

// C.2 Simulazione, prototipazione e attrezzaggio rapidi

Con la **simulazione**, imitazione delle operazioni che avvengono in un sistema reale, si genera una storia artificiale del sistema dalla quale si traggono delle deduzioni sulle sue caratteristiche operative in modo da poter prendere delle decisioni sul sistema stesso. Il comportamento di un sistema mentre evolve nel tempo si studia sviluppando un modello di simulazione, basato sull'uso del calcolatore come strumento non solo di calcolo ma anche di rappresentazione degli elementi che costituiscono la realtà in studio e delle relazioni fra essi. La corrispondenza tra realtà e modello non è basata su una riduzione proporzionale delle dimensioni come potrebbe avvenire per il modello in scala di un progetto architettonico, ma è di tipo funzionale: a ogni elemento del sistema reale corrisponde un oggetto informatico (un sottoprogramma, una struttura di dati ecc.) che ne svolge la funzione nel modello. Rispetto alla sperimentazione diretta, costosissima e spesso praticamente impossibile, o a quella realizzata per mezzo di modelli a scala, la simulazione ha il vantaggio della grande versatilità, della velocità di realizzazione e del (relativamente) basso costo.

I punti fondamentali della **progettazione meccanica** sono:

1. Il dimensionamento di massima iniziale in funzione dei dati raccolti nella banca dati basata su progetti simili; in mancanza della banca dati verranno impostati valori di tentativo.
2. L'impostazione del problema strutturale per cui, una volta definita la parte da progettare, occorre definire i carichi a cui essa è soggetta e le verifiche da effettuare.
3. Si esegue quindi, con i metodi illustrati in questo corso, la verifica classica del componente e si ricavano le dimensioni per poterlo disegnare.
4. Una volta definite le dimensioni del particolare si può disegnarlo utilizzando il CAD (*Computer-Aided Design*) tridimensionale *parametrico* (parametrico vuol dire che gli oggetti solidi 3D nascono dall'estrusione o dalla rivoluzione di schizzi piani in 2D). Tali schizzi possono essere successivamente modificati nella forma e nelle dimensioni, così come l'altezza di estrusione (*Figura C.2.1*) o l'angolo di rivoluzione. Le dimensioni divengono quindi dei parametri che possono essere modificati in qualsiasi momento della progettazione lasciando al sistema il compito di ricalcolare l'oggetto. Dal disegno tridimensionale verrà generata una tavola bidimensionale (2D) che rimarrà collegata alla parte di origine e verrà aggiornata automaticamente a seguito di modifiche effettuate sulla parte. La parte di origine viene trattata con il CAD *associativo*, che è un CAD che mantiene il collegamento fra i diversi ambienti di progettazione (tavola 2D, calcolo strutturale, programmazione delle lavorazioni con macchine a controllo numerico ecc.) in modo da poter ricalcolare tutti gli ambienti a seguito di una modifica effettuata.
5. Il metodo agli elementi finiti FEM (*Finite Element Method*) consente di analizzare le tensioni e le deformazioni del componente meccanico (*Figura C.2.2*). Si può così effettuare una verifica più accurata del particolare, tenendo conto della sua reale geometria. La parte potrà essere modificata a seguito dei risultati del calcolo e l'associatività con la tavola bidimensionale renderà possibile il suo aggiornamento automatico.

