

**VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE DEFORMAZIONI E DELLE TENSIONI
DI MODULI FOTOVOLTAICI SOTTOPOSTI ALL'IRRAGGIAMENTO SOLARE**

Cinzia Buratti
Researcher
Department of Industrial Engineering,
University of Perugia,
Via G. Duranti, 1/A-4, 06125 Perugia,
Italy
E-mail: cburatti@unipg.it

INTRODUCTION

The photovoltaic systems will contribute more and more to the realization of sustainable development in the immediate future because of the technological progress and the characteristics of the solar radiation, considered the renewable energetic source with the lowest environmental impact.

The recent applications of the photovoltaic systems, such as the integration in the noise barriers [1] and in the buildings structures (photovoltaic facades and roofs) request to determine the thermal stress due to the critical temperature variations for the structure; it could be useful for the choice of the materials and their assembly in order to guarantee their reliability and duration during the operating life.

The aim of the present paper is the experimental evaluation of the thermal stress and strain of photovoltaic modules subjected to the solar radiation, in order to verify the strain and stress state on stream and to avoid the damaging of the photovoltaic cells placed between the support and protection materials. The photovoltaic cells subjected to the solar radiation reach high temperatures: the two sides of the module (one subjected to the direct solar radiation, the other one in the shadow) are interested by different temperature values and thermal stress.

A temperature gradient due to the solar radiation is established between the two sides of the panel; it can induce a thermal stress, if the geometry of the system doesn't allow the thermal expansion.

The different deformations of the layer exposed to the solar radiation and of the shadow one can flex the panel until the photovoltaic cells breach: they have very low thickness and are extremely fragile.

In the present paper deformation measurements by means of strain gages have been carried, with the same

methodology described in a previous work [2]. In order to characterize the tri-axial deformation of the material rectangular strain rosettes were employed, constituted by three grids of laminated metal fixed on the same support of plastic material and oriented forming angles of 45°.

Four samples of photovoltaic modules were examined, different for dimensions, shape and type of cells, characteristics of the protection and support materials and for the presence or the absence of frame.

In the first phase of the research the deformations in climatic room were measured, in controlled temperature stress; data were employed to estimate the influence of the thermal expansion of the strain gage grid; so it was possible to carry out the measurements outdoor, with the modules subjected to the solar radiation and therefore to not controlled thermal conditions. In the outdoor measurements the panels were oriented in order to optimize the solar radiation gain; strains were measured simultaneously on the two sides of the panel, whose temperatures have different trends; the surface temperatures of two sides of the panel, the solar radiation, the air temperature and relative humidity were also measured during all the tests.

The effective deformations of the samples were calculated, considering the grid thermal expansion and, knowing the thermal and mechanical property of the materials, the stress state on the two sides of the photovoltaic modules in the examined points were estimated.

NOMENCLATURE

E Young modulus (N/mm²)
F gain factor of the strain gauge (-)
H total solar radiation (W/m²)
T temperature (°C)

t time (h)

Greek Letters

α coefficient of linear thermal expansion ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

β thermal coefficient of resistivity ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔH total solar radiation variation (W/m^2)

ΔT temperature variation ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta \varepsilon$ strain variation between sample and reference material (-)

ε deformation (-)

σ stress (N/mm^2)

Subscripts

G grid

R reference

S sample

ΔT thermal

EXPERIMENTAL METHOD

La prima operazione consiste nell'ispezione visiva dei moduli fotovoltaici, per verificare l'assenza di anomalie evidenti dovute a difetti di lavorazione oppure a danni accidentali provocati durante il trasporto e la manipolazione; successivamente ad ogni modulo sono applicati due estensimetri, uno sul lato superiore e l'altro su quello inferiore, fissati con uguale orientamento su due punti sovrapposti scelti presso la zona più interna del campione, in corrispondenza del centro di una cella fotovoltaica.

La metodologia di misura è articolata in diverse fasi, di seguito descritte:

- misure in camera climatica, finalizzate alla determinazione della deformazione complessiva del campione e della griglia estensimetrica;
- misure in camera climatica, impiegando estensimetri gemelli [2], applicati sul campione e su un materiale di riferimento di proprietà di dilatazione note, sottoposti alla stessa sollecitazione termica controllata, finalizzate alla determinazione della deformazione effettiva del campione;
- calcolo della deformazione della griglia estensimetrica e della sua influenza sulla deformazione totale misurata in a);
- misure in esterno della deformazione complessiva del campione e della griglia estensimetrica e dei quattro campioni in prova;
- calcolo della deformazione effettiva dei quattro campioni, depurando i risultati ottenuti in d) dell'influenza della griglia calcolata in c).

le fasi a), b) e c) sono descritte in *Laboratory measurements*; le fasi d) ed e) sono descritte in *Outdoor measurements*.

