

# Processo di riciclo meccanico per scarti industriali di schiume poliuretatiche rigide e validazione del materiale da riciclo

Andrea Tinti

Centro di Ricerche Europeo di Tecnologie, Design e Materiali  
(CETMA - Divisione "Advanced Materials & Processes Consulting")



## Introduzione

I poliuretani sono fra i materiali più versatili attualmente disponibili sul mercato. Negli ultimi quarant'anni sono stati impiegati in misura crescente ed in una varietà di differenti applicazioni.

Uno dei fattori che maggiormente rende il poliuretano così attraente è la sua durabilità, che contribuisce significativamente alla lunga vita utile di molti prodotti realizzati con questo materiale. L'estensione del ciclo di vita dei prodotti e la salvaguardia delle risorse primarie sono importanti considerazioni ambientali che spesso favoriscono la scelta dei poliuretani.

A livello mondiale, l'attenzione della comunità tecnico-scientifica si sta concentrando sempre di più sul riciclo del poliuretano a causa dei cambiamenti attualmente in corso su questioni sia normative che ambientali. L'aumento dei costi di smaltimento in discarica e la diminuzione degli spazi destinabili a tal scopo stanno rendendo necessario prendere in considerazione opzioni alternative per la gestione del fine vita dei materiali poliuretatici.

L'industria del poliuretano ha identificato tecnologie sfruttabili per il recupero e il riciclo degli scarti poliuretatici sia post consumo che derivanti dai processi di produzione. Anni di ricerca, di studio e di prove hanno portato allo sviluppo di svariate metodologie di riciclo e recupero del poliuretano potenzialmente sostenibili da un punto di vista sia economico che ambientale [1, 2].

Ciascun metodo fornisce una peculiare serie di vantaggi che lo rende particolarmente indicato per specifici destinatari, applicazioni e requisiti. Fra di essi l'unico metodo che riesce a creare davvero un "ciclo chiuso" e ad inserirsi quindi pienamente nel contesto dell'economia circolare è il riciclo chimico, cioè il ripristino delle materie prime costituenti ovvero la produzione di altri composti chimici ad alto valore aggiunto. Nonostante i vantaggi del riciclo chimico siano molti, l'aspetto economico fa sì che rimanga un

business di minori dimensioni rispetto agli altri metodi di recupero.

Attualmente sono in fase di studio nuove tecnologie di processo che potrebbero ottimizzare sia la qualità del prodotto che i costi di produzione, mirando non solo a garantire la fattibilità tecnica ma anche una totale sostenibilità economica.

La maggior parte dei poliuretani viene invece sottoposta al classico riciclo meccanico, il quale ha una catena di processo molto semplice che prevede separazioni, tritrazioni, macinazioni, addensamenti od altre trasformazioni successive a seconda che si abbia un materiale di partenza omogeneo oppure eterogeneo. Da queste lavorazioni è possibile ottenere dal rifiuto una materia prima seconda che servirà ad altre produzioni. Si parla in questo caso di devalorizzazione (downcycling) ovvero di riciclo a "ciclo aperto". Come per tutti i processi di riciclo delle materie plastiche, la fattibilità tecnico-economica e la generale applicabilità commerciale dei metodi di riciclo del poliuretano devono essere considerate in ogni fase della catena di riciclo. Attualmente, con poche eccezioni, tali tecnologie sono confinate ad un livello sperimentale e non hanno ancora dimostrato di essere sostenibili in un mercato competitivo. Tuttavia, esse restano di considerevole interesse per il loro potenziale di lungo periodo.

## Sviluppo sperimentale del processo di riciclo

CETMA, un centro di ricerca con sede a Brindisi che si occupa di sviluppo di servizi tecnologici e ricerca a contratto per le industrie, ha sviluppato in scala di laboratorio un efficace processo per il riciclo meccanico di scarti industriali di schiume poliuretatiche rigide per isolamento termico. Si tratta in particolare di sfridi di taglio a bassa densità (35-50 kg/m<sup>3</sup>) de-

rivanti dal processo produttivo di un'azienda pugliese che realizza allestimenti coibentanti per veicoli stradali adibiti al trasporto refrigerato di beni deperibili (Figura 1). Tali scarti non sono attualmente interessati da alcuna forma di riciclo, bensì interamente destinati allo smaltimento in discarica oppure al recupero come combustibile o come altro mezzo per produrre energia.

