

## Bilancia di torsione di Cavendish U40205

### Istruzioni per l'uso

03/10 ALF



### 1. Descrizione

La bilancia di torsione di Cavendish serve per dimostrare la forza gravitazionale tra due pesi e per determinare le costanti di gravitazione.

Il nucleo centrale della bilancia di torsione è rappresentato da un pendolo di torsione composto da un'asta sospesa con due piccole sfere di piombo, agganciata orizzontalmente a un filo sottile in tungsteno. La posizione di riposo viene influenzata dalla forza di attrazione delle due sfere di piombo grandi sulle sfere piccole. Orientando le sfere grandi in una nuova posizione, il pendolo di torsione oscilla attorno alla posizione di riposo modificata. Il movimento rotatorio viene misurato con un sensore

differenziale capacitivo, soppresse completamente le percentuali di rumore e vibrazione nel segnale, e registrato con un computer. Per la successiva valutazione è possibile esportare i dati in un foglio di calcolo. In alternativa è possibile anche la dimostrazione del movimento mediante un indicatore luminoso.

Grazie al breve periodo di oscillazione di 2 – 4 min (a seconda della lunghezza del filo in tungsteno) la costante di gravitazione può essere determinata entro un'ora di lezione con una precisione maggiore del 10%.

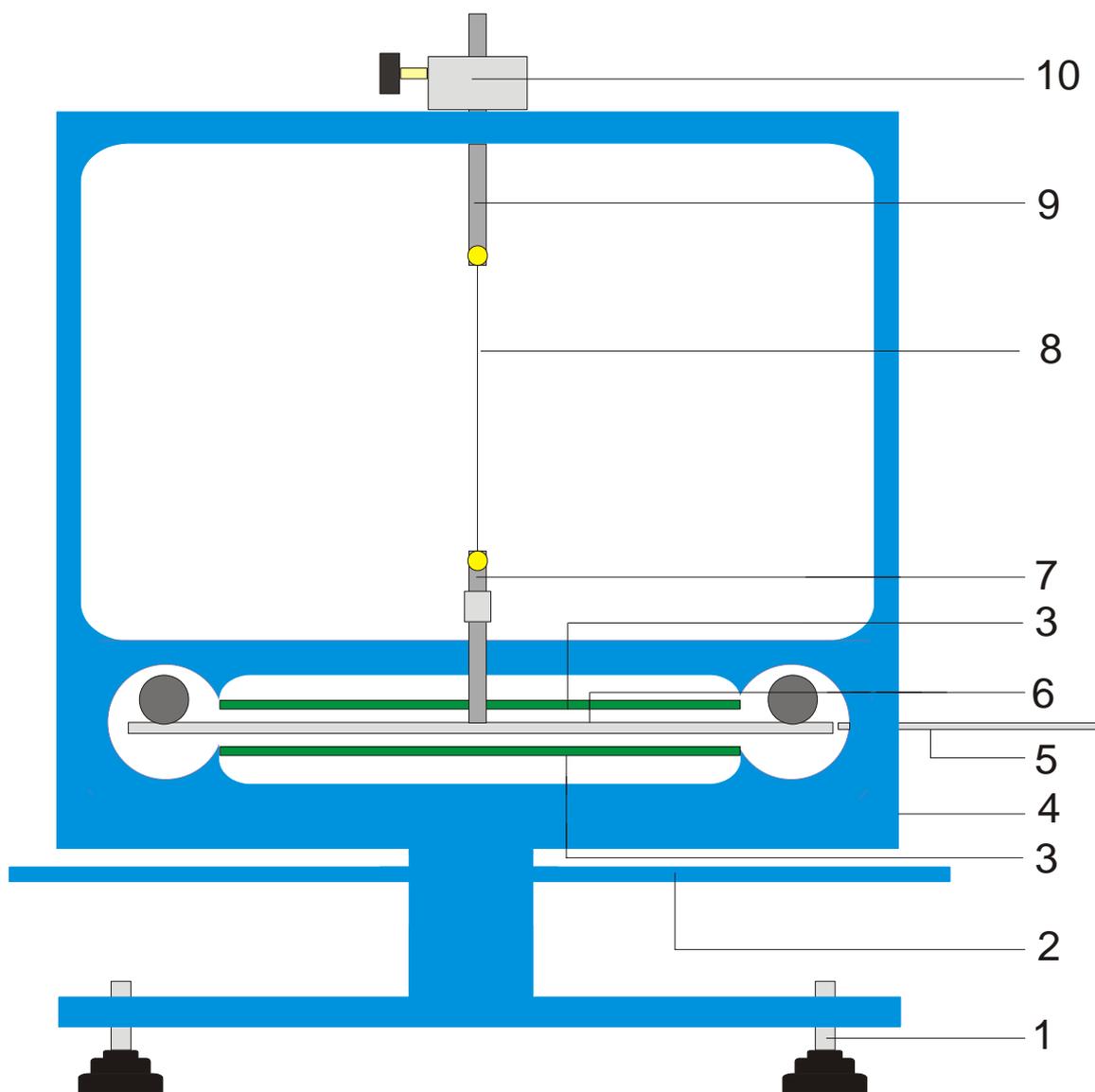


Fig. 1 Componenti della bilancia di torsione di Cavendish

1 piedi regolabili, 2 asta sospesa esterna per sfere di piombo grandi, 3 sensore differenziale capacitivo, 4 collegamento USB, 5 barra di centraggio, 6 asta sospesa interna con due sfere di piombo piccole, 7 sospensione inferiore con specchio, 8 filo in tungsteno, 9 sospensione superiore, 10 supporto girevole con scala angolare

## 2. Fornitura

1 Alloggiamento con lastre di vetro  
 1 rocchetto di filo in tungsteno  
 1 sospensione inferiore con specchio  
 1 sospensione superiore  
 1 asta sospesa interna  
 1 barra di centraggio  
 1 asta di alluminio con filettatura  
 2 sfere di piombo piccole  
 2 sfere di piombo grandi  
 1 software di misura  
 1 cavo USB

## 3. Dati tecnici

Peso delle sfere di piombo grandi: ciascuna ca. 1 kg  
 Peso delle sfere di piombo piccole: ciascuna ca. 15 g  
 Forza gravitazionale:  $< 10^{-9}$  N  
 Cavo di torsione: tungsteno, 25  $\mu$ m  
 Periodo di oscillazione: 2 – 4 min  