Con il CAD passiamo da oggetti pensati su viste bidimensionali a oggetti tridimensionali, che solo in un secondo tempo tornano ad essere rappresentati da viste e sezioni. Sul modello 3D si possono poi effettuare verifiche strutturali e programmare le lavorazioni con

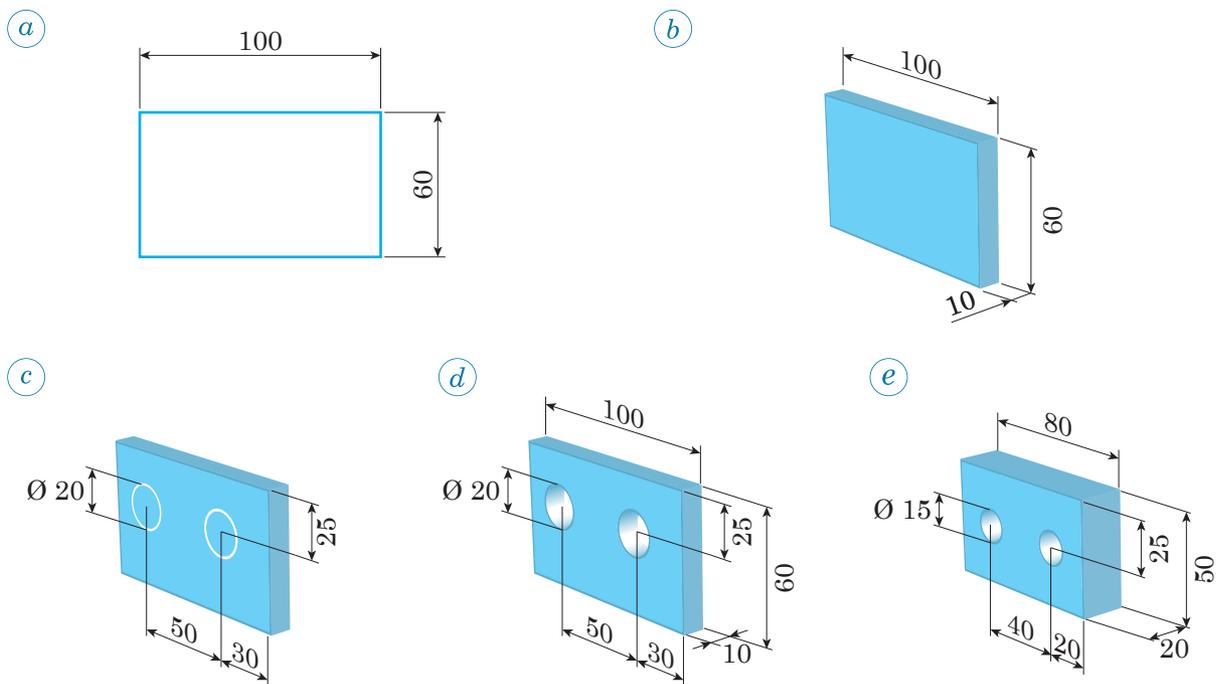
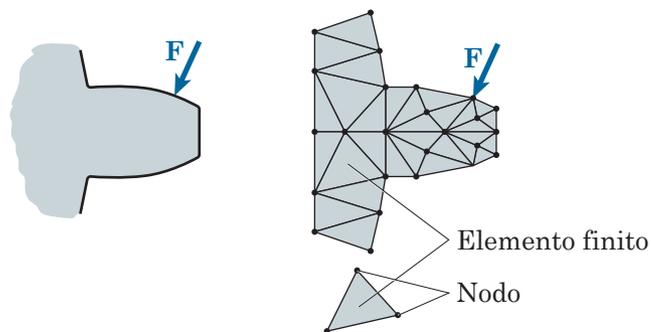


Fig. C.2.1 - Le fasi che conducono alla costruzione di un modello solido parametrico: a) schizzo del profilo con le dimensioni; b) estrusione di 10 mm; c) la faccia del solido può venire utilizzata per il profilo dei due cerchi; d) taglio-estruso per la creazione dei fori passanti; e) cambiamento delle dimensioni del profilo in modo da riconfigurare l'intero modello che può così assumere nuove forme e dimensioni.

