Gli spettri delle vie

Stefano Boccelli, Davide Del Cont-Bernard

Abstract—Questo testo documenta un piccolo esperimento, volto sia all'ottenimento degli spettri di carico su un componente strutturale di una bicicletta a partire dalle deformazioni misurate, sia alla costruzione di un sistema di acquisizione compatto e riutilizzabile.

Index Terms—Sistemi di acquisizione, Raspberry PI, estensimetria, spettri di carico.

1 Introduzione

Un mezzo di trasporto in movimento è soggetto sia a carichi statici che dinamici. Se è semplice predire i primi, altrettanto non vale per i secondi, fortemente legati al terreno sul quale esso si muove.

In questo lavoro è stato strumentato il telaio di una bicicletta al fine di ricavare lo spettro di carico applicato durante la marcia su terreno cittadino.

Sono state percorse strade più o meno accidentate e gli sforzi sono stati misurati e memorizzati grazie ad una scheda d'acquisizione a 12 bit realizzata per l'occasione.

Le misurazioni effettuate possono essere usate per molteplici scopi, quali una raccolta dati in vista della progettazione di strutture efficienti, oppure un'indagine sperimentale e fenomenologica del dissesto del manto stradale cittadino.

In questo lavoro vengono descritti il setup estensimetrico, la scheda di acquisizione realizzata ed infine i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale.

2 Telaio ciclistico: sezione strumentata

Si è scelto di misurare i carichi agenti sulla porzione posteriore del telaio, chiamata *carro posteriore*, composta da quelli che in gergo sono chiamati *tubo piantone* o *seat-tube*, *fodero verticale* o *seatstay* ed il *fodero orizzontale* o *chainstay* (elementi 2, 6 e 7 in figura 1, rappresentati in rosso). Praticamente ogni bicicletta in commercio adotta tale geometria, sia essa da uomo o da donna. Il resto del telaio invece subisce sostanziali modifiche, passando da forme triangolari a quadrilatere, o ancora a geometrie soggette a forte flessione nel caso di telai da donna.

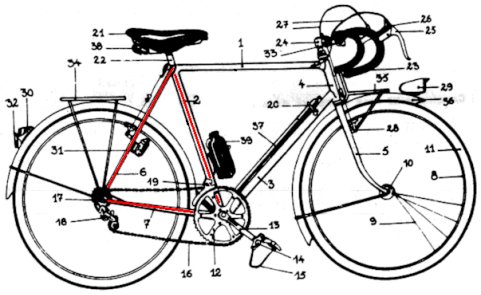

Fig. 1. Telaio ciclistico retro'.

2.1 Sezione strumentata

Si è scelto di strumentare il fodero verticale. Tale componente è soggetto prevalentemente ad un'azione assiale di compressione. E' possibile che la geometria non reticolare adottata dai telai da donna introduca attraverso il piantone verticale dei momenti flettenti non trascurabili nel triangolo posteriore. Se il fodero verticale lavorasse come una biella non avremmo certo flettenti, tuttavia il possibile momento flettente - unito alla presenza dei freni - fa si che le deformazioni misurate non possano a priori essere attribuite ad una sola forza assiale. Durante le prove si è adottata l'accortezza di non utilizzare il freno posteriore.

3 Configurazione estensimetrica

Al fine di misurare puntualmente uno sforzo, è teoricamente sufficiente adottare una configurazione estensimetrica composta da un solo estensimetro. Le deformazioni termiche tuttavia rischiano di modificare sensibilmente la misura: è stata scelta quindi una configurazione composta da 2 estensimetri, che permette di misurare lo sforzo in direzione assiale e contemporaneamente l'eliminazione degli sforzi termici indesiderati.

Fig. 2. Estensimetri applicati al telaio. Due effettivi, uno in ridondanza.

Un estensimetro è stato posizionato assialmente, mentre l'altro a 90°. Si veda la figura 2. Si osservi che sono stati montati 3 estensimetri, dei quali solo due sono stati effettivamente collegati al ponte.

Sono stati usati estensimetri di parametri:

gauge factor	2.1
resistenza	120Ω
lunghezza	$9.5mm$
larghezza	$3.5mm$

3.1 Ponte di Wheatstone

La configurazione adottata prevede l'impiego di due estensimetri posizionati su rami adiacenti del ponte di Wheatstone. Con riferimento alla figura 3, gli elementi *R1* ed *R2* sono estensimetri applicati sul telaio.