 Risoluzione angolare: 25  $\mu$ rad  
 Velocità di scansione: 0,5, 1, 2, 5, 10 samples/s  
 Dimensioni: ca. 190x180x200 mm<sup>3</sup>  
 Peso: ca. 5 kg

## 4. Comandi

### 4.1 Norme di sicurezza

Il laser a diodi (U22000) soddisfa i requisiti tecnici di sicurezza per i laser di classe II. In caso di uso conforme, la sperimentazione con il laser a diodi non comporta alcun pericolo.

- Attenersi alle indicazioni contenute nelle istruzioni per l'uso del laser.
- Non guardare il raggio laser direttamente o riflesso.
- Evitare di superare il limite di abbagliamento, cioè nessun osservatore deve sentirsi abbagliato.

### 4.2 Indicazioni sul luogo dell'esperimento

Il sensore differenziale capacitivo sopprime completamente le percentuali di rumore e vibrazione nel segnale. Tuttavia è necessario scegliere una postazione di lavoro stabile. Le sollecitazioni forti (ad es. lo sbattere di una porta) non possono essere sopresse e alterano il segnale.

### 4.3 Installazione del software e collegamento al computer

Prima che l'apparecchio sia pronto per l'uso, il software deve essere installato e l'apparecchio collegato a un PC o notebook.

- Inserire il CD del software nell'unità CD del computer.
- Aprire Windows Explorer (Esplora risorse) e navigare nell'unità CD. Per avviare il programma di installazione cliccare due volte su "setup.exe". Seguire le istruzioni della guida di installazione dell'hardware.
- Collegare la bilancia di torsione con il cavo USB al computer.
- Avviare il programma.

Se l'installazione è stata eseguita correttamente, compare un valore in mrad nell'angolo in alto a sinistra della finestra.

Una descrizione dettagliata del software è riportata al punto 5.

### 4.4 Impostazione del range di misura

- Estrarre le lastre di vetro dall'alloggiamento.
- Avvitare la barra in alluminio con la filettatura al centro dell'asta sospesa interna. Quindi montare l'asta sospesa nell'alloggiamento della bilancia di torsione e orientarla in modo tale che si trovi a metà tra le due piastrine dei sensori.
- Inserire le lastre di vetro. Collegare la bilancia di torsione al computer e avviare il software. Nel software, cliccare sul pulsante "setup".
- Ruotare l'asta sospesa tramite il supporto in senso antiorario fino a quando questa non tocca la

lastra di vetro.

