

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA DI PRIMO LIVELLO

**“PROTOTIPAZIONE RAPIDA DI PRODOTTO:
TECNICHE E APPLICAZIONI”**

RELATORE:

CH.MO. PROF. ENRICO SAVIO

LAUREANDO:

ANDREA VEZZARO

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

INDICE

SOMMARIO.....	5
INTRODUZIONE.....	6
CAPITOLO 1	
La prototipazione rapida.....	8
1.1Cenni storici.....	9
1.2Fasi del ciclo.....	10
1.2.1Modellazione tridimensionale.....	10
1.2.2 Conversione e trasmissione dei dati.....	11
1.2.3.Controllo e preparazione.....	11
1.2.4.Costruzione.....	12
1.2.5.Post-processo.....	12
1.3Applicazioni.....	13
1.4Benefici.....	14
CAPITOLO 2	
Le tecniche prototipazione rapida.....	18
2.1Stereolitografia (SLA).....	18
2.1.1Materiali.....	20
2.1.2Fattori che influenzano la qualità del prototipo.....	22
2.1.3Difetti.....	24
2.1.4Applicazioni ed esempi.....	24
2.2Solid ground curing (SGC).....	25
2.2.1Applicazioni ed esempi.....	27
2.3Laminated object manufacturing (LOM).....	27
2.3.1Applicazioni ed esempi.....	30
2.4Fused deposition modeling (FDM).....	31
2.4.1Materiali.....	33
2.4.2Applicazioni ed esempi.....	33

2.5 Selective laser sintering (SLS).....	34
2.5.1 <i>Materiali</i>	35
2.5.2 <i>Applicazioni ed esempi</i>	35
2.6 Altre tecniche.....	36
2.6.1 <i>3D printing (3DP)</i>	36
2.6.2 <i>Polyjet</i>	38
2.6.3 <i>Multi-jet modeling (MJM)</i>	39

CAPITOLO 3

Analisi delle tecniche RP.....	40
3.1 Valutazione delle prestazioni dimensionali.....	40
3.2 Prestazioni in termini di errori di forma.....	43
3.3 Prestazioni in termini di rugosità superficiale.....	44

CAPITOLO 4

Il rapid tooling.....	45
4.1 Tecniche dirette.....	46
4.2 Tecniche indirette.....	47
4.2.1 <i>Stampi in silicone</i>	47
4.2.2 <i>Spin casting</i>	48
4.2.3 <i>Stampi in resina rigida</i>	49
4.2.4 <i>Stampi in gesso</i>	49
4.2.5 <i>Stampi in lega bassofondente</i>	50
4.2.6 <i>Stampi ottenuti con il metal spraying</i>	50
4.2.7 <i>Stampi ed elettrodi ottenuti per elettroformatura</i>	51
4.2.8 <i>Modelli e casse d'anima per la fusione in terra</i>	52
4.2.9 <i>Elementi per microfusione</i>	52
4.2.10 <i>KelTool</i>	53
CONCLUSIONI.....	55
BIBLIOGRAFIA.....	57

SOMMARIO

Questa tesi si propone di illustrare le tecniche di prototipazione rapida, tecnologie di costruzione additiva per piani di prototipi, che consentono di poter realizzare un primo esemplare di un qualunque prodotto senza l'uso di utensili e soprattutto in maniera molto più veloce rispetto alle tecniche di lavorazione tradizionali.

Dopo una breve introduzione del concetto di prototipo stesso, nel primo capitolo verrà introdotta la tematica della prototipazione rapida, il suo ciclo di lavorazione, le applicazioni principali dei particolari prodotti da tali tecnologie e i benefici apportati.

Nel secondo capitolo saranno passate in rassegna le principali tecnologie di prototipazione rapida e per ognuna verrà illustrato il processo, i punti di forza e di debolezza ed alcuni esempi di applicazioni industriali.

Nel terzo capitolo si analizzeranno le prestazioni dei più importanti sistemi di prototipazione rapida con le stesse modalità con cui si studiano i pezzi costruiti con le lavorazioni convenzionali.

Nel quarto capitolo verrà trattata la più interessante e promettente applicazione delle tecnologie di prototipazione rapida, il rapid tooling o attrezzaggio rapido, un insieme di tecniche mirate alla costruzione in tempi brevi di attrezzature destinate alla realizzazione della preserie.

Dopo una panoramica generale verranno illustrate nello specifico le più importanti tecnologie di attrezzaggio rapido.

INTRODUZIONE

Con il termine prototipo si intende il primo esempio di un prodotto che deve essere sviluppato, consente di poter effettuare considerazioni preliminari prima che venga rilasciato in produzione.

La sua costruzione, detta prototipazione, costituisce quindi una fase importante del processo di sviluppo di nuovi prodotti.

La definizione di prototipo contiene tre aspetti di interesse:

- L'implementazione del prototipo, dal prodotto nel suo complesso ai suoi componenti e subassemblati;
- La forma del prototipo, dalla sua versione virtuale a quella fisica;
- Il grado di approssimazione del prototipo, ovvero quanto la rappresentazione del prodotto sia più o meno prossima a quella del prodotto finale.

Il primo aspetto comprende la prototipazione del prodotto globale o di un suo componente. Nel prototipo completo è possibile valutare la pressoché totalità delle caratteristiche del prodotto, questo compito è svolto da un focus group che identifica ed esamina i problemi per poi passare allo studio delle varianti che permettano di ovviarli. Nel caso in cui non sia il prodotto nel suo complesso a destare problematiche si concentra l'attenzione sui componenti interessati.

Il secondo aspetto riguarda la forma del prototipo, si può avere il modello fisico costruito per test ed esperimenti oppure una semplice rappresentazione virtuale, utile qualora il prototipo fisico fosse troppo grande oppure quando fossero necessari solo test al computer.

Il terzo aspetto considera il grado di approssimazione o rappresentatività del prototipo, esso può essere una rappresentazione grezza, se per lo studio del prodotto sono sufficienti solo valutazioni sulla forma e le dimensioni mentre la rappresentazione completa del prodotto è richiesta qualora fossero necessarie valutazioni più precise e specifiche come la preparazione della fase di produzione e dei problemi produttivi che possono emergere.

Le tecniche di prototipazione rapida si pongono, in relazione ai tre aspetti, come tecniche produttive di prodotti fisici con grado di approssimazione abbastanza accurato, mentre si collocano trasversalmente in relazione al primo aspetto, possono costituire una rappresentazione globale del prodotto oppure limitarsi ad una certa parte, in relazione al caso in esame.

Considerando il punto di vista dell'impiego un prototipo può essere destinato a vari utilizzi:

- Sperimentazione ed apprendimento, nella fase di sviluppo del prodotto possono spesso insorgere problematiche e dubbi risolvibili costruendo un prototipo e analizzandolo;
- Test e prove;
- Comunicazione ed interazione, all'interno di un team di sviluppo prodotto niente è più chiaro di una rappresentazione fisica del prodotto per dissipare dubbi e divergenze;
- Sintesi ed integrazione, le componenti e i sub-assemblati di un prodotto devono essere montati ed aggregati assieme per poter verificare il funzionamento del prodotto nel suo complesso oppure per decidere le modifiche da apportare nel caso in cui ci siano problemi funzionali;
- Pianificazione ed indicatori, il prototipo serve per la pianificazione del processo produttivo del prodotto ed è usato come indicatore per l'inizio e la fine delle varie fasi del processo.

Ci sono tre principali processi di costruzione dei prototipi, vale a dire processi sottrattivi, formativi e additivi.

Nei processi sottrattivi il punto di partenza è un blocco solido di materiale dal quale si ottiene il componente per progressiva rimozione di materiale.

In quelli formativi la costruzione del pezzo è dovuta all'applicazione di forze meccaniche che formano il particolare desiderato.

A questi primi due processi produttivi appartengono le cosiddette tecnologie tradizionali di fabbricazione, tra le quali troviamo fresatura, tornitura, foratura, taglio, rettifica, piegatura, stampaggio, ecc.

La tecnologia tradizionale di fabbricazione dei prototipi è affidata ai modellisti che sulla base delle indicazioni dei progettisti li realizzano con operazioni manuali incompatibili con le esigenze aziendali, visti i tempi e costi elevati richiesti.

I processi additivi prevedono che la costruzione del pezzo avvenga per progressiva aggiunta di materiale e proprio in questa categoria troviamo le tecnologie di prototipazione rapida.

CAPITOLO 1

La prototipazione rapida

La realizzazione di un prototipo fisico ha tradizionalmente comportato l'impiego di processi di lavorazione flessibile, come le lavorazioni alle macchine utensili utilizzando varie attrezzature per un periodo di tempo nell'ordine di settimane, se non mesi.

La prototipazione rapida è una tecnica che permette di costruire oggetti, anche geometricamente complessi, direttamente dal modello matematico realizzato su un sistema CAD tridimensionale.

La tecnologia si basa sulla considerazione che ogni elemento può essere pensato come unione di tante sezioni di spessore infinitesimo. Il prototipo viene così realizzato sezione dopo sezione risolvendo un problema tridimensionale come una successione di problemi bidimensionali.

Tutte le tecniche di prototipazione rapida sono caratterizzate dallo stesso approccio base adottato, che può essere schematizzato come segue:

1. Il prodotto è rappresentato in modo inequivocabile su un sistema CAD/CAM come un insieme di superfici chiuse che ne racchiudono il volume, ovvero sono specificate univocamente le superfici interne ed esterne;
2. Le superfici e i volumi così rappresentati sono convertiti in un file di formato ".STL". Questo tipo di file approssima le superfici del modello con poligoni e triangoli, tanto più fitti quanto più curva è la superficie dell'oggetto.
3. Un software analizza il file .STL e genera delle sezioni orizzontali nel modello. Queste sezioni sono ricreate attraverso la solidificazione di polimeri liquidi o tramite l'aggregazione di particelle in forma di polveri andando così a creare fisicamente il modello tridimensionale inizialmente rappresentato sul sistema CAD/CAM.

Lo sviluppo della prototipazione rapida può essere visto in 4 aree principali che ne rappresentano gli aspetti chiave, input, metodo, materiali e applicazioni:

- Input, ovvero l'informazione elettronica richiesta per descrivere l'oggetto fisico. Si hanno due possibili punti di partenza, il modello rappresentato in un sistema CAD oppure un oggetto fisico dal quale è possibile costruirne un modello CAD grazie a tecniche di *reverse engineering*;

- Metodo, sebbene vi siano attualmente più di 20 aziende di prototipazione rapida i metodi utilizzati dalle macchine possono essere classificati nelle seguenti categorie: fotopolimerizzazione, taglio e incollaggio, fusione e solidificazione ed unione e fissaggio;
- Materiali, lo stato iniziale dei materiali può essere solido, liquido oppure in polvere, la categoria più variegata è quella dei solidi e comprende carta, nylon, cera, resine, metalli e ceramici;
- Applicazioni, le applicazioni principali possono essere raggruppate in tre macro-aree, ovvero il design, l'ingegneria e la fabbricazione. Un ampio gruppo di tipologie d'aziende può sfruttare a proprio favore la prototipazione rapida, tra le quali l'industria aerospaziale, automobilistica, biomedica, elettrica ed elettronica.

1.1 Cenni storici

La tecnologia tradizionale di fabbricazione dei prototipi è rappresentata da operazioni soprattutto manuali che comportano tempi e costi elevati penalizzando notevolmente l'immissione nel mercato del nuovo prodotto.

Si è resa quindi necessaria la ricerca di tecnologie atte a ridurre i tempi e i costi per la fabbricazione di prototipi : la prototipazione rapida si colloca in questo contesto poiché essa consente di ottenere, in poche ore e senza l'uso di utensili, oggetti anche geometricamente complessi a partire dal modello CAD degli stessi.

Lo sviluppo della prototipazione rapida è strettamente legato a quello dell'applicazione dei computer in ambiti industriali, in particolare dei sistemi Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM) e Computer Numerical Control (CNC).

Le origini della prototipazione rapida possono essere individuate verso la fine degli anni settanta quando gli americani A. Herbert, C. Hull e il giapponese H. Kodama lavorano in modo indipendente per sviluppare un sistema di solidificazione selettiva di un fotopolimero per costruire un oggetto tridimensionale per strati successivi.

Questi studi portano C. Hull a brevettare nel 1986 un sistema da lui battezzato "stereolitografia" e a fondare con R. Fried un'azienda destinata a produrre e commercializzare tali macchine, la 3D Systems.

Negli anni successivi si sviluppa la maggior parte dei sistemi alternativi di prototipazione rapida e la 3D Systems presenta, nel 1987, la sua prima macchina (SLA1), avviando il β test con alcune aziende interessate alla sperimentazione della stereolitografia.

Negli anni successivi, altre aziende emergenti commercializzano macchine utilizzando tecnologie alternative alla stereolitografia, le aziende in questione sono Cubital, DTM, EOS, Helysys e Stratasys.

Nel 1994 la Sanders commercializza la prima macchina caratterizzata da un costo inferiore ai 100.000 \$, mentre nel 1996 la 3D Systems e la Stratasys introducono i modellatori concettuali da destinare all'ufficio tecnico.

La tendenza odierna è l'implementazione e diffusione in tutto il mondo di nuove tecniche di prototipazione rapida.

1.2 Fasi del ciclo

Come già descritto tutte le tecniche di prototipazione rapida seguono il medesimo approccio, è possibile quindi elencare e descrivere le fasi di quello che è comunemente detto, ciclo di prototipazione rapida.

Si sono individuate cinque fasi:

1. Modellazione tridimensionale;
2. Conversione e trasmissione dei dati;
3. Controllo e preparazione;
4. Costruzione;
5. Post-processo.

1.2.1 Modellazione tridimensionale

La modellazione tridimensionale su un supporto CAD è il prerequisito basilare di tutti i processi ed è la parte che comporta il maggior dispendio di tempo.

E' molto importante che tali modelli geometrici possano essere condivisi dall'intero team di design per molti motivi, ad esempio studi sulle interferenze, analisi delle sollecitazioni, analisi FEM, design dei dettagli, ecc.

Ci sono due comuni equivoci tra i nuovi utilizzatori delle tecniche di prototipazione rapida, per prima cosa a differenza della programmazione a controllo numerico, la prototipazione rapida richiede volumi chiusi del modello, questa confusione deriva dal fatto che gli utilizzatori hanno spesso familiarità con la programmazione a controllo numerico dove una singola superficie o linea possono essere un elemento; infine i nuovi utilizzatori assumono di solito la concezione WYSIWYG (what you see is what you get).

Questi equivoci spesso portano a sottospecificare i parametri per il sistema, causandone scarse performance e un'utilizzazione non ottimale. Per esempio aspetti che devono essere presi in considerazione sono l'orientazione delle parti, necessarie

per i supporti e i dettagli difficili da costruire, come pareti sottili, piccoli buchi, ecc... Quindi gli utilizzatori di queste tecniche devono passare per una fase di apprendimento facendo esperienza diretta poiché molte sono le tecnologie.

1.2.2 Conversione e trasmissione dei dati

Il modello CAD è poi convertito nel formato “.STL” che approssima la superfici con triangoli.

Le superfici molto curve sono rappresentate con un’alta densità di triangoli, generando file “.STL” molto grandi.

