

## **Teresa Frye**

TechForm Advanced Casting Technology

**Teresa Frye** ha maturato oltre 25 anni di esperienza di lavoro nell'industria della fusione di precisione. Ha dedicato i primi anni della carriera all'attività di vendita e marketing presso la Precision Castparts Corpo., al servizio di un ampio portafoglio clienti internazionali nel settore della fusione aerospaziale in Europa e in Giappone. Nel 1994 è cofondatrice della TechForm Advanced Casting Technology. La TechForm ha avviato la propria attività servendo i mercati aerospaziale e medico, affacciandosi all'industria gioielliera nel 1995 e specializzandosi nei metalli del gruppo del platino e nei metalli di base ad alta temperatura. Ha ottenuto il titolo di laurea in Affari Internazionali presso il Lewis & Clark College di Portland, in Oregon, USA.

*Oggi i produttori di gioielli incorporano come mai prima d'ora modelli di fusione prodotti digitalmente nei loro processi di produzione. I costi delle macchine sono scesi significativamente e ora i produttori possono scegliere fra un'ampia varietà di stampanti 3D e materiali. Nessuno di questi è qualitativamente identico agli altri e le numerose prove raccolte, sia aneddotiche che documentate, indicano che i materiali usati nella produzione digitale hanno diversi livelli di successo nella microfusione. Le principali cause dei difetti connessi non sono state comprese appieno, tanto che nel settore si fanno ancora numerose ipotesi e vengono proposte varie soluzioni.*

*Prima di tutto, verranno esaminati i comportamenti di alcuni dei principali materiali attraverso studi controllati, quindi farà seguito una valutazione del movimento dimensionale sperimentato da tali materiali quando sottoposti a microfusione e cottura. I difetti di fusione saranno fatti risalire alle loro cause originali tramite l'analisi dimensionale e l'osservazione della morfologia dei difetti nei prodotti di fusione.*

# “Uno studio degli effetti dei modelli di fusione prodotti digitalmente sulla qualità delle fusioni”

Teresa Fryé  
Presidente  
TechForm Advanced Casting Technology  
Portland, OR USA

Kevin Mueller  
Direttore operativo  
TechForm Advanced Casting Technology  
Portland, OR USA

## INTRODUZIONE

Lo studio dei comportamenti dei materiali per la prototipazione digitale non è nulla di nuovo. Dalla comparsa sul mercato di queste tecnologie agli inizi degli anni novanta, sono stati compiuti numerosi sforzi per sviluppare materiali che oltre a permettere di immaginare e percepire un oggetto in 3D nella sua forma plastica, fornissero ottimi risultati nei modelli per fusione per una varietà di metalli. Dalle ricerche finora compiute abbiamo appreso che tutti questi materiali esibiscono comportamenti diversi nel processo di fusione. Alcune soluzioni, come il build system QuickCast<sup>®</sup> di 3D Systems, sono state oggetto di studi approfonditi con numerose pubblicazioni in materia che aiutano a comprendere come ottenere la migliore fusione. Altri materiali sono troppo recenti oppure non esistono ancora pubblicazioni scientifiche a riguardo. L'obiettivo di questa ricerca è fare chiarezza sull'argomento e fornire ai designer di gioielli e alle fonderie strumenti più efficaci per trovare il materiale che più si addice alle loro esigenze individuali.

*Nota: gli autori non sponsorizzano nessuno dei prodotti utilizzati in questo studio. Data la complessità dei macchinari e dei materiali usati non è possibile trarre conclusioni accurate unicamente dall'analisi dei dati di questo studio.*

## MATERIALI PER MODELLI 3D

I materiali utilizzati più comunemente per i modelli 3D vengono classificati in tre gruppi sulla base delle rispettive proprietà chimiche e ai fini di questo studio sono raggruppati nelle seguenti categorie: fotopolimeri (polimerizzazione attraverso la luce), materiali termoplastici (tecnologie a getto) o a base di cera (tornitura CNC). La cera per iniezione, sebbene non utilizzata per la produzione digitale, è stata inclusa come riferimento e metro di paragone. Nella tabella 1 è riportato un elenco dei materiali per modelli con le rispettive classificazioni.

Classe materiale	ID materiale	Metodo DIGITALE
Fotopolimero	A	Stampa 3D polimerizzazione attraverso la luce
Fotopolimero	B	Stampa 3D polimerizzazione attraverso la luce
Materiale termoplastico	C	Stampa 3D a getto
Cerca polimerica (tornitura) verde	D	Tornitura CNC
Cerca polimerica (tornitura) blu	E	Tornitura CNC
Cerca polimerica (tornitura) viola	F	Tornitura CNC
Cerca polimerica (tornitura) arancione	G	Tornitura CNC
Resina cera idrocarburi verde	H	Iniezione stampi in plastica

Tabella 1 Materiali dei modelli

## GEOMETRIA DI PROVA E SCELTA DELLA LEGA

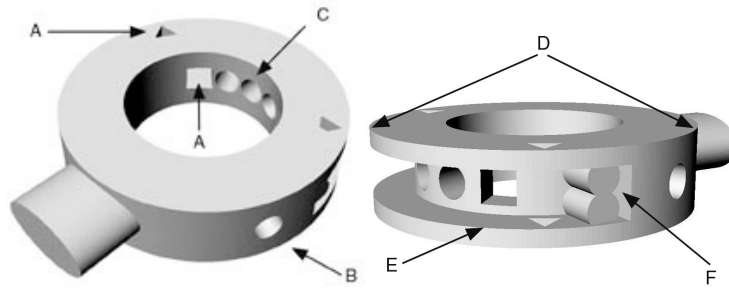


Figura 1 Geometria di prova

Per i nostri esperimenti abbiamo creato una geometria di prova progettata per favorire i difetti tipici riscontrati nella microfusione dei materiali per modelli 3D (Figura 1). Sulla base delle esperienze precedenti è stata scelta una forma toroidale spesso con fori profondi, angoli appuntiti e rientranze complesse, ovvero caratteristiche che aumentano le probabilità che insorgano difetti. Di seguito vengono riassunte le caratteristiche della geometria scelta:

*Angolo appuntito (A):* Indipendentemente dal materiale del modello, gli angoli appuntiti possono compromettere fortemente il processo di fusione a causa della debolezza creata nel guscio/microfusione dalla tensione di un angolo di  $90^\circ$ . Si potrebbe ipotizzare che questa condizione venga amplificata quando la velocità di espansione del materiale del modello è molto elevata; la pressione interna applicata a un sistema già indebolito causerebbe un danno precoce rispetto a quello che potrebbe essere causato dalla fusione con materiali con espansione minima.