Il processo di riciclo sviluppato trae spunto dalla ben nota tecnologia denominata re-bonding (Figura 2), largamente impiegata per il riciclo di schiume poliuretaniche flessibili [3]. Nel corso del presente studio è stato sviluppato un processo analogo che impiega scarti di schiume poliuretaniche rigide ed è quindi volto alla realizzazione di lastre o pannelli rigidi e compatti, aventi densità di diverse volte superiore – dell'ordine di un fattore dieci – rispetto al materiale di partenza. Rispetto alle schiume flessibili, il re-bonding di schiume rigide sembra essere meno comune nel panorama industriale attuale, probabilmente perché occorre ancora sviluppare una efficace filiera: Produttore (degli scarti) → Trasformatore → Utilizzatore.



Figura 1: Scarti industriali di schiume rigide prima del processo di macinazione meccanica

Il processo di riciclo sviluppato consiste di tre fasi principali, di cui si forniscono di seguito alcuni dettagli.

**1. Macinazione meccanica degli scarti**

Gli scarti campionati, senza procedere a separazione fra le varie densità disponibili, sono stati sottoposti a macinazione meccanica in un mulino a coltelli. Il materiale risultante ha la forma di un granulato misto in fiocchi, costituito sia

da frammenti grossolani che da una polvere fine (Figura 3).

**2. Miscelazione degli scarti con un opportuno legante (Figura 4 e 5)**

Il legante selezionato è un prepolimero MDI commerciale specificamente formulato per processi di re-bonding ed avente numero NCO pari a 14,5%. Il contenuto di legante, rispetto agli scarti, è stato variato dal 5 al 15% in peso. In generale, è necessario prevedere

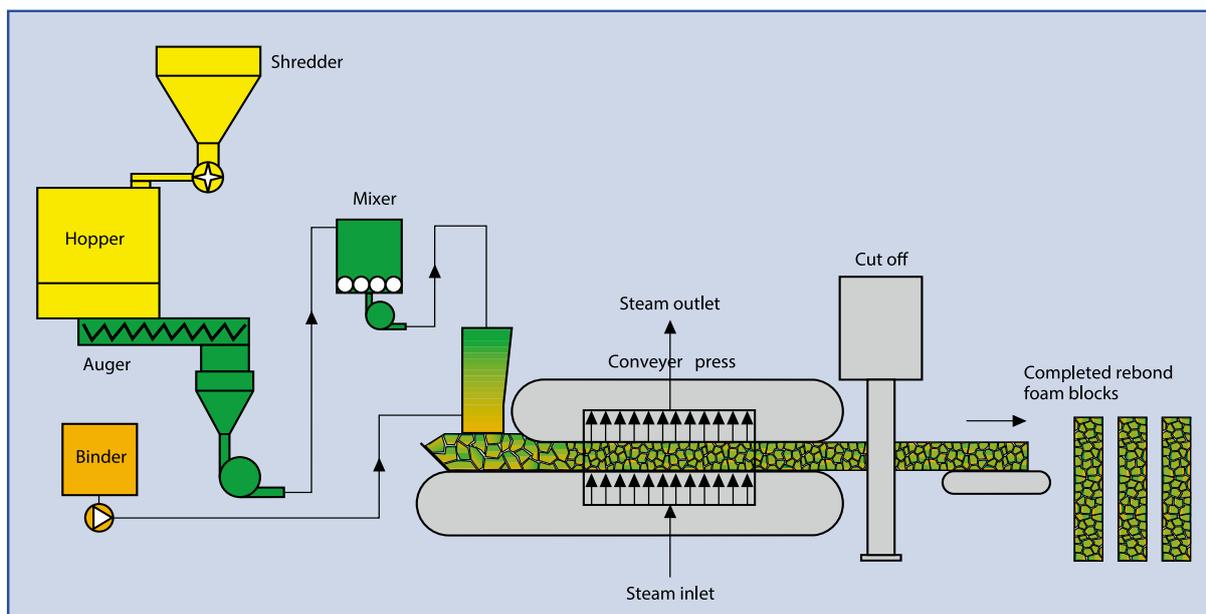


Figura 2: Schema del processo di re-bonding di schiume poliuretaniche flessibili. Fonte: ISOPA.