Una tale configurazione del ponte richiederebbe di adottare i seguenti valori:

Vs	$5V$	
R1	120Ω	$k = 2.1$
R2	120Ω	$k = 2.1$
R3	120Ω	
R4	120Ω	

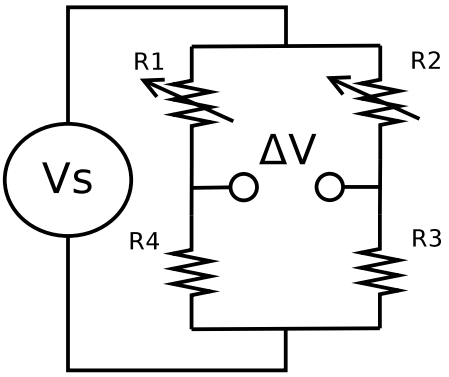

Fig. 3. Ponte di Wheatstone.

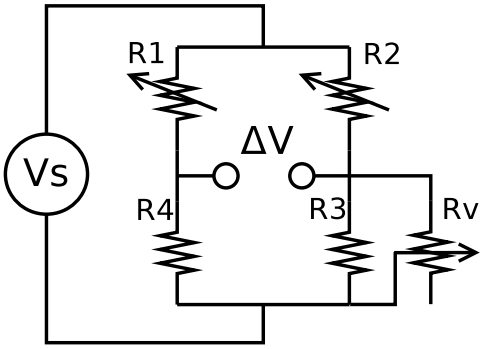

Fig. 4. Ponte di Wheatstone con trimmer di bilanciamento

In realtà per permettere il bilanciamento del ponte (leggasi $R_1R_3 = R_2R_4 \rightarrow \Delta V = 0$, garantire cioè un'uscita nulla in condizioni scariche) la configurazione di figura 3 risulta inadeguata. Le resistenze portano infatti con se un'incertezza, così come gli estensimetri e pure i collegamenti effettuati. Ne risulta che la condizione di bilanciamento rischia di non essere soddisfatta.

E' quindi stata scelta una configurazione leggermente diversa, mostrata in figura 4, che sostituisce alla resistenza $R3$ il parallelo di una resistenza più grande (143 Ω) con un trimmer da $1k\Omega$. Ciò permette di modificare il valore della vecchia $R3$ fino ad ottenere un azzeramento dell'uscita. Si noti infine che per questioni realizzative, la resistenza $R3$ è fisicamente realizzata come serie di più resistenze.

La configurazione adottata del ponte si è rivelata funzionante ma non ottimale, in quanto l'escursione del trimmer necessaria al bilanciamento è risultata eccessivamente corta. Nelle versioni future sarà adottata una soluzione diversa.

Di seguito una tabella recante i valori dei componenti di figura 4

Vs	$5V$	
R1	120Ω	$k = 2.1$
R2	120Ω	$k = 2.1$
R3	143Ω	
R4	120Ω	
Rv	$1k\Omega$	

In generale, l'uscita di un ponte bilanciato estensimetrato può essere calcolata come:

$$\Delta V = \frac{V_s}{4}(k_1\epsilon_1 - k_2\epsilon_2 + k_3\epsilon_3 - k_4\epsilon_4) \tag{1}$$

e dal momento che: i)

1) vengono usati solo due estensimetri, in posizione 1 ed 2
2) i *gauge factors* sono uguali
3) $\epsilon_2 = -\nu\epsilon_1$ poiché il secondo estensimetro è posizionato a $90°$ rispetto all'asse della trave

$$\Delta V = \frac{V_s}{4}(k_1\epsilon_1 - k_2\epsilon_2) = \frac{V_s}{4}k(\epsilon_1 - \epsilon_2) = \frac{V_s}{4}k(1+\nu)\epsilon \tag{2}$$

Invertendo tale formula è possibile ricavare la deformazione del componente e tramite il legame elastico lineare lo sforzo.

$$\Delta V = \frac{V_s}{4}k(1+\nu)\epsilon \;\rightarrow\; \sigma = E\epsilon = \frac{4E}{k(1+\nu)}\frac{\Delta V}{Vs} \tag{3}$$

Nota: la misura effettuata, a questo livello, non consente di ricavare le azioni interne e/o carichi agenti sulla struttura in quanto momenti e forze potrebbero essere mischiati; maggiori informazioni si sarebbero potute ottenere misurando anche l'entità del momento (usando altri estensimetri disposti diversamente).

