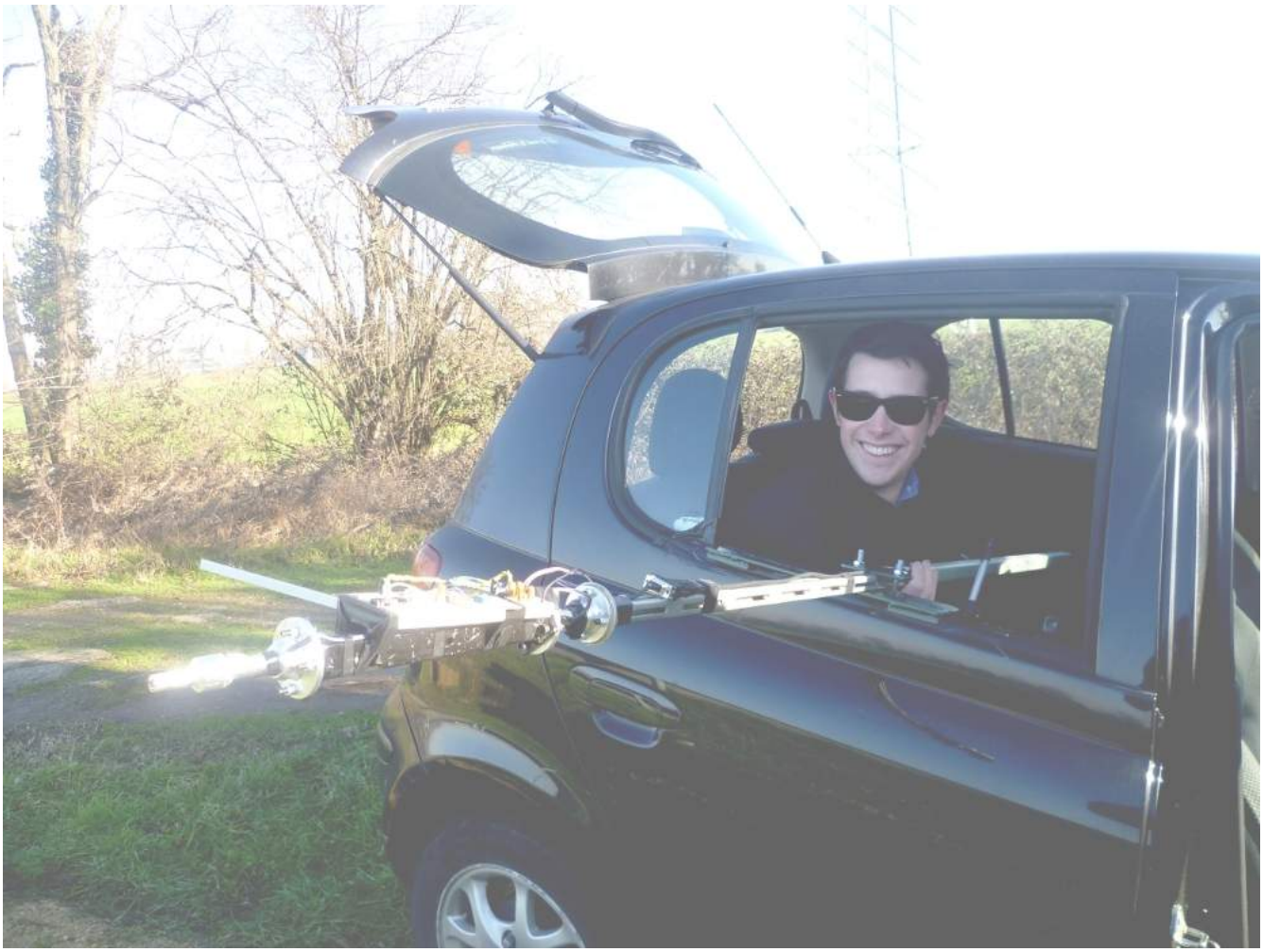
Sistema di misurazione di carichi aerodinamici tramite montaggio a bordo di automobile:

dalla progettazione alla realizzazione



Stefano Boccelli
Davide Del Cont Bernard

Indice

Introduzione …. 3

Scheda di acquisizione …. 4
Architettura generale del sistema di misura …. 4
Dettagli sul sistema di acquisizione …. 5

Dimensionamento e Realizzazione della Cella di Carico …. 8
Analisi dei carichi …. 8
Geometria della cella e configurazione del ponte di Wheatstone …. 10
Materiali impiegati: scelta e caratterizzazione 12
Determinazione della Geometria della Cella …. 15
Conclusioni …. 17

Test sul sistema realizzato …. 20
Prova dell'ala 20
Prova del cilindro 23
Conclusioni e modifiche future 24

Introduzione

Con il presente lavoro intendiamo documentare la strada che ci ha portato dalla progettazione alla realizzazione di un sistema di misurazione di carichi aerodinamici da collegare al lato di un'automobile.

Lo scopo del sistema è la rilevazione dei carichi aerodinamici agenti su corpi di forma arbitraria in maniera duale alla galleria del vento: anzichè mettere in moto l'aria attorno al corpo si sceglie di portare il corpo in velocità tramite “prove su strada”. I risultati sono decisamente più poveri, ma per un hobbista probabilmente ben più abbordabili.

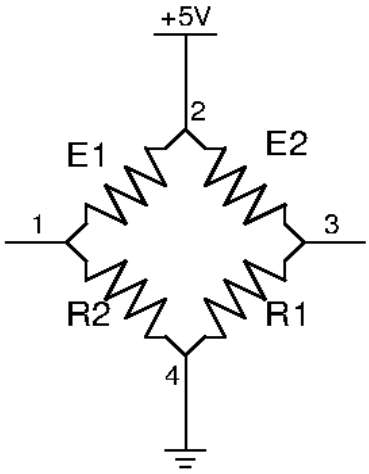
Il sistema consiste in una cella di carico ed una relativa scheda di acquisizione.
La cella di carico è strumentata con estensimetri, il cui stato viene letto da una scheda di acquisizione basata sul microcontrollore ATMEGA 168 PA-PU e sull'amplificatore da strumentazione INA125.
La scheda di acquisizione legge lo stato degli estensimetri e lo invia in formato digitale ad un computer attraverso una periferica seriale (tramite adattatore usb-seriale).

Dopo aver presentato I componenti hardware, viene illustrata brevemente la realizzazione di una prova sperimentale per testare il sistema: costruzione di un'ala di piccola apertura e di un cilindro ed infine I primi risultati ottenuti.

Scheda di Acquisizione

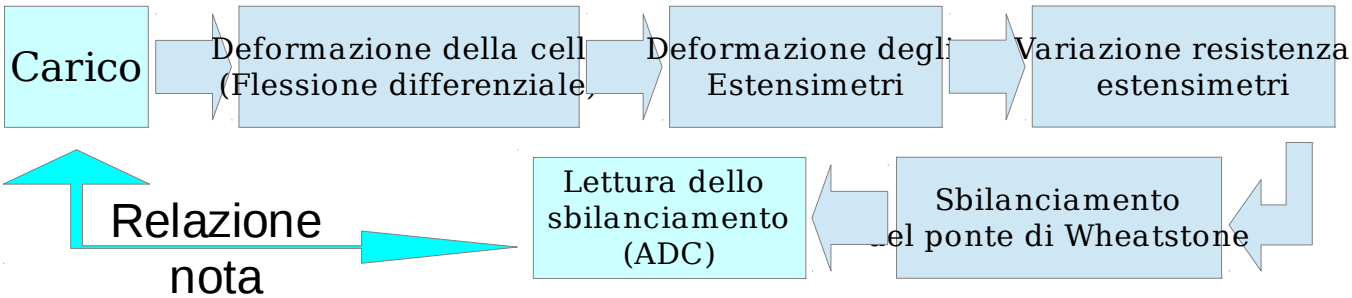
Architettura generale del sistema di misura

Le cella di carico sono degli elementi tipicamente metallici con geometrie appositamente realizzate per generare zone in cui la deformazione è facilmente correlabile ad una certo tipo di sollecitazione (es. una azione di taglio). Le deformazioni di queste zone *sensibili* della cella possono essere misurate con degli estensimetri. Gli estensimetri rispondono ad una deformazione con una variazione della loro resistenza. Per misurare queste variazioni di resistenza (che tipicamente sono estremamente contenute) gli estensimetri vengono collegati ad una particolare configurazione circuitale detta ponte di Wheatstone (si veda fig. a lato) che permette di rilevare più facilmente le piccole variazioni di resistenza degli estensimetri attraverso una misura di tensione $\Delta V = V_3 - V_1$ [1]. In particolare, se il ponte a cella scarica è *bilanciato*, ovvero $\Delta V = 0$, poi quando caricata, la tensione letta ΔV presenterà una relazione pressochè lineare con la variazione di resistenza, e quindi con la deformazione e con il carico.



