



Analisi numerica-sperimentale dell'influenza delle caratteristiche elastiche dei materiali compositi sulle proprietà di vibrare

G. Risitano

Facoltà di Scienze e Tecnologie Applicate, Università degli Studi Guglielmo Marconi, via Plinio 44, 00193, Roma

D. Corallo

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università degli Studi di Catania, via A. Doria 6, 95125, Catania

F. Langanelli Sellani

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia, via G. Duranti 67, 06125, Perugia

A. Davitti, N. Bellato

Magneti Marelli S.p.A. - Powertrain, via Timavo 33, 40131, Bologna

ABSTRACT. In recent years, composite materials are increasingly used in industrial field due to the high mechanical characteristics and lightness. However, the modeling of composite materials is very complex. In the industrial design, this type of material is considered isotropic. Instead, the fluid dynamics during injection molding gives a directionality to the fibers. So, this directionality is manifested in the mechanical properties of the component. The authors compared the vibration modes of a plate PA66GF35 treated as an isotropic material as material anisotropy (Folgar and Tucker).

SOMMARIO. I materiali compositi negli ultimi anni hanno trovato sempre più maggiore impiego nell'ambito industriale in quanto, le elevate caratteristiche meccaniche unite ad elevate doti di leggerezza, risultano fondamentali per l'incremento delle prestazioni e la riduzione delle emissioni inquinanti. Tuttavia la trattazione dei materiali compositi nella meccanica industriale risulta molto complessa ed, in alcuni casi, eccessiva per la finalità della progettazione e si preferisce adottare sostanziali semplificazioni. Nella progettazione industriale tale tipologia di materiali viene considerato puramente isotropo. È noto, invece, che la fluidodinamica sviluppata all'interno dello stampo durante il processo di *injection molding* conferisce una direzionalità alle fibre di rinforzo; direzionalità che si ripercuote sulle proprietà meccaniche dell'intero componente. Partendo da queste considerazioni, l'attenzione degli autori è stata rivolta alle proprietà di vibrare di tali materiali. Infatti, i materiali compositi sono adottati anche per la realizzazione di componenti in campo automotive, sensibilmente affetti da problematiche di rumore; essendo il rumore derivante da un'interazione fluido-struttura, è facile comprendere quale ruolo ricoprano le frequenze proprie ed i modi di vibrare del componente stesso. Gli autori hanno confrontato i modi di vibrare di una piastra in PA66GF35 (matrice in poliammide rinforzata con fibre di vetro), modellata sia come materiale isotropo che come materiale anisotropo derivante dalla Teoria di Folgar e Tucker.

KEYWORDS. Composite materials; Injection molding; Anisotropy.

INTRODUZIONE

Nella progettazione industriale l'impiego dei materiali compositi negli ultimi anni ha trovato sempre più maggiore applicazione, per via della leggerezza e delle elevate caratteristiche meccaniche. Un esempio tipico di tale fenomeno è rappresentato dal massiccio impiego dei materiali in fibra nelle applicazioni in campo automotive,



dove il fine ultimo dell'abbattimento dei consumi, dell'incremento delle prestazioni e della riduzione delle emissioni inquinanti, ha giustificato l'impiego a bordo delle autovetture di una quantità sempre maggiore di compositi. L'utilizzo di polimeri rinforzati, a fianco di notevoli vantaggi, ha mostrato il problema della modellazione degli stessi in fase di progettazione, in quanto, a differenza dei materiali convenzionali (es. acciaio) che possono essere considerati isotropi, questi per effetto dei costituenti e dei processi produttivi, sono nella maggior parte dei casi caratterizzati da una certa anisotropia, generalmente difficile da trattare in ambito progettuale.