La maggior parte, se non tutti i principali fornitori di sistemi CAD/CAM, hanno sviluppato e integrato l’interfaccia CAD-STL, in modo tale da effettuare automaticamente la conversione, facendo sì che questa fase del ciclo sia la più semplice e veloce. Ovviamente le tempistiche della conversione dipendono dalle capacità della workstation o PC usati.

Il file deve essere trasferito dalla workstation che l’ha prodotto, tipicamente situata nell’ufficio di design, al computer del sistema di prototipazione rapida, situato nei reparti produttivi tramite varie modalità (copia su disco, via e-mail, via rete LAN).

1.2.3. Controllo e preparazione

Prima di procedere con la fase di creazione fisica del prototipo occorre controllare che il file sia privo di errori, potenzialmente contenuti nel modello CAD che può presentare buchi, vuoti e fessure. Questi problemi, se non corretti, possono causare il fallimento della creazione del prototipo, con lo spreco di tempo e risorse.

La correzione è effettuata dagli operatori, assistiti da software, questa fase è noiosa e complessa, specialmente nel caso in cui si operi con un elevato numero di entità geometriche.

Una volta che il file “.STL” è privo di errori, il computer del sistema di prototipazione rapida lo analizza e lo seziona.

La fase di preparazione dei parametri costruttivi è molto delicata e deve essere accompagnata da un’adeguata documentazione. Devono essere stabiliti molti parametri, ad esempio, profondità e potenza del laser, posizionamento del modello, ecc.

I rivenditori continuano a cercare di migliorare i propri sistemi in modo tale da cercare di facilitare e velocizzare la fase di setting della macchina.

1.2.4.Costruzione

Per la maggior parte dei sistemi di prototipazione rapida questa fase è completamente automatizzata e spesso gli operatori lasciano lavorare la macchina di notte poiché il processo può impiegare molte ore e l'operatore non può più intervenire una volta avviata l'operazione.

1.2.5.Post-processo

La fase terminale del processo è quella più manuale, di conseguenza è anche una fase molto delicata perché il pericolo di danneggiare il prototipo con una manovra errata è elevato.

Il processo di pulitura consiste nella rimozione di parti in eccesso che possono essere rimaste sul pezzo, ovvero supporti, resina intrappolata e altre parti a seconda della tecnologia utilizzata.

La finitura si riferisce a processi secondari come la sabbatura o la verniciatura, il cui scopo è quello di migliorare le caratteristiche superficiali ed estetiche del pezzo.

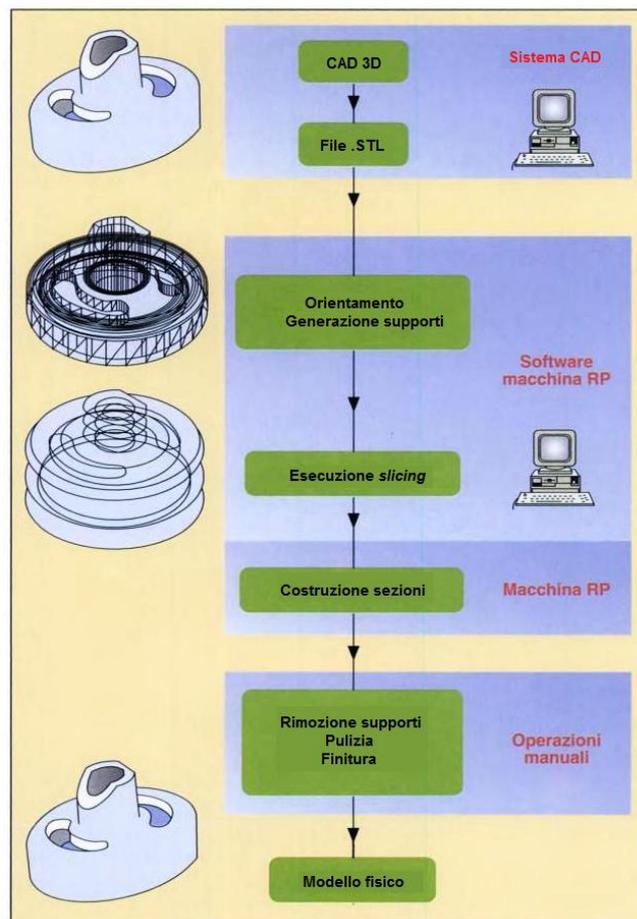


Figura 1.1 – Fasi del processo di prototipazione rapida
Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

1.3 Applicazioni

Le principali applicazioni delle tecniche di prototipazione rapida si possono ricondurre a tre macroaree:

- Applicazioni di design (prototipi estetici), costituiscono la prima applicazione in senso storico delle tecniche di prototipazione rapida, in quanto i progettisti necessitano di una rappresentazione fisica del particolare progettato in modo da confermare gli aspetti estetici desiderati, particolarmente quelli più intricati. I progetti dei prototipi spesso devono essere comunicati non solo nel reparto dei progettisti ma anche presso i reparti produttivi e l'ufficio marketing. Questa necessità richiede quindi la creazione di una rappresentazione concreta dell'oggetto.
Inoltre può essere di fondamentale importanza per gli uffici marketing e commerciale la possibilità di disporre di un prototipo fisico di un nuovo prodotto prima di averne avviato il processo produttivo in modo tale da poter intraprendere attività promozionali e raggiungere il mercato prima dei concorrenti;
- Test funzionali (prototipi funzionali), i prototipi costruiti vengono sottoposti a prove di resistenza o di assemblaggio perchè oltre alle funzionalità estetiche del prototipo è di fondamentale importanza poterne analizzare l'aspetto ingegneristico.
Quando il pezzo prodotto è un sub-componente o sub-assemblato è molto utile testare il prima possibile che la parte si adatti bene al prodotto nel suo insieme, nel caso in cui il test fallisca si può procedere immediatamente alle modifiche necessarie evitando un consistente spreco di tempo e risorse.
Se il pezzo viene prodotto con materiali simili a quelli del prodotto finale si possono effettuare test fisici, come l'analisi dei flussi e test di resistenza agli sforzi;
- Costruzione di attrezzaggi rapidi o rapid tooling, una delle più recenti e interessanti applicazioni delle tecnologie RP, si inserisce nella fase di produzione di utensili e attrezzature nel ciclo di sviluppo prodotto.

La potenzialità di questi processi è enorme, ciò ha reso possibile la loro introduzione in molte industrie, dalle più tecniche (automobilistica, aeronautica, aerospaziale, elettronica, telefonica, idraulica e orafa) fino a quelle dei giocattoli, dell'arredamento e delle applicazioni medicali.

1.4 Benefici

I moderni sistemi di prototipazione rapida possono produrre direttamente parti funzionali in piccole quantità, sebbene i particolari così ottenuti presentino un'accuratezza e finitura superficiale inferiori a quelli ottenuti con lavorazioni convenzionali.

Tuttavia i sistemi più avanzati, combinati a trattamenti di post-processo, consentono di avvicinare di molto le caratteristiche dell'oggetto finale, sia in termini di materiali che di proprietà fisico-meccaniche.

L'introduzione di queste tecniche ha consentito di poter lavorare con oggetti fisici di qualsiasi complessità in periodi di tempo brevi.

Dalla figura 1.2, si osserva come negli ultimi 35 anni sia aumentata la complessità dei prototipi realizzati, triplicando un fattore di complessità relativa; contemporaneamente si nota che col passaggio dalle tecniche convenzionali a quelle a controllo numerico prima, e alle tecniche RP poi, si è visto il calo dei tempi di completamento dei progetti.

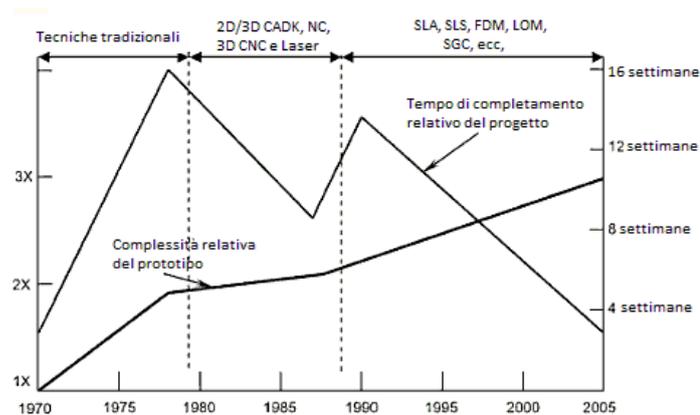


Figura 1.2 – Evoluzione della complessità e del tempo di costruzione dei prototipi dal 1970
Fonte: Chua C.K., Leong K.F, Lim C.S., 2010, Rapid prototyping: Principles and applications, third edition

Per poter accertare il modo in cui le tecniche RP riescano a ridurre il time to market e velocizzare lo sviluppo del prodotto è sufficiente analizzare i risultati dei numerosi casi pratici che si sono potuti osservare.

La possibilità di compiere verifiche già nei primi stadi di sviluppo del prodotto permette di apportare migliorie e cambiamenti in termini di tempo anche di quattro volte inferiori. I risparmi economici sono invece più difficili da riscontrare perché strettamente connessi al risparmio di tempo e ai costi aggiuntivi per le correzioni da apportare a fine processo.

Le modalità con cui le tecnologie RP influenzano la realizzazione di prototipi possono essere così raggruppate:

- Riduzione del tempo e del costo della fase di costruzione del prototipo;
- Velocizzazione degli altri stadi;
- Riduzione di costose iterazioni;
- Modificazione della sequenza delle fasi di sviluppo del prodotto.

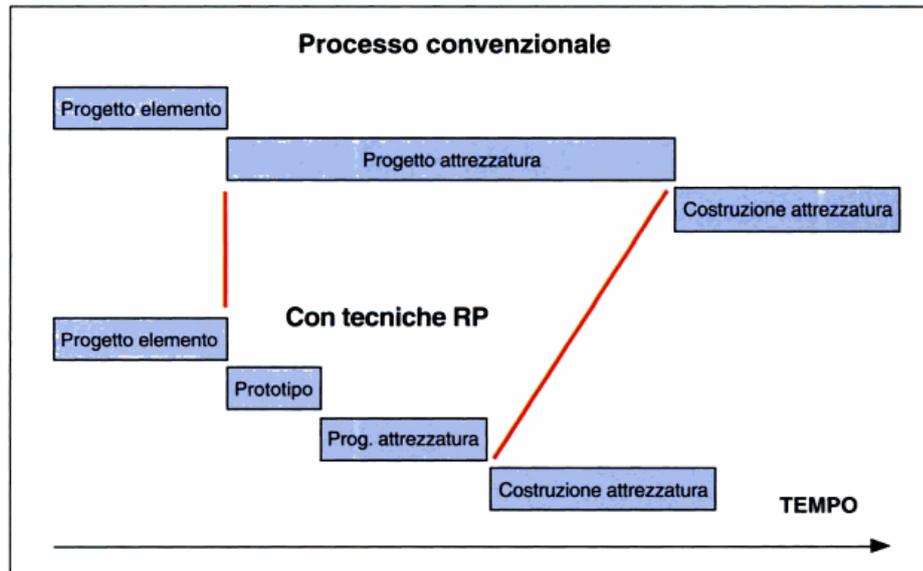


Figura 1.3 – Riduzione di tempi e costi di prototipazione
Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

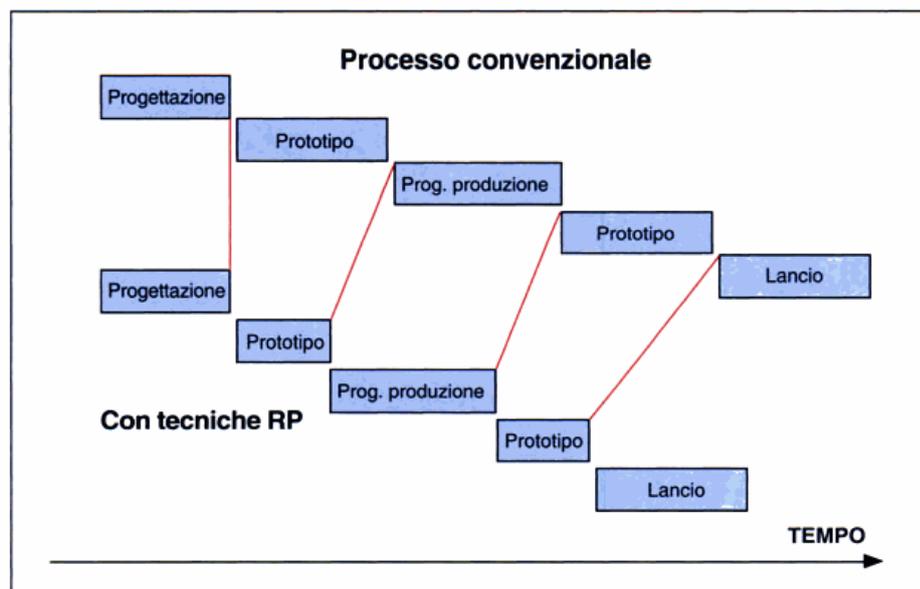


Figura 1.4 – Riduzione dei tempi totali di sviluppo con l'impiego di tecniche RP
Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

Per poter individuare con precisione la collocazione della prototipazione rapida nello sviluppo prodotto occorre prima identificarne le fasi:

- Idea;
- Concettualizzazione;
- Progetto;
- Prove funzionali;
- Ingegnerizzazione;
- Produzione;
- Lancio sul mercato.

Se si analizza il diagramma in figura 1.5, che rappresenta sia il costo della correzione degli errori al procedere dello sviluppo del prodotto che l'impatto delle correzioni stesse sui costi di produzione, si può individuare il punto A, alla destra del quale non vi è più convenienza economica nell'apportare modifiche al prodotto, le tecniche RP devono quindi essere posizionate alla sinistra di tale punto per poterne sfruttare appieno le potenzialità.

