

**II - METODI E SISTEMI PRINCIPALI PER LA RILEVAZIONE DEI DATI
TECNICO-BIOMECCANICI NELL'ATLETA**

HEIN BEULKE

Introduzione

La biomeccanica sportiva si occupa dei complessi motori dalle forme più semplici a quelle più complesse nelle diverse discipline sportive sotto l'aspetto della meccanica classica. Considera nello stesso tempo le caratteristiche meccaniche e le premesse dell'apparato motorio, la cui funzionalità dipende dalle condizioni biologiche dell'organismo (Hochmuth).

Secondo questa definizione i metodi di ricerca devono derivare in primo luogo da metodi applicati alla meccanica. Dati e caratteristiche biomeccaniche si esprimono in grandezze fisiche, che, per principio, sono misurabili.

I metodi usati per la rilevazione dei dati biomeccanici, indicanti le condizioni istantanee delle capacità qualitative dell'atleta, si basano sulla misurabilità di grandezze fisiche, il cui andamento in funzione del tempo è di particolare importanza nella biomeccanica. I dati relativi si rilevano tramite esercizi che rappresentano parti di complessi di moto specifici, in cui le componenti delle condizioni istantanee si manifestano nel modo più chiaro possibile, senza falsare il loro carattere specifico.

I metodi di rilevazione dei dati devono inoltre essere adeguati alle esigenze dei metodi analitici applicati nell'elaborazione dei dati. L'analisi cinematica è possibile soltanto con un minimo indispensabile di dati cinematici, mentre per l'analisi dinamica sono necessari dati di carattere dinamico. Nella maggior parte dei casi l'analisi dinamica di un complesso motorio si esegue in parallelo con l'analisi cinematica. La rilevazione dei dati cinematici e dinamici si esegue perciò spesso in parallelo e con assoluta sincronia.

A. - La rilevazione di dati cinematici.

La cinematica descrive i diversi tipi di moto tramite le grandezze fisiche velocità ed accelerazione, che da parte loro si basano su misurazioni di spazio e tempo. Essa non prende in considerazione l'interdipendenza tra l'effetto della forza ed il moto.

Un dato tra i più fondamentali è la velocità con la quale un atleta percorre un determinato spazio. Nell'insieme dei dati relativi allo stato condizionale di un atleta può essere di interesse sia la velocità massima, sia quella propria di una determinata fase della rincorsa ad esempio.

La velocità si calcola sulla base del tempo impiegato per percorrere un determinato spazio. Il tempo si può rilevare sia manualmente, sia tramite sistemi elettronici adeguati. Da quest'ultimi risultano dati più precisi, spesso indispensabili su distanze brevi o brevissime. La velocità calcolata è quella media per l'intero percorso considerato.

L'informazione diventa più completa applicando metodi cinematografici. Il loro principio consiste nella registrazione dello spostamento di un corpo in spazio e tempo, e nella deduzione dell'andamento di velocità ed accelerazione dalle variazioni di spazio e tempo tramite differenziazione.

Aumentando la frequenza dei fotogrammi si diminuisce l'intervallo tra di loro e diventa più breve la distanza percorsa dall'intero corpo o (e) dai diversi segmenti corporei dell'atleta tra un fotogramma e l'altro. Con ciò il complesso di moto diventa più risolvibile per l'analisi cinematica. Una frequenza massima da 200 a 300 fotogrammi al secondo basterà comunque per quasi qualunque esigenza analitica.

La registrazione cinematografica è sottomessa alle precise regole dell'ottica geometrica. Secondo queste, per limitare l'errore di parallasse ad un minimo inevitabile, si utilizza un angolo di apertura dell'obiettivo più piccolo possibile, cioè la distanza focale più lunga possibile (teleobiettivo). La posizione della cinepresa si deve trovare su una linea perpendicolare rispetto al piano principale del moto. Ciò significa che in pratica si stabilisce prima la posizione della cinepresa ad una distanza ottimale, date le condizioni geometriche ambientali, per scegliere poi l'angolo di apertura dell'obiettivo secondo la « larghezza » del complesso di moto da registrare.

La registrazione con una sola cinepresa rimane comunque bidimensionale. Ciò può anche bastare ai fini analitici, finché il complesso di moto si evolve esclusivamente o quasi sui due piani registrati.

Nella maggior parte delle discipline atletiche l'analisi cinematica basata sulla registrazione bidimensionale del complesso di moto rimane però approssimativa. Con l'impiego di una seconda cinepresa, che registra in direzione perpendicolare rispetto alla prima, e con la stessa distanza dal centro geometrico del complesso di moto, si arriva ad una registrazione tridimensionale, se le due cineprese funzionano in perfetto sincronismo.