Schema 1: Ponte di Wheatstone

Il problema della misura di un generico carico, si traduce così in una misura di tensione, che nel nostro caso era dell'ordine delle decine di microvolt. A questo scopo si è scelto di utilizzare un amplificatore per strumentazione INA125 ed un microcontrollore ATMEGA168PA-PU, con ADC[2] integrato, e capace di trasferire efficacemente dati ad un PC.



In

1 Si veda il paragrafo xx per una trattazione più compiuta.
2 Analog to Digital Converter

Dettagli sul sistema di acquisizione

Per amplificare la tensione in uscita dal ponte di Wheatstone si è scelto di utilizzare un INA125. Si tratta di un amplificatore da strumentazione ad alta accuratezza, che fornisce precise tensioni di riferimento. Il guadagno dell'amplificatore, variabile da 4 a 10,000 è impostato modificando un'unica resistenza (R5 nello schema) e segue la legge: $G=4+\frac{10\mathrm{k}\Omega}{R5}$. Le tensioni di riferimento (2.5, 5, 10 V) permettono ad esempio di alimentare in maniera precisa il ponte di Wheatstone. Nel nostro caso però non si sono potute utilizzare visto che la tensione di alimentazione dell'intero sistema era proprio 5V (non sufficienti all'INA per produrre il riferimento a 5V). Saranno utili in futuro quando il sistema verrà modificato per permettere letture in campo bipolare.

Il microcontrollore utilizzato, come già detto, è un ATMEL ATMEGA168PA-PU. Si tratta di un microcontrollore ad 8-bit della famiglia AVR I punti di forza che lo rendono adeguato ai nostri scopi sono:

- Potenza di calcolo non indifferente: ~20MIPS @ 20MHz.
- Supporto hardware per comunicazioni seriali di vario tipo, a due e tre fili.
- ADC integrato (con tutti gli altri dispositivi ad esso legati: S/H e MUX)
- Programmabili direttamente in C.
- Disponibili in vari *packaging*.
- Richiede un minimo numero di componenti elettronici aggiuntivi.
- Sono diffusi ed esiste un'ampia comunità di supporto.

Il software per il microcontrollore è stato sviluppato utilizzando una *toolchain* free (*avr-gcc* e *avrdude*); ci si è appoggiati a librerie esistenti per quanto concerne la comunicazione seriale (sviluppate da Peter Fleury[3]).

Il microcontrollore si interfaccia con un computer attraverso la porta seriale.

Per mantenere il sistema il più semplice possibile si è scelto di non implementare nessun tipo di comunicazione nella direzione computer→microcontrollore; quindi all'accensione del sistema di acquisizione il computer deve essere già pronto a ricevere i dati, il cui flusso cesserà solo allo spegnimento del sistema stesso.

Il sistema è capace di fornire 1429 letture dello stato della cella al secondo.

Per l'elaborazione sul computer dei dati così ottenuti, si è scelto di scrivere alcuni script Octave, il quale permette la agevole realizzazione di grafici e dispone di una vasta gamma di funzioni statistiche e matematiche.

L'ATMEGA168 ha in dotazione un ADC da 10 bit ed è del tipo ad approssimazioni successive, capace di lavorare a 15KSamples/s alla massima risoluzione. L'accuratezza assoluta è di 2 LSB. L'ADC è collegato ad un multiplexer da 8 canali che permette di utilizzare come input di tensione 8 dei suoi pin. L'ADC contiene un dispositivo Sample and Hold (S/H) che assicura che la tensione in ingresso sia stabile durante la conversione. La tensione di riferimento può essere fornita ad un pin del controllore

3 http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/uartlibrary.zip

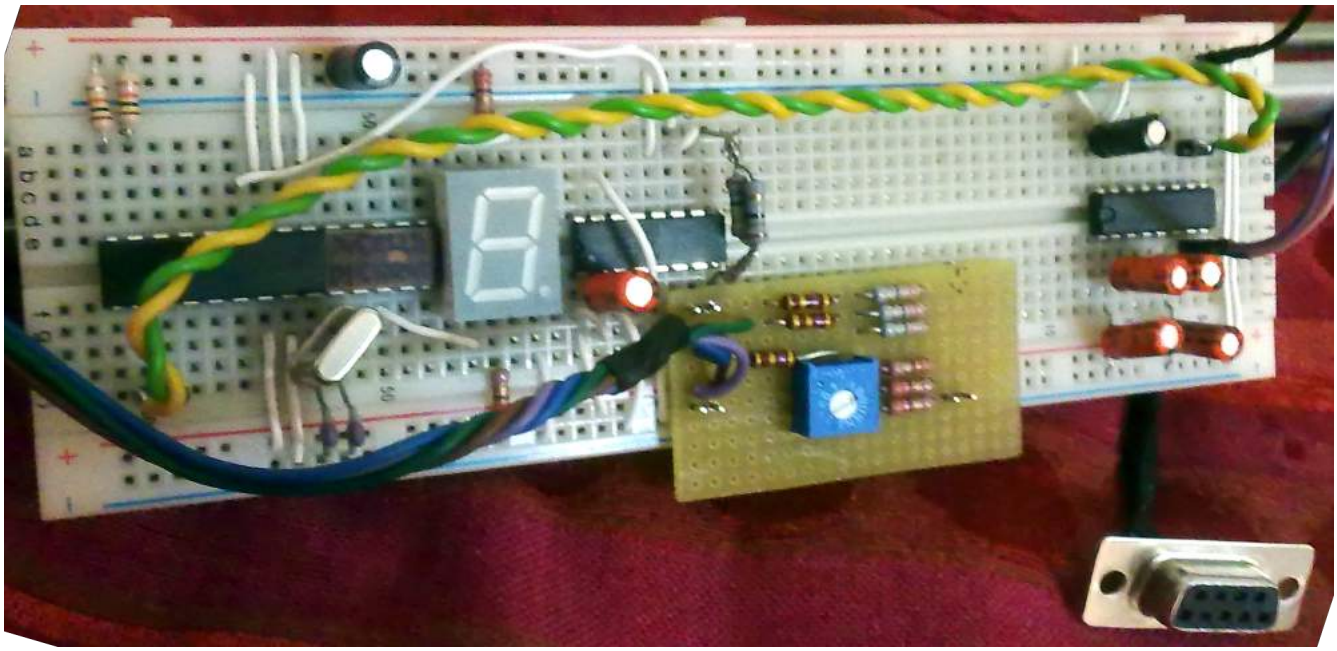
oppure può essere utilizzato un riferimento interno ad 1.1V. Nel nostro caso come riferimento sono stati presi i 5V di alimentazione. Sono previsti numerosi accorgimenti per la riduzione del rumore di conversione. Si rimanda ai datasheet, ai sorgenti e agli schemi allegati per maggiori dettagli.

Vista la scarsa risoluzione del ADC è stato ritenuto conveniente preparare un set di resistenze per modificare al volo il guadagno dell'amplificatore e quindi il fondo-scala della cella stessa. Ciò può essere utile nella misura di forze che sono di un ordine di grandezza diverse, come ad esempio una misura di portanza e una di resistenza. I guadagni utilizzati nelle prove sono stati: 556 ($R5=18\Omega$) e 1115($R5=9\Omega$).

