

# CAPITOLO 8

## Il calcolo elastico lineare dei materiali compositi

### 8.1 Introduzione

In questo Capitolo ci concentreremo sulle problematiche che si riscontrano ogniqualvolta si devono affrontare la modellazione e il calcolo di una struttura realizzata con materiali compositi, indicando con questo termine quei materiali che, non essendo omogenei e isotropi, presentano qualche complicazione in più, sia per quanto riguarda la costruzione del modello sia per quanto concerne l'interpretazione dei risultati. Non ci soffermeremo nemmeno per un istante sulla teoria alla base del comportamento di un materiale composito. Per quella rimandiamo ai testi specifici riportati nella bibliografia.

Qui ci limiteremo a dire che l'uso dei materiali compositi sta entrando a far parte della vita di tutti i giorni e trova impiego oggi anche dove in precedenza venivano utilizzati altri materiali e la sofisticazione dei primi era relegata a settori altamente tecnologici e molto specifici: militare (specialmente in campo aeronautico), competizione motoristica e navale, sportivo (racchette da tennis, mazze da golf, sci, canne da pesca, biciclette).

Il tentativo, in parte riuscito, di industrializzare la realizzazione di un oggetto in materiale composito (mentre prima era una procedura artigianale e in alcuni casi ancora oggi per trarre il massimo delle prestazioni da un determinato elemento è necessaria l'operazione manuale) ha abbassato i costi del prodotto ed esteso l'uso di materiali così avanzati anche in ambiti meno "spinti" di quelli poco sopra citati. Sono soprattutto i pezzi ottenuti per stampaggio a iniezione di materia plastica ad aver visto l'inserimento nella resina di rinforzi di fibra (principalmente vetro) corta e non orientata.

L'impiego di teli (pre-impregnati di resina) dove le fibre (di vetro, di Kevlar, di carbonio, etc.) sono organizzate e orientate tutte in una direzione voluta è difficilmente industrializzabile e richiede ancora oggi l'opera di tecnici altamente specializzati per la realizzazione di componenti ad alte prestazioni e al tempo stesso affidabili. I sistemi computerizzati di disegno 3D (CAD) certamente facilitano la determinazione della forma che i vari teli devono avere per poter essere disposti nello stampo senza troppe difficoltà e hanno fatto nascere macchinari che consentono il taglio dei teli stessi secondo la forma desiderata. L'operatore deve quindi utilizzare la propria perizia solamente per disporre i teli con la massima cura possibile, senza doversi più preoccupare di "trimmarli" con taglierino e forbici o di operare pericolose giunzioni in fase di produzione del manufatto.

Di pari passo con l'impiego dei materiali compositi è cresciuta l'esigenza di poter sapere, prima di testare i primi prototipi, se il pezzo sarà in grado di resistere ai carichi che lo sollecitano oppure dove questo dovrà essere rinforzato per raggiungere

l'obiettivo. Così il calcolo automatico delle strutture, specialmente quello basato sul Metodo degli Elementi Finiti, trova un nuovo terreno su cui misurarsi. Niente di particolarmente complicato per l'utente finale (se adeguatamente preparato); la reale complicazione risiede nella programmazione del codice perché la costruzione della matrice di rigidezza dei singoli elementi costituiti da materiale composito non è più basata sulle equazioni costitutive semplici che legano le deformazioni agli stress in un materiale omogeneo e isotropo, ma deve tenere conto dell'anisotropia del laminato (cioè di come i vari teli pre-impregnati sono sovrapposti uno all'altro, di come sono mutuamente orientati, delle caratteristiche elastiche di ciascuno di essi). Può ad esempio capitare che una semplice barretta realizzata con fibre di carbonio e soggetta a un carico perfettamente assiale si trovi sottoposta anche a flessione, pur in assenza di un momento flettente. Tutti questi effetti sono spiegati dalla Teoria Classica della Laminazione (si veda ad esempio [7]), sulla quale, come già detto, spenderemo pochissime parole, rimandando il lettore ad altri testi specialistici. Qui ci limiteremo all'aspetto pratico della modellazione di una struttura realizzata in composito.

