

di Francesco Manarini e Luca Posca, Lati Industria Termoplastici

# Termoconduttivi Compound ad alta temperatura

Tra realtà e falsi miti, ecco un vademecum per sfruttare al meglio le proprietà dei compound termoconduttivi

**A** distanza di quasi dieci anni dalla loro introduzione sul mercato, l'affermazione commerciale dei compound termoplastici a migliorata conduttività termica si può ritenere consolidata. Nonostante le inevitabili diffidenze iniziali e le difficoltà connaturate all'impiego di tali materiali, molti produttori di compound tecnici possono oggi vantare nella propria gamma almeno una serie di gradi destinati a manufatti per stampaggio a iniezione in cui venga richiesto un migliore smaltimento di calore. L'approccio a queste nuove proposte, tuttavia, non risulta sempre corretto, specialmente da parte di utilizzatori abituati all'impiego di materiali storicamente comprovati, principalmente alluminio o rame. Occorre pertanto fare in modo che alcuni "falsi miti" vengano sfatati, evitando così di incorrere in comuni errori di progettazione.

## I principali errori di valutazione

Un primo errore è quello di pretendere le medesime prestazioni termiche dei metalli. Ipotesi ingiustificata dato che numerose applicazioni di successo hanno dimostrato come i metalli, in termini di scambio termico, risultino sovente sovradimensionati, e i medesimi risultati siano raggiungibili mediante compound termoconduttivi dotati di un de-

cimo della conducibilità termica: ciò è vero soprattutto in regime di convezione naturale, ossia quando l'estrazione del calore non è affidata alla ventilazione forzata. Secondo errore tipico è quello di continuare a ragionare su geometrie standard – ad esempio, per i dissipatori –, ossia concepite per un buono scambio termico, ma sempre utilizzando metalli. È necessario invece ragionare secondo una mentalità nuova, più flessibile, che consenta di comprendere come i compound termoplastici siano materiali completamente diversi, in primis per ciò che riguarda la loro eterogeneità compositiva da cui consegue un comportamento fisico anisotropo. Non tenere conto di ciò e trattare le materie plastiche assumendo che si comportino come i metalli può condurre a sensibili errori di progettazione, culminanti talvolta nel fallimento di progetti potenzialmente realizzabili. Per questo motivo è di fondamentale importanza che le proprietà più intime di tali materiali vengano comprese, "domate" e sfruttate al meglio soprattutto in fase di progetto. I requisiti, inoltre, non si limitano alle sole prestazioni termiche. Vi sono infatti vincoli estetici imposti da marketing e product designer, più ulteriori proprietà tecniche di tipo elettrico e meccanico; la messa a punto di compound sempre più efficienti anche da questi punti di vista,

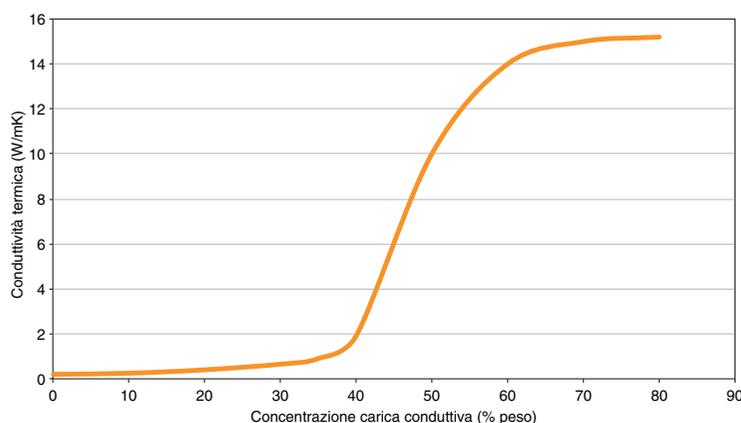
nonché la libertà di design, la flessibilità e l'efficienza di funzionamento che essi offrono, ne stanno consolidando un successo sempre crescente nei più avanzati settori tecnologici.

