

ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

ISSN / 1120 - 5571

Dipartimento Innovazione



IT9700474

ELASTOMERI PROPRIETÀ TERMODINAMICHE ED EFFETTO TERMOELASTICO DI UNA STRUTTURA COMPLESSA

Teoria e prove termovisive sperimentali
per una analisi di fattibilità

M. FABBRI, A. SACRIPANTI

ENEA - Centro Ricerche Casaccia, Roma

RT/INN/96/12



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Dipartimento Innovazione

ELASTOMERI PROPRIETÀ TERMODINAMICHE ED EFFETTO TERMOELASTICO DI UNA STRUTTURA COMPLESSA

Teoria e prove termovisive sperimentali
per una analisi di fattibilità

M. FABBRI, A. SACRIPANTI

ENEA - Centro Ricerche Casaccia, Roma

RT/INN/96/12

Testo pervenuto nel settembre 1996

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

Riassunto

L'analisi quali-quantitativa delle proprietà termodinamiche e dell'effetto termoelastico (o elastocalorico) di una struttura macroscopica complessa (prodotto industriale finito) viene effettuata con l'utilizzo di una termocamera all'infrarosso allo scopo di svolgere un'analisi di fattibilità relativa ad un progetto di ricerca industriale.

Abstract

Gross quali-quantitative analysis about thermodynamical properties and thermoelastic coupling (or elastocaloric effect) of complex macroscopic structures (running shoes) is performed by infrared camera.

The experimental results showed the achievability of an industrial research project.

INDICE

- 1. Introduzione**
- 2. Verifica teorica dell'ipotesi di lavoro**
- 3. Elaborazioni sperimentali e risultati**
 - 3.1 Compressione ed effetto elastocalorico**
 - 3.2 Calcolo approssimativo del coefficiente di conduttività termica**
 - 3.3 Calcolo del coefficiente di conduttività termica in condizioni di stiramento**
 - 3.4 Individuazione delle eventuali microfratture presenti**
- 4. Conclusioni**
- 5. Appendice : Sistema sperimentale di rilevamento termografico**
- 6. Bibliografia**

1.0) Introduzione

Lo scopo di questo lavoro era quello di comprendere se le dimensioni del processo che si manifesta in un elastomero sottoposto a deformazione elastica con la conseguente instabilità termoelastica associata fossero facilmente osservabili e che tipo di andamento sperimentale presentassero.

Il calcolo del coefficiente di conduttività termica di una parte di un prodotto industriale finito (suola di una scarpa da ginnastica), in due condizioni sperimentali diverse, connesso con il calcolo teorico della “zona di record” ottenibile mediante un opportuno irrigidimento della suola, hanno completato il set di rilievi teorico-sperimentali effettuati, convalidando l’ipotesi di fattibilità relativa ad un progetto di ricerca industriale.

Si rimane volutamente nel vago, sull’argomento, per salvaguardare eventuali proprietà intellettuali, brevetti e progettazioni riservate.

2.0) Verifica teorica dell'ipotesi di lavoro

Il comportamento di un uomo durante la locomozione è regolato ovviamente dai muscoli che presentano una chiara struttura di solido "soffice" ovvero viscoelastico.

Poichè il comportamento reologico complesso di un corpo viscoelastico è difficile da visualizzare è spesso ricorrente l'uso di modelli meccanici per poterli concettualmente rappresentare.

In tali modelli la risposta viscosa allo sforzo applicato si assume che sia quella di un fluido Newtoniano, ed è rappresentata da un ammortizzatore, cioè un pistone che si muove in un cilindro pieno di liquido Newtoniano.

La risposta elastica è rappresentata da un solido Hookeano, cioè una molla. L'ammortizzatore rappresenta la dissipazione dell'energia sotto forma di calore, la molla rappresenta il modo di conservare e restituire l'energia da parte del sistema.

Il comportamento del corpo come insieme di muscoli e quindi come sistema viscoso è rappresentato approssimativamente da una combinazione di molle ed ammortizzatori (in serie o in parallelo: in parallelo se gli stress sono additivi o in serie se le deformazioni sono additive).

In letteratura sono stati proposti molti modelli come quelli di Maxwell, Weichert, Kelvin, Becker, Burgers, ecc. (fig. 1).

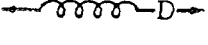
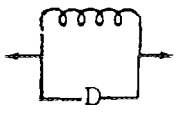
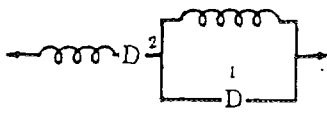
	Maxwell series	Kelvin parallel	Burgers series (2) and parallel (1)
			
Operation			
extension	$\gamma = \tau/G + \tau t/\eta$	$\gamma = (\tau/G) \times (1 - e^{-t/(\eta/G)})$	$\gamma = \tau/G_2 + \tau t/\eta_2 + \tau/G_1(1 - e^{-tG_1/\eta_1})$
held at constant strain, γ_0	$\tau = \gamma_0 G e^{-t/(\eta/G)}$	$\tau = \gamma_0 G = \text{constant}$	$\tau = \gamma_0 G_2 e^{-tG_2/\eta_2} + \tau_0 G_1$
release of stress τ_0 at time θ	$\tau_0 \gamma = \tau_0 t/\eta = \text{constant}$	$\gamma = (\tau_0/G) e^{-t/(\eta/G)}$	$\gamma = \tau_0 t/\eta_2 + (\tau_0/G_1) e^{-tG_1/\eta_1}$
sinusoidal oscillation			
elastic component	$\eta''(\omega) = G\omega(\eta/G)^2/(1 + \omega^2(\eta/G)^2)$	$\eta''(\omega) = G/\omega$	$\eta''(\omega) = \frac{\eta_2^2/G_2}{1 + \omega^2\eta_2^2/G_2^2} + G_1/\omega$
viscous component	$\eta'(\omega) = \eta/(1 + \omega^2(\eta/G)^2)$	$\eta'(\omega) = \eta$	$\eta'(\omega) = \frac{\eta_2}{1 + \omega^2\eta_2^2/G_2^2} + \eta_1$
phase angle	$\delta = \arctan(1/\omega(\eta/G))$	$\delta = \arctan \omega(\eta/G)$	$\delta = \arctan \eta'/\eta''$

Fig. 1 - Equation for Selected Mechanical Models.

Per la nostra analisi di fattibilità si può sviluppare il modello di fig.2 sulla base di quello di Voigt-Maxwell.