- Premere il pulsante "Adjust left border", confermare con "OK" e definire in tal modo il limite inferiore del range di misura.
- Ruotare ora l'asta sospesa in senso orario fino a quando questa tocca nuovamente la lastra di vetro. Premere il pulsante "Adjust right border", confermare con "OK" e definire in tal modo il limite superiore del range di misura.

L'asta sospesa è stata progettata con sporgenze alle estremità, in modo tale che oscilli sempre in un range lineare delle piastre del condensatore.

Il software di misura rileva tutti i valori di misura compresi tra +60 e -60 mrad, durante l'esperimento invece l'asta sospesa oscilla di norma solo di pochi mrad.

La figura 2 mostra le dimensioni dell'asta sospesa interna. Da queste dimensioni si può facilmente calcolare l'angolo massimo.

$$\alpha = \frac{(30 - 18,7)}{2} \div \frac{150}{2} = 75 \text{ mrad}$$

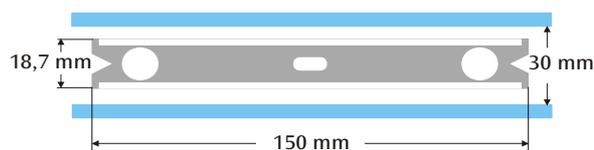


Fig. 2 Dimensioni dell'asta sospesa interna

### 4.5 Assemblaggio del pendolo di torsione

Nota: L'assemblaggio del pendolo di torsione è una procedura complessa, che richiede una mano molto precisa e una buona capacità visiva. Il filo in tungsteno è molto sottile e soggetto a strappi e deve quindi essere maneggiato con particolare attenzione. Affinché il filo sia ben visibile, si consiglia di eseguire l'assemblaggio del pendolo di torsione su un foglio di carta bianco.

- Collocare la bilancia di torsione su un tavolo da lavoro stabile e orientarla in posizione orizzontale.
- Avvitare la sospensione inferiore nel centro sull'asta sospesa interna. A questo riguardo, accertarsi che la superficie dello specchio sia parallela all'asta sospesa (vedere Fig. 3).
- Con un piccolo cacciavite allentare le viti di fissaggio su entrambe le sospensioni.
- Fissare la sospensione superiore con un pezzo di striscia adesiva su un foglio di carta bianca, in modo che non possa rotolare via.
- Svolgere un pezzo di filo in tungsteno lungo da 8 a 10 cm circa, senza tagliarlo ancora.
- Fissare sulla carta l'estremità del filo accanto alla sospensione superiore con un pezzo di striscia adesiva. Ora posizionare il filo attorno alla vite di fissaggio e serrare bene la vite. Durante questo

procedimento, assicurarsi che il filo non venga schiacciato. Il filo dovrebbe passare il più possibile al centro tra le due sospensioni (vedere Fig. 3).

- A questo punto posizionare la sospensione inferiore sulla carta a circa 4-5 cm al di sotto della sospensione superiore. Condurre il filo attorno alla vite di fissaggio tirandolo leggermente e serrare la vite.
- Ora tagliare il filo dal rocchetto.
- Appendere con attenzione il pendolo di torsione alla sospensione superiore a uno stativo e verificare che l'asta sospesa sia allineata in orizzontale.
- Per allineare orizzontalmente l'asta sospesa, rimuovere nuovamente il pendolo di torsione dallo stativo e posizionarlo con attenzione sul tavolo. Allentare la vite della sospensione inferiore, tenere ferma la sospensione con una mano e spostare l'asta sospesa in modo corrispondente. Serrare nuovamente la vite e verificare l'allineamento.

- Inserire con cura il pendolo di torsione allineato nell'alloggiamento. A tale scopo collocare l'asta sospesa sopra la scheda sensori verde inferiore e far passare la sospensione superiore attraverso il foro nell'alloggiamento.
- Regolare l'altezza tramite la vite di bloccaggio in modo tale che l'asta sospesa possa oscillare liberamente tra le schede sensori. La vite di bloccaggio deve premere sul lato piatto della sospensione.
- Se il pendolo non oscilla liberamente, ripetere la procedura sopra descritta per il posizionamento della sospensione sull'asta sospesa. Tramite i piedini regolabili è possibile apportare ulteriori correzioni.
- Posizionare le sfere di piombo piccole sull'asta sospesa interna e inserire le lastre di vetro.