## Scelte ragionate

Se oggi è lecito ipotizzare che i principi teorici alla base della formulazione e del comportamento dei compound termoconduttivi siano stati definiti e compresi, altrettanto non si può dire, invece, per un'estesa serie di temi tecnici e tecnologici indispensabili a far sì che le reali proprietà di tali materiali siano sfruttate al meglio. È infatti durante la fase di progettazione e produzione del manufatto stampato che si impone la necessità di garantire la massima resa con il minor costo, ossia il miglior scambio termico con il più basso contenuto di carica conduttiva. Il successo delle nuove



Il radiatore nero della lampada Tivedo di Luceplan (design Sebastian Bergne) è realizzato con il compound termoconduttivo Laticonther 62 GR/50



**1 Andamento qualitativo del fenomeno della percolazione nella conducibilità termica. Al di sotto di un valore soglia di concentrazione della carica conduttiva il compound offre le prestazioni termiche della sola matrice**

applicazioni in campo illuminotecnico, automotive o elettrico-elettronico si ottiene non solo attraverso la formulazione ottimale dei compound (scelta della resina, della tipologia di carica e delle relative proporzioni), ma anche, e soprattutto, ottimizzando la geometria dei manufatti e le tecniche di trasformazione. Il quadro ideale prevede la comprensione

delle relazioni esistenti fra le caratteristiche del compound, la geometria del manufatto e gli effetti dello stampaggio sui meccanismi dello scambio termico. La scelta di un materiale inadeguato, il mancato sfruttamento delle reali possibilità del compound o uno stampaggio svantaggioso si traducono in un aggravio di costi che può causare il fallimento

## La misura della conducibilità termica

Uno degli strumenti più utilizzati e affidabili per la misura della diffusività termica ( $\alpha$ ), e di conseguenza della conducibilità termica, è l'LFA di Netzsch. Lo strumento, attraverso un detector IR, mediante l'emissione di un flash generato da una lampada allo Xeno, misura in quanto tempo la superficie opposta del provino di materiale sottoposto al flash

si attesta su una temperatura costante. Le misure possono essere effettuate a diverse temperature, purché siano note, a tali temperature:

- il  $C_p$ , ottenibile con maggiore affidabilità mediante DSC;
  - la densità del materiale ( $\rho$ ), stimabile tramite modelli matematici alle diverse temperature.
- Una volta misurata la diffusività, mediante la semplice correlazione:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

sarà possibile ricavare la conducibilità termica (K).

**Tabella 1** Fattore di forma di alcuni tipi di cariche e conduttività stimata

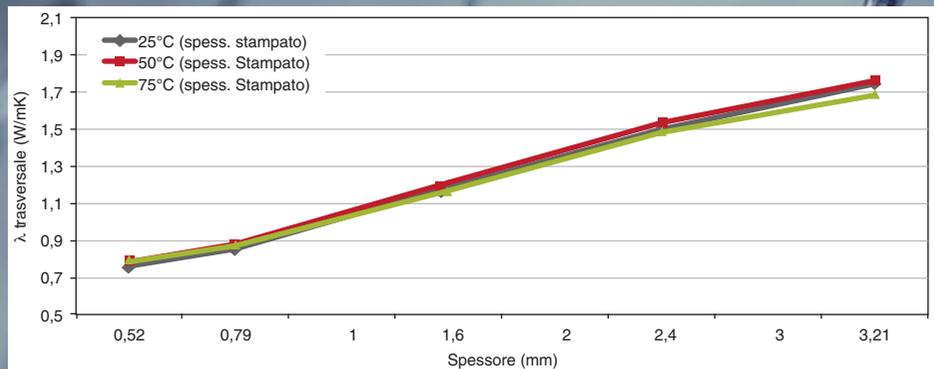
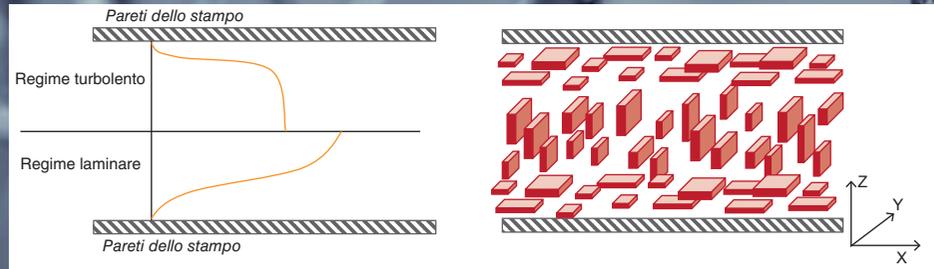
	ASPECT RATIO	K (W/mK)
Allumina	3,50	36,00
Ossido di magnesio	3	23
Nitrato di boro	7	29
Grafite	4-6	75

del progetto a favore di chi, al contrario, ha saputo lavorare al meglio su questi fronti.