*Fori profondi/ciechi (B&C):* Fori troppo profondi possono causare problemi per svariati motivi. In primo luogo, la microfusione interna non ha una grande massa ed è dunque più debole per sua natura. In secondo luogo, potrebbe essere difficile ottenere un'anima molto densa poiché il materiale potrebbe riempire il foro cieco in modo impreciso, ovvero sul fondo potrebbe rimanere intrappolata dell'aria oppure l'incollaggio della microfusione al modello potrebbe non avvenire completamente. Infine, cosa più importante ai fini di questo studio, l'anima lunga e sottile potrebbe essere premuta in modo concentrico dal materiale del modello in espansione.

*Forma toroidale spessa, con bordi appuntiti (D & E):* Osservando i processi di produzione abbiamo riscontrato che i pezzi più spessi tendono maggiormente a presentare difetti nella microfusione. La massa maggiore può aumentare le sollecitazioni sulla microfusione non solo a livello dimensionale, ma anche in termini di ritenzione del calore e forza del metallo che entra ad alta velocità nella cavità dello stampo.

*Rientranza complessa (F):* Questo tipo di geometria lascia presumere che le forze applicate sulla microfusione siano molteplici. Tra i dettagli molto ravvicinati la "parete" di microfusione è sottile. Se si verifica un'espansione notevole del modello mentre la microfusione è ancora nello stato verde, questa parete sottile e relativamente debole può rompersi e i due dettagli fondersi in un unico elemento.

*Lega:* È stata scelta una lega al 90% di platino e 10% di iridio data la sua elevata densità e le alte temperature del cassero e di colata che devono essere utilizzate nella fusione. Questi parametri estremi naturalmente mettono a repentaglio la qualità della fusione, di conseguenza rappresentano buoni indicatori di robustezza quando si considerano le reciproche prestazioni dei materiali per i modelli.

## ESPERIMENTI DI COTTURA

La prima serie di esperimenti condotta era finalizzata a misurare la quantità di ceneri residue dopo la cottura. A tale scopo abbiamo utilizzato due contenitori; uno coperto per simulare il flusso d'aria ristretto di un tipico cassero di fusione e uno scoperto per il flusso d'aria libero (Figura 2).



Figura 2 Contenitore di cottura – Aria piena

Materiale		Deformazione	Temperatura di ebollizione/cottura	Residuo con aria piena	Residuo con flusso d'aria ristretto
Fotopolimero	A	425°C - 450°C	~450°C - 475°C	5	4
Fotopolimero	B	275°C	~450°C	9	8
Materiale termoplastico	C	110°C	~175°C	3	2
Cerca tornitura verde	D	125°C	~350°C	5	1
Cerca tornitura blu	E	100°C	~350°C	5	2
Cerca tornitura viola	F	125°C	~350°C	4	1
Cerca tornitura arancione	G	150°C	~390°C	3	1
Cerca iniezione verde	H	75°C	~240°C	4	1

Tabella 2 Risultati di cottura

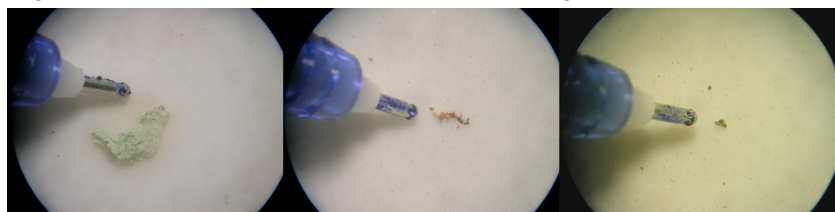
Nota: 1= contenuto minimo di ceneri; 10 = contenuto massimo di ceneri. Per gli esempi vedere le Figure da 3 a 6.

Chiaramente, la scoperta più interessante in questa fase del nostro studio è stata la relativa scarsità di residui di ceneri riscontrata con l'utilizzo del contenitore coperto. Secondo la nostra ipotesi, la maggiore esposizione all'aria e il potenziale di circolazione offerto dal contenitore aperto avrebbero dovuto avere come effetto un minor residuo di ceneri. Il risultato è stato sorprendentemente l'opposto. Anche per i fotopolimeri, coprendo il contenitore i residui di cenere si sono in parte ridotti.

Alla luce di queste scoperte andrebbero condotti ulteriori esperimenti con casseri per fusione veri.

In sintesi, tutti i materiali hanno lasciato un certo residuo di ceneri dopo la cottura. Il residuo più basso è stato riscontrato con la cera arancione, mentre il più alto con i fotopolimeri.

La Figura 3 mostra il volume di ceneri raffrontato con la punta di una penna. Partendo da questi risultati, nello studio di correlazione seguente verrà analizzata la corrispondente morfologia del difetto.



Fotopolimero

Cera per tornitura verde

Cera per tornitura arancione

Figura 3 Residui di ceneri – Aria piena

## MISURAZIONI DELL'ESPANSIONE TERMICA DEL MODELLO - BACKGROUND

Nello studio del 2005: "The Revolution of CAD/CAM in the Casting of Fine Jewelry"<sup>1</sup> di Adler e Fryé, venne dimostrato che i modelli erano soggetti a una significativa espansione termica, soprattutto quelli della categoria dei fotopolimeri. A livello fisico, l'espansione era stata dimostrata dall'osservazione secondo cui le dimensioni delle fusioni ottenute con modelli fotopolimerici erano superiori a quelle dei modelli stessi.

La cavità dello stampo si era chiaramente ingrandita, in teoria a causa del fatto che l'espansione dei modelli (e di conseguenza la cavità stessa) avviene mentre la microfusione è ancora nello stato verde flessibile. Questa espansione, come dimostrato dallo studio del 2005, avviene sia nei processi di microfusione che di cottura. Ciò che non venne pienamente compreso allora, tuttavia, era la velocità di espansione dei diversi modelli in 3D e il rapporto tra questa velocità e la qualità della fusione. Ad esempio, come influisce l'inizio dell'espansione sul tempo totale di cottura? I materiali che si espandono prima causano più danni, oppure un'espansione tardiva è più dannosa per la nostra microfusione? Per rispondere a queste domande abbiamo deciso di valutare la velocità dell'espansione termica dei materiali per modelli di utilizzo più comune.

## MISURAZIONI DELL'ESPANSIONE TERMICA DEL MODELLO - METODO

Per poter analizzare l'espansione termica dei nostri materiali per la produzione digitale abbiamo per prima cosa condotto indagini telefoniche e ricerche su Internet per verificare l'esistenza di informazioni a riguardo. Abbiamo dunque contattato i produttori di stampanti 3D e torni CNC per cere. Abbiamo svolto ricerche su Internet trovando tuttavia informazioni molto limitate a riprova del fatto che occorreva condurre uno studio apposito per ottenere e confrontare i dati. Il passo successivo consisteva nel trovare un metodo affidabile per misurare i materiali a temperature elevate. Per misurare la velocità e il volume di espansione in condizioni tipiche di cottura necessitavamo di un dispositivo resistente alle temperature e molto sensibile. Dalle ricerche e dai colloqui condotti con i laboratori di prova specializzati in queste misurazioni è emerso che il metodo più affidabile per misurare l'espansione termica delle resine fotopolimeriche e della cera consisteva nel ricorrere a un dilatometro. Purtroppo, a seguito di ulteriori indagini, questo metodo è stato scartato a causa dei costi elevati che comportava l'acquisto di un dilatometro o l'affidamento di queste prove a un laboratorio esterno per numerosi campioni di materiali diversi.