Laboratory measurements

Le misure di laboratorio sono state impiegate per la valutazione della deformazione della griglia estensimetrica. Su uno stesso pannello (campione *PVI*) sono state effettuate misure di deformazione complessiva

pannello-griglia e misure relative, in grado di fornire la sola deformazione del pannello; queste ultime sono possibili impiegando due estensimetri *gemelli*, uno applicato sul campione e uno su una barretta in titanio silicato, di coefficiente di espansione termica noto. In tal modo la deformazione risultante, pari alla differenza tra quella del campione e quella della barretta di riferimento, non è affetta dall'errore dovuto alla dilatazione termica delle due griglie in quanto la misura è relativa [2]. Le caratteristiche della strumentazione e del sistema di misura sono descritte in [2]. Nelle misure del primo tipo il collegamento dell'estensimetro è effettuato a 1/4 di ponte di *Wheatstone*, in quelle del secondo tipo a 1/2 ponte di *Wheatstone*. Nel caso di misura effettuata con il collegamento a 1/2 ponte, è immediato determinare l'effettiva deformazione e il relativo coefficiente di dilatazione termica del campione, per mezzo della seguente relazione [2]:

$$\alpha_S = \alpha_R + (\varepsilon_{(G/S)} - \varepsilon_{(G/R)}) / \Delta T = \alpha_R + \Delta \varepsilon / \Delta T \quad (1)$$

Tale operazione richiede che il campione in esame e il materiale di riferimento siano sottoposti alla stessa sollecitazione termica e si portino alla stessa temperatura, e ciò è possibile soltanto in un regime strettamente controllato, come all'interno di una camera climatica. All'esterno, invece, la barretta di riferimento, sottoposta all'irraggiamento solare, potrebbe portarsi ad una temperatura diversa da quella del modulo fotovoltaico, in virtù del diverso coefficiente di assorbimento della radiazione incidente. Inoltre si rilevano contemporaneamente le dilatazioni di due materiali (lato superiore di protezione e lato inferiore di supporto), le cui temperature variano in maniera differente, pertanto la barretta potrebbe costituire il riferimento solo per uno. La soluzione più ragionevole consiste pertanto nell'adottare lo schema di collegamento a 1/4 di ponte di *Wheatstone*, che impiega circuiti separati per ogni estensimetro, con connessioni a tre fili e l'introduzione di una resistenza di precisione aggiuntiva, identica a quella del sensore: in questa maniera si riescono a misurare in modo indipendente e nello stesso istante le deformazioni della superficie esposta all'irraggiamento e di quella in ombra di uno stesso modulo.

La dilatazione misurata attraverso lo schema a 1/4 di ponte non esprime la deformazione assoluta del pezzo in prova, perché risente dell'influenza esercitata dalle variazioni di temperatura sul conduttore dell'estensimetro. Bisogna quindi valutare l'errore dovuto alla dilatazione termica della griglia estensimetrica e poi depurare il segnale dagli effetti di essa. Confrontando la deformazione $\varepsilon_{(G/S)}$, misurata a 1/4 di ponte, con la dilatazione termica $\varepsilon_{S,\Delta T}$, calcolata a parità di ΔT utilizzando il coefficiente di espansione α_S ottenuto nella prova a 1/2 ponte, si individua la corrispondente dilatazione termica $\varepsilon_{G,\Delta T}$ del conduttore di cui è costituito l'estensimetro.

