

# Ricerca di Sistema elettrico



**Nuovi polimeri incapsulanti per moduli fotovoltaici  
eco-compatibili: caratterizzazione, durabilità,  
affidabilità (LA1.30)**

Valeria Fiandra, Lucio Sannino, Concetta Andreozzi,  
Pietro Scognamiglio

RdS\_PTR 22-24\_PR 1.1\_LLA1.30\_050

NUOVI POLIMERI INCAPSULANTI PER MODULI FOTOVOLTAICI ECO-COMPATIBILI:  
CARATTERIZZAZIONE, DURABILITÀ, AFFIDABILITÀ (LA1.30)

Valeria Fiandra, Lucio Sannino, Concetta Andreozzi, Pietro Scognamiglio  
ENEA – TERIN FSD DIN

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 “Fotovoltaico ad alta efficienza”

Linea di attività: LA1.30

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	3
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	3
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	3
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	4
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
8	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	14

## 1 Risultati attesi

Questa linea di attività è mirata alla progettazione ecocompatibile di moduli fotovoltaici realizzata mediante l'utilizzo di polimeri alternativi agli incapsulanti convenzionali, al fine di ridurre i difetti dei moduli, estenderne la durata della vita e aumentarne l'affidabilità.

I risultati attesi dalla LA1.30 come da capitolato sono: Selezione di polimeri alternativi all'EVA, utilizzabili come incapsulanti per celle fotovoltaiche. Approvvigionamento dei materiali selezionati. Caratterizzazione chimico-fisica dei polimeri pre-laminazione e determinazione delle proprietà elettriche, ottiche e termiche dei diversi polimeri.

## 2 Risultati ottenuti

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Selezione di nuovi materiali polimerici, alternativi all'EVA, utilizzabili come incapsulanti per celle fotovoltaiche;
- approvvigionamento di film polimerici dei materiali selezionati;
- caratterizzazioni chimico-fisiche dei polimeri pre-laminazione e determinazione delle proprietà elettriche, ottiche e termiche dei diversi polimeri;
- prove di invecchiamento accelerato dei materiali;
- verifica delle caratteristiche dei materiali dopo l'invecchiamento;
- individuazione degli incapsulanti con le migliori performance.

## 3 Prodotti attesi

Report tecnico-scientifico dal titolo: "Nuovi polimeri incapsulanti per moduli fotovoltaici eco-compatibili: caratterizzazione, durabilità, affidabilità"

## 4 Prodotti sviluppati

Il presente report: "Nuovi polimeri incapsulanti per moduli fotovoltaici eco-compatibili: caratterizzazione, durabilità, affidabilità" - RdS\_PTR 22-24\_PR 1.1\_LA1.30\_050

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il lavoro è proceduto secondo le previsioni e le attività pianificate hanno raggiunto gli obiettivi stabiliti. Non si segnalano, quindi, scostamenti tra i risultati attesi e quelli ottenuti.

## 6 Sintesi delle attività svolte

È stata investigata la variazione delle proprietà chimico/fisiche di diversi materiali incapsulanti non convenzionali a seguito di invecchiamento UV. Sono state analizzate tre classi di polimeri: etilene-vinilacetato (EVA), comunemente utilizzato come incapsulante, poliolefine termoplastiche (TPO) ed elastomeri poliolefinici (POE). In una camera climatica sono state simulate condizioni ambientali stressanti, valutando la variazione delle proprietà di diversi film polimerici prima e dopo invecchiamento UV. Il legame tra la struttura chimica, la formulazione e la degradazione degli incapsulanti con la loro durata in condizioni simulate di stress UV è stato studiato valutando i cambiamenti nella stabilità termica, trasmittanza ottica, cristallinità, indice di ingiallimento e degradazione chimica.

L'analisi dei risultati delle caratterizzazioni ha consentito di selezionare i film polimerici con migliori prestazioni per testarli nei dispositivi da realizzare nel prosieguo delle attività.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Materiali e metodi

Film polimerici incapsulanti, con formulazioni chimiche nuove rispetto all'EVA comunemente usato, appartenenti a tre diverse classi di polimeri: EVA, POE e TPO, sono stati acquistati da 4 aziende specializzate del settore fotovoltaico:

- EVA-05, EVA-05HTL, POE-05 e POE-05HTL da Satinal spa;
- TPO e TPO-m da MG Lavorazioni plastiche;
- EVA-3M, TPO-3M, POE-8110 e POE-8510 da 3M;
- EVA-MW da MrWATT.

Per studiare l'impatto dell'invecchiamento causato da radiazione UV, su proprietà, caratteristiche e struttura degli 11 diversi polimeri, questi sono stati sottoposti ad invecchiamento UV accelerato in una camera climatica e sono state effettuate caratterizzazioni analitiche in funzione della dose UV somministrata e del tempo di invecchiamento. In particolare, sono stati studiati: stabilità termica mediante TGA, cristallinità mediante DSC, trasmittanza ottica mediante spettroscopia UV-Vis, ingiallimento mediante colorimetria e degradazione chimica mediante spettroscopia ATR-FTIR.