Venne ideato un secondo metodo più economico che si basava sull'utilizzo di un supporto in acciaio, un comparatore a quadrante e una sonda al quarzo. (Figure 4-5) La struttura comprende quattro elementi principali realizzati in acciaio. Il primo pezzo rappresenta la "base" della struttura, il cui spessore è fondamentale per prevenire la deformazione durante l'esposizione al ciclo di temperature. I due pezzi successivi, le piastre "A" e "B", tengono i modelli in posizione. Le piastre sono state livellate su entrambi i piedini per mantenerle in linea con la base della struttura, affinché i modelli rimanessero adeguatamente in posizione durante il test. La piastra "A" era due volte più alta della piastra "B", affinché potesse estendersi oltre l'altezza dei modelli.

In questo modo si veniva a formare una superficie di appoggio piatta che forzava la crescita del modello in un'unica direzione; inoltre la forza di serraggio era presente solo al centro della piastra "A" in modo tale che il modello non potesse inclinarsi in avanti, per evitare il rischio di fessure tra la struttura e il modello. (Qualsiasi fessura esibirebbe una crescita negativa durante il ciclo di temperature perché provocherebbe l'allontanamento del modello dalla sonda, anziché avvicinarlo.) L'ultimo pezzo è rappresentato dalla "guida al quarzo", un filo in acciaio armonico calibro 16 con un'asola piegata a un'estremità, bloccato in posizione all'altra estremità tramite una vite che ne permette la regolazione all'altezza desiderata. La guida ha lo scopo di evitare che la sonda al quarzo appoggi sulla piastra "B" durante il test, garantendone il movimento libero durante i cicli di temperatura.