Essendo infatti la deformazione termica $\varepsilon_{S,\Delta T}$ del campione pari a:

$$\varepsilon_{S,\Delta T} = \alpha_S \cdot \Delta T \quad (2)$$

e quella relativa $\varepsilon_{(G/S)}$ condizionata dalla deformazione

della griglia pari a :

$$\varepsilon_{(G/S)} = [\beta_G / F_G + (\alpha_S - \alpha_G)] \cdot \Delta T \quad (3),$$

sottraendo membro a membro si ricava:

$$\varepsilon_{S,\Delta T} - \varepsilon_{(G/S)} = (\alpha_G - \beta_G / F_G) \cdot \Delta T = \varepsilon_{G,\Delta T} \quad (4),$$

la quale esprime la dilatazione termica della griglia estensimetrica $\varepsilon_{G,\Delta T}$ in funzione del salto termico ΔT . In particolare, confrontando i dati ottenuti nelle prove eseguite sui due lati del campione *PVI* e sulla barretta di riferimento, e considerando le differenze esistenti tra i fattori di taratura delle diverse sezioni della rosetta rettangolare, con:

$$F_{G,1} = F_{G,3} = 2,075 \pm 0,5\% \quad (5.1)$$

$$F_{G,2} = 2,085 \pm 0,5\% \quad (5.2),$$

è stato possibile determinare i valori medi del coefficiente di dilatazione termica α_G e del coefficiente termico di resistività elettrica β_G del conduttore dell'estensimetro, che costituiscono le incognite del problema, ottenendo:

$$\alpha_G = 17,85 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (6.1)$$

$$\beta_G = 2,77 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (6.2).$$

Con questi risultati è possibile determinare le deformazioni ε_S dei campioni sottoposti all'irraggiamento solare, depurando le misure dall'influenza della griglia estensimetrica ed ottenendo:

$$\varepsilon_S = \varepsilon_{(G/S)} + \varepsilon_{G,\Delta T} = \varepsilon_{(G/S)} + (\alpha_G - \beta_G / F_G) \cdot \Delta T \quad (7).$$

L'andamento della deformazione $\varepsilon_{G,\Delta T}$ della griglia in funzione della temperatura è riportato in Fig. 1.

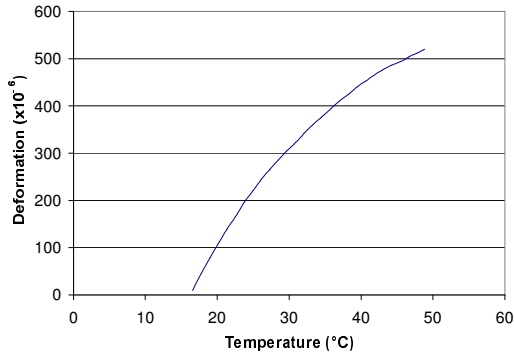


Figure 1 – Andamento della deformazione $\varepsilon_{G,\Delta T}$ della griglia in funzione della temperatura, rilevato in camera climatica.

Outdoor measurements

I moduli fotovoltaici sono stati esposti alla radiazione solare diretta per misurare le deformazioni indotte dall'irraggiamento solare nelle reali condizioni di esercizio.

L'energia raccolta da un modulo fotovoltaico è massima quando la radiazione incidente colpisce la superficie dell'elemento perpendicolarmente. Considerando la sola luce diretta, per gli abitanti dell'emisfero Nord del pianeta la posizione ottimale del dispositivo di captazione è quella di un piano orientato a Sud, con angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale pari alla latitudine del sito: l'orientamento a Sud rende massima la radiazione ricevuta durante la giornata (con il

maggior tempo di esposizione al Sole), mentre l'inclinazione pari alla latitudine minimizza le variazioni di assorbimento della luce solare fra il periodo estivo e quello invernale (dovute all'oscillazione di $\pm 23,5^\circ$ della direzione dei raggi del Sole rispetto alla perpendicolare alla superficie di raccolta).

Per riprodurre tali condizioni operative, i moduli sono stati collocati su una struttura di sostegno metallica dotata di piano orientabile. I test si sono svolti all'esterno del *Laboratorio di Termotecnica* del *Dipartimento di Ingegneria Industriale* dell'*Università di Perugia* durante i mesi di maggio e giugno, al fine di ottenere valori più elevati di radiazione globale e di temperatura. Calcolando infine che la latitudine del luogo di installazione è dell'ordine di 43° e riducendola di circa $20,5^\circ$ perché le misure vengono compiute all'inizio dell'estate, i moduli



sono stati orientati verso Sud con un'inclinazione di $22,5^\circ$ rispetto al piano orizzontale (Fig. 2).

Figure 2 – Posizionamento del modulo fotovoltaico su un piano inclinato per lo svolgimento delle prove all'esterno.