un maggior impiego di legante (>15%) in presenza di una elevata frazione di polveri negli scarti rispetto al caso in cui ci siano quasi esclusivamente granuli macroscopici (5-10%). Ciò perché il ruolo del legante è quello di ricoprire la superficie degli scarti, la quale aumenta proporzionalmente con il diminuire delle loro dimensioni. La miscelazione del legante con gli scarti macinati è stata effettuata in un turbomixer da laboratorio, eventualmente aggiungendo anche acqua in opportuna proporzione, dell'ordine di alcune parti per mille. L'acqua, addizionata dall'esterno oppure già presente negli scarti sotto forma di umidità adsorbita, reagisce infatti con il legante a base di isocianato formando poliurea, la quale costituisce di fatto l'elemento adesivo del sistema.

### 3. Stampaggio a compressione del composto scarti/legante (Figura 6).

La principale criticità tecnologica del processo oggetto di studio, almeno su scala di laboratorio, sta nel fatto che il materiale deve subire una forte riduzione di volume nel passaggio dagli scarti macinati a bassa densità ad un pannello con certe proprietà strutturali, avente quindi densità significativamente superiore. È stato quindi necessario sviluppare un sistema capace di accogliere l'elevata quantità di materiale, in forma granulata secca, necessaria a produrre un pannello compatto con dimensioni finali piuttosto contenute. La procedura sperimentale ideata è descritta di seguito.

Il composto scarti/legante viene riversato in uno stampo modulare a pareti alte. Lo stampo, dotato di pistone, viene trasferito fra i piatti di una pressa idraulica da laboratorio dove, applicando pressione, si ottiene il compattamento del composto nella parte inferiore dello stampo, che consiste di una cornice più sottile. Lo stampo viene infine rimosso e la sola cornice, piena di composto scarti/legante, viene mantenuta in pressa calda (100 °C) per il consolidamento del materiale, che avviene grazie alla reazione chimica fra l'isocianato e l'acqua. La densità finale del pannello risulta pari al rapporto fra la massa totale del composto scarti/legante ed il volume utile della cornice.

Nel corso della sperimentazione sono stati prodotti pannelli con densità variabile nell'intervallo 200÷400 kg/m<sup>3</sup> (Figura 7).

### Validazione del materiale riciclato

Il semilavorato prodotto col processo di riciclo descritto potrebbe avere potenziali applicazioni, ad esempio, nel settore dell'arredamento, per allestimenti oppure elementi divisori, piani di lavoro e mensole, eventualmente previo rivestimento con pellicole estetiche e/o di rinforzo. In tal senso, il pannello

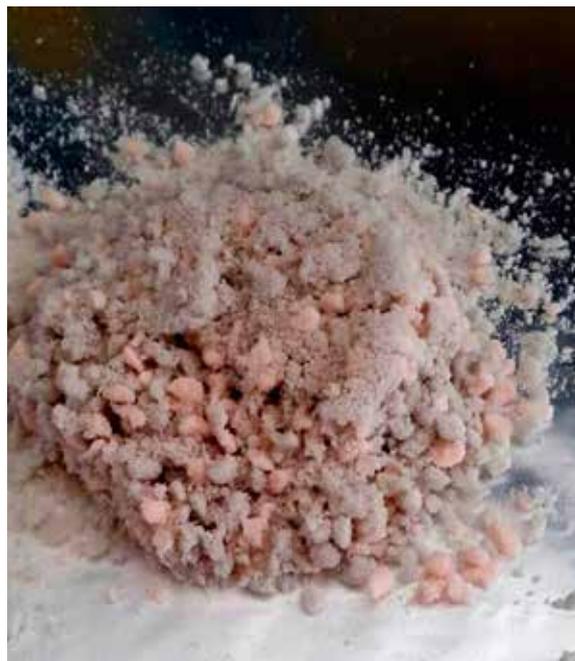


Figura 3: Scarti industriali di schiume rigide dopo il processo di macinazione meccanica.