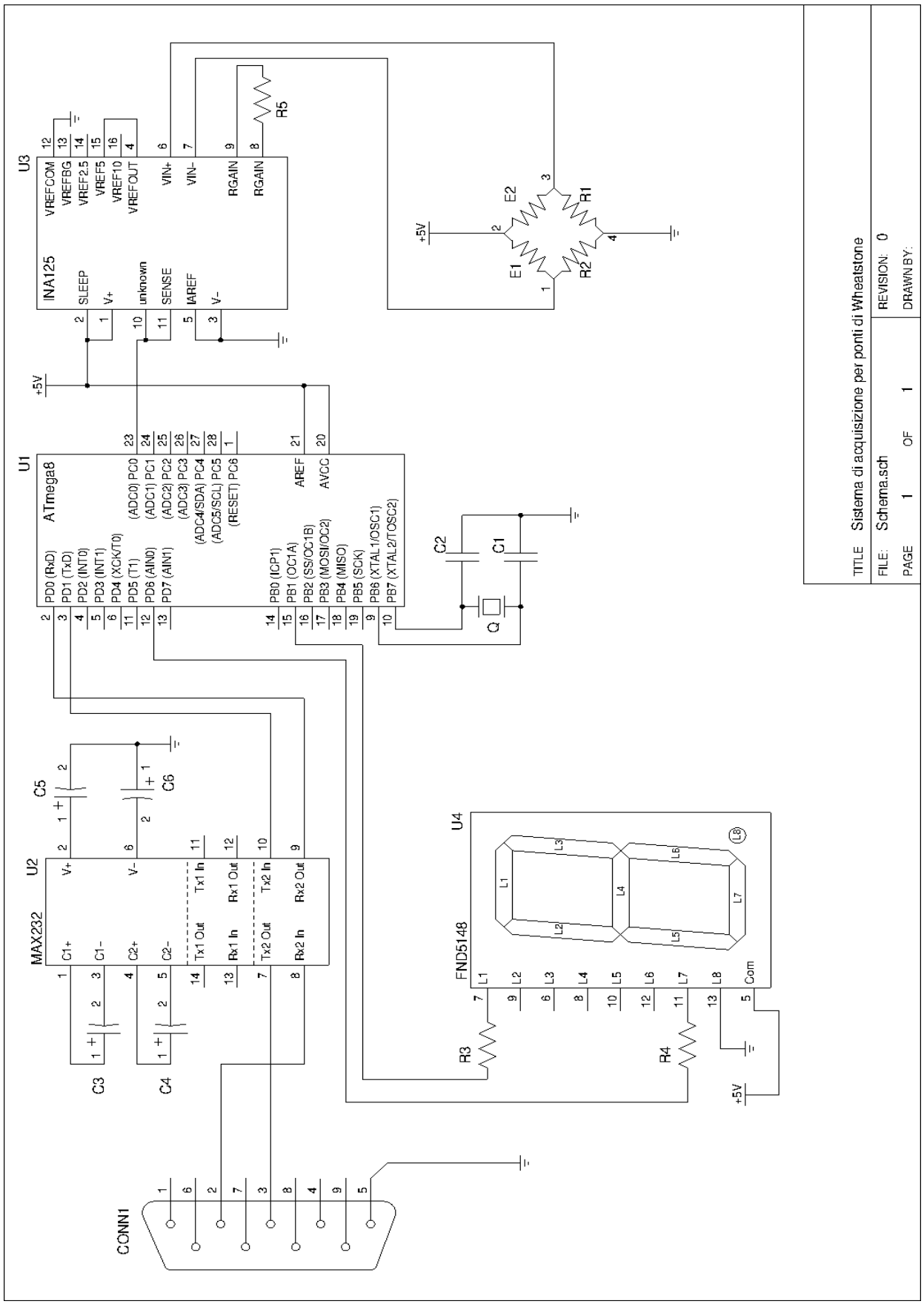
Il bilanciamento del ponte consiste nell'azzerare l'uscita del ponte ΔV . Questo si verifica quando $E1\,R1=E2\,R2$, ed è possibile rendere vera questa relazione agendo manualmente su un trimmer (R2) direttamente nella scheda di acquisizione. R1 invece è una semplice resistenza dello stesso valore degli estensimetri.

Nel sistema di acquisizione non si è inserito alcun filtro anti-aliasing, perché si è ritenuto che i fenomeni che avrebbero interessato la cella sarebbero stati sufficientemente a bassa frequenza o di ampiezza assolutamente trascurabile.

Per semplificare l'operazione di bilanciamento e per segnalare una eventuale saturazione dell'ADC durante una prova (cosa probabile giocando con i guadagni dell'amplificatore) è stato incluso un display a 8 segmenti. Il punto è sempre acceso acceso quando il sistema è alimentato, il segmento superiore si illumina in caso di saturazione positiva, mentre il segmento superiore si illumina in caso di saturazione negativa.



Sistema di acquisizione completo


TITLE Sistema di acquisizione per ponti di Wheatstone
FILE: Schema.sch
REVISION: 0
PAGE 1 OF 1
DRAWN BY:
U3
INA125
VREFCOM
VREFBG
VREF2.5
VREF5
VREF10
VREFOUT
VIN+
VIN-
RGAIN
RGAIN
SLEEP
V+
unknown
SENSE
IAREF
V-
R5
E1
E2
R1
R2
+5V
U1
ATmega8
PD0 (RxD)
PD1 (TxD)
PD2 (INT0)
PD3 (INT1)
PD4 (XCK/T0)
PD5 (T1)
PD6 (AIN0)
PD7 (AIN1)
(ADC0) PC0
(ADC1) PC1
(ADC2) PC2
(ADC3) PC3
(ADC4/SDA) PC4
(ADC5/SCL) PC5
(RESET) PC6
AREF
AVCC
PB0 (ICP1)
PB1 (OC1A)
PB2 (SS/OC1B)
PB3 (MOSI/OC2)
PB4 (MISO)
PB5 (SCK)
PB6 (XTAL1/OSC1)
PB7 (XTAL2/TOSC2)
C1
C2
Q
U2
MAX232
C1+
C1-
C2+
C2-
V+
V-
Tx1 In
Tx1 Out
Rx1 Out
Rx1 In
Tx2 In
Tx2 Out
Rx2 Out
Rx2 In
C3
C4
C5
C6
U4
FND5148
L1
L2
L3
L4
L5
L6
L7
L8
Com
R3
R4
CONN1

Dimensionamento e Realizzazione della Cella di Carico

Per il dimensionamento della cella di carico, i requisiti principali sono stati:

1) la capacità di misurare forze nell'ordine del Newton (fondoscala 20N circa)
2) un'elevata rigidezza, per evitare di incorrere in fenomeni oscillatori indesiderati

Analisi dei carichi

Carichi aerodinamici

Parametri dell'ala:

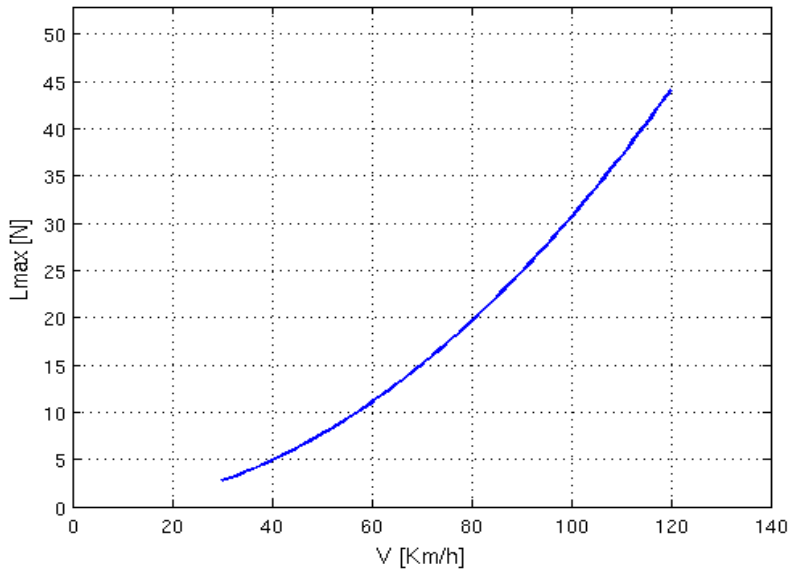
Corda c	120 mm
Allungamento λ	3
CL max @ Re = 260000	1,13

Tramite il software Xfoil, ci poniamo al numero di Reynolds corrispondente ad una velocità asintotica di circa 80km/h: 260000. Calcoliamo ora il coefficiente di portanza massimo della sezione, che risulta 1.13 e si ottiene per un'incidenza di 13°.
OSSERVAZIONE: Xfoil funziona bene per numeri di Reynolds alti. Il valore Clmax è quindi da intendersi come una stima.

Per calcolare il carico massimo, ci mettiamo in condizioni di sicurezza, assumendo un Cl massimo di 1.5 (contro il valore prospettato di 1.13) e trascuriamo il decremento di portanza dato dall'allungamento finito dell'ala.
In figura la portanza generata per Cl = 1.5 al variare della velocità asintotica, secondo la formula:

$$L_{max} = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{Lmax}$$

Figura: Portanza per Cl = 1.5



Calcoliamo una forza massima generata di valore prossimo ai 20N.

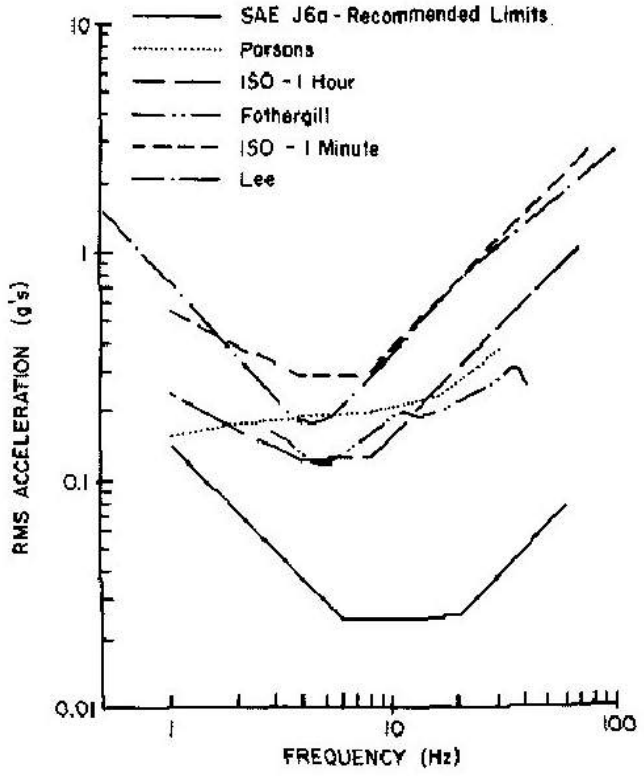
La configurazione dei carichi prevede tale forza localizzata approssimativamente a metà dell'apertura, ad una distanza cioè di circa 180mm dalla radice alare. Questa distanza amplifica notevolmente il carico applicato: sarà necessaria una discreta sezione per resistere al momento flettente.