Tra gli altri metodi per il rilevamento dei dati cinematici figura soprattutto la cronociclofotografia. Il cinegramma delle sequenze filmate risulta dalla successione dei singoli fotogrammi. Il principio della cronociclofotografia consiste nella registrazione dell'andamento motorio sullo

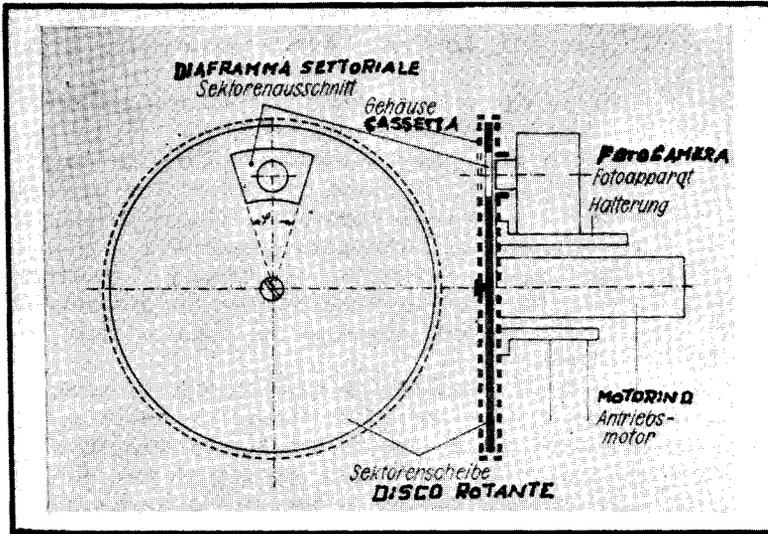


Fig. 1 - Schema funzionale di un impianto per la cronociclofotografia (Hochmuth).

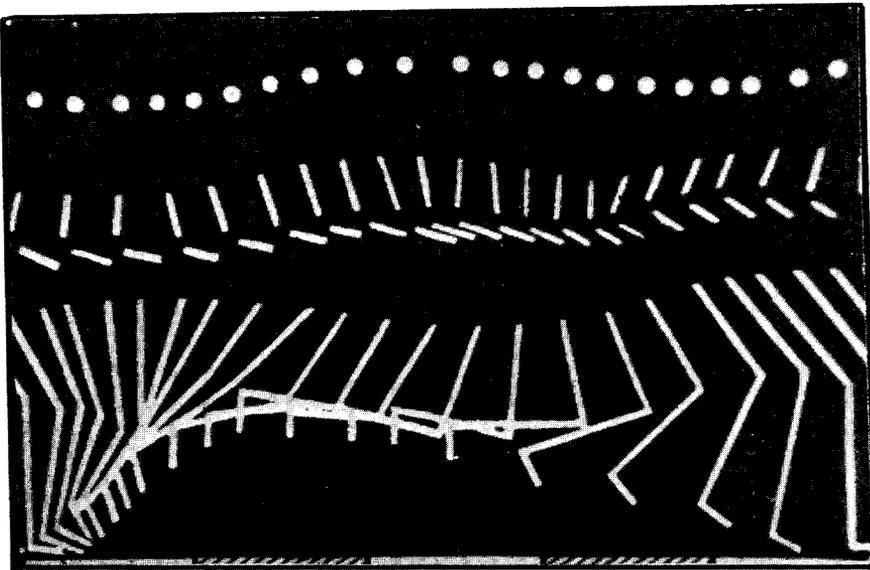


Fig. 2 - Cronociclogramma della corsa (secondo Marey).

stesso fotogramma tramite prese ad intervalli periodici fissi. Risulta così che un'unica fotografia contiene l'intero cinegramma, il cosiddetto cronociclogramma.

Due sono i sistemi principali che abitualmente si usano nella cronociclofotografia. Il primo è puramente meccanico (fig. 1). Un disco con un diaframma settoriale, che gira a velocità angolare costante, è montato davanti ad una fotocamera in modo che soltanto al passaggio del diaframma settoriale viene scoperta l'entrata ottica dell'obiettivo per la registrazione di un fotogramma. Durante la registrazione di un'intero cronociclogramma rimane aperto l'otturatore e bloccato il trasporto della pellicola nella fotocamera. Il tempo di esposizione del singolo fotogramma dipende quindi dalla velocità angolare del disco e dalla larghezza del diaframma settoriale.