Fig. C.2.2 - Dente di un ingranaggio caricato da una forza concentrata \mathbf{F} che simula l'ingranamento del dente. È una struttura continua, schematizzabile come piana, che dopo esser stata discretizzata in elementi bidimensionali a forma di triangolo i cui vertici costituiscono i nodi, viene calcolata con il metodo agli elementi finiti. In funzione degli spostamenti incogniti dei nodi, si calcolano le deformazioni all'interno di ogni elemento finito differenziando gli spostamenti, poi le tensioni con la legge di Hooke e infine, attraverso un approccio energetico, le forze che il singolo elemento esercita ai vertici.



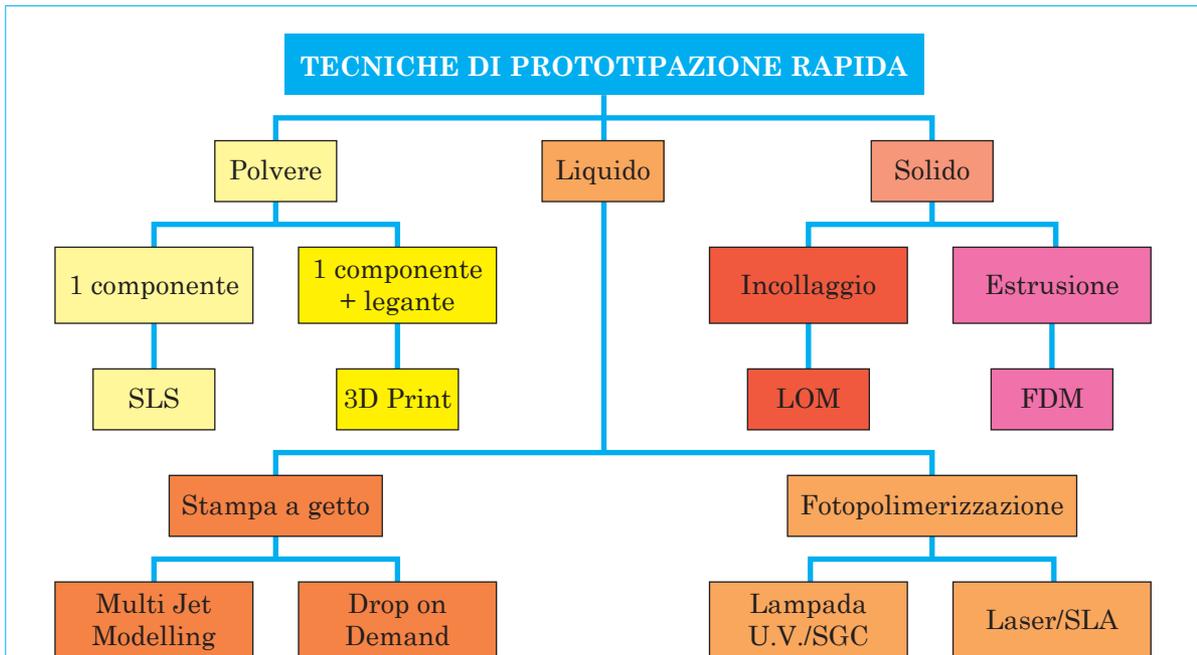
macchine a controllo numerico oppure realizzare direttamente il pezzo reale utilizzando la tecnologia della prototipazione rapida.

Con la **prototipazione rapida** (*rapid prototyping, RP*) è possibile allestire in tempi brevi il particolare progettato per poterne effettuare le prove funzionali prima della sua produzione su larga scala, naturalmente più costosa. Le tecniche di prototipazione rapida più diffuse partono dal modello 3D del particolare ma usano strati 2D successivi, sezioni orizzontali su cui viene depositato il materiale strato per strato, e si differenziano l'una

Tabella C.2.1

Prototipazione rapida

Classificazione delle tecniche di prototipazione rapida (RP) in base ai materiali utilizzati.



DOD (Drop on Demand): si depositano attraverso due getti gocce micrometriche di materiale termoplastico verde (del tutto simile a cera) per la costruzione del modello e una cera rossa per la costruzione dei supporti.