4 Requisiti del sistema di acquisizione

E' stato necessario realizzare un sistema di acquisizione tale da permettere la lettura di dello sbilanciamento del ponte. I requisiti sono i seguenti:

- Possibilità di essere alimentato a batteria.
- Singola alimentazione (+5V o +12V).
- Capacità di immagazzinare dati.
- Facilità di utilizzo, sia al momento delle acquisizioni sia per il *postprocessing*.

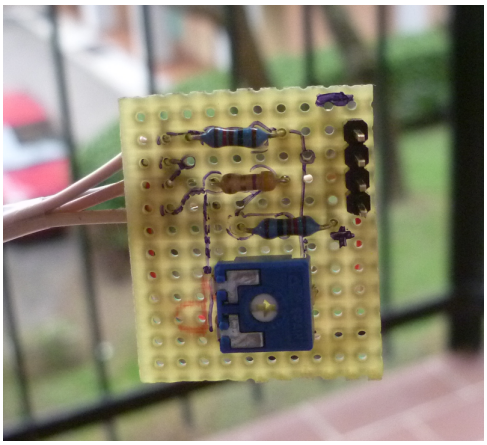

Fig. 5. Un ponte di Wheatstone di prova montato su basetta millefori. Una resistenza è montata sul retro, così come un condensatore a stabilizzare l'alimentazione.

5 Soluzione adottata

Si è quindi scelto di realizzare un piccolo circuito di condizionamento del segnale e di interfacciare un ADC ad un *Raspberry PI*. Sono stati realizzati due circuiti, uno su *breadboard* e uno stampato, identico al primo ma dotato anche di un filtro passabasso, in modo da poter essere utilizzato per misure generiche.
Sono ora discussi i componenti salienti dei due sistemi.

5.1 Raspberry PI

Il *Raspberry PI* (fig. 6) è un *single-board* computer della dimensione di una carta di credito, basato sul SoC (System on Chip) *Broadcom BCM2835* che incorpora un microprocessore ARM da 700 MHz, 512 MB di RAM e una performante GPU. E' inoltre dotato di porte USB, porta *Ethernet*, uscite audio e video. Non avendo dischi fissi il sistema operativo è installato su comune scheda SD.

A renderlo particolarmente adatto ai nostri scopi è la presenza di periferiche di basso livello: 26 pin GPIO (*General Purpose Input Output*). Alcuni di questi pin sono nativamente predisposti all'utilizzo dei protocolli di comunicazione seriale più comuni: I2C, SPI, UART etc. garantendo buone prestazioni.

5.1.1 Software utilizzato

Il sistema operativo utilizzato è *Raspbian*, in sostanza una versione di *Debian* specifica per *Raspberry*.
Per l'occasione è stato scritto un semplice programmino in C per la lettura dell'ADC e per la gestione

Fig. 6. Un *Raspberry Pi Model B+*

dei led e dei pulsanti. Led e pulsanti sono stati semplicemente collegati ad alcuni GPIO disponibili, mentre l'ADC è gestito tramite il protocollo SPI. Per la gestione dei GPIO e della comunicazione seriale si è utilizzata la libreria *bcm2835.h* [1].
L'aspetto più critico riguarda il fatto che non essendo il kernel Linux "standard" adatto ad applicazioni real time, non è possibile garantire che le acquisizioni avvengano esattamente al momento desiderato. Nel nostro caso, visto il tipo di analisi cui siamo interessati (si veda oltre), non è un aspetto preoccupante. Inoltre, se non ci sono altri programmi che impegnano risorse, la variabilità della frequenza di acquisizione è minima. E' possibile ottenere una spaziatura temporale tra le acquisizioni piuttosto soddisfacente anche per velocità di campionamento sull'ordine dei KHz.

5.2 Condizionamento del segnale

I due circuiti realizzati permettono l'amplificazione e la conversione analogica digitale delle misure estensimetriche. Lo schema elettrico di quello più completo (dotato di filtro) è riportato in figura 7. Nei paragrafi successivi sono approfonditi alcuni aspetti chiave nella progettazione/realizzazione del sistema.

5.2.1 Caratteristiche del segnale

Lo sbilanciamento del ponte, come visibile in figura 3, è letto misurando la tensione tra i punti A e B. Siccome la differenza tra A e B (ΔV) è dell'ordine di grandezza 1e-3, 1e-4 V, non è pratico misurarla direttamente utilizzando un ADC. Per questo una possibile soluzione è di ricorrere ad un amplificatore differenziale e amplificare la solamente ΔV.