Figura 4 e 5: Miscelazione degli scarti con il legante

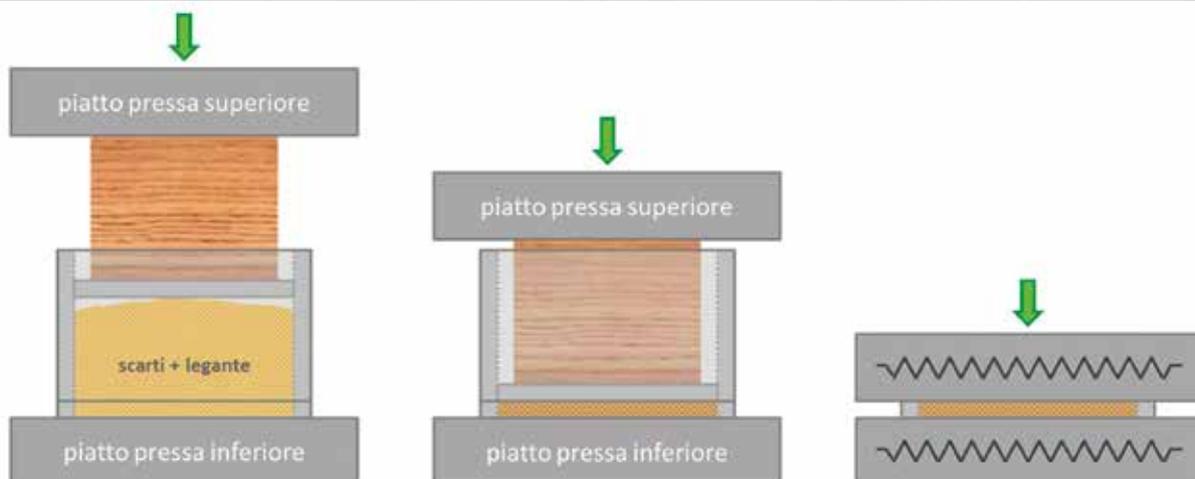


Figura 6: Stampaggio a compressione del composto scarti/legante

sviluppato potrebbe essere impiegato in alternativa ai tradizionali pannelli di fibra di legno. Si è dunque stabilito di far riferimento alle normative relative a questa tipologia di prodotto per fissare i requisiti ed i metodi di prova rispetto ai quali svolgere la validazione del materiale da riciclo costituente il pannello stesso. In accordo con la norma UNI EN 316 i pannelli di fibra di legno possono essere classificati secondo diversi criteri, per esempio secondo il processo produttivo, la densità, le condizioni di utilizzo o la finalità d'uso. In particolare, compatibilmente con l'intervallo di densità sperimentato e l'applicazione ipotizzata, si è fatto riferimento ai requisiti specifici per pannelli teneri (230÷400 kg/m<sup>3</sup>) per uso generale, cioè non portante, in ambiente interno secco (20 °C, 65% R.H.). I requisiti meccanici sono specificati in Tabella 1, così come riportati nelle norme della serie UNI EN 622 (parti 1-5). Per i pannelli teneri viene indicato unicamente il requisito di resistenza a flessione. Per completezza di trattazione sono stati considerati anche i requisiti relativi alle altre categorie di densità, sempre per uso generale in ambiente secco.



Figura 7: Pannelli prodotti mediante processo di riciclo re-bonding

**Tabella 1.**

**Requisiti meccanici per i pannelli di fibra di legno per uso generale in ambiente secco.**

Evidenziati in arancione i valori di interesse relativamente ai pannelli prodotti nel presente studio.

Proprietà	Metodo di prova	Pannelli duri > 900 kg/m <sup>3</sup>	Pannelli semiduri 400÷900 kg/m <sup>3</sup>	Pannelli teneri 230÷400 kg/m <sup>3</sup>	Pannelli MDF > 450 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza a flessione	EN 310	25 MPa	8÷12 MPa	0,8 MPa	20 MPa
Modulo a flessione	EN 310	-	-	-	2200 MPa
Resistenza a trazione perpendicolare al piano	EN 319	500 kPa	100 kPa	-	550 kPa
Resistenza all'estrazione della vite sulla faccia	EN 320	-	30 N/mm	-	-

Per quanto riguarda la conducibilità termica, la norma UNI EN 13986 dispone che essa venga determinata – in conformità alla norma UNI EN 12664 oppure ricavata dal prospetto riportato in Tabella 2 – solo per gli utilizzi soggetti a requisiti termoisolanti.

Tutti i test sperimentali citati in Tabella 1 ed in Tabella 2 sono stati svolti presso CETMA secondo i metodi di prova indicati.

