

Numerical modelling of composite stack drilling process

Mauro Vinciguerra, Raffaele Sansone, Antonio Caraviello - Sòphia High Tech, Francesco Galise, Unina

AIM

Sòphia High Tech carried out an experimental study about the numerical modelling of the drilling process on stacks made by composite material (Cfrp/Cfrp) about a research project related to the aerospace industry. The project purpose is to simulate the drilling process on stacks in order to foresee the behaviour of a generic drilling tool during the drilling process. In particular, the predominant factor for this evaluation is the axial force on the tool and its variation in comparison to the tool wear, evaluated by the number of holes made. Through a numerical model it is possible to reduce experimental time and costs, reducing the number of prototypes and tests carried out in order to assess tool performances. In addition, it will be easier to achieve appropriate design and optimization of drilling tools.

INTRODUCTION

In the aeronautical field, the structural assembly represents a critical stage where results of the design, engineering and manufacturing process of the product converge. Assembly process represents the main part of the overall cost of the aircraft. In fact, it represents about the 50% of the total costs. The current trend, to enhance the competitiveness of the aviation industry, is to reduce manufacturing and assembly time.

The assembly process of all parts is mainly achieved through mechanical connections, in particular for composite materials parts. In fact, these parts cannot be welded nor bonded, because it is not permitted by standards of this field. The number of fasteners in a typical military aircraft is between 200.000 to 300.000, while for an airliner there are between 1.500.000 to

3.000.000 connection elements. For each of them, it is necessary to realize several holes to complete the installation among all parts. So, it becomes clear why the drilling process is considered to be a fundamental activity of the assembly process in the aeronautical field.

The interest of the aviation industry in the characterization and optimization of the drilling tools is justified in order to define materials and geometry tools able to increase its useful life.

DRILLING PROCESS MODEL

The drilling process is a machining process that allows removing material in order to obtain holes which represent the accommodation of bolts or rivets, useful to realize a joint between two or more parts. The most common and simple tool is represented by the helical drilling bit.

Modellazione numerica del processo di foratura di stack in composito

Mauro Vinciguerra, Raffaele Sansone, Antonio Caraviello - Sòphia High Tech, Francesco Galise, Unina

SCOPO

La società Sòphia High Tech ha condotto uno studio sperimentale volto alla modellazione numerica del processo di foratura di stacks in materiale composito (Cfrp/Cfrp) nell'ambito di un progetto di ricerca nel settore aerospaziale. Lo scopo del progetto è simulare il processo di foratura dei laminati in composito al fine di prevedere il comportamento del generico utensile durante la lavorazione. In particolare, fattore predominante per questa valutazione è la forza assiale agente sull'utensile e la sua variazione all'aumentare del numero di fori realizzati (usura). L'impiego di un modello numerico consente di ridurre tempi e costi della fase sperimentale, riducendo il

numero di prototipi e i test da realizzare per valutare le performance di un generico utensile. Inoltre, la progettazione di utensili da foratura ottimizzati risulterà notevolmente semplificata.

INTRODUZIONE

Nel settore aeronautico l'assemblaggio strutturale rappresenta una fase critica in cui s'incontrano i risultati delle fasi di progettazione, ingegnerizzazione e fabbricazione del prodotto. L'assemblaggio costituisce una porzione rilevante del costo complessivo di realizzazione del velivolo, infatti, può coprire fino al 50% del suo costo globale. La tendenza attuale, per rendere più competitivo il

settore aeronautico, è quella di ridurre i tempi di produzione e di assemblaggio.

L'assemblaggio delle diverse parti avviene principalmente tramite collegamenti meccanici, in particolare per i materiali compositi. Infatti, questi non possono essere saldati e l'incollaggio è molto lontano dagli standard prescritti dal settore. Il numero dei fasteners in un tipico aereo militare varia da 200.000 a 300.000 elementi, mentre in un aereo di linea da 1.500.000 a 3.000.000. Per ognuno di essi, sarà necessario realizzare dei fori per completare l'installazione dei diversi elementi. Di conseguenza, si evidenzia la rilevanza del processo di foratura che si configura come una delle

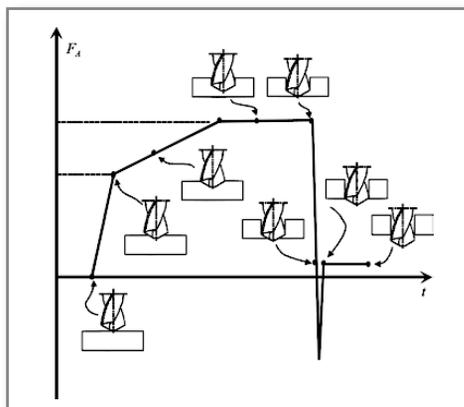


Fig. 1 - Axial force as function of time in the drilling process
Forza assiale in funzione del tempo nel processo di foratura