1. Reperibile presso http://www.airspayce.com/mikem/bcm2835/index.html

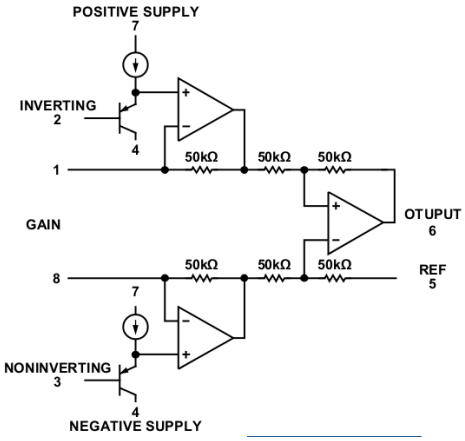

Fig. 8. Schema funzionale dell'AD623

Il segno di ΔV tuttavia cambia a seconda che l'estensimetro subisca una compressione o un allungamento: sorge un'ulteriore complicazione.
Alimentando il ponte (vedi figura 3) a 5V (al fine di avere una discreta sensibilità), la tensione di modo comune è circa a 2.5 V, infatti i due rami del ponte sono praticamente identici e la variazione di resistenza degli estensimetri è di una frazione piccolissima del valore nominale.

5.2.2 Amplificatore da strumentazione

L'amplificatore da strumentazione scelto è un AD623[2] della *Analog Device*. Si tratta di amplificatore da strumentazione del tipo a tre operazionali, a singola alimentazione e uscita *rail-to-rail*. Il guadagno è settabile da 1 a 1000 con un'unica resistenza. Con questa configurazione è inoltre possibile amplificare un segnale differenziale e sommare il risultato ad una tensione di riferimento. Lo schema funzionale è riportato in fig. 8.

A partire dal guadagno desiderato g, la resistenza R_g da inserire è scelta dalla $g = 1 + \frac{100k\Omega}{Rg}$ (cfr. *datasheeet*). Per rendere la scheda più flessibile sono stati inseriti 4 *microswitch* per la scelta di 4 guadagni comodi (circa 1001, 501, 101, 11).
La tensione di riferimento invece è stata scelta in modo da portare la condizione di sbilanciamento nullo ad una tensione intermedia al range di tensioni in ingresso all'ADC. Si è utilizzato un riferimento di tensione LM285[3] che garantisce su di se

2. Non è tra quelli che la *Analog Device* consiglia per la lettura di un ponte estensimetrico di questo tipo (cfr [4]), tuttavia a parità di prezzo era l'amplificatore da strumentazione a singola alimentazione dalle caratteristiche più interessanti.

3. Sarebbe stato preferibile un regolatore che fornisse una tensione di 1.5 o 1.6 V, ma per motivi di disponibilità si è optato per il sopra citato integrato.

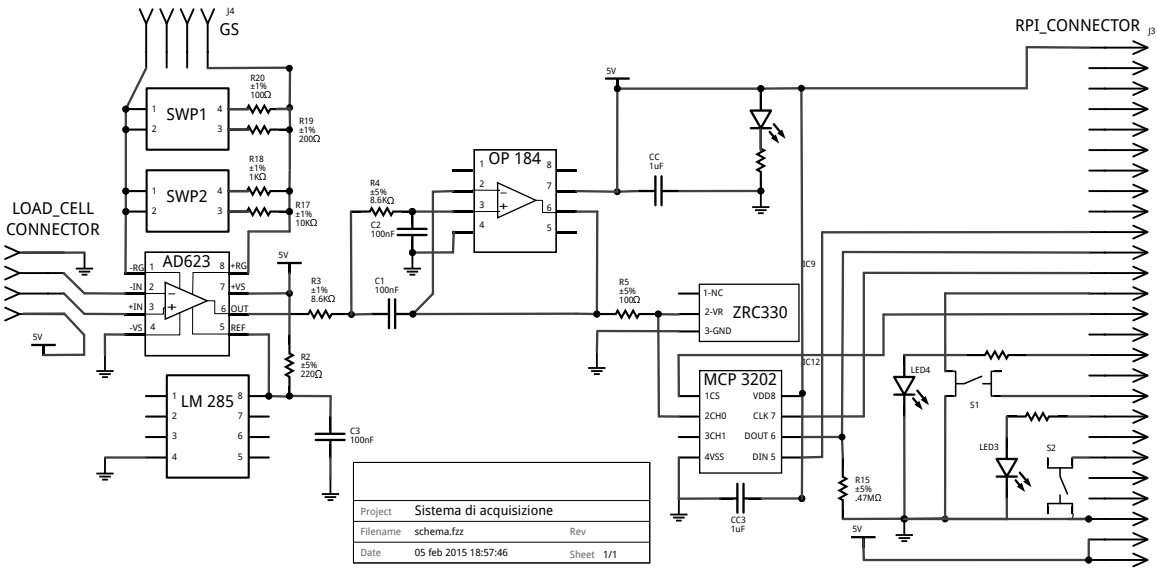

Fig. 7. Schema del sistema completo. (ponte non incluso)

una caduta di 1.235 V.