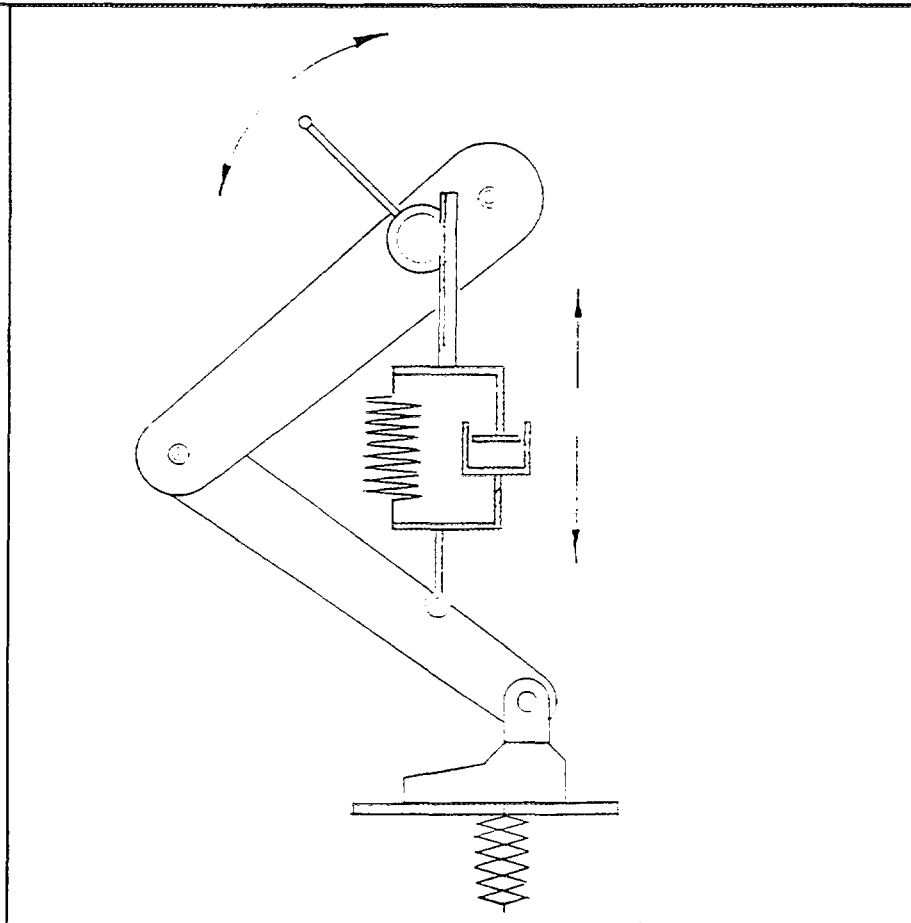
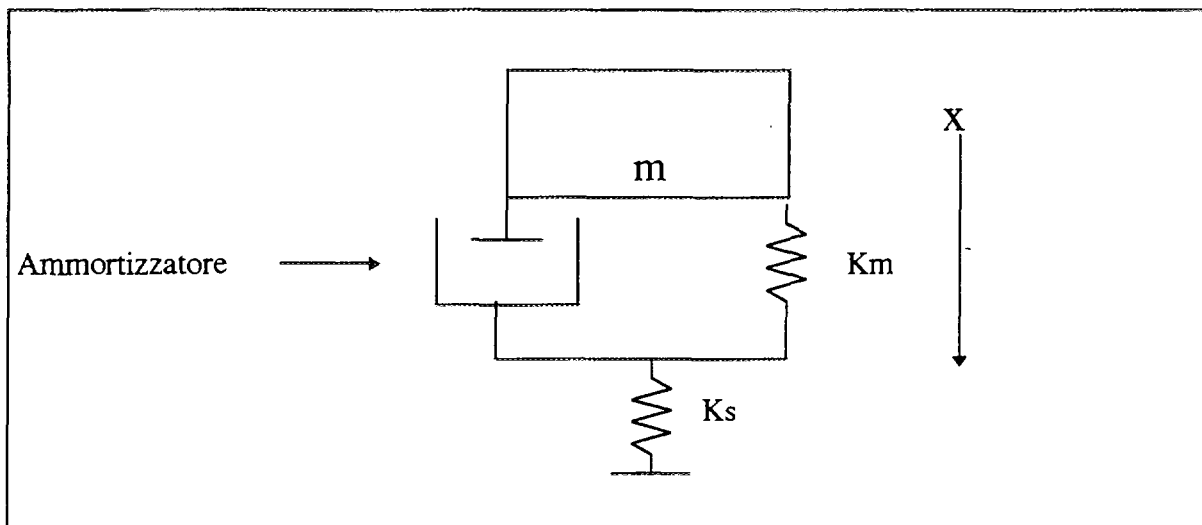


Fig. 2

La condizione statica di equilibrio alla suola è

$$b \frac{dx}{dt} + K_m x - K_s x_s = 0 \quad 1)$$

ovvero

$$b (\ddot{x}_m - \ddot{x}_s) + K_m (x_m - x_s) = K_s x_s \quad 2)$$

L'equazione del moto nel campo gravitazionale considerando $g = \text{cost}$ è

$$m \frac{dv}{dt} + mg + K_s x_s = 0 \quad 3)$$

ovvero

$$M \ddot{x}_m = -K_s x_s - mg = -b (\dot{x}_m - \dot{x}_s) - K_m (x_m - x_s) - mg$$

Se le soluzioni generali sono della forma

$$x_m = e^{i\omega t} \quad x_s = A e^{i\omega t} \quad \text{con } A \text{ e } \omega \text{ complessi si può scrivere}$$

$$ib\omega (1 - A) + K_m (1 - A) - K_s A = 0 \quad 4)$$

$$ib\omega (1 - A) + K_m (1 - A) + mge^{-i\omega t} - m\omega^2 = 0 \quad 5)$$

per semplificare essendo $mg = \text{cost}$ introduciamo la costante K_{sol} $x_s = K_s x_s - mg$ sotto la pressione costante la reazione della scarpa (K_s) raggiunge un nuovo punto d'equilibrio per cui basta sostituire la nuova costante per annullare il contributo di g

Pertanto potremo scrivere in forma semplificata :

$$(1 - A) ib\omega + K_m (1 - A) - K_{sol} A = 0 \quad 6)$$

$$(1 - A) ib\omega + K_m (1 - A) - m\omega^2 = 0 \quad 7)$$

Sottraendo i due membri si ha $A = \frac{m\omega^2}{K_{sol}}$ e sostituendo nell'equazione si ha

$$ib\omega \left(1 - \frac{m\omega^2}{K_{sol}}\right) + K_m \left(1 - \frac{m\omega^2}{K_{sol}}\right) - m\omega^2 = 0 \quad 8)$$

L'equazione generale è

$$ibm\omega^3 + m(Km + K_{sol})\omega^2 - iK_{sol}b\omega - K_{sol}Km = 0 \quad 9)$$

D) CASI LIMITE :

1) Se si ipotizza assenza di ammortizzazione $b = 0$ si ha :

$$\omega^2 = \frac{Km K_{sol}}{m(Km + K_{sol})}$$

2) Se la scarpa ha coefficiente di restituzione $\varepsilon \rightarrow 1$ allora $K_{sol} \rightarrow \infty$ e si ha

$$ib\omega + Km - m\omega^2 = 0 \quad \text{posto} \quad \xi = \frac{b}{\sqrt{m Km}} \quad \text{si ha}$$

$$\omega = \frac{ib \pm \sqrt{b^2 - 4m Km}}{2m}$$

pertanto
$$\omega^2 = \frac{Km}{m}(1 - \xi^2)$$

II) RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

sostituendo $\omega_c = \omega + \frac{i}{3}\left(\frac{Km + K_{sol}}{b}\right)$ nell'equazione (9) si ottiene un'equazione in cui manca il termine quadratico

$$\omega_c^3 + \left[\frac{1}{3}\left(\frac{Km + K_{sol}}{b}\right)^2 - \frac{K_{sol}}{m} \right] \omega_c + \frac{4i}{27}\left(\frac{Km + K_{sol}}{b}\right)^3 - \left(\frac{iK_{sol}}{3mb}\right)(K_{sol} - 2Km) = 0 \quad 10)$$

Sostituendo nell'equazione (10)

ω con il tempo di contatto ad essa legato dalla relazione $t_c = \frac{\pi}{\omega_c}$ si ottiene una forma

dell'equazione (10) direttamente collegabile con i dati sperimentali.

Il grafico dell'equazione (10) permette di visualizzare in modo immediato le risultanze dell'ipotesi iniziale.

Per sottolineare l'importanza ed il "peso" che l'irrigidimento differenziale della suola può avere nel campo delle performances sportive è preferibile graficare la parte reale dell'equazione (10) in funzione di due opportune variabili adimensionali:

t / t_0 = tempo di contatto, normalizzato al tempo di contatto relativo ad una suola rigida t_0
(coefficiente di restituzione $\epsilon \rightarrow 1$)

K_{sol} / K_m = costante elastica della suola K_{sol} normalizzata alla costante elastica muscolare globale K_m .

L'andamento del grafico della parte reale dell'equazione (10) in funzione di queste nuove coordinate è mostrato in fig3.

La curva di fig. 3 ottenuta da Mac Mahon per ricerche connesse alle piste d'atletica, può essere comodamente usata per i nostri scopi tesi a valutare la bontà dell'ipotesi iniziale, l'area tratteggiata sottesa indica il range di possibilità migliorativa della suola per ottenere incrementi nelle performances dei runners.