The drilling process on composite materials is a complex phenomenon, regulated by numerous factors, first of all cutting parameters (feed-rate and cutting speed), then the workpiece material and the drilling tool. Composite materials are anisotropic and not homogeneous, so drilling process causes specific problems that can affect the strength and fatigue behaviour of drilling tools. One of the main limitations in the drilling process of composite materials is the high tool wear caused by the strong abrasiveness of the reinforcement fibres, regardless of their shape and length. Tool wear grows up proportionally

with the volumetric percentage of reinforcement and with the vertical force exerted by the drilling tool itself. A further cause of tool wear is due to the low thermal conductivity which causes a higher heating than metallic materials. In the drilling process on carbon fiber-reinforced polymer (Cfrp), 50% of the thermal energy is absorbed by the tool and the remaining part is absorbed in part from the workpiece and in part by the chip. Instead, in drilling process on metal alloys, 75% of the thermal energy is removed by the chip, 18% by the drilling tool and 7% through the workpiece. The particular structural, thermal and abrasive features of CFRP contribute in paying attention on the choice of geometry and material of drilling tool. This choice is mainly constrained by fiber type to be cut rather than the matrix. During the drilling process, there is a vertical thrust that depends by drilling tool geometry, by tool and workpiece material, by tool wear and by the relation between cutting ratio and feed ratio. The figure 1 shows the trend of the force as function of time, step by step the cutting edge enter the workpiece.

Many types of damage are directly due to the thrust and the torque (delamination, micro-fractures,

thermal damages etc.), and that's why we need a valid numerical model of the phenomenon in order to evaluate the influence of various parameters on the values of axial force.

The model has been realized using CAD and FEM software and it is shown in (Fig. 2).

To complete this simulation, an explicit type solver was used because the process is highly dynamic and depends by high speed of the drilling process. The 3D model is made by two composite material

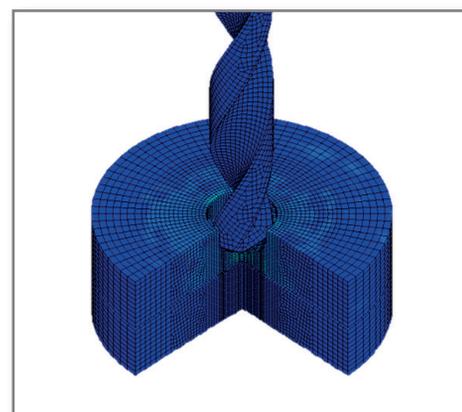


Fig. 2 - Finite Element Model of the Drilling Process
Modello ad elementi finiti del processo di foratura

attività predominanti dell'intero processo.

Tutto ciò giustifica il forte interesse del settore aeronautico nella ricerca volta alla caratterizzazione e all'ottimizzazione degli utensili, in particolar modo nell'ambito del processo di foratura.

Modello del processo di foratura

La foratura è una lavorazione per asportazione di truciolo che, per mezzo della rimozione di materiale, consente di ottenere dei fori che costituiscono alloggi per giunzioni bullonate o rivettate.

Per quanto riguarda gli utensili, il più comune e semplice è rappresentato dalla punta elicoidale.

La foratura dei materiali compositi è un fenomeno complesso, regolato da numerosi fattori, primi tra tutti i parametri di taglio (avanzamento e velocità di taglio), le caratteristiche del materiale e quelle dell'utensile. Poiché i compositi sono materiali non omogenei ed anisotropi, la foratura solleva specifici

problemi che possono influenzare la resistenza e la durata a fatica delle parti. Uno dei maggiori limiti nella foratura dei materiali compositi è rappresentato dall'elevata usura dell'utensile, causata dalla

