



**Figura 2**  
Modello STL del componente e relativa mesh "voxelizzata".

I fenomeni di durata a fatica sono generalmente studiati con l'ausilio di simulazioni elastiche lineari, mentre le tensioni di precarico sono generalmente ottenute attraverso simulazioni non lineari: il metodo sviluppato consente di linearizzare la soluzione non lineare ottenuta da una simulazione di precarico, ipotizzando che quest'ultima conduca a spostamenti piccoli della struttura (nessun cambiamento sensibile nei punti di applicazione di forze e coppie) e non causi effetti di plasticità globale, ma solamente effetti di piccola plasticità locale. Di fatto, tali ipotesi sono vere per quanto riguarda la maggior parte delle attuali tecnologie di produzione.

### Il modello per la simulazione

Il concetto che sta alla base del metodo di simulazione ideato dal team di Phitec Ingegneria è quello di utilizzare una mesh "ponte" in grado di ricevere le informazioni dalla mesh usata per il calcolo non lineare di precarico e dalla mesh usata per il calcolo linearizzato. Questa nuova mesh dovrà essere facile da generare e i suoi elementi dovranno essere velocemente interrogabili, in modo da poter eseguire la mappatura dei risultati del calcolo non lineare e del calcolo linearizzato. Per il caso in esame si è deciso di utilizzare una mesh composta da elementi cubici (chiamati voxel), generabile automaticamente utilizzando un programma open-source denominato binvox che esegue l'operazione in oggetto a partire dalla superficie del componente solido originario in

formato STL. La mesh ottenuta per voxelizzazione presenta tra l'altro il vantaggio che ciascun elemento nello spazio è individuabile per mezzo di tre soli indici interi.

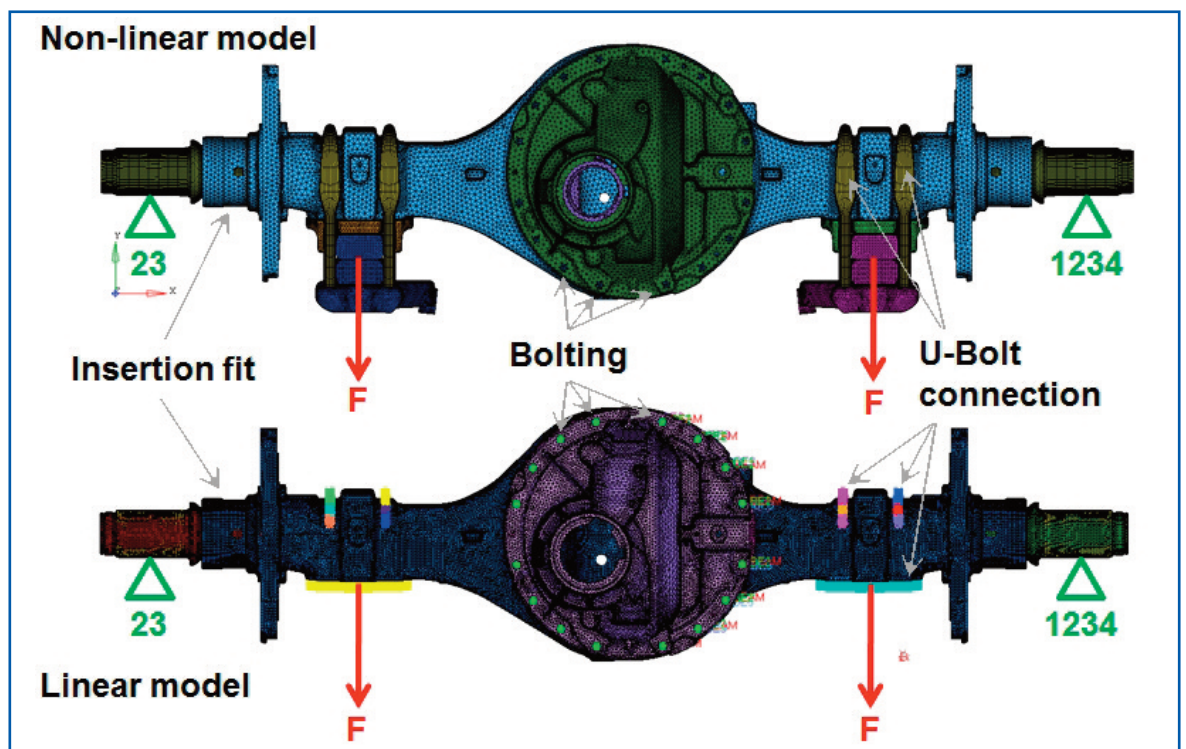
Le informazioni di pretensione calcolate sul modello non lineare con MSC Nastran SOL 400 vengono poi mappate sulla mesh a cubetti. In maniera analoga, vengono mappate sullo stesso modello le informazioni del calcolo linearizzato eseguito con MSC Nastran SOL 101.

