

# IL VOLO IN ATMOSFERA

STUDIO E REALIZZAZIONE DI UN PROFILO ALARE

di Francesco Iervese\*

*L'articolo riguarda un lavoro di approfondimento presentato alla scorsa edizione di ScienzaFirenze dove ha conseguito il terzo premio nella categoria triennio. Esso dimostra come gli studenti siano in grado di mobilitare risorse insospettite quando è loro offerta una possibilità di uscire dalla routine spiegazione-interrogazione, raggiungendo una sorprendente padronanza del metodo sperimentale e del rigore che esso richiede. L'impresa ha coinvolto inaspettatamente anche una ditta di impianti di condizionamento per spazi industriali che ha offerto alla scuola un ventilatore centrifugo e ha realizzato alcuni elementi della galleria del vento. I risultati raggiunti, assolutamente imprevisi, giustificano l'entusiasmo che trapela dalle conclusioni.*

**L**a domanda che ci siamo posti è: perché un mezzo più pesante dell'aria riesce a galleggiare in essa? Per capirlo, abbiamo ricreato in laboratorio le condizioni del volo in atmosfera: costruita una galleria del vento, l'abbiamo testata, verificandone la funzionalità e in essa abbiamo posto un profilo d'ala su cui sono stati eseguiti vari esperimenti. Il nostro lavoro è stato diviso in due fasi: la prima ha riguardato la costruzione della galleria del vento e i test fatti su di essa, la seconda la costruzione del profilo alare e i test fatti con quest'ultimo.

## La galleria del vento

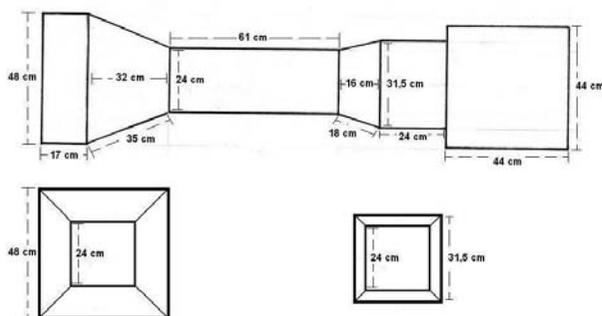
Una galleria del vento è realizzata allo scopo di studiare il comportamento fluidodinamico di vari oggetti ricreando al suo interno le condizioni che essi incontrerebbero nella realtà con il vantaggio di poter effettuare test ed esperimenti sulle loro reazioni a tali condizioni in modo più semplice e sicuro. Il funzionamento generale di una galleria del vento è basato su due principi: quello di conservazione della massa, secondo cui un fluido che scorre in una tubatura a sezione variabile aumenta la sua velocità ogni qual volta si trovi a passare in una strozzatura o viceversa, e quello di relatività galileiana.

\* Il lavoro è stato realizzato, oltre che dall'autore, da Guglielmo Lapenna, Roberto Pace, Loris Prospero, studenti della classe III B del Liceo Scientifico "Galileo Galilei" di Pescara nell'anno scolastico 2006-2007 ed è stato coordinato dal docente di matematica e fisica Giorgio Guidi.

na secondo cui le azioni fluidodinamiche esercitate su un fluido in movimento, con velocità vettoriale  $\vec{V}$ , sono le stesse, sia se il corpo è in movimento e il fluido in quiete, sia se si considera il corpo in quiete e il fluido in moto con velocità vettoriale  $-\vec{V}$ . La galleria da noi costruita, come descritto di seguito, è di tipo subsonico a circuito aperto composta da quattro componenti principali: contrattore, camera dei test, diffusore e ventilatore.