I risultati ottenuti sono rappresentati graficamente in Figura 8 ed in Figura 9. Per ciascuna proprietà, è riportato l'andamento in funzione della densità del pannello e del contenuto di legante. In tratteggio viene indicato il requisito specifico relativo ai pannelli teneri per uso generale in ambiente secco. Laddove assente, è stato considerato il requisito relativo ad una categoria di ordine superiore.

**Tabella 1.**

**Conducibilità termica dei pannelli di fibra di legno in relazione alla densità.**

Evidenziati in arancione i valori di interesse relativamente ai pannelli prodotti nel presente studio.

Densità kg/m <sup>3</sup>	Conducibilità termica mW/(m·K)
250	50
400	70
600	100
800	140

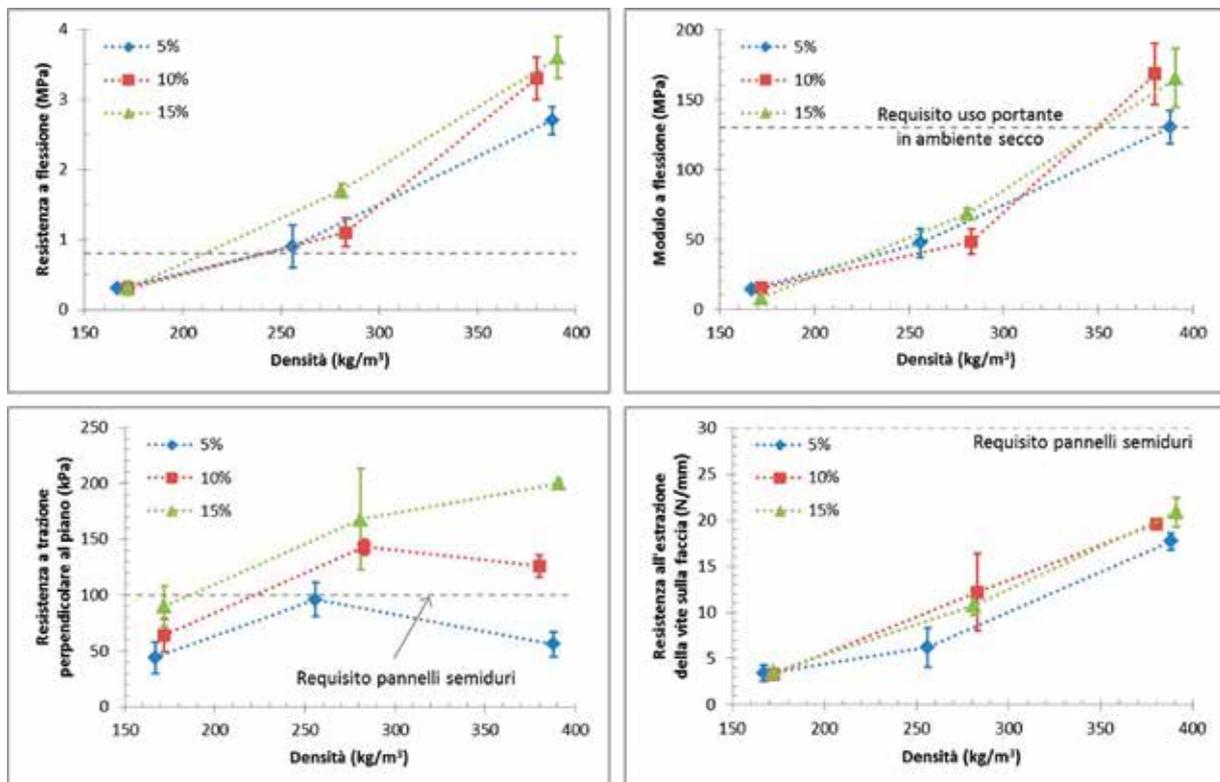


Figura 8: Risultati sperimentali: proprietà meccaniche

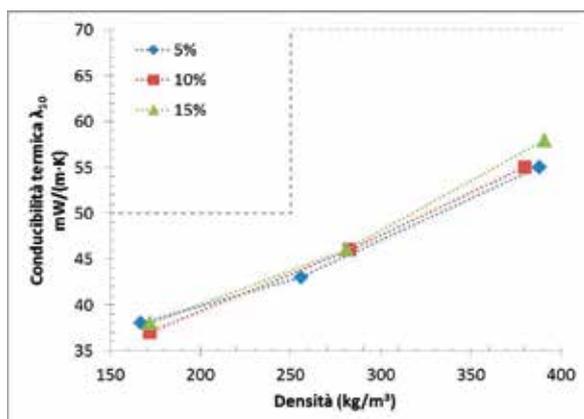


Figura 9: Risultati sperimentali: conducibilità termica.

