

Analisi termografica di materiali plastici per serre

Giacomo Scarascia Mugnozza (*) – Pietro Picuno (**)

(*) Professore Associato, Istituto di Costruzioni Rurali, Università di Bari

(**) Ricercatore Confermato, Dipartimento Tecnico-economico, Università della Basilicata, Potenza

1. Premessa

La diffusione avvenuta negli ultimi anni dei laminati plastici trasparenti sotto forma di film e lastre rigide per la copertura delle serre, ha spinto le aziende produttrici verso la ricerca di materiali dotati di proprietà radiometriche sempre migliori e, contemporaneamente, caratterizzati da resistenze meccaniche tali da consentire di individuare la durata in funzione delle esigenze del serricoltore. Lo studio del comportamento tensionale e deformativo dei materiali plastici utilizzati per la copertura degli apprestamenti protetti può risultare utile per una migliore comprensione delle caratteristiche di resistenza, nonché per una previsione circa l'affidabilità del materiale in funzione del tempo di impiego (3). L'esame dello stato tensionale e deformativo di tali materiali può essere approfondito mediante l'analisi termografica eseguita nel corso delle prove di resistenza a trazione per correlare il livello tensionale con il campo termico che si instaura nel materiale in prova, ottenendo inoltre informazioni circa la omogeneità di comportamento del materiale sotto sforzo. A tale scopo nella presente indagine sono stati esaminati i risultati di analisi termografiche effettuate su campioni di film e lastre rigide traspa-

renti (4) sottoposti a prove meccaniche di rottura per trazione, valutando le variazioni di temperatura indotte dallo stato tensionale e confrontando i risultati sperimentali con quanto previsto dalle teorie della termoelasticità e della termoplasticità.

2. La variazione di temperatura di un corpo in relazione allo stato tensionale e deformativo

Un corpo rigido soggetto ad uno stato tensionale subisce una variazione di temperatura rispetto al valore che esso ha in condizioni di riposo: tale variazione è legata alla liberazione di energia, che viene dissipata per conduzione, convezione ed irraggiamento, durante la deformazione e la successiva rottura. Se l'applicazione del carico avviene in maniera sufficientemente rapida, gli scambi di calore per conduzione e convezione hanno luogo in maniera limitata, e la maggior parte di energia viene rilasciata per irraggiamento, tale energia può così venire rilevata attraverso una apparecchiatura termografica all'infrarosso termico (6). Il campo termico che si instaura nel materiale in prova è legato allo stato tensionale attraverso la relazione (2), (4), (6):

$$\Delta T = - \frac{3 E}{1-2 \nu} T \frac{\alpha}{\rho c} [e]_{e_i}^{e_f} + \oint \frac{\Theta d\Gamma_p}{\rho c} + D \int_{t_i}^{t_f} \nabla^2 T dt \quad (I)$$

ove i simboli hanno il significato riportato in tab. 1.

Come si può osservare dalla (I), la variazione di temperatura è data dalla somma di tre termini rispettivamente legati alla deformazione in fase elastica, alla deformazione in fase plastica ed allo scambio di calore per conduzione.

Nell'ipotesi in cui la prova meccanica avvenga in condizioni adiabatiche, ossia con l'applicazione del carico massimo in tempi molto rapidi, ovvero attraverso cicli di carico e scarico, quest'ultimo termine può essere trascurato e la (I) diventa la (II):

$$\Delta T = - \frac{3 E}{1-2 \nu} T \frac{\alpha}{\rho c} [e]_{e_i}^{e_f} + \oint \frac{\Theta d\Gamma_p}{\rho c}$$

I due termini del secondo membro della (II) sono legati alla variazione di temperatura in fase elastica ed in fase plastica e possono essere esaminati separatamente, anche ai fini di una quantificazione dei rispettivi contributi.