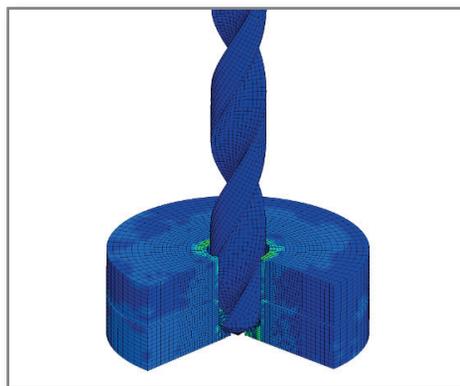


Fig. 3 - Tool feed into the CFRP laminate
Avanzamento dell'utensile nel laminato CFRP

forte abrasività del rinforzo, indipendentemente dalla forma e dalla lunghezza delle fibre. L'usura cresce proporzionalmente con la percentuale volumetrica del rinforzo e con la spinta verticale esercitata dall'utensile stesso. Ulteriore causa di usura dell'utensile è legata alla bassa conducibilità termica che provoca un riscaldamento superiore rispetto ai materiali metallici. Nella foratura dei compositi rinforzati con fibre di carbonio, il 50% dell'energia termica è assorbita dall'utensile e la parte rimanente viene assorbita in parte dal pezzo ed in parte dal truciolo. Al contrario, nella foratura dei metalli il 75% dell'energia termica è eliminata con il truciolo, il 18% dall'utensile e il 7% attraverso il pezzo. Le particolari caratteristiche strutturali, termiche e abrasive dei CFRP fanno sì che nella foratura sia posta particolare attenzione alla scelta della geometria e del materiale dell'utensile: tale selezione è vincolata soprattutto dalla tipologia

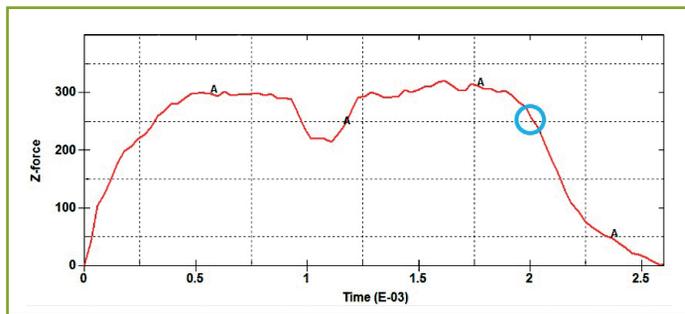


Fig. 4 -Axial force as function of the time in FE Environment
Avanzamento della forza assiale in funzione del tempo in ambiente FE

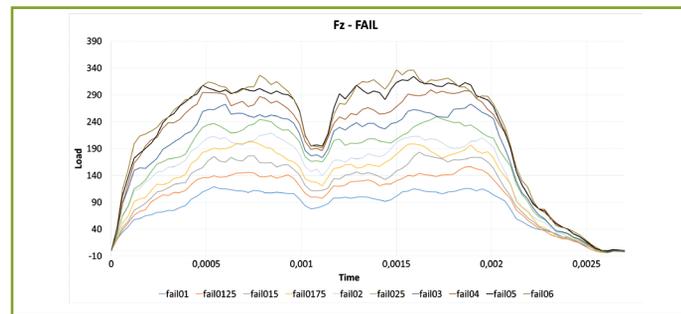


Fig. 5 -Forza assiale in funzione del tempo e del FAIL in ambiente FE
Axial force as function of the time and FAIL in FE environment

cylinders (Cfrp-carbon fiber reinforced polymer) and of a hard metal helical drilling bit (cutting angle 90 ° and diameter 6.35mm). The final thickness of the single laminate, part of the stack, is 5 mm and it is obtained following the layering of 26 plies according to the following lay-up:

[F/G, 45°T, -45°T, 0°T, 45°T, -45°T, 90°T, 45°T, -45°T, 0°T, -45°T, 90°T, 45°T, 90°T, 90°T, 45°T, 90°T, -45°T, 0°T, -45°T, 45°T, 90°T, -45°T, 45°T, 0°T, -45°T, 45°T, F/G]

We referred to some experimental data collected useful to carry out experimental numerical

comparison, in order to validate the accuracy of the behaviour reproduced by our numerical model. The numerical model simulates the drilling tool while entering the stack and it returns as output the resulting force along the tool axis faithfully to the experimental data (Fig. 3 and 4). Moreover, an added value of the model is to be able to define the relationship between the value of the FAIL (parameter that controls the participation of the individual finite elements of the model analysis, as a function of reference energy criteria), to be associate to workpiece material, and the tool wear that you want to replicate in the analysis. In this way, without performing experimental