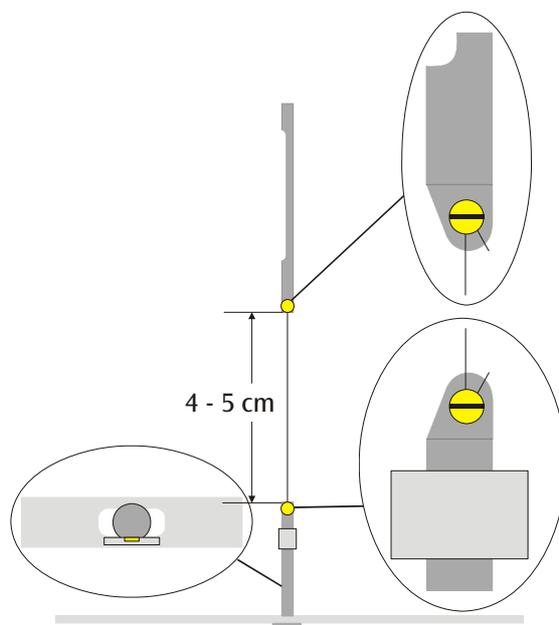


Fig. 3 Rappresentazione schematica del pendolo di torsione (sezione sinistra: asta sospesa con sospensione inferiore dall'alto)

#### 4.6 Impostazione dello zero

Per la regolazione del punto zero si consiglia il seguente laser come indicatore luminoso:

laser a diodi, rosso 650 nm U22000

- Montare la bilancia di torsione su un tavolo da lavoro stabile a circa 2-3 m di fronte a una parete piatta e collegarla al computer (vedere Fig. 5).
- Montare il laser in modo tale che il raggio si trovi alla stessa altezza dello specchio sulla sospensione inferiore.
- Osservare l'indicatore luminoso sulla parete.
- Attendere fino a quando le oscillazioni del pendolo di torsione sono cessate.
- Girando il supporto per la sospensione superiore, spostare l'asta sospesa di piccoli angoli fino a quando l'asta sospesa va a urtare contro le lastre di vetro. Come ausilio per questa operazione, sull'alloggiamento attorno al supporto è riportata una scala con graduazione 45° (vedere Fig. 4).
- Osservare il movimento dell'indicatore luminoso e annotare su un pezzo di carta alla parete le deviazioni massime a destra e a sinistra.
- A partire dalle tacche della deviazione massima, definire la posizione centrale e segnare sulla parete.
- Ruotando il supporto, portare l'asta sospesa in questa posizione centrale e attendere fino a quando il pendolo si ferma lì. In alternativa fissare l'asta sospesa con la barra di centraggio in posizione centrale.

- Definire questa posizione come posizione di origine nel software.
- Per continuare l'esecuzione mantenere la struttura dell'esperimento.

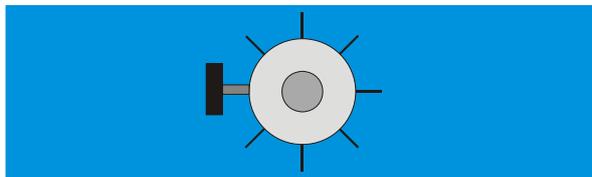


Fig. 4 Supporto del pendolo di torsione con graduazione osservato da sopra

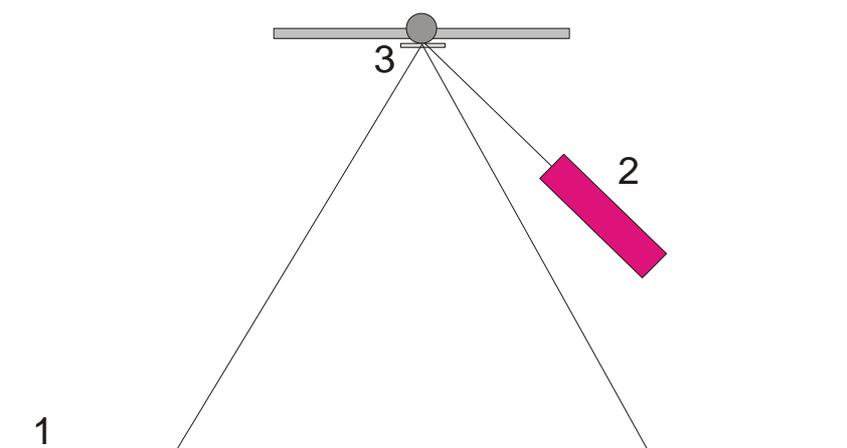


Fig. 5 Struttura dell'indicatore luminoso per la regolazione del punto zero (1 parete, 2 laser, 3 specchio)

#### 4.7 Esecuzione dell'esperimento

- Collocare le sfere di piombo grandi sull'asta sospesa esterna in posizione 1 (vedere Fig. 6) e attendere fino a quando le oscillazioni sono cessate (osservazione dell'indicatore luminoso). Eventualmente calibrare il punto zero.
- Ruotare l'asta sospesa esterna in posizione 2 e iniziare la misurazione.
- Quando le sfere piccole hanno quasi raggiunto la loro posizione di equilibrio, orientare l'asta sospesa esterna in posizione 3.
- Quando le sfere piccole hanno quasi raggiunto la loro nuova posizione di equilibrio, interrompere la misurazione.
- Salvare la curva di misurazione.