L'estensimetro a rosetta rettangolare presente su ciascun lato del modulo fotovoltaico (Fig. 3) misura le deformazioni attraverso collegamenti a 1/4 di ponte di Wheatstone, e utilizzando pasta dissipante si è applicata una termoresistenza per la misura della temperatura superficiale. Inoltre i sensori di deformazione e di temperatura posizionati sul lato superiore dell'elemento sono stati schermati con materiale isolante rispetto all'irraggiamento diretto, al fine di evitare errori di misura. Si sono inoltre misurate, in continuo, la radiazione solare incidente per mezzo di una sonda radiometrica posizionata sullo stesso piano inclinato del pannello (la sonda è costituita da una fotocellula e presenta una precisione di $\pm 1 \text{ W/m}^2$) e la temperatura e l'umidità relativa dell'aria per mezzo di una sonda psicrometrica (precisione di $\pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$ e di $\pm 0,1 \%$ rispettivamente).

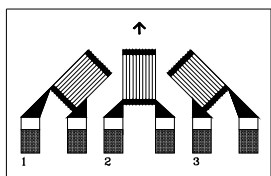


Figure 3 – Estensimetro a rosetta rettangolare: le sezioni complanari sono contrassegnate da un numero.

Il segnale estensimetrico proveniente da entrambi gli estensimetri posizionati sui due lati del campione è rilevato dall'acquisitore multicanale *Spider 8* ed è elaborato attraverso un *PC* ad esso connesso; la radiazione solare, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria sono registrate ad intervalli di 1' dal sistema di acquisizione *Babuc/M*; le temperature superficiali sono rilevate da termoresistenze opportunamente posizionate in prossimità dell'estensimetro e collegate ad un sistema di acquisizione *Delta Logger* (Fig. 4). Per le caratteristiche delle strumentazioni si veda quanto descritto in [2].



Figure 4 – Allestimento dell'apparato strumentale per le misure eseguite all'esterno.

RESULTS

Samples description

Si sono presi in considerazione quattro moduli fotovoltaici, forniti da diverse ditte e caratterizzati da materiali di protezione e di supporto differenti; i quattro campioni sono di seguito descritti:

- campione *PV1* (Fig. 5): è un modulo delle dimensioni di 500 mm × 500 mm e include 16 celle fotovoltaiche in silicio monocristallino; il materiale di protezione (lato superiore) è costituito da una lastra di *Plexiglas* dello spessore di 6 mm (coefficiente di dilatazione termica: $\alpha_S = 83,22 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; modulo di Young: $E = 3.300 \text{ N/mm}^2$), il materiale di supporto (lato inferiore) è costituito da una lastra di *Plexiglas* dello spessore di 14 mm ($\alpha_S = 75,37 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 3.300 \text{ N/mm}^2$); il campione è assemblato mediante incollaggio e non presenta cornice al suo intorno;

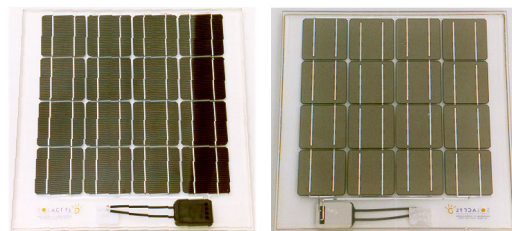


Figure 5 – Campione *PV1*: lato superiore (a sinistra) e lato inferiore (a destra).

- campione *PV2* (Fig. 6): è un modulo delle dimensioni di 700 mm × 500 mm e include 40 celle fotovoltaiche in silicio policristallino; il materiale di protezione (lato superiore) è costituito da una lastra di fluoropolimero *Tefzel* trasparente ($\alpha_S = 8,09 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.070 \text{ N/mm}^2$), il materiale di supporto (lato inferiore) è costituito da una lastra di polivinilfluoride *Tedlar* opaco ($\alpha_S = 12,19 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.300 \text{ N/mm}^2$); il campione è assemblato mediante una cornice metallica in alluminio anodizzato al suo intorno;

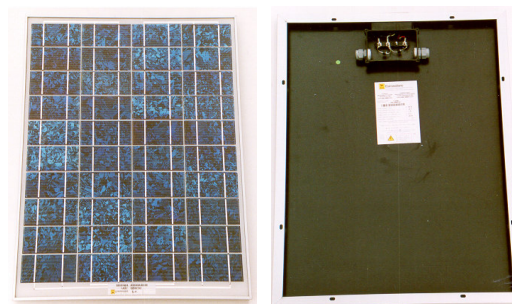


Figure 6 – Campione *PV2*: lato superiore (a sinistra) e lato inferiore (a destra).