La sua realizzazione è avvenuta in due fasi. La prima riguarda la realizzazione del prototipo di tunnel sulla base di un progetto da noi

sviluppato, affinché le proporzioni tra le varie parti della galleria fossero ideali per un suo corretto funzionamento. Contrattore e diffusore sono stati costruiti in cartone mentre la camera del test, la stessa utilizzata sia per il prototipo che per il tunnel definitivo, è stata realizzata piegando una lastra di plexiglas in due punti in modo da avere un parallelepipedo chiuso su tre lati, sul quarto è stato



Progetto originale della galleria del vento

applicato uno sportellino che permette di accedere facilmente all'interno della galleria. Il prototipo poggia su due supporti che garantiscono un perfetto equilibrio sul piano orizzontale. Nella seconda fase, grazie all'ausilio di una ditta locale specializzata in impianti di condizionamento industriale, contattata dalla segreteria della nostra scuola, ci siamo occupati del perfezionamento della galleria, che ha portato alla realizzazione del tunnel definitivo e alla scelta del miglior ventilatore da utilizzare. Verificato tramite il prototipo il discreto funzionamento del nostro manufatto, era necessario affinare quest'ultimo in ogni aspetto possibile per ottimizzare la sua efficienza; così si è stabilito di realizzare diffusore e contrattore in lamiera d'acciaio in modo da rendere più uniforme l'interno della galleria. Il contrattore presenta, su uno dei quattro lati della superficie minore, tre fori di diametro pari

a 1 cm utili per il rilevamento dei valori di velocità all'interno del tunnel tramite l'anemometro a filo caldo. Il diffusore è collegato al motore aspirante tramite un giunto e quattro viti. Per facilitare la costruzione e il trasporto dell'apparato, sia il prototipo sia il tunnel definitivo sono scomponibili nelle quattro componenti sopra descritte; questo però ha reso necessario l'aggiunta di guarnizioni lungo i perimetri di contatto dei vari pezzi. Per rendere possibile la regolazione della velocità del vento all'interno della galleria, il ventilatore è collegato a un potenziometro che funge anche da interruttore di corrente.

Tunnel definitivo



Illustreremo ora alcuni dei calcoli svolti nelle stesura del progetto. I valori di velocità del vento all'interno della galleria, ove non specificato diversamente, sono stati sempre rilevati grazie ai tre fori presenti sul contrattore, inserendo l'anemometro all'interno di essi, a tre profondità diverse e prestabilite, ottenendo nove valori di velocità. Nella tabella al fondo della pagina 100 sono racchiusi i valori standard utilizzati durante i calcoli.

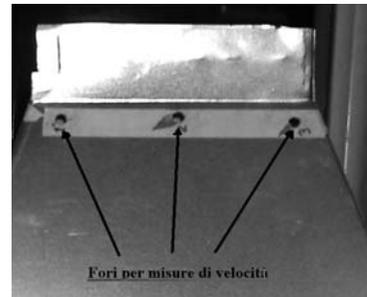
*Il convergente*

Sappiamo che la turbolenza diminuisce in funzione dell'accelerazione cui il fluido è sottoposto, e quindi, per l'equazione di continuità, in funzione del rapporto fra la superficie maggiore e quella minore del convergente, detto rapporto di contrazione (CR):

$$CR = A_1 / A_2 \quad [1]$$

dove  $A_1$  è appunto la superficie maggiore del contrattore e  $A_2$  la minore. Si è deciso di progettare questo componente con CR pari a 4 considerando che le moderne gallerie del vento hanno un CR raramente inferiore a 3,5. Scelto CR, si è passati a stabilire la superficie maggiore del contrattore più consona al nostro caso, scegliendo il valore  $0,2304 \text{ m}^2$ , in funzione del prezzo del materiale di costruzione, della grandezza totale del manufatto e di altre considerazioni di ordine pratico. Infine la superficie minore, ricavata tramite la [1] è risultata pari a  $0,0576 \text{ m}^2$ . La lunghezza del convergente, nel nostro caso non rappresenta un parametro fondamentale per il buon funzionamento della galleria. Tuttavia, è vero che quanto più è elevata la lunghezza, tanto più è uniforme il flusso in uscita. Ma dal suo valore dipende anche l'aumento dello spessore di strato limite e, quindi, della turbolenza. Risulta, perciò, più utile un convergente corto, anche perché, come vedremo in seguito, esso sarà provvisto di grate che provvederanno a uniformare il flusso d'aria.