2.1. Termoelasticità

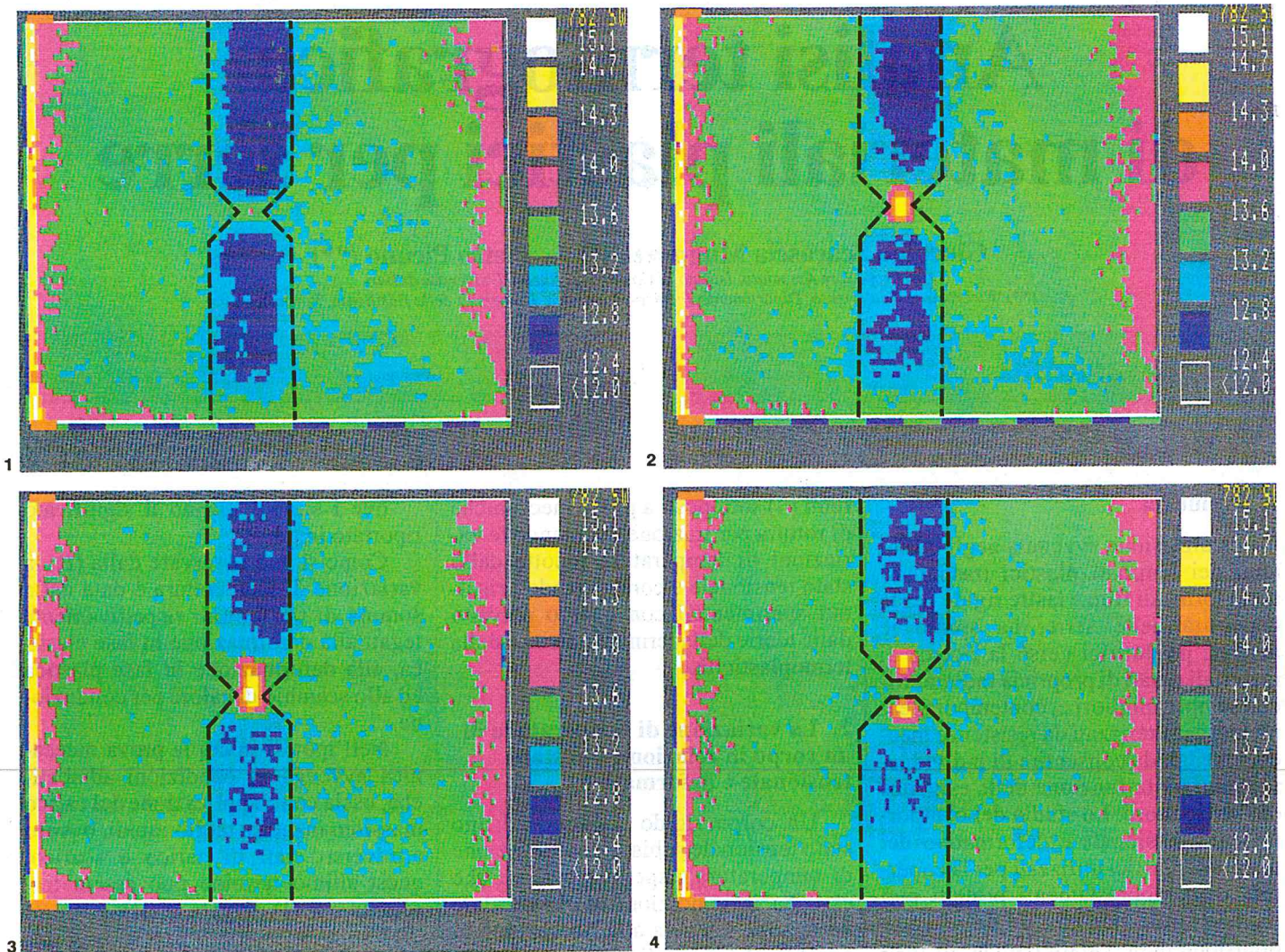
In fase elastica il cambiamento del livello termico determinato da una variazione dello stato tensionale equivale a:

$$\Delta T_e = - \frac{3 E}{1-2 \nu} T \frac{\alpha}{\rho c} [e]_{e_i}^{e_f} \quad (III)$$

e deriva dall'integrazione della legge di Kelvin in condizioni adiabatiche

Lavoro eseguito con contributo Cnr, nell'ambito del P.F. Raisa, Sottoprogetto 2. Pubblicazione n. 795.