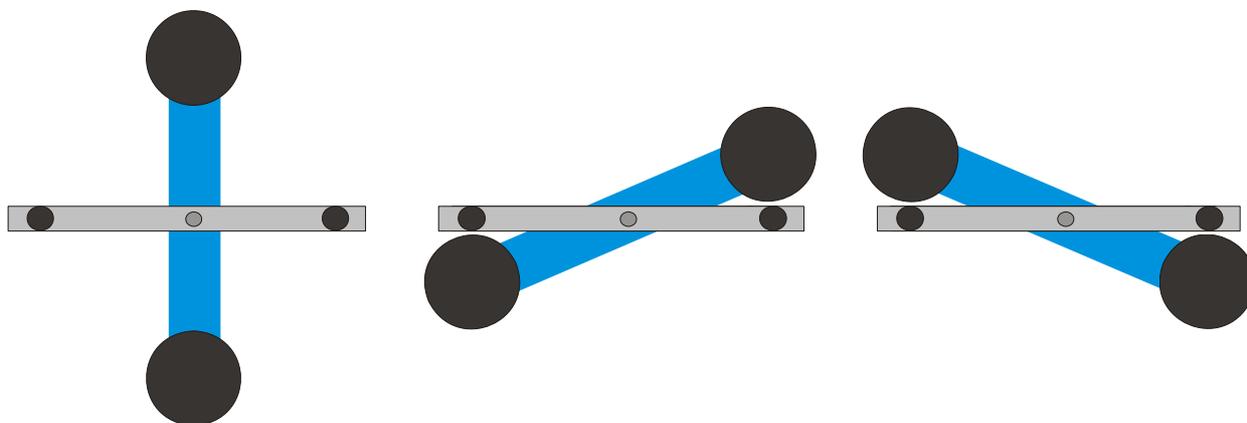


Fig. 6 Posizioni dell'asta sospesa esterna (visione dall'alto) sinistra: posizione 1, centrale: posizione 2, destra: posizione 3

## 4.8 Analisi

### 4.6.1 Determinazione della posizione di equilibrio

- Dai primi cinque valori di fondo scala, dopo aver orientato l'asta sospesa esterna in posizione 2, è possibile calcolare la posizione di equilibrio  $\alpha_1$  in base all'equazione

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\alpha^{(7)} + \alpha^{(3)} + \alpha^{(5)}}{3} + \frac{\alpha^{(2)} + \alpha^{(4)}}{2} \right)$$

- Quindi con il cursore spostarsi sui valori massimi e minimi della curva e leggere i valori nel campo "Data" della barra delle informazioni.

In alternativa i valori possono essere acquisiti anche da un elenco in Excel se i dati sono stati memorizzati in un foglio di calcolo.

- Analogamente, calcolare la nuova posizione di equilibrio  $\alpha_2$  dopo aver nuovamente orientato l'asta in posizione 3.

### 4.6.2 Determinazione della costante di gravitazione $G$

$m$  = massa delle sfere piccole

$r$  = distanza delle sfere rispetto all'asse di rotazione

$M$  = massa delle sfere grandi

$M_B$  = massa dell'asta sospesa interna

$L_B$  = lunghezza dell'asta sospesa interna

$W_B$  = larghezza dell'asta sospesa interna

$b$  = distanza tra sfere piccole e grandi

$T$  = periodo di oscillazione

$k$  = costante di collegamento angolare

$\Delta\alpha$  = differenza delle posizioni di equilibrio  $\alpha_1 - \alpha_2$

Il momento di inerzia del pendolo di torsione  $J_{\text{tot}}$  si ottiene dalla somma dei momenti di inerzia delle sfere piccole  $J$  e dell'asta sospesa interna  $J_B$ .

$$J = 2 \cdot m \cdot r^2$$

$$J_B = \frac{1}{12} \cdot M_B \cdot (L_B^2 + W_B^2)$$

$$J_{\text{tot}} = J + J_B$$

$$\tau = k \cdot \Delta\alpha$$

$$k = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot J_{\text{tot}}$$

$$\tau = G \cdot 2 \cdot \frac{m \cdot M \cdot r}{b^2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4r^2}} \right)^3 \right)$$

Tramite l'inserimento e la trasformazione dell'equazione si ottiene la grandezza desiderata  $G$ .