tests, you can evaluate resulting force values with the variation of the tool wear, workpiece material and tool geometry. In figure 5 and 6 there is a numerical-experimental comparison and it is possible to appreciate how the resulting curve of the axial force reaches higher peaks, varying the value of fail of the elements in the model. Therefore, it is possible on the basis of the test performed and of the experimental-numerical comparison, to express the relationship between the drilling bit wear, expressed as "number of completed holes", and the numerical value of elements fail (Fig. 7). Through this curve it is possible reproduce and predict the resulting forces in the case of worn

della fibra da tagliare piuttosto che della matrice. Durante la foratura nasce una spinta verticale, che dipende non solo dalla geometria dell'utensile, ma anche dal materiale, dall'usura e del rapporto tra velocità di taglio e di avanzamento. La figura 1 mostra l'andamento della forza in funzione del tempo man mano che il bordo del tagliente impegna il pezzo. Molte tipologie di danno sono direttamente legate alla spinta ed al momento torcente (delaminazione, micro-fratture, danni termici ecc.), ed è per questo che si rende necessaria una valida modellazione del fenomeno in modo da valutare l'influenza di vari parametri sui valori assunti dalla forza assiale. Il modello realizzato mediante l'utilizzo di software CAD e FEM è mostrato in figura 2. Per fare ciò è stato utilizzato un solutore

di tipo esplicito dal momento che il processo risulta fortemente dinamico e dipende dalle alte velocità in gioco. Il modello 3D costruito consta di due cilindri rappresentativi del materiale composito (Cfrp-carbon fiber reinforced polymer) e di una punta di tipo elicoidale in metallo duro (angolo del

tagliente 90° e diametro 6,35mm). Lo spessore finale del singolo cilindretto costituente lo stack è di 5mm ed è stato ottenuto in seguito alla stratificazione di 26 plies, secondo il seguente lay-up:

[F/G, 45°T, -45°T, 0°T, 45°T, -45°T, 90°T, 45°T, -45°T, 0°T, -45°T, 90°T, 45°T, 90°T, 90°T, 45°T, 90°T, -45°T, 0°T, -45°T, 45°T, 90°T, -45°T, 45°T, 0°T, -45°T, 45°T, F/G]

Per la taratura del modello si è fatto riferimento a dati sperimentali ed è stato pertanto eseguito un confronto numerico sperimentale parallelo alla modellazione numerica, al fine di valutare la veridicità del comportamento del modello numerico. Il modello simula l'avanzamento dell'utensile all'interno dello stack e restituisce

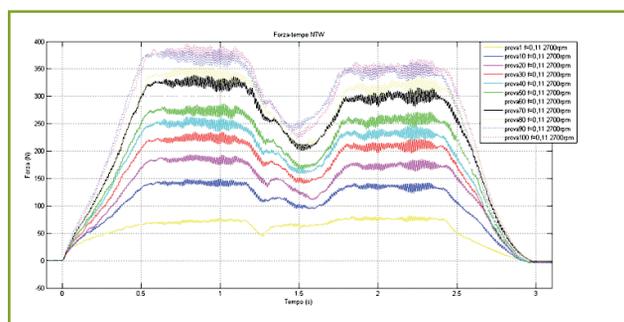


Fig. 6 -Experimental curves about axial forces as function of time and wear
Curve sperimentali dell'andamento della forza assiale in funzione del tempo e dell'usura

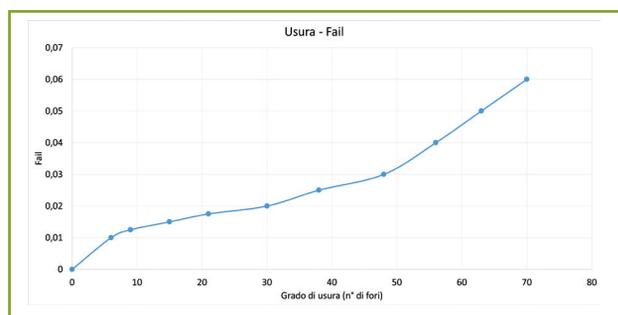


Fig. 7 -EFAIL as function of the tool wear in FE environment
Andamento del FAIL in funzione dell'usura dell'utensile in ambiente FE

out drilling bit after an amount of holes realized. In fact, setting a higher and higher Fail value in the numerical model, it is possible to reach an higher resulting force along the tool axis, which corresponds to the resulting force due to the tool wear. After many numerical simulations, and in parallel with experimental data available, it has been established a correlation between tool wear and the fail value set to the finite elements of the workpiece.