- campione *PV3* (Fig. 7): è un modulo delle dimensioni di 440 mm × 305 mm e include 6 celle fotovoltaiche in silicio monocristallino; il materiale di protezione (lato superiore) è costituito da una lastra di fluoropolimero *Tefzel* trasparente ($\alpha_S = 13,30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.070 \text{ N/mm}^2$), il materiale di supporto (lato inferiore) è costituito da una lastra di polivinilfluoride *Tedlar* bianco ($\alpha_S = 67,00 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.103 \text{ N/mm}^2$); il campione è assemblato mediante una cornice metallica in alluminio anodizzato al suo intorno;

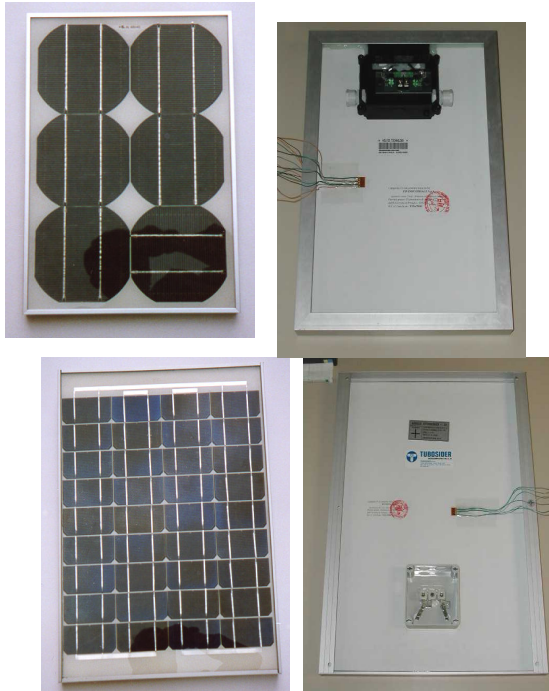


Figure 7 – Campione PV3: lato superiore (a sinistra) e lato inferiore con estensimetro e cavi elettrici (a destra).

- campione PV4 (Fig. 8): è un modulo delle dimensioni di 585 mm × 435 mm e include 36 celle fotovoltaiche in silicio monocristallino; il materiale di protezione (lato superiore) è costituito da una lastra di fluoropolimero *Tefzel* trasparente ($\alpha_s = 13,30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.070 \text{ N/mm}^2$), il materiale di supporto (lato inferiore) è costituito da una lastra di polivinilfluoride *Tedlar* bianco ($\alpha_s = 67,00 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 2.103 \text{ N/mm}^2$); il campione è assemblato mediante una cornice metallica in alluminio anodizzato al suo intorno.

Figure 8 – Campione PV4: lato superiore (a sinistra) e lato inferiore con estensimetro e cavi elettrici (a destra).

Experimental data

Per ciascun campione si sono effettuate almeno tre prove all'esterno. Ciascuna prova si è svolta nell'arco di una giornata, iniziando al mattino (ore 10:45, quando il modulo ancora in ombra sta per essere investito dalla luce solare) e terminando nel pomeriggio (quando il Sole inizia a tramontare e sul modulo torna l'ombra), per una durata minima di rilievo di 5 ore (ore 15:45) e una durata massima di 6 ore e 20 minuti (ore 17:05), compatibilmente con le condizioni atmosferiche. A parità di valori della radiazione globale e della temperatura, le prove relative ad uno stesso modulo hanno fornito risultati congruenti. A titolo di esempio, in Fig. 9, sono riportati i risultati relativi al lato superiore del campione PV3: sono disegnati, in funzione del tempo, l'andamento della deformazione delle tre sezioni del campione, depurata dell'effetto della griglia, quello della radiazione

solare, della temperatura superficiale e della temperatura dell'aria. Risultati analoghi si sono ottenuti per gli altri campioni.