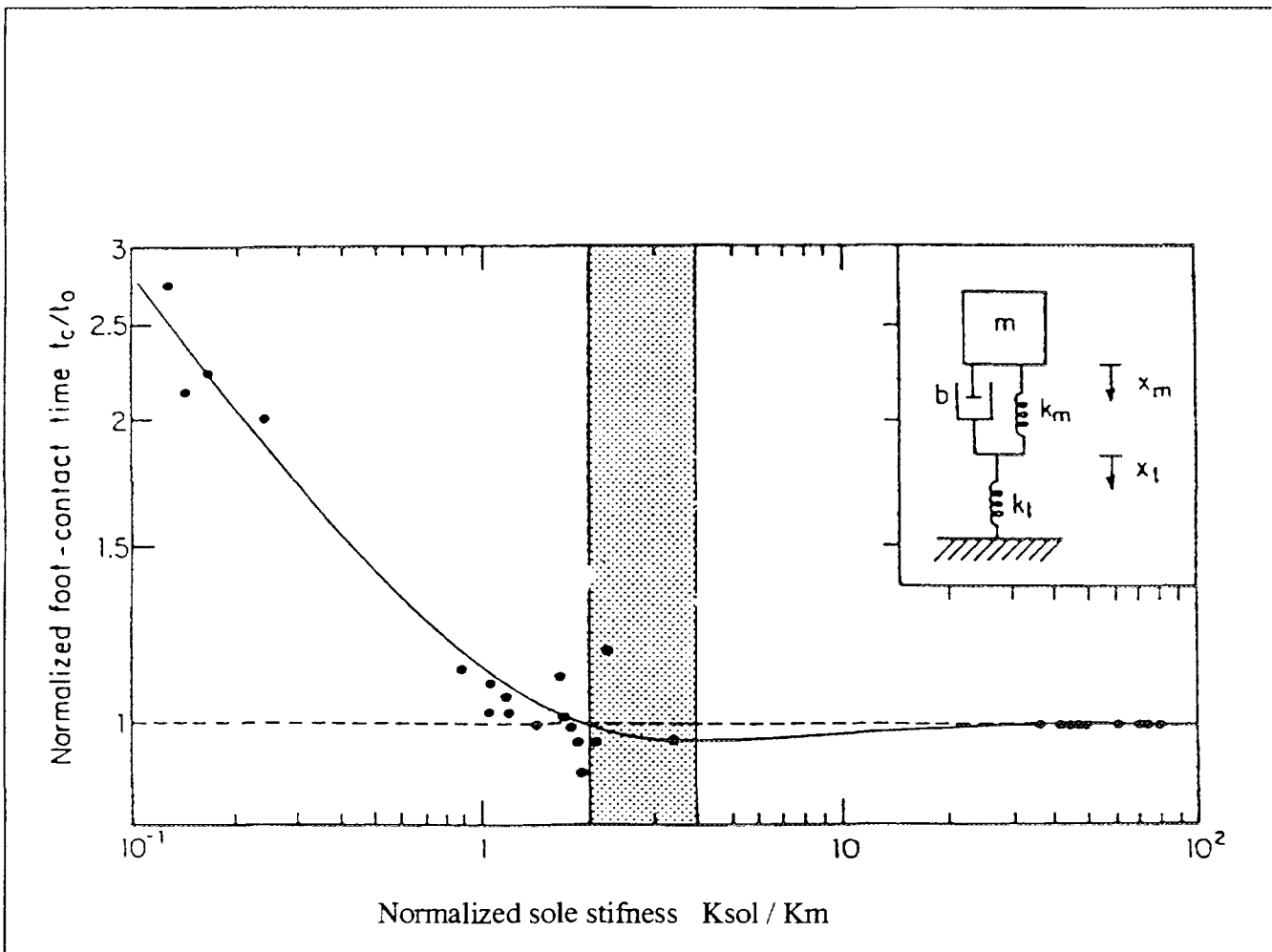


Fig.3

Elaborazioni sperimentali effettuate e risultati.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

3.0) Elaborazioni sperimentali e prove

Per testare la fattibilità di poter ottenere informazioni relative al coefficiente di restituzione globale della "struttura complessa" e ad alcune proprietà termodinamiche, sono state eseguite delle prove sperimentali presso il C.R. Casaccia dell'E.N.E.A., laboratorio **Analisi Non Distruttive** del Dipartimento I.N.N. -T.E.C. con l'ausilio di una termocamera a termovisione (vedi appendice), tese a valutare sia l'ipotesi di fattibilità delle analisi, sia la loro potenziale affidabilità.

I risultati delle variazioni termiche registrati su videotape, sono state elaborate in tempo reale. Nella tabella 1 vengono mostrate le prove registrate, il tempo di durata della registrazione ed il numero della figura relativa alla prova.

Sequenza Video - Tape.	Time	Termgrafia
Salti	0'. 50"	1
Passeggiata	0'. 33"	2
Compressione	1'. 30"	3
Conduzione	5'. 20"	4
Stiramento	5'. 05"	5
Microfatture	5'. 35"	6

Tab 1 Prove sperimentali, tempi, figure relative.

Si auspica che i risultati indicativi di queste esperienze fornissero indicazioni valide sulle possibilità di effettuare in seguito ricerche quantitative, metodologicamente meno approssimate, in modo da soddisfare un'ipotesi di contratto di ricerca proposto all'ENEA INN.

La tabella 2 mostra i dati bibliografici usati per le valutazioni che vengono presentate nelle pagine successive.

Peso specifico	0.92 - 0.96	
Densità	946	Kg/m ³
Coef. dilatazione lineare	0.428	1/°K
Calore specifico	1589.92	J/°K Kg

Tab 2 Gomma : caratterizzazione termodinamica di bibliografia

L'ipotesi di base era quella di utilizzare l'effetto elastocalorico per ottenere dati relativi al coefficiente globale di restituzione e valutare l'ordine di grandezza del coefficiente di conduttività termica della struttura, importante per analizzare le condizioni di termocondizionamento del sistema.

Bisogna anticipare relativamente a quest'ultimo dato che, a valle delle esperienze iniziali di conduttività, si è proceduto all'apertura della suola che mostrava una struttura composta complessa, formata da due strati di gomma piena intervallati da una struttura a nido d'ape preticamente piena d'aria.

Pertanto il relativo coefficiente di conduttività termica doveva risultare funzione dei coefficienti delle singole parti.

L'indicatività usate nelle esperienze permettevano di considerare la struttura complessa "suola", in prima approssimazione omogenea con un coefficiente di conduttività totale combinazione lineare dei coefficienti relativi alle singole parti.



Termografia n. 1



Termografia n. 2



Termografia n. 3



Termografia n. 4



Termografia n. 5



Termografia n.6

3.1 Compressione ed effetto elastocalorico

La suola della scarpa da ginnastica è stata sottoposta ad una compressione prima con una martellata, e successivamente con cinque martellate, l'idea base era quella di verificare almeno grossolanamente in prima approssimazione, l'eventuale sommabilità del processo di compressione come risposta termica della gomma.

Ovviamente i dati numerici ottenuti sono del tutto indicativi non avendo effettuato esperienze in condizioni standard di riproducibilità, ma il risultato ottenuto può essere considerato indicativo della bontà dell'ipotesi operativa.

Il processo elastocalorico permette di valutare la variazione di temperatura prodotta da una compressione, le valutazioni numeriche sono ovviamente puntuali, ma dal video-tape si vede la situazione areale che può, ovviamente, divenire input del codice strutturale.

In fig. 4 sono riportate le variazioni di temperature in un punto della suola in funzione del tempo, risulta facile osservare che la risposta termica del processo di compressione è sicuramente sommabile, ovvero direttamente proporzionale all'intensità dello stress a cui è sottoposta la suola.

Durante una trasformazione adiabatica il processo elastocalorico produce a valle di una forza di compressione F una variazione di temperatura.

$$(T - T_0) = \int \left(\frac{\partial T}{\partial F} \right)_{s,p} dF \quad (11)$$

per calcolare la variazione di temperatura dovuta alla forza di compressione si usa l'uguaglianza di Maxwell

$$\left(\frac{\partial T}{\partial F} \right)_{s,p} = - \left(\frac{\partial L}{\partial S} \right)_{F,p} \quad (12)$$

Il secondo membro della (12) può essere trasformato in

$$\left(\frac{\partial L}{\partial S} \right)_{F,p} = \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_{F,p} \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_{F,p} \quad (13)$$

ma ricordando che

$$\left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_{F,p} = \frac{T}{C_{F,p} \rho V} \quad (14)$$

con ρ = densità della gomma, e che il coefficiente di dilatazione termica lineare è definito da

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p \quad (15)$$

si ha sostituendo per la (13) la (14) e la (15) nella (11)

$$(T - T_0) = - \int \frac{\alpha L T}{C_p \rho V} dF \quad \text{se } (T - T_0) \text{ è piccolo si ha} \quad (16)$$

$$(T - T_0) = -\frac{\alpha T_0 F}{C_p \rho V} \quad 17)$$

nel caso sperimentale in cui $(T - T_0) > 1$ vale la relazione

$$T = T_0 \exp\left(-\frac{\alpha F}{C_p \rho}\right)$$

sviluppando in serie

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots \quad \text{si ha}$$

$$T = T_0 - \frac{\alpha T_0 F}{C_p \rho} + \frac{T_0}{2!} \left(\frac{\alpha F}{C_p \rho}\right)^2 - \frac{T_0}{3!} \left(\frac{\alpha F}{C_p \rho}\right)^3$$

troncando lo sviluppo al secondo termine otteniamo la relazione di nostro interesse.

$$(T - T_0) = -\frac{\alpha T_0 F}{C_p \rho} \quad 18)$$

in fig 4 è mostrato l'innalzamento sperimentale di temperatura dovuto alle compressioni nel tempo.