Con lo scopo di valutare se con l'utilizzo del contrattore vi fosse un'apprezzabile accelerazione del fluido nel tunnel, sono stati presi vari valori delle velocità iniziali ( $V_i$ ) misurate alla bocca maggiore del contrattore e delle velocità finali ( $V_f$ ) misurate alla bocca minore. La raccolta dati è stata eseguita tre volte variando la velocità del fluido tramite il potenziometro. Per ognuna delle rilevazioni è stato ricavato un grafico, riportato a lato.



Il convergente

Grafico 1

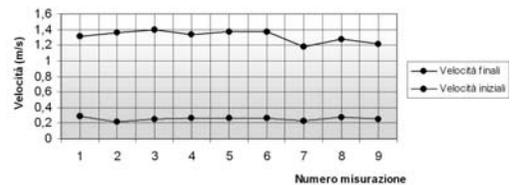


Grafico 2

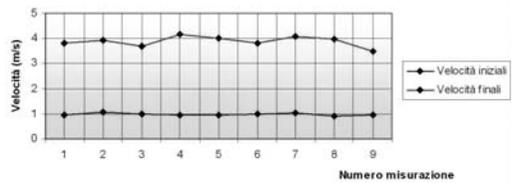
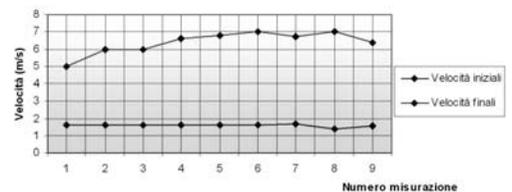


Grafico 3



Anche se le elaborazioni grafiche confermavano l'accelerazione del fluido si è preferito svolgere anche l'elaborazione numerica: applicando l'equazione di continuità [2], se si ottengono  $V_f$  teoriche compatibili con le rispettive  $V_f$  sperimentali viene confermata la giusta progettazione e costruzione del contrattore.

Nella relazione: 
$$\rho_1 A_1 V_i = \rho_2 A_2 V_f \quad [2]$$

$\rho_1$  e  $\rho_2$  sono le densità del fluido rispettivamente all'ingresso e all'uscita del contrattore. Nel nostro caso possiamo considerare  $\rho_1 = \rho_2$ , ricavando  $V_f$  come:

$$V_f = V_i(A_1/A_2) \quad [3]$$

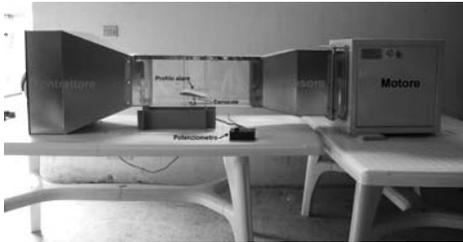
Le  $V_f$  teoriche, le medie delle  $V_f$  sperimentali, e i relativi errori percentuali sono raccolti nella tabella che segue.

L'errore percentuale è ricavato dalla formula:  
 $Er = [(valore\ teorico - valore\ sperimentale) / valore\ sperimentale] \times 100$

Elaborazione numero	$V_f$ teoriche (m/s)	$V_f$ sperimentali (m/s)	Errori percentuali (%)
1	1.036	1.053	2
2	3.932	3.878	1
3	6.424	6.388	0,6

Come si può notare dai grafici sopra riportati, vi è in tutti e tre i casi un incremento di velocità confermato dalle elaborazioni numeriche, che segue una precisa legge, espressa dalla [2]. Tutto ciò è sufficiente per dimostrare l'utilità, la buona progettazione e l'ottima costruzione del contrattore.

*La camera di prova*



La camera di prova

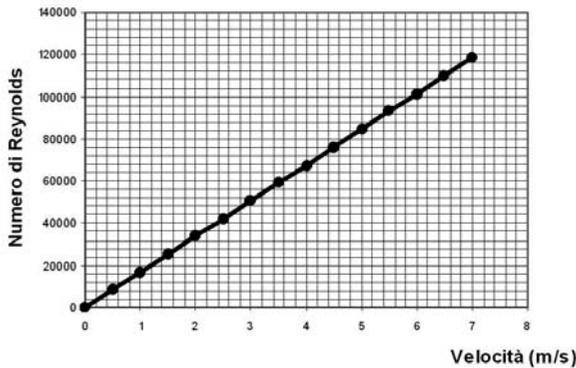
Questo pezzo è stato progettato in funzione dell'area minore del contrattore, valore che doveva corrispondere alla superficie di entrata della camera. Con lo scopo di stabilire il regime di scorrimento del fluido all'interno della camera, è stato calcolato il numero di Reynolds (Re) dalla [4]. Il flusso viene considerato in regime laminare se Re è inferiore a 2100, turbolento se superiore a 10000, transitorio se compreso fra 2100 e 10000.