### **8.1.1 Cenni storici**

Agli inizi dell'era commerciale dei software di calcolo a Elementi Finiti (si parla della fine degli anni '60 del secolo scorso), i codici erano esclusivamente lineari e avevano nella loro libreria un numero di tipologie di elementi estremamente ridotto. Modelli di tipo beam e truss erano all'ordine del giorno, e ci si spingeva a realizzare modelli a shell quando era strettamente necessario. I modelli solidi erano quindi un sogno, non solo per lo sforzo computazionale richiesto a macchine che erano di gran lunga meno potenti del meno potente smartphone oggi in vendita, ma anche perché la costruzione di un modello tridimensionale con elementi brick (il tetraedro infatti sarebbe arrivato solo in seguito) non era per nulla una cosa semplice: non va dimenticato, infatti, che i modelli venivano prima disegnati in scala su un foglio di carta millimetrata e poi inseriti nei calcolatori digitando i numeri di ogni singolo nodo, le sue coordinate, il numero di ogni singolo elemento e le relative connessioni con i nodi.

Sembra preistoria eppure sono trascorsi solamente poco più di cinquant'anni.

I materiali utilizzabili erano solo quelli omogenei e isotropi, anche perché a quei tempi il settore aerospaziale (non bisogna dimenticare che NASTRAN, il primo codice a elementi finiti a essere stato commercializzato, è l'acronimo di NAsa STRucture ANalysis) faceva uso esclusivamente di questo genere di materiali (acciaio, titanio, leghe di alluminio).

Tempi più recenti hanno visto lo sviluppo dei materiali compositi a fibra lunga e orientata e la necessità di analizzare in modo automatico le strutture realizzate con questi materiali ha richiesto l'adeguamento dei codici, almeno in una certa misura: per gli elementi shell è stato a un certo punto possibile assegnare diversi materiali in funzione dello stato tenso-deformativo, ossia, ad esempio, un modulo di Young per il comportamento membranale e uno, diverso, per il comportamento flessionale. E questo proprio per adeguarsi alle caratteristiche dei pannelli in composito, dove la rigidezza flessionale e quella membranale, in generale diverse tra loro, sono funzione dei materiali

impiegati, della loro orientazione e del loro impilamento lungo lo spessore del pannello. Era un passo in avanti, ma era ancora necessario calcolare a mano i moduli di Young flessionale e membranale equivalenti per poi darli in pasto al codice; così, ogni volta che si cambiavano i materiali, la loro orientazione o la loro sequenza di impilamento, era necessario ricalcolare le proprietà equivalenti. Ma le difficoltà non terminavano qui; una volta ottenuta la soluzione bisognava calcolare gli stress nei vari strati di materiale perché, essendo il pannello non omogeneo, la discontinuità delle sollecitazioni tra i vari strati può essere molto marcata. E quindi l'ultimo passo evolutivo è stato quello di automatizzare anche il calcolo delle proprietà equivalenti: oggi è infatti possibile "semplicemente" indicare quale materiale viene assegnato a un determinato strato, quale l'orientazione delle sue fibre e quale il suo spessore per avere, in uscita dal calcolo, anche gli stress e gli indici di rottura di ogni singolo strato. Tutto questo, lo ricordiamo, viene fatto per gli elementi shell, ossia per elementi atti a modellare strutture in cui due dimensioni sono molto maggiori rispetto allo spessore: piastre sottili e gusci, in sostanza.

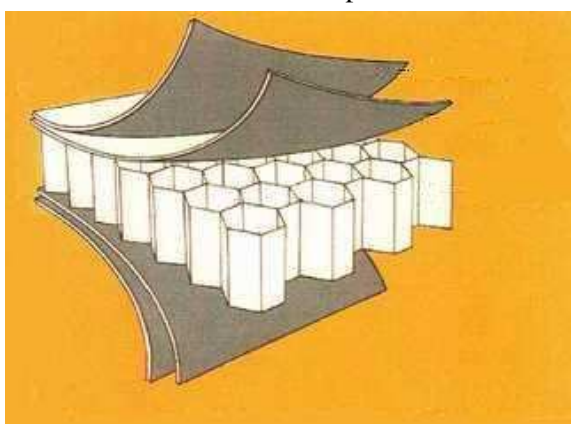
Tuttavia oggi, dato il crescente uso di materiali compositi e lo sviluppo di tecnologie produttive inimmaginabili solamente qualche anno fa, di frequente si vedono strutture in composito che definire "sottili" appare quantomeno azzardato e la loro analisi strutturale pone indubbiamente qualche perplessità. Estendere oltre i suoi limiti intrinseci le capacità dell'elemento shell sembra la sola strada da intraprendere, ma anche con tutte le cautele del caso e la consapevolezza che i risultati possono condurre ampiamente fuoristrada, i rischi cui si va incontro sono elevati. L'esplorazione di percorsi alternativi diventa allora quasi un obbligo e nel seguito vedremo un esempio tratto dalla pratica industriale dove si è dovuto ricorrere a un approccio sofisticato in quanto quello classico ha prodotto risultati errati che hanno portato alla rottura di un componente.