Al primo picco corrisponde una compressione al secondo cinque compressioni, sebbene il tempo intercorso tra la prima prova e la seconda non sia stato tale da ricondurre il "sistema" allo stato termico iniziale, dalla figura si evince facilmente con il conforto delle valutazioni numeriche, che il processo è in buona approssimazione lineare.

Ora ricordando che la forza F ricavata è una compressione, quindi una forza areale e che il martello usato presenta una superficie d'impatto di $\sim 10 \text{ cm}^2$ si ricava in corrispondenza dei due picchi il valore numerico delle forze.

$$F_1 \cong 12.2 \text{ N} \quad F_5 \cong 43.7 \text{ N}$$

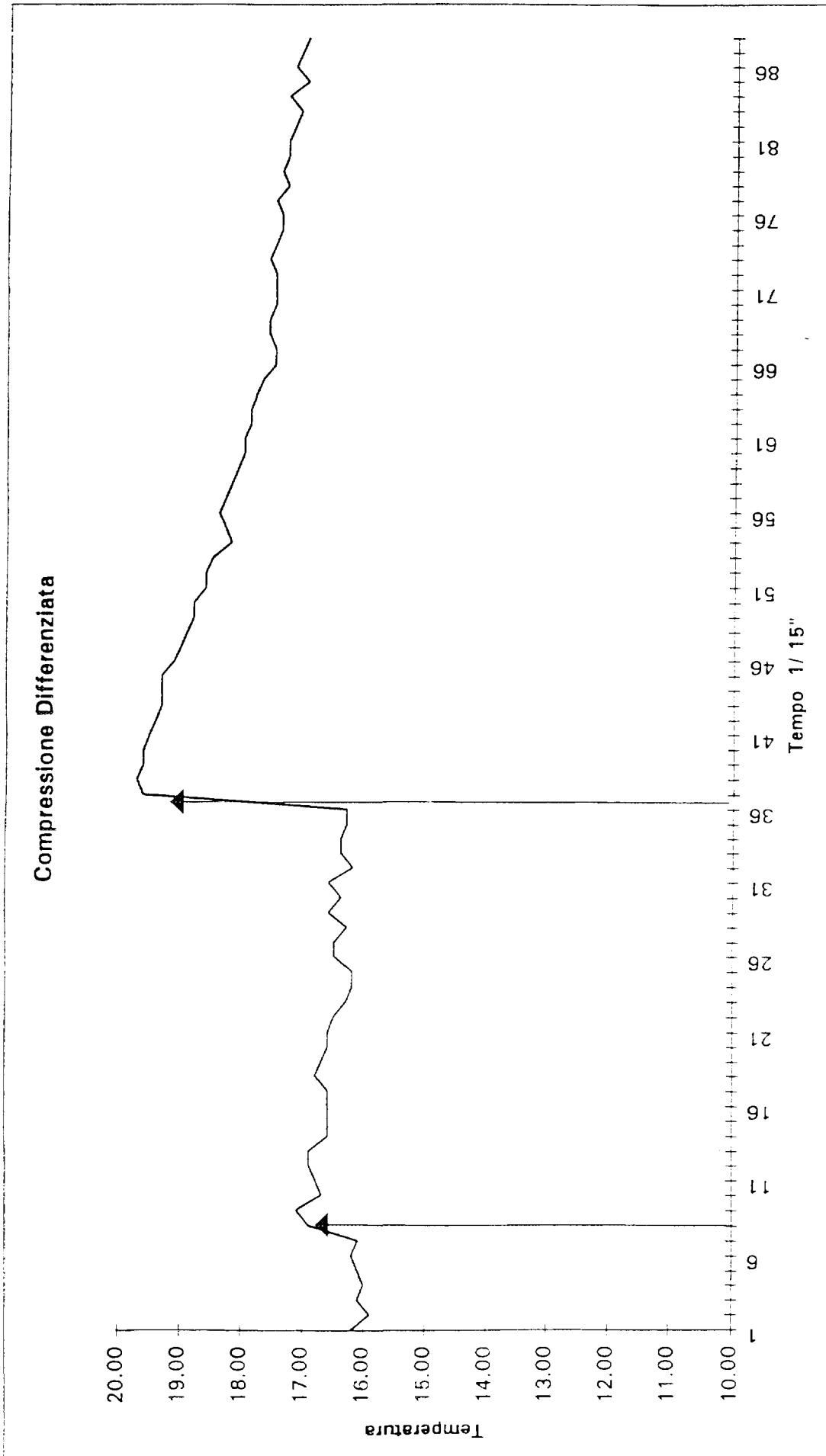


Fig. 4 - Variazioni dell'andamento della temperatura di un punto della suola sottoposta a compressione differenziata
 NB. < Le frecce indicano i punti dove la suola ha subito 1 e 5 compressioni >

3.2 Calcolo approssimativo del coefficiente di conduttività termica:

Il secondo gruppo di esperienze è stato relativo al calcolo indicativo del coefficiente di conduttività termica del materiale, l'idea base era quella di verificare, in modo grossolano la capacità della termocamera di discriminare termodinamicamente i materiali.

La prova è stata effettuata ponendo una fonte di calore all'interno della scarpa riscaldando per un tempo definito il sistema, dalla visione del video-tape si può notare il progressivo innalzamento di temperatura del sistema scarpa e l'aumento relativo del flusso termico.

In fig. 5 viene mostrato l'andamento della temperatura di un punto della suola nel tempo, con un semplice calcolo è possibile ottenere il valore del coefficiente desiderato.

In formule:

$$\int_{T_1}^T \frac{dT^*}{T^* - T_0} = \int_0^t -\frac{KS dt}{\Delta x C_p M} \quad 19)$$

da cui
$$\ln \left(\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \right) = -\frac{K_s t}{\Delta x C_p M} \quad 20) \text{ ovvero}$$

$$T = T_0 - \tilde{T} \exp \left(-\frac{KS}{\Delta x C_p M} t \right) \quad 21)$$

se $T - T_0$ è piccolo, possiamo sviluppare in serie

$$\tilde{T} \left(1 - \frac{K t}{\Delta x^2 \rho C_p} \right) \quad 22)$$

si ottiene nel punto $t = 210_s$, $T = 293.8 \text{ } ^\circ \text{K}$

$$K_s = 0.11 \frac{W}{m^\circ K}$$

con $\bar{K}_s = 0.114 \frac{W}{m^\circ K}$ a fronte del $K_{gomma} = 0.159 \frac{W}{m^\circ K}$

Ricordando che lo spessore della suola è $\Delta x \cong 1 \text{ cm}$ e che in prima approssimazione si è preferito considerare il sistema "suola" omogeneo ed il coefficiente di conduttività termica, come combinazione lineare dei due coefficienti.

ricordando che $K_{aria} = 0.043 \frac{W}{m^\circ K}$ facendo la semplice media aritmetica si ottiene:

$$K_s \cong \frac{K_{gomma} + K_{aria}}{2} \cong 0.10 \frac{W}{m^\circ K} \quad \text{in ottimo accordo con i dati rilevati.}$$

Per il calcolo corretto del coefficiente di conduttività bisogna prendere in considerazione il concetto di resistenza termica del materiale.

Sviluppando quindi un analogo elettrico per il processo di conduzione termica e ricordando le dimensioni della struttura $\Delta x = 1 \text{ cm}$, e quelle dei costituenti Δx (gomma) = 0.4 cm e Δx (aria) = 0.2 cm, possiamo scrivere.

$$R = 2L_g / k_g A + L_a / k_a A = L_{\text{tot}} / k_{\text{tot}} A$$

$$1 / k_{\text{tot}} = 0.8 / k_g + 0.2 / k_a$$

$$\frac{1}{k_{\text{tot}}} = \frac{0.8k_a + 0.2k_g}{k_a k_g}$$

$$k_{\text{tot}} = \frac{k_a k_g}{0.8k_a + 0.2k_g} = 0.10$$

Questo risultato conferma ragionevolmente (entro il 10%) le misure effettuate.