Il contributo all'impostazione ed allo svolgimento del lavoro va suddiviso in maniera paritetica tra gli Autori.



(4), (6). Dalla (III) si evince che nel caso di sollecitazione di trazione si ottiene una diminuzione di temperatura, mentre in condizioni di compressione, poiché il coefficiente di deformazione cubica (e) assume segno negativo, si produce un ΔT positivo.

Poiché (5) il coefficiente di deformazione cubica coincide con l'invariante lineare di deformazione, si può scrivere:

$$[e]_{e_i}^{e_f} = \frac{1}{3} \sum_{i=1,2,3} \epsilon_{ii}$$

da cui la (III) diventa:

$$\Delta T_e = - \frac{\alpha}{\rho c} T \sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii} \quad (IV)$$

Fig. 1, 2, 3, 4 - Sequenza di immagini termografiche rilevate nel corso della fase plastica, e al collasso del materiale, durante la prova a rottura per trazione su provini di film di PE intagliato. Le temperature relative alle variazioni termiche sono misurate in °C.

avendo sostituito le tensioni principali σ_{ii} alle deformazioni principali ϵ_{ii} . Introducendo quindi la costante termoelastica K_m (4), caratteristica del materiale in prova, pari a:

$$K_m = \frac{\alpha}{\rho c}$$

la relazione (IV) diventa

$$\Delta T_e = - K_m T \Delta \sigma \quad (V)$$

La (V) consente pertanto la quantificazione delle variazioni di temperatura in fase elastica (ΔT_e) in funzione della variazione dello stato tensionale imposto ($\Delta \sigma$) una volta note la temperatura assoluta (T) del materiale ed il valore della costante termoelastica (K_m).

2.2. Termoplasticità

In fase plastica l'incremento di temperatura conseguente ad una variazione dello stato tensionale, nell'ipotesi generalmente verificata (2) in cui la totalità del lavoro plastico sia convertita in calore, può essere, con buona approssimazione, considerata pari a:

$$\Delta T_p = \int \frac{\sigma d\varepsilon_p}{\rho c} \quad (\text{VI})$$

Nell'ipotesi di stato di tensione monoassiale la (VI) è esprimibile come rapporto tra l'area sottesa dalla curva tensioni/deformazioni e la capacità termica per unità di volume, ossia:

$$\Delta T_p = \frac{\int \sigma d\varepsilon_p}{\rho c} \quad (\text{VII})$$

Ponendo (1): $\bar{\sigma}$ = tensione media in fase plastica e $\bar{\varepsilon}_p$ = quantità equivalente di deformazione plastica, la (VII), essendo ρ e c quantità costanti, diventa:

$$\Delta T_p = \frac{\bar{\sigma} \bar{\varepsilon}_p}{\rho c} \quad (\text{VIII})$$

Mediante la (VIII) è quindi possibile valutare la variazione di temperatura in fase plastica essendo nota la curva tensioni/deformazioni del materiale in prova.

3. Prove sperimentali

3.1. Materiali e metodi

Le prove sono state condotte portando a rottura per trazione campioni di laminati plastici rigidi (PMMA Vedril) e flessibili (film PE b.d. stagionale) ed effettuando, in contemporanea alle prove meccaniche, le riprese termografiche.

I provini di plastica rigida sono stati ricavati (4) mediante fresatura secondo la sagoma prevista dalla normativa (7), mentre i provini di film sono stati ottenuti attraverso strisce di materiale di 10 mm di larghezza in cui è stato praticato un intaglio in modo da poter ottenere in corrispondenza dello stesso una con-