La registrazione di un complesso di moto tramite la cronociclofotografia, evidentemente, si deve svolgere davanti un fondo assai scuro, con il soggetto in tenuta chiara. Oppure il soggetto, davanti allo stesso fondo scuro, si veste interamente in nero, ma con gli assi dei segmenti corporei verso la fotocamera marcati in bianco. Risulta da quest'ultimo metodo il tipo di cronociclogramma più conosciuto (fig. 2).

Nel secondo sistema la funzione del disco rotante con diaframma settoriale è assunta da un stroboscopio. Tramite i « flash » periodici, emessi dallo stroboscopio, si registrano le singole fasi dell'andamento del complesso di moto. L'ambiente rimane, secondo la potenza luminosa dello stroboscopio, più o meno oscurato, per registrare soltanto il soggetto in moto.

La cronociclofotografia è applicabile soltanto per la registrazione di complessi motori che si evolvono su due dei tre piani spaziali. Il cronociclogramma di un lancio del disco ad esempio, registrato lateralmente, sarebbe infatti poco informativo ai fini di un'analisi cinematica.

Metodi ausiliari per la rilevazione dei dati cinematici esistono in gran numero, servono però quasi esclusivamente per la rilevazione di dati isolati o particolari, come ad esempio la registrazione fotografica di tracce luminose, rappresentative della traiettoria approssimata del baricentro o di altri punti o segmenti corporei. Elencarli o spiegarli tutti andrebbe oltre i fini di questo articolo.

B. - La rilevazione di dati dinamici.

La dinamica descrive le interdipendenze tra forza e moto, basandosi sui quattro assiomi di Newton, dai quali derivano tutte le leggi della meccanica classica. Alle grandezze fisiche della dinamica, — forza, massa, quantità di moto ed impulso di forza —, sarà opportuno aggiungere le cosiddette grandezze ausiliari della meccanica, ossia lavoro, energia e potenza.

Quantità di moto ($m \cdot v$) ed impulso di forza $F (t_2 - t_1)$, quest'ultima come variazione della quantità di moto $[F (t_2 - t_1) = (v_2 - v_1)]$, sono di particolare importanza nella biomeccanica. Con i metodi dinamometrici si misura quindi sempre l'andamento della forza in funzione del tempo.

Dati dinamici relativi allo stato condizionale dell'atleta devono perciò consistere in informazioni sull'andamento della forza nell'atleta in fun-

zione del tempo durante l'esecuzione di un complesso di moto, che rappresenta parzialmente o integralmente quello caratteristico per la relativa disciplina atletica.

I dati rilevati devono essere significativi per le condizioni istantanee delle forze specifiche, determinanti le capacità qualitative dell'atleta nella sua disciplina. La scelta degli esercizi, tramite i quali si cerca di ottenere i dati più significativi, deve tener conto di queste premesse.

Si offrono almeno tre sistemi diversi, utilizzabili con metodi diretti di rilevazione dei dati dinamici:

- 1) - *il sistema dinamografico meccanico,*
- 2) - *il sistema estensimetrico,*
- 3) - *il sistema piezoelettrico.*

In tutti i tre si usufruisce del fatto che la resistenza del fondo nell'appoggio come forza F_r equivale alla forza muscolare F_m che agisce su di esso.

- 1) - *Il sistema dinamografico meccanico.*

Se una forza muscolare F_m agisce su un fondo elastico, questo si deforma secondo l'intensità e l'andamento della forza. I dinamografi più primitivi consistono infatti in una tavola di legno assai elastica come piattaforma, la cui deformazione durante l'impulso di forza si registra tramite un meccanismo scrivente direttamente accoppiato.

Di Abalakow ed altri si conoscono dei dinamografi meccanici più perfezionati, in cui, tramite l'applicazione di sistemi di leve, si riduce notevolmente l'entità necessaria di deformazione elastica della piattaforma, senza perdita di ampiezza nella registrazione (fig. 3).