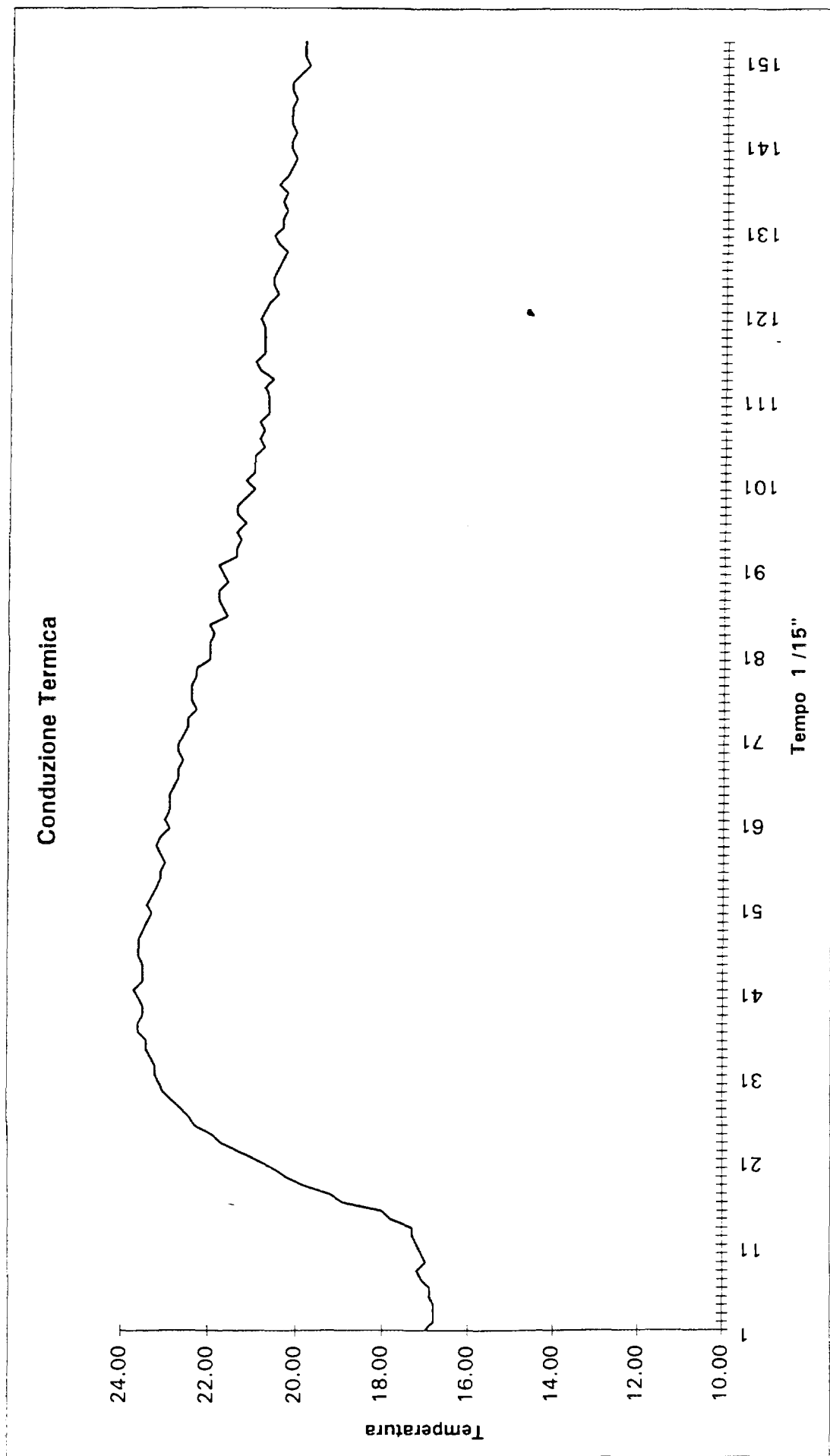


Fig 5 - Innalzamento nel tempo della temperatura di un punto della suola indisturbata.

3.3 Calcolo del coefficiente di conduttività termica in condizioni di stiramento

La successiva esperienza è stata volta a valutare di nuovo il valore del coefficiente di conduttività della gomma, dopo che il disassenblaggio della scarpa aveva mostrato, all'interno della suola, l'esistenza di una struttura a vespaio responsabile del valore ottenuto che si poteva, come mostrato, collocare grossolanamente a metà stada fra quello dei materiali gomma ed aria.

L'idea base era quella che lo stiramento ed il susseguente schiacciamento della struttura a vespaio avrebbe fatto diminuire il peso della componente aria nel calcolo indicativo da noi sviluppato; al termine dell'esperienza si attendeva un incremento del valor medio calcolato in un punto della suola.

La fig. 6 mostra ancora una volta il comportamento termico di un punto della suola della scarpa sottoposta simultaneamente a stiramento e riscaldamento con la stessa sorgente precedente, per il medesimo intervallo di tempo.

Il risultato è stato ritenuto, di gran lunga soddisfacente date le approssimate condizioni di sperimentazione, indicazione indiretta anche della versatilità della strumentazione utilizzata.

Suola normale $\Delta x \cong 1 \text{ cm}$
Suola "stirata" $\Delta x \cong 0.08 \text{ cm}$

$$K_{\text{gomma}} \cong 0.159 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}} \qquad K_s^{(1)} \cong 0.11 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}$$

nel punto $t = 240_s$ $T = 301.2 \text{ }^{\circ}\text{K}$ si ricava

$$K_s^{(2)} \cong 0.136 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}} \quad \text{con} \quad \bar{K}_s^{(2)} \cong 0.137 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}$$