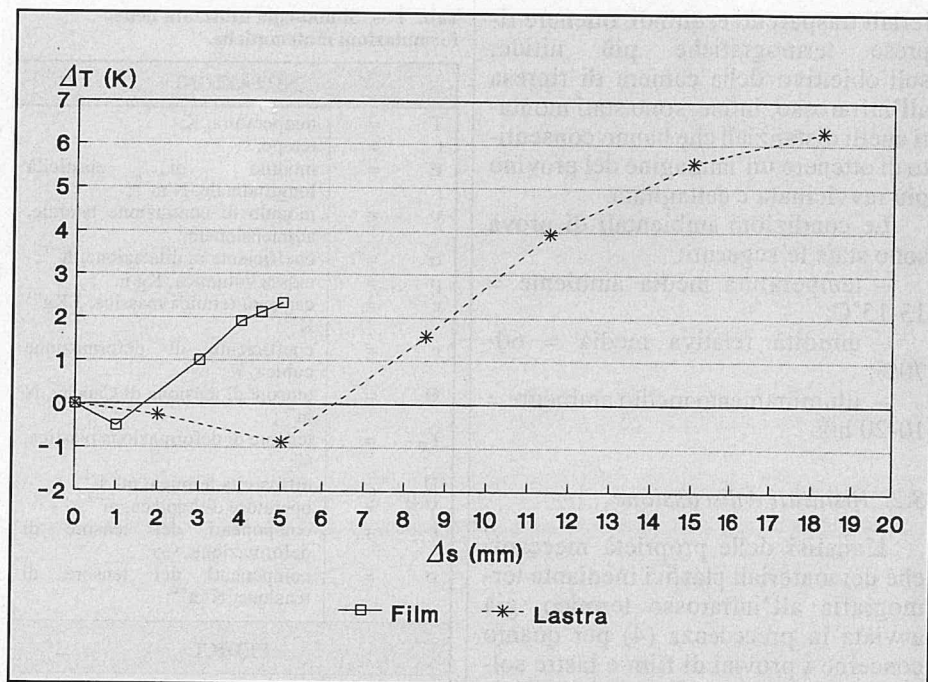


Fig. 5 - Andamento della variazione di temperatura in funzione dell'allungamento nel corso della prova di trazione a rottura su un provino intagliato di film di PE e su un provino sagomato di lastra di PMMA.

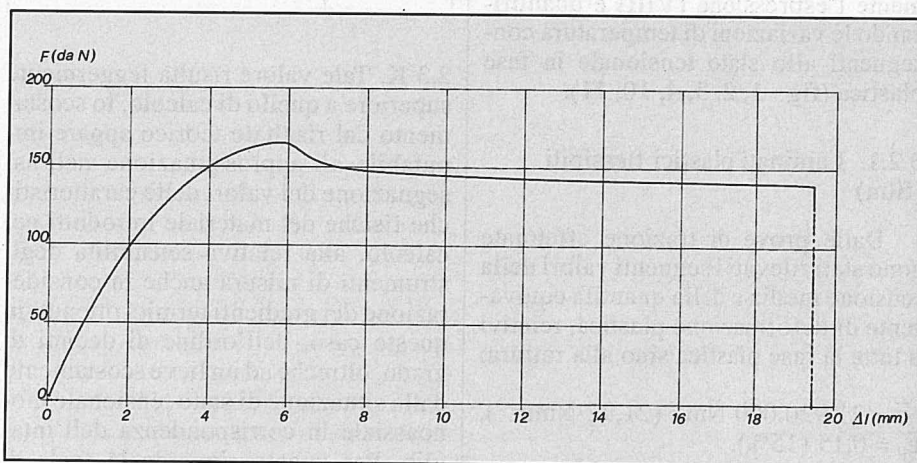


Fig. 6 - Diagramma tensioni/deformazioni relativo al provino di lastra PMMA oggetto dell'analisi termografica riportata nelle figure 7, 8, 9, 10, 11.

centrazione di tensioni e, quindi, un'esaltazione dell'effetto termografico (4).

Le prove di trazione sono state effettuate nel laboratorio prove materiali del Dipartimento Tecnico-economico dell'Università della Basilicata di Potenza, utilizzando una pressa universale computerizzata Galdabini PMA 10, che ha consentito la riproduzione della curva tensioni/deformazioni del materiale in prova.

Il provino in trazione è stato ripreso per tutto il corso della prova con un

termografo a raggi infrarossi AGEMA 782 SW, completo di monitor per la visione in diretta della ripresa, di sistema di registrazione dell'immagine, di datalink e personal computer per l'elaborazione dell'immagine e di stampante a colori per la sua restituzione.