## 8.2 Tipi di elemento da impiegare

Per gli oggetti realizzati in materiale plastico e caricati con fibre corte e non orientate è la geometria stessa del pezzo a guidare la scelta del tipo di elemento che dovrà essere impiegato. Strutture tozze verranno modellate con elementi solidi (brick o tetraedri) mentre organi con pareti sottili saranno realizzati con elementi shell. Infatti, come vedremo più avanti, generalmente questo tipo di materiale composito viene ancora trattato come omogeneo e isotropo.

Le strutture realizzate con teli di fibra lunga e orientata, invece, saranno generalmente "sottili", salvo qualche eccezione, e pertanto di dominio esclusivo degli elementi shell; questo avviene perché i teli hanno spessori piccoli (dell'ordine di 0.1÷0.5 mm) e pertanto, al fine di ottenere un laminato con spessore elevato, sarebbe necessario impilare molti teli, affrontando in tal modo alcuni problemi di tipo tecnologico. In alcuni casi, quando si ha necessità di avere strutture tozze realizzate con compositi a fibra lunga e orientata, questo approccio viene comunque seguito e si possono raggiungere spessori complessivi di 20÷22 mm (e se consideriamo di avere uno spessore medio del singolo telo di 0.2 mm bisogna impilare 100÷110 teli). Ma anche senza ar-

rivare a un prodotto che in questa ipotesi sarebbe di carbonio solido è sufficiente pensare ai pannelli “sandwich”, dove tra due pelli esterne di fibra (più o meno spesse a seconda dei casi) trova spazio un “core” (o cuore) di natura completamente diversa: nido d’ape di alluminio o di cartone (il cosiddetto Nomex), schiume riempitive, legno di balsa, etc. Anche in questo caso, pur avendo delle pelli sottili (magari costituite da 4÷5 teli) il manufatto finale può comunque essere spesso a causa di un core che può raggiungere i 30 mm di spessore (si veda la figura 8.1 per un esempio di pannello sandwich). E questo può cominciare a creare dei problemi di modellazione quando si impiegano elementi shell, soprattutto lungo superfici che magari hanno un raggio di curvatura dello stesso ordine di grandezza dello spessore. In situazioni geometriche di questa natura e avendo un materiale omogeneo e isotropo si impiegherebbero elementi solidi. Ma con i materiali compositi il discorso cambia.



*Figura 8.1. Esempio di pannello sandwich. Il core è generalmente costituito da una struttura a nido d’ape, realizzato con alluminio, cartone o materiale plastico (a volte addirittura arricchito con fibra). Le pelli esterne possono essere dei laminati di fibra oppure delle lamiere di materiale metallico (ad esempio alluminio).*

Inoltre ultimamente si stanno facendo strada, soprattutto in ambiti fortemente tecnologici dove l’aspetto economico è di secondaria importanza, materiali che vengono comunemente definiti “compositi 3D”. Essi prevedono la presenza di fibre non solo su una superficie ma anche lungo la sua normale per facilitare l’impacchettamento dei vari strati di fibra e per evitare la cosiddetta delaminazione. Al di là dei problemi tecnologici e degli aspetti produttivi connessi a un tale materiale, il nostro interesse è legato al modo in cui una struttura di questo genere viene discretizzata per un calcolo a elementi finiti.

Proprio per questi motivi al giorno d’oggi molti dei programmi di calcolo commerciali hanno introdotto, a fianco del classico elemento 2D per modellare un laminato, elementi 3D detti “structural layered elements”, ovvero elementi strutturali 3D in cui sia possibile definire degli strati, ciascuno con caratteristiche elastiche e meccaniche proprie e un proprio orientamento rispetto a una direzione predefinita. In sostanza con questi elementi la caratterizzazione della loro costituzione avviene nel medesimo modo con cui si descrivono gli elementi shell, ma la fondamentale differenza risiede nel fatto che la geometria della struttura viene rispettata. Questo approccio presenta però alcune difficoltà e alcuni problemi, sia nel definire le caratteristiche elastiche e meccaniche, sia soprattutto nel riuscire a stabilire un criterio di verifica a rottura.

Nei paragrafi seguenti affronteremo le problematiche di modellazione FEM per entrambi i tipi di elemento, 2D e 3D.

Tuttavia è necessario prima di tutto dare alcune informazioni sui materiali impiegati nella realizzazione di oggetti in composito.