Nei materiali compositi a fibra continua (es. componenti in fibra di carbonio), i modelli matematici di comportamento meccanico e le simulazioni numeriche derivanti risultano sostanzialmente agevoli. Il problema risulta molto più complesso nel caso in cui si debba parlare di materiali compositi realizzati attraverso lo stampaggio ad iniezione (*injection molding*). Nel *injection molding* la matrice polimerica, al cui interno vi sono le fibre di rinforzo (es. vetro), è portata alla temperatura di fusione e iniettata ad alta pressione all'interno dello stampo. Questo processo tecnologico, largamente impiegato in ambito industriale, consente un elevato grado di libertà nelle forme realizzabili, ad un costo relativamente contenuto; ma proprio il processo di realizzazione, in fase di progettazione, rende molto difficile la modellazione delle caratteristiche meccaniche del materiale. Le fibre di rinforzo, disperse nella matrice, non sono disposte ordinatamente dall'operatore, come nel caso dei compositi a fibra lunga, ma si distribuiscono in funzione dei processi fluidodinamici che si sviluppano all'interno dello stampo. Essi sono connessi direttamente a quelle che sono le condizioni di iniezione quali ad esempio la temperatura, la pressione, i punti di iniezione, etc. Per semplicità di progettazione, nella pratica industriale, non è raro che questa tipologia di compositi sia considerata come materiale isotropo, essendo molto più semplice da modellare attraverso sole due costanti. Inoltre erroneamente, la pratica comune, considera la dimensione delle fibre tale da non conferire una direzionalità preferenziale alla meccanica del materiale.

Essendo materiali di questo genere adottati anche per realizzare componenti in campo automotive (es. collettori di aspirazione), sensibilmente affetti da problemi di rumore di tipo *airborne* e *solidborne* (rumore aerodinamico e rumore connesso alla vibrazione delle superfici), è facile comprendere quale ruolo ricoprano le frequenze proprie ed i modi di vibrare del sistema in casi di tal genere. Una errata trattazione delle caratteristiche meccaniche può voler dire anche sottostimare la problematica del rumore stesso. Infatti, a parità di geometria, è inequivocabilmente il materiale a incidere sulle frequenze proprie del sistema.

In funzione di tutto ciò, l'obiettivo del presente studio, che nasce da un progetto di ricerca tutt'ora in corso con Magneti Marelli S.p.A. – Powertrain, è quello di confrontare i due differenti modelli (isotropo ed anisotropo) con i quali può essere trattato il materiale al fine di verificare se una modellazione semplificata (risparmio di risorse e tempo) possa essere adeguata. Per far ciò, si è considerato, in prima istanza, il semplice caso di una piastra incastrata, analizzando la diversa risposta vibrazionale dei due modelli.

TEORIA DI FOLGAR E TUCKER

Per materiali compositi a matrice polimerica ed a fibre corte, durante il processo di *injection molding*, l'orientamento delle fibre all'interno della matrice è descritto dalla Teoria di Folgar e Tucker. Essa, in particolare, riguarda la determinazione dell'orientamento delle fibre disperse all'interno di una soluzione concentrata. L'orientamento di un corpo disperso all'interno di un fluido può essere descritto attraverso un tensore del secondo (1) o del quarto (2) ordine definito come [1]:

$$(a_2)_{ij} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} p_i p_j \psi(\phi, \theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

$$(a_4)_{ijkl} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} p_i p_j p_k p_l \psi(\phi, \theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

dove l'integrale (1) rappresenta il doppio prodotto del vettore p che descrive l'orientamento della fibra, pesato tramite la funzione $\psi(\varphi, \theta)$ che rappresenta la distribuzione di probabilità di trovare la fibra nella direzione (φ, θ) . L'obiettivo è quello di determinare i termini del tensore di orientamento della fibra nei vari punti. La teoria di Folgar e Tucker è un modello particolarmente importante per la determinazione dell'orientamento della fibra all'interno della matrice polimerica. La particolarità di questa sta nel fatto che essa tiene conto, oltre che dell'influenza fluidodinamica (cioè del moto del fluido

all'interno dello stampo), anche dell'interazione che si viene a creare tra le fibre stesse (situazione che si verifica nelle miscele fibra-matrice molto concentrate).

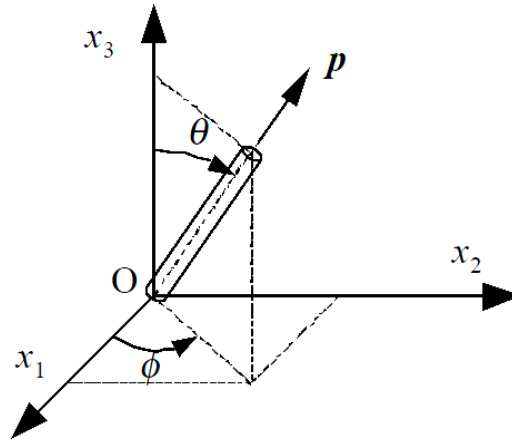


Figura 1: Orientamento di un corpo disperso all'interno di un fluido.