The numerical model allows simulating the drilling processes, through failure and progressive elements deleting, and trend of resisting force along the axis of the drilling bit in all phases of the tool feed in the stack. In addition, the added value of the model consists in the possibility to predict the interface forces necessary to simulate the process with a different tool, with certain degree of wear in terms of number of holes realized. That is possible by setting a value of "fail" in the

CONCLUSION

In the present research activity about the simulation of the drilling process of composite stacks, the obtained model (Fig. 8 and 9) responds coherently with the requirements, in particular in reference to the comparison with the experimental data obtained by laboratory tests.

material sheet.

Furthermore, it is possible to simulate the process characterized by different tips having a similar geometry to the helical drilling tool present on the market, guaranteeing excellent results (with a mean deviation from the experimental data around 5-10%).

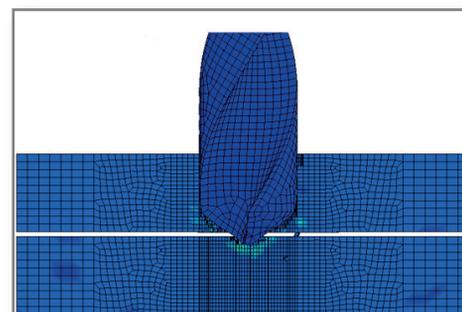


Fig. 8 -Finite element model of drilling process in a generic time step
Modello numerico del processo di foratura in un generico istante temporale

la forza risultante lungo l'asse dell'utensile in maniera fedele ai dati sperimentali (Fig. 3 e 4). Inoltre, valore aggiunto del modello è riuscire a definire la relazione esistente tra il valore del FAIL (parametro che controlla la partecipazione dei singoli elementi del modello all'analisi, in funzione dei criteri energetici di riferimento) da associare al materiale e il grado di usura dell'utensile che si vuole replicare nell'analisi. In questo modo senza eseguire prove sperimentali è possibile ottenere

i valori della forza risultante al variare dell'usura della punta, del materiale da forare e della geometria dell'utensile.

Nelle figure 5 e 6 c'è un confronto numerico-sperimentale ed è possibile apprezzare come al variare del valore di fail degli elementi, la curva risultante raggiunga appunto picchi diversi. È quindi possibile, sulla base dei dati sperimentali, esprimere la relazione che esiste tra grado di usura della punta, espresso come "numero di fori realizzati" e valore numerico del fail degli elementi (Fig. 7).

Attraverso questa curva è possibile riprodurre e prevedere le forze risultanti nel caso di punta usurata dopo un certo numero di fori realizzati. Infatti, impostando man mano un fail maggiore all'interno della simulazione si ottiene una forza risultante maggiore lungo l'asse dell'utensile, che corrisponde alla forza esercitata dall'utensile. A valle di numerose simulazioni e in parallelo con i dati sperimentali a disposizione si è riusciti a stabilire una relazione sperimentale che permettesse di legare appunto il grado di usura al valore di fail degli elementi finiti.

CONCLUSIONI

Nell'ambito dell'ampio lavoro di simulazione del processo di foratura di stacks in composito, il modello ottenuto (Fig. 8 e 9) risponde in maniera coerente a quanto richiesto, soprattutto in merito al confronto effettuato con i dati sperimentali ottenuti dalle prove di laboratorio. Il modello creato riesce a simulare, mediante fallimento ed eliminazione progressiva degli elementi, il processo di foratura e restituisce un andamento della forza resistente lungo l'asse della punta in tutte le fasi dell'avanzamento dell'utensile nello stack.

Inoltre, valore aggiunto del modello è quello di riuscire a prevedere le forze di interfaccia nel caso si voglia simulare il processo con un utensile differente ipotizzando un determinato grado di usura in termini di numero di fori realizzati. Ciò è possibile impostando a priori un certo valore di fail nella scheda del materiale. Peraltro, è possibile simulare con ottimi risultati (scarto medio dai dati sperimentali del 5%) il processo con differenti punte caratterizzate da una geometria analoga alle punte elicoidali presenti in commercio.

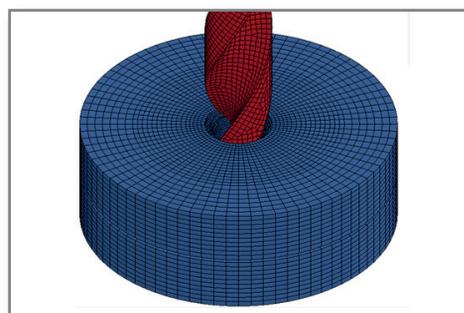


Fig. 9 -Global FEM of the drilling process
Modello globale del processo di foratura in ambiente FE