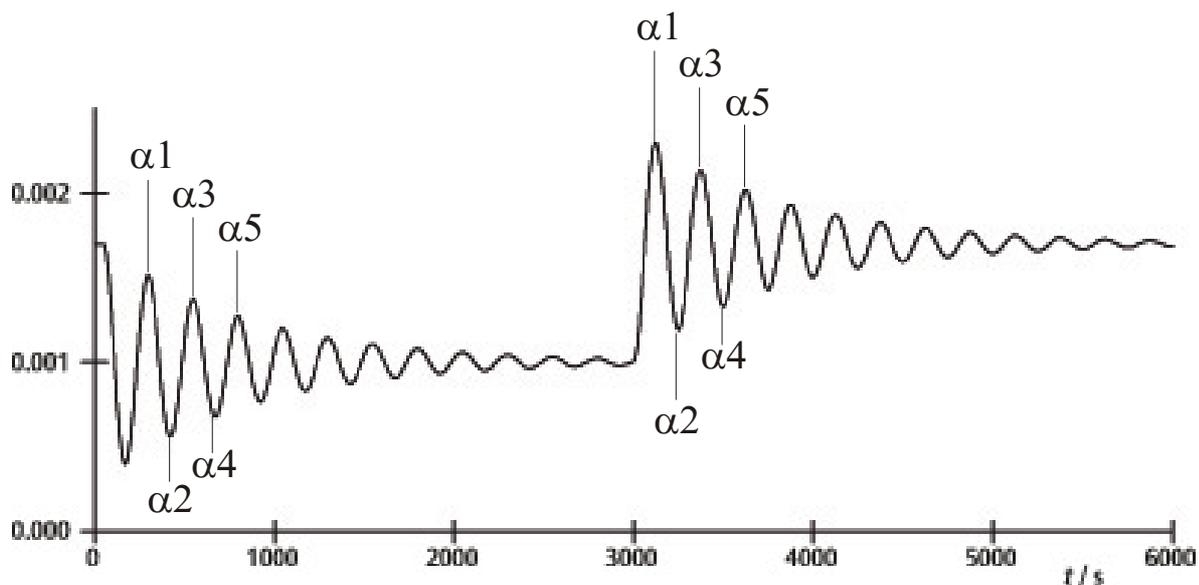


Fig. 7 Determinazione delle posizioni di equilibrio

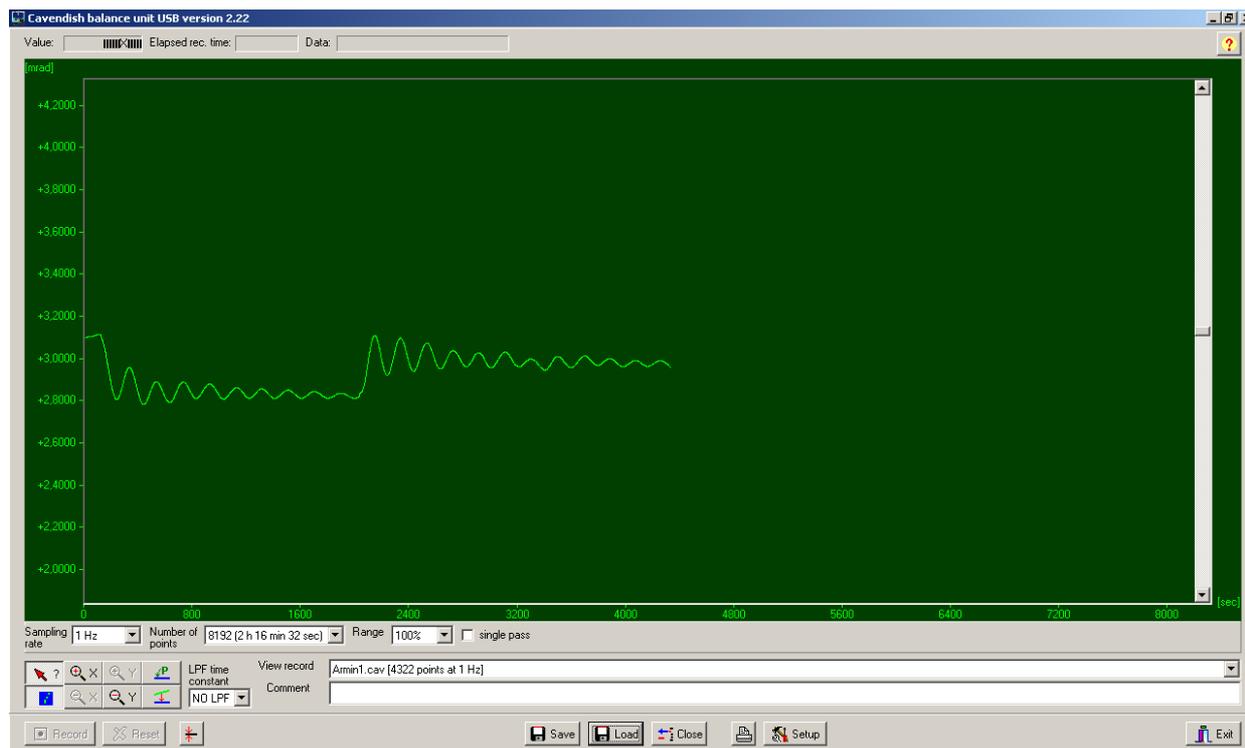


Fig. 8 Esempio di una curva di misurazione

## 5. Descrizione del software

### 5.1 Barra delle informazioni

La barra delle informazioni sul bordo superiore della finestra contiene tre campi. Il campo “Value” indica il valore di misurazione corrente della bilancia di torsione. Nel campo “Elapsed Time” viene indicato il tempo trascorso dall’inizio dell’esperimento e nel campo “Data” vengono indicati i dati di ciascun punto della curva di misurazione quando il cursore viene spostato lungo il grafico.

### 5.2 Barra “View Record”

A destra sotto alla finestra del diagramma si trova la barra “View Record”, nella quale vengono visualizzate le seguenti informazioni: la velocità di misurazione, la modalità di misurazione “Single pass” (misura singola) o “Continuous” (misurazione continua) e se la misurazione avviene in tempo reale oppure se è stato caricato un record.

### 5.3 Barra dei commenti

La barra dei commenti si trova direttamente sotto la barra “View Record”. In questa barra è possibile inserire commenti all’esperimento.

### 5.4 Barra degli strumenti

La barra degli strumenti a sinistra sotto alla finestra del diagramma consente di selezionare i parametri per il rilevamento dei valori misurati. Nel campo “Sampling Rate” si possono scegliere 5 diverse velocità

di misurazione. Il campo “Number of Points” mette a disposizione 7 „capacità di dati” da 512 fino a 32768 punti con un massimo di 19 ore di tempo di rilevamento a disposizione. Il campo “Range” indica la possibilità di scelta tra 6 diverse graduazioni dell’asse y. Attivando l’opzione “Single Pass” il “rilevamento dei dati” si interrompe dopo un passaggio. Se questa opzione non viene attivata, il rilevamento dei dati prosegue in modo continuo.

