

PRODUZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI MATERIALI COMPOSITI A MATRICE METALLICA

D. Gentile¹, V. Esposito¹, M. Marchetti¹, J.M. Kenny²

¹ Dipartimento Aerospaziale - via Eudossiana, 18 Roma

² Istituto di Tecnologie Chimiche, Università di Perugia - Loc. Pentima Bassa,
21 - 05100 Terni

Sommario

Lo sviluppo di una nuova classe di materiali è sempre guidato da diverse esigenze spesso in conflitto tra di esse. Nel caso dei materiali compositi a matrice metallica (CMM) le elevate caratteristiche meccaniche e la leggerezza, richieste dal mercato, soprattutto quello autoveicolistico, sono ottenute a fronte di un elevato costo di produzione imputabile principalmente alla scarsa disponibilità di tecnologie di produzione e formatura sufficientemente ottimizzate. In considerazione di ciò, la ricerca è stata rivolta soprattutto verso materiali compositi a matrice in lega di alluminio rinforzata con particelle o fibre corte ceramiche (Al_2O_3 o SiC), che esibiscono ottime caratteristiche di rigidità e resistenza ad usura, pur mantenendosi economicamente competitivi con le leghe di alluminio non rinforzate.

In tale contesto, sono state analizzate le tecnologie di produzione per le quali si ritiene più promettente il passaggio alla produzione di grande serie, come lo "squeeze-casting" e il "compo-casting". Nel primo caso il processo di produzione è stato messo a punto e sono stati ottenuti in forma preliminare provini di forma semplice.

Questa ricerca vuole tracciare un quadro dello stato dell'arte dei metodi di produzione e caratterizzazione dei compositi a matrice metallica, evidenziando le problematiche a carattere tecnologico e di indagine di maggiore interesse.

INTRODUZIONE

Le potenziali applicazioni dei CMM sono numerose e fra loro notevolmente differenziate, in relazione alle possibili combinazioni realizzabili di matrici metalliche e rinforzi.

Le principali proprietà che giustificano la potenzialità di un'applicazione crescente dei CMM sono: caratteristiche meccaniche specifiche più alte, soprattutto ad alte temperature, maggiore resistenza all'usura ed al danneggiamento da impatto, un migliore coefficiente di smorzamento delle vibrazioni. Rispetto ai compositi a matrice polimerica presentano il vantaggio di poter essere impiegati a temperature più elevate, di avere una resistenza e una rigidità nella direzione trasversale migliore, di non assorbire acqua, di resistere di più alle radiazioni, di non degasare.

I problemi principali che limitano la crescita di questo tipo di materiali sono fondamentalmente: costo di produzione e, quindi, del prodotto, elevato; mancanza di dati sulle proprietà e di esperienze di riferimento; modesta tenacità a frattura; difficoltà di lavorazione e giunzione; limitata resistenza a fatica;

velocità di crescita delle cricche non trascurabile. E' necessario quindi per avere un impiego più diffuso dei CMM, creare informazioni adeguate sulle loro caratteristiche meccaniche e tecnologiche, che siano di aiuto sia al progettista, nella scelta del materiale per ogni specifica applicazione, sia al produttore nel definire le migliori metodologie di produzione e relativi parametri di processo.

Sul fronte dei produttori di CMM particolarmente attiva è la Duralcan, che ha sperimentato il proprio materiale, costituito da leghe di Al rinforzate con particelle di SiC o Allumina. Questo tipo di composito pur non presentando gli incrementi di proprietà meccaniche tipici dei materiali rinforzati con fibre lunghe o whiskers, è appetibile per produzioni commerciali di grande serie sia per il costo abbastanza contenuto e, secondo la Duralcan [1], sia perchè è possibile utilizzarlo con i comuni metodi di trasformazione quali la colata, l'estrusione, la forgiatura, con pochi adattamenti rispetto alle leghe di Alluminio non rinforzate. Componenti tipici prodotti con leghe Duralcan ed in fase di qualificazione sono: pistoni, bielle, camme cilindri, dischi e pinze freno, alberi di trasmissione. Inoltre si sta cercando di utilizzare i CMM anche per produrre oggetti di varia utilità, nel campo sportivo ad esempio, sempre la Duralcan ha realizzato dei cerchi per bicicletta meno costosi di quelli in fibra di carbonio. Un'altra società, la Dow Chemical sta sperimentando (oltre 150000 km. percorsi) un coperchio pompa olio per un'automobile realizzato in lega AZ91-particelle di Allumina. Per quanto riguarda le esperienze in Italia possiamo ricordare quelle svolte presso il Centro Ricerche Fiat per lo studio del rinforzo locale della testa cilindri per motori diesel. La fattibilità del prodotto è stata dimostrata, per ora, su scala di prototipi. L'attività del Centro Ricerche Fiat su compositi rinforzati con whiskers o fibre lunghe non è proseguita, poichè, nonostante le proprietà meccaniche indiscutibilmente superiori che questi tipi di materiali danno, il loro costo rimane proibitivo per applicazioni di larga scala. Attualmente l'interesse del CRF è rivolto a materiali di costo contenuto, soprattutto Alluminio rinforzato con particelle ceramiche.