Per simulare ed accelerare i processi di fotodegradazione che avvengono nel materiale incapsulante, i campioni sono stati esposti ad un'intensità di irraggiamento UV di 22, 74, 126 e 214 kWh/m<sup>2</sup>, in quattro step consecutivi, con umidità relativa del 60% ed alla temperatura di 60 °C. Le risposte dei vari materiali all'invecchiamento accelerato sono state confrontate e gli incapsulanti con le migliori performance sono stati scelti per realizzare mini-dispositivi fotovoltaici da testare nella LA1.31.

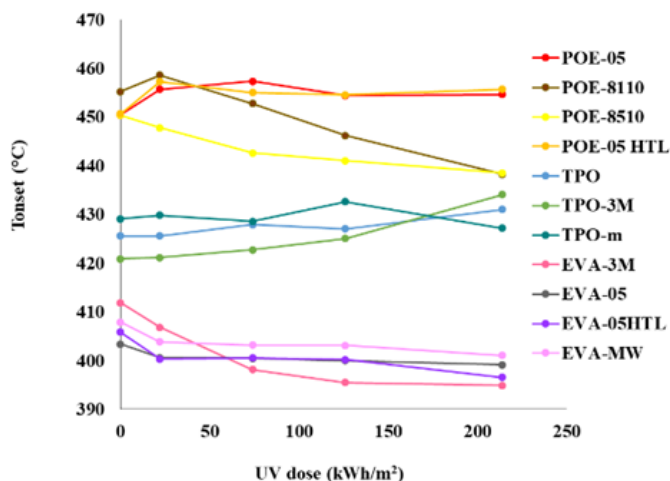
### 7.2 Stabilità termica di incapsulanti invecchiati

La stabilità termica e gli stadi di decomposizione termica dei film incapsulanti sono stati analizzati mediante TGA. L'EVA mostra due step di degradazione, la prima è dovuta alla deacetilazione e inizia intorno ai 260°C, la seconda è dovuta alla decomposizione della catena principale del polietilene [1]. A differenza dell'EVA, POE e TPO hanno un unico stadio di degradazione, rispettivamente a circa 450°C e 425°C, dovuto alla scissione della catena polimerica principale [2]. Le  $T_{onset}$  delle fasi di transizione sono state calcolate ed elencate nella Tabella 1 per tutti gli incapsulanti. I POE hanno le migliori prestazioni termiche. L'analisi TGA permette di valutare la variazione della temperatura di  $T_{onset}$  dei materiali causata dall'invecchiamento UV.

**Tabella 1**  $T_{onset}$  di tutti gli incapsulanti calcolate mediante analisi TGA prima dell'invecchiamento UV.

Incapsulante	$T_{onset}$ (°C)	
	Primo stadio	Secondo stadio
EVA-MW	256	408
EVA-05HTL	261	406
EVA-05	274	403
EVA-3M	274	412
POE-05	450	/
POE-05HTL	451	/
POE-8510	450	/
POE-8110	455	/
TPO	426	/
TPO-M	429	/
TPO-3M	421	/

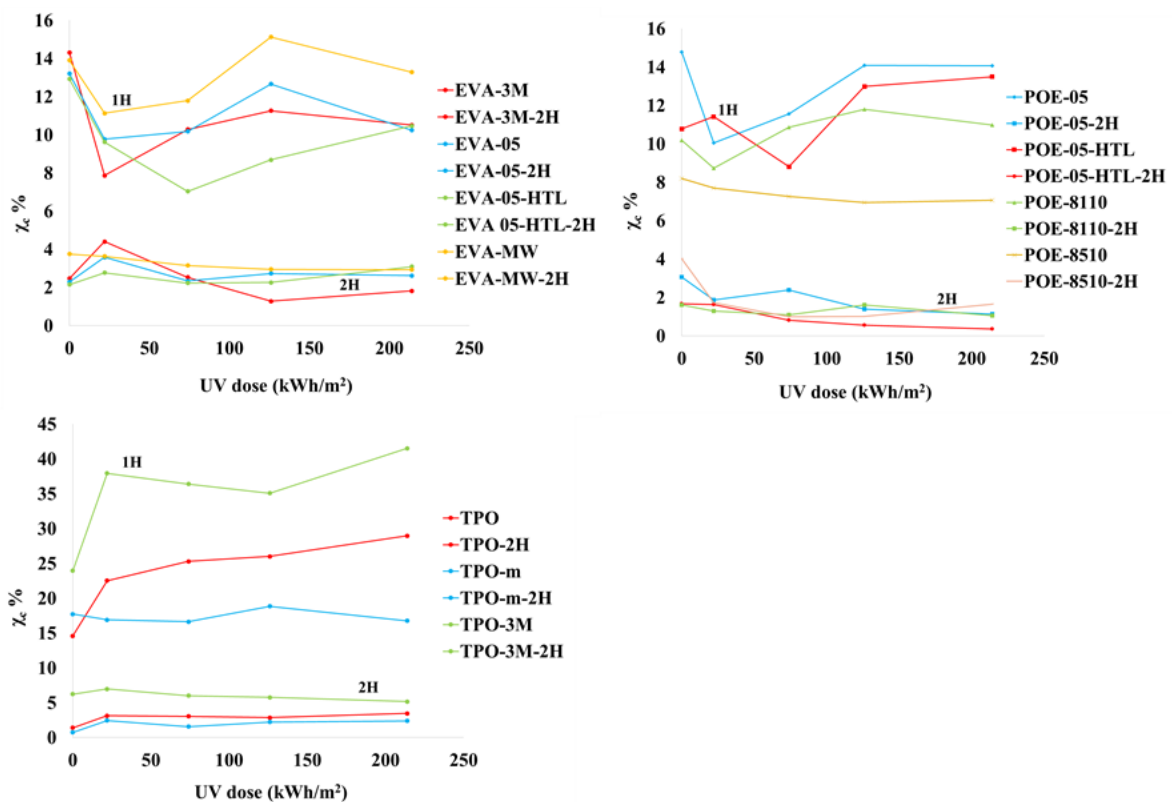
Nella Fig. 1 sono mostrati i cambiamenti nelle  $T_{onset}$  dei diversi incapsulanti dopo l'esposizione a dosi UV crescenti. POE-05 e POE-05HTL sono gli incapsulanti termicamente più stabili:  $T_{onset}$  non cambia all'aumentare della dose UV. Invece, POE-8110 e POE-8510 subiscono una diminuzione del  $T_{onset}$  rispettivamente di circa 19,9 e 11,8 °C. Il TPO-m è termicamente stabile, la  $T_{onset}$  di TPO-3M aumenta di 13,2°C e quella di TPO-m diminuisce leggermente. Nella Fig. 1 si osserva anche che la  $T_{onset}$  di tutti i campioni EVA diminuisce all'aumentare dell'invecchiamento UV. Tra i campioni EVA, quello termicamente meno stabile è EVA-3M, infatti la sua  $T_{onset}$  diminuisce di 16,9 °C. Tuttavia, tra tutti gli incapsulanti studiati, anche dopo l'invecchiamento UV, per i campioni POE, la degradazione della catena principale del polimero inizia solo intorno ai 438 °C, fornendo migliori prestazioni in campo ai moduli fotovoltaici fabbricati con questi polimeri.