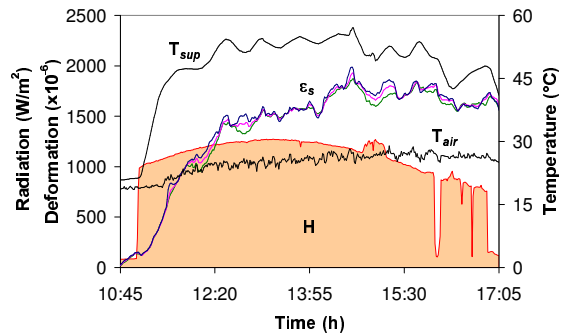


Figure 9 – Risultati relativi al lato superiore del campione PV3: andamento nel tempo della deformazione ϵ_s delle tre sezioni del campione, della radiazione solare H, della temperatura superficiale T_{sup} e della temperatura dell'aria T_{air} .

In Tab. 1 sono riportati i risultati relativi alle deformazioni massime e minime dei due lati dei quattro campioni e dei corrispondenti valori di radiazione solare e temperatura superficiale.

Sample	Lato	$\epsilon_{s,max}$ ($\times 10^6$)	$\epsilon_{s,min}$ ($\times 10^6$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	ΔH (W/m^2)
PV1	sup	5.597,39	5.399,21	43,21	1.243
	inf	3.535,19	3.490,24	27,58	
PV2	sup	1.559,17	1.434,33	34,68	1.147
	inf	1.610,22	1.498,46	34,22	
PV3	sup	1.964,58	1.856,50	36,25	1.190
	inf	2.066,34	1.876,82	35,57	
PV4	sup	2.131,13	2.061,19	38,48	1.150
	inf	2.277,84	1.768,46	37,75	

Table 1 – Deformazioni principali e corrispondenti variazioni di temperatura superficiale e di radiazione solare.

Se tra i componenti di un modulo fotovoltaico sussistono particolari condizioni di vincolo, la dilatazione termica delle superfici viene contrastata inducendo nell'elemento uno stato di coazione. Lo stato di coazione è legato alla deformazione residua che si ha, una volta depurato il risultato della deformazione termica, sia per il lato superiore che per quello inferiore. In Fig. 10 sono riportati gli andamenti della deformazione residua per i due lati del campione PV3, insieme all'andamento della radiazione solare e della temperatura superficiale; in Tab. 2 sono riportati i valori della deformazione residua massima e minima.

In tali circostanze la deformazione ε_S complessivamente misurata (considerando il contributo dell'estensimetro) è il risultato della sovrapposizione degli effetti dei due fenomeni e secondo la *legge di Hooke*:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\Delta T}) = E \cdot (\varepsilon_S - \alpha_S \cdot \Delta T) \quad (8)$$

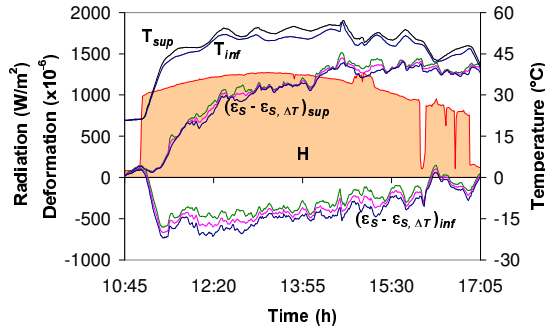


Figure 10 – Risultati relativi al campione *PV3*: andamento nel tempo delle deformazioni di coazione ($\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\Delta T}$) massima, media e minima del lato superiore (*sup*) e di quello inferiore (*inf*) del campione, delle corrispondenti temperature superficiali *T* e della radiazione solare *H*.

Stress calculations

Il calcolo delle tensioni è stato effettuato considerando il principio di sovrapposizione degli effetti; in particolare è noto che in un corpo elastico una variazione di temperatura ΔT a partire da un valore iniziale di riferimento produce una deformazione $\varepsilon_{S,\Delta T}$, definita da:

$$\varepsilon_{S,\Delta T} = \alpha_S \cdot \Delta T \quad (9)$$

dove α_S è il coefficiente di dilatazione termica del materiale esaminato. Quando il corpo è libero di deformarsi, la variazione di temperatura determina allungamenti o accorciamenti senza influenzare lo stato di sollecitazione dell'elemento; se al contrario sussistono particolari condizioni di vincolo, la dilatazione termica viene contrastata ed induce uno *stato di coazione*, per cui la deformazione complessivamente misurata è il risultato della sovrapposizione degli effetti dei due fenomeni. Ciò si verifica, ad esempio, assemblando materiali diversi in un'unica struttura, come nel caso di moduli fotovoltaici.