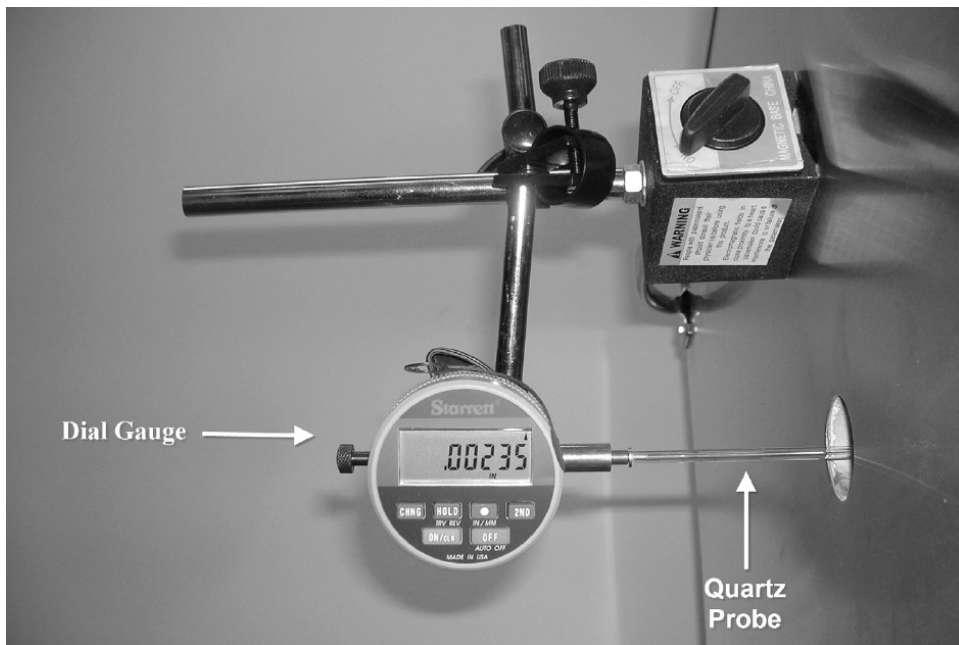


Figura 4 - Esterno forno - Comparatore a quadrante e sonda al quarzo

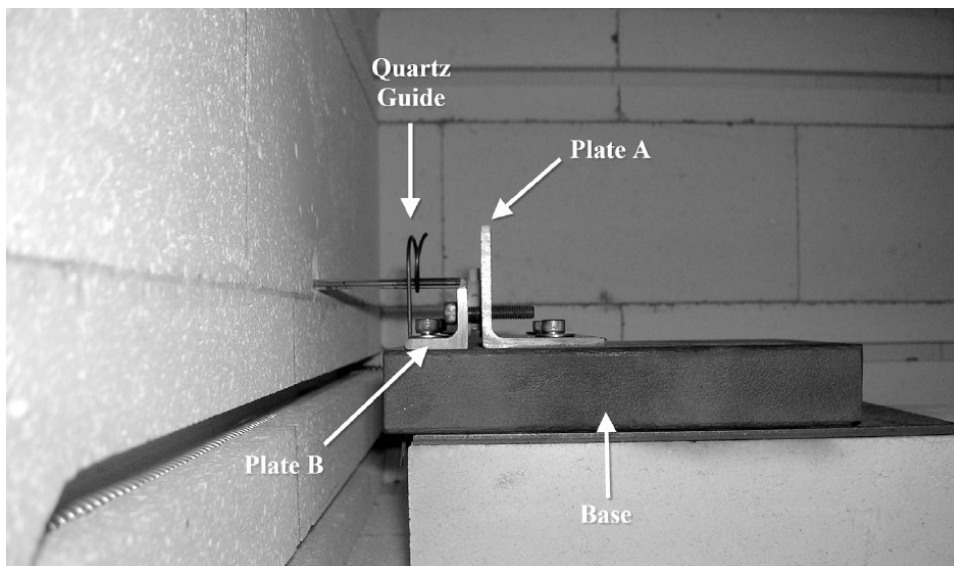


Figura 5 Interno forno – Guida al quarzo e struttura di supporto

## ALLESTIMENTO DEL TEST

Per fissarlo alla struttura, il modello è stato posizionato tra le due piastre e le viti sono state serrate a mano per non stringerlo eccessivamente. I modelli sono stati collocati in modo tale che il diametro interno si trovasse in corrispondenza della parte superiore della piastra "B" con il canale di colata rivolto verso l'alto. La morsa è stata successivamente serrata prestando attenzione a non schiacciare o deformare il modello. A serraggio avvenuto, la struttura è stata posizionata in forno. Per misurare il modello durante il ciclo di temperature è stato utilizzato un comparatore a quadrante con range di 0,250" e precisione di 0,00005". Utilizzando un adattatore lavorato, sull'indicatore a quadrante è stata montata una sonda al quarzo con diametro di 0,150" per 8". Ai fini dei test, l'estremità smussata della sonda è stata posizionata a filo dei modelli. Dopo aver posizionato la struttura nel forno, la sonda al quarzo è stata fatta avanzare attraverso il foro di ispezione e la guida. La struttura è stata successivamente spostata in avanti affinché la sonda fosse a contatto con il modello e sull'indicatore del quadrante comparisse un valore ~0,02000. Per misurare e verificare la distanza tra la struttura e la parete del forno è stato utilizzato un calibro. Una volta controllata la posizione della struttura nel forno, la porta è stata chiusa e l'indicatore a quadrante è stato azzerato. Successivamente, la sonda è stata tirata leggermente indietro ed è stata fatta scattare nuovamente in avanti a contatto con il modello. Questa operazione è stata ripetuta per tre volte per verificare l'azzeramento della sonda.

## CICLO DI TEMPERATURE

Tutti i modelli sono stati sottoposti a una serie di incrementi di temperatura con progressione di 25°C alla volta. Si è atteso che ogni fase andasse in temperatura e la mantenesse per dieci minuti prima di registrare la dimensione. I modelli in cera per tornitura e in materiale termoplastico con punti di fusione relativamente bassi hanno iniziato il ciclo delle temperature a 50°C. I fotopolimeri, che presentano punti di fusione più alti, hanno iniziato il ciclo a 100 °C. I cicli di temperature sono proseguiti finché non è stata riscontrata una crescita negativa, indice del fatto che i modelli avevano iniziato fondere e deteriorarsi.

## MISURAZIONI DELL'ESPANSIONE TERMICA DEL MODELLO - RISULTATI

I grafici che seguono riportano le letture eseguite dalla struttura con la sonda al quarzo. Sebbene vengano riportate misure nell'ordine di millesimi di pollice, ciò non si deve considerare come una crescita assoluta dei modelli, bensì come uno schema del movimento della sonda al quarzo generato da ciascun materiale. Per quanto questo metodo sia relativamente preciso, i risultati dei nostri test non possono ignorare il possibile impatto dell'espansione termica della struttura e l'influenza dell'uomo nel posizionamento esatto della sonda. Inoltre, gli incrementi di temperatura e il tempo trascorso non erano identici alle curve di riscaldamento e il fatto che i modelli non fossero stati sottoposti a microfusione per il test non consente di valutare il potenziale impatto dell'assorbimento dell'acqua e delle altre dinamiche inerenti il processo di microfusione. Pertanto, per l'interpretazione dei grafici del movimento della sonda ci affidiamo più ai valori relativi che a quelli assoluti.

### CERA PER INIEZIONE

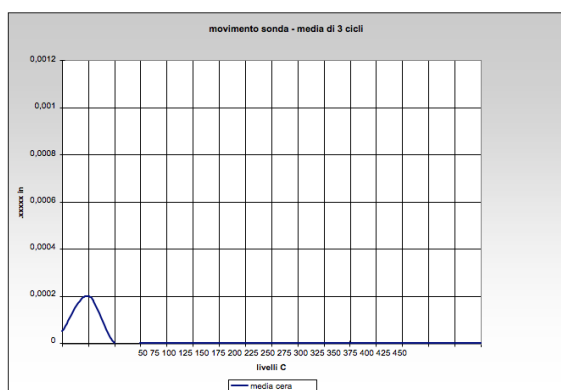


Figura 6 Movimento sonda cera per iniezione Materiale H: bassa espansione e temperatura di fusione

Figura 6 Movimento sonda cera per iniezione Materiale H: bassa espansione e temperatura di fusione

### CERA TORNITURA

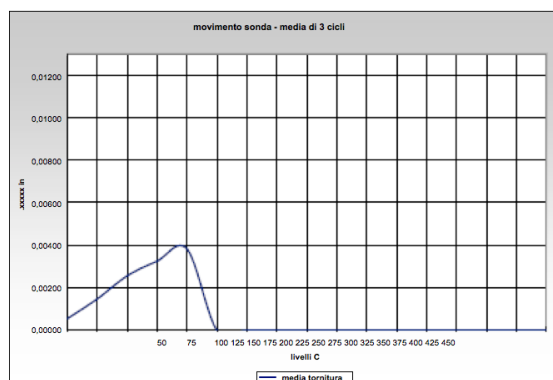


Figure 7 Movimento sonda cera tornitura viola Materiale F: espansione e temperatura di fusione modeste

Figure 7 Movimento sonda cera tornitura viola  
Materiale F: espansione e temperatura di fusione modeste

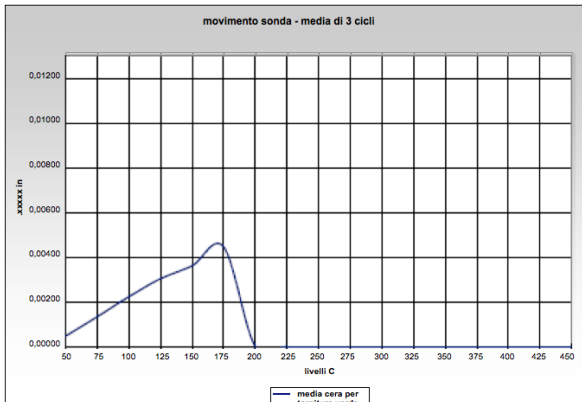


Figura 8 Movimento sonda cera tornitura verde  
 Materiale D: espansione e temperatura di fusione modeste

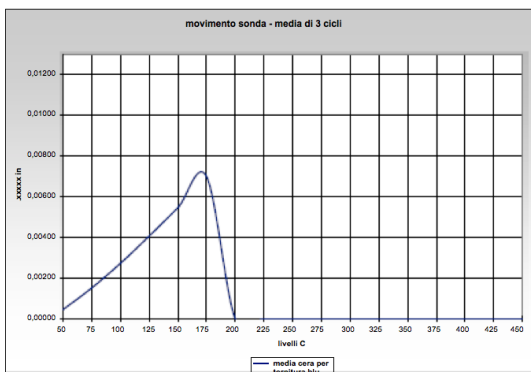


Figura 9 Movimento sonda cera tornitura blu  
 Materiale E: espansione moderatamente alta e temperatura di fusione moderata

