

## Capitolo 14

Per determinare gli stati di sollecitazione o di deformazione di un componente meccanico abbiamo visto come esiste un metodo analitico, basato su equazioni di equilibrio e su equazioni di congruenza. Quando si devono studiare strutture complesse, o organi di macchine, in cui la forma geometrica e le condizioni di carico sono troppo complesse per poter utilizzare procedimenti analitici, è necessario ricorrere al Metodo degli Elementi Finiti (FEM) basato sull'uso del calcolatore. Il corpo (sistema continuo, composto da elementi di dimensioni infinitesime) di cui si studia la deformazione o lo stato di sollecitazione viene suddiviso in un certo numero di elementi di dimensioni finite (*discretizzazione*), interconnessi attraverso i nodi, che garantiscono la continuità fisica del corpo stesso. In questo modo gli infiniti gradi di libertà del continuo viene reso discreto con un insieme finito di elementi ottenendo un sistema di equazioni algebriche (o differenziali) con un numero finito di incognite risolubili se si dispone di una adeguata capacità di calcolo. La discretizzazione fatta deve tener conto delle discontinuità geometriche, delle discontinuità del materiale, delle condizioni al contorno e delle forze applicate alla struttura.

Un modello FEM per analisi strutturale può essere realizzato con differenti tipi di elementi; sul mercato si trovano un gran numero di codici commerciali che hanno come base lo stesso principio (cioè gli elementi finiti) ma possono presentare notevoli differenze tra loro. Possono essere:

- di uso generale (NASTRAM e ANSYS): hanno la possibilità di analizzare un gran numero di processi molto diversi tra loro (calcolo delle strutture nel campo elastico, propagazione del calore, processi di lavorazione plastica dei metalli, processi per materiali plastici, fluidodinamica, campi elettromagnetici ...);
- specializzati per applicazioni particolari.

Rispetto alla sperimentazione diretta, la **simulazione** ha il vantaggio della grande versatilità, della velocità di realizzazione e del costo relativamente basso. La simulazione (imitazione della realtà) è un insieme di metodi attraverso i quali si può costruire un modello che possa rappresentare uno o più aspetti di un fenomeno noto e si può studiare nella sua evoluzione nel tempo simulando diverse condizioni al contorno. La simulazione consente di prevedere situazioni future, di provare rapidamente scelte progettuali alternative e modellare sistemi anche di grandissima complessità studiandone il comportamento e l'evoluzione nel tempo. Si distingue in:

- **simulazione analogica**: costruzione artificiale di modelli di un dato sistema che verranno studiati in relazione ad una determinata caratteristica:

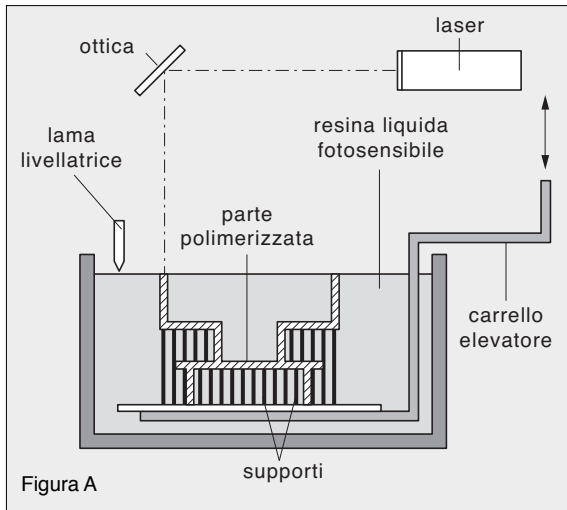
- aerei da sottoporre a particolari esperimenti di aerodinamica;
- automobili da sottoporre a crash test;
- fabbricati da sottoporre a test di scosse telluriche;
- rete elettrica per l'analisi dinamica delle variazioni del carico delle varie utenze;
- rete idraulica per analizzare gli effetti di un possibile evento di contaminazione;

- **simulazione numerica**: il modello preso in esame viene rappresentato da elementi numerici e da operazioni sugli stessi; consente di realizzare modelli artificiali ma concreti (cioè immagine della realtà). I più famosi sono: i metodi di Montecarlo, il PERT (Program Evaluation and Review Technique), il CPM (Critical Path Method).

La **prototipizzazione rapida** (o RP dall'inglese Rapid Prototyping) è una tecnologia il cui punto di forza sta nella possibilità di realizzare in tempi ridottissimi e senza utilizzare utensili, prototipi (*primo elemento*) di oggetti, indipendentemente dalla loro forma e dalla loro complicazione geometrica, partendo dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD tridimensionale.

Diversamente dalle tecniche tradizionali di lavorazione meccanica, che operano per asportazione di materiale, le tecniche RP operano per addizione di materiale, costruendo l'oggetto con l'aggiunta, strato per strato, di materiale. Si parla di *layered manufacturing* (fabbricazione stratificata). I materiali possono essere di volta in volta costituiti da liquidi, polveri, o solidi (fili o laminati) che, strato dopo strato, ricostruiscono l'oggetto che rappresenta il modello matematico di partenza. Secondo il materiale usato, le tecnologie possono essere le seguenti:

- nel caso di materiale liquido:
  - **Stereolitografia (SLA - StereoLitographic Apparatus)**: è basata sulla fotopolimerizzazione di una resina liquida sensibile alla radiazione emessa da una sorgente laser che investe il pelo libero della resina liquida con un sistema di prismi e specchi e fa solidificare la zona voluta (figura A). Al termine di questa fase una lama livellatrice rende uniforme il piano solido che viene poi abbassato, tramite il carrello elevatore, di una quantità pari allo spessore di resina solidificata ( $0,1 \div 0,4$  mm), e successivamente ricoperto con nuova resina. Il procedimento continua finché si ottiene, strato per strato (dal basso verso l'alto), il prototipo. Se l'oggetto da costruire ha forme particolari si devono integrare nel progetto dei supporti per il sostegno del modello, che vengono poi rimossi al termine della lavorazione. Il trattamento di finitura comprende un'esposizione a una lampada a raggi



ultravioletti, per completare il processo di fotopolimerizzazione. I materiali utilizzati possono essere fotopolimeri epossidici o acrilici, o resine: tutti devono avere elevata reattività alla radiazione laser, bassa volatilità, tossicità e ritiro;

- **Solid Ground Curing (SGC):** per eliminare i principali inconvenienti della stereolitografia (utilizzo dei supporti e il post-trattamento per la solidificazione finale) si utilizza una lampada a raggi ultravioletti che permette l'indurimento contemporaneo dell'intera sezione. Il processo è:
  - sulla tavola si deposita un sottile strato di resina;
  - il software riporta il disegno su una lastra di vetro in modo tale che la sezione sia trasparente ai raggi UV e il resto sia opaco;
  - la lastra di vetro si posiziona sopra la resina, e la lampada UV si accende, indurendo il polimero nella sezione disegnata;
  - la resina rimasta liquida viene aspirata e sostituita da uno strato di cera fusa che viene fatta solidificare;
  - lo strato viene fresato;
  - l'elevatore abbassa della quantità dello spessore costruito e si ricomincia;
  - si recupera il prototipo eliminando la cera dal risultato finale con acqua calda e acidi.

Gli svantaggi rispetto alla stereolitografia sono: perdita di materiale (polimero liquido misto a cera) e complessità del macchinario;

- **Multi Jet Modelling (MJM):** è basata sulla stampa in 3D di termopolimeri a basso punto di fusione, con deposito successivo di materiale attraverso una testina di stampa che crea sia il prototipo che i relativi supporti. Rappresenta una tecnica di RP abbastanza veloce e poco costosa, concepita per produrre in modo rapido modelli concettuali con la stessa facilità con la quale una stampante produce immagini bidimensionali. Ha le stesse dimensioni di una grossa fotocopiatrice;

- **Drop On Demand (DOD):** si basa sullo stesso principio della precedente ma le testine di stampa sono due: la prima deposita gocce micrometriche di materiale termoplastico per la costruzione del modello e la seconda una cera per la costruzione di eventuali supporti di parti a sbalzo. Il polimero termoplastico solidifica al contatto con lo strato precedentemente depositato e con una fresa si provvede a spianare lo strato appena depositato. Il metodo produce modelli con buone caratteristiche di rugosità e precisione dimensionale ma richiede molto tempo;

- nel caso di materiale solido:
  - **Fused Deposition Modeling (FDM):** ciascuna sezione del prototipo viene realizzata mediante la deposizione di un polimero termoplastico mediante un ugello di estrusione:
    - la testina di estrusione deposita il filo allo stato fuso muovendosi nel piano x-y;
    - la temperatura di estrusione è tale che lo strato, appena depositato, si unisce stabilmente alla sezione inferiore prima posata;
    - una volta realizzati i perimetri interni ed esterni della sezione, essi vengono collegati con un certo numero di nervature, per aumentare la resistenza meccanica del prototipo;
    - dopo che una sezione è stata costruita il piano di lavoro si abbassa e il ciclo ricomincia;
  - **Laminated Object Manufacturing (LOM):** si basa sull'incollaggio progressivo di fogli di carta (pre-rivestita da un lato con polietilene per realizzare l'incollaggio allo strato precedente) e sul loro successivo taglio con un raggio laser. È una tecnologia lenta, imprecisa, i prototipi deperiscono e non è adatta per prototipi che presentano cavità; è idonea a costruire prototipi di grandi dimensioni in tempi ridotti;
- nel caso di materiale in polvere:
  - **Selective Laser Sintering (SLS):** questa tecnica si basa sulla sinterizzazione mediante raggi laser di polveri (metalliche, polimeriche o sabbia):
    - uno strato di polvere viene depositato da un rullo;
    - la radiazione laser sinterizza la polvere;
    - l'elevatore si abbassa dello spessore dello strato ed il processo riprende.

Tale metodo non necessita di alcun tipo di supporto; il particolare finito viene estratto e pulito dalla polvere non sinterizzata. I prototipi in materiali metallici o ceramici subiscono un trattamento termico che ne incrementa le caratteristiche meccaniche;

- **Selective Laser Melting (SLM):** rappresenta una variante rispetto alla SLS (non si ha sinterizzazione ma fusione), necessita di un'energia da fornire maggiore e di una sorgente laser di potenza elevata. Il prototipo che si ottiene ha densità elevata e caratteristiche metallurgiche analoghe a

quelle ottenibili con i processi di produzione tradizionali;

- **Three Dimensional Printing (3DP)**: si basa sull'incollaggio di strati di polvere; è quindi una tecnica simile alla SLS ma le polveri, anziché essere sinterizzate, vengono mantenute insieme da un collante spruzzato con la tecnica della stampa a getto d'inchiostro.

Per *attrezzaggio rapido* (o *rapid tooling*, acronimo

RT) si intende quell'insieme di tecniche mirate alla costruzione in tempi brevi di attrezzature destinate alla produzione della pre-serie. Le tecniche sono:

- indirette: si combina il prototipo rapido con processi convenzionali per ottenere l'attrezzatura;
- dirette: la macchina RP produce direttamente le attrezzature;
- *oft tooling* (stampi leggeri): poche decine di pezzi;
- *hard tooling* (stampi rigidi): migliaia di pezzi.