Secondo la *legge di Hooke*, in termini di tensioni la coazione viene espressa da:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\Delta T}) = E \cdot (\varepsilon_S - \alpha_S \cdot \Delta T) \quad (8)$$

dove *E* rappresenta il *modulo di elasticità normale* o *modulo di Young* ed ε_S è la deformazione misurata. Note allora le principali proprietà termiche e meccaniche dei materiali che costituiscono lo strato superiore di protezione e quello inferiore di supporto, fra i quali sono poste le celle fotovoltaiche, dalle precedenti valutazioni delle deformazioni si possono dedurre informazioni sulle tensioni del campione in corrispondenza dei punti presi in esame.

Al fine di verificare la resistenza a rottura delle celle, si sono calcolate le tensioni massime, che sono state confrontate con le tensioni ammissibili dei diversi

materiali. Il calcolo delle tensioni è stato effettuato considerando i valori delle deformazioni lungo le tre direzioni principali, calcolate a partire dalle deformazioni lungo le tre direzioni di misura. I valori delle deformazioni principali e delle corrispondenti tensioni sono riportati in Tab. 2:

Sample	Lato	$(\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\Delta T})_{max}$ ($\times 10^{-6}$)	$(\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\Delta T})_{min}$ ($\times 10^{-6}$)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)
<i>PV1</i>	sup	2.279,78	1.996,91	7,52	6,59
	inf	1.673,71	1.564,04	5,53	5,16
<i>PV2</i>	sup	1.314,82	1.196,11	2,72	2,48
	inf	1.193,08	1.081,32	2,74	2,49
<i>PV3</i>	sup	1.489,91	1.384,40	3,08	2,87
	inf	- 622,25	- 752,41	- 1,31	- 1,58
<i>PV4</i>	sup	1.620,38	1.549,40	3,35	3,21
	inf	- 432,55	- 944,74	- 0,91	- 1,99

Table 2 – Deformazioni principali di coazione e corrispondenti valori delle tensioni

I risultati mostrano che:

- il campione *PV1* ha un foglio superiore di protezione e uno inferiore di supporto di diverso spessore, ma realizzati nello stesso materiale (*Plexiglas*), che possiede un coefficiente di dilatazione termica elevato. I due strati sono incollati l'uno sull'altro senza essere vincolati da una cornice e subiscono deformazioni con allungamenti su entrambi i lati: le fibre, dunque, sono tese sia sulla superficie esposta alla radiazione solare sia su quella in ombra. Tale comportamento risulta influenzato dall'elevata temperatura raggiunta dalla cella, che induce deformazioni sui materiali tra i quali è collocata; i valori massimi della tensione sono dell'ordine di 7,5 N/mm², comunque inferiori ai valori ammissibili ($\sigma_{adm} = 72,40$ N/mm²);
- anche per il campione *PV2* si registrano allungamenti sui due lati, ma in questo caso cambiano i materiali (fluoropolimero *Tefzel* trasparente e polivinilfluoride *Tedlar* opaco) ed è presente una cornice in alluminio anodizzato: nonostante tale vincolo, per effetto delle variazioni di temperatura associate all'irraggiamento solare si osserva un comportamento deformativo caratterizzato ancora da tensioni di trazione su entrambe le superfici; i valori massimi della tensione sono dell'ordine di 2,7 N/mm², comunque inferiori ai valori ammissibili ($\sigma_{adm} = 68,00$ N/mm² per il lato inferiore; $\sigma_{adm} = 47,00$ N/mm² per il lato superiore);
- i campioni *PV3* e *PV4* sono entrambi realizzati con *Tefzel* trasparente e *Tedlar* bianco ed hanno un comportamento simile: si registrano allungamenti sul lato superiore ed accorciamenti su quello inferiore, ovvero fibre tese superiormente e fibre compresse inferiormente. Anche questi moduli sono dotati di

cornice metallica, ma le condizioni di assemblaggio e le proprietà dei componenti determinano un comportamento differente da quello del campione PV2; i valori estremi della tensione sono dell'ordine di $-2 \div +3,4 \text{ N/mm}^2$, comunque inferiori ai valori ammissibili ($\sigma_{adm} = -55,00 \text{ N/mm}^2$ per il lato inferiore; $\sigma_{adm} = 47,00 \text{ N/mm}^2$ per il lato superiore).