$$Re = \rho V_m D / \mu \quad [4]$$

$\rho$  è la densità del fluido,  $V_m$  la sua velocità media,  $\mu$  la viscosità dinamica,  $D$ , per sezioni non circolari, è il diametro equivalente, calcolato dalla formula  $D = 4L^2 / 4L = L = 0.234$  m dove  $L$  è il lato interno della sezione. Sostituendo nella [4] i dati della tabella che segue, si ottengono i regimi dinamici del fluido in funzione della velocità.

Temperatura atmosferica	288,15 K
Pressione atmosferica	101000 Pa
Densità dell'aria	1,293 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosità dinamica dell'aria	1,79*10 <sup>-5</sup> Pa*s
Velocità del vento	da 0 a 7 m/s
Densità dell'acqua	1000 Kg/m <sup>3</sup>

I valori di Re calcolati sono riportati accanto ai rispettivi valori di velocità nella tabella a lato dalla quale è stato ricavato il grafico corrispondente analizzando i quali si nota che il flusso viaggia in stato laminare solo a bassissime velocità. Questo spiega l'instabilità, anche se modesta, dell'ala ancor prima del decollo, instabilità che cresce, come Re, all'aumentare della velocità dell'aria.



Per cercare di ovviare a questo problema bisogna, o costruire un convergente più lungo e/o ridurre la velocità del fluido e/o il diametro equivalente del condotto, e/o utilizzare un certo numero di grate. Scartate le prime tre possibilità si è dunque deciso di aumentare il numero di grate all'interno del contrattore portandola da una a tre.<sup>1</sup> Dopo l'aggiunta delle grate, si è notato un miglioramento nel volo del profilo. Ciò è imputabile al fatto che il flusso d'aria, passando attraverso i fori regolari di varie reti metalliche, tende a omogeneizzarsi diventando più lineare e quindi meno turbolento.

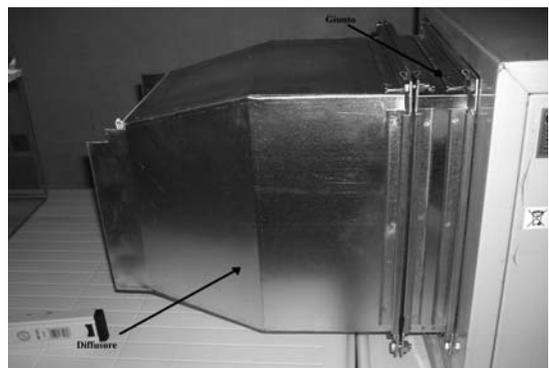
*Il divergente*

Questo pezzo, dato che le perdite di potenza del carico che si manifestano nel tunnel sono funzione della velocità della corrente elevata al cubo, è utile per trasformare l'energia cinetica del fluido in moto in energia di pressione ottenendo, di conseguenza, un suo rallentamento. Il criterio fondamentale da noi seguito per la progettazione di questo componente, è stato quello di calcolare la sua superficie di uscita in funzione di quella di entrata (0.0576 m<sup>2</sup>), in modo che non sia superato il rapporto 5/6 (0.83) oltre il quale si rischia di avere una separazione della corrente d'aria che renderebbe inutile il diffusore. Il rapporto scelto per la progettazione, anche tenendo conto della grandezza del ventilatore a nostra disposizione è 0.58 corrispondente a una superficie di uscita di 0.0992 m<sup>2</sup>.