A sinistra sotto la barra degli strumenti sono disposti 8 pulsanti in 2 file. Nella fila superiore a sinistra si trova il pulsante “Examine Data”. Selezionando questo pulsante viene visualizzato un angolo e il tempo nella barra delle informazioni. Se il reticolo scompare, è possibile renderlo nuovamente visibile cliccando sul pulsante.

Sia l’asse x che l’asse y possono essere ingranditi con l’attivazione del bottone +Zoom- e cliccando con il tasto sinistro del mouse nella finestra attiva. Attivando il pulsante -Zoom- e cliccando con il tasto sinistro del mouse nella finestra attiva viene ripristinata la grandezza originaria. L’ingrandimento massimo è pari a 512 punti di tempo per circa 1,5 mrad.

Attivando il pulsante “Connect Data” i singoli punti di misurazione vengono collegati l’un l’altro da una linea.

A destra, uno sotto l’altro, si trovano i due bottoni “Select Points” e “Apply Corrections”. Con il pulsante „Select Points” è possibile scegliere 1, 2 o 3 punti sul grafico, per definire un offset, una funzione lineare o una curva quadratica. Queste possono in seguito

essere utilizzate per la correzione di una deriva nelle misurazioni a lungo termine. Cambiamenti nel livello di umidità dell'aria si sono dimostrati causa principale di questo tipo di derive. Per selezionare dei punti, premere il pulsante "Select Points" e cliccare nella finestra del diagramma e nel menu a discesa attivare P1. Quindi selezionare il primo punto per la correzione della deriva. Ripetere la procedura per i successivi due punti P2 e P3.