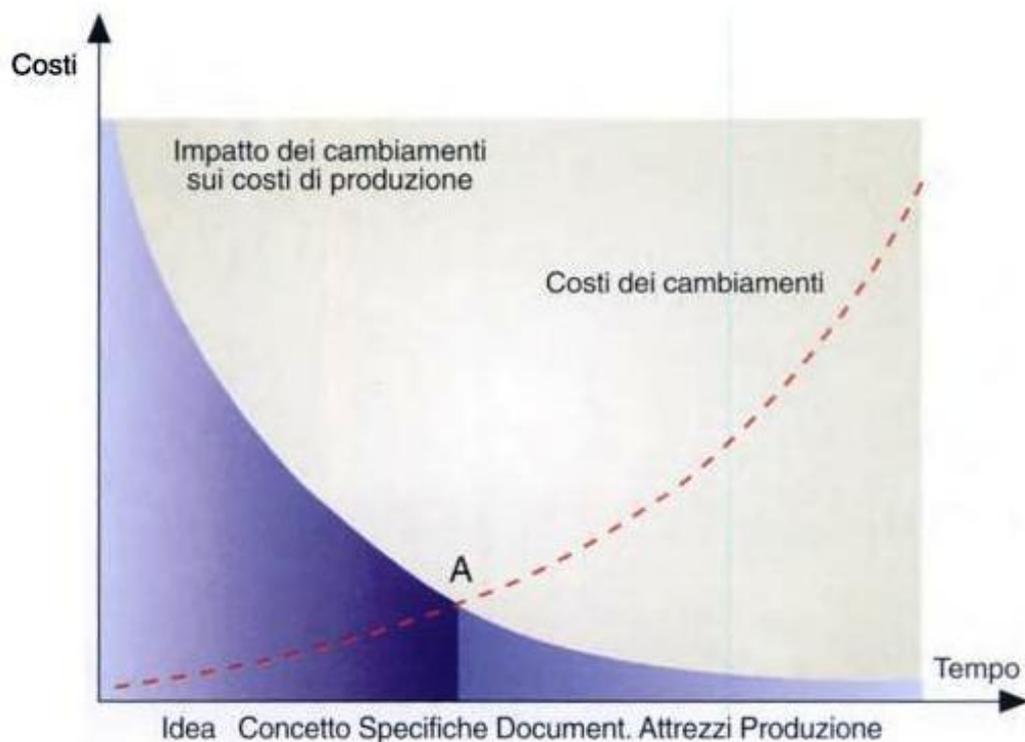


Figura 1.5 – Andamento del costo per la correzione degli errori al procedere delle fasi di sviluppo prodotto
Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

La curva di costo delle variazioni dovrà pertanto arrestarsi al punto A, come mostrato in figura 1.6, ed è possibile derivare due grafici che confrontano in funzione del tempo, i costi di sviluppo e cambiamento ottenuti con le tecniche convenzionali e RP

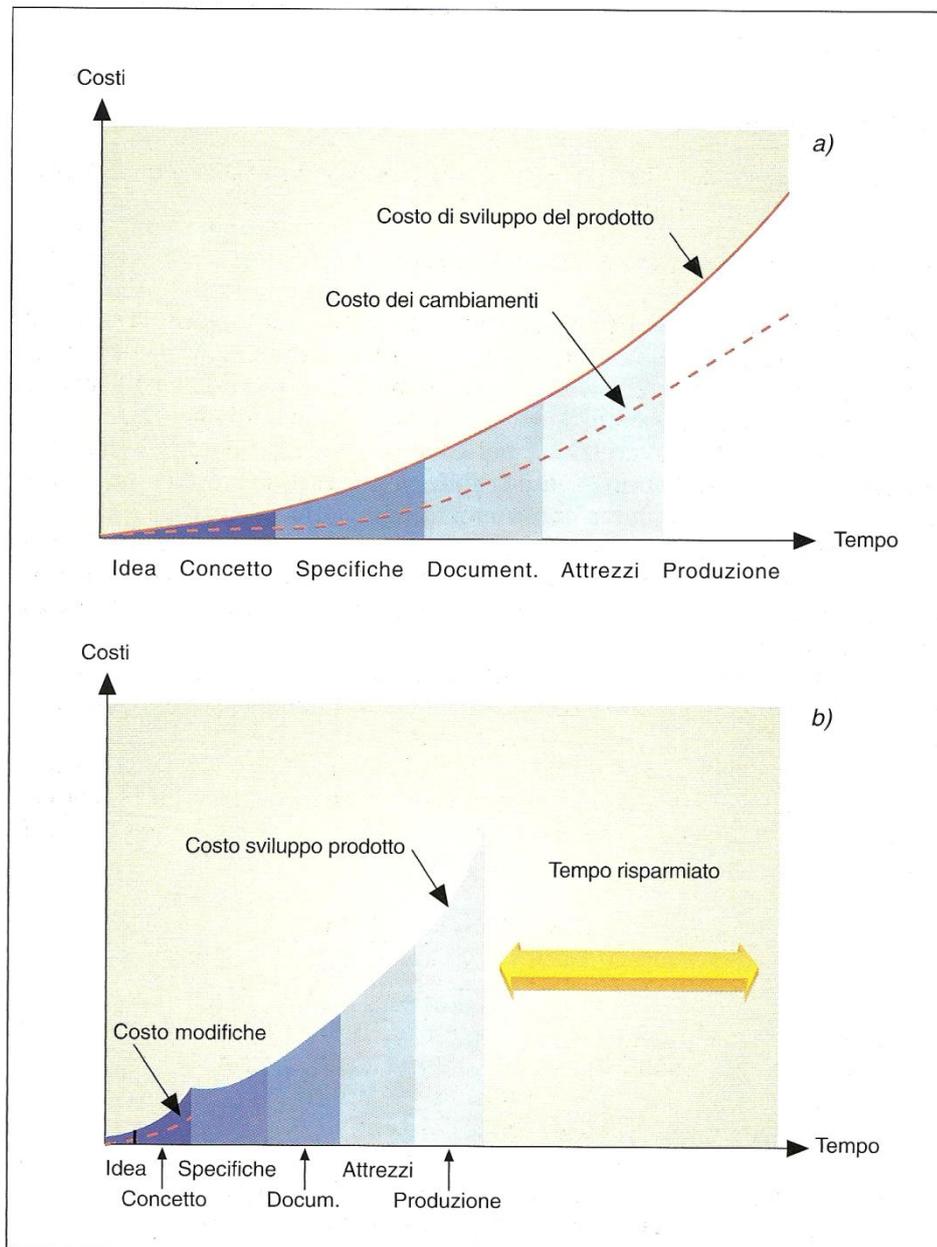


Figura 1.6 – Andamento dei costi di sviluppo e cambiamento: a) metodo convenzionale; b) con la prototipazione rapida

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

CAPITOLO 2

Le tecniche prototipazione rapida

2.1 STEREOLOGRAFIA (SLA)

E' stato il primo sistema di prototipazione rapida commercialmente disponibile e attualmente il più diffuso. E' stata sviluppata dall'azienda americana *3D Systems* che commercializzò la sua prima macchina (la SLA 1) nel 1987 ed è tuttora l'azienda leader del mercato mondiale. La *3D Systems* realizza un'ampia gamma di modelli, dalle versioni più economiche destinate ad uso istruttivo a quelle più sofisticate e costose.

Il processo stereolitografico è basato sulla fotopolimerizzazione, le parti sono costruite a partire da una resina liquida fotosensibile (detta foto-polimero) che solidifica sotto l'esposizione di un raggio laser (tipicamente ultravioletto) che scansiona la superficie della resina.

Queste resine sono formulate con fotoiniziatori e monomeri liquidi, che possono contenere anche leganti ed altre sostanze in grado di conferire al prodotto le caratteristiche meccaniche e chimiche richieste.

La fotopolimerizzazione è il processo che permette di collegare i monomeri in molecole reticolate di dimensioni maggiori.

Il punto di partenza è dato dall'introduzione di energia nella forma di radiazione ultravioletta, ma essendo la formulazione del fotopolimero costruita in modo tale da inibire la reazione a temperatura ambiente è necessaria la presenza di un catalizzatore, di solito un radicale libero generato termicamente o foto-chimicamente a partire da un fotoiniziatore che reagisce con un fotone attinico.

Il processo parte dalla resina costituita da monomeri (M) e foto-iniziatori (P_i), che una volta esposti alla radiazione ultravioletta assorbono alcuni fotoni e passano ad uno stato eccitato ad energia maggiore (P_i^*), che essendo instabile decade producendo due radicali liberi molto reattivi ($P\bullet$). Queste molecole possono quindi reagire con i monomeri in modo da formare una molecola iniziatrice della polimerizzazione ($PM\bullet$). Ad attivazione avvenuta le molecole di monomeri reagiscono con la catena polimerica formando molecole via via più lunghe ($PMMM\bullet$) finché non viene inibita la propagazione della catena.

Più viene mantenuta la reazione più le molecole di polimeri assumono peso molecolare elevato e se i monomeri hanno tre o più gruppi chimici reattivi, il polimero risulterà reticolato generando un'insolubile e continua rete di molecole.

Durante la polimerizzazione è importante che i polimeri siano sufficientemente reticolati in modo da impedire la dissoluzione verso lo stato di monomeri liquidi e che posseggano forza sufficiente da rimanere saldi mentre la resina è sottoposta a varie forze durante la ricopertura.

I componenti principali del sistema sono un computer per la generazione dei dati macchina, un computer per il controllo delle parti in movimento, un pannello di controllo, il laser, il sistema ottico e la camera di processo, ovvero un recipiente riempito di resina liquida foto-sensibile, al cui interno è presente una piattaforma che può abbassarsi o sollevarsi grazie alla presenza di un elevatore.

La sorgente laser è collocata sopra al recipiente e il suo fascio viene deviato opportunamente dal sistema di ottiche.

Il processo parte come per tutte le tecniche dal file “.STL” creato a partire dal modello CAD tridimensionale. Il primo passo è l'esecuzione dello *slicing*, ovvero la generazione delle sezioni del pezzo (di spessore compreso tra i 0.025 e 0.5 mm) e la generazione dei supporti per sostenerlo nella fase di costruzione.

Dopo aver completato questa fase preliminare comincia la creazione del prototipo, la piattaforma è al suo livello più alto, ricoperta da appena uno strato di resina opportunamente livellato.

Il laser comincia a tracciare la sezione inferiore del pezzo come previsto dal file “.STL”, si osserva così la solidificazione localizzata della prima sezione.

Una volta terminata la solidificazione, l'elevatore abbassa di un livello la piattaforma che si ricopre di uno strato di fotopolimero liquido e il laser solidifica la sezione successiva.

E' da sottolineare che alcuni micrometri dello strato indurito a contatto con l'atmosfera rimangono liquidi poiché l'ossigeno ne inibisce la reazione, questo comportamento è molto favorevole al processo perché agevola l'adesione tra strati successivi.

Il processo si ripete finché non viene solidificata anche l'ultima sezione, quella superiore del pezzo.

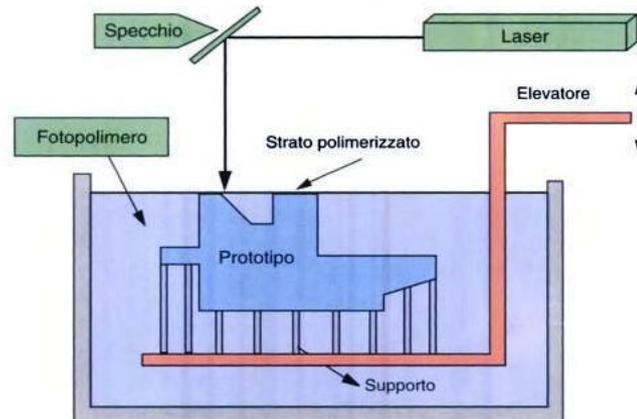


Figura 2.1 – Schema del processo stereolitografico

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

Per ragioni di tempo il laser non può solidificare totalmente la sezione ma si limita ai profili e ad un certo numero di linee che congiungono il perimetro interno con quello esterno. Al termine di questa fase, la parte prodotta, detta *green part*, contiene ancora del liquido intrappolato e inoltre le sue pareti non sono completamente polimerizzate. Il pezzo deve quindi subire ulteriori trattamenti agli ultravioletti e viene quindi esposto ad una lampada UV per un tempo che è funzione del tipo di resina e della geometria, il pezzo è ora denominato *red part*.

Ultimato il post-trattamento si provvede all'asportazione dei supporti, alla finitura e alla pulizia sempre manuali.

2.1.1 Materiali

Negli ultimi anni sono stati effettuati molti investimenti volti allo sviluppo di nuove resine per la stereolitografia.

Le principali caratteristiche che un fotopolimero deve possedere per impieghi stereolitografici sono:

- Elevata reattività alla radiazione laser utilizzata;
- Viscosità stabile e controllabile;
- Limitata volatilità;
- Limitata tossicità;
- Basso ritiro;
- Bassa energia di attivazione;
- Buone proprietà meccaniche dopo la polimerizzazione.

La composizione generale di un materiale adatto alla fotopolimerizzazione deve comprendere:

- Monomeri a basso peso molecolare per il controllo della viscosità;
- Monomeri ad alto peso molecolare per le prestazioni meccaniche;
- Fotoiniziatori per assorbire la radiazione laser e iniziare la catena del polimero;
- Additivi per conferire le proprietà richieste al prototipo.

La conoscenza delle proprietà fisico-chimiche del materiale è essenziale per individuare il campo di applicazione del prototipo, che può essere estetico o funzionale, in questo caso sarebbe auspicabile che la resina solidificata presenti caratteristiche simili a quelle del materiale definitivo, ma questo obiettivo è molto difficile da realizzarsi.

I fotopolimeri più diffusi sono di tipo acrilico, caratterizzato da bassa viscosità, destinato a scopi estetici e ad applicazioni in cui il tempo di costruzione è da privilegiarsi rispetto alla precisione oppure epossidico, molto viscoso e destinato a scopi funzionali vista la maggior precisione.

Lo spessore della resina polimerizzata viene espresso dalla seguente relazione, detta "curva di lavoro del laser" : $C_p = D_p \ln\left(\frac{E}{E_c}\right)$ dove E rappresenta l'energia del laser in mJ/cm^2 , D_p il coefficiente di penetrazione ed E_c l'energia d'attivazione.

I principali vantaggi della stereolitografia sono:

- Possibilità di utilizzo continuo ventiquattro ore su ventiquattro;
- Buon supporto per gli utenti;
- Macchine con volumi costruttivi variabili dalle piccole alle grandi dimensioni;
- Buona accuratezza e finitura superficiale;
- Ampia gamma di materiali utilizzabili.

I principali svantaggi sono invece i seguenti:

- Necessità di costruire strutture di supporto;
- Fasi post-processo, ovvero rimozione di supporti e altre fasi manuali;
- Post-trattamento, per solidificare l'intera struttura e garantirne l'integrità.

2.1.2 Fattori che influenzano la qualità del prototipo

La qualità di un prototipo è influenzata da molti fattori legati alle condizioni ambientali (umidità, temperatura e vibrazioni), alla forma geometrica, al materiale del pezzo, alla preparazione dei dati, alla macchina, al processo di costruzione, al post-processo e alla finitura manuale.

Per quanto riguarda il materiale le proprietà più importanti sono:

- Viscosità: influenza l'uniformità e la precisione del ricoprimento. E' determinante per quanto riguarda il ritiro volumetrico poiché bassa viscosità implica un consistente ritiro volumetrico mentre se elevata rende complicato il ricoprimento dello strato solidificato;
- Tensione superficiale: è la capacità della resina liquida di bagnare lo strato polimerizzato pena la disuniformità nello spessore degli strati;
- Uniformità e stabilità: la separazione dei vari componenti della resina determina un comportamento disuniforme alla radiazione laser pregiudicando il risultato complessivo.

I parametri legati alla macchina sono:

- Potenza del laser: per avere una corretta fotopolimerizzazione la distribuzione dell'irraggiamento dello spot del laser deve essere gaussiana;
- Spot del laser: il sistema di focalizzazione deve assicurare sia una sezione circolare dello spot sia una buona dinamica per poter seguire le traiettorie alle massime velocità di lavoro in modo da evitare o almeno limitare le deviazioni dalla traiettoria nominale;
- Elevatore: la precisione e la ripetibilità di posizionamento assicurano la costanza dello spessore delle sezioni del prototipo e l'allineamento delle stesse;
- Ricoprimento: l'altezza dello strato di resina liquida sopra la sezione solidificata deve essere costante per garantire l'uniformità di spessore e l'allineamento dei singoli strati. In funzione della viscosità del fotopolimero si avranno tempi d'attesa più o meno lunghi e la velocità di ricoprimento deve essere tale da impedire la formazione di vuoti.