Velocità (m/s)	Numero di Reynolds
0	0
0,5	8451,45
1	16902,91
1,5	25354,36
2	33805,81
2,5	42257,26
3	50708,72
3,5	59160,17
4	67611,62
4,5	76063,07
5	84514,53
5,5	92965,98
6	101417,43
6,5	109868,88
7	118320,34

<sup>1</sup> Le prime tre possibilità sono state scartate poiché:  
a) occorreva troppo tempo per la progettazione e la costruzione di un nuovo convergente;  
b) agire sulla velocità significava lavorare con valori non superiori a 0.592 m/s. A queste velocità il profilo non decolla;  
c) agire sul diametro equivalente della camera dei test significava ridurlo a un valore massimo di 2.31 cm.  
 $V = (Re \mu) / (\rho D) = (10000 \cdot 1.79 \cdot 10^{-5}) / (1.293 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0.234 \text{ m}) = 0.592 \text{ m/s}$ ;  $D = (Re \mu) / (\rho V_{max}) = (10000 \cdot 1.79 \cdot 10^{-5}) / (1.293 \text{ Kg/m}^3 \cdot 6 \text{ m/s}) = 2.31 \text{ cm}$ .

Il divergente

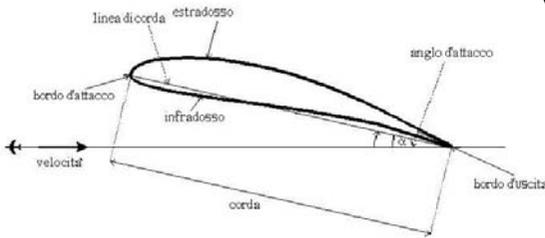


## *Ventilatore centrifugo aspirante*

Presenta due fori, uno per l'uscita l'altro per l'entrata dell'aria. Al suo interno è presente un materiale plastico spugnoso che oltre a prevenire eventuali perdite d'aria, insonorizza parzialmente il motore elettrico monofase.

## La costruzione e lo studio di un profilo alare

Un profilo alare è la sezione di un'ala condotta secondo un piano verticale e parallelo alla mezziera dell'ala stessa o alla fusoliera. Le sue parti principali mostrate nell'immagine, sono: il bordo di attacco, il bordo di uscita, la corda (retta che unisce le estremità del bordo di attacco e di uscita), l'infradosso (parte inferiore del profilo), l'estradosso (parte superiore del profilo), l'angolo di attacco è l'angolo formato tra la corda dell'ala e il sentiero di volo.



## *Metodi e materiali di costruzione dei modelli d'ala*

I profili costruiti e analizzati sono cinque, tutti piano-convessi; le loro caratteristiche sono raccolte nella tabella.

Profilo numero	Intradosso (cm)	Estradosso (cm)	Lunghezza (cm)	Peso (N)	Materiali utilizzati	Fili di supporto	Zavorra utilizzata	Rinforzi strutturali
1	12,3	12,8	21,0	0,15	balsa; tela	nylon	/	/
2	12,8	13,8	21,1	0,058	polistirolo	nylon	/	/
3	12,5	13,8	21,5	0,16	polistirolo scotch	seta	piombi	scotch perimetricamente
4	12,6	13,8	21,5	0,17	polistirolo scotch	canapa	scotch su l'estradosso	scotch e barrette in plastica
5	<b>13,0</b>	<b>14,0</b>	<b>21,5</b>	<b>0,29</b>	<b>polistirolo</b>	<b>canapa</b>	<b>scotch su tutte le superfici</b>	<b>scotch e barrette in plastica</b>

I valori scritti **in grassetto** indicano i dati del profilo utilizzato per i test