Il campo aerospaziale è quello che può dare maggiore sviluppo a questo tipo di materiali, soprattutto in applicazioni militari, dove però la riservatezza non consente gli scambi delle informazioni tecnologiche necessarie ad una maggiore conoscenza delle applicazioni effettuate.

Lo studio svolto nel presente articolo è quindi rivolto a cercare di tracciare un primo bilancio di quello che è lo stato dell'arte per la produzione di CMM con matrici di Al e rinforzi con particelle ceramiche e ad individuare un possibile metodo di produzione e caratterizzazione a costi contenuti che rendano competitivi questo tipo di materiali. Per questo tipo di compositi con matrice in lega di Alluminio da lavorazione plastica con rinforzi a particelle e fibra corta, sono state preparate per estrusione vergelle, piattine e tubi di diverso diametro. La caratterizzazione di alcuni materiali ha evidenziato incrementi nel carico di rottura e nel modulo elastico, anche a temperature relativamente elevate. Per quanto riguarda la produzione, sono stati presi in considerazione due processi produttivi lo Squeeze-Casting ed il Compo-Casting. (fig. 1 e 2). Inoltre si descrivono le tecniche di caratterizzazione più comuni e necessarie per fornire al progettista una serie di informazioni indispensabili sul comportamento del

materiale per consentirne un uso appropriato. A titolo dimostrativo si riportano i risultati di alcune prove di trazione effettuate su provini con matrice di Alluminio rinforzata con particelle di SiC ed anche delle simulazioni numeriche di problematiche affrontabili con codici di calcolo agli Elementi Finiti (FEM). Attualmente presso il Dipartimento Aerospaziale si sta mettendo a punto un codice di calcolo BEM (Boundary Element) per trattare materiali ortotropi con caratteristiche di comportamento duttile e, quindi, particolarmente adatto per l'analisi del comportamento a frattura dei CMM.

1 PRODUZIONE

Le tecnologie di produzione sono numerose e sono basate sull'impiego del metallo di matrice sia allo stato solido che semisolido, fuso od in polvere. Attualmente le tecnologie di produzione che destano maggiore interesse sono quelle che consentono di arrivare direttamente al manufatto, riducendo o eliminando del tutto le difficili e costose lavorazioni secondarie agli utensili (tecnologia "net shape"). Come già detto l'orientazione attuale dei produttori e, in particolare, della Duralcan, è quella di produrre CMM con matrice di Alluminio rinforzata con fibra corta o particelle che, pur non consentendo notevoli miglioramenti nelle proprietà meccaniche in termini di modulo di Young (fig. 3,4), consente un notevole aumento in durezza e resistenza ad usura, senza intaccare sensibilmente le proprietà di tenacità e resistenza ad impatto. Inoltre viene ridotto il coefficiente di dilatazione termica e quindi diminuiscono gli effetti fastidiosi dovuti al ritiro durante la solidificazione. Infine il costo della materia prima non è eccessivo e c'è notevole conoscenza da parte di progettisti e produttori di componenti a trattare il materiale.

Per quanto concerne le tecniche di produzione di particolari in CMM possiamo a grandi linee individuare quattro categorie :

fusione; deformazione plastica; infiltrazione; compattazione per diffusione.

Da un punto di vista prettamente operativo, potremmo raggruppare i processi di fusione e di deformazione plastica sotto il comune denominatore di tecniche che necessitano in partenza di materiali semilavorati in CMM. Tale peculiarità le distingue dai processi di infiltrazione e di compattazione per diffusione, ove i materiali che entrano in gioco nel processo produttivo sono le materie prime (le fibre ceramiche, le leghe metalliche). Prima di analizzare in particolare, ognuno dei sistemi di produzione, proposti per la produzione dei CMM possiamo schematizzarli come segue:

processi di deformazione plastica----->stampaggio a caldo

metodologia delle polveri----->estrazione

processi d'infiltrazione-----> squeeze-casting o liquid pressure forming

PROCESSI DI DEFORMAZIONE PLASTICA: sotto questa voce vanno tutti i processi che permettono di ottenere tramite un preriscaldamento ed una successiva applicazione di una forza, che può essere di natura statica o dinamica, il manufatto desiderato.

Da esperienze effettuate su tecniche di produzione di CMM si sono ricavate le seguenti considerazioni:

1. è necessaria una riprogettazione del particolare al fine di esaltare le caratteristiche dei CMM e contemporaneamente sopperire alla minore plasticità intrinseca.
2. è preferibile, soprattutto qualora il rinforzante sia di tipo bidimensionale, una fibra piuttosto che un particolato, usufruire di forze di deformazione statiche al fine di non rompere le fibre stesse..