Parametri di processo:

- Spessore dello strato: valori piccoli migliorano la rugosità del pezzo ma richiedono tempi di costruzione elevati;

- Velocità di scansione: valori elevati riducono i tempi di costruzione ma mettono a dura prova il sistema di focalizzazione e richiedono potenze del laser maggiori;
- Strategia di scansione: deve essere scelta opportunamente per limitare le distorsioni sul pezzo;
- Tratteggio: rappresenta il metodo usato per riempire le sezioni collegando il perimetro esterno con quello interno;
- Compensazione: in funzione del tipo di materiale e della geometria del pezzo occorre inserire in macchina una serie di parametri per compensare il ritiro volumetrico e le distorsioni.

Parametri di post-processo:

- Pulizia: è l'operazione successiva all'estrazione del pezzo ed è necessaria per eliminare la resina liquida intrappolata all'interno delle pareti, solitamente si usa l'isopropanolo che diluisce la resina liquida senza essere assorbito dalle pareti, che poi vengono asciugate con l'acetone;
- Post-trattamento: tempi elevati determinano particolari con stabilità temporale superiore mentre in presenza di pareti sottili è consigliabile adottare tempi ridotti per evitare rotture dovute alla presenza di tensioni residue;
- Finitura: essa è funzione dell'applicazione cui è destinato il pezzo.



Figura 2.2 – Variabili che influenzano la qualità del pezzo
 Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

2.1.3 Difetti

I pezzi costruiti con la stereolitografia possono presentare due tipi di difetti noti col nome di *curl distortion* e *swelling*.

Il fenomeno del *curl distortion* è dovuto alla concomitanza del ritiro di solidificazione e di parti sporgenti del pezzo: il primo strato solidificato, essendo libero di ritirarsi senza introdurre tensioni residue, non presenta deformazioni mentre gli strati successivi aderiscono l'uno all'altro e il ritiro del pezzo introduce un momento flettente che determina uno spostamento verso l'alto della parte terminale degli strati.

Inizialmente la curvatura degli strati è molto evidente e può portare all'emersione dalla resina liquida ma via via che la costruzione prosegue il fenomeno si attenua perché la struttura raggiunge una certa massa e oppone resistenza alla deformazione.

Questa tipologia di difetto viene contrastata con la costruzione di supporti laddove vi siano parti sporgenti.

L'altro difetto è lo *swelling* che si manifesta in presenza di componenti grandi e complessi che rimangono immersi nella resina liquida per molte ore, si possono osservare degli incrementi di volume dovuti alla migrazione di monomero liquido all'interno della parte solidificata.

Questo fenomeno può determinare grossi problemi di deformazione e viene limitato con l'uso di nuove resine ed una polimerizzazione più marcata.

2.1.4 Applicazioni ed esempi

La stereolitografia si offre ai produttori come un metodo per ridurre il tempo impiegato per il lancio nel mercato di un nuovo prodotto limitando i costi e assumendo un maggior controllo del processo di design.

Le applicazioni più comuni sono varie :

- Modelli per la concettualizzazione, la presentazione e l'imballaggio;
- Prototipi per il design, l'analisi, le verifiche ed i test funzionali;
- Parti per prototipi di utensili e la produzione in piccoli volumi;
- Modelli per microfusione, fusione in terra e formatura;
- Strumenti per il design di apparecchiature e utensili.

Ford, per la produzione del coperchio motore del tergilunotto del suo "1994 Explorer", analizzò diverse alternative ed optò per l'uso della stereolitografia.

Con questa tecnica prima venne costruito il modello, ma una volta montato mostrò problemi di spazio, il pezzo venne quindi smontato, modificato prima manualmente e poi sul sistema CAD.

Il tempo impiegato per queste operazioni fu di sole 4 settimane per un costo totale di 5000 \$, situazione molto più vantaggiosa rispetto all'uso di tecniche tradizionali per le quali sarebbero stati necessari tre mesi e 33000 \$.

Ford fu in grado di cominciare i test di durata e resistenza al flusso d'acqua 18 mesi prima del previsto, con costi inferiori del 45% e risparmi in termini di tempo del 40%.

Il team di designer di *Black & Decker* aveva solo cento giorni per riuscire a costruire un prototipo funzionante di un nuovo decespugliatore in modo tale da poterlo testare e presentare ad un'importante fiera del settore.

Il fallimento di questi obiettivi avrebbe penalizzato notevolmente l'azienda rispetto ai concorrenti.

Black & Decker si rivolse alla *Mass Engineered Design Inc.* di Toronto, dove veniva usata la stereolitografia, che disegnò, creò e testò numerosi prototipi in modo da individuare l'alternativa migliore. Una volta sciolti i dubbi venne assemblato il prototipo definitivo con i componenti meccanici che lo resero funzionante e completato con la verniciatura ed il marchio.

Tutta la procedura impiegò un tempo inferiore ai cento giorni previsti, così *Black & Decker* riuscì ad esporre il prototipo alla fiera ottenendo un grande successo, numerosi infatti furono gli ordini ricevuti.

2.2 SOLID GROUND CURING (SGC)

La tecnica del Solid Ground Curing è stata sviluppata dall'azienda israeliana *Cubital*, la cui attività cominciò nel 1987 in seguito alla scissione dalla *Scitex Corporation* e iniziò a commercializzare le sue macchine nel 1991.

Una volta disegnato il pezzo su un sistema CAD, il software *Cubital's Solider DFE* genera le sezioni trasversali e le trasferisce al generatore di maschere, il cui compito è quello di creare il negativo della sezione desiderata su una lastra di vetro.

La maschera è creata tramite un processo di stampa ionografica, simile alla xerografia, attraverso la quale viene depositato un sottile strato di polvere nera che vi aderisce elettrostaticamente.

La lastra di vetro viene posta sopra ad un elevatore, che funge da tavola portapezzo, sul quale è deposto un sottile strato di fotopolimero liquido. A questo punto viene accesa per pochi secondi la lampada ultravioletta, che trovandosi sopra alla lastra di vetro causa la solidificazione della sezione del prototipo considerata.

L'elevatore si porta prima sotto alla stazione d'aspirazione che elimina la resina non polimerizzata e poi sotto ad una stazione che deposita uno strato di cera liquida

sull'intera stazione, che viene poi solidificata da una piastra reffreddante.

Si ha così la sezione di fotopolimero solidificata inglobata dalla cera, il tutto viene poi fresato in modo da uniformare lo spessore.

Il ciclo appena descritto viene ripetuto per tutte le sezioni ripulendo di volta in volta la lastra di vetro sulla quale è rappresentata la sezione già creata e stampando la sezione successiva.

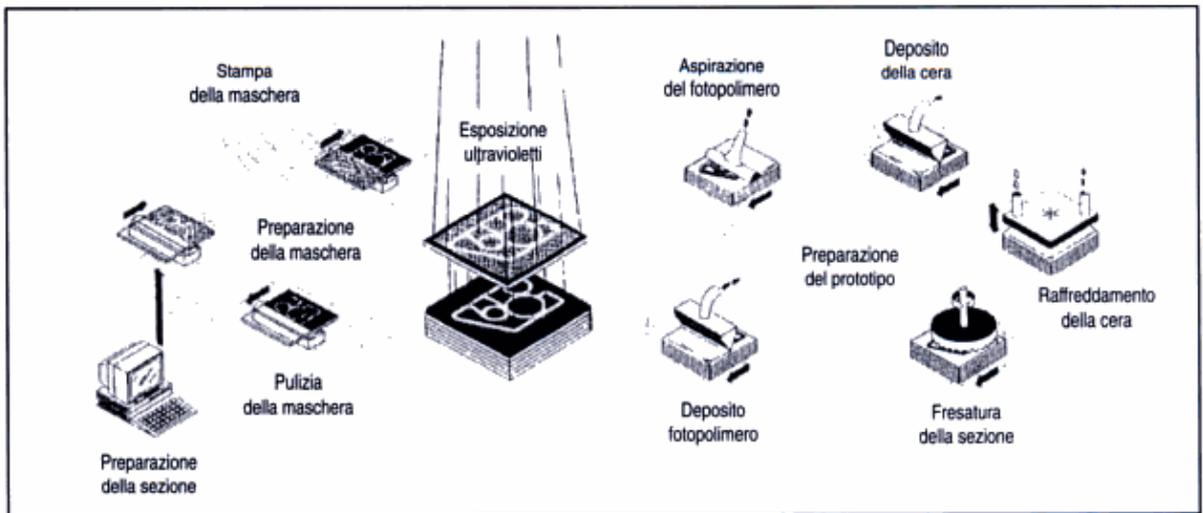


Figura 2.3 – Schema del processo di Solid Ground Curing

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

I vantaggi della tecnica Solid Ground Curing, soprattutto se comparati con la stereolitografia sono i seguenti :

- Alta velocità di elaborazione, grazie alla solidificazione dell'intera sezione, questa tecnica è otto volte più veloce di altre e i costi possono essere inferiori anche del 25-50%;
- Assenza di supporti, la funzione di supporto è svolta dalla cera;
- Tolleranza agli errori, gli strati sono eliminabili e correggibili;
- I pezzi prodotti sono affidabili, robusti, accurati e lavorabili, questo è dovuto all'assenza di tensioni residue;
- Ritiro volumetrico minimo, dovuto alla solidificazione istantanea della sezione;
- Sicurezza, la resina rimane allo stato liquido per poco tempo e quella non solidificata è aspirata immediatamente.

Gli svantaggi principali sono invece:

- Necessità di spazio costruttivo maggiore rispetto alle altre tecniche;
- Difficoltà di rimozione della cera se la geometria del pezzo è complessa;
- Produzione di materiale di scarto, principalmente nella fase di fresatura;
- Rumore.

2.2.1 Applicazioni ed esempi

Il sistema SGC si presta, oltre che ad applicazioni generali (design, test, analisi, esposizione) ad applicazioni relative all'attrezzaggio e alla microfusione.

L'azienda *Schneider Prototyping GmbH* è riuscita a costruire un prototipo in metallo per la microfusione direttamente dal modello CAD con la tecnica Solid Ground Curing in sole due settimane quando con le tecniche tradizionali sarebbero occorse tra le dieci e le sedici settimane. Inoltre l'applicazione di tale tecnologia ha permesso di produrre prototipi dal costo pari alla metà di quello che si sarebbe ottenuto con altre tecniche di prototipazione rapida.

2.3 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)

La tecnica è stata sviluppata da Michael Feygin, il quale fondò nel 1985 l'azienda *Helisys* proprio per commercializzare le macchine basate su questa tecnologia. Tuttavia nel 2000 l'azienda andò incontro al fallimento perché le vendite non rispettarono le aspettative, attualmente la tecnica è commercializzata dall'azienda che è succeduta ad *Helisys*, la *Cubic Technologies*.

La struttura base della macchina LOM comprende diversi sottosistemi: un computer, il laser CO₂, il sistema di ottiche (che consiste di tre specchi che riflettono il raggio laser ed una lente che lo focalizza), la piattaforma e il sistema di incollaggio.

Per rendere più semplice, veloce e sicuro il taglio, il raggio laser è accompagnato ad un laser He-Ne che proietta un raggio rosso che rende visibile la traiettoria seguita.

Le proprietà meccaniche assunte dal pezzo sono funzione della velocità di passaggio del rullo di incollaggio, della sua temperatura e della pressione esercitata sugli strati.

Il materiale di costruzione, di costo limitato e completamente atossico, è costituito da carta rivestita nella parte inferiore da uno strato di polietilene e viene approvvigionata sotto forma di rotoli. Lo spessore utilizzato è unico e pari a 0.066 mm per minimizzare l'effetto staircase sul prototipo.

Sono utilizzabili anche altri materiali, ad esempio materiali plastici termoadesivi per ottenere pareti sottili e tenaci e compositi per la costruzione diretta di attrezzature.

Il processo parte con l'elaborazione del modello CAD del pezzo da parte del software LOMSlice™ che esegue lo slicing delle sezioni.

Questa tecnica consiste nel progressivo incollaggio di fogli sottili rivestiti di materiale adesivo sui quali interviene successivamente il raggio laser CO₂ che taglia le sezioni. Il pezzo viene costruito strato su strato a partire da una piattaforma metallica, il sistema di trascinamento posiziona il foglio di carta nella zona di lavoro e il passaggio di un rullo caldo incolla il foglio al supporto, il software LOMSlice™ effettua, prima della creazione di ogni sezione, delle precise misurazioni dell'altezza raggiunta dal pezzo e seziona il modello CAD in corrispondenza; le misurazioni effettuate dal software guidano il raggio laser nel taglio della sezione e dei riquadri che fungono da sfrido di contenimento.

La potenza del laser è opportunamente controllata in modo tale da tagliare un solo strato di foglio adesivo per non compromettere l'integrità degli strati inferiori.

A questo punto la piattaforma si abbassa di un livello per consentire l'avanzamento di un nuovo strato di materiale, la piattaforma si alza ed interviene il rullo caldo, il cui passaggio incolla il nuovo strato con i precedenti.

Il ciclo si ripete fino alla all'ultima sezione, a processo ultimato il pezzo appare come un parallelepipedo compatto di aspetto simile al legno.

La fase successiva, ovvero quella di post-processo è quella più complessa e delicata, anche perché condotta manualmente.

Il blocco contenente il pezzo viene prima rimosso dalla piattaforma con l'utilizzo di attrezzi tipici della lavorazione del legno, tipicamente un martello, una spatola e fili sotto tensione che vengono fatti passare tra lo sfrido e il pezzo.

Una volta estratto, il modello viene trattato con uretano, resina epossidica o spray per impedire l'assorbimento di umidità e quindi la deformazione. Inoltre esso può subire operazioni di finitura in funzione dell'utilizzo a cui è destinato, ad esempio sabbiatura, lucidatura, verniciatura e lavorazioni meccaniche.