FDM (Fused Deposition Modelling): ciascuna sezione del prototipo viene realizzata mediante la deposizione di un polimero termoplastico mediante un ugello di estrusione. Per “estrusione di materiale” si intende quel processo tecnologico in cui le sezioni orizzontali del modello (*slicing*) sono realizzate tramite estrusione e deposizione di materiale allo stato fuso e non tramite polimerizzazione.

LOM (Laminated Object Manufacturing): basata sull’incollaggio o sul taglio di fogli di materiale simile alla carta per la costruzione del prototipo. Si utilizza un foglio (può essere carta prerivestita su un lato con politene) per realizzare l’incollaggio allo strato precedente e la radiazione laser per il taglio della sezione.

MJM (Multi Jet Modelling): deposito di materiale simile a cera (temperatura di fusione di circa 80° C) attraverso una testina di stampa che provvede a creare sia il modello che i supporti. Una volta terminato il ciclo di stampa si preleva il modello dalla piattaforma e si rimuovono i supporti. A questo punto la macchina è pronta per un nuovo ciclo di stampa.

SGC (Solid Ground Curing): basata sulla fotopolimerizzazione di un fotopolimero ma utilizza un lampada a ultravioletti che permette l’indurimento contemporaneo dell’intera sezione.

SLA (StereoLitography Apparatus): basata sulla fotopolimerizzazione di una resina liquida sensibile alla radiazione ultravioletta emessa da una sorgente laser e focalizzata sul pelo liquido con un sistema di specchi.

SLS (Selective Laser Sintering): viene sfruttata la radiazione emessa da una sorgente laser CO₂ per “sinterizzare” polveri precomprese di materiali differenti su di una struttura di supporto.

dall'altra per il tipo di materiale utilizzato e per il principio fisico sfruttato (*Tabella C.2.1*). Per ciascun materiale, si possono poi impiegare tecnologie differenti per realizzare e unire le diverse sezioni in modo da realizzare il particolare desiderato: talune utilizzano materiali già in strati, ad esempio rulli di carta rivestiti con un polimero, che vengono tagliati e sovrapposti strato per strato, altre filamenti di materiali termoplastici che solidificano una volta depositi, altre ancora un processo di polimerizzazione uniforme.

La prototipazione rapida consente (*Figura C.2.3*):

- l'uso di tecniche additive per la costruzione di parti definitive in quantità da 1 a 1.000.000 di pezzi;
- di evitare l'ausilio di stampi o attrezzature;
- una geometria qualsiasi;
- una grande varietà di materiali (plastica, ceramica, metallo).

Con *rapid manufacturing* si vogliono dunque descrivere i processi che permettono di accorciare in modo sostanziale i passi necessari per ottenere parti definitive da porre sul mercato, eliminando al limite gli stampi come vengono comunemente intesi e producendo direttamente il prototipo da dati CAD. Si dovrebbe perciò sostituire al termine *rapid* il concetto *direct*, che rende probabilmente meglio il senso dello sviluppo tecnologico.