Tutt'intorno all'apparecchiatura di prova sono stati disposti schermi costituiti da lastre di polistirolo espanso, onde evitare l'influenza radiante dei corpi circostanti; sui provini è stata applicata una vernice nera, in modo da esaltare il fenomeno emissivo dei ma-

teriali trasparenti e, quindi, ottenere riprese termografiche più nitide; sull'obiettivo della camera di ripresa all'infrarosso, infine, sono stati montati anelli distanziali che hanno consentito di ottenere un'immagine del provino più ravvicinata e dettagliata.

Le condizioni ambientali di prova sono state le seguenti:

- temperatura media ambiente = 13-15°C;
- umidità relativa media = 60-70%;
- illuminamento medio ambiente = 10-20 lux.

3.2. Risultati e discussione

L'analisi delle proprietà meccaniche dei materiali plastici mediante termografia all'infrarosso termico, già avviata in precedenza (4) per quanto concerne i provini di film e lastre sollecitati a trazione limitatamente alla fase elastica, è stata estesa anche al campo plastico, verificando sperimentalmente l'espressione (VIII) e quantificando le variazioni di temperatura conseguenti allo stato tensionale in fase plastica (fig. 1, 2, 3, 4, 10, 11).

3.2.1. Laminati plastici flessibili (film)

Dalle prove di trazione effettuate sono stati rilevati i seguenti valori della tensione media e della quantità equivalente di deformazione plastica, relativi a tutta la fase plastica sino alla rottura:

$$\bar{\sigma} = 21.920.000 \text{ Nm}^{-2} (21,92 \text{ Nmm}^{-2}),$$

$$\bar{\epsilon}_p = 0,15 (15\%).$$

Assumendo i seguenti valori delle caratteristiche fisiche del PE b.d.: $\rho = 920 \text{ Kg m}^{-3}$, $c = 2100 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ne deriva:

$$\Delta T_p = \frac{\bar{\sigma} \bar{\epsilon}_p}{\rho c} = 1,7 \text{ K}$$

L'evoluzione della prova a trazione indica un progredire del livello termico del provino di film durante la fase plastica (figg. 1, 2, 3). Con riferimento alla sezione di intaglio si può dedurre un aumento di temperatura (fig. 4) rispetto alla situazione indisturbata pari a circa

Tab. 1 - Simbologia utilizzata nelle formulazioni matematiche.

NOTAZIONI	
T	= temperatura, K;
t	= tempo, s;
E	= modulo di elasticità longitudinale, N m^{-2} ;
v	= modulo di contrazione laterale, adimensionale;
α	= coefficiente di dilatazione, K^{-1} ;
ρ	= massa volumica, Kg m^{-3} ;
c	= capacità termica massica, $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;
e	= coefficiente di deformazione cubica, %;
Θ	= tensore di tensione di Cauchy, N m^{-2} ;
Γ_p	= tensore di deformazione plastica, %;
D	= diffusività termica, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
∇^2	= operatore di Laplace, m^{-2} ;
ϵ	= componenti del tensore di deformazione, %;
σ	= componenti del tensore di tensione, N m^{-2} ;
PEDICI:	
e	= elastico;
p	= plastico;
i	= iniziale;
f	= finale.

2,3 K. Tale valore risulta leggermente superiore a quello di calcolo; lo scostamento dal risultato teorico appare imputabile all'approssimazione nell'assegnazione dei valori delle caratteristiche fisiche del materiale introdotti nel calcolo, alla relativa sensibilità degli strumenti di misura anche in considerazione dei gradienti termici ottenuti in questo caso, dell'ordine di decimi di grado, oltreché ad un lieve scostamento dalla situazione di stato tensionale monoassiale in corrispondenza dell'intaglio. Per quanto riguarda la scala di temperature in °C riportata sul margine destro delle figg. 1, 2, 3 e 4 va precisato che si tratta di valori derivanti dall'aver impostato durante i rilievi, livelli termici idonei a mettere meglio in evidenza le differenze di temperatura che si determinano nel corso della prova; le temperature lette su tale scala vanno pertanto assunte soltanto come valori relativi per ricavare le differenze di temperatura tra i diversi punti del provino o, per lo stesso provino, tra immagini relative a istanti diversi della prova, e non quali valori assoluti di temperatura del materiale.