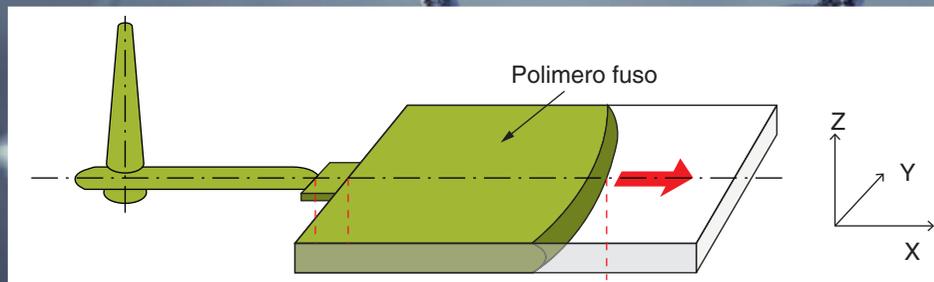
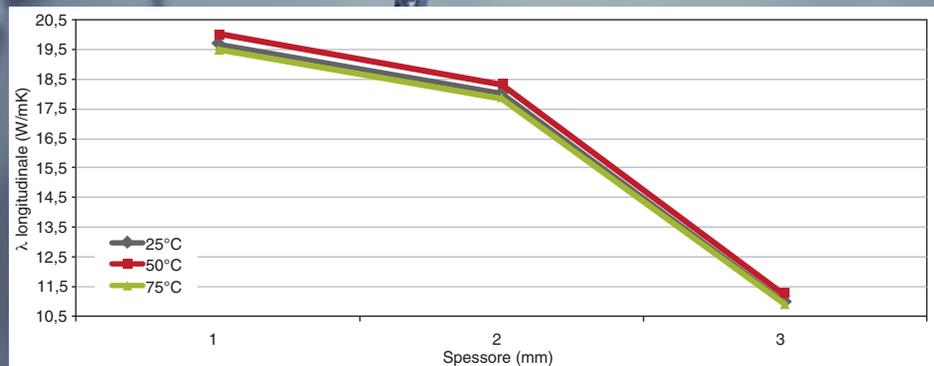
### La scelta del polimero

Nell'ambito delle soluzioni termoconduttive, le proposte che garantiscono le massime prestazioni sono oggi ottenute estrudendo resine termoplastiche in grado di inglobare elevate quantità di carica, come PP, PC, PA6, PA12 o PPS con filler capaci di trasportare efficacemente il calore. La scelta più comune, in merito a questi ultimi, cade sull'allumina o altri sali e ossidi metallici, sulla grafite (nel caso in cui sia accettabile anche un'alta conducibilità elettrica), oppure sul nitrato di boro esagonale (h-BN), qualora siano richieste proprietà dielettriche. I risultati più interessanti si ottengono, come è noto, con grafite e nitrato di boro. Queste due cariche sono infatti accomunate, oltre che da interessanti caratteristiche termiche, anche da un'ottima lavorabilità, da un'influenza accettabile sulla viscosità del fuso e dal ridotto potere abrasivo che preserva estrusori, macchine a iniezione, ugelli e stampi da costosi e sgraditi fenomeni di usura. In ogni caso, è necessario che la quantità di carica introdotta nella matrice assicuri il raggiungimento della soglia di percolazione (figura 1), ossia la condizione in cui si verifica il contatto fra le particelle disperse con il manifestarsi di caratteristiche di conduzione termica soddisfacenti.