Dall'analisi dei risultati ottenuti è possibile svolgere le seguenti considerazioni generali:

1. Tutte le grandezze misurate, come atteso, aumentato sensibilmente all'aumentare della densità – ovvero le proprietà meccaniche migliorano e la conducibilità termica peggiora – ma mostrano generalmente un dipendenza meno significativa dal contenuto di legante, il quale potrebbe quindi essere minimizzato al 5% in peso previa ottimizzazione del processo di macinazione degli scarti in termini di granulometria risultante;
2. La maggior parte delle configurazioni sperimentate, in termini di densità e contenuto di legante, soddisfano i requisiti prestazionali attesi per la categoria di riferimento, cioè quella dei pannelli teneri per uso generale in ambiente secco, ed inoltre in molti casi vengono soddisfatti anche i requisiti relativi a categorie di ordine superiore in termini di densità (pannelli semiduri, 400÷900 kg/m<sup>3</sup>) o di finalità d'uso (uso portante, dati non riportati in Tabella )<sup>a</sup>.

a) Si noti che per quanto riguarda la resistenza all'estrazione delle vite sulla faccia, nessun materiale soddisfa il requisito di 30 N/mm (Tabella 1), che è però relativo ai pannelli di fibra semiduri, categoria avente densità superiore (400÷900 kg/m<sup>3</sup>).

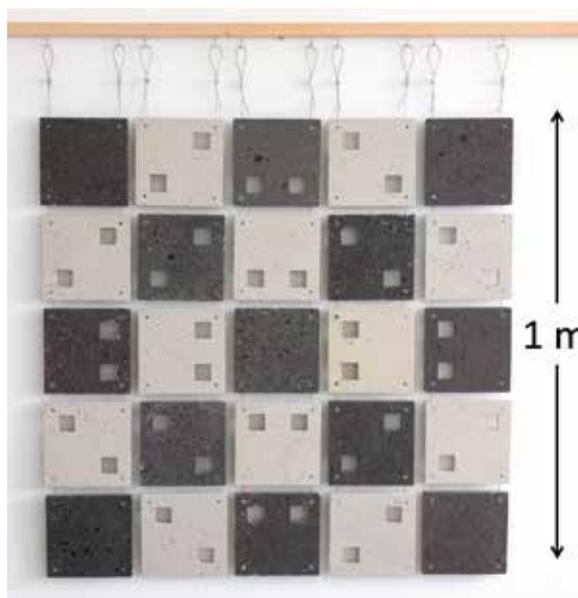


Figura 10: Prototipo dimostratore di divisorio

## Conclusioni

Lo studio sperimentale svolto dal CETMA su scala di laboratorio ha dimostrato la fattibilità tecnica del processo di re-bonding di schiume poliuretatiche rigide e validato il materiale da riciclo risultante in conformità agli standard relativi ad un prodotto potenzialmente concorrente. A titolo di dimostratore tecnologico, CETMA ha realizzato un prototipo di divisorio per ambienti interni (Figura 10).

### Bibliografia

- [1] K.M. Zia, H.N. Bhatti, I.A. Bhatti, Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review, *Reactive & Functional Polymers* 67 (2007) 675–692
- [2] M.M.A. Nikje, A.B. Garmarudi, A.B. Idris, Polyurethane Waste Reduction and Recycling: From Bench to Pilot Scales, *Designed Monomers and Polymers* 14 (2011) 395–421
- [3] ISOPA: <http://www.isopa.org>

Quanto descritto nel presente articolo è un risultato del progetto di ricerca MAIND (Materiali eco-innovativi e tecnologie avanzate per l'industria manifatturiera e delle costruzioni), finanziato dal MIUR nell'ambito del programma P.O.N. "Ricerca e Competitività" 2007-2013.

Per informazioni:

Andrea Tinti - Centro di Ricerche Europeo di Tecnologie, Design e Materiali (CETMA)  
 c/o Cittadella della Ricerca - S.S. 7 km 706 + 030 - 72100 Brindisi  
 Tel.: 0831 449 403 - E-mail: [andrea.tinti@cetma.it](mailto:andrea.tinti@cetma.it)