**Figura 1.**  $T_{onset}$  del secondo stadio di degradazione per diversi incapsulanti EVA e  $T_{onset}$  di decomposizione termica per diversi incapsulanti TPO e POE prima e dopo l'invecchiamento UV, calcolati mediante analisi TGA.

### 7.3 Proprietà termiche e cristallinità

Le variazioni delle proprietà termiche di tutti gli incapsulanti, causate dall' invecchiamento UV, dovute sia a processi fisici che chimici, sono state studiate mediante analisi DSC. Per lo studio dei processi di fusione e cristallizzazione, ciascun campione è stato sottoposto a un primo ciclo di riscaldamento (1H) da 20 a 200°C, seguito da un ciclo di raffreddamento da 200 a 20°C e un secondo ciclo di riscaldamento (2H) da 20 a 200°C. Processi chimici, come la scissione della catena, e processi fisici come la perdita di un additivo antiossidante o stabilizzante o fenomeni di post cristallizzazione, possono portare a cambiamenti nella temperatura di fusione e nel flusso di calore [3]. Le variazioni dell'entalpia di fusione sono state utilizzate per valutare il grado di cristallinità. In Fig. 2 è mostrato l'andamento della cristallinità in funzione dell'invecchiamento UV per tutti gli incapsulanti. L'andamento altalenante delle curve è indice della complessa natura semicristallina dei polimeri. Durante i test di invecchiamento, effettuati a 60°C e cioè nell'intervallo di fusione, i cristalli più piccoli si sciolgono e poi ricristallizzano per formare cristalli più spessi, che fondono a temperature più elevate [4].



**Figura 2.** Evoluzione della cristallinità dopo l'esposizione ai raggi UV dei diversi incapsulanti prima e dopo il secondo riscaldamento (1H e 2H).

Come mostrato in Fig. 2, nel primo riscaldamento, la cristallinità di tutti i campioni EVA e di tutti i campioni POE diminuisce inizialmente, per poi aumentare con il progredire dell'invecchiamento UV, ad eccezione del POE-8510 per il quale diminuisce leggermente e costantemente. Invece durante il primo riscaldamento, la cristallinità di TPO e TPO-3M aumenta, mentre per TPO-m rimane costante. TPO-3M ha il più alto grado di cristallinità. I cambiamenti della cristallinità sono parzialmente reversibili e l'aumento della cristallinità degli incapsulanti indica il verificarsi di cristallizzazione secondaria [5]. Nel secondo riscaldamento non si osservano cambiamenti significativi nella cristallinità per quasi tutti i campioni, suggerendo che non subiscono cambiamenti chimici, ma solo effetti di invecchiamento fisico. I campioni di TPO sono chimicamente più stabili.

La diversa influenza dell'invecchiamento sulla cristallinità degli incapsulanti è probabilmente correlata a vari fattori: la formulazione specifica, in particolare gli additivi, la cristallinità iniziale, la temperatura di fusione e il contenuto di VA nei campioni EVA. POE-8510 ha il grado di cristallinità più basso (8%) e TPO-3M ha il grado di cristallinità più alto (24%). Le curve DSC dei campioni di TPO mostrano due picchi a temperature di fusione (intorno a  $48^\circ\text{C}$  e  $97^\circ\text{C}$ ) superiori a quelle dei film EVA e POE. Il TPO, infatti, non contiene gruppi laterali che potrebbero ostacolare la cristallizzazione delle sequenze PE; quindi, presenta un grado più elevato di cristallinità.