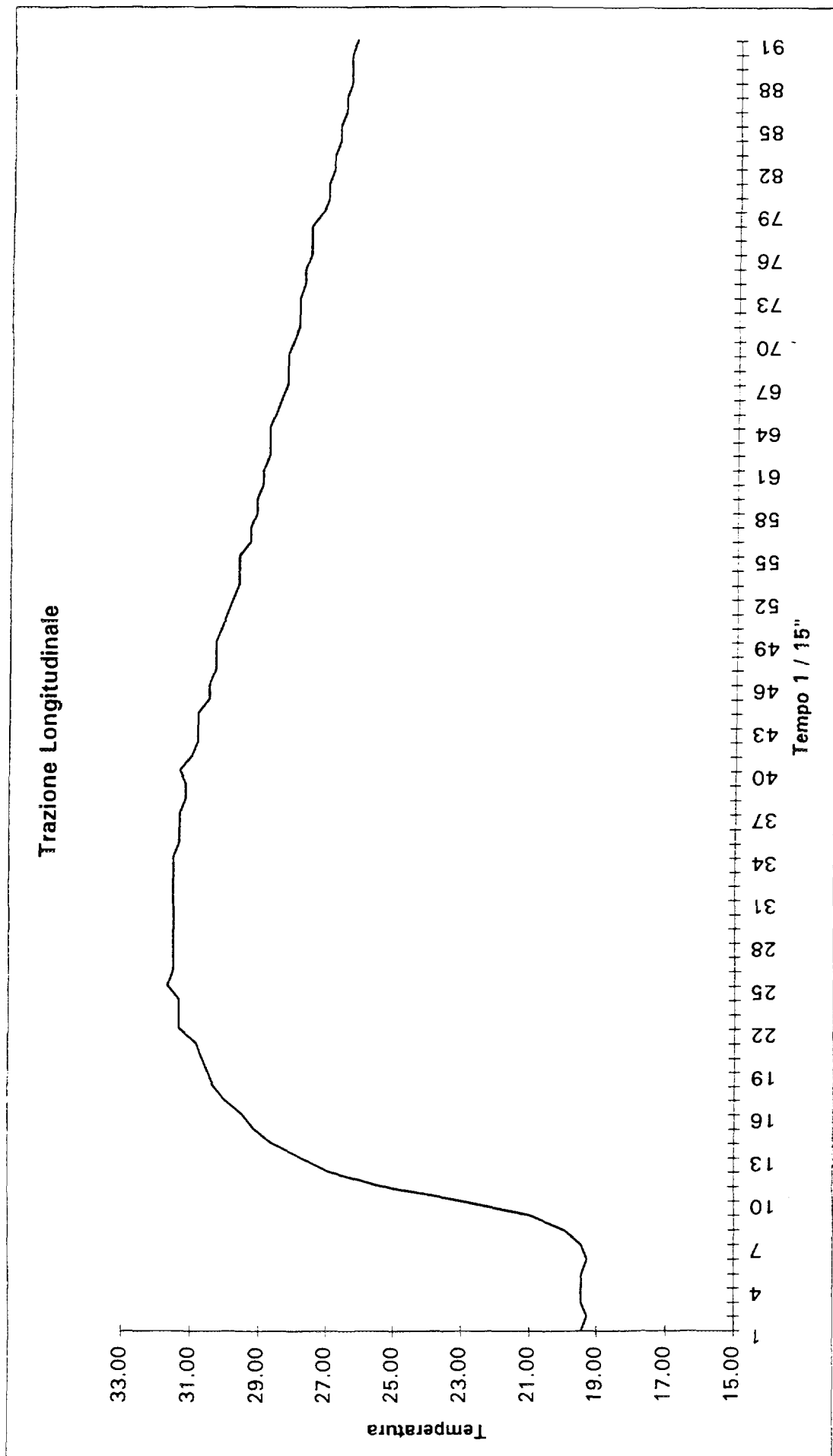


Fig 6 - Innalzamento nel tempo della temperatura di un punto della suola sottoposta a trazione.

3.4 Individuazione delle eventuali microfratture presenti.

L'idea di quest'ultima esperienza indicativa, era quello di fornire una mappatura delle microfratture evidenziate nella suola.

Si è proceduto ad un piegamento della scarpa, ponendo al suo interno la solita sorgente termica già utilizzata in attesa di evidenziare un comportamento termico differenziato a causa delle microfratture ipotizzate presenti nella suola.

Si prevedeva cioè di “vedere” termicamente nel transitorio, prima le linee di frattura a temperatura diversa e dopo un certo tempo Δt la situazione globale della suola in condizioni di omogeneità termica.

Questa $\Delta T / \Delta t$ avrebbe permesso di individuare topologicamente aree eventuali di cedimento strutturale dovuto all'uso.

Purtroppo l'esperienza non ha avuto un buon seguito a causa di due inconvenienti.

- 1) Essa è stata effettuata prima dell'apertura della scarpa e non si pensava all'esistenza del vespaio che certamente ha avuto un'effetto di omogeneizzazione della temperatura interna, rendendo difficili di fatto le rivelazioni.
- 2) Inadeguatezza del sistema di lenti della termocamera che non risultavano avere la sensibilità necessaria, si ritiene che con lenti macro sarà possibile effettuare mappature significative della suola.

In fig. 7 viene mostrato l'andamento termico di un punto della suola.

Ovviamente esso risulta uguale alle precedenti figg. 5-6 anche se la scala delle temperature appare più alta, in quanto data l'indicatività dell'informativa ricercata, non si è proceduto ad attendere il raggiungimento dello “stato termico iniziale”.

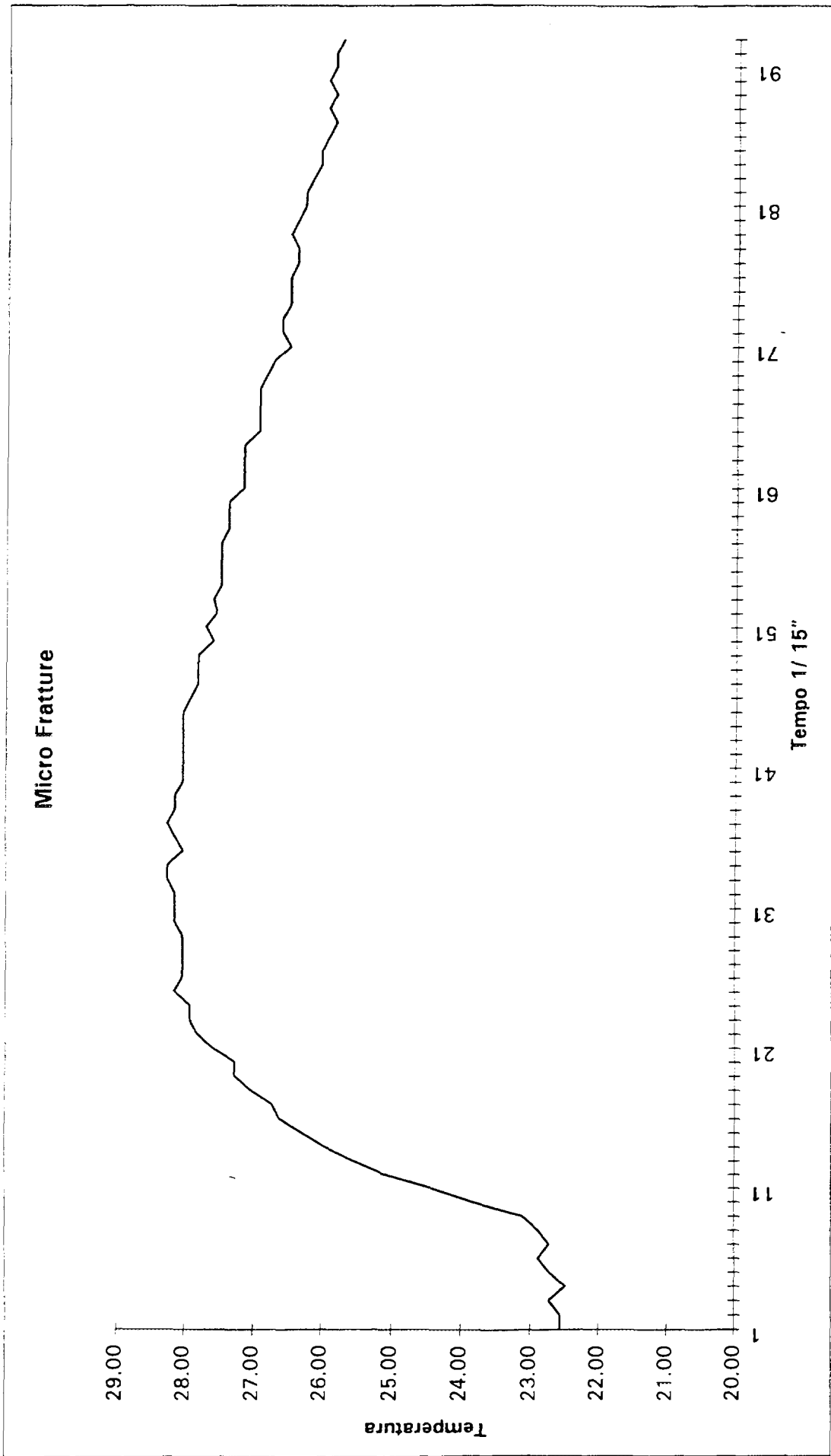


Fig 7 - Innalzamento nel tempo della temperatura di un punto della suola sottoposta a piegatura massima.

4.0 Conclusioni

La trattazione teorica del problema ha mostrato la validità dell'ipotesi di poter ottenere una performance sportiva accresciuta con gli opportuni miglioramenti al prodotto industriale finito, preso in esame.

L'insieme dei test di misure sperimentali ha mostrato:

- La dimensione misurabile del processo elastocalorico
- Il suo andamento di tipo lineare (in buona approssimazione)
- La validità del metodo (sia pure in termini indicativi) del calcolo del coefficiente di conduzione termica della struttura complessa
- La necessità di dover migliorare le apparecchiature al fine di poter raffinare ulteriormente le capacità di rilevazione in alcuni campi specifici.

Sulla base dei riscontri teorico-sperimentali effettuati si può ritenere convalidata con sufficiente margine di approssimazione, l'ipotesi di fattibilità relativa ad un progetto innovativo di ricerca industriale.