NOTA: per la teoria dell'ala di apertura finita il risultante della distribuzione di pressione non sarà posto a metà dell'apertura, bensì in una posizione più prossima alla radice. Prendiamo questo fatto come ulteriore margine di sicurezza, al fine di evitare il danneggiamento della cella (dimensioniamo cioè per un momento flettente leggermente superiore al reale).

<u>Carichi dinamici</u>
E' necessario ora tenere in conto la presenza di asperità nell'asfalto e buche, nonchè turbolenza dell'aria, fattori che possono creare carichi dinamici.
Dal momento che l'obiettivo della nostra misura è l'acquisizione di valori *statici* (quali Cd e Cl), I carichi dinamici verranno filtrati, ma in ogni caso costituiscono un'ulteriore sollecitazione per la cella.

Ci supponiamo innanzitutto in aria calma (ipotesi da verificare al momento della prova).

Da normative sviluppate negli anni, abbiamo valori di accelerazione massima ammessi per una confortevole condotta del velivolo. Sapendo che le vibrazioni sono nell'ordine dei 20Hz, possiamo assumere una variazione massima di accelerazione pari a +0.5g.



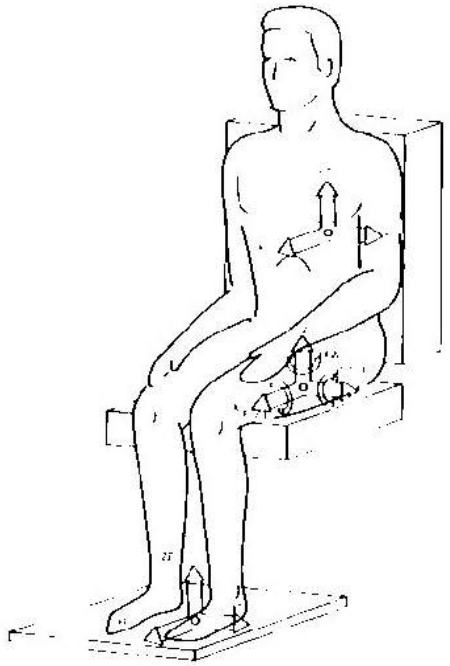


Fig. 5.36 Human tolerance limits for vertical vibration.

La presenza di buche supponiamo possa portare il valore massimo a + 1g.
Data la massa dell'ala di 600g, otteniamo un carico dinamico massimo pari a:

$$F_{DIN} = m\ a_{MAX} = \pm 0.6\text{kg} \times 1\frac{m}{s^2} = 0.6\,N$$

Geometria della Cella e configurazione del ponte di Wheatstone

La geometria della cella è intimamente connessa alla configurazione del ponte che si vuole adottare. Sono due le scelte praticamente percorribili nel nostro caso:

1) misura della forza di taglio

2) misura del momento flettente generato

1) La prima configurazione è poco efficiente nel nostro caso in quanto per resistere ad un momento flettente elevato, la sezione della cella deve essere di dimensioni tali da rendere la misura della deformazione a taglio di piccola entità e quindi soggetta a superiori interferenze del rumore elettronico. Escludendo l'acquisto di strumentazione eccessivamente costosa, unica soluzione sarebbe un'opportuna scelta della forma della sezione, adottando geometrie troppo complesse per I mezzi a nostra disposizione.

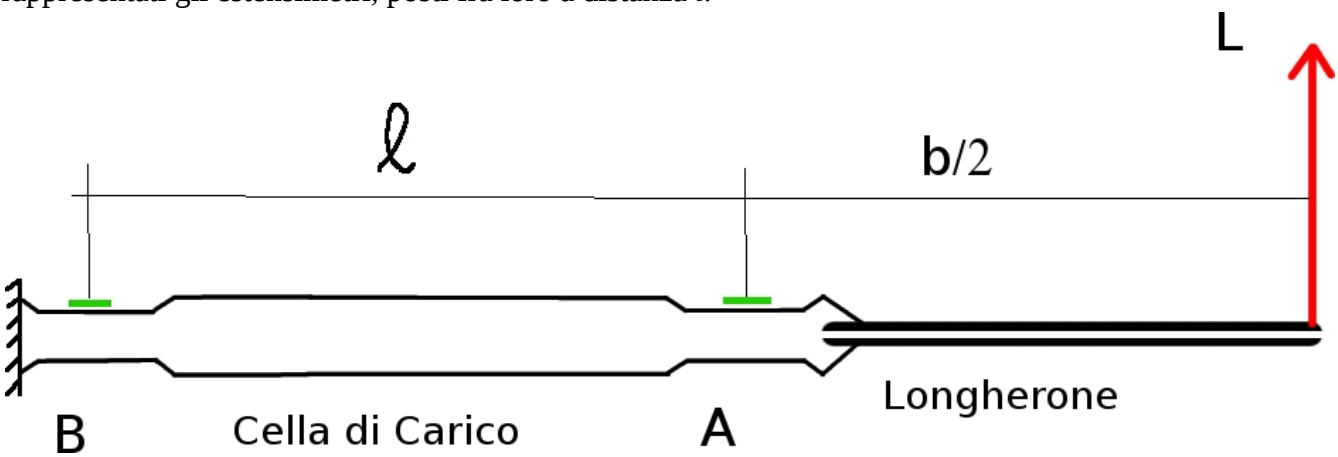
2) La seconda configurazione presenta lo svantaggio di possedere un'ambiguità intrinseca: obiettivo della misurazione è ricavare la portanza o la resistenza, mentre il momento flettente viene determinato dalla combinazione fra carico applicato e braccio. Per eliminare questa indeterminazione dobbiamo adottare una configurazione a "*ponte a flessione differenziale*" (figura).

Decidiamo innanzitutto di realizzare una cella di sezione cilindrica.
Le incognite del problema sono dunque 2:

- raggio della sezione
- distanza fra gli estensimetri

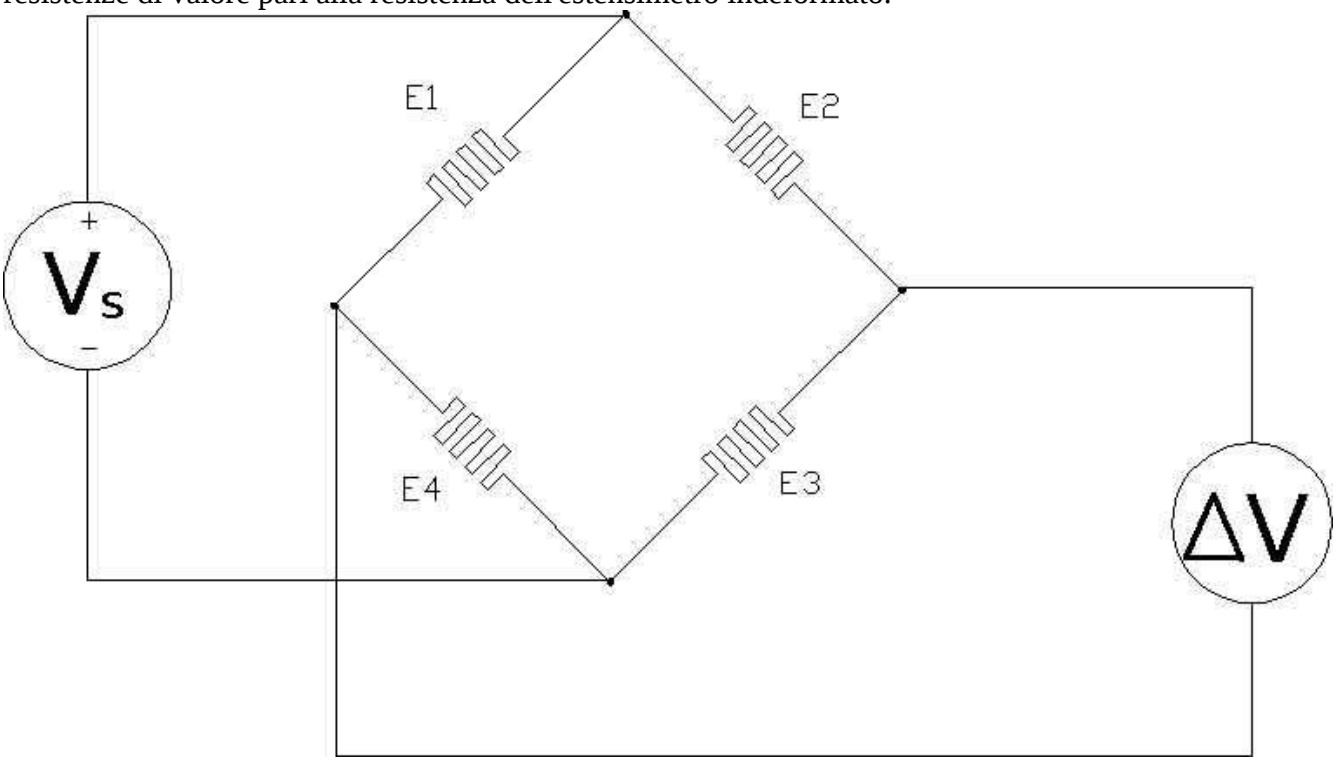
Per affrontare il problema si sono preparati alcuni scripts Matlab/Octave che permettono di ricavare la sensibilità della cella in funzione di ognuno dei parametri.