Dall'andamento della variazione di

temperatura in funzione della deformazione subita nel corso della prova di trazione, comprensiva sia della fase elastica che di quella plastica, si nota (fig. 5) come alla fase elastica corrisponda una diminuzione di temperatura, come previsto teoricamente dalla (V) ove compare il segno negativo, mentre nella fase plastica la temperatura del provino aumenta proporzionalmente alla deformazione plastica tramite il fattore $\bar{\sigma}/\rho c$.

3.2.2. Laminati plastici rigidi (lastre)

La fig. 6 riproduce il diagramma tensioni/deformazioni relativo al provino oggetto dell'analisi termografica riportata nelle figg. 7, 8, 9, 10 e 11; su tale diagramma si possono distinguere sia la fase elastica (fig. 8), caratterizzata da una curva ascendente in maniera pressoché lineare, che la fase plastica, ove la curva $F/\Delta l$ si dispone secondo un andamento suborizzontale, in corrispondenza della quale è stata effettuata la sequenza di riprese delle figg. 9, 10 e 11.

Relativamente a tutta la fase plastica sino alla rottura, nel caso delle lastre sono stati ottenuti i seguenti valori della tensione media e della quantità equivalente di deformazione plastica:

$$\bar{\sigma} = 40.037.000 \text{ Nm}^{-2} (40,037 \text{ Nmm}^{-2}),$$

$$\bar{\epsilon}_p = 0,277 (27,7\%).$$

Assumendo i seguenti valori delle caratteristiche fisiche del PMMA: $\rho = 1180 \text{ Kg m}^{-3}$, $c = 1500 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ne deriva:

$$\Delta T_p = \frac{\bar{\sigma} \bar{\epsilon}_p}{\rho c} = 6,3 \text{ K}$$

Tale valore di incremento del livello termico è risultato in accordo con la differenza di temperatura, rilevata sperimentalmente, tra l'istante della rottura (fig. 11) e quello iniziale (fig. 7), pari a circa 6 K. È opportuno tenere presente che, anche per quanto riguarda le immagini termografiche relative alle prove sulle lastre, i valori di temperatura in °C letti sulla scala riportata sul margine destro delle figg. 7, 8, 9, 10 e 11 vanno assunti non per una valutazione della temperatura effettiva del mate-