Si può concludere che un prodotto CMM, ottenuto per deformazione plastica, risulta portare con se vantaggi di un costo di processo di trasformazione che non si discosta in linea di principio dall'analogo adottato per le convenzionali leghe di Alluminio. Presenta però, naturalmente, gli stessi limiti tecnologici: necessità di angoli di spoglia, di raggi di raccordo, ecc..., e contemporaneamente non soddisfa alcune esigenze quali la distribuzione differenziata e preferenziale del rinforzante.

METALLURGIA DELLE POLVERI: la miscelazione meccanica di polveri metalliche e rinforzi ceramici discontinui è stata la prima tecnologia produttiva che ha permesso di ottenere una distribuzione uniforme dei rinforzi all'interno della matrice metallica e rappresenta ancor oggi una tecnologia produttiva industrialmente valida. Questo metodo comporta infatti numerosi vantaggi dal punto di vista tecnico legati al fatto che le fasi ceramiche non vengono a contatto con il metallo liquido, evitando così il rischio di reazioni chimiche indesiderate. In tal modo è possibile produrre una vasta gamma di materiali, scegliendo gli opportuni abbinamenti tra diversi tipi di rinforzi e diversi tipi di leghe. In particolare risulta possibile combinare rinforzi in Carburo di Silicio anche con leghe da lavorazione plastica a basso contenuto di Silicio. La frazione volumetrica della fase ceramica può variare entro limiti molto ampi (fino al 40%). Una proprietà della metallurgia delle polveri è quella di produrre una matrice metallica caratterizzata da un'ottima omogeneità fisica. Questi fattori si traducono nelle elevate proprietà meccaniche dei compositi prodotti, a fronte delle quali si pone la complessità della sequenza di operazioni richieste, che possono così essere schematizzate:



I due processi produttivi più promettenti per uno sviluppo di compositi competitivi sul mercato con le leghe di materiale non rinforzato sono comunque lo Squeeze-Casting ed il Compo-Casting [2],[3],[4],[5].

SQUEEZE-CASTING: questa tecnologia (fig.1) consente di ottenere getti in forma quasi finita contenenti diversi tipi di rinforzi ceramici. Per quanto riguarda i rinforzi con fibre i getti vengono prodotti mediante infiltrazione di preformati. Per il rinforzo particellare si ricorre, invece, alla colata di leghe preinforzate, prodotte tramite compo-casting.

Questo processo appartiene al gruppo delle tecnologie di colata e di stampo metallico permanente.

Lo schema produttivo è riportato in fig. 1 : dopo aver preriscaldato e posizionato una idonea preforma di materiale ceramico nella cavità dello stampo, si inietta allo stato liquido in quest'ultimo, la lega prescelta. Il metallo liquido iniettato sotto pressione, che in certi casi può raggiungere anche i 100 MPa, va ad infiltrarsi nel materiale ceramico e, l'applicazione della pressione fino al suo completo consolidamento, assicura l'assenza di porosità nel manufatto.

Con questo processo si ottengono una solidificazione estremamente rapida con l'ottenimento di una struttura cristallina fine ed omogenea, e conseguentemente assenza di reazioni chimiche di diffusione all'interfaccia matrice-rinforzo (formazione di compositi infragiliti) ed assenza di difetti interni dovuti a ritiro o gas intrappolato. Si ottengono, quindi, dei materiali con proprietà meccaniche decisamente superiori rispetto ai getti ottenuti con le tecnologie di colata tradizionali.

- **INFILTRAZIONE DI PREFORMATI:** Una preforma porosa di fibre corte ceramiche posta nello stampo viene infiltrata con metallo allo stato fuso e sottoposta a pressione (fig.2). Il fatto di poter disporre in anticipo le fibre consente di produrre un componente rinforzato in misura maggiore nelle parti dove è più sollecitato. Ovviamente bisogna prestare la massima attenzione a dei parametri quali la temperatura di processo, la velocità di iniezione del metallo, la pressione applicata ed il tempo di permanenza del composito nello stampo, poichè un'impostazione errata di uno di questi parametri di processo può causare una serie di difetti nel materiale che possono riguardare sia il rinforzo che la matrice.
- **COLATA DI LEGHE PRE-RINFORZATE:** In questo caso si impiegano leghe di Alluminio preinforzate con particelle ceramiche (Al_2O_3 o SiC). Le leghe preinforzate vengono prodotte tramite compo-casting e possono essere rifuse ed utilizzate allo stato liquido per la formatura. E' necessario, però, a differenza del caso precedente, trattare il metallo di colata con degasaggio e bisogna anche mantenere in agitazione il bagno fuso per evitare la sedimentazione per gravità delle particelle.