In figura una rappresentazione della configurazione a ponte a flessione differenziale. In verde sono rappresentati gli estensimetri, posti fra loro a distanza *l*.



Configurazione del ponte di Wheatstone

Per misurare le deformazioni facciamo uso di un ponte di Wheatstone. Come illustrato nello schema, la configurazione del ponte da noi adottata prevede l'utilizzo di soli 2 estensimetri, in posizione 1 e 2. La figura qui riportata chiarisce le idee. Gli estensimetri E3, E4 segnati in figura vengono sostituiti con resistenze di valore pari alla resistenza dell'estensimetro indeformato.



L'output del ponte ci viene fornito dalla seguente formula (linearizzata):

$$\Delta V = \frac{V_s}{4}(k_1\varepsilon_1 - k_2\varepsilon_2 + k_3\varepsilon_3 - k_4\varepsilon_4) \quad (1)$$

Dal momento che usiamo solamente due estensimetri, in posizione 1 e 2, otteniamo (supponendo inoltre il gage factor sia il medesimo)

$$\Delta V = \frac{V_s}{4}k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \qquad k_1 = k_2 = k \quad (2)$$

Limiti sulla deformazione

Dall'espressione (1) si nota chiaramente che più è grande la deformazione, maggiore sarà l'uscita fornita dal ponte (ossia la sensibilità).

Tuttavia abbiamo tre limiti sulla deformazione della cella:

- interferenza sulla misura
- snervamento del materiale
- danneggiamento dell'estensimetro

Trascurando il primo effetto (stimiamo una variazione dovuta alla torsione dell'angolo di incidenza trascurabile ed una flessione massima di circa 1mm a pieno carico), restano da valutare lo snervamento del materiale ed il danneggiamento dell'elemento sensibile.

Obiettivo della nostra cella è fornire una deformazione massima, rispettando I suddetti limiti.

Limiti di snervamento del materiale
Per avere una cella che non incorra in snervamento, a parità di dimensioni è essenziale che le prestazioni in termini di σ_snervamento siano le più elevate possibile.
NOTA: occorre ricordare che la cella è sottoposta ad effetti d'intaglio, che amplificano lo sforzo di un fattore k. Stimiamo questo fattore k pari a 1.7 tramite l'opportuna scelta di raggi di raccordatura delle sezioni della cella.

Limite: massima deformazione estensimetro
Dobbiamo tenere in conto la massima deformabilità dell'estensimetro, che si aggira intorno ai 1000μstrain.

Materiali impiegati: scelta e caratterizzazione

Dalle considerazioni effettuate, è necessario scegliere un materiale che permetta di sfruttare appieno la deformabilità degli estensimetri senza incorrere in snervamento.
Da un lato era possibile scegliere un acciaio inossidabile, dall'altro un alluminio di buone prestazioni.
Abbiamo optato per la lega di Al 7075 (Ergal), che sottoposta a trattamento termico di invecchiamento artificiale (T6) presenta uno sforzo di snervamento di circa 400 – 450 MPa.

Tabella Indicativa sforzi di snervamento

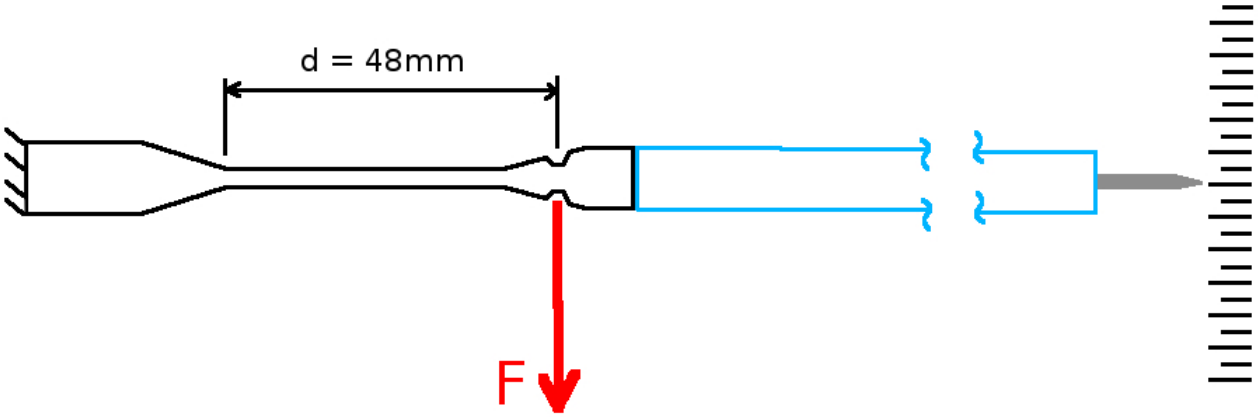
	Alluminio puro	**Ergal (7075)**	Acciaio da Costruzione
σ_y [MPa]	50	**450**	250
ε_y [μstrain]	700	**5000**	1190

Nominalmente anche l'alluminio puro sarebbe una scelta possibile, ma avvicinarsi allo snervamento è una scelta rischiosa in quanto non avremmo fattori di sicurezza rispetto a possibili carichi ulteriori.

Notiamo che per la lega scelta l'allungamento a snervamento è notevolmente superiore alla massima deformabilità dell'estensimetro: sarà quest'ultima il fattore determinante.

Caratterizzazione del materiale
Una volta acquistata la lega 7075, si impone una verifica almeno approssimativa delle capacità meccaniche del materiale. Il parametro principale da sondare è lo sforzo di snervamento.
A tal proposito, è stato realizzato un provino per eseguire una prova a flessione.

Descrizione della prova
La prova prevede l'applicazione progressiva di un carico via via crescente ad un'estremità del provino. La deflessione del provino viene amplificata tramite un opportuno braccio, in materiale molto leggero, fissato all'estremo libero. Viene infine collegato un ago all'estremità del braccio, che indica lo spostamento su una scala graduata.

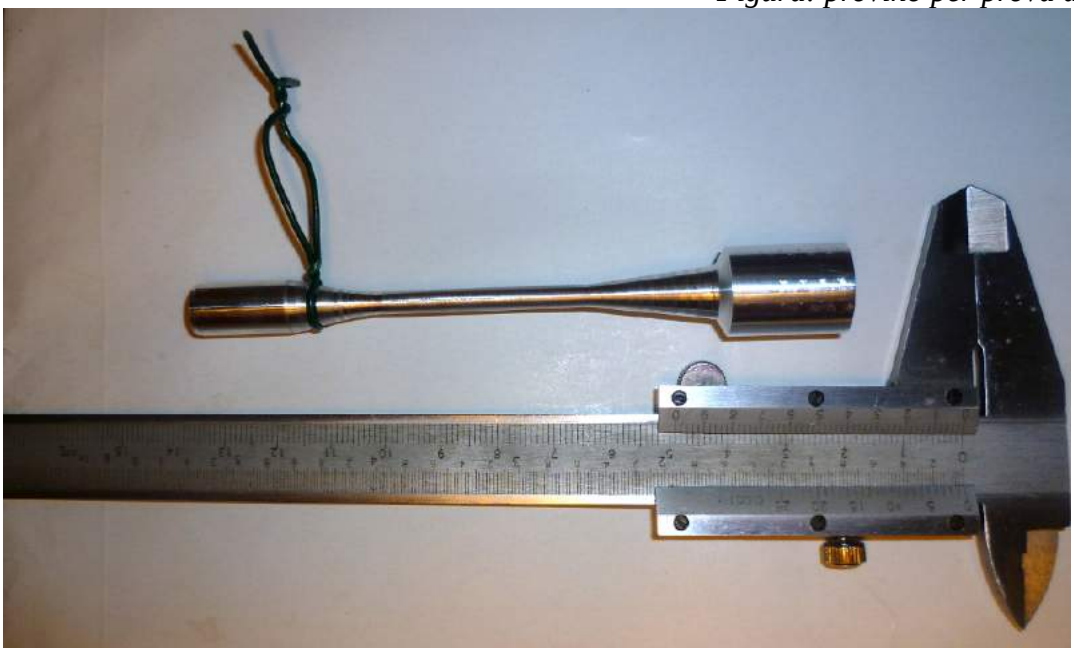


Geometria del provino

Il provino è stato realizzato in modo da rendere minimo il coefficiente d'intaglio, al fine di ottenere uno sforzo il più vicino possibile alla soluzione per trave di De Saint Venant. A tale scopo si nota che la sezione aumenta in modo lento, con un angolo scelto di 7°.