L'Eq. (3) esprime la teoria sopra descritta [2]:

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = \omega_{ij}a_{kj} - \omega_{kj}a_{ik} + \lambda(D_{ik}a_{kj} + D_{kj}a_{ik} - 2D_{kl}a_{ikjl}) + 2C_I\dot{\gamma}(\delta_{ij} - \alpha a_{ij}) \quad (3)$$

dove abbiamo, λ rapporto d'aspetto delle fibre, ω_{ij} vorticità locale, D_{kj} tensore di deformazione, δ_{ij} delta di Kronecker, a una costante (pari a 3 per i flussi tridimensionali e 2 per flussi planari) e il C_I coefficiente di interazione delle fibre. C_I descrivendo l'interazione tra le fibre, generalmente, viene determinato per via analitica dalla relazione empirica (4):

$$C_I = 0.0184 \exp\left(-0.718V_f \frac{L}{d}\right) \quad (4)$$

dove V_f rappresenta la frazione in volume di fibre nella matrice. Quindi, risolvendo il campo di moto del fluido all'interno della matrice, è possibile determinare l'orientamento della fibra in qualsiasi punto dello spazio considerato. Inoltre, nella relazione (3) compaiono sia elementi del tensore del quarto ordine che elementi del tensore del secondo ordine che, però, si riferiscono all'orientamento della medesima fibra. Per tale motivo risulta necessaria l'utilizzo di "modelli di chiusura" dell'equazione che consentano di esprimere i termini del secondo ordine in funzione di termini del quarto. Esistono differenti modelli di chiusura che vengono impiegati nel calcolo dell'orientamento delle fibre; la scelta è funzione del tipo di flusso che si instaura all'interno dello stampo [3]. Ad esempio, se si considera un flusso di un polimero scarsamente deformato con fibre distribuite in maniera casuale, si può utilizzare la *Linear Closure*; invece, se si ha un'elevata deformazione del flusso e le fibre risultano allineate in un'unica direzione, si può applicare la *Quadratic Closure*. Il modello di chiusura utilizzato per i materiali compositi a matrice poliammidica è l'*Orthotropic Closure* [4] e viene espresso tramite la relazione tensoriale (5):

$$\begin{pmatrix} a_{1111} \\ a_{2222} \\ a_{3333} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.15 + 1.15a_{11} - 0.10a_{33} \\ +0.60 - 0.60a_{11} - 0.60a_{33} \\ -0.15 + 1.15a_{11} + 0.90a_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

L'orientamento delle fibre, come è facile capire, si riflette sulle proprietà meccaniche del materiale. Si fa ricorso alla teoria dell'elasticità generalizzata in cui la rigidità del materiale viene espressa da una matrice 6 x 6 che mette in relazioni gli sforzi con le deformazioni [5]:



$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Coniugando la Teoria di Folgar e Tucker con le caratteristiche meccaniche del materiale stesso in capo elastico lineare, è possibile fornire una descrizione del materiale anisotropo. Se si considera la struttura del materiale in esame, possiamo semplificare la relazione; infatti, esaminando la singola fibra, è possibile schematizzare il singolo elemento di rinforzo come rivestito dal materiale poliammidico [5] (Fig. 2).

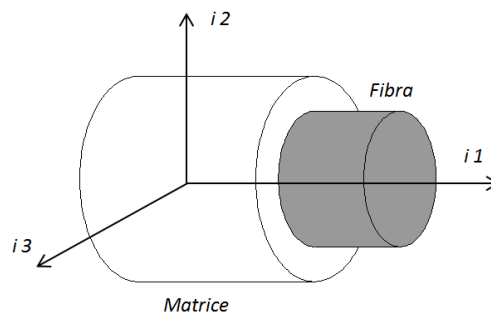


Figura 2: Schematizzazione del singolo elemento di rinforzo rivestito dal materiale poliammidico.