Tipicamente, è preferibile un basso grado di cristallinità poiché generalmente fornisce una maggiore trasmittanza ottica, minore rigidità, fragilità e maggiore flessibilità/deformazione nei moduli fotovoltaici. D'altra parte, l'incidenza dei meccanismi di degradazione è maggiore sui polimeri con cristallinità inferiore, poiché la migrazione dell'ossigeno atmosferico o di un prodotto di degradazione generato durante l'esposizione ai raggi UV è facilitata in strutture con un grado di cristallinità inferiore. Dopo l'invecchiamento UV, la cristallinità di tutti i campioni EVA diminuisce, poco significativamente solo per EVA-MW; aumenta per TPO e TPO-3M, mentre per TPO-m ha solo una piccola diminuzione; aumenta per POE-05HTL e POE-8110, mentre diminuisce leggermente per POE-8510 e POE-05.

## 7.4 Proprietà ottiche

Durante l'esercizio in campo di un modulo fotovoltaico, l'umidità, i cicli termici e le radiazioni UV causano la degradazione dell'incapsulante. L'invecchiamento UV in particolare, influisce in modo intenso sull'ingiallimento dei polimeri, determinando una diminuzione della loro trasmittanza [6]. Ciò porta ad una perdita di potenza dei moduli nel tempo ed una minore durata. Nel caso dell'EVA, l'invecchiamento UV porta anche alla perdita di VA sotto forma di acido acetico, con conseguente corrosione delle parti metalliche del modulo [7]. L'analisi UV-Vis consente di valutare la trasparenza dei film incapsulanti nel campo del visibile, la presenza di additivi quali assorbitori UV, agenti indurenti, stabilizzanti della luce e la formazione di specie insature, responsabili dello scolorimento durante l'invecchiamento [8].

In Fig. 3, la variazione della trasmittanza a 550 nm in funzione della dose UV, determinata a valle dei 4 step di invecchiamento, è mostrata per i diversi incapsulanti.

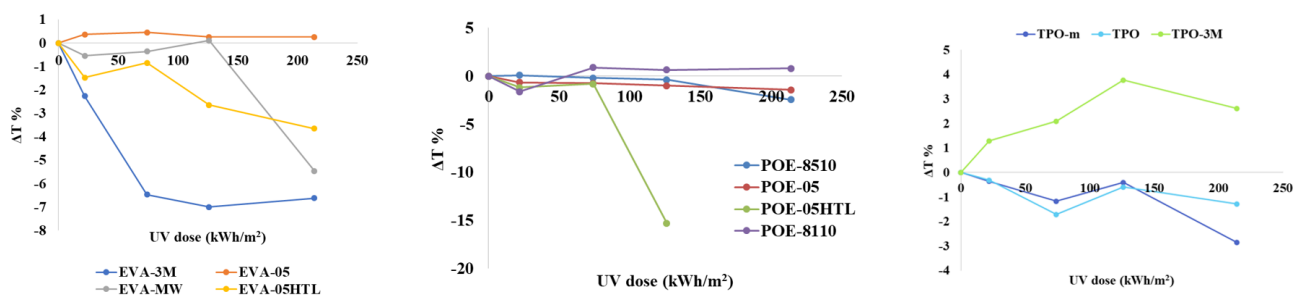


Figura 3. Variazione della trasmittanza ( $\Delta T$ ) a 550 nm vs dose UV per differenti incapsulanti.

Per quanto riguarda gli EVA, una diminuzione maggiore del valore di trasmittanza è osservabile per EVA-3M (6.62%) ed EVA-MW (5,46%), probabilmente a causa di un contenuto di VA più elevato. Nella regione tra 300 e 320 nm degli spettri UV, per EVA-05 si osserva un leggero aumento della T%, che potrebbe essere correlato al consumo degli assorbitori UV, mentre per EVA-MW ed EVA-3M è trascurabile, grazie alla tenuta dell'assorbitore UV.

Per quanto riguarda i POE, solo POE-05HTL subisce un'elevata degradazione dopo il terzo invecchiamento UV ed è completamente degradato al quarto step. POE-05 mostra la minore perdita di trasmittanza e una piccola diminuzione della lunghezza d'onda di cut-off, suggerendo la buona tenuta dell'assorbitore UV.