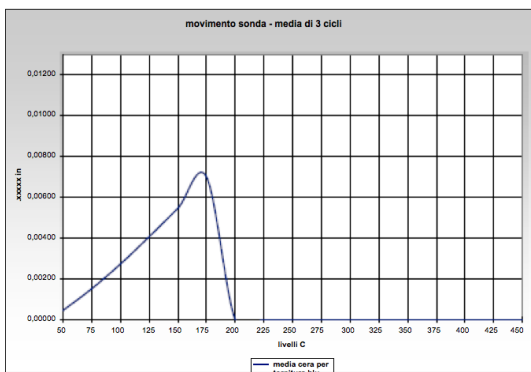


Figura 10 Movimento sonda cera tornitura arancione  
 Materiale G: espansione moderatamente alta e temperatura di fusione moderata

### RIEPILOGO ESPANSIONE TERMICA CERA

Tabella 3 Risultati espansione termica cera

Tipo cera	Movimento sonda	Temperatura di picco
Cera iniezione verde H	0,00025"	75°C
Cerca tornitura viola F	0,00400"	175°C
Cerca tornitura verde D	0,00425"	175°C
Cerca tornitura blu E	0,00700"	175°C
Cerca tornitura arancione G	0,00725"	200°C



Come mostra la tabella 4, il movimento della sonda è stato minimo nel caso della cera per iniezione. Degna di nota è anche la temperatura di fusione nettamente inferiore. In teoria, questo materiale con un movimento della sonda pari a 0,00025 dovrebbe incidere in minima parte sulla microfusione e i risultati di fusione dovrebbero essere generalmente buoni.

I risultati della cera per tornitura, d'altro canto, hanno destato qualche sorpresa con un movimento della sonda fino a 0,00725" per il campione blu, indice dell'imminente espansione, fenomeno osservato nei fotopolimeri. Il produttore dei materiali verde, viola e blu utilizzati in questo studio segnala che tutte le cere per tornitura hanno una composizione chimica simile a quella dei materiali ibridi cera/plastica con quantità variabili di additivi a seconda delle caratteristiche di durezza desiderate. La cera blu, utilizzata anche per la modellazione, è la più morbida del gruppo, la viola ha una morbidezza media mentre la verde è la più dura. Dato il notevole movimento della sonda su tutte le cere per tornitura, è lecito aspettarsi sollecitazioni sulla microfusione durante le fasi di deceratura e cottura.

## ESPANSIONE TERMICA MATERIALI TERMOPLASTICI

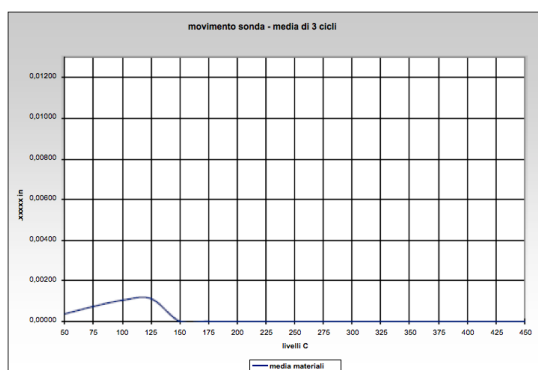


Figura 11 Movimento sonda materiale termoplastico

Materiale C: bassa espansione e temperatura di fusione moderatamente bassa

Materiale	Movimento sonda	Temperatura di picco
Materiale termoplastico	0,00115	125°C

Tabella 4 Risultati espansione materiali termoplastici

I risultati dell'unico materiale termoplastico testato mostrano un'espansione molto limitata, inferiore a quella di tutte le cere per tornitura testate e solo leggermente superiore alla cera per iniezione. Questo campione riflette una temperatura di fusione leggermente bassa di 125°C e un movimento sonda leggermente superiore a 0,001". Questo risultato è in linea con le osservazioni condotte sulla produzione dalle quali si evince che le fusioni ottenute con questo materiale termoplastico in genere non presentano difetti presumibilmente derivanti dall'espansione del modello, come venature e difetti dell'anima di fusione.

## ESPANSIONE TERMICA FOTOPOLIMERI

È generalmente risaputo che i modelli in fotopolimeri possiedono un livello superiore di espansione termica rispetto alla maggior parte delle cere e dei materiali termoplastici. Nel libro "Rapid Prototyping: Laser Based and Other Technologies"<sup>2</sup> gli autori Venuvinod e Ma affermano che le resine, essendo materiali termoindurenti, non fondono alle basse temperature e continuano a espandersi durante la fase di cottura iniziale. I nostri risultati confermano questa tesi considerato il movimento dei fotopolimeri da un minimo di 0,009" a un massimo di 0,012".

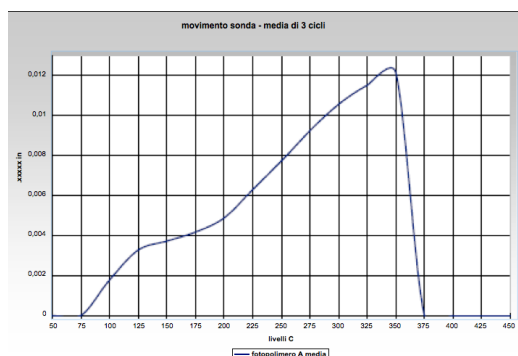


Figura 12 Movimento sonda fotopolimero A  
Materiale A: espansione e temperatura di fusione elevate

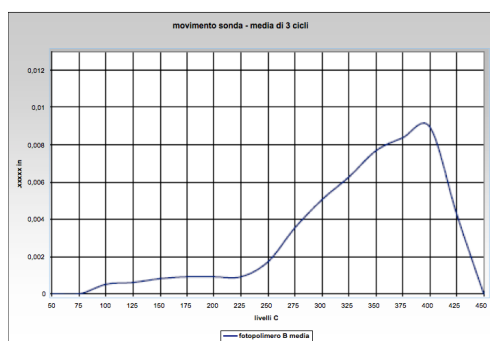


Figura 13 Movimento sonda fotopolimero B  
Materiale B: espansione moderatamente elevata e temperatura di fusione elevata

Tipo materiale	Movimento sonda	Temperatura di picco
Fotopolimero A	0,01200"	350°C
Fotopolimero B	0,00925"	400°C

Tabella 5 Risultati espansione fotopolimeri

Come era prevedibile, per entrambi i polimeri il movimento della sonda è stato significativo. Il dato sorprendente che emerge da questi test non è tanto la portata dell'espansione, bensì le temperature a cui si è avuto il picco di espansione. Raffrontati con le categorie delle cere e dei materiali termoplastici con picco di espansione a 200°C, i nostri fotopolimeri continuano a espandersi anche nel range di temperatura da 350° a 400°C. Questa combinazione di espansione elevata lungo un periodo di tempo prolungato fa sì che i fotopolimeri si distinguano nettamente rispetto agli altri materiali in termini di interazioni della microfusione.