CONCLUSIONS

Per effetto dell'irraggiamento solare i moduli fotovoltaici sono interessati da sollecitazioni termiche di differente entità sui due lati, che determinano in ogni punto un particolare stato di deformazione e di tensione. A volte la libera dilatazione delle superfici è contrastata dalle condizioni di vincolo esistenti tra i vari componenti e le deformazioni dei due fogli di protezione e di supporto possono provocare danni strutturali alle celle fotovoltaiche contenute al loro interno.

È nell'ambito di questo problema che si inserisce il presente studio, il cui obiettivo è la *valutazione sperimentale delle deformazioni e delle tensioni di moduli fotovoltaici sottoposti all'irraggiamento solare*, attraverso un procedimento basato su misure estensimetriche eseguite contemporaneamente sul lato del campione esposto alla radiazione solare e su quello in ombra, le cui temperature assumono andamenti diversi. Tali misure sono rese possibili dalla realizzazione di circuiti separati, che collegano gli estensimetri al sistema di acquisizione secondo lo schema a *1/4 di ponte di Wheatstone*.

Depurando i dati dall'influenza dell'estensimetro e interpretando i risultati ottenuti, si è giunti alle seguenti conclusioni:

- nei campioni PV1 e PV2, diversi per i materiali di protezione e di supporto e per l'assenza e la presenza di cornice, lo stato di coazione è caratterizzato da sforzi di trazione su entrambe le superfici: l'elevata temperatura raggiunta dalla cella fotovoltaica deforma il foglio superiore e quello inferiore provocando localmente l'allungamento di entrambi;
- nei campioni PV3 e PV4, costruiti con gli stessi materiali ed entrambi dotati di cornice, lo stato di coazione è caratterizzato da fibre tese sulla superficie esposta alla radiazione solare e fibre compresse su quella in ombra: la dilatazione del lato inferiore del modulo risulta pertanto ostacolata.

La possibilità di verificare lo stato di deformazione e di tensione dei materiali di un modulo fotovoltaico in condizioni di esercizio, consentita dal metodo di misura adottato nella presente sperimentazione, permette di valutare le condizioni critiche e quindi di evitare danni strutturali alle celle fotovoltaiche racchiuse all'interno dei materiali di protezione e di supporto. Tali informazioni acquistano particolare rilievo ai fini dell'integrazione dei sistemi fotovoltaici nelle barriere acustiche antirumore [1] e nelle strutture di rivestimento degli edifici (*facciate e tetti fotovoltaici*), dove i moduli interagiscono con altri elementi e richiedono un attento studio dei giunti. Dai dati raccolti si possono ricavare indicazioni utili a diversi

stadi (progettazione, prove di sicurezza e sovraccarico, condizioni di rottura in servizio) per realizzare prodotti affidabili e sicuri.

REFERENCES

- [1] F. Asdrubali, C. Buratti, C. Simoncini: "Airborne sound insulation and absorption of noise barriers with photovoltaic modules", 17th International Congress on Acoustics ICA 2001, Rome, September 2001;
- [2] C. Buratti, S. Ortica: "Experimental data of thermal expansion coefficient on artistic glass", 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics HEFAT 2002, Kruger International Park, South Africa, April 8-10 2002;
- [3] AA. VV., "Energia dal Sole", ENEA-ISES Italia;
- [4] L. Fedele, "Stato dell'arte delle fonti energetiche nuove e rinnovabili in Italia", ISES Italia;
- [5] G. Comini, G. Cortella, "Energistica generale", SGE editoriali;
- [6] A. Bosio, "Sistemi energetici", SGE editoriali;
- [7] C. Mencuccini, V. Silvestrini, "Fisica II - Elettromagnetismo Ottica", Liguori;
- [8] R. Baldacci, "Scienza delle costruzioni", UTET;
- [9] V. I. Feodosev, "Resistenza dei materiali", MIR;
- [10] F. P. Branca, "Misure meccaniche", ESA;
- [11] G. Minelli, "Misure meccaniche", Patron;
- [12] K. Wellinger, "Caratteristiche e prove dei materiali", PEM;
- [13] *Manuale dell'ingegnere - Nuovo Colombo*, Hoepli;
- [14] *Energy and buildings*;
- [15] *Solar energy materials & solar cells*;
- [16] *Progress in photovoltaics*.