Quindi, se ipotizziamo di sottoporre a uno sforzo di trazione in maniera radiale la fibra, vediamo che, in tutte le direzioni, per effetto della simmetria, si avrà la medesima rigidezza, la quale sarà differente rispetto a quella che si avrebbe sottoponendo la fibra e la matrice polimerica nella direzione longitudinale alla fibra stessa. Quindi, in base a tale considerazione, è possibile passare dalla condizione di materiale anisotropo, al concetto di materiale trasversalmente isotropo. Dalla teoria dell'elasticità generalizzata, la matrice di rigidezza 6 x 6 del materiale diventa [6] [7]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

dove nella precedente relazione (7) valgono le equazioni (8) e (9):

$$c_{44} = \frac{1}{2}(c_{22} - c_{23}) \quad (8)$$

$$c_{55} = c_{66} \quad (9)$$

Per descrivere il comportamento del materiale trasversalmente isotropo sono necessarie cinque costanti elastiche che possono essere determinate attraverso le relazioni della micromeccanica. In base a quanto detto è possibile scrivere la relazione di Advani-Tucker, che permette di calcolare la rigidezza del materiale usando il tensore di orientazione ricavato precedentemente [1]:

$$\langle c_{ijkl} \rangle = B_1 a_{ijkl} + B_2 (a_{ij} \delta_{kl} + a_{kl} \delta_{ij}) + B_3 (a_{ik} \delta_{jl} + a_{il} \delta_{jk} + a_{jl} \delta_{ik} + a_{jk} \delta_{il}) + B_4 \delta_{ij} \delta_{kl} + B_5 (\delta_{ij} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (10)$$

Le cinque grandezze B_i sono proprietà invarianti del tensore di tensione unidirezionale; queste possono essere ricavate dalle proprietà unidirezionali del materiale trasversalmente isotropo. Le parentesi poste sulle grandezze calcolate, stanno ad indicare che queste rappresentano grandezze mediate nello spazio in tutte le direzioni, ed equivale a scrivere:

$$\langle K_{ijkl} \rangle = \oint K_{ijkl} \psi(p) dp \quad (11)$$

ossia la rigidità viene pesata attraverso la funzione che descrive l'orientamento della fibra nello spazio. In questa ottica il composito viene visto come una aggregato di elementi discreti, nel quale ogni elemento ha le proprietà di un materiale composto da fibre completamente allineate, ma orientato diversamente nello spazio.

MATERIALI E METODI

Gli scriventi hanno considerato il caso di una piastra in PA66GF35 (matrice poliammidica di nylon 6.6 e fibre di vetro al 35%). La piastra è quadrata 200 x 200 mm con uno spessore di 3 mm (Fig. 3.a). La piastra è stata realizzata tramite il processo di *injection molding*. Dopo aver realizzato il CAD, il processo del *injection molding* è stato simulato attraverso il software Moldflow® di Autodesk® (Fig. 3.b) che, attraverso l'implementazione della teoria di Folgar e Tucker [1], consente di ricavare l'orientamento delle fibre per effetto della fluidodinamica che si sviluppa all'interno dello stampo. Una volta stabiliti gli orientamenti delle fibre, il modello della piastra, con le relative caratteristiche del materiale, è stato importato in Ansys®. Al fine di calibrare il modello, è stata eseguita un'analisi modale sperimentale della piastra (Fig. 3.c), vincolando rigidamente il lato in cui vi è l'iniezione del materiale, che è stata confrontata con i risultati di un'equivalente analisi FE (Fig. 3.d).

L'analisi FE che si applica nel presente lavoro opera nella maniera descritta nel precedente paragrafo: si determina il comportamento fluidodinamico del polimero iniettato all'interno dello stampo, dal quale viene poi ricavato il tensore di orientamento delle fibre, e di conseguenza la rigidità del singolo elemento nel dominio discretizzato. Dopo aver risolto la fluidodinamica di iniezione e l'orientamento delle fibre in ogni elemento del FEM (Moldflow®), è possibile, quindi, modellare numericamente l'anisotropia del materiale. Conoscendo, inoltre, la rigidità degli elementi è possibile costruire la matrice di massa $[m]$ e la matrice di rigidità $[k]$ del componente. Facendo riferimento alla meccanica delle vibrazioni e applicando la relazione:

$$\det([m]s^2 + [k]) = 0 \quad (12)$$

è possibile determinare le frequenze proprie $[\omega_0^2]$ e le forme modali $[q]$ del sistema che consentono di caratterizzare completamente a livello dinamico la piastra. Su questo aspetto si basa la differenza tra i due modelli del materiale in esame. Infatti, se per descrivere il materiale anisotropo è necessario seguire il ragionamento sopra esplicitato, per il materiale isotropo è possibile effettuare un'analisi modale definendo solamente il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Chiaramente, la differenza tra i due modelli si riflette su una diversa matrice dei coefficienti di partecipazione modale. Per l'analisi modale sperimentale, sono stati considerati diversi punti per l'applicazione dell'impulso al fine di ottenere una adeguata risposta in frequenza. Il criterio che ha guidato la scelta, dei punti di impatto, è spiegato dalla relazione (14):

$$H_{ij} = \sum_{r=1}^n \phi_{ir} \phi_{jr} H_r \quad (14)$$

La funzione rappresenta la risposta nel dominio della frequenza del punto j -esimo all'applicazione della forza nel punto i -esimo. La funzione H_r rappresenta la risposta in frequenza dei sistemi a un grado di libertà che si può ottenere dall'analisi modale, in cui ogni sistema ha frequenza di risonanza ω_r . Quindi, se in un impatto si vuole osservare in particolare una determinata frequenza, sarà necessario colpire e misurare la risposta nei punti che massimizzano il prodotto $\phi_{ir} \phi_{jr}$, che rappresentano rispettivamente il coefficiente di partecipazione modale del punto misurato e del punto di applicazione dell'impulso. In base alle considerazioni fatte, durante la sperimentazione, la scelta dei punti di impatto e dei punti di



misura è stata effettuata tenendo in considerazione i valori dei coefficienti di partecipazione modale delle forme proprie ricavate in via numerica precedentemente.

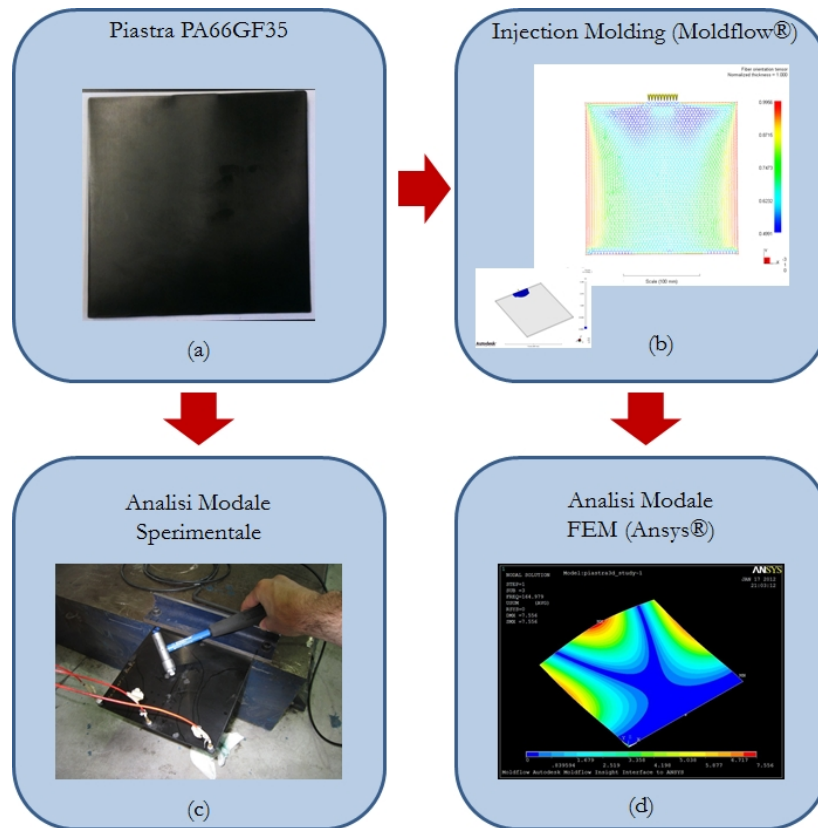


Figura 3: Piastra in PA66GF35 (a), simulazione del processo di stampaggio per iniezione (b), analisi modale sperimentale (c) e relativa analisi FE (d).