## ESPANSIONE TERMICA DEL MODELLO - CONCLUSIONI

I nostri risultati riflettono un range di movimento sonda nei valori minimi, pari a 0,00025 per la cera per iniezione e nei valori massimi pari a 0,012 per il fotopolimero A. Naturalmente, lo spettro dei comportamenti dei modelli che interagiscono con i processi di microfusione e riscaldamento è molto vasto. Al fine di poter valutare al meglio il potenziale impatto dei vari livelli e velocità di espansione, li inseriremo ora nel contesto delle dinamiche di microfusione, a cui seguirà uno studio di correlazione della fusione.

## CONSIDERAZIONI SULLA MICROFUSIONE

La maggior parte dei materiali si espande con il calore. Questo fenomeno è causato da un incremento dello spazio medio tra i nuclei di atomi quando è presente più energia. Di conseguenza, durante la cottura, Madre Natura non ci impone solo di considerare l'espansione dei materiali del modello, bensì anche l'espansione del materiale della microfusione. Il tipo di microfusione può inoltre rappresentare un fattore critico per l'espansione, ma anche per la resistenza. Quanto maggiore è la resistenza della microfusione nello stato verde (prima e durante la cottura) tanto maggiore sarà probabilmente la pressione esercitata su questa durante la curva di cottura iniziale. Al fine di valutare questa interazione, abbiamo innanzitutto cercato informazioni sull'espansione termica di due tipologie comuni di microfusione. I grafici che seguono, forniti su gentile concessione dai fornitori di microfusione Ransom & Randolph, mostrano le espansioni termiche dei leganti per microfusione in gesso e fosfato, commercializzati rispettivamente come Ultravest<sup>®</sup> e Astrovest<sup>™</sup>.

### ESPANSIONE MICROFUSIONE CON FOSFATO LEGANTE

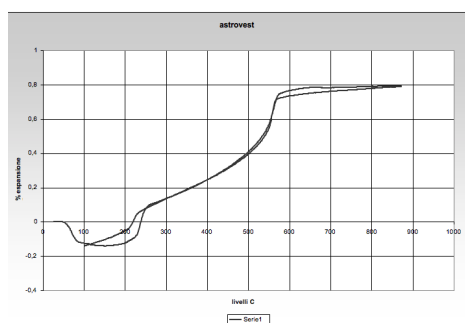


Figura 14 Astrovest<sup>™</sup> Espansione termica bassa o quasi nulla alle temperature chiave di espansione del modello

Come si può vedere, la microfusione con legante fosfato inizia la curva con un ritiro poi inizia ad espandersi a 225°C. In particolare, l'espansione avviene molto dopo che tutte le categorie di cere e materiali termoplastici hanno raggiunto le rispettive temperature di espansione di picco. Di conseguenza, per questi materiali l'espansione della microfusione non costituisce un problema. I fotopolimeri, diversamente, si espandono fino al range di temperature tra 350 e 400°C. Di conseguenza, l'espansione del modello avviene in simultanea con l'espansione della microfusione. Sebbene l'espansione totale della microfusione sia relativamente bassa, con valore pari a ~0,3% nei range di fusione del fotopolimero, vale la pena notare che questo fenomeno si verifica. Per quanto dai nostri esperimenti non si evinca chiaramente quale possa essere l'impatto preciso di questa dinamica sul difetto della microfusione, questo elemento deve essere comunque tenuto in considerazione come possibile fattore contribuente.

### ESPANSIONE MICROFUSIONE IN GESSO

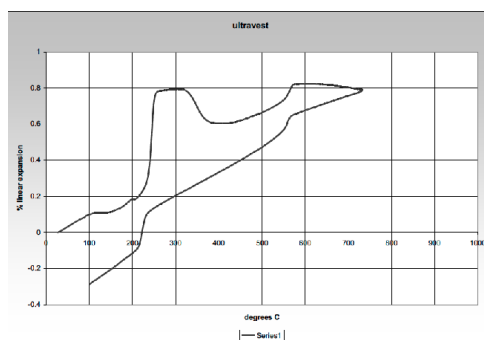


Figura 15 Ultravest<sup>®</sup> Espansione termica relativamente bassa alla temperatura chiave di espansione della cera e dei materiali termoplastici; relativamente alta alle temperature chiave di espansione dei fotopolimeri

La microfusione in gesso presenta una curva di espansione molto diversa rispetto a quella della microfusione con legante fosfato. L'espansione ha inizio molto lentamente, poi improvvisamente si impenna a 225°C. Di nuovo, questo fenomeno non rappresenta un problema per le categorie di cere o materiali termoplastici, poiché questi iniziano a fondere già al di sotto di questa temperatura. I fotopolimeri, invece, non sono così fortunati e continuano a espandersi oltre il picco del gesso pari a 0,9% iniziando a 260°C, per poi scendere leggermente a 0,7% alle temperature di fusione dei fotopolimeri. Come evidenziato sopra, ciò sembrerebbe indicare l'espansione simultanea dei fotopolimeri e della microfusione con legante gesso.

### RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE DELLE MICROFUSIONI CON LEGANTE FOSFATO

Oltre all'espansione termica, abbiamo voluto considerare anche la resistenza alla compressione delle microfusioni alle temperature chiave di espansione del modello. Per le microfusioni con legante fosfato, la resistenza aumenta di pari passo con l'innalzamento della temperatura, di conseguenza il rischio di danni si potrebbe potenzialmente ridurre aumentando la resistenza. Il grafico riportato sotto mostra la resistenza alla compressione in psi del prodotto Astrovest™ di Ransom & Randolph alle temperature chiave di espansione del modello. La resistenza alla compressione di Astrovest™ continua ad aumentare seguendo l'andamento della curva di riscaldamento per raggiungere 600 psi a riscaldamento completo.

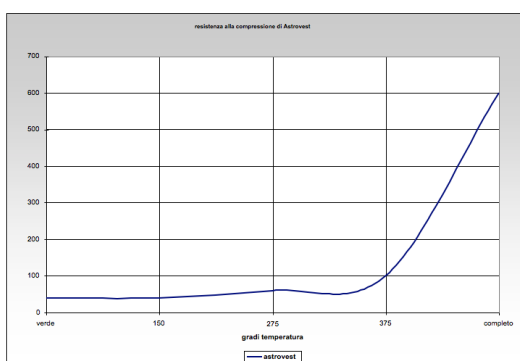


Figura 16 Astrovest™ Resistenza alla compressione relativamente bassa (da 40 a 100 psi) alle temperature chiave di espansione del modello

### RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE DELLA MICROFUSIONE CON LEGANTE IN GESSO

La curva della resistenza alla compressione della microfusione con legante in gesso è sostanzialmente invertita rispetto a quella della microfusione con legante in fosfato. Il nostro campione di gesso esibiva la massima resistenza nello stato verde (400 psi) dopo un tempo di solidificazione di 2 ore. Man mano che la curva di riscaldamento progredisce, il campione si indebolisce, raggiungendo il valore minimo di 100 psi a riscaldamento completo. Tuttavia, alle temperature di espansione critiche del modello di 150°C, 275°C e 375°C, il gesso mantiene comunque una resistenza alla compressione superiore rispetto alla legante fosfato. Sebbene non siano stati condotti studi di fusione sulla microfusione in gesso ai fini di questo documento, sarebbe interessante eseguire questo esperimento alla luce delle curve di resistenza variabili di queste due tipologie di microfusione a temperature di espansione critiche per il modello.