COMPO-CASTING: il bagno metallico parzialmente solidificato, viene sottoposto a continue vigorose sollecitazioni di taglio durante il raffreddamento che servono a mantenere una bassa viscosità anche quando la frazione di solido supera il 50%. Lo stato semisolido della lega di matrice presenta una bagnabilità superiore nei confronti del rinforzo ceramico ed è quindi favorita la dispersione delle particelle, in assenza di fenomeni di coalescenza e di sedimentazione, con

l'ottenimento di distribuzione omogenea del rinforzo. Uno dei principali vantaggi ottenuti con questa metodologia è che i compositi possono essere formati con processi allo stato semisolido o allo stato liquido (squeeze casting).

2 CARATTERIZZAZIONE

Le procedure di caratterizzazione dei materiali sono quelle solite per ogni materiale, e cioè, prove di tenacità, di rigidità, di durezza, prove di impatto ed analisi frattografica [6]. Queste prove sono necessarie per due motivi: dare informazioni al produttore sul prodotto finito tali che, modificando opportunamente alcuni dei parametri che regolano il processo produttivo, si possa pervenire ad un prodotto finito che abbia caratteristiche il più possibile vicine a quelle desiderate e dare informazioni al progettista tali da consentire l'impiego più idoneo del prodotto finito.

In particolare in questo lavoro è stata effettuata una serie di prove di trazione su provini con matrice di Alluminio e SiC al 4,8,10,15 %. I provini sono stati prodotti secondo normativa ASTM D 3552-77 [7]. La lega base è del tipo Al-7Si-0.6Mg; il composito è stato ottenuto tramite compo-casting con rinforzo di fibre corte di SiC ($E=180-200$ GPa, $\sigma_r=2500$ MPa [8]). La geometria utilizzata è riportata in figura 5. In figura 3 è riportato il diagramma tensione-deformazione. Si può notare che, per il range di lunghezza di fibre e di frazione volumetrica che sono state studiate, lo sforzo di snervamento (σ_y) non è aumentato rispetto a quello della matrice non rinforzata. L'aumento della frazione volumetrica porta ad una diminuzione della tensione di rottura σ_r a temperatura ambiente. Si può anche notare che la presenza delle fibre comporta un infragilimento della matrice, infatti si nota chiaramente la netta diminuzione della deformazione alla rottura. In figura 4 è riportato l'andamento del modulo di Young al variare della percentuale di fibre. Si può notare un piccolo miglioramento all'aumentare della percentuale di fibra; in conclusione il materiale migliora la rigidità all'aumentare della frazione di volume delle fibre, ma perde in duttilità. Queste prove consentono di definire i parametri che controllano la produzione (temperatura, velocità di iniezione, ecc..) in maniera tale da avere caratteristiche del prodotto prestabilite. Ovviamente non è pensabile effettuare per ogni variazione di parametro una campagna di prove ed è quindi, opportuno cercare di sfruttare dei codici numerici che, tenendo conto dei parametri principali di produzione, arrivino a dare delle indicazioni di massima sulle caratteristiche meccaniche del prodotto finito.

Accanto a questo tipo di analisi numerica del fenomeno, ancora in fase di studio, si possono sfruttare dei codici numerici FEM per analizzare il comportamento a frattura del provino. Inoltre i risultati sperimentali ottenuti su provini possono essere elaborati da questi codici FEM o BEM consentendo la valutazione delle proprietà del prodotto finito nelle condizioni di vincoli e carico di esercizio e la successiva ottimizzazione del prodotto stesso. I vantaggi di un tale approccio sono essenzialmente quelli di poter prevedere il comportamento del prodotto sotto varie condizioni e di effettuare una verifica sperimentale su provini di piccole dimensioni e non su più costosi prototipi in dimensioni reali. A titolo di

esempio vengono riportate due mesh (fig. 6 e fig. 7) effettuate con codice FEM (Marc) per mettere in luce il possibile studio di problemi di Meccanica della Frattura effettuabili con questo tipo di approccio.

3 CONCLUSIONI

Le tecnologie di produzione di CMM che attualmente sembrano avere le prospettive più ampie per uno sviluppo legato alle possibilità di ricezione del mercato in termini di rapporto costi/benefici, sembrano essere lo Squeeze-Casting ed il Compo-Casting per la produzione di CMM a matrice in lega di Alluminio. E' necessario però effettuare sui materiali prodotti una caratterizzazione accurata, sia per definire le caratteristiche del prodotto e quindi di verificare l'influenza dei parametri che controllano il processo produttivo e di agire su di essi in maniera tale da ottenere il prodotto finito con determinate caratteristiche stabilite a priori e sia per fornire ai progettisti informazioni utili per l'impiego più idoneo di questi materiali.

Alle prove sperimentali necessarie per la caratterizzazione è possibile abbinare delle simulazioni numeriche con codici di calcolo FEM per l'analisi del comportamento a frattura e, una volta verificata la corrispondenza dei risultati numerici con quelli sperimentali, passare alla progettazione del componente.