RICERCA E SPERIMENTAZIONE

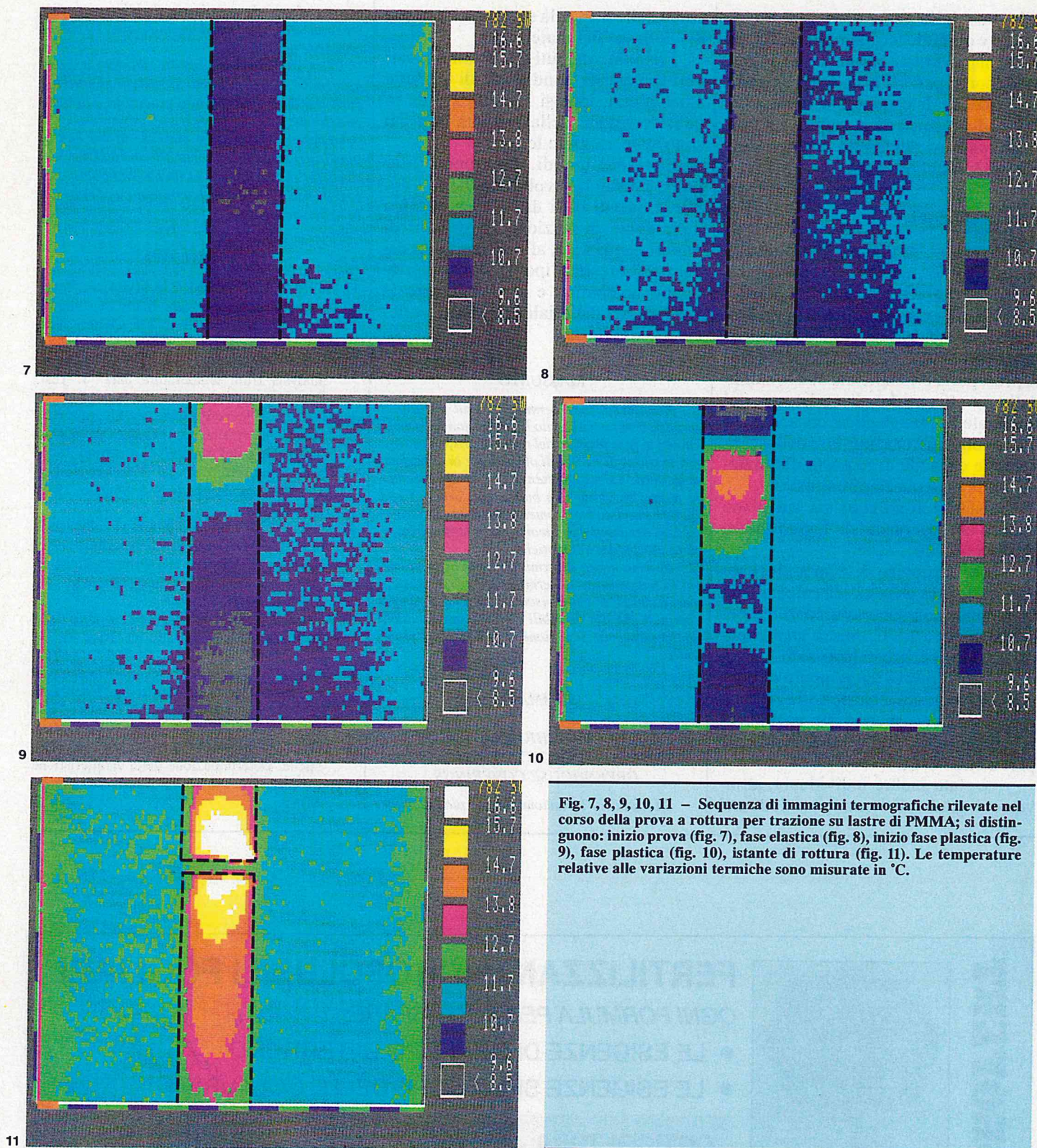


Fig. 7, 8, 9, 10, 11 - Sequenza di immagini termografiche rilevate nel corso della prova a rottura per trazione su lastre di PMMA; si distinguono: inizio prova (fig. 7), fase elastica (fig. 8), inizio fase plastica (fig. 9), fase plastica (fig. 10), istante di rottura (fig. 11). Le temperature relative alle variazioni termiche sono misurate in °C.

riale ma soltanto ai fini di un confronto tra due punti diversi del provino o, per lo stesso punto, tra immagini relative a istanti diversi della prova. Infatti in fa-

se di elaborazione dell'immagine sono stati impostati livelli termici atti a meglio evidenziare le variazioni termiche che si determinano nel corso della pro-

va. Riportando su un diagramma cartesiano le variazioni di temperatura rilevate termograficamente in funzione degli allungamenti prodotti sul provino

nel corso della prova a trazione su lastre, si è ottenuto un diagramma (fig. 5) in cui si può notare che anche in questo caso, come per i film, ad una iniziale diminuzione di temperatura, corrispondente alla fase elastica, segue una fase di incremento del livello termico sino alla rottura del provino.

4. Conclusioni

L'analisi mediante termografia all'infrarosso termico del comportamento meccanico dei materiali plastici più diffusi per la copertura di apprestamenti protetti, già avviata con particolare riferimento alla fase elastica, è stata proseguita e completata con lo studio delle caratteristiche di resistenza del materiale in fase plastica, consentendo così di ottenere una migliore conoscenza delle capacità di risposta del materiale alle sollecitazioni imposte.