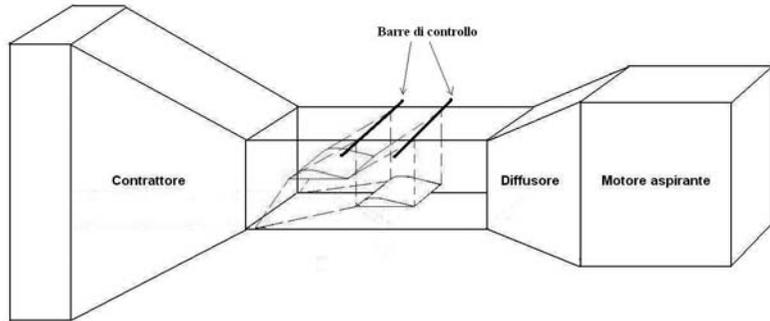
Per la costruzione dei profili alari ci siamo basati su un progetto in possesso di uno dei componenti del gruppo. Per realizzare il profilo che meglio si sarebbe adattato al nostro caso, sono state effettuate varie prove in galleria su profili d'ala che differivano per peso, materiale e supporti impiegati per sospenderlo all'interno del tunnel. I test tendevano alla ricerca del miglior rapporto tra peso, aerodinamicità, resistenza strutturale, costo dei materiali, tutto rapportato alla poten-

za e al tipo di motore della nostra galleria del vento. Il primo esemplare da noi costruito, un profilo in balsa e tela, ottimo dal punto di vista strutturale, è stato scartato per il costo eccessivo dei materiali e per la realizzazione troppo complessa. Tutti i profili successivi sono stati realizzati profilando parallelepipedi di polistirolo.

Sperimentalmente abbiamo verificato che i profili costruiti in polistirolo con le dimensioni del nostro progetto avevano un peso massimo di 0.058 N, erano instabili anche a velocità bassissime e troppo fragili per resistere alle sollecitazioni a cui erano sottoposti e, quindi, andavano incontro a rottura. Inizialmente per appesantire il primo profilo in polistirolo, altrimenti troppo leggero per sopportare la potenza del ventilatore, si è deciso di applicare un bullone metallico sul baricentro, all'interno della struttura alare. Questo metodo è stato scartato dopo poco per evitare eventuali problemi di ordine accidentale. Tale profilo era sostenuto da fili in nylon, anch'essi scartati poiché essendo troppo rigidi vincolavano i movimenti dell'ala. In seguito si è deciso di appesantire un secondo profilo con piombi di peso conosciuto posti ai quattro angoli sull'estradosso, mentre il perimetro del profilo è stato rinforzato con del nastro adesivo. Anche questa soluzione è stata abbandonata in quanto causa di un eccessivo peggioramento dell'aerodinamica dell'ala. Nel penultimo modello abbiamo rivestito l'estradosso di nastro adesivo, cosa che conferiva una maggiore solidità e stabilità al profilo, senza alterare l'aerodinamica. Come supporto si era optato per l'impiego di fili di seta, più flessibile del nylon. Infine, si è giunti alla realizzazione del modello definitivo: realizzato in polistirolo, si presenta all'esterno interamente coperto di scotch e, sia sul bordo d'attacco, che sul bordo d'uscita, sono presenti barrette rotonde in plastica, che, oltre a rendere più dolce la sagoma dell'ala, fungono da punti di partenza dei fili di sostegno. Si ha, così, un ottimale rapporto fra peso, resistenza strutturale e aerodinamica. I fili di supporto usati sono di canapa, materiale leggero resistente ed economico.

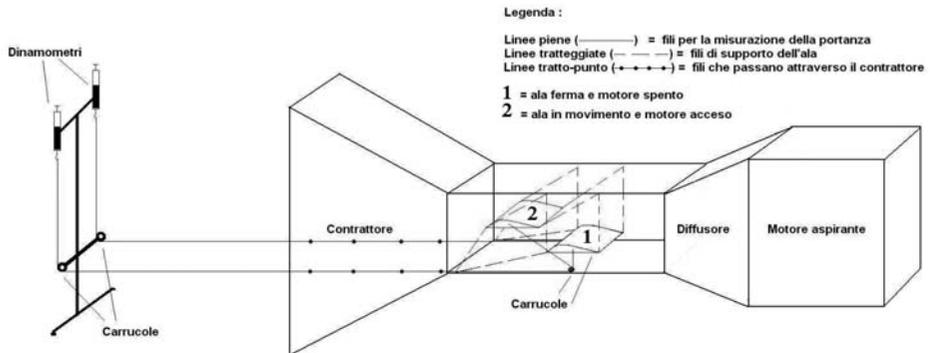
Descriviamo ora come vengono fissati i profili all'interno della galleria. Dai quattro angoli di ogni profilo partono dei fili, due dagli angoli anteriori e uno da quelli posteriori. In questo modo si legano all'ala sei fili, quattro per il sostegno e il controllo del profilo in volo e due per garantire all'ala la stabilità necessaria durante tutto il test. I fili di sostegno vengono fatti uscire dalla camera di prova, perpendicolarmente all'ala, tramite quattro fori di 1 mm di diametro. Vengono, quindi, fissati a due barrette, una per i fili anteriori, l'altra per i fili posteriori. In questo modo si ha la possibilità di regolare l'angolo di attacco dell'ala in modo facile e veloce anche durante l'esecuzione di un test. I fili «stabilizzatori» partono, come già detto, da i due angoli anteriori e vengono fissati davanti l'ala alla fine della camera di prova. Inizialmente, per ancoraggi del profilo alla galleria non appro-