RISULTATI E DISCUSSIONI

Come si può vedere dalla Tab. 1, la differenza delle frequenze proprie della piastra ricavate tramite analisi FE ed analisi sperimentale si assesta intorno ai 3 Hz. Il modello, quindi, è stato ritenuto calibrato. È necessario, però, fare la seguente considerazione. L'analisi modale sperimentale su materiali compositi a matrice polimerica, come quello in esame, risulta molto complessa in quanto, come si può vedere dalle Fig. 4, il segnale non risulta molto limpido, pur comunque applicato un buon filtraggio. La problematica, considerato la natura termoplastico del materiale in esame, è connessa allo smorzamento stesso. Infatti, se il punto di applicazione dell'impulso è troppo lontano dal punto di misura, la forza di impatto viene pesantemente smorzata e difficilmente rilevata. Al contrario se si applica un impulso troppo forte o, addirittura, in prossimità del punto di misura, si rischia di andare in *over range*.

| n° modo | Risultati FEM | Risultati Sper. | Differenza | Errore % |
|---------|---------------|-----------------|------------|----------|
| | [Hz] | [Hz] | [Hz] | |
| 1 | 28 | 25 | 3 | 11% |
| 2 | 60 | 63 | 3 | 5% |
| 3 | 165 | 168 | 3 | 2% |
| 4 | 197 | 193 | 4 | 2% |

Tabella 1: Confronto dei risultati tra le analisi sperimentali ed analisi FE.

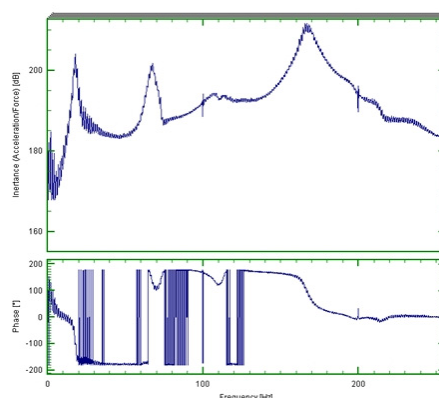


Figura 4: Inertanza della piastra in PA66GF35 ricavata durante l'analisi modale sperimentale.

È interessante notare, tramite analisi FE, la differenza tra i risultati del modello isotropo del materiale ($E = 7000$ MPa e $\nu = 0.39$), realizzato tramite elementi *Shell 181* presenti nella libreria di Ansys®, ed il modello derivante dalla teoria di Folgar e Tucker. Come si può vedere nella Fig. 5, le forme modali risultano pressoché invariate nel caso isotropo e nel caso anisotropo, in quanto la variazione dell'orientamento delle fibre influenza in maniera significativa solo i moti di dettaglio e, quindi, i modi di vibrare alle frequenze più alte del sistema. Un aspetto importante, però, è dato dalla variazione delle frequenze. Infatti, come si può vedere dalla Tab. 2, per basse frequenze le differenze sono piccole, diventano sostanziali, invece, a frequenze più alte con uno scarto dell'ordine dei 10 Hz.