I risultati conseguiti sia sul piano teorico che sperimentale hanno infatti dimostrato che:

- per il provino di film sollecitato durante la fase plastica si è calcolato un incremento massimo teorico di temperatura di circa 1,7°C, contro un aumento rilevato sperimentalmente di 2,3°C;
- per le lastre l'incremento di temperatura massimo teorico previsto in fase plastica è stato di 6,3°C a fronte di un aumento rilevato sperimentalmente pari a circa 6°C;
- è stata inoltre individuata, attraverso i gradienti termici prodotti nel

corso delle prove, la sezione di innesco del collasso del materiale.

I risultati ottenuti sono stati ricavati nell'ipotesi di condizioni di perfetta adiabaticità, ipotesi ritenuta valida in considerazione della velocità con cui sono state eseguite le prove.

Si ritiene quindi opportuno proseguire l'indagine svolta mediante l'applicazione di cicli di carico e scarico delle forze di trazione su provini di materiale plastico, allo scopo di verificare nella realtà l'ipotesi di comportamento adiabatico e per analizzare la risposta del materiale soggetto a sollecitazioni di fatica.

RIASSUNTO

Attraverso rilievi termografici all'infrarosso termico è stato analizzato il comportamento meccanico in fase plastica nel corso di prove a rottura per trazione di materiali plastici per la copertura delle serre. I risultati ottenuti per via sperimentale hanno mostrato una buona concordanza con quanto previsto teoricamente mediante le formulazioni derivanti dalla teoria della termoplasticità in condizioni adiabatiche.

Si sono infatti determinati incrementi massimi di temperatura al termine della fase plastica pari a circa 2°C e 6°C rispettivamente nel caso di laminati plastici flessibili e rigidi, individuando anticipatamente le sezioni di collasso del materiale.

SUMMARY

THERMOGRAPHIC ANALYSIS OF STRETCHED PLASTIC MATERIALS FOR GREENHOUSE COVERINGS

Mechanical behaviour during plastic defor-

mation of greenhouse plastic cladding materials was analyzed by infrared thermography by means of tensile tests.

The experimental results showed a good agreement with theoretical formulations deriving from the theory of thermoplasticity in adiabatic conditions.

Highest temperature increase at the end of plastic deformation of about 2°C and 6°C, respectively for plastic films and sheets, were obtained, together with the early determination of material breakdown sections.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Huang Y., Li S.X., Shih C.H. (1984) - "Investigation of temperature fields of stainless steel during deformation" The Chinese Academy of Science, Shenuang.
- 2) Jordan E.H., Sandor B.I. (1978) - "Stress analysis from temperature data" J. Test. Eval., Jteva, 6, 325-331.
- 3) Manera C., Picuno P., Scarascia Mugnozza G. (1988) - "Analisi termoelastica dello stato tensionale e deformativo di materiali di copertura per serre" Atti del IV Convegno Nazionale Aigr, Alghero, 4-6 Maggio 1988, 455-461.
- 4) Manera C., Scarascia Mugnozza G., Picuno P. (1989) - "La resistenza di materiali plastici per serre in relazione alla termoelasticità ed all'invecchiamento" Colture Protette, 18, (8/9), 103-109.
- 5) Matildi P. (1971) - "Lezioni di scienza delle costruzioni" Adriatica editrice, Bari, (I), 39-44.
- 6) Oliver D.E. (1986) - "Stress pattern analysis by thermal emission" tratto da: "Handbook on experimental mechanics" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 610-620.
- 7) UNI 5819-66 (1966) "Prove sulle materie plastiche. Determinazione delle caratteristiche a trazione dei materiali plastici" Uniplast, Milano. □

HIDROFERT



FERTILIZZANTI IDROSOLUBILI FOGLIARI

OGNI FORMULA PER SODDISFARE:

- LE ESIGENZE DI OGNI TIPO DI TERRENO
- LE ESIGENZE SPECIFICHE DELLE COLTURE

**ORTICOLTURA - FLORICOLTURA - FRUTTICOLTURA
AGRUMICOLTURA - CEREALICOLTURA**

HIDROFERTS.r.l. - Via della Solforata, 92 - 00040 Pomezia (Roma) - Tel. e Fax 06/9105979