

Riduzione dei tempi ciclo, maggiore precisione di lavorazione, abbattimento dei costi, aumento delle performance consentono di ottenere miglioramenti complessivi anche oltre il 20% sulla macchina, attraverso l'uso di materiali innovativi.

L'OTTIMIZZAZIONE MULTIDISCIPLINARE E I MATERIALI INNOVATIVI NUOVI DRIVER TECNOLOGICI PER LE MACCHINE DEL FUTURO.

L'attività di R&D dei costruttori di macchine utensili è sempre più orientata verso una sostanziale innovazione e verso un continuo miglioramento delle prestazioni del prodotto. I materiali innovativi e l'ottimizzazione multidisciplinare rivestono un ruolo rilevante nel determinare la precisione, la produttività e l'economicità di una macchina raggiungendo, in molti casi, risultati migliori rispetto alle macchine realizzate con materiali tradizionali.

Giuseppe Sterlino *

Maria Papariello *

Giuseppe Gori *

* Sintesi SCpA

Le aziende utilizzatrici di macchine utensili chiedono sempre più ai propri costruttori la diminuzione dei tempi ciclo, la crescita della precisione di lavorazione, l'abbattimento dei costi. Per rispondere a queste esigenze e soddisfare le richieste dei propri clienti, il costruttore deve cercare di indirizzare le proprie attività di Ricerca e Sviluppo verso una sostanziale innovazione e verso il continuo miglioramento delle prestazioni del prodotto.

In questo contesto i materiali innovativi, rivestono un peso rilevante nel determinare la precisione, la produttività e l'economicità di una macchina.

A seguito delle peculiarità che li caratterizzano, i materiali non convenzionali richiedono però l'impiego di criteri di progettazione differenti rispetto a quelli utilizzati per i materiali tradizionali come per esempio acciaio o alluminio. In presenza di materiali innovativi, infatti, è necessario procedere alla ri-progettazione del componente rivisitandone la forma senza mutare le interfacce con altri componenti.

Questo processo, apparentemente lungo e complesso, può essere velocizzato impiegando procedure automatizzate di progettazione che si basano sull'ottimizzazione multidisciplinare, come quelle illustrate nei paragrafi successivi.

Attraverso la MDO (Multi Disciplinary Optimization), metodologia importata da settori ad alto contenuto tecnologico, quali automotive ed aerospace, è infatti possibile trarre vantaggi sempre crescenti dall'introduzione di materiali non convenzionali nel settore dei sistemi di produzione. In questo modo si riesce a fondere l'esperienza del settore specifico dei sistemi di produzione con le più

moderne metodologie CAE, consentendo così di offrire ai propri clienti un prodotto con performance più elevate e a costi ridotti.

Quando si parla di MDO è bene precisare che esistono diverse tecniche fortemente dipendenti dalle caratteristiche del materiale che si vuole impiegare e dai vincoli e obiettivi progettuali.

In particolare, le tecniche utilizzate nei Case History presentati di seguito riguardano l'ottimizzazione topologica e di design utilizzate per l'impiego di due materiali innovativi: il calcestruzzo polimerico e i compositi polimerici rinforzati in fibra di carbonio: i c.d. CFRP.

MDO: metodologia indispensabile nella progettazione con materiali non convenzionali

In passato numerosi costruttori di macchine hanno commissionato o svolto studi di fattibilità e/o prototipazioni che prevedevano l'impiego di nuovi materiali. Tuttavia questi non hanno evidenziato risultati molto favorevoli dal punto di vista economico-industriale: le scelte tecniche effettuate, hanno infatti condotto alla progettazione di componenti e alla costruzione di prototipi la cui produzione industriale avrebbe comportato costi eccessivi. Per questo motivo tali componenti non sono mai stati commercializzati.

Attraverso la MDO possono invece essere analizzati, allo stesso tempo, dati di stress e/o deformazione insieme a dati economici. E' così possibile tenere conto, nella progettazione di una struttura, non solo delle caratteristiche meccaniche

ma anche dei vincoli economici consentendo in tal modo di avere soluzioni progettuali industrialmente valide.