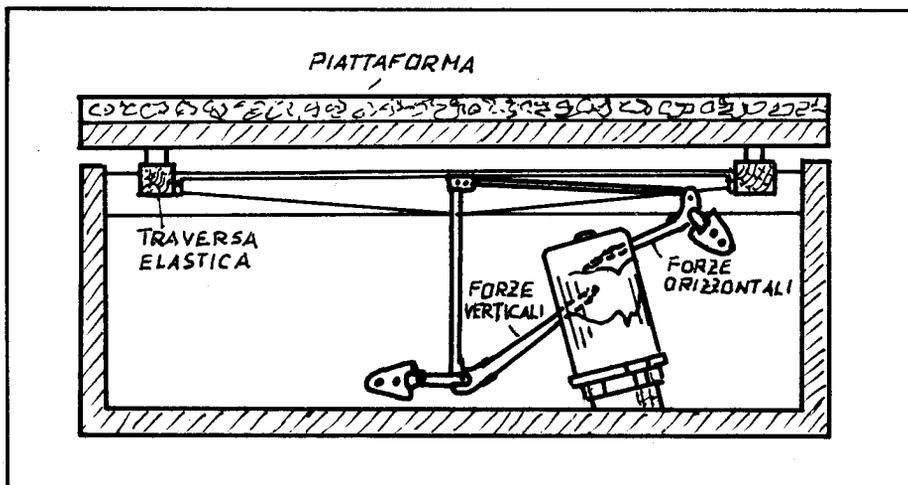


Fig. 3 - Dinamografo meccanico (Abalakow).

Tutti i sistemi dinamografici meccanici sono comunque assai problematici per diverse ragioni. La proporzionalità tra carica e registrazione è assicurata secondo la legge di Hook finché non avvengono deformazioni plastiche (rimanenti) del materiale elastico. Il momento d'inerzia e la risonanza propria della piattaforma elastica portano facilmente a distorsioni nella registrazione, e la sfasano. Anche diminuendo la massa della piattaforma, aumentando la frequenza della risonanza propria del meccanismo, variando la costante di elasticità ecc. si arriva al massimo ad un compromesso inadeguato alle moderne esigenze.

Una variante più moderna del dinamografo meccanico con l'utilizzazione di trasduttori induttivi come sensori di forza non ha mai avuto gran successo. Al meccanismo che scrive in via diretta le deformazioni della piattaforma, subentra un sistema induttivo, essenzialmente costituito da una bobina e da un nucleo magnetico che si può spostare in essa. La variazione del segnale elettrico sulla bobina è proporzionale allo spostamento del nucleo dovuto all'applicazione di una forza sulla piattaforma elastica. Bastano però spostamenti minimi del nucleo, perché le variazioni elettriche sono amplificabili. Diminuendo così notevolmente l'entità necessaria della deformazione elastica rimane lo stesso valida una parte della problematica caratteristica per i dinamografi meccanici.

2) - *Il sistema estensimetrico.*

L'estensimetro è uno dei primi sistemi dinamometrici applicati nella ricerca biomeccanica che si basa sulla trasformazione dell'effetto della forza in segnali elettrici. Elemento sensitivo è una resistenza elettrica, incollata o fotoincisa su un supporto di resina epossidica. Il valore della resistenza varia se la sua lunghezza subisce delle variazioni con un fattore di proporzionalità di 2; cioè ad una variazione di lunghezza del fattore 10^{-3} consegue una variazione della resistenza del fattore $2 \cdot 10^{-3}$.

La resistenza ha una forma meandrica per moltiplicare l'effetto estensivo o compressivo di una deformazione sul valore assoluto della resistenza (fig. 3).

La resistenza estensimetrica viene incollata sulla superficie del materiale di cui si vuole misurare la deformazione, con un collante molto duro per garantire il contatto meccanico sicuro tra resistenza e materiale.

Al contrario del dinamografo meccanico già una deformazione minima provoca un segnale elettrico amplificabile. Dall'applicazione dell'estensimetro ad una piattaforma piuttosto rigida, la cui deformazione non superi i limiti d'elasticità della resistenza, possono risultare segnali elettrici proporzionali all'andamento dell'impulso di forza, senza che l'atleta risenta minimamente della deformazione nell'appoggio.

La resistenza estensimetrica ha un coefficiente di temperatura (negativo) non trascurabile. Le variazioni dovute a variazioni della temperatura sono dello stesso ordine di grandezza delle variazioni dovute ad estensioni o compressioni. Ciò obbliga ad utilizzare circuiti compensatori, esponendo ad esempio una seconda resistenza estensimetrica alla temperatura ambientale della prima, senza che essa però subisca