La tensione di modo comune produce un'uscita non desiderata (si veda [3]), calcolabile a partire dal CMRR e dal guadagno, mediante l'eq 4.

$$V_{out(vcm)} = \frac{Gain\ V_{cm}}{\log_{10}^{-1}(\frac{CMRR}{20})} \tag{4}$$

L'equazione 4, valutata nel caso di $V_{cm} = 2.5, Gain = 100, CMRR = 110dB$ produce una tensione $V_{out} = 790\mu V$. Si tratta di un errore costante (V_{cm} =costante) che non produrrà alcun danno, semplicemente verrà o fatto sparire durante il bilanciamento del ponte o comunque non darà effetti in quanto il suo contributo verrà eliminato considerando come *zero* la lettura del sistema a struttura scarica.

Sarebbe stato comodo alimentare tutti gli integrati della scheda di acquisizione a 3.3V in modo da essere compatibili con i pin GPIO del *Raspberry* (che non tollerano tensioni maggiori di 3.3V e non dispongono neppure di alcun dispositivo di protezione). Questo non è stato possibile perché a fronte di una tensione di modo comune di 2.5V l'uscita dell'amplificatore sarebbe stata limitata: si veda fig. 9.

Alimentando l'AD623 a 5V, si potranno avere in uscita tensioni di poco inferiori a 3.5V, tali da permettere di coprire tutti il range dell'ingresso dell'ADC (vedi paragrafo 5.2.4).

5.2.3 Filtro antialiasing

E' stato implementato nella scheda un filtro passa basso del secondo ordine (Sallen-Key), con fre-

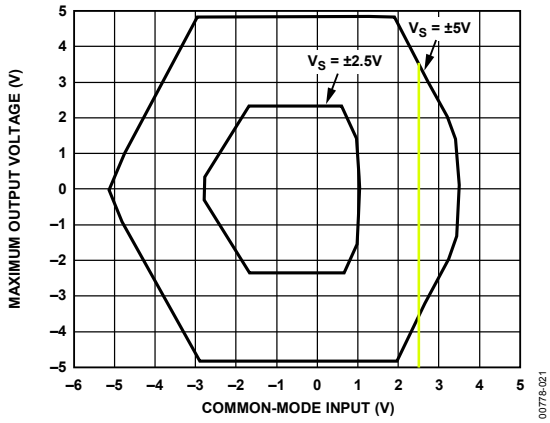

Fig. 9. Limitazioni imposte dalla V_{cm}.

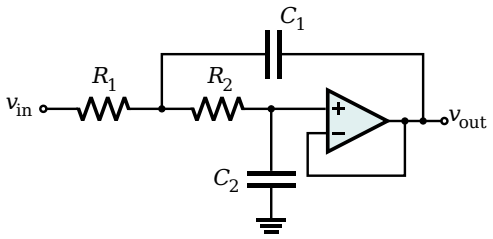

Fig. 10. Un filtro passa basso del secondo ordine.

quenza di taglio $f_{cut} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ per il quale si è scelto un amplificatore operazionale *general purpose* a singola alimentazione: un OP 184 della Analog Devices.

5.2.4 Convertitore analogico digitale

Come convertitore analogico digitale è stato scelto un MPC3202 della Microchip. Si tratta di un ADC

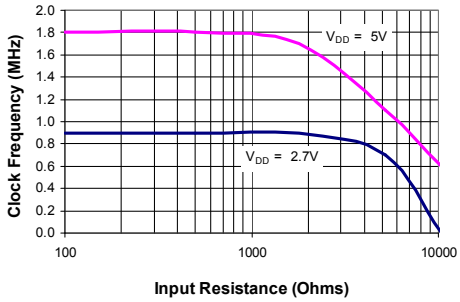

Fig. 11. Frequenza di clock vs. resistenza di ingresso per avere una deviazione minore di .1 LSB rispetto alla condizione nominale.

ad approssimazioni successive da 12 bit, singola alimentazione, 100ksps, con interfaccia SPI, 2 canali *single ended* oppure 1 pseudodifferenziale, completo di MUX e S/H.