E' stato verificato, inoltre, che i CMM realizzati con fibre corte e matrice di Alluminio, anche se consentono un costo non elevato (in relazione a quelli a fibre lunghe) ed un miglioramento nel modulo di Young, causano però un infragilimento nella matrice. E' necessario quindi cercare di ottimizzare la frazione di volume delle fibre in maniera tale da non avere eccessivo infragilimento pur ottenendo una buona rigidità.

Il presente lavoro è il primo passo verso una caratterizzazione completa di questi CMM a matrice di Alluminio e di una analisi accurata del loro comportamento a frattura.

BIBLIOGRAFIA

1. Duralcan MMC - "Rapporto Tecnico 1991" - Dural Aluminium Composite Corporation, San Diego (USA).
2. Harris - "Fiber-Reinforced Aluminium Alloys". - Treatise on Materials Science and Tecnology, Vol 31 (1989)
3. Gibson, A.J. Clegg, A.A. Das - "Production and evalutation of squeeze-cast graphitic Al-Si Alloy" - Materials Science and Technology, July 1985, Vol. 1
4. Lim Y.H. Kim, C.S. Lee and K.S. Han - "Fabrication and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composite Materials" - Journal of Composite Materials, Vol 26, N° 7/1992
5. W. Clyne - "Fabrication and Microstructure of Metal Matrix Composites" - Second European Conference on Composite Materials , Vol 2 ppgg. 2.275-2.286
6. Atzori, A. Prato - "Casting and Characterization of an Aluminium Alloy Car Engine Bracket Produced by Squeeze Casting Tehnology" - Third

7. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Reinforced Metal Matrix Composites. (1977).
8. F. Girot, J.M. Quenisset, R. Naslain, B. Countand, T. Macke - "Mechanical behavior of Aluminium Matrix Composites Reinforced by Short Fibers and Processed by Compcasting" - Second European Conference on Composite Materials , Vol 2 pp. 2.330-2.339
9. Bernard, F. Taricco - "Metal Matrix Composites in Automotive Applications" - Second Seminar and Exhibition ATA-MAT, Torino 1989

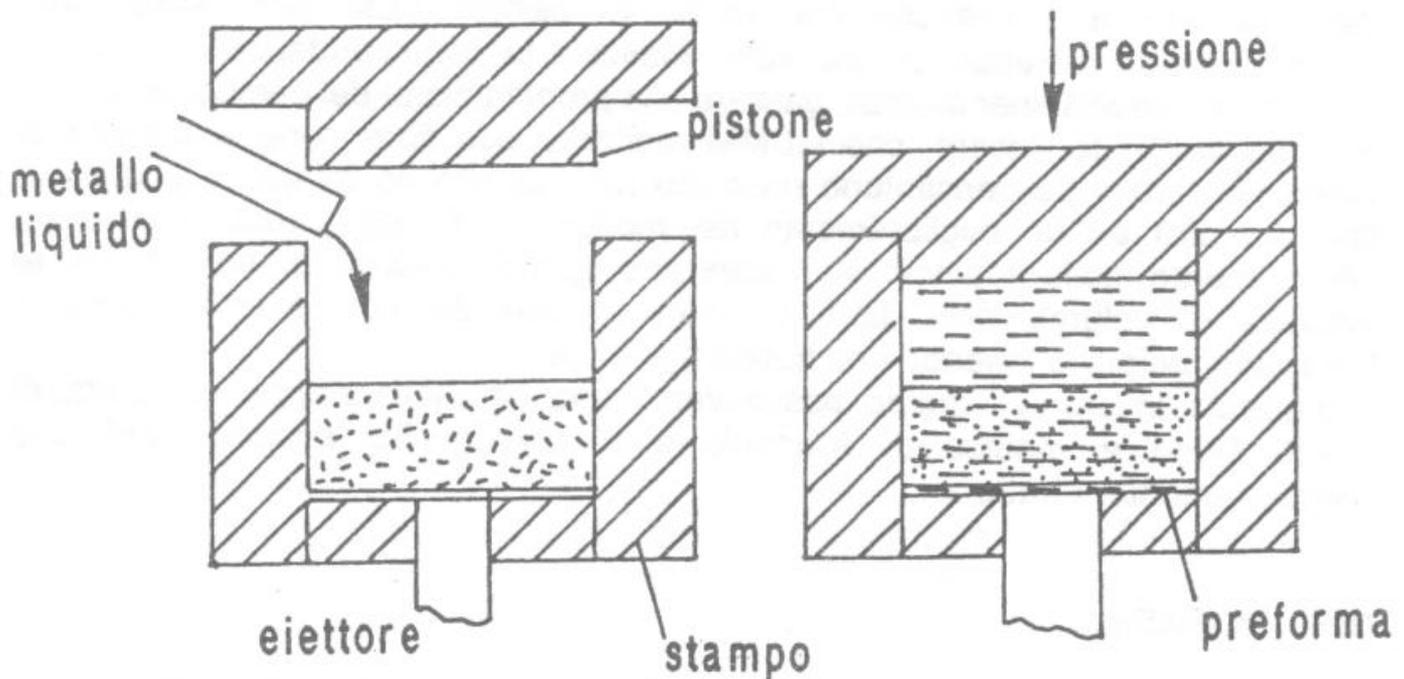


fig. 1 processo di produzione Squeeze-Casting

a) prima dell'iniezione; b) ad iniezione avvenuta si applica la pressione per consentire l'infiltrazione della preforma.