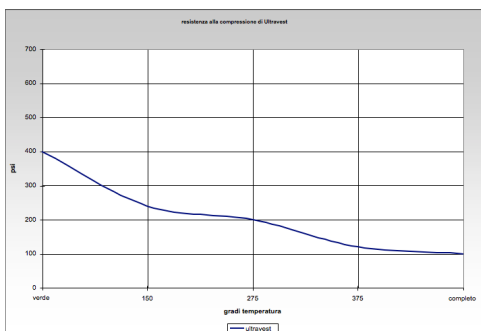


Figura 17 Forza di compressione di Ultravest superiore a quella del legante fosfato alle temperature di espansione del modello chiave

## CORRELAZIONE DI FUSIONE

Dopo aver analizzato l'espansione termica dei materiali del modello e delle microfusione, abbiamo condotto altri esperimenti allo scopo di trovare una correlazione tra questi risultati nella fusione. Per questi esperimenti è stata scelta una lega composta al 90% di platino e al 10% di iridio, mentre per la microfusione abbiamo utilizzato un sistema a guscio ceramico abbinato a una microfusione in platino con legante fosfato. Questo tipo di sistema ceramico rappresenta un'interfaccia resistente per i vari materiali dei modelli e le successive fusioni, sebbene, come hanno dimostrato gli esperimenti di espansione termica, l'espansione del modello avvenga molto prima che il guscio o la microfusione con legante fosfato raggiungano le temperature di sinterizzazione e la resistenza massima.

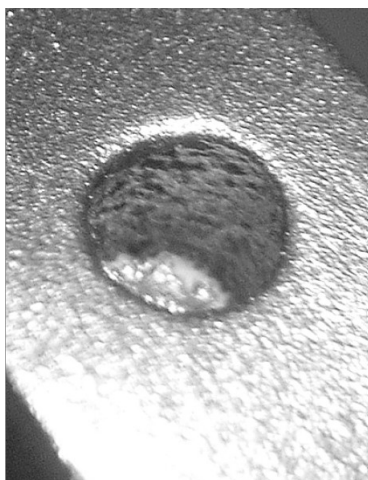
Quando abbiamo iniziato gli esperimenti sulle fusioni abbiamo ipotizzato che i materiali che avrebbero esibito un movimento maggiore della sonda nell'espansione termica sarebbero stati maggiormente suscettibili a difetti nella microfusione. Inoltre, i materiali che avevano lasciato una quantità maggiore di residui di ceneri negli esperimenti di cottura avrebbero potuto presentare difetti superficiali con morfologia simile a quella delle ceneri.

Come illustrato in precedenza, la tipologia di caratteristiche di design più vulnerabile all'espansione del modello è tendenzialmente rappresentata dai fori molto profondi o dalle rientranze dove si ritiene che l'"anima" della microfusione subisca un collasso dovuto alla pressione applicata dall'espansione delle pareti del modello attorno alla stessa. In questo senso, quando la resistenza alla compressione della microfusione viene superata dalla pressione esercitata su di essa dal modello in espansione, l'anima si rompe. Il difetto risultante di solito è un mix di metallo e microfusione che riempie in parte o totalmente il vuoto in cui si trovava l'anima. Questo tipo di difetto compromette gravemente la qualità della fusione, oltre a rendere il metallo interessato non sicuro per la rifusione diretta a causa della contaminazione del metallo con la microfusione, aggiungendo al danno anche la beffa.

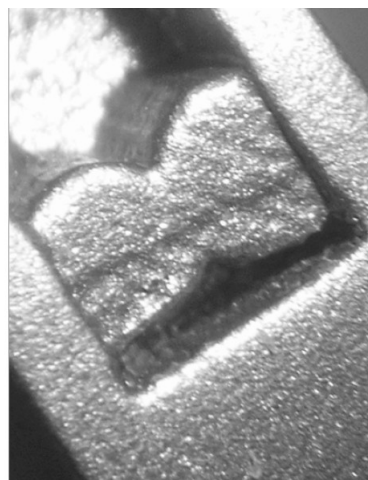
In alcuni casi, l'anima della microfusione si stacca interamente (del tutto intatta) e si riposiziona in un'altra area della fusione. Questo tipo di difetto, chiamato "riposizionamento dell'anima" (Figura 26) rivela un'impronta precisa della forma dell'anima in un punto che dovrebbe essere composto da metallo solido.

Per il nostro studio di correlazione delle fusioni abbiamo realizzato sei alberi identici con canali di colata. Tre alberi contenevano materiali a base di cera mentre altri tre contenevano materiali termoplastici e fotopolimeri. Le temperature dei casseri e di colata erano identiche per tutti i sei alberi. Le immagini seguenti raffigurano i risultati ottenuti con i diversi materiali dei modelli.

## CERA PER INIEZIONE



*Figura 18*



*Figura 19*

La cera per iniezione (Figure 18 e 19), con un'espansione molto limitata e temperature di fusione relativamente basse, ha dato ottimi risultati nella fusione. Anche le caratteristiche specificamente progettate per le sollecitazioni della microfusione non hanno riportato difetti nella fusione.

## CERE PER TORNITURA



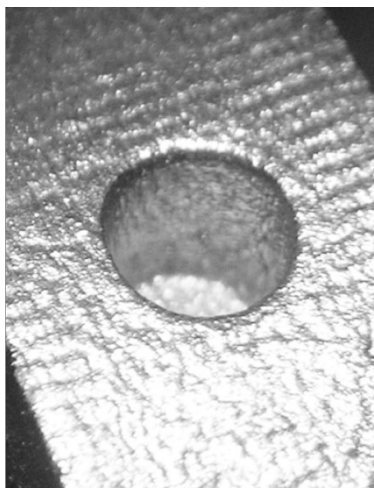
*Figura 20*



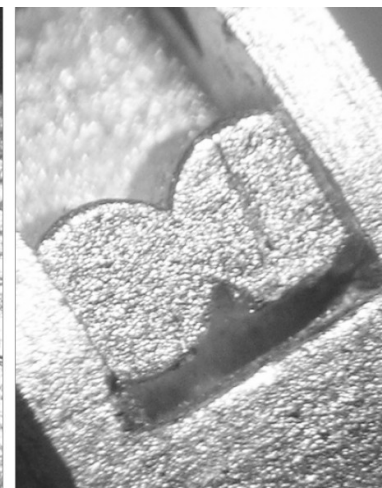
*Figura 21*

Tutte le cere per tornitura hanno evidenziato problemi nelle caratteristiche progettate per testare le sollecitazioni sulla microfusione. Qui vengono riportati i risultati della cera per tornitura verde, tuttavia, tutte le cere per tornitura hanno evidenziato difetti analoghi. Si noti il difetto di microfusione nel foro cieco riportato nella Figura 20, oltre al difetto della parete sottile della microfusione adiacente alle griffe nel canale riportato nella Figura 21. Guardando queste caratteristiche si può immaginare l'espansione del materiale del modello circostante che preme contro la microfusione relativamente debole fino al punto di rottura.