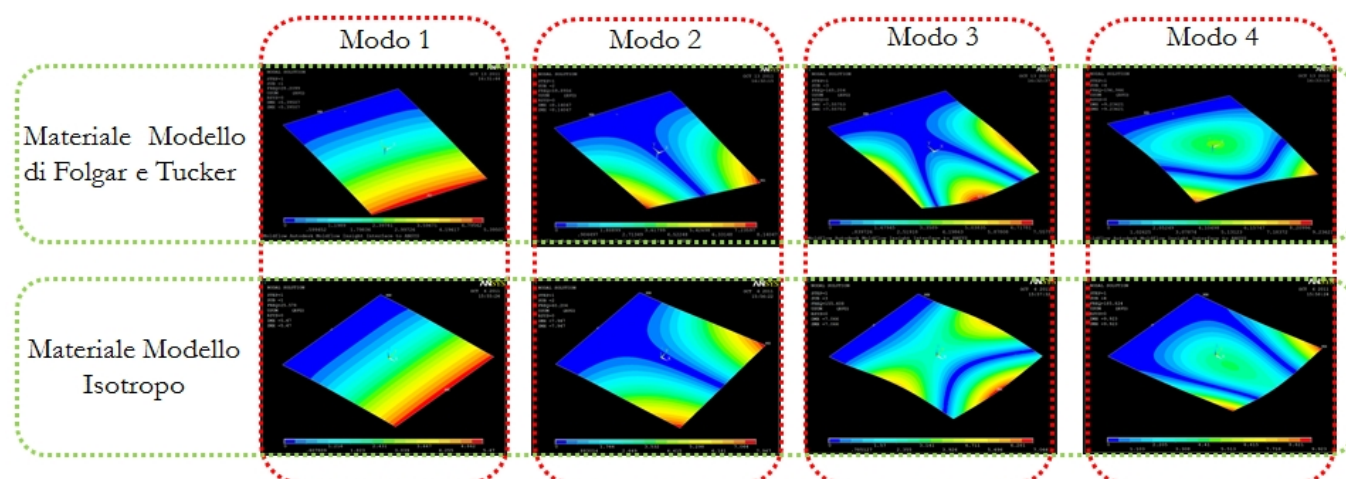


Figura 5: Confronto dei modi di vibrare delle analisi FE tra materiale anisotropo (derivante dal modello di Folgar e Tucker) e il materiale isotropo.

| n° modo | Modello di Folgar e Tucker [Hz] | Modello Isotropo [Hz] | Differenza [Hz] | Errore % |
|---------|---------------------------------|-----------------------|-----------------|----------|
| 1 | 28 | 26 | 2 | 7% |
| 2 | 60 | 60 | 0 | 0% |
| 3 | 165 | 155 | 10 | 6% |
| 4 | 197 | 186 | 11 | 6% |

Tabella 2: Confronto dei risultati delle analisi FE tra materiale anisotropo (derivante dal modello di Folgar e Tucker) e il materiale isotropo.

L'anisotropia del materiale deriva dalla fluidodinamica del processo di stampaggio ad iniezione e, quindi, dalla disposizione delle fibre di vetro nella matrice di poliammide (Fig. 3.b). Se nel modello FEM, derivante dal processo di *injection molding*



simulato in Moldflow®, si cambia il lato di incastro (Fig. 6), si può notare come i risultati abbiano una certa dispersione (Tab. 3), funzione, appunto, della “diversa disposizione delle fibre” nel sistema di riferimento assoluto del vincolo stesso. Infatti, oltre agli stessi risultati dei lati “-x” e “+x”, dovuti ad una simmetria rispetto all’asse delle y, i valori delle frequenze proprie sono molto diversi tra un caso e l’altro, fino ad arrivare a differenze dell’ordine dei 20 Hz del modo 3. È evidente, quindi, la forte anisotropia vibrazionale di materiali di questa natura e come, cambiando anche la più semplice condizione di vincolo, i risultati si discostano fortemente gli uni dagli altri.

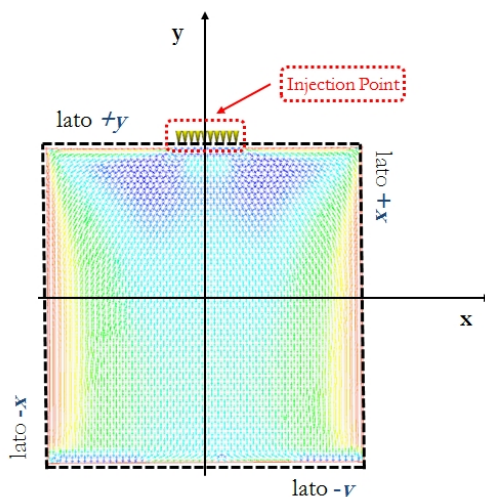


Figura 6: Denominazione dei 4 lati di incastro della piastra in PA66GF35.

| n° modo | Incastro lato "+y" | Incastro lato "-y" | Incastro lato "-x" | Incastro lato "+x" | Differenza | Errore |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|--------|
| | [Hz] | [Hz] | [Hz] | [Hz] | [Hz] | % |
| 1 | 28 | 32 | 23 | 23 | 9 | 32% |
| 2 | 60 | 63 | 59 | 59 | 4 | 7% |
| 3 | 165 | 165 | 145 | 145 | 20 | 12% |
| 4 | 197 | 197 | 206 | 206 | 9 | 5% |

Tabella 3: Confronto dei risultati delle analisi FE tra materiale anisotropo (derivante dal modello di Folgar e Tucker) e il materiale isotropo.