Il diametro della zona centrale del provino risulta di 4.1 mm ed il braccio del carico di 50mm.

Figura: provino per prova a flessione



Esecuzione della prova di snervamento

E' stato applicato un carico progressivo da zero ad un valore massimo rivelatosi di 5.6 kgf.
Durante l'esecuzione si notava chiaramente un'andamento lineare dell'indicatore, che per ogni 0.1kgf supplementare si spostava di 1mm.
Giunti allo snervamento, la deflessione dell'indicatore per un incremento di carico è vistosamente aumentata.

Figura: provino caricato

Utilizzando il carico applicato, siamo risaliti ad uno sforzo di snervamento minimo di circa 420MPa.
OSSERVAZIONE: tale valore non tiene in conto del coefficiente d'intaglio. Stimando tale coefficiente pari ad 1.05, otteniamo uno sforzo di snervamento di **440MPa**, in linea con quanto ci aspettavamo:

$$\sigma_Y = k_i \, \sigma_{DSV} = \frac{M_f}{J} R = \frac{F \, d}{\pi \, R^3 / 4} \approx 440 \, MPa$$

Determinazione della Geometria della Cella

Determiniamo ora la geometria finale della cella.
Considerando che il posizionamento degli estensimetri si fa tanto più complesso quanto il raggio della sezione diminuisce, consideriamo per praticità operativa raggi superiori a 5mm.
Introduciamo inoltre la possibilità della sezione di essere cava, al fine di ottenere a parità di momenti d'inerzia, dimensioni leggermente maggiori.

Osservando la configurazione della cella, possiamo esprimere il momento flettente applicato sulle sezioni A e B:

$$M_B = L(l + b/2) \qquad M_A = L\,b/2$$

Dalla formula di Navier, le deformazioni risultano quindi

$$\varepsilon_B = \frac{M_B}{EJ_B} R_{Bext} \qquad \varepsilon_A = \frac{M_A}{EJ_A} R_{Aext} \quad (3)$$

In cui il R_Bext è il raggio esterno della cella di carico e J il momento d'inerzia flessionale, di valore:

$$J = \pi \frac{R_e^4 - R_i^4}{4}$$

con ovvio significato dei simboli.

Riprendendo l'espressione dell'uscita del ponte di Wheatstone (2), inserendo l'espressione delle deformazioni ci è possibile ricavare la *sensibilità della cella*:

$$\Delta V = \frac{V_s}{4} k \left(\frac{M_B}{EJ_B} R_{Bext} - \frac{M_A}{EJ_A} R_{Aext} \right) = \frac{V_s}{4} \frac{k}{EJ} R_{ext} (M_B - M_A) \quad (4)$$

in cui si è supposto il momento d'inerzia flessionale delle due sezioni A e B uguale ed analogamente per il raggio esterno.
Ricordando che il Momento Flettente è legato alla derivata del Taglio, possiamo esprimere

$$M_B - M_A = L\,l$$

in cui *l* è la distanza fra gli estensimetri.
Ricaviamo così

$$\Delta V = \frac{V_s}{4} \frac{k\,R_{ext}\,d}{EJ} L \quad (5)$$

E la sensibilità risulta:

$$S = \frac{\Delta V}{L} = \frac{V_s}{4} \frac{k\,R_{ext}\,d}{EJ} \qquad [V/N] \quad (6)$$

Per quanto riguarda I limiti di snervamento e deformazione massima degli estensimetri, ricaviamo:

$$\sigma^Y = \frac{M_f}{J_f} R_e = \frac{4 M_f}{\pi (R_e - R_i^Y)} R_e \quad (7)$$

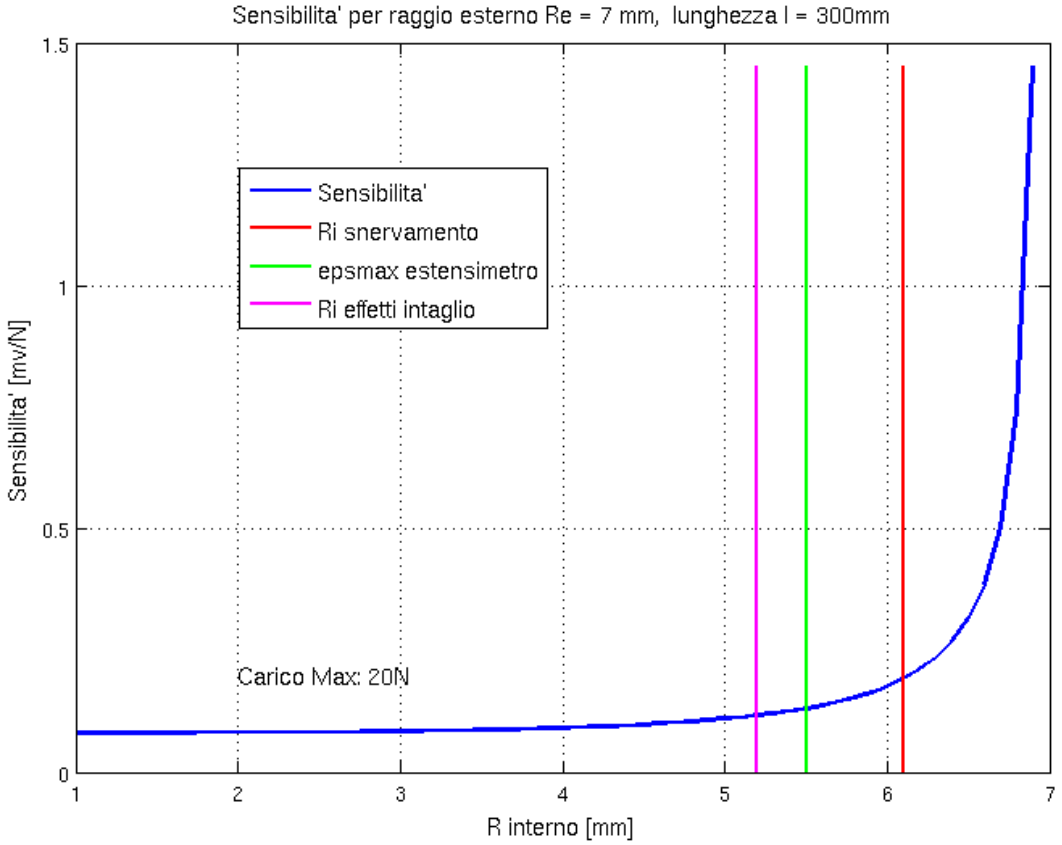
E' possibile quindi controllare per ogni Rinterno se viene o meno superato il limite di snervamento.
In maniera più o meno analoga, sostituendo allo sforzo nella (7) la deformazione moltiplicata per il modulo di elasticità, otteniamo:

$$E \varepsilon^{MAX} = \frac{M_f}{J_f} R_e = \frac{4 M_f}{\pi (R_e - R_i^{MAX})} R_e \qquad \rightarrow \qquad R^{MAX} = \left(R_e^4 - \frac{4 L (l + b/2)}{\pi E \varepsilon^{MAX}} R_e\right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

dove Rmax indica il raggio della sezione per cui otteniamo una deformazione ε_max dell'estensimetro.

Dati una lunghezza l ed un raggio esterno Re, possiamo quindi diagrammare la sensibilità della cella di carico, insieme ai vari limiti sul raggio interno.
A tale scopo è stato da noi prodotto uno script, grazie al quale inserendo come dato iniziale la distanza fra due estensimetri, possiamo ottenere una serie di grafici rappresentanti la sensibilità ed I limiti sul raggio interno per una serie di raggi esterni forniti dall'utente.

Di seguito riportiamo il grafico per raggio esterno 7mm, snervamento a 370 MPa, massima deformazione ammissibile per estensimetro: 800microstrain.