## MATERIALI TERMOPLASTICI



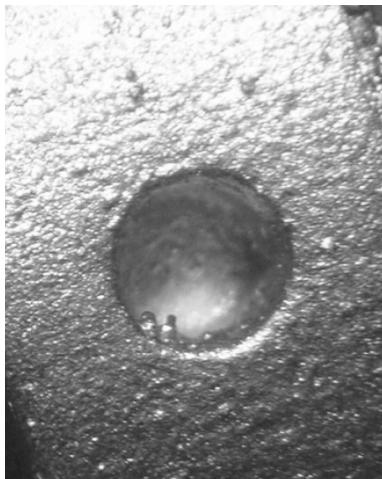
*Figura 22*



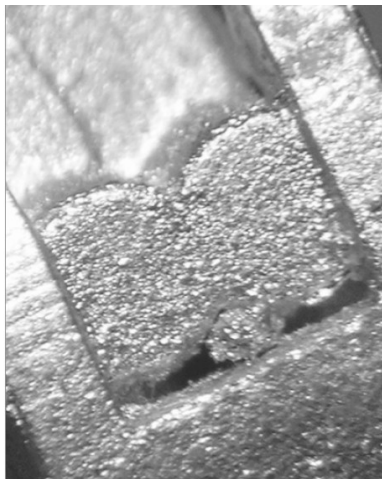
*Figura 23*

Il materiale termoplastico (Figure 22 e 23) fornisce una prova ulteriore del fatto che grazie alle basse proprietà di espansione si ottiene una qualità di fusione superiore nelle caratteristiche critiche. Come si vede in figura, le aree che pongono delle sfide per le cere per tornitura risultano molto pulite nei materiali termoplastici.

## FOTOPOLIMERI



*Figura 24*



*Figura 25*

Le fusioni ottenute con modelli fotopolimerici hanno fornito risultati misti. Come si vede nella Figura 24, la fusione del foro risulta relativamente pulita. Si possono vedere alcune aree di infiltrazione della microfusione, sebbene siano in gran parte superficiali. La Figura 25 mostra la rottura della microfusione nella parete adiacente alle griffe, inoltre, le fusioni presentano bave sui bordi del gambo e delle griffe. Dato il livello elevato di movimento della sonda rispetto alla cera per iniezione e al materiale termoplastico, questo risultato viene in sostegno alla nostra teoria secondo la quale livelli elevati di espansione causano difetti nella microfusione.

## RIPOSIZIONAMENTO DELL'ANIMA

Questo fenomeno si verifica talvolta nella fusione in serie con effetti piuttosto devastanti. Nei nostri esperimenti, il riposizionamento dell'anima si è verificato in uno degli alberi in cera per tornitura. Non era chiaro da quale materiale in particolare aveva avuto origine l'anima, poiché tutti i prototipi in cera per tornitura di questo albero presentavano un certo grado di difetti. La Figura 26 mostra come l'anima in ceramica integrata si è riposizionata sul fondo dell'albero.

Inoltre, un pezzo in fotopolimero A ha riportato un grave riposizionamento dell'anima alla base del gambo. Questo difetto sembra essere fortemente attribuibile all'espansione termica del prototipo dal momento che si riscontra raramente nella cera per iniezione o nei materiali termoplastici in base alle nostre esperienze di produzione. I risultati dei nostri esperimenti vengono in sostegno alla nostra teoria secondo la quale l'espansione sarebbe la causa principale di questi difetti.



Figura 26

## **RESIDUI DI CENERI**

Sebbene i livelli dei residui di ceneri riscontrati nei nostri esperimenti di cottura siano risultati significativi, non siamo stati in grado di trovare una correlazione tra i difetti di fusione specifici e la morfologia delle ceneri. Una ragione plausibile potrebbe essere che le ceneri si spargono in piccole particelle non facilmente rilevabili sulla superficie as-cast date le loro dimensioni. Un'altra potrebbe essere che, a contatto con il metallo fuso, gran parte di queste ceneri rimane in sospensione nel sistema di colata. In qualunque caso non abbiamo riscontrato che i residui di ceneri contribuiscano in modo significativo ai difetti superficiali.

## **CONCLUSIONI**

La maggior parte dei materiali per modelli 3D presenta problemi di fusione nelle geometrie con bordi netti, fori profondi e piccoli dettagli che possiedono sezioni sottili di microfusione tra le caratteristiche. L'unico materiale per modelli 3D che non ha riportato problemi nella fusione per la nostra geometria di prova è stato il materiale termoplastico. Ciò si deve presumibilmente alla sua bassa temperatura di fusione e alla bassa espansione termica rispetto agli altri materiali. In sostanza, sembrerebbe che il materiale termoplastico si comporti in modo molto simile alla cera per iniezione durante la cottura.

Come dimostra questa ricerca, la causa dei difetti di microfusione generati dagli altri materiali per modelli 3D è da ricondursi principalmente all'espansione dei materiali durante le operazioni di microfusione e cottura. La resistenza delle microfusioni a temperature che coincidono con quelle di espansione della maggior parte dei modelli 3D è insufficiente per contrastare le rotture, soprattutto nelle geometrie CAD complesse.

La progettazione dei gioielli in funzione del particolare materiale dei modelli 3D utilizzati per la loro realizzazione rappresenta un aspetto importante da considerare per il buon esito della fusione. Le caratteristiche complesse utilizzate in questo studio si possono tutte modificare per gestire al meglio l'espansione dei materiali. L'aumento del raggio sui bordi netti e la minore profondità dei fori e dei canali contribuirà a ottenere risultati migliori per i materiali che si espandono prima nella curva di riscaldamento.



## RIFERIMENTI

1. Steven Adler and Teresa Fryé "The Revolution of CAD/CAM in the Casting of Fine Jewelry" in The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2005, ed. Eddie Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, 2005).
- 2.
3. Patri K. Venuvinod and Weiyin Ma, Rapid Prototyping – Laser-based and Other Technologies (Kluwer Academic Publishers, 2004).
- 4.
5. Paul F. Jacobs, PhD, Stereolithography and other RP&M Technologies (Society of Manufacturing Engineers, 1996).