Siccome in uscita dal filtro *antialiasing* potrebbero esserci tensioni maggiori di 3.4 V (limite massimo della tensione in ingresso) è stato necessario inserire un dispositivo (un regolatore di tensione ZRC330) in modo da impedire sovratensioni potenzialmente pericolose.

Rispetto ad un diodo la caratteristica tensione-corrente del regolatore ZRC330 è preferibile, in quanto assorbendo solo poche decine di μV non disturba la misura fino alla tensione alla quale è necessario intervenire. La corrente massima inversa che lo potrà percorrere è limitata a quelle nominali di lavoro da una resistenza (R5), tale da non interferire con la misura (si veda fig. 11).

Un controllo sulla saturazione potrà quindi eventualmente essere implementato in software.

5.3 Accortezze nel design del layout

Avendo visto quanto le misure effettuate dal circuito su *breadboard* fossero rumorose (vedi **??**), nella realizzazione del PCB sono state prese alcune accortezze volte a ridurre i disturbi. Si veda [2].

- Utilizzo di *groud plane*
- Piste digitali distanti da analogiche
- Condensatori accanto ad ogni integrato

5.4 Costruzione del sistema completo

Tutta la catena di acquisizione è stata riportata su un unico PCB, sia per evitare altre soluzioni potenzialmente più *rumorose*, sia perché le piccole dimensioni sono un pregio per un dispositivo portatile, sia perché la scelta di *packages* a montaggio

Fig. 12. *Asportazione del rame tramite soluzione* $HCl + H_2O_2$

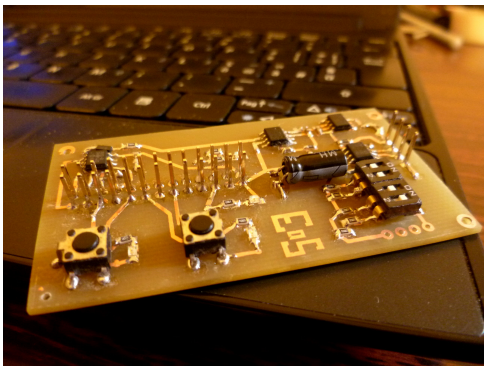

Fig. 13. La scheda di acquisizione finita.

superficiale (SMD) rende disponibile una più ampia varietà di componenti rispetto ai classici DIP (*Dual In Line Package*).

Per il disegno del PCB è stato usato *Fritzing*, un semplice programma multipiattaforma che permette in modo intuitivo sia di disegnare schemi (compreso quello di figura 7), sia di preparare i tracciati (anche in modo automatico).

Una volta realizzato il disegno delle piste, il circuito può essere stampato con toner su appositi fogli per il trasferimento. Le piste sono trasferite dal foglio stampato ad una basetta ramata utilizzando un comune ferro da stiro. La basetta a questo punto può essere immersa in una soluzione di HCl e H_2O_2 diluiti (entrambi facilmente reperibili in qualsiasi supermercato/farmacia) per asportare il rame in eccesso (vedi figura 12). Alla fine della reazione tutto il rame è stato rimosso eccetto quello coperto dal toner in corrispondenza delle piste; il toner può essere facilmente pulito con dell'acquaragia. Per facilitare la stagnatura dei componenti più piccoli può essere d'aiuto l'uso del flussante, reperibile a prezzi modicissimi ad esempio su *ebay*. Una foto della scheda ultimata e completamente popolata è

Fig. 14. Elementi viscoelastici sotto alla massa.

Fig. 15. Damper montato sul portapacchi posteriore.

visibile in figura 13.

6 Damper

Per ridurre le vibrazioni delle schede elettroniche si rende necessario isolare il blocco di acquisizione dal telaio tramite un sistema massa - molla - smorzatore. E' stato realizzato un semplice *damper* costituito da elementi viscoelastici in gommapiuma, una massa ed un piano di appoggio, sul quale fissare la circuiteria.

Si mostra in figura 14 la massa (una corona motociclistica) e gli elementi viscoelastici, successivamente modificati ad assumere la forma di un triangolo.

In figura 15 il damper montato sul mezzo.