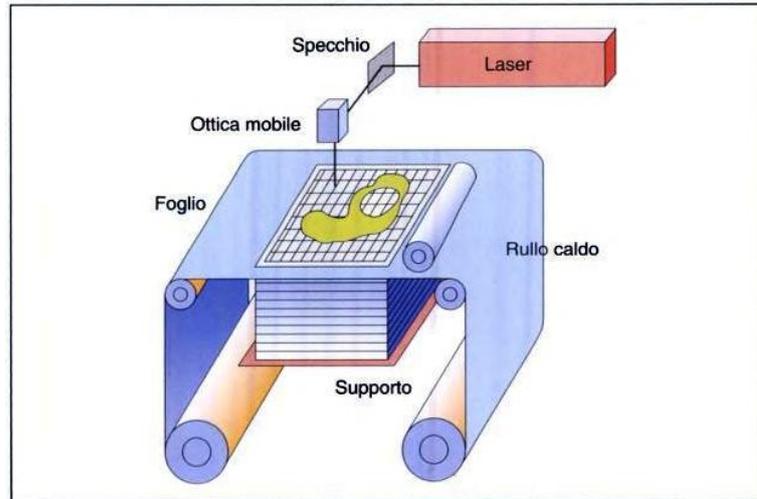


Figura 2.4 – Schema del processo Laminated Object Manufacturing (LOM)
 Fonte: Gatto A., Iuliano L., “Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale”

La tecnica LOM presenta i seguenti vantaggi :

- Ampia varietà di materiali, in linea di principio tutti i materiali che possano presentarsi sotto forma di fogli sottili possono essere applicati a questa tecnica, ad esempio carta, materie plastiche, metalli, materiali compositi e ceramici. Un importante aspetto di questi materiali è la disponibilità commerciale, ciò consente di poter utilizzare di volta in volta quello che concilia le sue proprietà con l'applicazione desiderata;
- Velocità, il laser, non dovendo scannerizzare l'intera superficie della sezione, ma solo il perimetro, consente velocità produttive elevate rendendo il processo molto vantaggioso nella produzione di pezzi grandi e voluminosi;
- Alta precisione, l'accuratezza che può essere raggiunta con questa tecnica è nell'ordine del decimo di millimetro;
- Assenza di strutture di supporto, la loro funzione è svolta dagli strati di materiale esterni al pezzo che vengono rimossi solo alla fine;
- Assenza di cambiamenti di stato, non vi è la necessità di solidificare o fondere il materiale, questo si traduce in risparmi di tempo e costi;

La tecnica presenta però anche degli svantaggi, ad esempio :

- Regolazione della potenza, il laser usato per tagliare i perimetri della sezione deve essere controllato rigorosamente e la sua potenza tarata in modo tale da tagliare un solo strato di carta e non quelli inferiori poiché ciò causerebbe distorsioni dell'intero pezzo;

- Costruzione di pezzi con elementi sottili, la tecnica LOM non è consigliata per la prototipazione di pezzi con pareti sottili perché la struttura non garantisce una rigidità adeguata;
- Integrità del prototipo, la struttura è tenuta assieme dalla superficie adesiva posta tra gli strati, pertanto è la forza della colla usata che garantisce integrità al pezzo. Le parti possono quindi non resistere alle sollecitazioni se la colla non garantisce l'adesione.
- Fase post-processo, la rimozione delle parti di contenimento dal pezzo è la fase più impegnativa e delicata di tutto il processo. E' svolta dal personale addetto con gli attrezzi tipici della lavorazione del legno.

2.3.1 Applicazioni ed esempi

La tecnica LOM è applicata ad un'ampia gamma di industrie, incluse quella aerospaziale, automobilistica, ai prodotti di consumo ed ai dispositivi medici. Questa tecnologia viene utilizzata quando è importante visualizzare l'aspetto finale dell'oggetto, testarne la forma, l'adattabilità e le funzioni così come produrre utensili e un piccolo volume di prodotti finiti.

La tecnologia LOM è stata adottata dalla *NASA* per il suo *Marshall Space Flight Center* (MSFC), un laboratorio fondato per condurre attività di ricerca e sviluppo.

Nel 1999 venne acquistata la macchina LOM-1015Plus™ e venne utilizzata per la prima volta per la progettazione di un collettore di gas caldi per il motore principale dello space shuttle per *Boeing Rocketdyne*.

Il pezzo, lungo 2 m e dal diametro di 0.10 m, presentava un design molto complesso, dovuti principalmente a intrecci, curve e giunzioni a forma di T.

Il prototipo, con le tecniche tradizionali, non sarebbe stato costituito da un unico pezzo di acciaio ma da varie parti che sarebbero poi state saldate assieme; con la tecnica LOM invece sono state realizzate otto parti, unite solo in seguito.

Il prototipo è stato realizzato così in soli dieci giorni invece dei tre mesi richiesti con le tecniche tradizionali, con un risparmio, dichiarato dalla compagnia di 10000 \$, sebbene *Boeing* non abbia rivelato le cifre esatte risparmiate.

2.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

La tecnica è stata sviluppata nel 1988 da Scott Crump, che l'anno seguente fondò l'azienda che tuttora commercializza tale tecnica, la *Stratasys Inc.*

La *Stratasys* lanciò sul mercato la sua prima macchina, la "3D modeler", nel 1992 osservando un progressivo aumento delle vendite negli anni successivi.

I sistemi di prototipazione rapida della *Stratasys* possono essere suddivisi in due categorie, la serie FDM ed i modellatori concettuali.

La serie FDM è in grado di produrre modelli tridimensionali non solo per i test meccanici ma anche prototipi funzionali in grado di lavorare come unità produttive.

I modelli più vecchi della serie FDM sono coadiuvati da software come Quickslice® e SupportWorks™ che nelle macchine moderne sono stati sostituiti dal software Insight, più veloce, efficiente e semplice da usare.

Le macchine della serie dei modellatori concettuali hanno la funzione di aiutare i designer nella valutazione dei pezzi grazie ad una veloce stampa tridimensionale.

Il processo parte col caricamento del modello CAD del pezzo nella workstation e la successiva elaborazione eseguita dal software previsto dalla macchina, che dopo aver effettuato lo slicing, orienta il pezzo nella posizione costruttiva ottimale ed individua e genera automaticamente le strutture di supporto.

Lo spessore degli strati può essere modificato manualmente e varia da 0.172 a 0.356 mm a seconda delle necessità.

Questa tecnica utilizza materiali differenti sotto forma di fili sottili avvolti in bobine che vengono estrusi da una testa di estrusione che li scalda fino ad uno stato semi-liquido.

Il materiale estruso viene quindi depositato in strati ultra sottili, uno alla volta.

Poiché l'aria attorno alla testina d'estrusione viene mantenuta ad una temperatura inferiore a quella del punto di fusione, il materiale estruso solidifica rapidamente.

La testina muovendosi nel piano X-Y costruisce il pezzo sezione dopo sezione partendo da quella inferiore e distribuisce due materiali grazie ad un meccanismo a doppia punta, il primo per costruire il pezzo vero e proprio mentre il secondo per produrre le strutture di supporto.

Il particolare prodotto non necessita di post-trattamento poiché si devono solo eliminare strutture di supporto ed eseguire la finitura manuale per migliorare la rugosità.

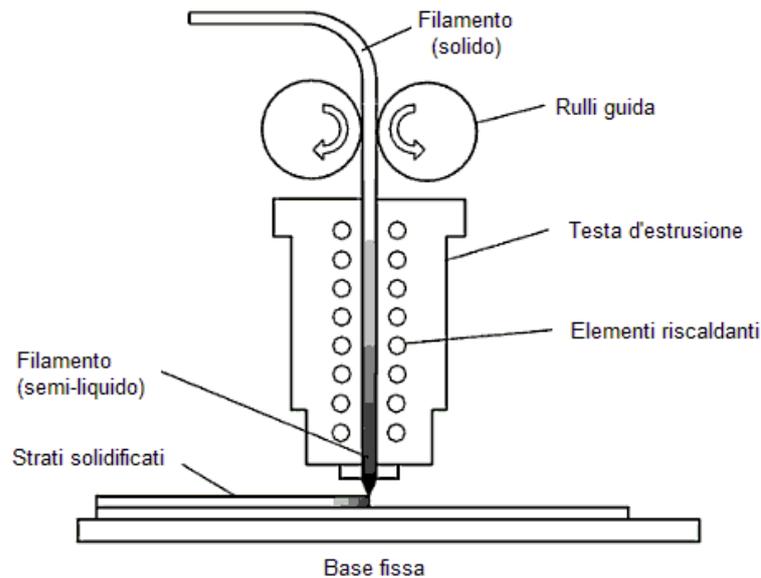


Figura 2.5 – Schema del processo Fused Deposition Modeling (FDM)
 Fonte: Chua C.K., Leong K.F, Lim C.S., 2010, Rapid prototyping: Principles and applications, third edition

I principali vantaggi della tecnica FDM sono i seguenti:

- Costruzione di parti funzionali, i pezzi prodotti presentano ottime caratteristiche meccaniche e ciò è molto utile soprattutto per lo sviluppo di prodotti che richiedono test funzionali in tempi brevi;
- Minimo scarto di materiale;
- Facilità di rimozione dei supporti;
- Facilità di cambio del materiale.

Gli svantaggi sono invece:

- Accuratezza limitata, ciò è dovuto al fatto che il materiale è estruso sottoforma di fili dallo spessore di 1.27 mm circa;
- Lentezza del processo;
- Ritiro imprevedibile.

2.4.1Materiali

I materiali utilizzabili, sottoforma di fili sottili avvolti in bobine, sono vari:

- Cera per microfusione, in realtà si tratta di un polimero termoplastico, il limite del suo impiego consiste nella bassa temperatura di fusione che crea difficoltà nel controllo della temperatura. Questi problemi stanno spingendo verso un progressivo abbandono;
- Poliammide P301, viene usato per realizzare prototipi estetici a causa delle limitate precisioni e caratteristiche meccaniche;
- ABS P400, garantisce resistenza meccanica e chimica, stabilità al calore, rigidità, basso coefficiente di ritiro e rapida solidificazione per la realizzazione di modelli funzionali. La qualità superficiale dei modelli può essere migliorata con verniciatura, sabbiatura e sono inoltre possibili lavorazioni meccaniche tradizionali;
- MABS, è un materiale destinato ad applicazioni medicali, i modelli possono essere sterilizzati con le radiazioni γ e utilizzati per prove funzionali direttamente a contatto con le apparecchiature medicali e nelle camere sterili;
- Elastomero, è caratterizzato da una durezza shore di 60A e destinato alla realizzazione di prototipi di elementi elastici come le guarnizioni.

Tutti i materiali sono stati sviluppati e ottimizzati per l'applicazione specifica dell'estrusione, per ogni materiale ne esiste un secondo con proprietà termomeccaniche leggermente inferiori e colore diverso destinato ai supporti.

2.4.2Applicazioni ed esempi

I pezzi prodotti con la tecnica FDM possono essere usati per la concettualizzazione e la presentazione, per i test funzionali (solo se il materiale utilizzato è l'ABS) o per essere modelli per l'attrezzaggio.

La *Toyota*, una delle più importanti case automobilistiche a livello mondiale, effettua il design ed il test dei veicoli principalmente al *Toyota Technical Center* (TTL).

Nel 1997 il TTL acquistò dalla *Stratasys* la FDM 8000 per migliorare l'efficienza nella fase di test e design.

Nel progetto denominato *Avalon 2000* la TTL rimpiazzò il metodo tradizionale di attrezzaggio e lo sostituì con la tecnica FDM, ciò permise di risparmiare più di 2000000 \$ e aiutò i designer nell'individuazione di problemi imprevedibili nella fase di design.

2.5 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

La tecnica è stata sviluppata dalla società americana *DTM Corporation*, fondata nel 1987, e la prima macchina venne commercializzata nel 1992. Nell'agosto 2001 l'azienda venne acquistata dalla *3D Systems*, azienda leader del mercato che commercializza anche le macchine stereolitografiche.

Il sistema SLS contiene i seguenti componenti: la camera di costruzione, il calcolatore di processo e il refrigeratore.

All'interno della camera di costruzione viene depositato un sottile strato di polvere fusibile se sottoposta al calore, la temperatura interna viene mantenuta prossima a quella di fusione del materiale in modo tale da minimizzare l'energia richiesta al laser. Il laser CO₂ segue le traiettorie necessarie a tracciare la sezione e fornisce l'energia termica necessaria a provocare la fusione localizzata delle polveri, lasciando inalterate quelle nelle zone circostanti, si ha così la creazione della sezione grazie alla fusione e unione dei granelli di polvere.

Una volta completata la sezione viene depositato un ulteriore strato di polvere grazie ad un meccanismo di rulli ed è così possibile la creazione della sezione successiva.

Il procedimento si ripete fino alla creazione dell'ultima sezione.

Un aspetto molto importante dei materiali in forma di polveri è che consentono di non utilizzare supporti nella creazione del prototipo, infatti la loro funzione è svolta dagli strati stessi di polvere non fusa dal laser che rimangono nella camera di costruzione fino al termine del processo.

Terminata la creazione del pezzo, esso viene rimosso dalla camera di costruzione e la polvere libera si rimuove semplicemente.

Il prototipo può richiedere alcune operazioni di finitura come sabbiatura, laccatura, verniciatura a seconda dell'utilizzo a cui è destinato.

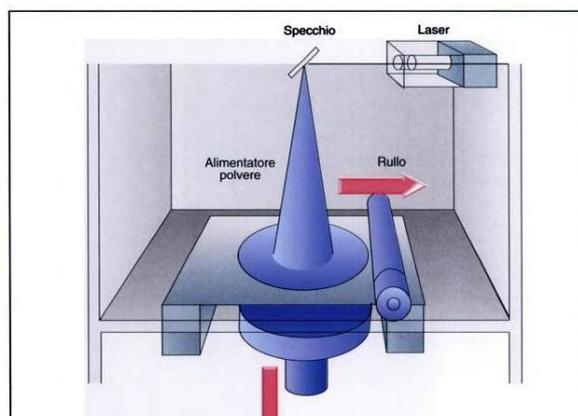


Figura 2.6 – Schema del processo Selective Laser Sintering (SLS)

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

I vantaggi presentati da questa tecnica sono:

- Buona stabilità del pezzo;
- Ampia gamma di materiali utilizzabili;
- Assenza di strutture di supporto;
- Limitata fase di post-processo;
- Assenza di post-trattamento per la solidificazione;
- Supporto software avanzato.

Gli svantaggi sono invece i seguenti:

- Ampio spazio fisico richiesto dall'unità;
- Alto consumo di potenza del laser;
- Scarsa finitura superficiale.

2.5.1 Materiali

Le macchine SLS sono le uniche in grado di lavorare direttamente con un'ampia gamma di materiali: termoplastici, metalli, ceramici e compositi.

La maggior parte dei materiali utilizzati sono sicuri, atossici, semplici da usare e possono essere facilmente conservati, riciclati e smaltiti.

Alcuni materiali usati sono i seguenti:

- Poliammidi, commercializzati col nome "*Duraform™*" vengono utilizzati per creare parti rigide e ruvide. Questo materiale è duraturo, può essere lavorato e anche saldato se necessario;
- Elastomeri termoplastici, commercializzati col nome "*SOMOS® 201*" sono flessibili, impermeabili, simili alla gomma e in grado di resistere alle abrasioni;
- Policarbonati, richiedono laser a minor potenza, sono più veloci da lavorare e sono spesso dedicati alla costruzione di modelli per la microfusione;
- Nylon, uno dei materiali più duraturi e attualmente disponibili;
- Metalli, commercializzati col nome di "*LaserForm ST-100*" sono acciaio inox in polvere, rivestiti di polimeri e infiltrati di bronzo. Questo materiale presenta ottima durabilità e conduttività termica;
- Ceramici, commercializzati con i nomi di "*SandForm™ Zr*" e "*SandForm™ Si*".

2.5.2 Applicazioni ed esempi

I pezzi prodotti con la tecnica SLS, in particolare costruiti con la *Vanguard™* possono essere destinati a varie applicazioni come la rappresentazione fisica del pezzo per rivederne il design, la costruzione di modelli in grado di poter subire limitati test

funzionali, la costruzione di modelli al policarbonato per il processo di fusione a cera persa e per l'attrezzaggio rapido, nel caso in cui il materiale usato sia metallico.

La compagnia aerea *Boeing* acquistò la macchina *Sinterstation*® per la progettazione dei nuovi modelli e per poter effettuare i necessari test di fatica, resistenza al calore e all'umidità.