**2** Andamento qualitativo dell'orientamento delle cariche sullo spessore: lo spessore dello strato orientato lungo la direzione del fuso che si ritrova a ridosso delle pareti dello stampo è legato al profilo di velocità e risulta tanto più ridotto quanto più turbolento è il moto del fuso durante il riempimento



**3** (in alto) e **4** (in basso) Andamento della conduttività termica trasversale (z) e longitudinale (x, y) in funzione dello spessore del manufatto e della temperatura di rilevamento. Risulta evidente l'aumento della conduttività trasversale (z) al crescere dello spessore della parete riempita. In generale,  $k_x \approx k_y > k_z$  (figura in fondo)



## Le caratteristiche delle cariche

La maggior parte delle cariche ceramiche, come l'ossido di alluminio, sono costituite da particelle dotate di isotropia geometrica, ossia aventi circa la medesima estensione nelle tre direzioni dello spazio. Risultano quindi caratterizzate da un fattore di forma (o aspect ratio), inteso come rapporto fra la dimensione maggiore e quella minore, relativamente basso. Sia la grafite che il nitruro di boro esagonale (h-BN) presentano invece un'elevata anisotropia geometrica legata alla comune morfologia cristallina, un assetto allotropico costituito da sistemi esagonali disposti su fogli sovrapposti e indipendenti. Grafite e h-BN sono disponibili in scaglie di varie dimensioni e aspetto, tutte però contraddistinte da un rapporto di forma molto accentuato (tabella 1). La struttura allotropica in cui sono organizzati gli atomi di carbonio della grafite o di boro e azoto nel h-BN si traduce, a livello macroscopico, in anisotropie anche dal punto di vista fisico: le caratteristiche meccaniche, così come la conduttività termica, risultano

estremamente differenti a seconda che ci si muova longitudinalmente o trasversalmente rispetto ai piani.

## La preparazione campione

La preparazione dei campioni (di diverse geometrie, a seconda del portacampioni utilizzato) è piuttosto delicata. I campioni, di spessore rigorosamente costante e uniforme, vengono ricavati dal taglio di provini stampati di dimensioni maggiori (importantissimo quindi conoscere geometria e punti di iniezione di tali campioni al fine di poter prevedere il livello di orientamento delle cariche, che influenzerà la conducibilità misurata) e quindi ricoperti da un sottile strato di grafite spray. Qualora si desiderasse misurare la conducibilità termica longitudinale, sarà necessario partire da campioni ben orientati che verranno tagliati a "fettine", ruotati di 45° e affiancati l'uno all'altro.

## Gli effetti dell'orientamento delle cariche

Per effetto della loro forma, durante il processo di estrusione prima, e stampaggio poi, le scaglie di grafite e h-BN sono esposte all'azione meccanica generata dagli sforzi di taglio presenti nel flusso di polimero fuso. La distribuzione di questi sforzi di taglio è a sua volta influenzata, oltre che dalle caratteristiche reologiche del compound, anche dal profilo di velocità con cui il materiale avanza nella cavità dello stampo e dal processo di raffreddamento progressivo che si

instaura lungo lo spessore della parete da riempire. Accade quindi che, così come avviene per le fibre di vetro e di carbonio, anche queste scaglie si dispongono lungo differenti direzioni, così come previsto nelle diverse teorie relative al calcolo del tensore di orientamento. Tipicamente si osserva un'elevata percentuale di scaglie orientate lungo la direzione di avanzamento del fuso in prossimità delle pareti dello stampo, e un orientamento via via sempre più a essa normale muovendosi verso il centro della vena fluida (figura 2). Dal momento che la conduttività termica dei polimeri di interesse industriale è inferiore a quella di grafite e h-BN di quasi due ordini di grandezza, è semplice dedurre che la capacità di trasportare il calore del com-

## COSA SIGNIFICA PER TE "FREE CHOICE"?

Significa che le tue opzioni sono sempre aperte. Qualunque sia la tua applicazione, ovunque tu sia. Non importa la marca di presse ad iniezione che utilizzi, nè se stai comprando una nuova macchina o se sei già in possesso di un'automazione ... Sepro ha la soluzione giusta per te.

- Robot a 3-Assi
- Robot a 5-Assi
- Robot a 6-Assi
- una Piattaforma di Controllo Universale

*Per ulteriori informazioni su robot ed automazioni, chiama il numero 02.251561.*



### Distributore per l'Italia

Sverital S.p.A.  
Via Santa Maria, 108  
20093 Cologno Monzese (MI)  
sverital@sverital.it  
Tel. +39 02 251561  
Fax +39 02 25391055  
www.sverital.it