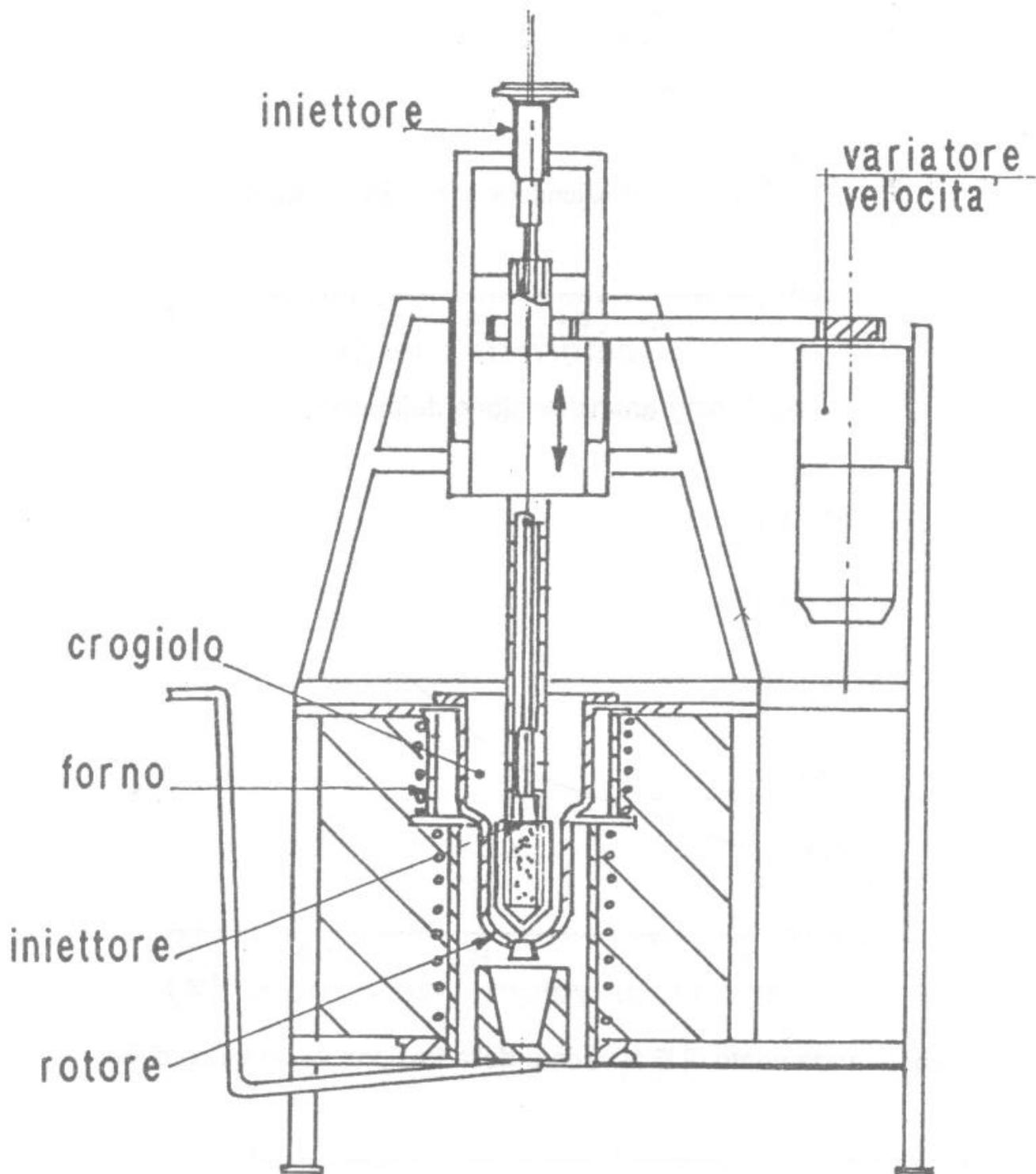


fig. 2 processo di produzione Compo-Casting

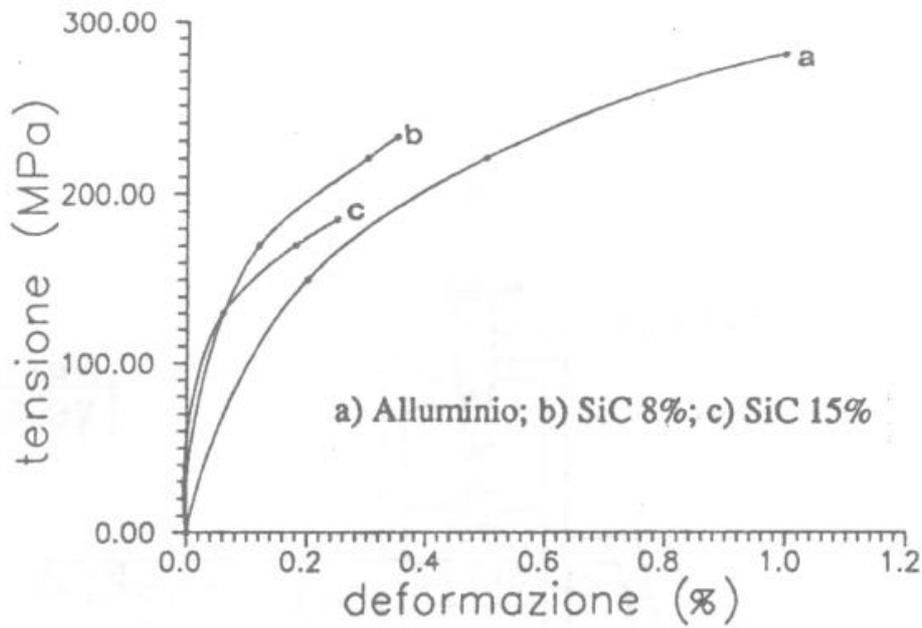


fig. 3 diagramma tensione deformazione