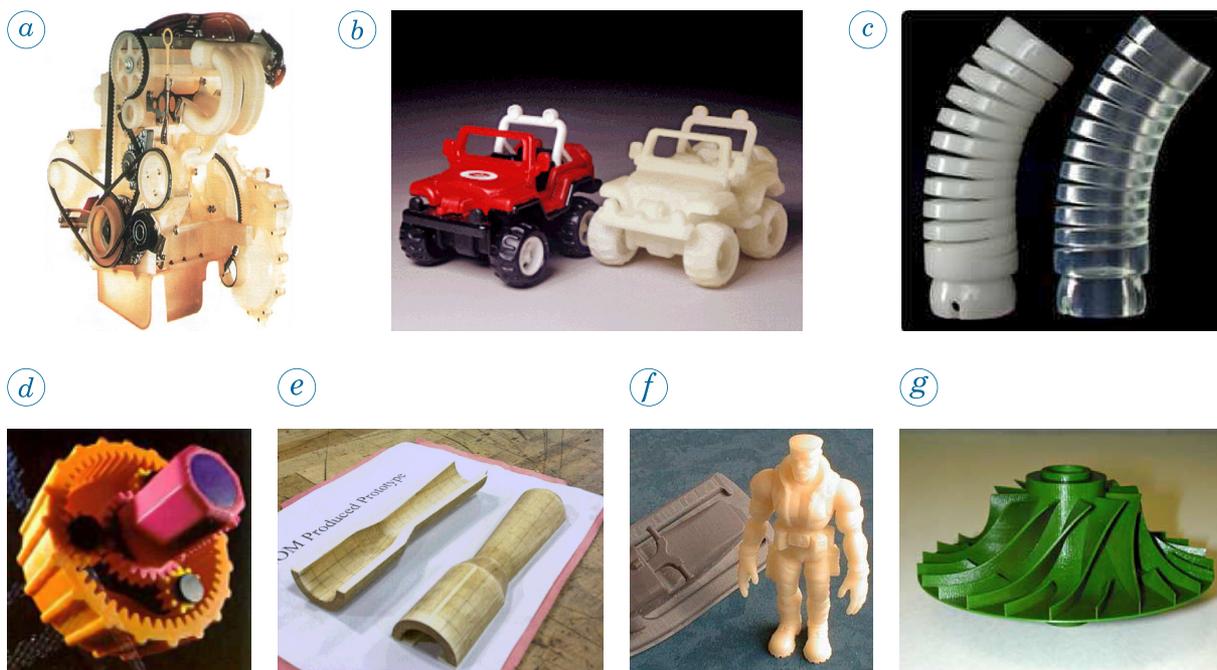


Fig. C.2.3 - Oggetti ottenuti con la prototipazione rapida:

- a) Componenti SLA assemblati per realizzare il prototipo del motore Rover per verifiche di ingombro e di assemblaggio
- b) SGC
- c) SLS
- d) FDM
- e) LOM
- f) MJM
- g) DOD

La *stereolitografia* (Figura C.2.4) è stato il primo sistema disponibile commercialmente ed è tuttora molto diffuso. Esso è basato su un raggio laser^{C.2.1} focalizzato sulla superficie di una vasca contenente un fotopolimero allo stato liquido; il fascio laser, che si sposta lungo la superficie disegnando la configurazione della sezione da costruire, innesca nel fotopolimero una reazione che porta alla solidificazione dello stesso. Si crea così una prima sezione dell'oggetto, sezione che è sostenuta da una base e che, abbassandosi, consente a un film liquido di ricoprire la sezione appena costruita e al processo di riprendere con la solidificazione di uno strato successivo che aderisce chimicamente alla sezione sottostante. Questo processo continua fino alla completa realizzazione del prototipo, che viene successivamente sottoposto a un post-trattamento in forno e a ultravioletti per migliorarne le caratteristiche meccaniche.