Grazie all'adozione di tale tecnica *Boeing* riuscì a raggiungere gli obiettivi che si era prefissata, ovvero evitare l'uso di tecniche tradizionali, risparmiare tempi e costi, ridurre il tempo di ciclo, aumentare l'efficienza e massimizzare il Return On Investment (ROI) aziendale.

La *Reebok*, azienda calzaturiera, utilizzò la tecnica SLS per costruire una suola per un nuovo modello di scarpa da golf e scelse come materiale il *SOMOS*® 201.

La costruzione durò sole 7 ore per un costo complessivo di 250 \$, mentre le tecniche di prototipazione tradizionali avrebbero richiesto uno o due mesi per un costo di 4000 \$.

2.6 Altre tecniche

2.6.1 3D Printing (3DP)

La tecnologia in questione è stata sviluppata dal *Massachusetts Institute of Technology* e successivamente sviluppata e commercializzata dall'azienda *Z Corporation*, fondata nel 1994 da Hatsopoulos, Walter Bornhost, Tim Anderson e Jim Brett.

Gli ultimi prodotti della *Z Corporation* sono i sistemi Z™400, Z™406 e Z™810. Il primo ha sostituito il precedente modello, il Z™402, esso presenta la stessa velocità e performance ma è configurato per fini istruttivi. Il Z™406 invece presenta velocità costruttive anche tre volte superiori rispetto al precedente e utilizza quattro testine di stampa sviluppate da *Hewlett-Packard*. La particolarità dell'ultimo modello, il Z™810, invece è l'ampio volume costruttivo e l'offerta di alcune opzioni di finitura come il trattamento con resine epossidiche, la sabbiatura, la verniciatura e la placcatura.

La macchina, attraverso il sistema di alimentazione, distribuisce uno strato di polvere in modo tale da ricoprire il pistone di costruzione. Le testine della macchina quindi stampano una soluzione legante sulla polvere libera in modo tale da formare la sezione del pezzo. A seconda del colore richiesto dal particolare possono agire tutte e quattro le testine o solo alcune di esse.

La polvere è quindi incollata assieme dove viene stampato il legante mentre quella non facente parte della sezione rimane libera e si accumula nella fase di costruzione agendo da supporto come nella tecnica Selective Laser Sintering.

Quando ogni sezione viene costruita il pistone si abbassa e viene depositato un nuovo strato di polvere.

Come per le altre tecnologie la costruzione avviene strato su strato fino a che non viene creata l'ultima sezione.

La rimozione del pezzo avviene aspirando la polvere in eccesso ed esso può subire alcuni post-trattamenti per migliorarne la resistenza meccanica come rivestimento di cera o infiltrazioni con resine o uretano.

I vantaggi della tecnica 3D Printing sono :

- Alta velocità costruttiva, è la tecnologia più rapida poiché ogni sezione è costruita in un intervallo di tempo dell'ordine dei secondi;
- Versatilità, questa tecnica è utilizzata da molti tipi di industrie e per un'ampia varietà di utilizzi;
- Facilità d'uso, il sistema è basato su uno standard che lo rende simile ad una stampante ink-jet;
- Assenza di materiale di scarto, la polvere non utilizzata in un ciclo viene riusata la volta successiva;
- Colori, è possibile impartire ad un pezzo più colorazioni direttamente nella fase di creazione.

Gli svantaggi sono invece:

- Parti poco funzionali, il pezzo può essere sottoposto a limitati test funzionali per la sua debolezza strutturale;
- Materiali limitati, sono disponibili solamente amidi e materiali plastici;
- Scarsa finitura superficiale.

La tecnologia 3D Printing è molto usata nell'industria calzaturiera poiché permette di ridurre notevolmente il tempo di sviluppo di un nuovo modello di scarpa andando incontro alle esigenze sempre più mutevoli dei clienti.

2.6.2 Polyjet

La tecnica Polyjet è stata sviluppata dalla *Objet Geometries Ltd.*, questa azienda si è imposta come leader nel settore della stampa tridimensionale ad alta risoluzione.

Il sistema Polyjet segue lo stesso processo della tecnica 3D Printing, nella macchina sono inserite due cartucce, una contenente il fotopolimero destinato a costruire il pezzo ed un'altra per il materiale di supporto.

Le testine cominciano a muoversi nel piano X-Y e depositano il materiale in modo tale da costruire la prima sezione, contemporaneamente una lampada ultravioletta fa sì che il materiale depositato solidifichi al momento. Queste testine rilasciano il materiale strettamente necessario a costruire il pezzo e i suoi supporti e qualora una cartuccia stia per finirsi è possibile sostituirla senza interrompere il processo.

Una volta costruita una sezione la piattaforma si abbassa di 16 µm e le testine continuano a ripetere il processo fino al completamento del pezzo, che non necessita di trattamenti ma solo della rimozione dei supporti, con l'aiuto di un getto d'acqua.

I vantaggi comportati da questa tecnica sono i seguenti:

- Alta qualità, garantita dallo spessore di soli 16 µm degli strati costruiti;
- Velocità del processo;
- Ampia gamma di materiali;
- Facilità d'uso;
- Possibilità di sostituire le cartucce senza interrompere il processo;
- Sicurezza e pulizia.

Gli svantaggi sono rappresentati da:

- Rimozione dei supporti, il getto d'acqua richiesto per eliminare i supporti può danneggiare i particolari più delicati;
- Materiale di scarto, i supporti eliminati non possono essere riutilizzati.

La tecnologia Polyjet, oltre alle applicazioni generali si adatta bene alle applicazioni medicali, all'industria della gioielleria.

Adidas-Salomon AG è una tra le più importanti aziende produttrici di calzature sportive. In questo settore, caratterizzato più di ogni altro da alta competitività, è di fondamentale importanza continuare a migliorare i propri prodotti e lanciarli quanto prima sul mercato.

L'azienda si è quindi dotata di sistemi Polyjet, che hanno portato maggior flessibilità soprattutto nella collaborazione con le industrie delocalizzate nel resto del mondo.

2.6.3 Multi-jet modeling (MJM)

Il sistema multi-jet modeling è stato lanciato dalla *3D Systems* nel 1996 come modellatore concettuale per l'ufficio complementare alle macchine stereolitografiche,

Il pezzo viene costruito strato su strato a partire da una piattaforma mobile, la testa di stampa ha la particolarità di contenere al suo interno 352 testine, racchiuse in una lunghezza di 200 mm.

Queste testine seguono un processo simile alla stampa a getto d'inchiostro ed depositano un materiale termoplastico liquefatto, quando una sezione è completata la piattaforma di costruzione si abbassa e le testine riprendono la costruzione della sezione successiva fino al completamento dell'oggetto.

I vantaggi di questa tecnica sono:

- Efficienza e facilità d'uso, le testine depositano velocemente e in maniera continua materiale ad una risoluzione di 300 dpi;
- Basso costo, il termopolimero utilizzato è disponibile a costi limitati;
- Velocità costruttiva.

Gli svantaggi invece sono:

- Piccolo volume costruttivo, soprattutto se comparato a quelli di altre tecniche;
- Materiali limitati;
- Scarsa accuratezza.

L'applicazione della tecnica MJM è limitata alla costruzione di modelli concettuali per la visualizzazione del progetto ai primi stadi del processo di design.

Questa debolezza rispetto alle altre tecniche fa sì che il suo utilizzo sia limitato all'ufficio di design.

CAPITOLO 3

ANALISI DELLE TECNICHE RP

E' molto interessante poter valutare il prototipo rapido con le stesse metodologie applicate agli elementi costruiti con le tecnologie classiche, ad esempio processi fusori, lavorazioni per deformazione plastica, lavorazioni per asportazione di truciolo, ecc, dove la qualità dei pezzi prodotti è espressa in termini di tolleranza dimensionale, errori di forma e rugosità superficiale.

E' sorta quindi una serie di iniziative volte a sviluppare metodologie specifiche per la valutazione delle prestazioni delle varie tecniche, individuando un insieme più esteso di criteri da coinvolgere nell'analisi e nella valutazione dei prototipi rapidi.

I criteri ritenuti importanti sono:

- La tolleranza dimensionale;
- La tolleranza di forma;
- La rugosità delle superfici;
- Le caratteristiche meccaniche;
- Le tensioni residue.

La valutazione deve essere condotta su opportuni elementi di riferimento detti benchmark, tuttavia non è pensabile di operare con benchmark standardizzati per tutti i criteri, sono necessari quindi diversi elementi di riferimento.

A questo proposito sono stati sviluppati, presso gli ambienti industriali ed accademici, diversi tipi di benchmark a seconda delle esigenze.

3.1 Valutazione delle prestazioni dimensionali

Una volta individuato il particolare di riferimento occorre generarne il modello CAD e successivamente procedere alla costruzione con la tecnica RP desiderata, i particolari prodotti vengono sottoposti all'analisi di una macchina di misura a coordinate (CMM) con l'obiettivo di individuare gli errori dimensionali, di forma e la rugosità superficiale, elaborati da un'opportuna metodologia.

Le tecniche per l'elaborazione dei dati raccolti hanno lo scopo di fornire uno o più parametri che consentono di esprimere un giudizio aggregato su ciascun sistema di prototipazione rapida.

Il metodo più semplice di elaborazione dei dati è quello della distribuzione dell'errore, inteso come la differenza tra la dimensione nominale e quella effettivamente misurata. E' così possibile valutare sia l'errore medio che lo scarto quadratico medio e contemporaneamente verificare che la distribuzione dell'errore sia di tipo normale.

Le informazioni deducibili da questa analisi sono le seguenti:

- Un errore medio macroscopicamente diverso da zero indica la presenza di un errore sistematico nel processo;
- Lo scarto quadratico medio è indicativo della variabilità del processo;
- Una distribuzione non normale dell'errore ne indica la non casualità e la conseguente presenza di un problema sull'impianto.

Un'altra procedura è quella delle medie e delle ampiezze dell'errore, sviluppata presso l'Università di Leeds e prevede:

1. Raggruppamento delle misurazioni con lo stesso valore nominale e determinazione di errore medio, scarto quadratico medio e ampiezza dell'errore, ovvero differenza tra errore massimo e minimo;
2. Individuazione di tre classi in base alle dimensioni nominali, ovvero piccola (fino a 5 mm), media (da 5 a 50 mm) e grande (oltre i 50 mm);
3. Valutazione per ciascuna classe di errore medio e range delle ampiezze dell'errore.

Dai dati raccolti si possono elaborare parametri aggregati che permettono di poter valutare le macchine RP e precisamente:

- l'intervallo di errore medio indicativo della capacità della macchina di raggiungere il punto impostato dal sistema di controllo;
- il range delle ampiezze dell'errore indicativo del massimo errore che ci si deve attendere dal processo;

A titolo di esempio sono riportati in figura 3.1 alcuni dei risultati delle misure effettuate dal Prof. T. Childs sul benchmark sviluppato dall'Università di Leeds.

Sono riportati rispettivamente l'intervallo dell'errore medio e il range dell'ampiezza dell'errore in funzione delle classi secondo le quali sono aggregate le varie dimensioni, questa suddivisione permette di avere maggiori informazioni sulla variazione della precisione del sistema in funzione della dimensione stessa.

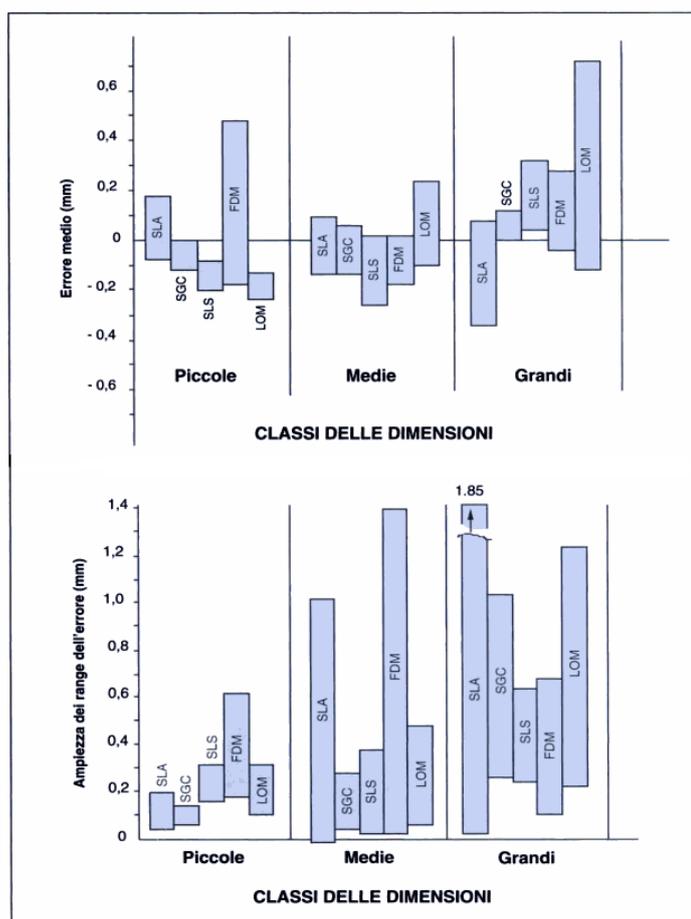


Figura 3.1 – Intervallo degli errori medi e range delle ampiezze degli errori in funzione delle classi delle dimensioni per le varie tecniche RP
 Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

La sintesi dei grafici porta ad esprimere le seguenti osservazioni:

- La precisione e gli errori massimi dei sistemi sono incostanti all'interno del volume di lavoro ma degradano progressivamente verso gli estremi;
- Per la classe delle piccole dimensioni sono i sistemi basati sui fotopolimeri (SLA e SGC) a garantire le prestazioni migliori, mentre globalmente sulle tre classi la più precisa è la SLS;
- Per le dimensioni maggiori i fotopolimeri, specialmente quelli di tipo acrilico, determinano errori rilevanti, imputabili al ritiro di solidificazione ed è pertanto sconsigliabile l'utilizzo delle tecniche SLA e SGC.

E' comunque opportuno sottolineare che i dati riportati in figura 3.1 hanno un carattere puramente indicativo poiché risalgono a prove svolte nel 1992 e da allora le attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie RP hanno indotto passi da gigante nello sviluppo di nuovi materiali.

3.2 Prestazioni in termini di errori di forma

Gli errori di forma, come anche la rugosità superficiale, risentono pesantemente della filosofia costruttiva della tecnologia RP, infatti:

- la conversione del modello CAD in file “.STL” amplifica gli errori di forma a causa dell'approssimazione delle superfici con triangoli e poligoni;
- la costruzione per strati del prototipo genera inevitabilmente problemi di rugosità superficiale.

L'utilizzo della macchina CMM sul benchmark proposto dal Politecnico di Torino ha permesso di determinare i seguenti errori di forma:

- Angolarità;
- Linearità;
- Planarità;
- Parallelismo;
- Circolarità.

I risultati in termini di errori medi di forma sono riportati nella tabella di figura 3.2 dove si nota come esistano ampie differenze tra i vari sistemi, le migliori prestazioni in termini di planarità sono presentate dalla tecnica SGC e complessivamente sono le tecniche SLA e FDM con l'uso di ABS a garantire i risultati migliori.