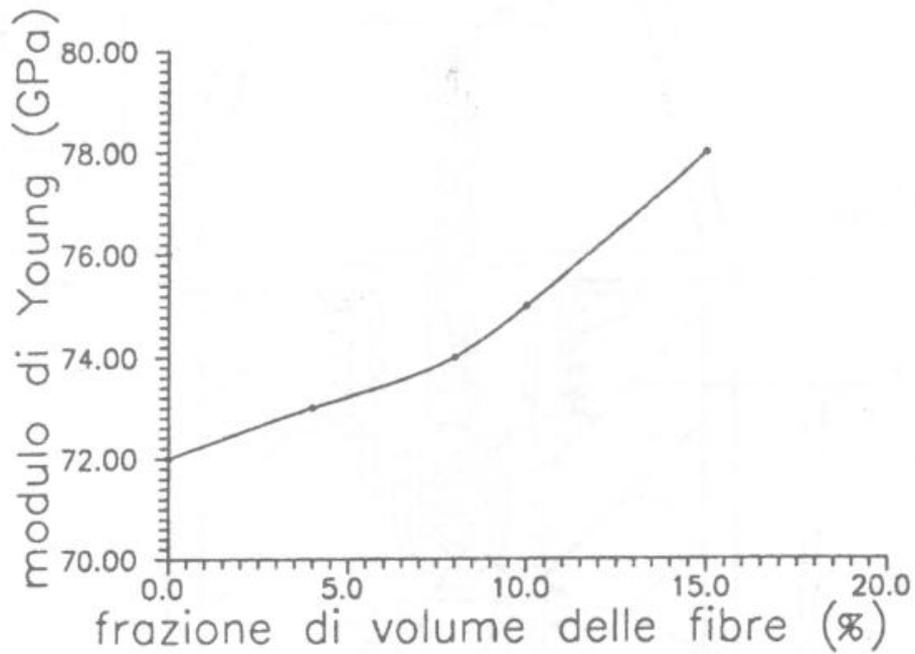


fig. 4 andamento di E al variare della frazione volumetrica di SiC

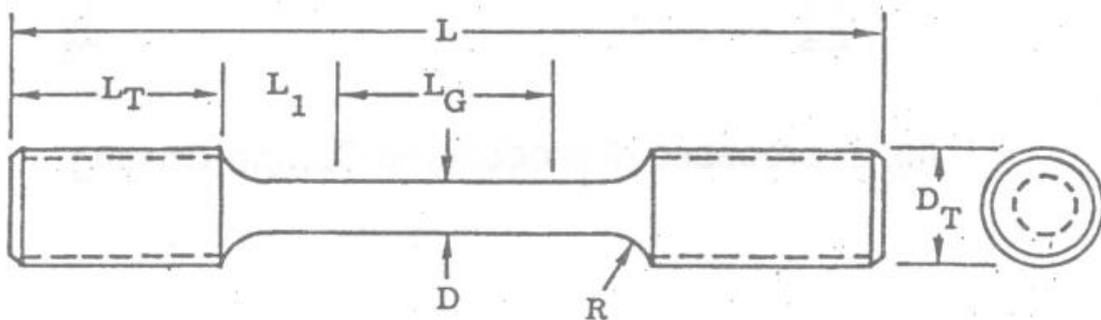


fig. 5 geometria del provino usata nelle prove di trazione