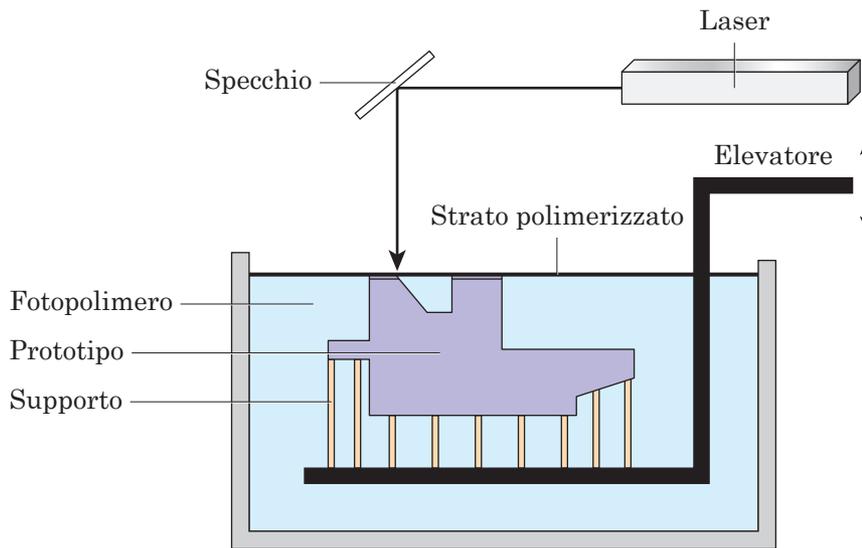


Fig. C.2.4 - Fotopolimerizzazione con laser: la stereolitografia SLA.

Altro processo affermato è quello dell'incollaggio (Figura C.2.5): il materiale è una specie di carta facilmente tagliabile con un raggio laser e viene utilizzato sotto forma di fogli; le singole sezioni vengono tagliate con un laser e poi incollate allo strato precedente.

Le macchine per la sinterizzazione laser diretta delle polveri (SLS) lavorano per strati come tutte le macchine con logica additiva. Ciò è reso possibile da un opportuno fascio laser che viene pilotato attraverso processi completamente automatici. Con tali sistemi è possibile la costruzione rapida di parti tecniche in materiali definitivi, sia di plastica che di metallo. Come tecniche disponibili di sinterizzazione distinguiamo: *sintering* plastico con sinterizzazione di materiali termoplastici, *sintering* metallico con sinterizzazione diretta di polveri di metallo e *sintering* di sabbia. Quest'ultima rappresenta una delle più grandi rivoluzioni nel mondo della fonderia negli ultimi 2000 anni (Figura C.2.6). Permette una

C.2.1 - Il laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) è un raggio di luce costituito da un sottile fascio di fotoni in modo da concentrare su una superficie ristretta una grande quantità di energia. Le sue applicazioni sono enormi; in campo industriale citiamo, come esempio, il taglio, la foratura e la saldatura di lamiera.

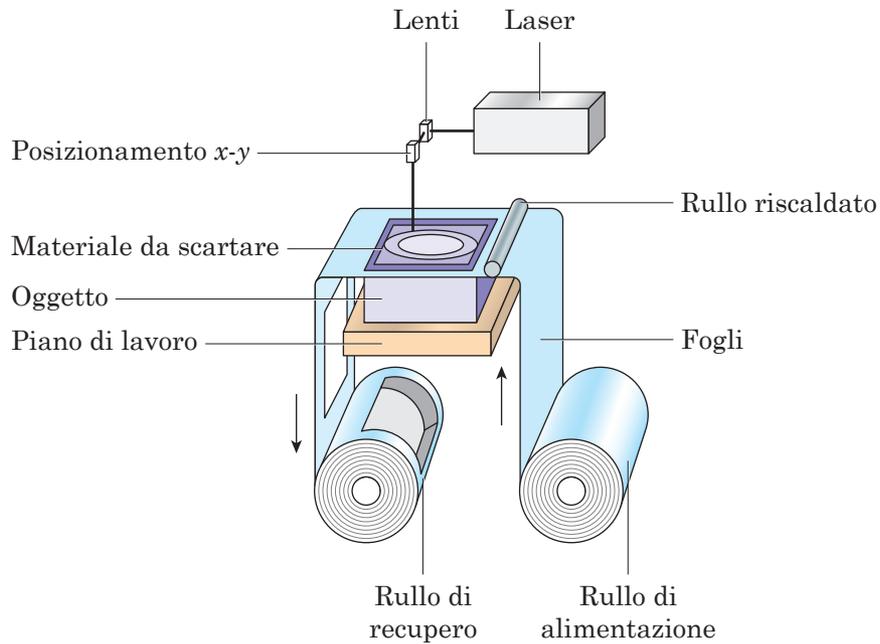


Fig. C.2.5 - *Laminated Object Manufacturing (LOM)* con fogli ceramici termoadesivi.