Pad 22 - Corsia D



**5X Line**  
Robot a 5 assi  
Controllato da Visual

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE	NORMA	UNITA'	PA 6	PA6 + 30% carica minerale (talco)	PA6 + 50% GRAFITE	PA12 + 75% BN
Densità in H <sub>2</sub> O	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,18	1,37	1,50	2,24
<b>RESISTENZA A TRAZIONE</b>						
Modulo in trazione	ISO 527-1	MPa	3000	6500	11400	7500
Sforzo a snervamento		MPa	50			
Allungamento a snervamento		%	3,6			
Sforzo a rottura		MPa		70	60	47
Allungamento a rottura		%	150	2,5	1,2	1,2
<b>RESISTENZA ALL'IMPATTO</b>						
Charpy con intaglio	ISO 179-1eA	kJ/m <sup>2</sup>	6	3	4	2
Charpy senza intaglio	ISO 179-1eU	kJ/m <sup>2</sup>	NR	35	8	5

**Tabella 2** Le caratteristiche meccaniche del compound costituito da PA6+50% grafite non evidenziano drammatiche riduzioni di prestazioni tali da inibirne l'impiego anche in applicazioni dove è richiesto un accettabile allungamento a rottura

pound nel manufatto risulti di gran lunga più elevata lungo la direzione di massimo orientamento della carica rispetto a quella a essa trasversale (figura 3 a pagina 38). Effettuando misure nei due sensi di massimo orientamento, per esempio mediante la tecnica laser-flash prevista dalla norma E1461, si rileva che la conduttività termica lungo la direzione più favorevole può essere anche 5 volte superiore alla normale (figura 4 a pagina 38). A questo punto risulta evidente che la progettazione e l'ingegnerizzazione di dispositivi deputati al trasporto del calore non possono prescindere dalla comprensione e dal controllo di questo importante aspetto, legato tanto alle caratteristiche del materiale di partenza – inteso come combinazione di resina e carica – quanto alla cinetica di riempimento della cavità in fase di stampaggio e alla geometria della cavità stessa. Ottimizzare la conduttività termica del manufatto sfruttando l'orientamento della carica permette di minimizzarne il contenuto nel compound, riducendo i costi del prodotto finito, e di mantenere il più possibile inalterata resilienza e allungamento a rottura della ma-

trice, tanto necessarie nel caso – sempre più frequente – della presenza di inserti, viti autofilettanti, calettamenti (tabella 2).

### Gli effetti dello spessore delle pareti

Come accennato precedentemente, teoria e tecniche sperimentali evidenziano un elevato orientamento delle cariche termoconduttive lungo la direzione di avanzamento del flusso in prossimità degli strati più esterni. Questo fenomeno porta a valori generalmente elevati di conduttività in direzione longitudinale, tanto più alti quanto più sottili sono le pareti riempite. In direzione trasversale non si verifica un orientamento casuale delle stesse, come si potrebbe ipotizzare tenendo conto delle tipiche condizioni di sforzo di taglio e gradiente di velocità presenti nel fuso. Quello che invece si osserva è un progressivo orientamento delle particelle in direzione perpendicolare, che porta a un graduale incremento della conduttività termica trasversale. Questa prima serie di osservazioni conduce a due fondamentali conclusioni confermate sperimentalmente:

- la conduttività termica integrale, intesa come valore medio sul manufatto nelle tre direzioni dello spazio, è tanto più elevata quanto maggiori sono gli spessori delle pareti riempite;
- in generale – e controintuitivamente – si possono ottenere elementi termoconduttivi mediamente più efficaci se si introducono spessori più elevati nelle regioni deputate espressamente al trasporto di calore. È evidente che concorrono all'orientamento delle cariche anche tutti quei fattori che influenzano gli sforzi di taglio presenti nel fuso, soprattutto:
  - velocità di riempimento: all'aumentare della velocità di iniezione si osserva un minimo incremento della conduttività longitudinale;
  - temperatura dello stampo: stampi più caldi potrebbero favorire una migliore conduttività termica trasversale grazie alla riduzione del gradiente di velocità generato dalla presenza di strati esterni più freddi durante il riempimento.