Le metodologie più diffuse in questo ambito sono l'ottimizzazione topologica e quella di design.

L'ottimizzazione topologica individua la forma che il componente deve avere affinché si raggiunga la prestazione desiderata utilizzando il minimo contributo di materiale. A tal fine viene richiesto di definire un volume di lavoro, dettato dalle dimensioni massime nelle tre direzioni che si vuole possedga il componente da riprogettare, all'interno del quale viene distribuito il materiale secondo i criteri di ottimizzazione. Fissati quindi gli ingombri volumetrici e gli obiettivi prestazionali, si procede alla costruzione di un modello "dettagliato" degli elementi finiti (attraverso FEM Analysis) dei componenti strutturali della macchina e, utilizzando un processo iterativo, si individua la migliore distribuzione del materiale, quindi della massa, all'interno del volume a disposizione.

L'ottimizzazione di design racchiude quella che in letteratura è meglio conosciuta come ottimizzazione di "shape" e ottimizzazione di "size". È usata in quei componenti per i quali la topologia non può essere soggetta a variazioni macroscopiche ma sia possibile invece incidere su variabili micro quali ad esempio gli spessori di parete.

Questo tipo di ottimizzazione inizialmente veniva impiegata nella parte conclusiva del ciclo di progettazione di un componente per determinare il valore finale degli spessori/dimensioni del componente stesso. Con l'introduzione dei materiali compositi in applicazioni strutturali, è divenuta uno strumento fondamentale fin dalle prime fasi della progettazione, dove non è tanto la forma ad essere soggetta ad ottimizzazione quanto, piuttosto, la sequenza di laminazione delle fibre e il tipo di fibre da usare il cui mix può generare componenti dalle caratteristiche meccaniche profondamente differenti.

Basamento in calcestruzzo polimerico

Il calcestruzzo polimerico, o quarzo sintetico, è un materiale composto da elementi minerali inerti come ghiaia, sabbia di quarzo, farina di pietre e da un legante costituito da una resina opportuna, generalmente acrilica, epossidica o poliesteri (vedi Fig.1).

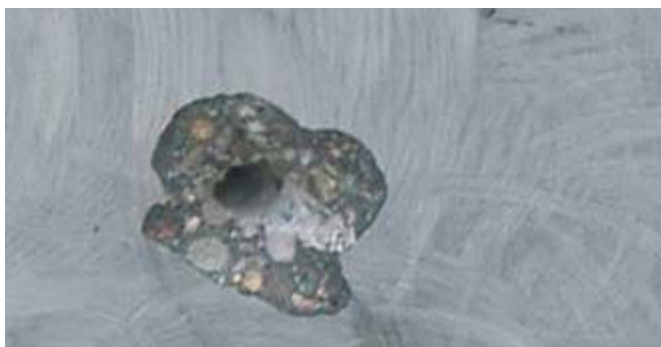


Fig.1 Particolare di un pezzo costruito con cemento polimerico nel quale sono visibili i componenti solidi (gli inerti) intorno ai quali si distribuisce il legante (in questo caso una resina)

il calcestruzzo polimerico è un materiale utilizzato già da tempo nel settore dei sistemi produttivi.

Infatti, molte sono le proprietà per le quali questo materiale può essere utilizzato in maniera vantaggiosa per componenti di macchine:

- minor costo del materiale,
- minor costo di produzione (dovuto a bassi tempi di lavorazione),
- superiore capacità di smorzamento: le vibrazioni con una frequenza superiore ai 50 Hz vengono ridotte all'incirca 6 volte più velocemente che in ghisa grigia GG25 ed all'incirca da 8 a 10 volte più velocemente che in strutture di acciaio; le qualità di smorzamento vengono mantenute a lungo,
- elevata finitura superficiale del pezzo prodotto (fino a 0.01 mm) che consente l'impiego senza ulteriori operazioni di finitura,
- buona stabilità termica,
- riciclabilità.