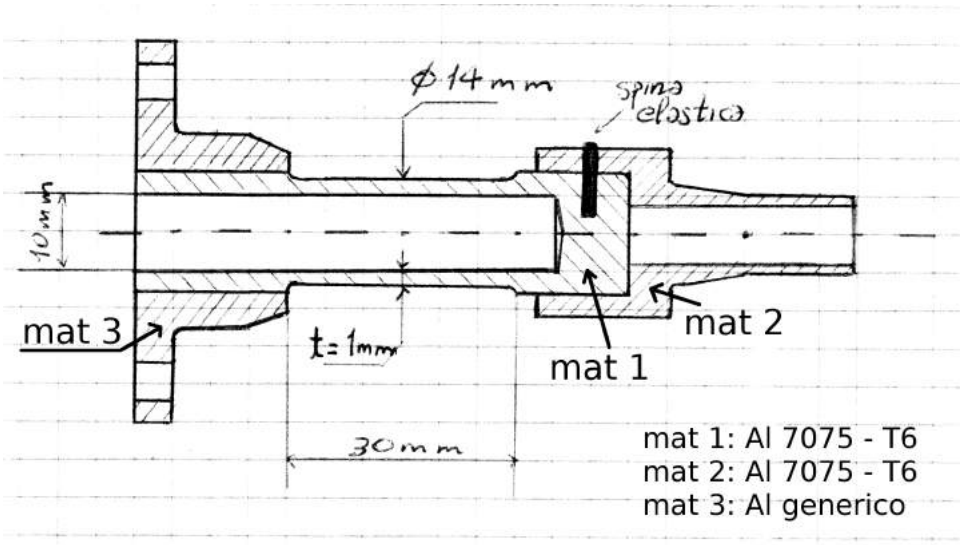


Conclusioni

Consci dei vari margini di sicurezza assunti, decidiamo di realizzare una cella di carico con I seguenti parametri:

Materiale	**Alluminio, lega 7075**
R_esterno	**7 mm**
R_interno	**5 mm**
Distanza fra estensimetri (*l*)	**300 mm**
Sensibilità	**0.1 mV/N**

In figura uno schema dell'elemento connesso al mandrino



Nelle figure seguenti i componenti principali della cella e l'assemblaggio

Incollaggio estensimetri

L'assemblaggio della cella:

Sistema di acquisizione completo:

Test sul sistema di misura

Per effettuare dei test sul sistema di misura realizzato, abbiamo deciso di realizzare un'ala di piccola apertura ed un cilindro.
Obiettivi iniziali erano la rilevazione rispettivamente della curva Lift – alpha per l'ala e delle frequenze in gioco per quanto riguarda il cilindro.

Prova dell'ala

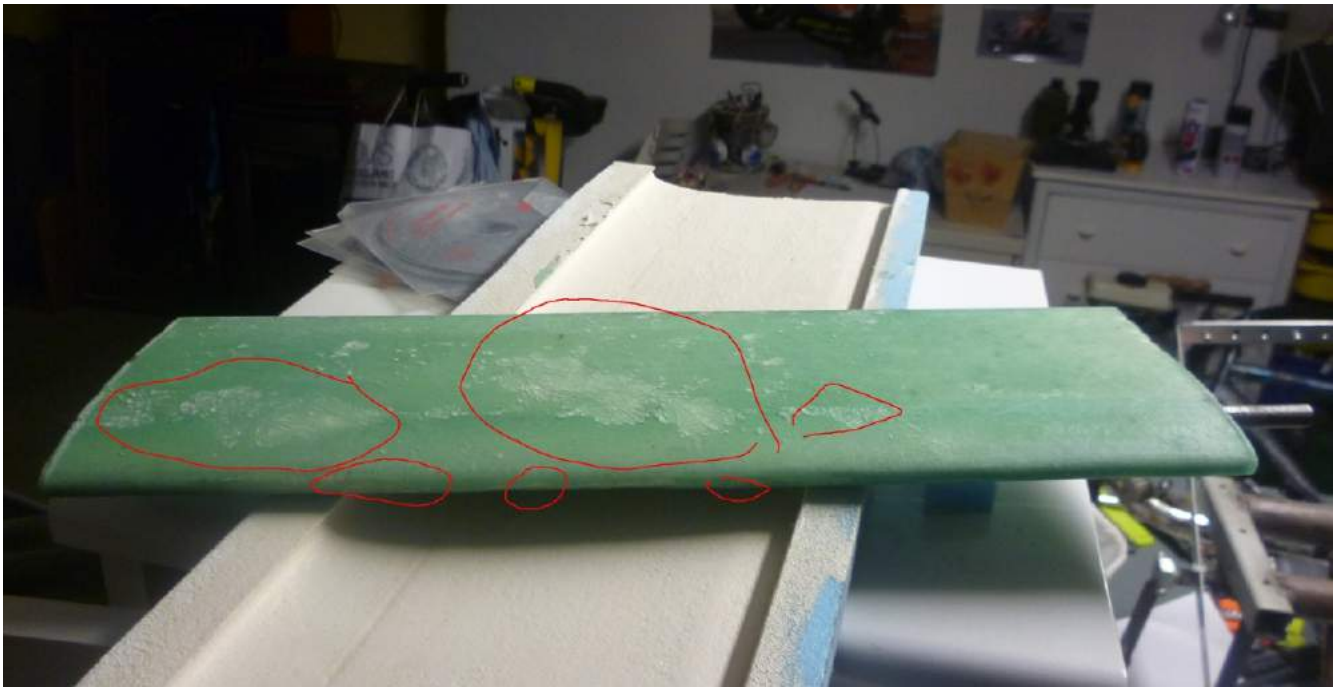
L'ala realizzata ha I seguenti parametri:

Corda [mm]	120
Allungamento [adim]	3
profilo	NACA 0012

Realizzazione dell'ala
Per gentile concessione degli esercitatori di laboratorio, è stata tagliatata un'ala tramite la macchina CNC per il “taglio a filo caldo” presente presso I laboratori del Politecnico di Milano. Il materiale usato è lo styrofoam.
L'ala è stata laminata con *resina poliestere*. Tramite qualche prova da noi effettuata possiamo confermare che la resina poliestere reagisce vistosamente con il materiale di supporto, scavandolo e modificando la geometria in modo eccessivo: per usare comunque tale resina, il profilo alare è stato ricoperto da tre strati successivi di vernice a base d'acqua, stucco e di nuovo vernice per riempire meglio eventuali pori rimasti.

Anche sul controstampo è stata effettuata la stessa procedura. Il procedimento si è verificato pienamente soddisfacente.

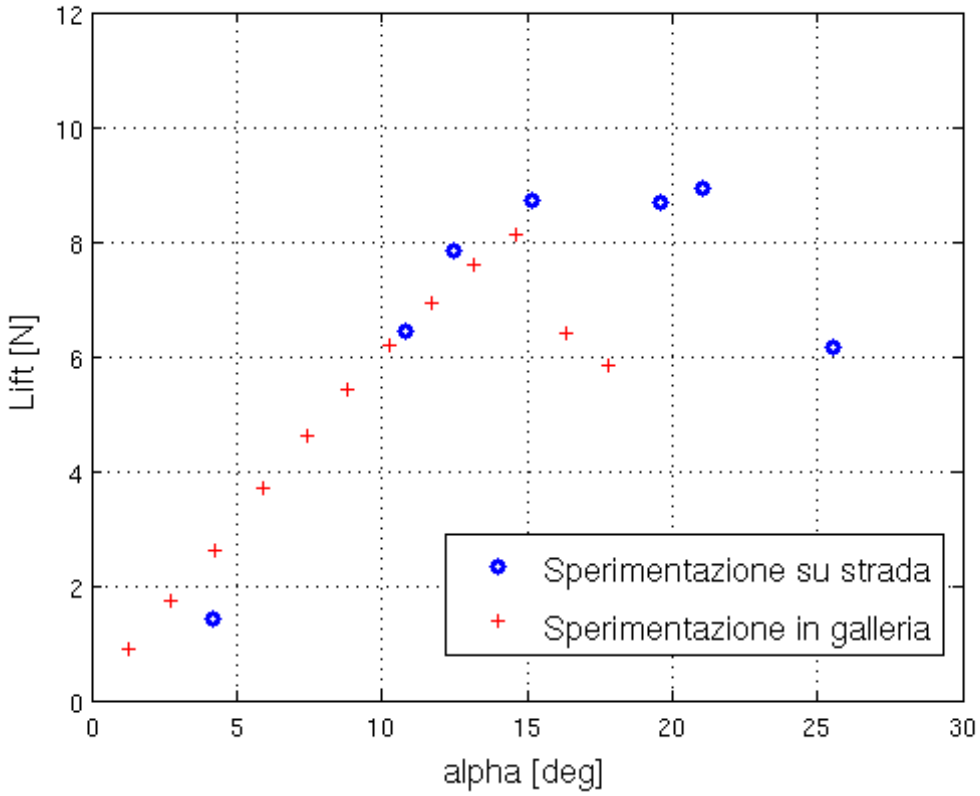
In seguito alla laminazione, la bassa qualità della resina utilizzata unita alla scarsa esperienza personale ha creato numerosi difetti superficiali, che sono stati completamente rimossi tramite “stucco metallico poliestere”.



