTAC-PLASMAERO PUBLIC WORKSHOP, Addison-Wesley, December 2012
- [9] C. Marongiu, P. Peschke, C. Hollenstein, R. Donelli, A. Marino, P. Catalano. *Effect of high voltage pulsed dbd plasma on the aerodynamic performance in subsonic and transonic conditions*. Number AIAA 2013- 2752, San Diego, CA, June 24-27 2013. 43rd AIAA Fluid Dynamics Conference.
- [10] A. Lebedev D. Sipp. Global stability of base and mean flows: a general approach and its applications to cylinder and open cavity flows. *J.Fluid Mech*, 593:333358, 2007.