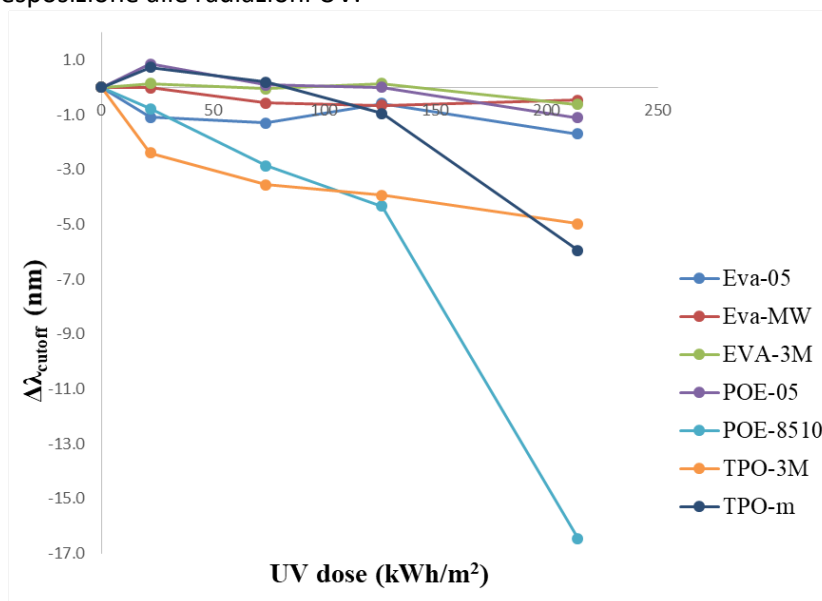
Per quanto riguarda i TPO, l'aumento del  $\Delta T\%$  per TPO-3M può derivare dalla riduzione della cristallinità del materiale. Probabilmente, la robustezza del TPO-3M deriva anche dal miglioramento della formulazione degli additivi e dalla riduzione della concentrazione di antiossidanti. TPO e TPO-m mostrano una modesta variazione del  $\Delta T\%$ , indice di un iniziale deterioramento degli additivi fino alla dose UV di 74 kWh/m<sup>2</sup>, seguito da un piccolo aumento di  $\Delta T\%$ , osservato alla dose UV di 126 kWh/m<sup>2</sup>, indice che altre specie che assorbono UV sono in corso di formazione. Questi cambiamenti di  $\Delta T\%$  sono seguiti da una degradazione finale maggiore per TPO-m e minore per TPO.

In Tabella 2, T % a 550 nm e UV cut-off al 10 % di Trasmittanza sono elencate per tutti i campioni non invecchiati. EVA-05HTL, POE-05HTL, POE-8110 e TPO non sono stabilizzati UV e sono trasparenti nella regione UV (250 - 400 nm). POE-8510 ha tre lunghezze d'onda di cut-off dovute alla presenza di additivi ed è semitrasparente nella regione UV (250–400 nm), compensando la minore trasmittanza nella regione visibile. Nella regione visibile, EVA-3M ha la lunghezza d'onda di cut-off più alta a 366 nm e la trasmittanza più alta (94.03 T%), seguito da POE-05HTL (92.71 T%), POE-05 (92.68 T%) e EVA-MW (92.47 T%).

**Tabella 2** Percentuale di luce trasmessa a 550 nm e UV cut-off wavelength a 10 % T di incapsulanti non invecchiati.

Incapsulanti non invecchiati	% T a 550 nm (400 – 800 nm)	UV cut-off wavelength a 10 % T (nm)
EVA-MW	92	360
EVA-05HTL	90	N.D.
EVA-05	88	354
EVA-3M	94	366
POE-05	93	355
POE-05HTL	93	N.D.
POE-8510	85	255 - 278 - 373
POE-8110	90	N.D.
TPO	90	N.D.
TPO-m	90	364
TPO-3M	87	362

Nella Fig. 4 è mostrata la variazione della lunghezza d'onda di cut-off in funzione della dose UV per tutti i campioni. Con l'invecchiamento, i cut-off di TPO-3M, TPO-m e POE-8510 diminuiscono maggiormente rispetto agli altri incapsulanti. EVA-05 e POE-05 hanno i valori di cut-off più bassi ma subiscono una variazione minore in seguito all'esposizione alle radiazioni UV.



**Figura 4.** Variazione nella lunghezza d'onda UV di cut-off al 10 % T vs dose UV per vari incapsulanti.

Inoltre, per ciascun campione, la variazione dell'indice di ingiallimento (YI) è stata calcolata come differenza tra il valore misurato dopo ciascuna esposizione alla dose UV e il valore misurato sul campione non invecchiato.

La Fig. 5 mostra che la variazione di YI aumenta all'aumentare della dose UV per tutti i tipi di incapsulanti: POE-05HTL ha mostrato un notevole incremento nella variazione del valore YI rispetto ad altri materiali, seguito da EVA-05HTL e TPO-m.

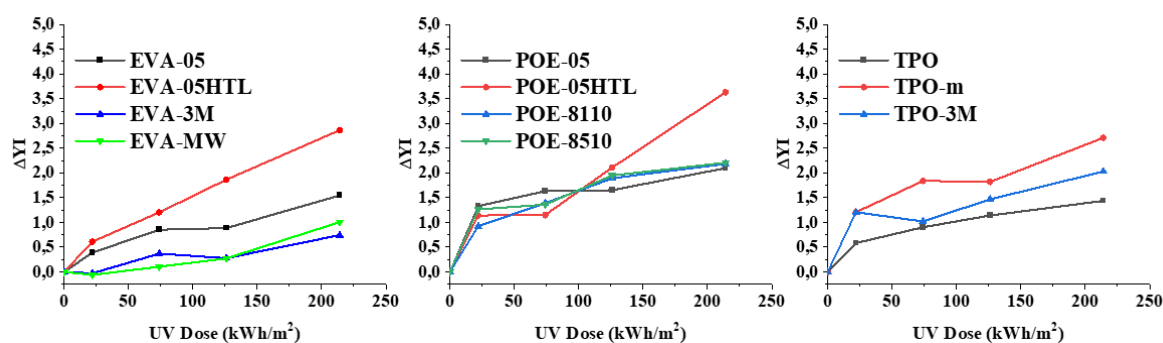


Figura 5. Variazione dell'indice di ingiallimento (YI) per i film incapsulanti dopo test di invecchiamento accelerato UV.