Tecnica	Angolarità	Rotondità	Planarità	Parallelismo	Linearità
SLA (vin.)	118	19	203	351	22
SLA (ep.)	47	23	170	207	8
SGC	300	31	52	161	38
FDM (P200)	305	57	228	305	31
FDM (P300)	591	115	153	253	54
FDM (ABS)	162	21	90	158	20
LOM	953	44	243	383	187
LOM	340	34	225	351	31
SLS(Nylon)	422	197	265	639	24
SLS(Polic.)	181	135	231	328	18
SLA (EOS)	53	25	77	151	15
SLA(QC)	79	21	205	190	13

Figura 3.2 Confronto tra gli errori medi di forma

Fonte: Gatto A., Iuliano L., “Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale”

3.3 Prestazioni in termini di rugosità superficiale

La rugosità delle superfici è misurata con un rugosimetro Hommel T1000 con una lunghezza di campionamento di 4.8 mm che valuta la rugosità sia lungo la direzione di crescita che normalmente.

Analizzando i dati raccolti nella tabella in figura 3.3 emerge come la tecnica migliore sia ancora la SLA mentre per altre tecniche come la SLS e FDM si rendono necessarie operazioni di finitura manuale o trattamenti di infiltrazione.

Anche la tecnica LOM presenta risultati soddisfacenti dovuti al ridotto spessore dei fogli di carta e all'operazione di verniciatura che riempie le porosità superficiali causate dal taglio laser e dalla rimozione del materiale di scarto.

Rif.	Tecnica	Ra ↑ (μm)	Ra → (μm)
1	SLA (3D) vin.	3,7	1,7
2	SLA (3D) ep.	1,5	1,3
3	SGC	9,8	5,0
4	FDM (P200)	4,0	2,4
5	FDM (P300)	11,0	1,2
6	FDM (ABS)	17	1,2
7	LOM	2,4	4
8	LOM	2,9	2,2
9	SLS (Nylon)	18,4	14,8
10	SLS (Polic.)	16,6	15,3
11	SLA (EOS)	1,8	1,1
12	SLA (3D Quick-Cast)	1,5	0,8

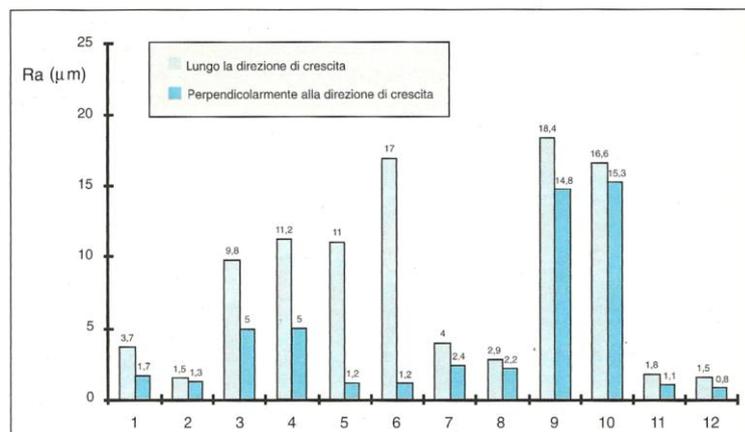


Figura 3.3 – Confronto tra le rugosità misurate

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

CAPITOLO 4

IL RAPID TOOLING

Un'importante applicazione industriale della prototipazione rapida è il rapid tooling (RT) o attrezzaggio rapido, un insieme di tecniche mirate alla costruzione in tempi brevi di attrezzature destinate alla realizzazione della pre-serie.

E' facile comprenderne l'importanza: in primo luogo la realizzazione di attrezzature per la produzione costituisce una delle fasi più lunghe e costose nello sviluppo di un nuovo prodotto; inoltre l'uso dei metodi tradizionali, pensati per volumi produttivi molto più grandi, è poco appropriato poiché i prodotti devono essere continuamente aggiornati per rispondere alle esigenze dei consumatori.

Questo contesto ha comportato un crollo nella durata del ciclo di vita del prodotto e nella consistenza quantitativa degli stock di produzione di alcuni prodotti.

Per essere competitivi sono dunque necessari processi in grado di poter consentire risparmi sia in termini economici sia di tempo nella costruzione delle attrezzature produttive.

Ovviamente l'attrezzatura prototipale non sarà sottoposta alle stesse sollecitazioni meccaniche e termiche che gli utensili definitivi dovranno sopportare durante tutto il processo ed assolveranno al loro compito solo se adoperati con le giuste precauzioni e per produttività limitata.

Questi metodi sono già esistenti e dipendono dall'esistenza di un modello campione del prodotto (master), sulla cui presenza e accuratezza non è sempre possibile contare.

Una soluzione può essere quindi quella di applicare le tecniche di prototipazione rapida che permettono di ottenere il master con i requisiti richiesti, infatti l'applicazione di queste tecniche sia in fase di sviluppo del prodotto che per la produzione degli utensili permette risparmi economici e di tempi sino al 70%.

I prototipi rapidi non sono propriamente idonei ad essere impiegati come master per la applicazioni di attrezzaggio rapido, devono prima subire dei trattamenti volti a ridurre la rugosità superficiale e a conferirne i requisiti indispensabili per il successivo impiego, ad esempio l'inserimento di angoli di spoglia, maggiorazione delle dimensioni per far fronte ai ritiri previsti e l'inserimento di dispositivi di colata. Con questi accorgimenti viene scongiurato il rischio dell'insorgere di eventuali problemi durante la successiva fabbricazione.

Le tecniche di attrezzaggio rapido possono essere classificate in :

- Tecniche dirette, dove la macchina RP produce direttamente l'attrezzatura;
- Tecniche indirette, dove il prototipo rapido subisce lavorazioni tradizionali per ottenere l'attrezzatura.

4.1 Tecniche dirette

Le tecniche dirette permettono di costruire l'attrezzatura idonea a produrre la pre-serie con le tecniche di prototipazione rapida. Alcuni esempi sono i seguenti:

- Inserti per stampi per l'iniezione della cera per ottenere modelli per microfusione;
- Inserti per stampi destinati all'iniezione, soffiaggio, termoformatura delle resine plastiche;
- Stampi per l'imbutitura della lamiera con la tecnologia della matrice elastica;
- Gusci per la microfusione;
- Forme ed anime per la fusione in sabbia.

Per inserti si intende la parte attiva dello stampo in cui avviene la colata vera e propria da installare in una struttura convenzionale di supporto, visti i limiti dimensionali delle aree di lavoro delle macchine RP e i tempi necessari di costruzione dei particolari.

I processi che garantiscono queste applicazioni sono le principali tecniche di prototipazione rapida come SLA, SLS, SGC e LOM che possono generare inserti per stampi da destinare all'iniezione della cera e il processo denominato *Direct Shell Production Casting* (DSPC).

Questa tecnica, commercializzata dalla Soligen Inc., permette la generazione di gusci ceramici per la microfusione.

Il modello CAD del pezzo viene elaborato dal software Soligen che genera la rappresentazione dello stampo in grado di produrre il pezzo.

A questo punto lo stampo viene creato con il processo di 3D Printing e può così essere colato al suo interno il metallo fuso. Una volta solidificato il metallo è possibile estrarre il pezzo ottenendo così il modello inizialmente disegnato al CAD.

4.2 Tecniche indirette

Le tecniche indirette sono precedenti alla diffusione della prototipazione rapida, tuttavia l'avvento di quest'ultima ne ha garantito il miglioramento.

I metodi indiretti più comuni sono i seguenti:

1. Stampi in silicone;
2. Spin casting;
3. Stampi in resina rigida;
4. Stampi in gesso;
5. Stampi in lega bassofondente;
6. Stampi ottenuti con il metal spraying;
7. Stampi ed elettrodi ottenuti per elettroformatura;
8. Modelli e casse d'anima per la fusione in terra;
9. Elementi per microfusione;
10. KeITool.

4.2.1 Stampi in silicone

E' una delle tecniche più comuni nella costruzione rapida di utensili che garantiscono la produzione di un numero limitato di particolari (da 5 a 50) in un materiale prossimo a quello da destinare alle verifiche funzionali, ovvero una resina siliconica flessibile che permette di ridurre i costi di gestione, di materiale, di manodopera e una consistente riduzione dei tempi.

Questi stampi presentano numerosi vantaggi:

- Resistenza termica e chimica tali da consentirne elevata durata;
- Precisione dimensionale garantita dal minimo ritiro volumetrico;
- Elasticità e resistenza alle lacerazioni;
- Morbidezza.

Per realizzare questi stampi si può partire dal prototipo costruito con le tecniche RP sul quale vengono inseriti gli sfiati, i canali di colata e viene individuato il piano di divisione. Il tutto viene posizionato in una cassetta di contenimento all'interno della quale viene colata la resina siliconica, opportunamente degassata.

Grazie alla gomma traslucida è facilmente individuabile il piano di divisione, si effettua quindi un taglio irregolare, che consente un successivo e perfetto accoppiamento per graffatura, e si estrae il modello.

Si realizzano in questo modo stampi flessibili e autodistaccanti che permettono la formatura di particolari molto complessi.

Per stampare i prototipi funzionali si posizionano gli stampi silicnici in una camera sottovuoto, vengono applicati i canali di colata, gli sfiati e può così iniziare la colata o l'iniezione della resina per la realizzazione di nuovi modelli.

4.2.2 Spin casting

Il processo di *spin casting* utilizza un silicone resistente alle alte temperature per realizzare stampi flessibili all'interno dei quali è possibile colare leghe leggere con temperature di fusione prossime ai 500°C.

Lo stampo si ottiene a partire da due dischi di silicone non vulcanizzato, si ricava l'alloggiamento del modello asportando manualmente una parte di silicone dove si inserisce il master di partenza.

A questo punto si chiude lo stampo che viene vulcanizzato mediante una pressa che fornisce anche il calore necessario; si crea così un'esatta riproduzione del modello.

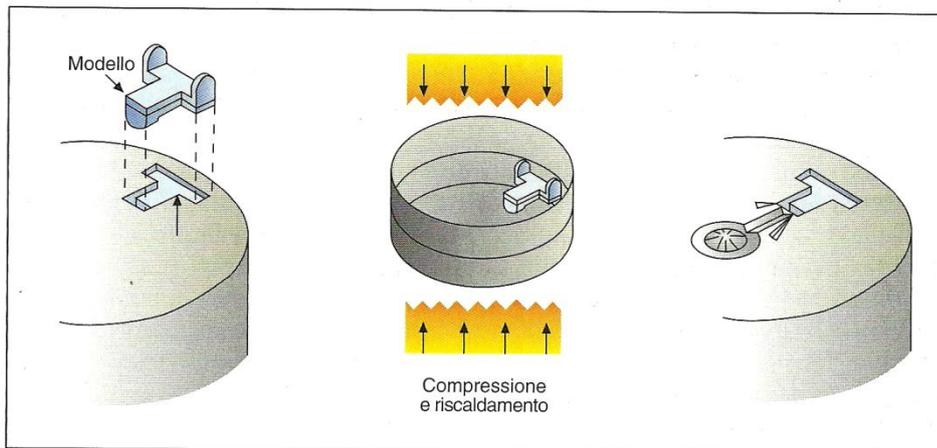


Figura 4.1 – Fasi del processo di spin casting, nell'ordine: preparazione stampo, vulcanizzazione silicone, completamento stampo

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

Terminata la vulcanizzazione, lo stampo viene aperto, il modello estratto ed è possibile ricavare i canali di colata, la materozza e gli sfoghi per l'aria.

Lo stampo è pronto e viene disposto in una centrifuga (velocità di rotazione variabile tra i 200 e i 1000 giri al minuto) per effettuare la fusione centrifuga che garantisce un'uniforme distribuzione del materiale.

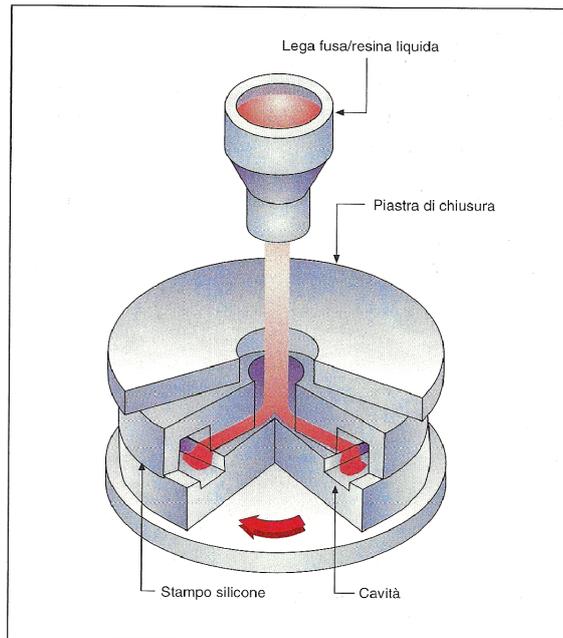


Figura 4.2 – Schema del processo di colata e riempimento dello stampo sotto l'azione della forza centrifuga nel processo di spin casting
 Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

4.2.3 Stampi in resina rigida

I sistemi che utilizzano resine additivate, in particolare quelle epossidiche, rappresentano le tecniche più diffuse per produrre utensili su piccola scala, uno dei principali motivi consiste nel fatto che sono realizzabili utensili relativamente grandi con investimenti in attrezzature praticamente trascurabili, anche se non presentano una buona resistenza alle alte temperature e alla conducibilità termica. Per ovviare a questi inconvenienti si stanno tuttavia studiando nuove resine additivate in grado di prolungarne la durata.

4.2.4 Stampi in gesso

Dal modello prodotto con le tecniche RP vengono ricavate delle copie in gomma siliconica che verranno utilizzate in seguito per la realizzazione di stampi a perdere in gesso all'interno dei quali verrà colato il metallo fuso. Il modello in gomma viene sistemato all'interno di un contenitore dove verrà colato il gesso fino ad un livello prestabilito per consentire il deposito di un distaccante sulla parte di gesso indurita per poi continuare la colata della seconda metà dello stampo. Quando lo stampo è solidificato le parti vengono separate e il modello rimosso. A questo punto è possibile ricomporre le due metà ed effettuare la colata di metallo fuso per ottenere l'elemento metallico. Ultimata la colata e solidificato il pezzo, il gesso viene rotto per estrarre il particolare.

4.2.5 Stampi in lega bassofondente

Per questi stampi vengono utilizzate leghe a basso punto di fusione, al massimo 300°C, che vengono colate in maniera del tutto analoga a quanto avviene per la realizzazione degli stampi al silicone o in resina rigida.

La maggior parte delle leghe bassofondenti contiene bismuto, un materiale che ha la proprietà di espandersi del 3.3% alla solidificazione. Calibrando quindi la composizione è possibile produrre una gamma di leghe che fondono tra i 20°C e 330°C sostanzialmente insensibili al ritiro.

Grazie ai bassi punti di fusione, queste leghe possono essere impiegate con i materiali più sensibili al calore, si fondono in acqua calda e sono di facile manipolazione. Vista la loro bassa o nulla dilatazione sono in grado di riprodurre perfettamente i dettagli della superficie e possono essere colate su modelli ricavati da quasi tutti i materiali compresi quelli derivanti dalle tecniche RP.

L'uso di queste leghe è vantaggioso poiché presentano un costo basso, sono riutilizzabili, non richiedono di finiture, non presentano ritiro volumetrico, sono di semplice utilizzo e necessitano di un unico modello per la costruzione dei stampi.