grande libertà progettuale nelle prime fasi perché non serve sformare o definire piani di divisione. Inoltre si ha:

- la sinterizzazione diretta di sabbia;
- un doppio sistema di scansione per la massima produttività;
- dei materiali prerivestiti sia a base silice che ceramica;

per applicazioni che riguardano:

- la costruzione diretta di anime e conchiglie senza l'ausilio di alcun attrezzaggio;
- i prototipi per prove funzionali;
- la produzione in piccola/media serie.



Fig. C.2.6 - Sinterizzazione delle polveri (SLS) – Sintering di sabbia.

L'**attrezzaggio rapido** (*rapid tooling*) è l'insieme delle tecniche mirate alla fabbricazione, in tempi rapidi, di attrezzature destinate alla produzione in preserie e in alcuni casi in serie. Si possono distinguere due categorie diverse della stessa tecnica:

- attrezzaggio indiretto (*indirect tooling*) con cui si combina il prototipo rapido (modelli e/o anime) con processi tradizionali per ottenere l'attrezzatura;
- attrezzaggio diretto (*direct tooling*) per cui l'attrezzatura viene fabbricata in modo diretto con sistemi di prototipazione rapida.

Un esempio di tecnica diretta nella costruzione di attrezzaggi metallici è il sistema DTM con (*Figura C.2.7*):

- la costruzione del prototipo utilizzando polveri a base ferrosa rivestite con resina termoplastica: è la parte verde (*green part*) con elevata porosità e limitate proprietà meccaniche;
- la parte verde viene infiltrata con resina epossidica e poi asciugata in forno: è la parte marrone (*brown part*) con densità fino al 100% e migliori caratteristiche meccaniche;
- la parte marrone viene inserita in un contenitore refrattario circondato da pezzi di rame. Il contenitore è quindi posto in forno sottovuoto causando l'eliminazione del polimero e l'infiltrazione del rame: è la parte rossa (*red part*) con 60% di acciaio e 40% di rame.

È poi necessaria un'operazione di finitura per migliorare lo stato delle superfici. I pezzi possono essere lavorati con le macchine utensili tradizionali. Come applicazioni, si possono citare le attrezzature destinate alla produzione della preserie e inserti per stampi per l'iniezione delle resine termoplastiche.

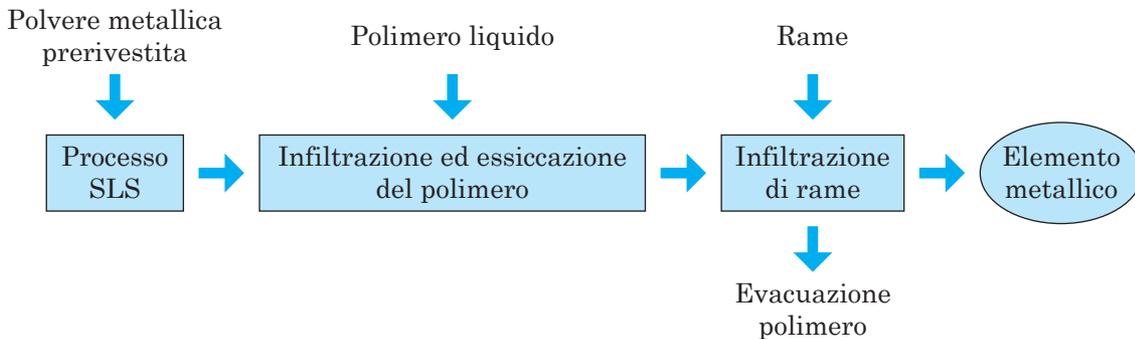


Fig. C.2.7 - Costruzione di attrezzaggi metallici con il sistema sviluppato dalla DTM Corporation.