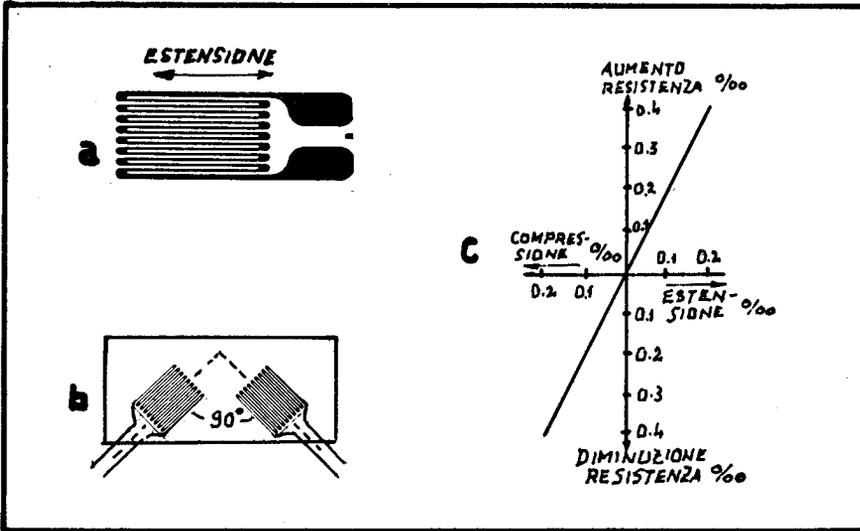


Fig. 4 - La resistenza estensimetrica.
 a - La resistenza fotoincisa su resina epossidica (SHINKOH).
 b - Due resistenze a 90° per misurazioni estensimetriche bidirezionali.
 c - La variazione del valore della resistenza in funzione della estensione (o compressione) meccanica.

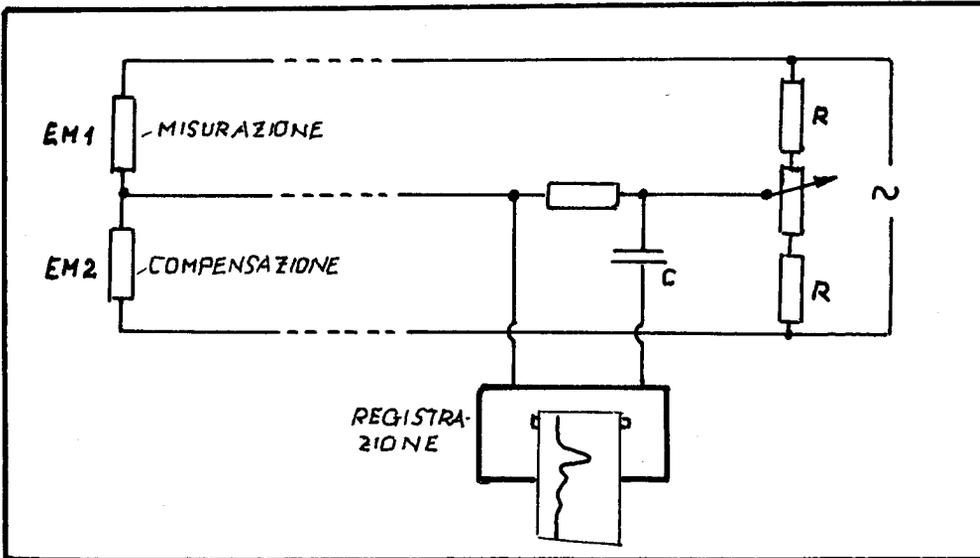


Fig. 5 - Circuito basilare estensimetrico con la compensazione del coefficiente di temperatura della resistenza di misurazione EM1 tramite la resistenza di compensazione EM2.
 EM2, identica a EM1, è esposta alle stesse condizioni ambientali di EM1, senza però subire alcun effetto meccanico.

alcuna deformazione. Un esempio semplificato viene riportato nella figura 5.

La resistenza estensimetrica viene sempre inserita in un circuito detto « ponte di Wheatstone », alimentato generalmente con una corrente alternata di media frequenza per ragioni di stabilità elettrica dell'amplificatore collegato all'uscita del ponte.

L'ultima novità in campo estensimetrico sono i trasduttori in cui l'elemento sensibile è piezoresistivo. Mentre le resistenze estensimetriche normali (metalliche) hanno un fattore di proporzionalità di 2, il fattore analogo nei trasduttori piezoresistivi può raggiungere valori fino a 140.

Applicato in modo adeguato, ossia con un ponte estensimetrico per ognuna delle 3 direzioni spaziali, si arriva senz'altro ad un impianto dinamometrico utilizzabile per la rilevazione di un campo di dati già molto interessante ed informativo anche ai fini dell'analisi dinamica. Il vantaggio in confronto al dinamometro meccanico è indiscutibile.

3 - Il sistema piezoelettrico.

Per la misurazione della forza ed il suo andamento in funzione del tempo si utilizza l'effetto piezoelettrico del quarzo le cui caratteristiche rimangono pressoché invariate con la temperatura (da -200 a $+450^{\circ}$ C), con l'invecchiamento e sotto l'azione prolungata di sollecitazioni meccaniche.