priati, si sono determinate rotture dei profili, forti instabilità in volo, episodi di stallo anche a basse velocità dovute all'improvvisa e incontrollabile variazione dell'angolo di attacco. Risolti opportunamente questi problemi, si è ottenuto un volo del profilo regolare, sufficientemente stabile anche alle massime velocità da noi raggiungibili.



Misure di portanza

Lo scopo dei nostri test era di verificare, misurare e integrare le quattro forze aerodinamiche (portanza, peso, spinta del motore e resistenza) che agiscono su un'ala in volo. La spinta del motore porta l'ala ad avere una velocità. Nel nostro caso, per il principio di relatività galileiana, questa velocità sarà uguale alla velocità del fluido che investe il profilo e verrà misurata tramite l'anemometro. Per misurare la portanza dell'ala abbiamo utilizzato due dinamometri a molla (portata 1 N; sensibilità 0.01N) posti all'esterno della galleria e collegati tramite un sistema di carrucole e fili al profilo alare.

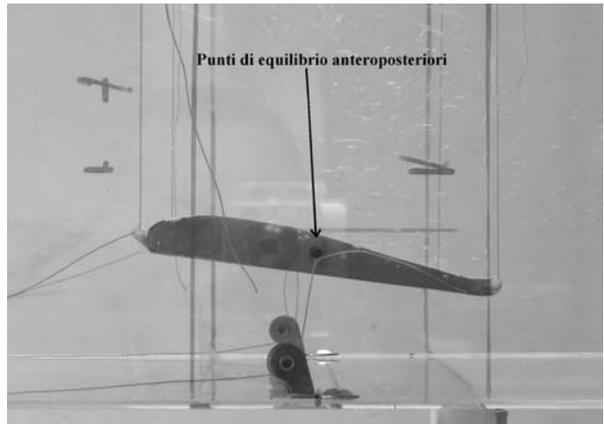


I fili sono stati fissati nei punti di equilibrio anteroposteriori dell'ala, lateralmente al profilo i punti di equilibrio sono stati trovati sperimentalmente e coincidono con una linea che interseca la corda nel suo terzo anteriore.

La portanza di un'ala può essere spiegata tramite la legge di Bernoulli: poiché il profilo dell'ala presenta un estradosso maggio-

re dell'infradosso, la velocità del flusso che la investe sarà maggiore sulla superficie superiore e minore su quella inferiore, determinando così una depressione sull'estradosso, il cui valore è funzione del quadrato della velocità.

I dinamometri a causa della loro disposizione e del modo in cui è sostenuta l'ala all'interno della galleria, permettono esclusivamente misurazioni in cui la portanza è maggiore del peso dell'ala. Quindi ognuno di loro segnava non la portanza effettiva dell'ala, ma la metà della differenza tra questa e il peso.