Malgrado queste proprietà, il suo utilizzo non è ancora una consuetudine consolidata: se da un lato infatti il suo impiego al posto dell'acciaio consente un notevole risparmio dei costi di produzione e del materiale, dall'altro il calcestruzzo polimerico ha caratteristiche di rigidità inferiori.

Per poter progettare un componente con questo materiale, Sintesi ha compiuto interventi di ottimizzazione topologica in grado di indicare la strategia migliore di utilizzo del materiale ottenendo un aumento del rapporto costo/prestazioni.

Più precisamente ha realizzato per un'azienda leader nel settore della produzione di macchine utensili, il re-design di un basamento di una macchina precedentemente costruito in acciaio.

La progettazione ha tenuto conto di alcuni vincoli tecnologici imposti dal fornitore del componente in un'ottica di co-design:

- 1) Direzione preferenziale da cui iniettare il materiale (da impostare per ogni zona di design);
- 2) Simmetria da usare insieme, o in alternativa, al vincolo direzionale.

A questo punto, tenendo conto dell'ingombro massimo del basamento, nonché dei vincoli progettuali fortemente restrittivi (come ad esempio il mantenimento della distanza tra le guide), si è costruito dapprima il modello CAD, poi si è proceduto alla definizione del modello FE e alla modellazione di vincoli ed obiettivi. Infine si è giunti al calcolo di ottimizzazione topologica.

Il procedimento di calcolo utilizzato ha fornito indicazioni tridimensionali su come disporre il materiale al fine di raggiungere gli obiettivi prestazionali prefissati riducendo al minimo la massa di materiale impiegato. Partendo da un volume di elementi FEM e a seguito dell'ottimizzazione, il software indica in rosso le zone dove deve essere presente il materiale, in blu quelle

dove il materiale deve essere rimosso in quanto inutile al raggiungimento delle performance richieste (Fig. 2).

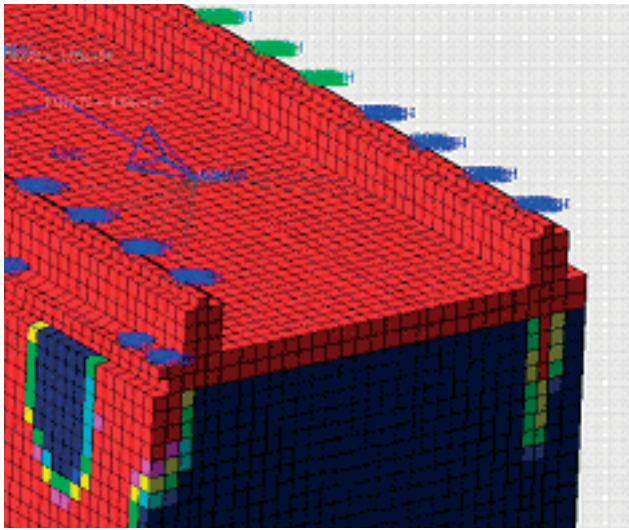


Fig. 2 Particolare del basamento dopo l'ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica del componente, attraverso una redistribuzione del materiale, consente di aggiungere al vantaggio economico dell'utilizzo del calcestruzzo polimerico, un vantaggio strutturale.

A valle di tali indicazioni fornite dall'analisi è stato possibile, da parte del progettista, procedere ad una post-ottimizzazione definendo i dettagli del componente riprogettato ed eliminando le zone a bassa densità.

In questo modo, ottimizzando un materiale sette volte meno rigido dell'acciaio, si è riusciti ad ottenere una riduzione dei costi pari al 30% e il mantenimento a valori stabiliti delle performance richieste in termini vibrazioni e di cedimenti statici (40 micron).

Asse Verticale di una macchina utensile in laminati di CFRP

Tra i materiali candidati a sostituire i metalli negli elementi strutturali mobili, i più promettenti sono i compositi a matrice plastica rinforzati con fibre di carbonio: i Carbon Fiber Reinforced Polymer che associano elevate proprietà meccaniche ad una bassa densità e ad un'apprezzabile resistenza chimica. Per la maggior parte delle applicazioni, i compositi sono in grado di soddisfare i più stringenti requisiti di rigidità e stabilità dimensionale, purché lo studio della soluzione ottimale sia effettuato sulla base di un'approfondita conoscenza dei parametri che influiscono sul comportamento del materiale.