L'effetto piezoelettrico consiste nel fatto che alle superfici opposte di certi cristalli si formano delle cariche elettriche, se vengono sottoposte a forze. Le cariche elettriche risultanti sono proporzionali alle forze applicate e vengono trasformate in tensioni elettriche proporzionali tramite gli « amplificatori di carica ».

Il cristallo di quarzo, opportunamente sagomato, quando viene sottoposto ad una forza, non subisce deformazioni geometriche apprezzabili (alcuni μm al massimo) e fornisce sufficienti segnali elettrici anche per deboli sollecitazioni. Ne deriva un'ottima linearità ed un campo di misura di ampiezza almeno triplo rispetto a quella di trasduttori estensimetrici normali.

Sono misurabili forze quasi statiche e dinamiche da qualche Millinewton ad un Meganewton. La risoluzione raggiunge valori dell'ordine da 10^{-5} a 10^{-8} . I sensori di forza a cristallo di quarzo sono molto rigidi, hanno una frequenza propria alta e sono inoltre senza istéresi. Al momento attuale, nella rilevazione delle variazioni rapide di forza, accelerazione, pressione ecc. sono senza equivalenti.

Esistono ormai degli elementi piezoelettrici combinati per la misura di forza in 3 componenti ortogonali più una componente torsionale, montati in una piattaforma con superficie di 40 per 60 cm, denominate « pedane piezoelettriche » (fig. 6).

C. - Sistemi ausiliari per la rilevazione di dati dinamici.

Impianti dinamometrici di alta precisione e rendimento informativo, come ad esempio la pedana piezoelettrica, richiedono degli investimenti