APPENDICE

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

5.0 Sistema sperimentale di rilevamento termografico HUGHES/AVIO

Il sistema termografico HUGHES/AVIO, si compone di più apparecchiature interconnesse secondo lo schema di fig. 8

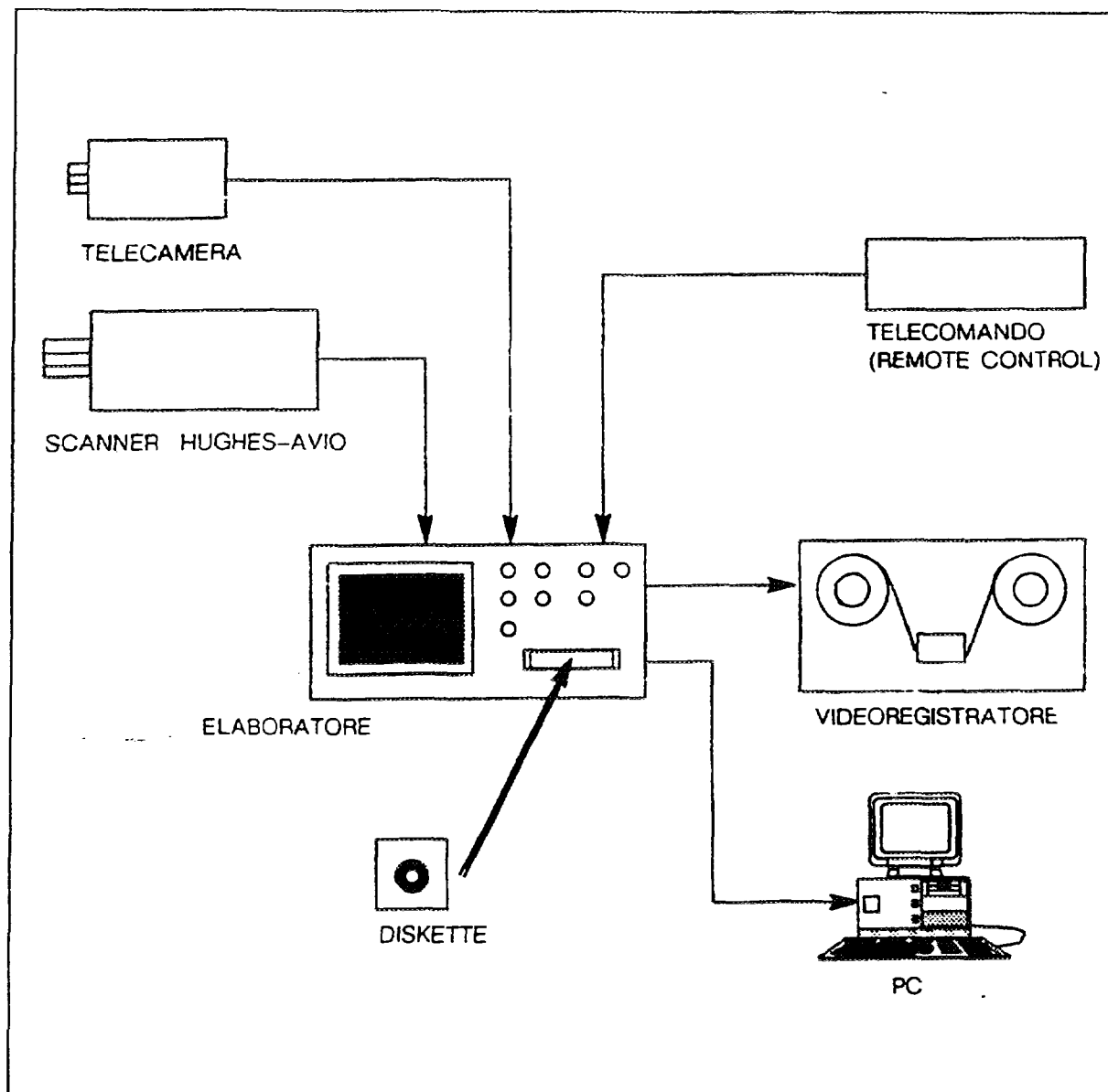


Fig. 8 Schema delle interconnessioni del sistema termografico HUGHES/AVIO

Lo scanner termico HUGHES/AVIO (fig.9) è un sensore passivo per la rilevazione di radiazioni termiche nella banda dell'infrarosso medio e viene utilizzato, nel sistema in esame, per la presentazione in tempo reale della mappatura termica quantitativa a 256 colori.

Attraverso una lente che delimita il campo di ripresa, l'energia infrarossa emessa dal soggetto viene captata da una matrice di rivelatori ad Antimoniuro di Indio; questi la convertono in un insieme di segnali elettrici che corrispondono alla mappa termica dello stesso. Un prisma rotante con 10 specchi costituisce il sistema meccanico di scansione per ottenere l'immagine video; i segnali prodotti vengono inviati all'unità di processamento.

Le caratteristiche dello scanner sono:

- array di rivelatori a 10 elementi di Antimoniuro d'indio
- raffreddamento a circuito chiuso a ciclo Stirling
- campo di visione (FOV= Field Of View) di 15° H x 10° V (H=orizz. V=vert.) - vedi fig. 10
- risoluzione geometrica (IFOV) 2.2 mrad
- campo di messa a fuoco da un minimo di 20 centimetri ad infinito, regolabile anche con telecomando
- resistenza alle vibrazioni di 2 g
- resistenza allo shock di 10 g