I materiali compositi sono costituiti da due componenti: la matrice, in questo caso una resina, e il rinforzo, in questo caso le fibre di carbonio. Il rinforzo, è solitamente costituito da fibre (vetro, carbonio, boro, kevlar, ecc...) immerse all'interno di una matrice che serve a mantenerle insieme e dalla cui compattezza discende gran parte delle elevate caratteristiche meccaniche del materiale.

Usualmente le fibre e la matrice vengono impiegate per dare vita a lamine di materiale composito dello spessore di alcuni decimi di mm. (Fig. 3)

Potendo disporre le fibre lungo una qualunque direzione all'interno della lamina, è possibile ottenere l'anisotropia controllata, ulteriore caratteristica dei materiali compositi CFRP. Nota a priori la direzione del carico che verrà applicato, è cioè possibile disporre le fibre in maniera tale che la lamina abbia caratteristiche meccaniche maggiori proprio nella direzione di applicazione del carico, da qui l'attributo 'direction-specific' dato al CFRP.

Questo comporta il vantaggio di riduzione della quantità di materiale inutilizzato nelle direzioni in cui il carico è nullo o trascurabile.

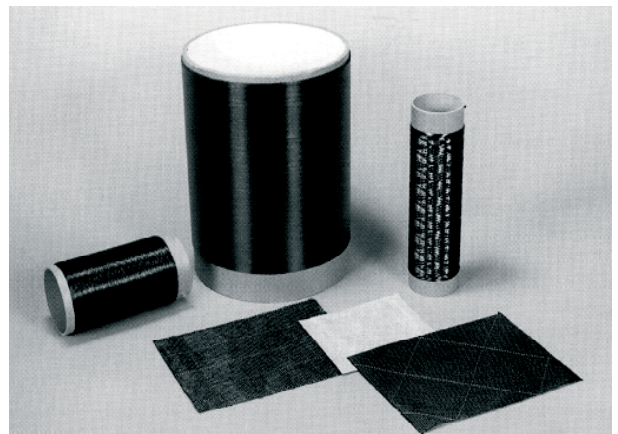


Fig. 3 Rotoli di fibre di carbonio e strati di materiale (CFRP) pre-impregnato

La realizzazione di un manufatto composito di qualità dipende soprattutto dal progettista e dal fornitore. Solo una forte interazione tra i due, infatti, può permettere di ottenere un componente ottimizzato di cui può essere realizzata una produzione industriale di piccola/media serie.

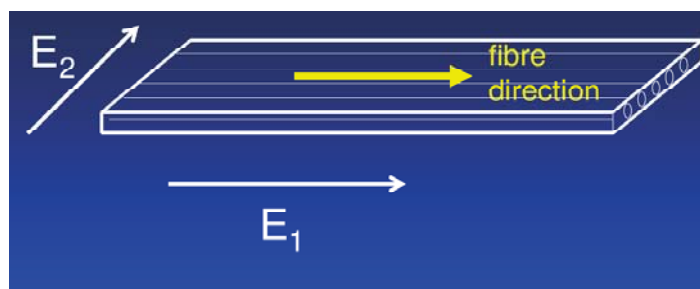


Fig. 4 Lamina unidirezionale con evidenziazione della direzione delle fibre (freccia in giallo); E_1 e E_2 indicano dove vengono rilevate le proprietà caratteristiche del composito.

Le proprietà fisico-meccaniche dei materiali CFRP variano entro campi molto ampi semplicemente agendo sul materiale usato come matrice, su quello usato come fibra e sulla disposizione delle fibre all'interno della lamina. La matrice infatti, sopporta ben poco del carico applicato ad una struttura composita ma ha maggiore rilievo negli sforzi interlaminari così come nelle proprietà di taglio del materiale composito. Essa infatti fornisce il supporto contro la possibilità di un distaccamento delle fibre sotto carichi di compressione e migliora la resistenza a compressione di un materiale composito. Le fibre invece influenzano in modo sostanziale le proprietà secondo la direzione longitudinale assorbendo la quasi totalità del carico applicato.