## 7.5 Foto-degradazione

L'invecchiamento UV provoca anche cambiamenti strutturali nei polimeri e di conseguenza i gruppi funzionali nelle molecole variano [9]. Mediante spettroscopia ATR-FTIR, sono state investigate l'evoluzione della degradazione chimica e la formazione dei prodotti di degradazione come acidi carbossilici, chetoni, aldeidi e lattoni, in conseguenza dell'invecchiamento UV. Le regioni dei gruppi carbonilico (C=O) ed etero (C-O-C) sono state analizzate per valutare la degradazione degli incapsulanti. Pertanto, sono stati calcolati l'indice carbonilico ( $CI = A_x / A_{2850}$ ) e l'indice di ossidazione ( $OI = A_y / A_{2850}$ ), dove  $A_{2850}$  è l'area dei picchi delle vibrazioni di stretching C-H del metilene a  $2850 \text{ cm}^{-1}$ , usata come riferimento per l'analisi quantitativa, e  $A_x$  e  $A_y$  sono l'area dei picchi riferiti alle vibrazioni di stretching C=O e C-O-C dei gruppi funzionali target [10]. Per i campioni di EVA, sono stati integrati i picchi tra  $1780\text{-}1712 \text{ cm}^{-1}$  e tra  $1185$  a  $1020 \text{ cm}^{-1}$  ed in Fig. 6, sono mostrati CI e OI. L'andamento del CI rivela che tutti i campioni di EVA subiscono una degradazione chimica fino alla fine dell'invecchiamento, dovuta ad un'ossidazione nel segmento dell'etilene o del VA e alla formazione di prodotti di ossidazione contenenti gruppi carbonilici. EVA-05 è il più instabile dei quattro campioni, a causa della presenza di elevati livelli di specie fotoattive che contribuiscono alla degradazione del polimero.

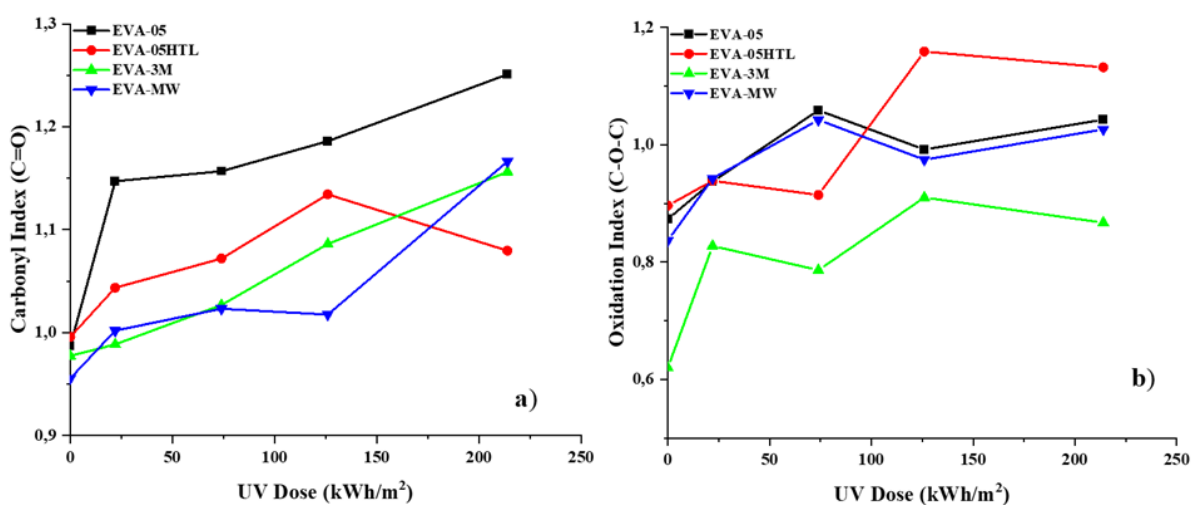


Figura 6. a) Carbon index (CI) e b) Oxidation index (OI) dei film incapsulanti EVA, riferiti rispettivamente alle variazioni dei gruppi funzionali C=O e C-O-C.

Tra il terzo ed il quarto invecchiamento, solo l'EVA-05HTL mostra una diminuzione del CI, a causa della maggiore deacetilazione che implica una diminuzione della concentrazione del gruppo carbonilico estereo. Anche l'OI aumenta con l'invecchiamento per tutti i campioni EVA, suggerendo l'ossidazione della struttura portante.

Nella Fig. 7, vengono mostrati CI e OI dei campioni POE, calcolati integrando le aree dei picchi corrispondenti alle vibrazioni C=O nell'intervallo 1757-1673  $\text{cm}^{-1}$  e alle vibrazioni C-O-C nell'intervallo 897-1200  $\text{cm}^{-1}$ .