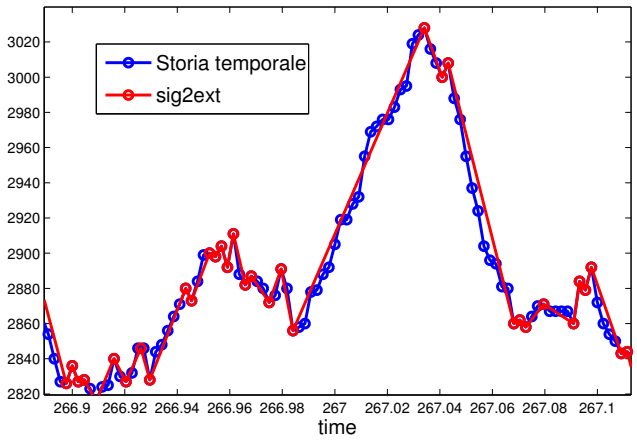

Fig. 16. Effetto dello script `sig2ext.m` su una porzione di storia temporale acquisita.

7 Analisi dei dati: Spettri di Sollecitazione

Il sistema descritto, costituito da bicicletta estensimetrata e scheda d'acquisizione su *breadboard*, è stato provato per durate di 20 minuti circa su tre tipi diversi di terreno: asfalto, pavé e sterrato.

L'analisi dei dati acquisiti ha permesso di ottenere gli spettri di sollecitazione. Per far ciò i dati vengono dati in pasto ad un algoritmo *rainflow*, che permette di conteggiare i cicli di carico. Prima di essere processati dal *rainflow*, i dati vanno filtrati attraverso un algoritmo che preserva solamente i picchi locali. I risultati del *rainflow* vanno infine processati ad eliminare fluttuazioni e rumore introdotti dall'ADC.

Una nota sul codice: *il codice usato è di libero dominio e ne esiste anche una versione per GNU/Octave chiamata* `rainflow-octave`*, reperibile in rete. La versione per Matlab prevede la compilazione di un sorgente C tramite il compilatore Matlab* `mex`*.*

7.1 *Pre-processing* del segnale

Come anticipato, occorre preprocessare il segnale per preservare solamente picchi e valli locali. Tale operazione può essere eseguita tramite uno script fornito nel pacchetto *rainflow*, chiamato `sig2ext.m`. In figura 16 la trasformazione di un segnale dall'originale al processato.

7.2 Algoritmo *Rainflow*

Gli algoritmi *rainflow* hanno come scopo l'individiazione dei cicli chiusi d'isteresi annidati

dentro al ciclo principale di entità maggiore. In altre parole, un algoritmo *rainflow* scompone una storia temporale di carico individuando sotto-cicli sovrapposti a cicli di entità superiore.

Il nome deriva dal vedere la storia temporale come il tetto di una pagoda, sulla quale scorre in direzione x della pioggia: l'effetto è che le zone rientranti rimangano asciutte. Effettuando la stessa operazione in direzione -x si riescono ad ottenere i cicli chiusi annidati nel ciclo principale. L'algoritmo agisce per eliminazione successiva di cicli sempre più grandi, che vengono conteggiati e memorizzati nel vettore di output.

Dopo aver eseguito un conteggio *rainflow* sulla storia temporale, si esegue un sort dei dati, dopodiché è possibile diagrammare lo spettro di carico in scala *semilogx*.

7.3 Estrapolazione dello spettro

Gli spettri di carico misurati possono essere scalati opportunamente per simulare l'uso quotidiano di una bicicletta. Ipotizzando ad esempio la bicicletta venga usata da lavoratori per 4 km al giorno (due in andata e due al ritorno) per 5 giorni lavorativi alla settimana, si ottiene una percorrenza di circa 1000 km all'anno. Nel lavoro in esame si sono acquisite storie temporali di circa 20 minuti su ogni terreno: per la scarsità di dati ci si è limitati ad estrapolare i dati su una percorrenza di $1h$.

La scalatura dello spettro risulta molto semplice e si riduce ad una scalatura dell'asse delle ascisse di un fattore $f = km_{richiesti}/km_{percorsi}$. Su una scala `semilogx` la scalatura diventa una semplice traslazione.

L'estrapolazione della parte alta dello spettro richiede invece di adottare un modello di distribuzione per descrivere gli eventi massimi. Si è scelto di usare una distribuzione LEVD (distribuzione di Gumbel): dai dati sono stati estratti dei massimi, che diagrammati su una carta di probabilità mostrano la qualità della scelta effettuata. L'ipotesi che i massimi appartengano ad una Gumbel si è rivelata buona per lo sterrato e per l'asfalto, mentre per il pavé si è mostrata meno adeguata. In figura 17 la carta di probabilità per i dati provenienti da sterrato.