In commercio esistono numerosissimi tipi di matrici e fibre le cui prestazioni sono migliorate nel corso degli anni. Esistono oltre sessanta tipi di fibre con proprietà meccaniche molto differenti: in genere si tende a suddividerle in quattro tipi, indicate rispettivamente con le sigle: HS (alta resistenza), IM (modulo intermedio) e HM (alto modulo) e UHM (altissimo modulo).

Alla varietà di fibre di carbonio impiegabili si aggiunge il gran numero di processi con cui è possibile produrre un manufatto in composito: si comprende, quindi, come mai la realizzazione di un manufatto in composito di qualità dipenda fortemente dalle figure del progettista e del fornitore, come risulta evidente dal re-design di un asse verticale in CFRP che Sintesi ha realizzato per una nota industria italiana.

Scopo del re-design è stato quello di utilizzare per l'asse verticale, fino a quel momento realizzato in alluminio, materiali non convenzionali al fine di fornire un forte incremento delle prestazioni statiche e dinamiche del componente insieme al contenimento del suo costo industriale (materiali, produzione e assemblaggio).

La riprogettazione ha mantenuto le medesime interfacce tra il componente originale e i restanti componenti della macchina utensile non presi in considerazione dal re-design.

Una rivisitazione approfondita del componente che ha ottimizzato l'utilizzo del materiale, ha consentito di trasformare il vantaggio strutturale, sempre presente nell'utilizzo dei materiali compositi, in convenienza industriale. Per questo motivo risulta fondamentale rivolgersi ad aziende con un forte know-how sul materiale e sull'automatizzazione delle procedure di progettazione.

Al fine di soddisfare le specifiche imposte dal cliente, Sintesi ha realizzato un'ottimizzazione di design, volta all'analisi economico-strutturale del componente, quindi della macchina.

E' stata inoltre effettuata la selezione del fornitore che, come detto, gioca un ruolo importante, al pari quasi del progettista, nell'ottenimento di un manufatto che abbia le caratteristiche meccaniche desiderate (discorso estendibile in generale a tutti i materiali non convenzionali). Per poter far questo si sono prese in considerazione, sin dalle prime fasi del re-design, l'insieme di tutte le variabili (progettuali e produttive) in maniera sistematica, integrandole nel processo di ottimizzazione multidisciplinare.

Sintesi ha elaborato un modello di costo che ha considerato, in funzione della dimensione del lotto di fabbricazione, i costi dei materiali e di processo. Questo ha permesso di contenere il costo totale di fabbricazione del componente in relazione al prototipo ed in relazione a pre-serie e serie industriali.

Il lavoro è stato strutturato nei seguenti step:

1. Analisi dei vincoli di progetto
2. Costruzione, con l'impiego di elementi piani, di una serie di tre modelli alternativi tra loro con l'obiettivo di individuare su quali dei tre fosse più conveniente continuare la fase di progettazione. Da queste analisi sono emersi due modelli validi, con performance ben superiori rispetto al modello di riferimento.
3. Costruzione di un modello realizzato con l'impiego di elementi solidi che assicurano una più dettagliata descrizione delle effettive condizioni di vincolo e una migliore descrizione delle condizioni di collegamento tra i componenti.
4. Analisi statiche e modali dalla quale è emerso un modello più performante rispetto agli altri.
5. Incontro con il fornitore per discutere di aspetti tecnologici, a valle del quale si è proceduto ad una rivisitazione dell'intera progettazione del componente. Il modello messo a punto nello step precedente è stato sottoposto ad una ulteriore rivisitazione al fine di evidenziare ulteriori zone nelle quali fosse possibile ridurre l'impiego del CFRP.
6. Presentazione al cliente della nuova soluzione.