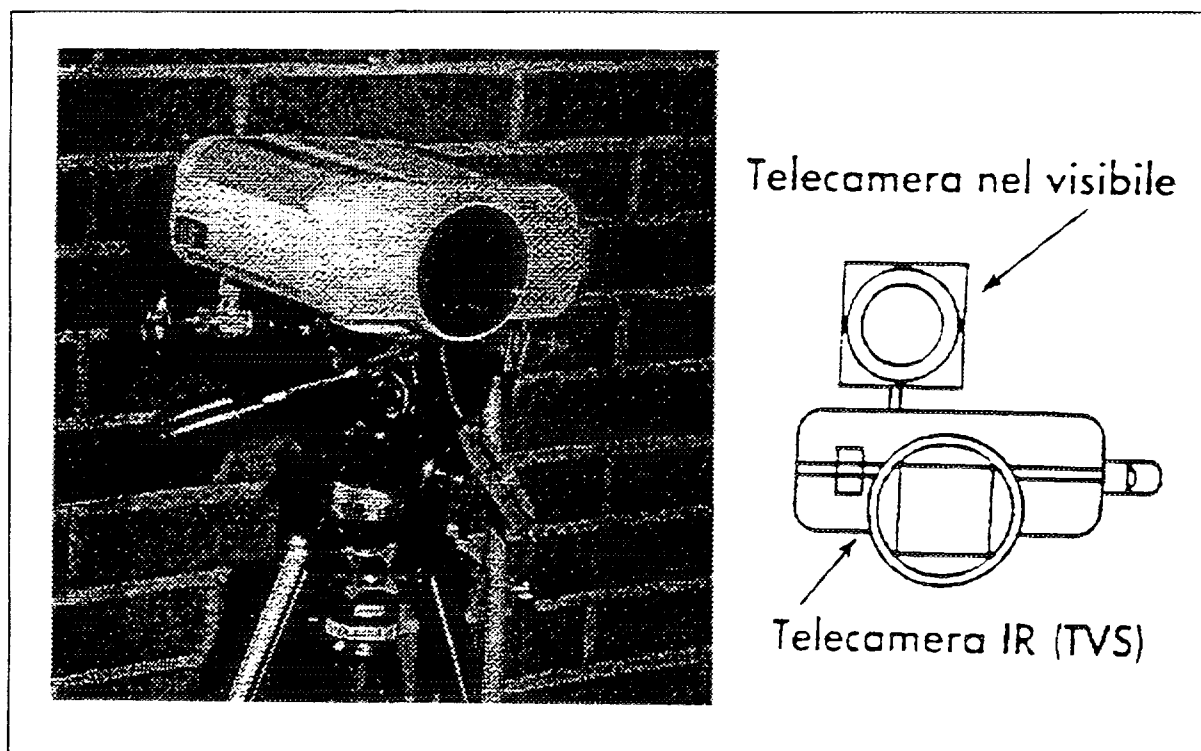


Fig. 9 Termocamera HUGHES/AVIO

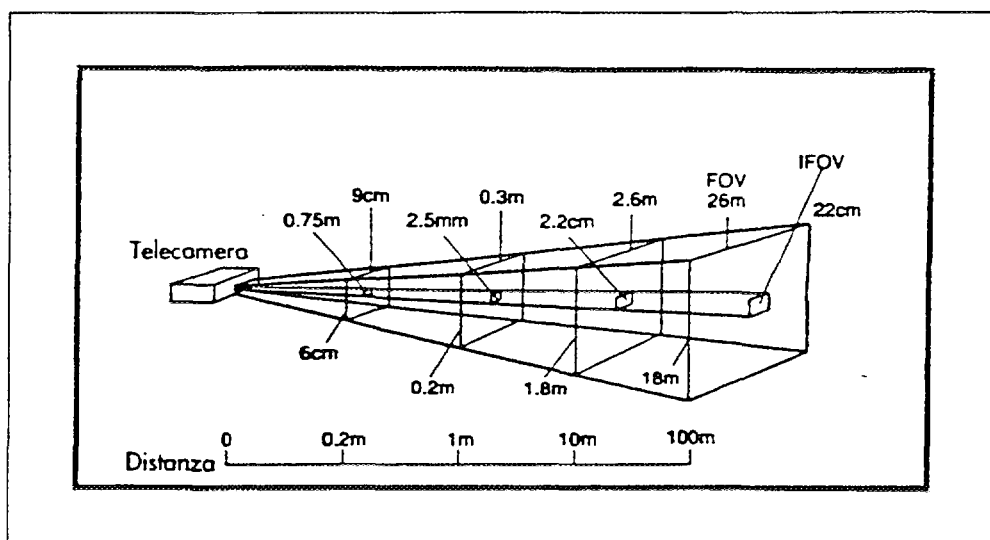


Fig. 10 Relazione tra FOV e distanza

Lo scanner effettua letture termiche comprese tra -20°C e $+300^{\circ}\text{C}$ in ambienti con temperature variabili da -10°C a $+45^{\circ}\text{C}$ e con umidità massima del 90%; la risoluzione termica è di 0.1°C a 30°C , ma con media di 0.05°C (a 30°C) sulle immagini riprese (51200 pixel = 256×200). La precisione sulla misura della temperatura letta risulta del $\pm 3\%$ ovvero di $\pm 2^{\circ}\text{C}$ quale valore massimo.

La termocamera può essere dotata di obiettivi aventi differenti aperture di campo, intercambiabili con lo standard ($15^{\circ}\text{H} \times 10^{\circ}\text{V}$), che spaziano dal teleobiettivo al grandangolo.

Inserendo opportuni filtri è possibile variare il campo spettrale (sia all'interno che all'esterno dell'infrarosso medio) ed anche misurare temperature fuori dal normale intervallo di ripresa.

È predisposta, inoltre, per supportare una telecamera operante nel visibile la cui immagine, attraverso un piccolo mixer video può essere sovrapposta all'immagine infrarossa.

L'unità di processamento (elaboratore di immagini) HUGHES/AVIO (fig. 11) riceve il segnale elettrico dalla telecamera e lo elabora per convertirlo in una immagine video in falsi colori; a ciascuno di essi corrisponde un campo di temperatura differente. L'immagine così realizzata viene inviata al monitor in tempo reale. L'elaboratore d'immagini HUGHES/AVIO è munito di:

- pannello frontale con comandi,
- floppy disk $3\frac{1}{2}$; 1.44 mb,
- monitor a colori da 6" ad alta risoluzione,
- tastiera alfanumerica

ed è collegato, tramite un cavo lungo 5m allo scanner consentendo la massima libertà di movimenti senza interferire nel campo delle riprese.

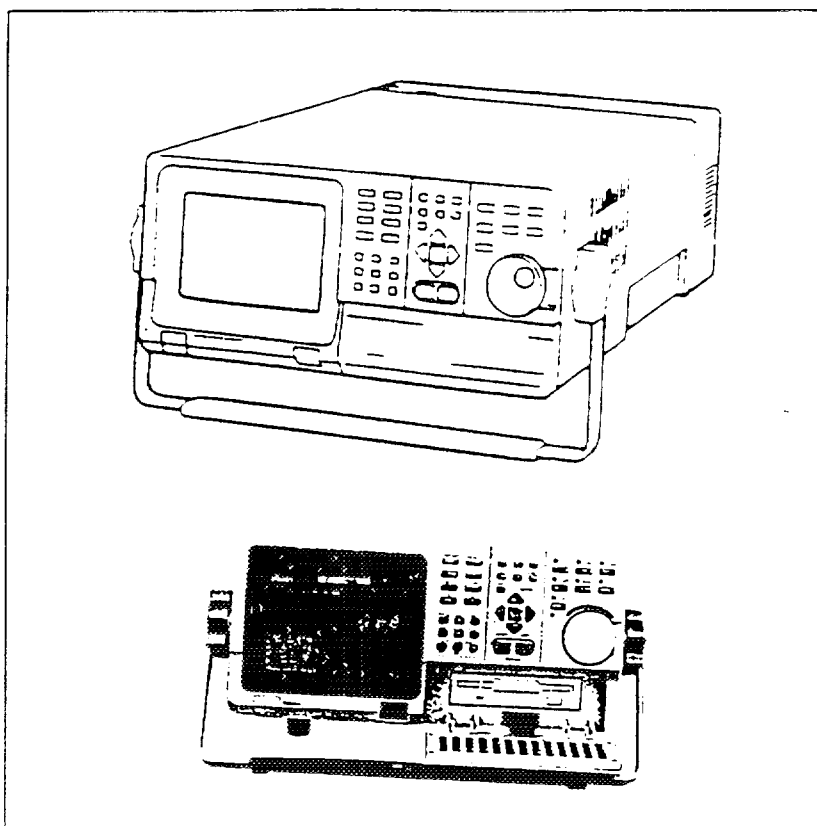


Fig. 11 Unità di processamento HUGHES/AVIO

Questo elaboratore presenta nel suo standard le seguenti caratteristiche:

- uscita video in RGB (1 volt p-p) o PAL,
- frequenza di scansione variabile (con valore massimo di 30 immagini al minuto),
- temperatura di funzionamento da 0° C a 45° C,
- registrazione di 40 immagini su floppy disk (FD) da 3¹/₂",
- velocità di registrazione delle immagini su FD e playback variabile da 10 secondi a 99 minuti,
- trigger esterno per comando congelamento e registrazione immagine.

Il software installato permette di:

- selezionare i colori della scala delle temperature in 16, 64, 128, 256 colori,
- selezionare 3 differenti scale di colori, per ciascuna di esse, ottenerne anche il bianco/nero o il negativo,
- visualizzare la scala di riferimento a colori con l'indicazione delle temperature,
- visualizzare le temperature in gradi Celsius o in Fahrenheit o in Kelvin,
- congelare l'immagine,
- indicare le temperature di 5 punti selezionabili piacere tramite opportuni cursori,
- effettuare la media tra più immagini,
- inserire le isoterme,
- regolare il livello della temperatura (thermal level),

-
- regolare la sensibilità,
- fare lo zoom x 2 (con panning),
- scrivere messaggi, che verranno registrati, sull'immagine,
- effettuare la sottrazione tra due immagini,
- adeguare la sensibilità della camera sull'emissività del soggetto (0.1-1),
- tararsi automaticamente sulla temperatura ambiente,
- calibrarsi per lenti e filtri aggiuntivi (10 tavole interne di parametri correttivi),
- fornire data, ora, minuti e secondi,
- memorizzare 5 differenti serie di parametri dell'utente,
- eseguire un tracking automatico in funzione della temperatura del cursore di riferimento o della temperatura massima o minima dell'immagine (aggiustamento del valore medio).

Bibliografia

- Balakrishnan and Bottani
Mechanical Properties and behaviour of solids; plastic instabilities
World Scientific 1986
- Fabbri.Maso,Rossi ,Sacripanti,Faina
valutazione del costo energetico degli sport di combattimento in “remote sensing” Progress report N°11 Apparato sperimentale e procedura esecutiva.
ENEA RT/INN/94/10
- Mc Mahon
Muscles,Reflexes and Locomotion
Princeton Un.Press 1984
- Ritche
Physics of Plastics
Van Nosrand Company 1965
- Treolar
The physics of rubber elasticity
Oxford press 1958
- Beckenbach
Modern mathematics for the engieneer
Mc Graw Hill 1956
- Kirillin, Sychev and Sheindlin
Engineering thermodynamics
MIR 1981
- Mason
Variational, Incremental and Energy Methods in Solid mechanics
and shell teory
Elsevier 1980
- Mochon and Mc Mahon
Ballistic Walking an inproved model
Math Biosci 1981 - 52
- Black and Hartley
Thermodynamics
Harper & Row 1985
- Wulff
The structure and properties of materials
vol II Thermodynamics of structure
vol III Mechanical behaviour
Wiley & Sons 1965

Edito dall' **ENEA**
Funzione Centrale Relazioni
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Stampa: RES-Centro Stampa Tecnografico - C. R. Frascati

Finito di stampare nel mese di novembre 1996