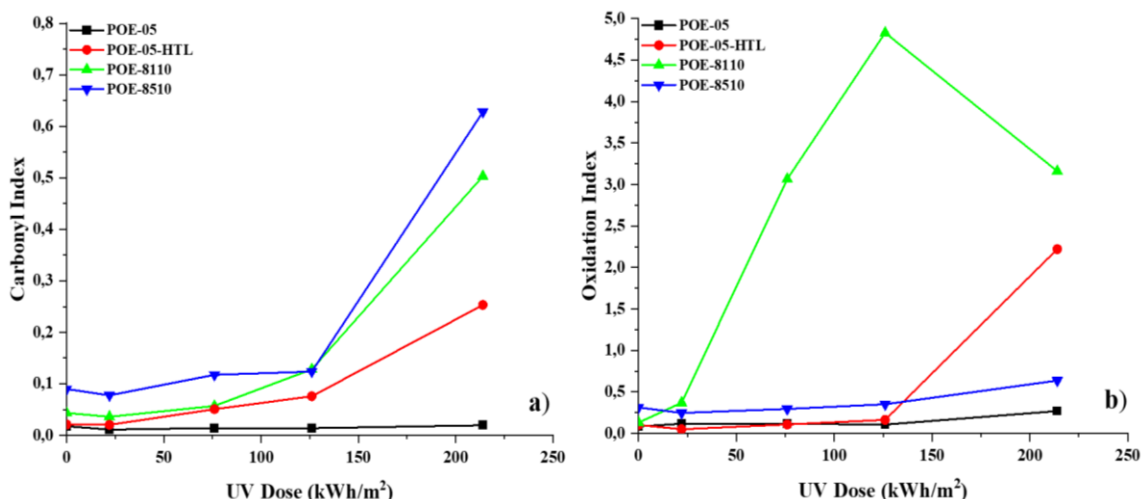


Figura 7. a) Carbon index (CI) e b) Oxidation index (OI) per film incapsulanti POE, riferiti rispettivamente alle vibrazioni del gruppo funzionale C=O e dei prodotti di ossidazione nella regione 897-1200  $\text{cm}^{-1}$ .

Fino al terzo invecchiamento, non si notano cambiamenti significativi nel CI per tutti i campioni POE, mentre dopo il quarto invecchiamento, la degradazione chimica diventa importante per POE-8510 e POE-8110, mentre è evidente in misura minore per POE-05HTL. L'OI del POE-8110 subisce le modifiche più significative, aumenta molto fino al terzo invecchiamento e poi diminuisce, probabilmente a causa della perdita di additivi e alla conseguente formazione di prodotti di ossidazione. POE-05 è l'incapsulante che mostra la maggiore stabilità chimica.

In Fig. 8, CI e OI sono mostrati per i film incapsulanti TPO. L'invecchiamento artificiale di tutti i campioni di TPO non provoca cambiamenti significativi nell'indice carbonilico; solo il TPO-3M subisce una leggera degradazione chimica. Pertanto, la degradazione avviene in misura molto inferiore rispetto a EVA e POE.

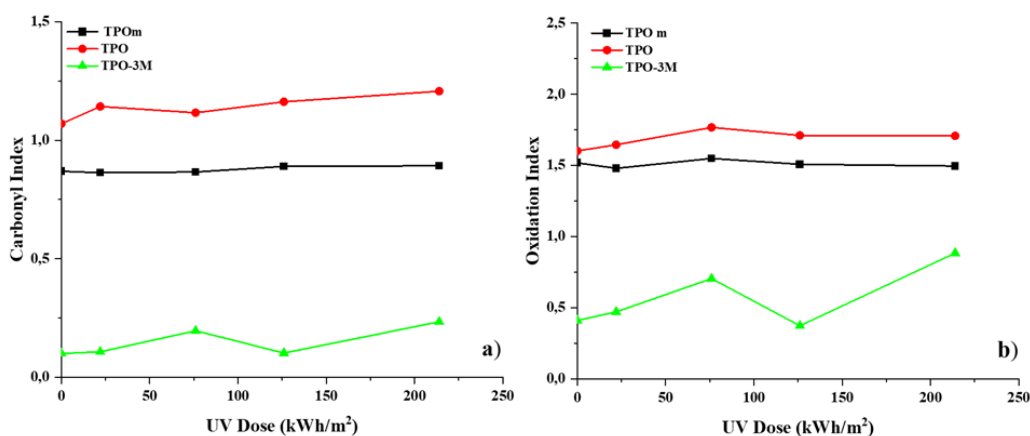


Figura 8 a) Carbon index (CI) e b) Oxidation index (OI) dei film incapsulanti TPO, riferiti rispettivamente alle variazioni dei gruppi funzionali C=O e C-O-C.

## 7.6 Conclusion

Nella Tabella 3 sono riassunti i risultati delle caratterizzazioni effettuate e sono evidenziate le variazioni delle proprietà caratteristiche specifiche di vari incapsulanti sottoposti ad invecchiamento UV.