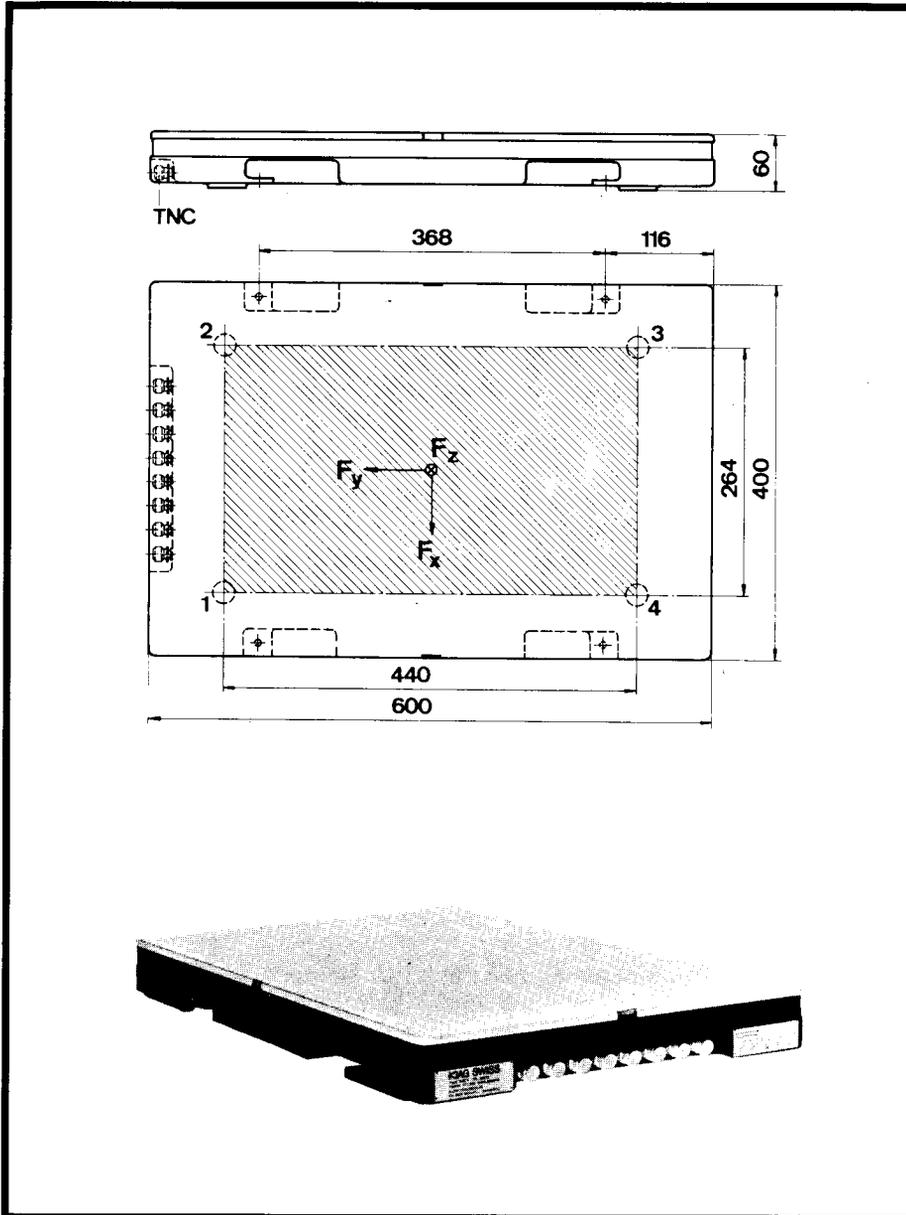


Fig. 6 - Pedana piezoelettrica (KISTLER, tipo 9261 a).
Caratteristiche tecniche:

Campo di misura F_x, F_y	± 5000 N
Campo di misura F_z	$0 \dots 10000$ N
Forza minima misurabile	$5 \cdot 10^{-2}$ N
Linearità (per l'intero campo)	$\leq \pm 1\%$
Istéresi (per l'intero campo)	$\leq 0,5\%$

non indifferenti. L'acquisto rimane perciò praticamente riservato ad istituzioni di ricerca sportiva, biomedica ecc. o, caso mai, alle federazioni sportive. Per loro però sono indispensabili per non rimanere con una base informativa alquanto rudimentale che non permetterebbe una vera ottimalizzazione dei programmi preparativi, almeno per gli atleti di interesse nazionale.

Sempre basandosi sul principio di uno dei tre sistemi dinamometrici fondamentali esistono delle attrezzature variatissime per la rilevazione di dati dinamici particolari. Oggigiorno si è in grado di rilevare dati sulle caratteristiche di quasi tutti i gruppi muscolari del corpo umano. E' impossibile entrare in dettagli relativi nel quadro di questo articolo.

Dove non esistono impianti dinamometrici, si cerca di arrivare ad informazioni relative alle condizioni istantanee degli atleti tramite metodi « indiretti ».

Un metodo indiretto assai complicato, dispendioso e costoso che richiede perfino l'impiego di un computer consiste nell'elaborazione di cronociclogrammi di alta precisione sotto l'aspetto della dinamica. Sarà comunque difficile l'analisi dinamica, perché le uniche masse precisamente determinabili sono quella corporea dell'atleta e quella dell'attrezzo, mentre le masse parziali — ossia quelle dei diversi segmenti corporei — rimangono ignote. Esse sono al massimo stimabili approssimativamente, mentre il loro moto — per la maggior parte di carattere rotativo — è assai facilmente determinabile.

Il metodo è perciò più che altro adeguato alle esigenze dell'analisi cinematica e tecnica-stilistica. In fig. 7 viene riportato il cronociclogramma come base per l'analisi complessiva di un lancio del giavellotto, realizzato da Ariel.

Nella maggior parte dei casi si ricorre ai metodi indiretti semplici, per non dire primitivi, perché nell'impossibilità di misurare effetto ed andamento della forza con metodi e sistemi dinamometrici, si misurano i risultati (generalmente) metrici di esercizi indicativi per le condizioni istantanee specifiche dell'atleta.

C'è una certa divergenza nei pareri degli esperti relativa al valore indicativo di certi esercizi e del loro risultato che rimane pur sempre inutilizzabile ai fini di una analisi dinamica, anche se consegue da un esercizio inconfutabilmente indicativo.

Il complesso motorio dell'esercizio appare nel risultato metrico come blocco anonimo ed irrisolvibile. Dati essenziali relativi all'andamento della forza e delle componenti direzionali di essa in funzione del tempo, il quoziente (\times) impulso frenante/impulso acceleratore ed il quoziente differenziale $\delta F / \delta t$ di alcune fasi importanti dell'impulso di forza rimangono assolutamente ignoti.

Se l'esercizio è indicativo nel senso che la significanza correlativa del suo risultato per lo stato condizionale di determinati gruppi muscolari e motori è statisticamente provata, non si potrà negare la sua validità entro limiti logici. Il valore informativo può anche essere considerato accettabile nell'ambito di certi test condizionali, tenendo conto però della sua globalità.

L'informazione è relativa al complesso e non alle singole componenti del complesso motorio. Altrimenti detto, il risultato rispecchia soltanto lo stato condizionale di un insieme di componenti senza indicare minimamente la loro composizione che può divergere sensibilmente.