4.2.6 Stampi ottenuti con il metal spraying

Il metal spraying consiste nello spruzzare metallo fuso direttamente sul prototipo, previa la deposizione di un distaccante, formando un rivestimento superficiale che dà origine allo stampo.

Il materiale fuso viene ottenuto con un sistema di spruzzatura ad arco, la testa dello spruzzatore viene alimentata da due bobine di filo metallico, le cui punte formano due elettrodi e al cui interno si fa passare una corrente elettrica, si ottiene così un arco elettrico che fonde le estremità metalliche.

Un getto d'aria atomizza le particelle fuse, che vengono accelerate e colpendo la superficie del modello solidificano formando una copertura superficiale.

Il processo viene iterato finché non si ottiene un guscio metallico spesso alcuni millimetri, che essendo poco resistente viene rinforzato con resina epossidica caricata da particelle metalliche per aumentarne la conducibilità termica.

Questo metodo ha il pregio di essere molto rapido, tuttavia comporta una certa difficoltà nella finitura delle superfici dello stampo, l'impossibilità di eseguire lavorazioni meccaniche e la scarsa durata degli stampi a causa della fragilità del materiale depositato.

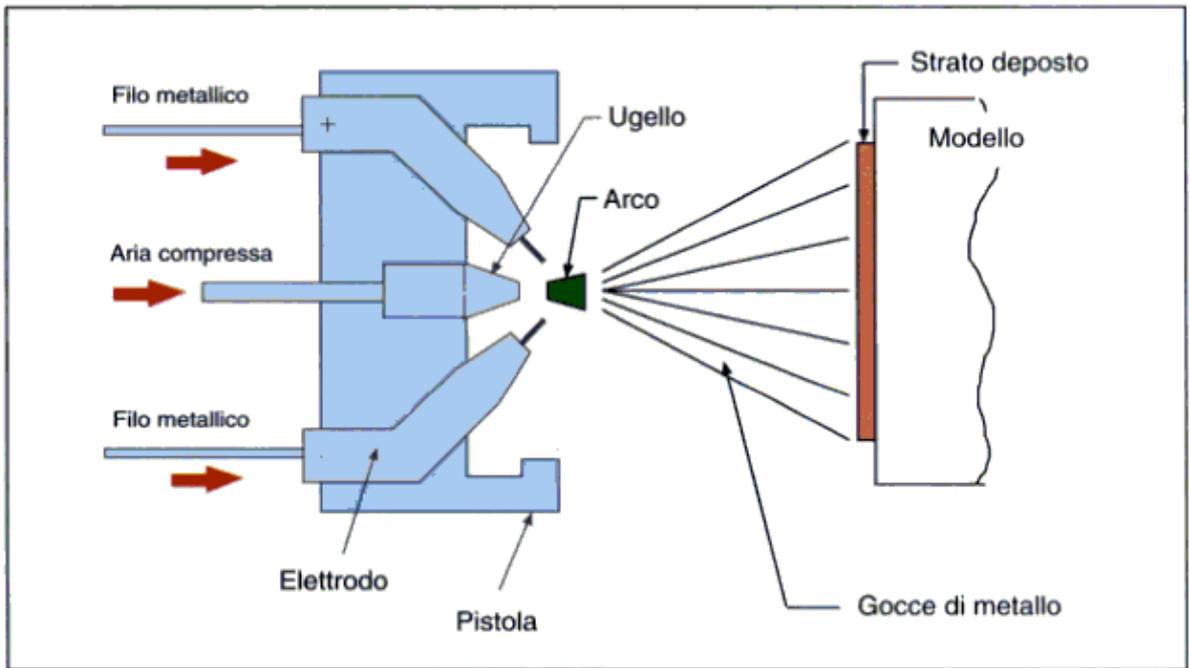


Figura 4.3 – Schematizzazione del processo di metal spraying
 Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

4.2.7 Stampi ed elettrodi ottenuti per elettroformatura

L'elettrodeposizione è nota industrialmente per la capacità migliorare la qualità delle superfici tramite la deposizione per via galvanica di un sottile strato di cromo o nichel; lo stesso metodo può essere anche usato per il ricoprimento a spessore di un master ottenuto con le tecniche RP raggiungendo spessori di qualche millimetro, sufficienti a garantire ottime prestazioni meccaniche del guscio prodotto.

Il metodo prevede il ricoprimento del master con una vernice conduttiva, l'inserimento dello stesso nel bagno galvanico e l'elettrodeposizione a spessore di uno strato di metallo.

Il guscio metallico così ottenuto può essere usato per la realizzazione di inserti per stampi per materie plastiche, punzoni per l'imbutitura ed elettrodi per l'elettroerosione a tuffo nel caso in cui il materiale depositato sia il rame.

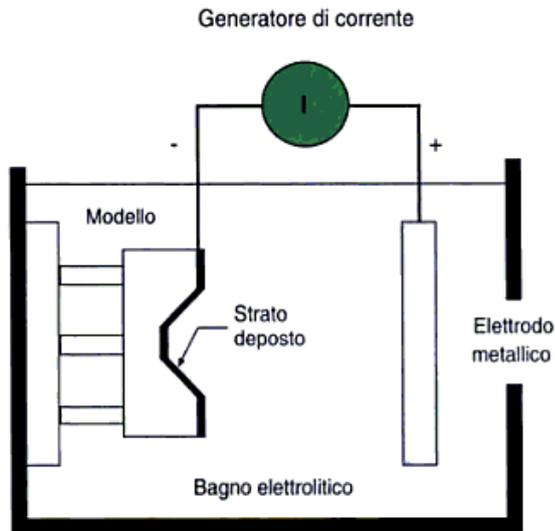


Figura 4.4 – Schema del processo di elettrodeposizione

Fonte: Gatto A., Iuliano L., “Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale”

4.2.8 Modelli e casse d'anima per la fusione in terra

Questo processo, dalle origini antiche richiede un modello o una placca modello dove si siano già ricavati i canali d'alimentazione, la materozza e le casse d'anima. L'introduzione delle tecniche RP permette la realizzazione dei modelli, placche modello e casse d'anima in tempi molto ridotti.

4.2.9 Elementi per microfusione

La microfusione, o fusione a cera persa, è un procedimento antico che necessita di un modello a perdere in cera avente la stessa forma dell'oggetto finale da produrre. Il processo consiste nella realizzazione del modello in cera e la formazione di un grappolo contenente più modelli per avere maggior produttività. Il tutto viene immerso in un bagno di materiale refrattario, contenente silice, leganti e acqua, finché non viene generata una conchiglia dello spessore tra i 5 e i 10 mm. La cera presente all'interno viene evacuata in autoclave alla temperatura variabile tra i 90 e i 280°C, a questo punto è possibile colare la lega fusa all'interno della conchiglia e una volta solidificato il modello lo si estrae con la rottura della stessa. L'utilizzo della prototipazione rapida si inserisce nella fabbricazione del modello iniziale riducendo i tempi di costruzione della conchiglia di un periodo di tempo anche nell'ordine delle settimane.

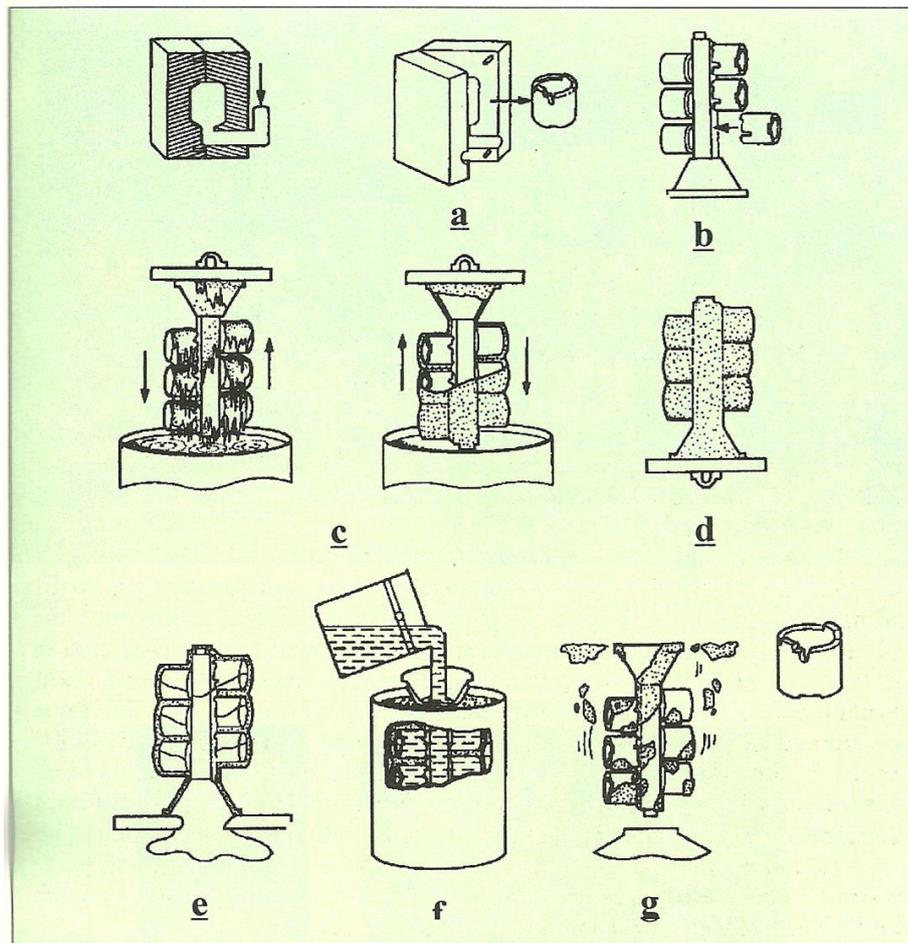


Figura 4.5 – Schema del processo di microfusione: a) costruzione del modello in cera; b) preparazione dei grappoli; c) realizzazione della conchiglia; d) evacuazione della cera; e) essiccazione della conchiglia; f) colata del metallo; g) rottura del guscio.

Fonte: Gatto A., Iuliano L., "Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale"

4.2.10 KeITool

Il processo KeITool è una tecnica sviluppata per la produzione di attrezzatura destinata alla realizzazione di decine di migliaia di pezzi nel materiale definitivo con tolleranze dimensionali, rugosità delle superfici e durezza del tutto confrontabili con uno stampo di produzione in acciaio.

Il punto di partenza è costituito dalla matrice e dal punzone, realizzati in stereolitografia.

La qualità del punzone e della matrice condiziona quella degli inserti finiti, pertanto la costruzione deve avvenire con una macchina estremamente precisa così come è necessaria una finitura accurata per eliminare l'effetto staircase e il facetting.

Le fasi del processo KelTool vero e proprio sono:

- produzione di una replica siliconica precisa e temporanea;
- riempimento della cavità con una miscela costituita da polvere metallica e legante;
- estrazione dopo opportuno trattamento della matrice metallica dallo stampo in silicone temporaneo;
- sinterizzazione della parte ed infiltrazione di rame per aumentare la densità dell'elemento;
- esecuzione di eventuali trattamenti termici;
- ripresa alla macchina utensile dei bordi prima dell'inserzione nella base stampo.

Il KelTool riunisce la prerogativa di un processo di prototipazione rapida pur conducendo ad uno stampo molto prossimo a quello di definitivo di produzione.

CONCLUSIONI

Quando alla fine degli anni Ottanta la 3D Systems presentò la sua prima macchina per la stereolitografia si diffuse una sorta di euforia che ha portato a pensare che le potenzialità delle tecnologie di prototipazione rapida fossero praticamente illimitate. Ben presto ci si rese conto dei limiti che queste tecniche presentavano in termini di accuratezza dimensionale, rugosità e proprietà meccaniche, ancora lontane da quelle ottenute con le tecnologie di lavorazione convenzionali.

Ciò nonostante è stato possibile trovare la giusta collocazione delle tecniche RP, ovvero esse costituiscono un metodo base nel ciclo di sviluppo prodotto.

Attualmente lo sviluppo delle tecniche RP si trova in una fase in cui si è reso relativamente semplice l'impiego delle macchine, la qualità dei prodotti è molto migliorata rispetto agli inizi, è disponibile un'ampia varietà di materiali utilizzabili e sono ben noti i limiti d'impiego dei prototipi nel settore del rapid tooling.

L'industria sviluppatasi dietro alla prototipazione rapida sta vivendo un periodo di forte crescita in tutto il mondo, i principali paesi industrializzati del mondo vi sono coinvolti e vedono questa tecnologia entrare nei principali settori industriali.

La prototipazione rapida è un punto focale di centinaia di programmi di ricerca che vedono l'impiego di ingenti risorse economiche e finanziarie, in numerosi centri di ricerca.

Questi programmi sono mirati soprattutto alla ricerca di nuovi materiali, allo sviluppo di software in grado di risolvere le problematiche di interfacciamento e allo sviluppo del settore del rapid tooling.

Da indagini dell'americana Wholer's emerge come il mercato della prototipazione rapida abbia registrato una continua crescita concentrata soprattutto negli anni Novanta mentre attualmente la crescita continua sebbene con un tasso di crescita inferiore ai decenni scorsi.

Le motivazioni che portano le aziende ad adottare le tecniche di prototipazione rapida sono le seguenti:

- le trasformazioni avvenute nel mercato dagli anni Settanta agli anni Novanta, i cambiamenti consistono nella crescita della complessità e delle varianti di prodotto richieste dai clienti e nella diminuzione della durata del ciclo di vita del prodotto e dei suoi tempi di consegna;

- il costo del ciclo di sviluppo di un nuovo prodotto cresce esponenzialmente al procedere dello sviluppo stesso, pertanto le tecniche RP si inseriscono ottimamente nella fase di progettazione consentendo di rivedere errori che altrimenti con le tecniche tradizionali sarebbero emersi soltanto alla fine, con notevole spreco di tempo e risorse;
- un ritardo di alcuni mesi nell'immissione sul mercato di un nuovo prodotto determina una perdita degli utili del 30%, mentre un incremento del 50% dei costi di sviluppo causa una perdita trascurabile, è risultata quindi una scelta vincente quella di alcune aziende hanno investito per dotarsi di tecniche RP per poter raggiungere il mercato prima dei concorrenti;
- i tempi di sviluppo dei prototipi tradizionali e degli stampi sono troppo elevati.

Per tutti questi motivi è evidente che la possibilità di abbattere i tempi e costi per la costruzione dei prototipi con le tecniche RP porta benefici all'azienda sia in termini di time to market che di incremento di quote di mercato.

BIBLIOGRAFIA

- Gatto A., Iuliano L., 1998, Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale, Tecniche Nuove, Milano.
- Chua C.K., Leong K.F, Lim C.S., 2003, Rapid prototyping: Principles and applications, second edition, New Jersey: World Scientific.
- Chua C.K., Leong K.F, Lim C.S., 2010, Rapid prototyping: Principles and applications, third edition, New Jersey: World Scientific.
- Kalpakjian S., Schmid S.R., 2008, Tecnologia Meccanica, quinta edizione, Pearson Paravia Bruno Mondadori, Milano.

SITI CONSULTATI

- Associazione Italiana Prototipazione Rapida (<http://www.apri-rapid.it/>).