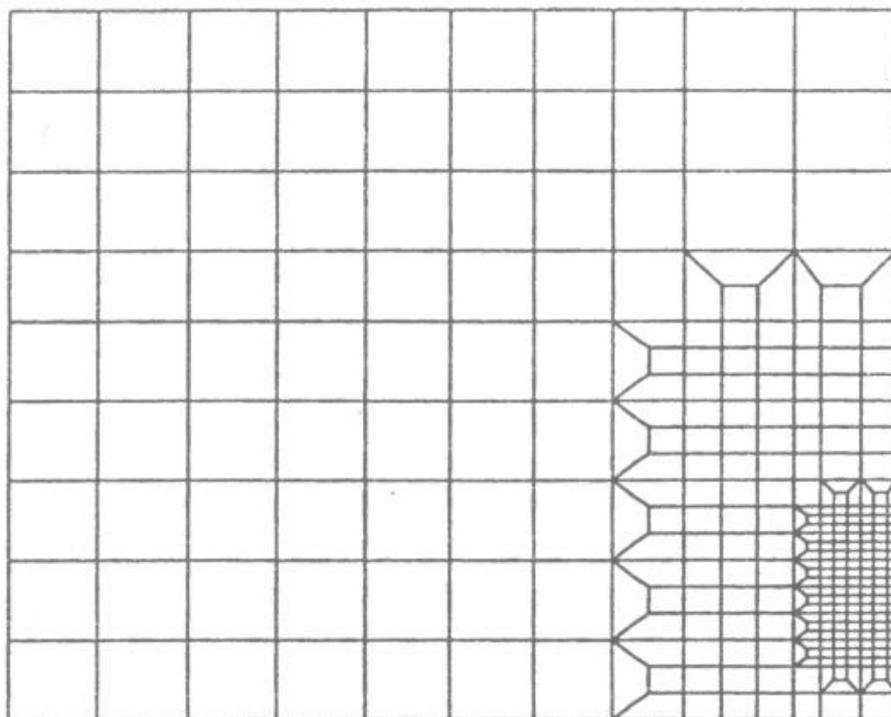


fig. 6 esempio di mesh con cricca centrale

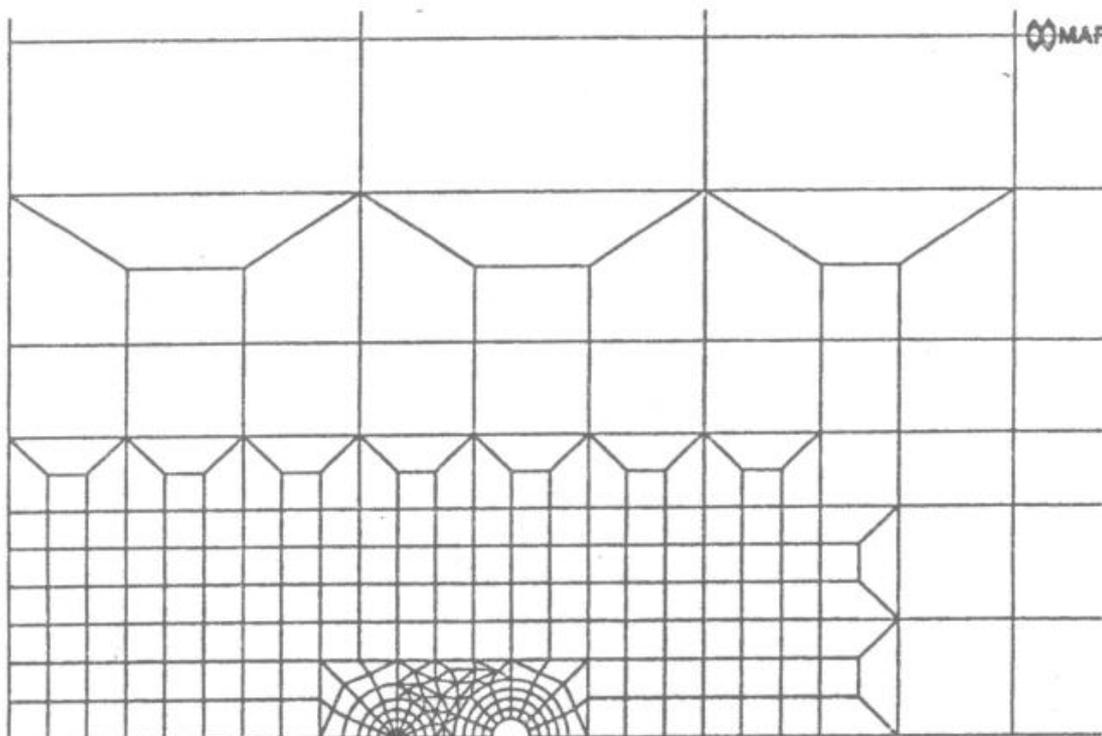


fig. 7 esempio di mesh con foro centrale