Encapsulant	Thermal stability	Crystallinity %		T % at 550 nm		Additives loss	Yellowing $\Delta YI$	Chemical degradation
		Unaged	$\Delta(\gamma\%)$	Unaged	$\Delta(T\%)$			
EVA-MW	Low	13.9	-0.62	92.47	-5.46	Negligible	1.01	High
EVA-05	Low	13.2	-2.97	88.24	0.26	Yes	1.55	High
EVA-05HTL	Low	12.9	-2.45	89.62	-3.66	Yes	2.86	High
EVA-3M	Very low	14.3	-3.80	94.03	-6.62	No	0.74	High
POE-05	Very high	14.8	-0.71	92.68	-1.44	Negligible	2.01	Very low
POE-05HTL	Very high	10.8	2.71	92.71	-15.30	High	3.63	Low
POE-8510	Low	8.2	-1.12	85.43	-2.45	Low	2.21	High
POE-8110	Low	10.2	0.80	90.50	0.80	High	2.18	High
TPO	High	14.6	14.00	89.64	-1.29	High	1.44	Very low
TPO-m	High	17.7	-0.96	90.45	-2.85	Low	2.71	No
TPO-3M	High	23.9	17.58	86.78	2.61	No	2.03	Low

Tabella 3 Riepilogo delle proprietà degli incapsulanti dopo invecchiamento UV.

I risultati ottenuti dai test di invecchiamento UV mostrano che la degradazione dell'incapsulante dipende non solo dalla base polimerica principale utilizzata, ma anche dalla sua formulazione, cioè dal tipo e dalla quantità degli additivi utilizzati. La presenza di assorbitori UV, antiossidanti e stabilizzanti UV, gioca un ruolo importante sulla durabilità dell'incapsulante e quindi sull'affidabilità di un modulo fotovoltaico.

I test e le caratterizzazioni effettuati hanno permesso di individuare gli incapsulanti con le migliori proprietà ottiche e la più alta resistenza alla degradazione. Alcuni di essi verranno usati per la realizzazione di prototipi di dispositivi nel prosieguo dell'attività.

## Bibliografia

- [1] C. Farrell, A.I. Osman, J. Harrison, A. Vennard, A. Murphy, R. Doherty, M. Russell, V. Kumaravel, A.H. Al-muhtaseb, X. Zhang, J.K. Abu-dahrieh, D.W. Rooney, Pyrolysis Kinetic Modeling of a Poly ( ethylene-co-vinyl acetate ) Encapsulant Found in Waste Photovoltaic Modules, (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01989>.
- [2] A. Sinha, D.B. Sulas-Kern, M. Owen-Bellini, L. Spinella, S. Ul'ic'na, S.A. Pelaez, S. Johnston, L.T. Schelhas, Glass/glass photovoltaic module reliability and degradation: A review, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 54 (2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1462>.
- [3] K. Agroui, G. Collins, Determination of thermal properties of crosslinked EVA encapsulant material in outdoor exposure by TSC and DSC methods, *Renew. Energy.* 63 (2014) 741–746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.013>.
- [4] J. Zhang, F. Xu, X. Chen, C. Putson, S. Diahm, Q. Wang, Investigation of the Potential-Induced Aging Phenomenon of an Insulating Encapsulant for a Photovoltaic Module: From Electrical to Chemical Properties, *ACS Appl. Energy Mater.* (2021). <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03521>.
- [5] J.C. Schlothauer, K. Grabmayer, I. Hintersteiner, G.M. Wallner, B. Röder, Solar Energy Materials & Solar Cells Non-destructive 2D-luminescence detection of EVA in aged PV modules : Correlation to calorimetric properties , additive distribution and a clue to aging parameters, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 159 (2017) 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.011>.
- [6] R. Heidrich, A. Mordvinkin, R. Gottschalg, Quantification of UV protecting additives in ethylene-vinyl acetate copolymer encapsulants for photovoltaic modules with pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry, *Polym. Test.* 118 (2023) 107913. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107913>.
- [7] J. Jin, S. Chen, J. Zhang, UV aging behaviour of ethylene-vinyl acetate copolymers ( EVA ) with different vinyl acetate contents, *Polym. Degrad. Stab.* 95 (2010) 725–732. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.02.020>.
- [8] U. Desai, B.K. Sharma, A. Singh, A. Singh, Enhancement of resistance against damp heat aging through compositional change in PV encapsulant poly (ethylene-co-vinyl acetate), *Sol. Energy.* 211 (2020) 674–

682. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.083>.

- [9] K. Yamada, S. Kumagai, T. Shiratori, T. Kameda, Y. Saito, A. Watanabe, C. Watanabe, N. Teramae, T. Yoshioka, Combined UV-irradiation and pyrolysis-GC/MS approach for evaluating the deterioration behavior of ethylene vinyl acetate, *Polym. Degrad. Stab.* 190 (2021) 109623. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109623>.
- [10] B. Ottersböck, G. Oreski, G. Pinter, Comparison of different microclimate effects on the aging behavior of encapsulation materials used in photovoltaic modules, *Polym. Degrad. Stab.* 138 (2017) 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.010>.

## 8 Eventi di disseminazione

M. Izzi, M. Tucci, C. Andreozzi, L. Sannino, V. Fiandra, PV module eco-design: new encapsulant for high sustainability and recyclability of photovoltaic value chain, 50th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 11-16, 2023, Puerto Rico, poster presentation.