Per l'esecuzione della correzione premere il pulsante "Apply Corrections". Se la correzione non è soddisfacente, sono disponibili due metodi di adattamento. Se si segue il primo metodo, disattivare il pulsante „Apply Corrections“ premendolo più volte. Quindi selezionare nuovamente i punti e ripetere l'intero processo. Il secondo metodo per adattare la correzione prevede la modifica diretta dei coefficienti di funzione. Quindi cliccare nella finestra del diagramma e selezionare "set coef." nel menu a discesa. Ora è possibile inserire i nuovi valori per A, B e C. Cliccare su "OK" e quindi ancora nella finestra del diagramma. Quindi cliccare su "Manual Coefficients OFF" per avviare la funzione "Manual Coefficients On" e visualizzare la correzione con i valori inseriti. I coefficienti possono essere modificati più volte a piacere fino a quando l'adattamento è soddisfacente.

### 5.5 Low Pass Filter

Il campo "LPF Time Constant" consente all'utente di scegliere tra 12 diversi filtri passa basso oppure nessun filtro. Questa funzione viene utilizzata solo in casi eccezionali. Tutti gli esperimenti devono essere avviati con l'opzione "No LPF". Se l'asta sospesa interna esegue movimenti significativi diversi da quelli rotatori, la reiezione di modo comune evita che questi movimenti vengano registrati. In caso contrario, l'impiego del filtro Low Pass può essere utile.

### 5.6 Pulsante „Reset“

Dopo aver completato la serie di misurazioni, è possibile modificare i parametri per il rilevamento dei valori misurati come velocità di misurazione, numero dei punti di misurazione, modalità di misurazione ecc. Cliccando il pulsante "Reset" queste modifiche vengono attivate.

### 5.7 Pulsante "Record"

Premendo il pulsante „Record“ viene avviata una serie di misurazioni. Il pulsante diventa ora pulsante „Stop“ con il quale è possibile arrestare manualmente la serie di misurazioni. Al termine di una serie di misurazioni, in modo manuale o automatico, compare un messaggio che chiede se i dati devono essere memorizzati.

### 5.8 Salvataggio e upload

I dati vengono salvati cliccando il pulsante "Save". Il formato standard è \*.cav. Altri due formati (\*.txt e \*.xls) sono a disposizione in un foglio di calcolo per ulteriori analisi dei dati.

Il pulsante "Load" consente l'upload di dati precedentemente registrati.

Dopo 2 minuti di rilevamento dei dati, il programma crea un file temp.cav. In seguito la misurazione viene salvata in questa cartella temporanea in modo che ad es. in caso di guasto della corrente i dati non vadano persi e possano essere ripristinati fino al momento del guasto. Questo file viene sovrascritto ad ogni avvio di una nuova serie di misurazioni.

### 5.9 Stampa

Con la selezione del pulsante "Print" è possibile stampare i dati. Oltre al grafico, vengono stampati la velocità di rilevamento, il numero dei punti di misurazione e il nome del file. I commenti dal campo dei commenti possono essere aggiunti alla stampa se questa opzione viene selezionata.

### 5.10 Pulsante "Setup"

Con questo pulsante vengono fissati i limiti min./max del range di misura della bilancia di torsione.

„Y minimum" e „Y maximum" definiscono l'intero range della bilancia di torsione. Con la modifica di questi valori è possibile adattare la lettura della bilancia di torsione. I pulsanti „Adjust left border" e „Adjust right border" adattano la visualizzazione in modo tale che la posizione dell'asta sospesa corrisponda al bordo superiore (adjust right border) o inferiore (adjust left border) della finestra del diagramma.

### 5.11 Calibrazione del punto zero

Il pulsante direttamente a destra del pulsante "Reset" fissa il punto zero dell'asta sospesa. Il punto zero dell'oscillazione dell'asta sospesa si trova nel punto in cui il pulsante viene premuto. Per fissare il punto zero, l'asta sospesa deve essere portata al centro al di sotto delle schede sensori, qui temporaneamente fissata con la barra di centraggio e quindi deve essere premuto il pulsante. Il centro geometrico delle schede è quindi definito come punto zero e la divergenza da questa linea su entrambi i lati viene indicata in mrad.

### 5.12 Pulsante "Exit"

Il programma viene terminato premendo il pulsante "Exit".