Per questo i valori raccolti nella tabella seguente corrispondono alla somma della forza peso dell'ala con la somma delle forze segnate dai due dinamometri. Per verificare l'attendibilità della portanza, trovata sperimentalmente, è stata confrontata con il valore teorico calcolato tramite la formula [5]:

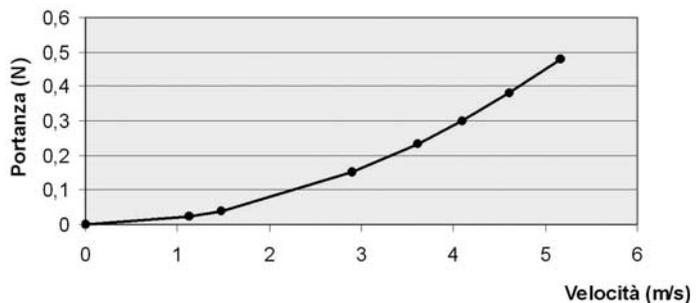
$$P = 1/2 \rho V^2 S \quad [5]$$

dove P è la portanza, V la velocità del fluido, S la superficie in pianta dell'ala, cioè il prodotto tra la corda dell'ala e la sua lunghezza. Nelle prime cinque misurazioni, come mostrano i dati della tabella e il grafico corrispondente, sull'ala non agiva una portanza sufficiente a equilibrare o superare il suo peso di 0.29 N (si veda la tabella a pagina 102).

In queste situazioni, in cui entrambi i dinamometri rilevavano una forza nulla, l'ala tendeva a compiere piccoli movimenti oscillatori.

Tuttavia, essi divenivano sempre più evidenti con l'aumentare della velocità, situazione derivante dal relativo incremento della turbolenza all'interno del condotto. Superata la soglia dei 4 m/s l'ala si sollevava esercitando forze crescenti in funzione della velocità.

Misurazione	Velocità (m/s)	Portanza misurata (N)	Portanza teorica (N)
1	0	0	0
2	1.12	0	0.022
3	1.48	0	0.039
4	2.90	0	0.151
5	3.62	0	0.235
6	4.10	0.31 ± 0.02	0.301
7	4.61	0.37 ± 0.02	0.380
8	5.17	0.48 ± 0.02	0.478



## Conclusioni

Quando venimmo a sapere che l'argomento dell'edizione 2007 di ScienzaFirenze sarebbe stato l'atmosfera, ci siamo chiesti immediatamente che cosa ci meravigliasse maggiormente dello strabiliante involucro del nostro pianeta. E cosa c'è di più strabiliante del volo, argomento che ha affascinato l'uomo sin dai primordi? Abbiamo, così, iniziato a lavorare alacremente, cercando i materiali e raccogliendo informazioni e dati. Le difficoltà, a dir la verità, sono state molte, così tante che in certi momenti eravamo quasi decisi ad abbandonare il progetto. Tuttavia, non ci siamo mai definitivamente abbattuti: ci siamo sempre chiesti i motivi di un problema, di un calcolo che non era giusto. Questa continua e incessante ricerca ha dato come frutto questo lavoro che ci rende orgogliosi. Esso, infatti, dimostra la validità della galleria del vento da noi realizzata. Inoltre, cosa non da poco, siamo riusciti a far volare un ala all'interno del nostro tunnel, misurandone la portanza da essa sviluppata e trovando valori compatibili con quelli teorici. I risultati da noi ottenuti furono tanto inaspettati quanto sorprendenti per la loro correttezza. Qualche tempo dopo la loro scoperta, trovandoci a riflettere sul perché essi ci stupirono tanto quando furono calcolati la prima volta, scovammo la risposta in questa frase di Luigi Giussani: «Qualunque esito di un'indagine è una grazia, qualunque passo faccia la scienza lo può fare per qualcosa che non dipende da essa. Tanto è vero che quando uno fa una scoperta sente una gratitudine, prova sorpresa, perché nulla è inerte, tutto vive, tutto è atto di ringraziamento». Resta però un punto che non siamo riusciti a comprendere bene vista la sua totale assurdità: perché un mezzo così affascinante come l'aeroplano, frutto di tanti studi e ricerche, è stato, ed è tuttora, utilizzato anche per portare morte e distruzione? Diceva Einstein: «Due cose sono infinite: l'Universo e la stupidità dell'uomo, ma della prima non sono sicuro». ❖

**emmeciquadro**

è acquistabile a **Milano** presso

**Libreria Internazionale Ulrico Hoepli** via Hoepli 5

**Libreria Feltrinelli** via Foscolo 1/3

**Libreria Cortina** viale dell'Innovazione 13