### Qualche utile suggerimento

Non è purtroppo possibile definire in modo netto e univoco il legame causa-effetto fra

i fattori che presiedono all'orientamento delle cariche conduttive nei compound, soprattutto perché gran parte delle grandezze finora descritte sono a loro volta legate alla composizione del compound stesso. Un ruolo di primaria importanza lo gioca, per esempio, la stessa conduttività termica del materiale, parametro fondamentale per definire tanto la viscosità del fuso quanto la velocità di raffreddamento. Da quanto è stato fin qui introdotto è già possibile trarre qualche valido accorgimento tecnico per la realizzazione di manufatti plastici termoconduttivi. Si può infatti dedurre come pareti interessate a un flusso termico trasversale – come per esempio nella maggior parte dei dissipatori per illuminotecnica – possano risultare più efficaci se progettate con spessori relativamente elevati. Infatti, a fronte di una resistenza termica teoricamente più alta rispetto a una parete sottile, spessori maggiori potrebbero offrire una conduttività termica trasversale nel complesso più accentuata, risultando così più indicate nel trasporto di calore attraverso la superficie esterna dei manufatti.

### **Gli effetti del processo sulla carica**

Se è corretto ipotizzare che l'orientamento delle cariche conduttive giochi un ruolo fondamentale nell'ottenimento di valide proprietà termiche, è altrettanto vero che la morfologia delle particelle riveste un ruolo di primaria importanza nel momento in cui queste si trovano disperse nel polimero fuso, libere di traslare e ruotare sotto l'azione degli sforzi di taglio indotti nel processo di riempimento. La forma, la dimensione e l'aspect ratio delle scaglie di nitruro di boro o di grafite ne stabiliscono infatti l'assetto finale nel manufatto stampato, e di conseguenza la facilità al trasporto di calore nelle tre direzioni dello spazio. Come intuibile, scaglie più grandi concorrono generalmente a incrementare la conduttività termica grazie alla maggiore probabilità di contatto fra loro; per lo stesso motivo funzionano bene soprattutto strutture quanto più possibile distanti dall'isotropia geometrica. In generale, impiegando particelle più grandi si misura un miglioramento sostanziale in direzione longitudinale, beneficio che viene accompagnato da miglioramenti più modesti in senso trasversale. Inoltre, non bisogna dimenticare che queste ceramiche sono costituite da particelle decisamente fragili, disperse in un fuso la cui viscosità è generalmente elevata. I processi di estrusione prima, e di stampaggio poi, sottopongono sia i polimeri sia le cariche a notevoli stress meccanici, che portano inevitabilmente alla più o meno accentuata frantumazione delle delicate scaglie conduttive. La perdita di prestazioni termiche – specialmente in direzione trasversale – è la conseguenza immediata della riduzione di dimensione e aspect ratio delle particelle. Da quanto osservato è possibile trarre alcune importanti conclusioni:

- nella scelta delle cariche conduttive si dovrebbe tenere in considerazione anche la geometria;
- a parità di compound termoconduttivo, i processi di trasformazione possono influenzare pesantemente le prestazioni finali del manufatto;



Presse orizzontali  
da 60 a 1800 tonnellate di forza di chiusura

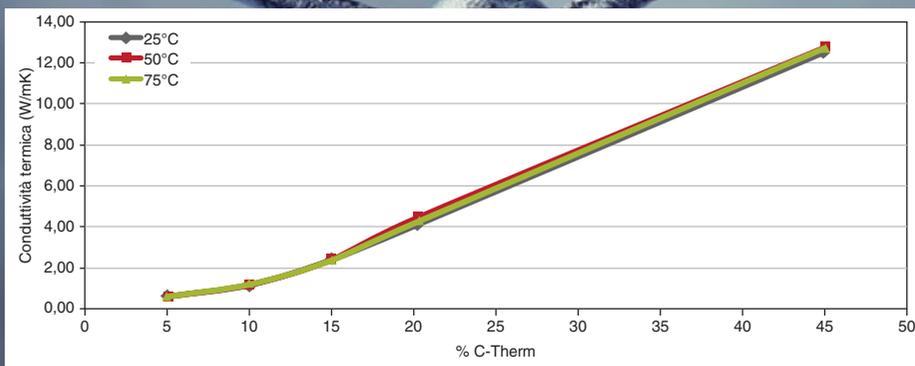
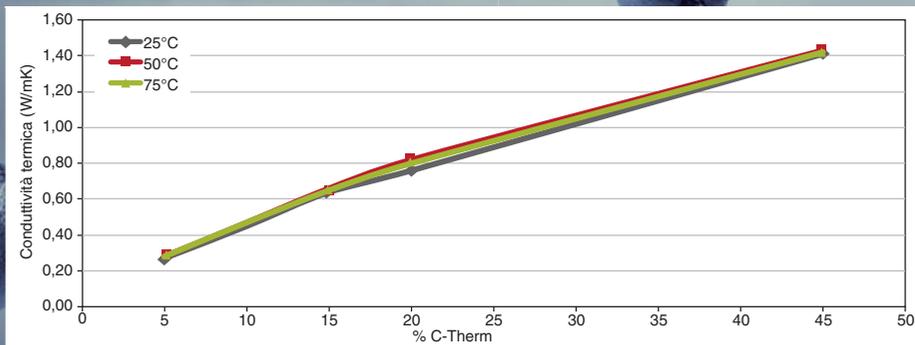