Anche conclusioni corrette secondo la significanza correlativa del risultato possono contenere degli errori relativi alle singole componenti dello stato condizionale. Può facilmente accadere che si programmi l'allenamento in modo sbagliato, pur avendo interpretato correttamente il significato globale del risultato.

D. - Aspetti pratici

La scelta dei metodi e sistemi per la rilevazione di dati cinematici e dinamici dipende dalle esigenze informative ed — evidentemente — dalle attrezzature disponibili.

Le esigenze informative per l'analisi complessiva delle condizioni istantanee di un atleta ai fini di una programmazione ottimale del suo allenamento divergono molto secondo il livello delle capacità qualitative dell'atleta stesso. Sotto questo aspetto si possono classificare gli atleti in tre categorie:

- a - principianti e giovanissimi;
- b - atleti attivi fino al livello regionale;
- c - atleti di interesse nazionale ed internazionale.

Nella categoria a, e fino ad un certo punto anche nella categoria b, valgono ancora gli schemi tecnico-stilistici generali. Con la progressione delle capacità qualitative degli atleti della categoria b diventano di più in più codeterminanti fattori individuali. Nella categoria c tutti gli schemi tecnico-stilistici generali si applicano secondo la loro compatibilità con le caratteristiche individuali degli atleti.

Le esigenze informative nelle tre categorie si possono perciò descrivere come segue:

Categoria a:

Trattandosi di principianti e giovanissimi in fase di avviamento all'attività sportiva, la preparazione fisica generale e l'apprendimento dei meccanismi di moto generali e specifici saranno predominanti.

Le esigenze informative si concentrano in linea di massima su due punti: l'idoneità generale e, data questa, i progressi fondamentali, il cui andamento permetterà in una seconda fase delle conclusioni sulla idoneità specifica dell'atleta alle diverse discipline atletiche.

Le informazioni risultanti da esercizi indicativi basteranno senz'altro per il controllo della progressione della forma generale e delle qualità atletiche in questa categoria. La globalità delle informazioni influisce ancora poco sulla validità dell'allenamento, visto che anche questo si basa ancora su schemi assai generalizzati.

Categoria b:

Inclusa una vasta gamma di atleti di qualità assai diversa, dai « promossi » della categoria a ai candidati per la categoria c, i metodi applicati per la rilevazione dei dati saranno differenziati secondo le varie esigenze.

Vale comunque per l'intera categoria, che agli esercizi indicativi, che già saranno più specifici di quelli della categoria a, si dovrebbe aggiungere una registrazione cinematografica almeno del complesso di moto specifico della relativa disciplina atletica. Basterà un'analisi cinematica assai approssimativa e basata sugli schemi tecnico-stilistici generali. Per questo anche cinegrammi registrati con cineprese semplici e non tanto precise possono soddisfare le esigenze informative; basta saper impiegare la cinepresa in modo giusto e corretto.

L'importanza delle informazioni relative alle caratteristiche individuali sarà più o meno proporzionale alle capacità qualitative dell'atleta e alla loro progressione.

Mentre il complesso di informazioni sopraindicato per i « promossi » della categoria a può essere considerato largamente sufficiente; non può più soddisfare le esigenze informative relative allo stato condizionale dei candidati per la categoria c.

Per loro infatti si dovrebbero già applicare metodi dinamometrici o almeno, se tali non saranno applicabili per mancanza di apparecchiature, variare gli esercizi indicativi in modo che essi corrispondano a quelli usuali nella categoria superiore.

Categoria c:

Nelle competizioni a livello internazionale gli ultimi decisivi centimetri o centesimi di secondo sono spesso dovuti allo sfruttamento ottimale delle caratteristiche complessive individuali dell'atleta nel quadro dello schema tecnico-stilistico generale e non all'osservazione esatta dello schema stesso.

E' perciò di estrema importanza nella categoria c il controllo delle caratteristiche individuali degli atleti. L'ottimalizzazione delle loro capacità qualitative richiede una conoscenza profonda di tutte le componenti delle condizioni istantanee. La rilevazione dei dati dinamici, oltre a quelli cinematici, diventa indispensabile. E qui i metodi ausiliari non possono più soddisfare le esigenze informative.

Ma non è tutto: oltre ai dati cinematici e dinamici il quadro deve essere completato da altri dati: biologici, fisiologici ecc., che costituiranno la base informativa da interpretare, elaborare e trasformare poi in programmi di allenamento.

Certamente: il tempo del « grossomodismo » nello sport ad alto livello è definitivamente tramontato.