7.4 Filtraggio numerico

Si rende infine necessario effettuare un filtraggio numerico: i dati passati all'algoritmo *rainflow* sono infatti affetti da rumore numerico introdotto dall'ADC. Occorre effettuare un troncamento dei $\Delta livelli$ forniti dal *rainflow*, sulla base perlomeno del rumore del convertitore analogico/digitale. Una possibilità per la caratterizzazione del rumore è misurare una storia temporale a carico nullo.

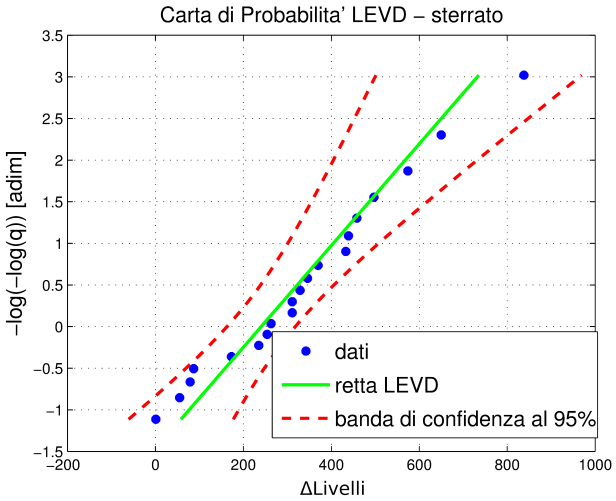

Fig. 17. Carta di probabilità per dati da sterrato.

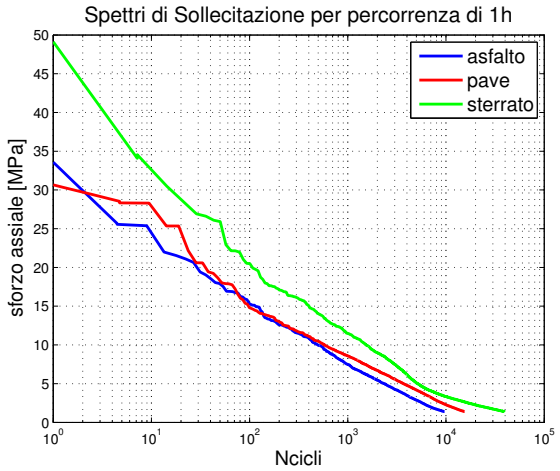

Fig. 18. Spettri di carico di diversi terreni a confronto

8 Risultati

In figura 18 sono mostrati i risultati relativi ai terreni:

1) asfalto
2) pavé
3) sterrato

Gli spettri sono stati estrapolati su percorrenze di $1h$ al fine di poter eseguire un confronto.

8.1 Interpretazione degli spettri

Come ci si può attendere, lo sterrato risulta primo classificato fra gli spettri di sollecitazione. Segue il pavé, a breve distanza dalla percorrenza su asfalto. Se è prevedibile che, a parità di velocità di marcia, la prima posizione sia riservata allo sterrato, non è scontata la differenza tra pavé ed asfalto (caratterizzato da un buon numero di buche e tombini).

I risultati mostrati in figura 18 rappresentano la *Stress Amplitude*: immaginando una sinusoide, viene rappresentata l'ampiezza, ossia metà del valore picco-picco.

Si osservi che, come specificato nel paragrafo 7.3, l'estrapolazione degli spettri per il pavé risulta poco attendibile. La zona estrapolata (a bassissimi cicli) risulta quindi indicativa.

Si noti infine che i risultati mostrati sono stati acquisiti per un temporaneo disguido tramite *breadboard*. L'uso del PCB precedentemente descritto rende possibile una maggiore ripetibilità delle misure.

References

[1] S. Beretta, *Affidabilità delle costruzioni meccaniche*, Springer, 2010.

[2] Bonnie C. Baker, *Layout Tips for 12-Bit A/D Converter Application*, AN688, Microchip Technology Inc.

[3] Nash, Eamon. *A Practical Review of Common-Mode and Instrumentation Amplifiers*, Sensors Magazine, July 1998, Article Reprint Available from Analog Devices.

[4] Kitchin C, Counts L. *A designer's guide to instrumentation amplifiers*, 3rd ed.,Analog Device Inc.; 2006.