E' stata infine costruita una parete per simulare la simmetria. La parete è stata raccordata all'ala tramite lo stucco metallico già citato.

Test sull'ala

Sull'ala sono stati effettuate alcune prove alla velocità di 70km/h (circa 20m/s), registrando la portanza generata per varie incidenze.
Come visibile nelle immagini precedenti, è stata fissata una squadretta sia alla cella che all'ala per avere un riferimento dal quale ricavare l'angolo di incidenza. Ad ogni prova è stata scattata una fotografia all'insieme ed in seguito, con l'aiuto di Octave e del comando *ginput()*, è stato ricavato l'angolo.
Varie sono state le fonti di rumore: è necessaria un'analisi attenta per distinguere I vari contributi. In questo lavoro ci limitiamo a stimare la componente statica tramite il valore medio, escludendo eventuali punti inconsistenti.
Citiamo solamente un disturbo, non previsto nella nostra rapida stima preliminare, costituito dal vento.
Otteniamo un abbozzo di curva di portanza qui di seguito diagrammato. Si tratta di dati grezzi e mal trattati, ma ugualmente colgono in maniera evidente l'incorrere del fenomeno dello stallo del profilo.



Osservazione:
notiamo una forza massima generata dall'ala pari a circa 9N. Ciò è in buon accordo con il risultato prospettato nel paragrafo “Analisi dei Carichi” secondo un modello notevolmente semplificato, ricordando che il Clmax era stato assunto pari ad 1.5, contro il valore di 1.15 fornitoci da XFOIL.
Si nota inoltre che la presenza della squadretta collegata alla parete solidale all'ala, per alti angoli di attacco ha probabilmente influito modificando le misurazioni.
Purtroppo ci siamo accorti in fase di post processing che la misurazione a incidenza 7° è stata perduta: durante la prova abbiamo più volte assistito a fenomeni di elettricità statica, che improvvisamente sospendevano il flusso di dati e riprendevano nonappena l'operatore si scaricava a terra. Per rimediare, la caviglia dell'addetto alle misurazioni è stata collegata ad un cavo elettrico, posto fuori dalla portiera “a strisciare” sul terreno durante la prova. Ciò ha ridotto notevolmente l'occorrenza del fenomeno.

Prova del cilindro

Realizzazione del cilindro

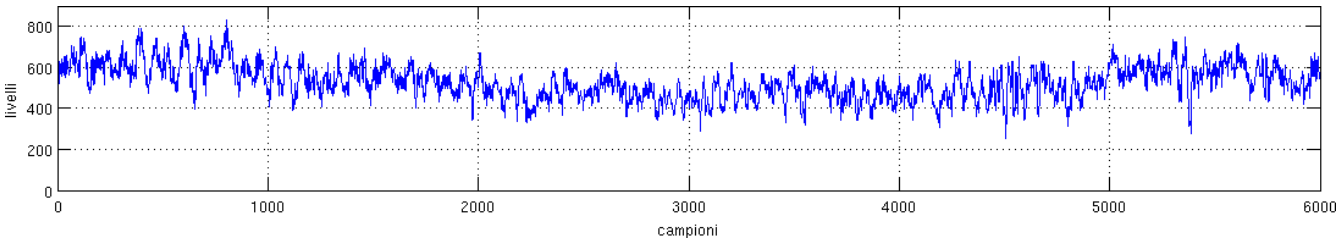
Per la prova del cilindro è stato montato al posto dell'ala un cilindro in PVC di diametro 50mm.
Per assicurare il cilindro alla cella di carico era necessario un adattatore il più leggero possibile: data l'alta sensibilità e flessibilità della cella, aggiungere una massa significativa avrebbe comportato un abbassamento delle frequenze proprie del sistema, avvicinandole eccessivamente alle frequenze associate al moto dell'automobile. E' stato quindi realizzato un adattatore cavo in alluminio, al quale il cilindro è stato in seguito rivettato.

Adattatore cilindro – cella di carico

Test sul cilindro

La configurazione scelta è stata quella verticale: avendo il cilindro una notevole lunghezza, il rischio di snervare la cella di carico sarebbe stato eccessivo.

Le poche acquisizioni da noi effettuate ed il design eccessivamente spartano della prova non hanno permesso di evidenziare con chiarezza il fenomeno del Vortex Shedding. Alcuni picchi si sono notati nell'analisi in frequenza delle acquisizioni, ma nulla di assolutamente evidente ed inequivocabile.
Si allega a titolo d'esempio l'immagine di un'acquisizione effettuata.
Sulle ascisse I campioni acquisiti durante una prova, e sulle ordinate l'ampiezza del campione in livelli dell'ADC. Il fondoscala per la prova era settato su circa 950 livelli.



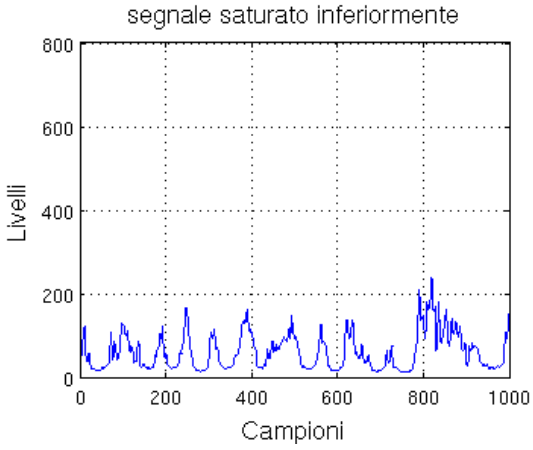
Conclusioni e modifiche future

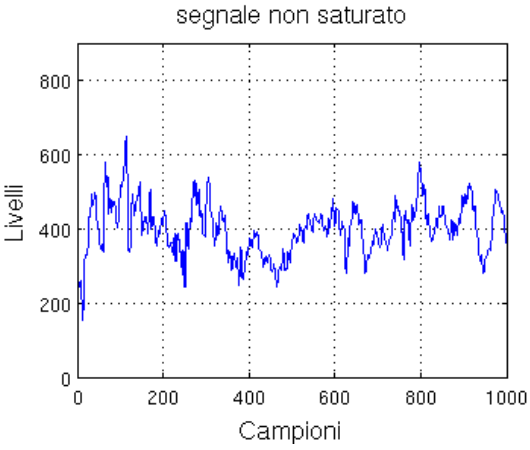
Dai test effettuati ricaviamo alcune lacune nella nostra configurazione:

1) In seguito alla prima prova sperimentale è emerso che l'architettura del sistema di misura era tale da introdurre nelle misure un elevato rumore dovuto alle vibrazioni dell'automobile in cui il sistema era montato. La distanza della cella e del provino dall'automobile era necessaria per evitare l'interferenza aerodinamica tra oggetto in prova e l'auto stessa. Tuttavia questo braccio ha reso ulteriormente più sensibile il sistema alle vibrazioni e le forze aerodinamiche solo per angoli elevati apparivano emergere rispetto alle forze di inerzia. In particolare, per bassi angoli di incidenza il rumore che avrebbe avuto media nulla, a causa del fatto che il campo delle forze misurabili era monopolare[4] tutte le misure negative sono state lette come zero.
   Il risultato è che un rumore a media 0 veniva letto solamente nella sua parte positiva, con l'effetto che la media non era più 0 ma un valore positivo, tanto più grande quanto maggiore era l'ampiezza del disturbo.

4 Al fine di tenere semplice al massimo il sistema.

La modifica al sistema per permettere la lettura di carichi sia positivi che negativi, richiede veramente uno sforzo minimo, e verrà applicata quanto prima. Grazie a questa modifica sarà possibile condurre in maniera molto più pulita e precisa la misura della portanza per bassi angoli di incidenza.





2) Uno degli elementi di debolezza del sistema è la scarsa risoluzione del sistema, anche alla luce di rendere il campo delle forze misurabili bipolare, sarebbe necessario ricorre ad un ADC esterno, capace di una maggiore risoluzione, risolvendo anche il disagio di cambiare manualmente il guadagno dell'amplificatore in funzione dell'entità della forza da misurare.

3) La cella è risultata stabile attorno all'asse di beccheggio dell'automobile grazie ad una piastra di collegamento con un finestrino, ma altrettanto non vale per la rotazione attorno all'asse di rollio dell'auto. L'angolo di incidenza è stato quindi misurato con discreta accuratezza, ma eventuali avvallamenti nel terreno causavano una rotazione dell'asta non trascurabile, con conseguenti oscillazioni a bassa frequenza ed elevata ampiezza nel segnale misurato.
Per alleggerire il fenomeno è necessario applicare una seconda piastra, che si colleghi al finestrino del lato opposto.