Questa è stata ulteriormente ottimizzata fino a raggiungere i risultati riportati nella tabella 1 ed è stata quindi scelta per la realizzazione del componente.

	Comp. Attuale	Comp. Riproget.	Variazione %
1° Frequenza Propria [HZ]	46,1	5,0	+41,3
2° Frequenza Propria [HZ]	51,3	66,0	+28,7
Cedimento Utensile Direzione X	0,0785	0,05065	-35,5
Cedimento Utensile Direzione Y	0,0943	0,04792	-49,2
Cedimento Utensile Direzione Z	0,0115	0,00721	-37,3
Massa Totale Asse [KG]	55,2	49,0	-11,2

Tab. 1 Confronto tra modello di riferimento e primo prototipo realizzato con il componente in composito risultato più performante

Conclusioni

Attraverso le metodologie di ottimizzazione strutturale è stato possibile utilizzare materiali innovativi ottenendo prestazioni strutturali più elevate rispetto a quelle delle macchine realizzate con i materiali metallici tradizionali, riuscendo inoltre a contenere e a diminuire i costi di produzione.

In particolare si è raggiunto un aumento della precisione di circa il 20%, una diminuzione del tempo ciclo e dei costi di componenti e macchine tra il 20% e il 30%.

Sintesi, è quindi riuscita a tradurre le richieste degli utilizzatori di macchine sviluppando componentistica che ha accresciuto la rigidità statica e dinamica delle macchine, minimizzando i costi delle soluzioni proposte.

Nell'articolo sono stati analizzati due casi affrontati con successo. La riprogettazione di due componenti di macchine utensili impiegando due materiali non convenzionali al fine di perseguire due obiettivi differenti.

È evidente che l'utilizzo dei materiali compositi in tali applicazioni ingegneristiche ha richiesto un approccio completamente differente da quello adottato comunemente nel caso dei materiali tradizionali. Non sono stati infatti determinati i soli spessori, ma sono stati definiti tutti i parametri che individuano lo stesso materiale: angoli di orientazione delle fibre, tipologia di fibre, numero di lamine, spessore delle lamine.

In questo modo il materiale è stato "costruito" in funzione delle esigenze progettuali.

Diviene quindi fondamentale ricorrere ad aziende con un forte know-how sul materiale e sull'automatizzazione delle procedure di progettazione tale da portare, in breve tempo, ad esplorare un numero considerevole di alternative progettuali in modo tale da scegliere quella con il miglior rapporto prestazione/costo

Nel primo caso si è partiti da un basamento costruito in acciaio e si è proceduti alla riprogettazione del componente con il calcestruzzo polimerico, che ha un costo per kg inferiore ma che è, nello stesso tempo, meno performante dell'acciaio avendo una rigidità nettamente inferiore.

Gli obiettivi richiesti: minimizzazione della massa e mantenimento del livello di performance sono stati ampiamente soddisfatti. Avvalendosi dell'ottimizzazione multidisciplinare topologica, il costo del nuovo componente è risultato inferiore del 30% rispetto al costo attuale.

Nel secondo caso si è partiti da un asse, costruito in alluminio e si è proceduto alla riprogettazione del componente con il materiale composito in fibre di carbonio

(CFRP), più performante dell'alluminio ma anche molto più costoso. Anche in questo caso, gli obiettivi richiesti: aumento delle performance e minimizzazione del costo di produzione industriale, sono stati soddisfatti avvalendosi dell'ottimizzazione multidisciplinare di design. Più precisamente, il nuovo asse ha presentato un incremento di performance del 30% e una riduzione della massa del 10%. ▀

Per maggiori informazioni su questa metodologia e sulla possibilità di applicarla alla progettazione di componenti per macchine e sistemi, potete contattare Giuseppe Sterlino e Giuseppe Gori all'indirizzo techrequest@sintesi-scpa.com e visitare il sito www.sintesi-scpa.com

Sintesi SCpA è una società che sviluppa tecnologie e componenti meccatroniche specializzata nelle tecnologie di misure, controllo, design meccatronico e sistemi di produzione.