Presse verticali da 3 a 500  
tonnellate di forza di chiusura con  
tavola fissa - traslante - rotante



Presse orizzontali a 2 piani  
da 500 a 6800 tonnellate  
di forza di chiusura

5 (in alto) e 6 (in basso) Andamento della conduttività termica trasversale e longitudinale di un PP in funzione del contenuto di grafite espansa C-Therm2



• per compensare queste inevitabili difficoltà, il produttore di compound tende ad aggiungere una certa frazione di carica in eccesso, decisione che crea vantaggi soprattutto al trasporto di calore in direzione trasversale.

### La grafite come il grafene

In merito a quest'ultima osservazione, si sono ottenuti risultati molto interessanti nell'ambito di un accurato studio inserito nel progetto europeo Nanomaster. È stata rilevata la conduttività termica trasversale (figura 5) e longitudinale (figura 6) di un compound ottenuto impiegando come carica conduttiva una speciale grafite (C-Therm2 di Imerys), trasformata in modo da ottenere la massima dispersione ed esfoliazione. Il risultato dell'operazione consiste nella presenza nel compound di una

varietà di scaglie nanometriche polidisperse fra le quali sono state osservate anche quelle strutture lamellari a singolo strato conosciute come grafene. Questo compound, in cui è presente una carica conduttiva con un elevatissimo fattore di forma favorito dagli spessori nanometrici delle lamelle, ha consentito il conseguimento della percolazione a valori di concentrazione di filler molto bassi. Anche in questo caso sono stati rilevati valori di conduttività crescenti all'aumentare della quantità di grafite impiegata.

### Gli effetti dello stampaggio

Alla luce di quanto finora descritto, è possibile tracciare alcune semplici linee guida per configurare lo stampo e il sistema di alimentazione. Sicuramente sono da evitare, per

esempio, sezioni troppo sottili che inducano sollecitazioni meccaniche pesanti e prolungate. Buona norma generale, ancora più valida nella trasformazione dei compound termoconduttivi, consiste nell'evitare canali e punti di alimentazione troppo stretti, comodi ed economici ma sicuramente inadatti alle fragili scaglie di nitruro di boro o grafite. Molta attenzione va poi posta al posizionamento delle linee di giunzione, che risultano ancora più fragili in compound carichi con grandi quantità di particelle anisotropiche e in fronti di flusso particolarmente "freddi". Quello che invece non può essere dedotto dalla buona pratica di stampaggio è l'orientamento delle cariche conduttive in funzione del posizionamento del punto di alimentazione, aspetto nuovo e dagli effetti immediati sulla conducibilità termica, soprattutto trasversale. La disposizione dei flakes di grafite o h-BN viene infatti dettata dalla fluidodinamica del compound fuso, dall'ingresso nello stampo fino al completamento della figura. Si osserva un orientamento casuale nelle immediate vicinanze del punto di alimentazione che diviene via via più regolare, guidato sempre più dal flusso di materiale (shearing flow). È infatti nelle zone più lontane dal gate che la conduttività termica trasversale raggiunge i valori più alti, grazie all'elevata frazione di cariche conduttive orientate perpendicolarmente alla direzione di avanzamento del fuso. Lo sfruttamento accurato di questo comportamento potrebbe risultare possibile mediante l'impiego di simulazioni numeriche che consenta di prevedere la disposizione delle particelle conduttive in funzione della cinetica di riempimento e del comportamento reologico locale del fuso durante il riempimento dello stampo. Ovviamente per la corretta computazione è indispensabile che i software di simulazione prevedano la descrizione fisico/matematica di un elemento disperso avente le caratteristiche geometriche corrette.