CONCLUSIONI

Negli ultimi anni l’impiego dei materiali compositi nella progettazione industriale ha trovato sempre più una maggiore applicazione per via del buon rapporto tra il peso e le caratteristiche meccaniche. L’impiego di polimeri rinforzati solleva, però, il problema della loro trattazione soprattutto in fase di progettazione industriale. A differenza di materiali convenzionali come l’acciaio che posso essere considerati isotropi, i materiali compositi, per la loro stessa natura, sono caratterizzati da una forte anisotropia. Inoltre, per i materiali compositi realizzati attraverso lo stampaggio ad iniezione (*injection molding*), è complessa la modellazione delle caratteristiche meccaniche. Le fibre, disperse nella matrice, si distribuiscono in funzione dei processi fluidodinamici che si sviluppano all’interno dello stampo, i quali sono connessi direttamente a quelle che sono le condizioni a contorno (temperatura, pressione, punti di iniezione, etc.). Per semplicità di progettazione, nella pratica industriale, questa tipologia di compositi è considerata come materiale isotropo.

L’obiettivo del presente studio, che nasce da un progetto di ricerca tutt’ora in corso con Magneti Marelli S.p.A. – Powertrain, è quello di confrontare i due differenti modelli (isotropo ed anisotropo) con i quali può essere trattato il materiale al fine di verificare se una modellazione semplificata (risparmio di risorse e tempo) possa essere adeguata. Per far ciò, in prima istanza, gli scriventi hanno considerato il caso di una piastra quadrata (200 x 200 mm), realizzata tramite il processo del *injection molding* in PA66GF35, di spessore pari a 3 mm. La piastra è stata.



Dopo aver realizzato il CAD, il processo del *injection molding* è stato simulazione attraverso il software Moldflow® di Autodesk® che, attraverso l'implementazione della teoria di Folgar e Tucker [1], consente di ricavare l'orientamento delle fibre per effetto della fluidodinamica che si sviluppa all'interno dello stampo. Il modello è stato calibrato eseguendo il confronto con una analisi modale sperimentale della piastra vincolata rigidamente (la differenza delle frequenze proprie si assesta intorno ai 3 Hz).

Di seguito sono stati messi a confronto i due modelli (isotropo ed anisotropo), mostrando come pur risultando le forme modali pressoché invariate, le differenze delle frequenze proprie sono sostanziali con uno scarto dell'ordine dei 10 Hz.

Infine, è stata indagata l'anisotropia del materiale stesso, derivante dalla fluidodinamica del processo di stampaggio ad iniezione. Infatti, cambiando il lato di incastro della piastra, si nota come i risultati abbiano una elevata dispersione, funzione della "diversa disposizione delle fibre" nel sistema di riferimento assoluto del vincolo stesso, fino ad arrivare ad una differenza di 20 Hz per il modo 3. È evidente, quindi, la forte anisotropia vibrazionale di materiali di questa natura e come, cambiando anche la più semplice condizione di vincolo, i risultati si discostano fortemente gli uni dagli altri.

Essendo materiali di questo genere adottati anche per realizzare componenti in campo automotive sensibilmente affetti da problemi di rumore di tipo *airborne* e *solidborne* (rumore aerodinamico e rumore connesso alla vibrazione delle superfici), è facile comprendere quale ruolo ricoprano le frequenze proprie ed i modi di vibrare del sistema in casi di tal genere. Infatti, a parità di geometria, è inequivocabilmente il materiale a incidere sulle frequenze proprie del sistema.

Quindi, come viene mostrato in questo studio, una errata trattazione dei materiali comporta una non corretta stima della problematica del rumore di tipo *solidborne*. Attualmente, il progetto di ricerca con Magneti Marelli S.p.A. – Powertrain si sta dirigendo verso il caso complesso di un collettore d'aspirazione; alle analisi modali sono anche previste della analisi numeriche acustiche accoppiate tramite software BEM.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Gupta and K. K. Wang, *Polym. Composite.*, 14 (1993), pp. 367.
- [2] N. M. Neves, A.J. Pontes, A.S. Pouzada, *J. Reinf. Plast. Comp.*, 20 (2001) 452.
- [3] M. Parsheha, M. L. Brown, C. K. Aidun, *J. Non-Newton. Fluid.*, 136 (2006) 38.
- [4] J. S. Cintra, Jr, C.L. Tucker, *J. Rheol.*, 39 (1995) 1095.
- [5] F. Caligiana, *I Materiali Compositi*, Pitagora Editrice Bologna (2002).
- [6] T. Ting, *Anisotropic Elasticity*, Oxford University Press (1996).
- [7] W. Hadley, *Mechanical Property of Solid Polimer*, Wiley & Sons Ltd. (2004).