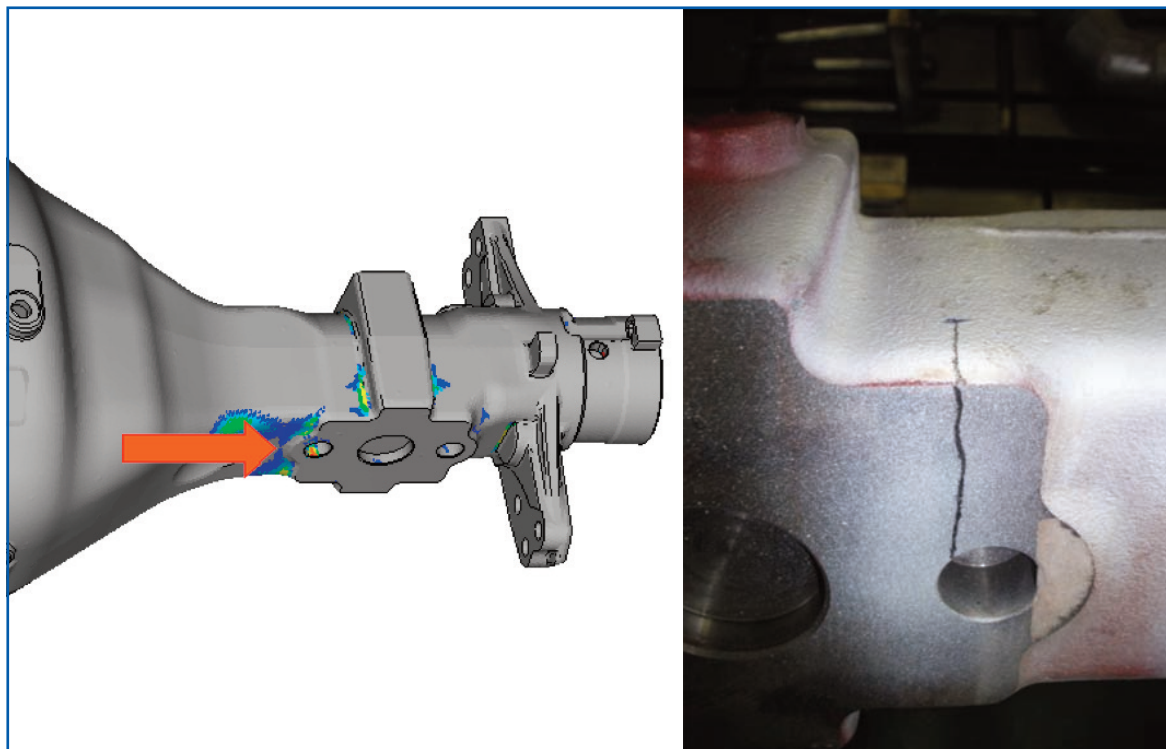
Affinché il campo tensionale del caso linearizzato si avvicini il più possibile al campo tensionale del caso non lineare, sarà necessario determinare il valore di opportuni coefficienti di peso: questa operazione viene svolta da un software di ottimizzazione open-source chiamato DAKOTA. Nel caso in esame, l'ottimizzatore viene utilizzato per determinare l'insieme dei pesi che, attraverso la combinazione lineare dei casi linearizzati, minimizzano (ed è questa la funzione obiettivo dell'ottimizzatore) lo scostamento del campo tensionale da quello ottenuto dal calcolo non lineare. Si è constatato che sono necessarie poche iterazioni per arrivare alla convergenza dei valori dei pesi.

Una volta determinati i pesi è possibile eseguire un'analisi di fatica dettagliata che tiene conto dei precarichi linearizzati e del carico ciclico: In fig. 3 è possibile notare che il modello non-lineare (in alto) è composto da diversi componenti che si scambiano forze di contatto, inoltre la taglia della mesh (dimensione dell'elemento) è maggiore per velocizzare l'analisi (questo non introduce degli errori significativi nella simulazione perché l'interesse è nella redistribuzione dei carichi, piuttosto che nell'analisi tensionale di dettaglio). Il modello lineare è invece composto da un unico componente e la taglia della mesh è più fine, perché c'è la necessità di valutare i picchi tensionali che sono nocivi per la vita a fatica. La possibilità offerta dalla mesh voxelizzata è quella di mettere a disposizione una rappresentazione comune (la geometria del componente oggetto di studio è la stessa) delle due griglie di calcolo.

Per l'esecuzione del calcolo a fatica sul modello lineare il team di Phitec Ingegneria ha sviluppato una procedura verticale completamente automatica basata sull'utilizzo di un modello MSC Nastran e di un file di risultati in formato OP2. La procedura esegue MSC Patran e MSC Fatigue in modalità batch e mappa i valori della vita a fatica in una versione modificata del file OP2, il che consente all'utente una grande flessibilità di visualizzazione in fase di post-processazione dei risultati.

**Figura 3**  
Modello non lineare completo del componente e modello linearizzato con carichi applicati per il calcolo a fatica.





**Figura 4**  
Confronto delle  
aree di rottura  
a fatica  
predette dalla  
simulazione e  
misurate in  
laboratorio.

## Conclusioni e sviluppi futuri

La procedura presentata è stata utilizzata in produzione dal team Phitec Ingegneria allo scopo di introdurre importanti riduzioni di massa nel componente in esame, determinando le opportune variazioni di spessore delle geometrie del componente stesso. Partendo da una geometria di alloggiamento non ottimizzata, è stato possibile ottenere una riduzione di peso del 8% che, per un componente caratterizzato dal peso di oltre un centinaio di kg, costituisce un ottimo risultato. L'analisi a fatica del componente ottimizzato mostra che quest'ultimo raggiunge i parametri di vita richiesti dal cliente: prolungando l'applicazione dei carichi ciclici fino alla rottura, è stato inoltre verificato attraverso un paragone con opportune prove sperimentali che il cedimento a fatica avviene esattamente nei punti predetti dalla simulazione.

Tutte le fasi che compongono la procedura di simulazione, sviluppate in linguaggio Python, risultano molto efficienti dal punto di vista computazionale: la parte meno veloce di tale procedura è rappresentata dalla fase di mappatura del campo di stress sul modello voxelizzato, che nel caso in esame richiede 50 ore di CPU time. Tale fase può però essere velocizzata tramite una procedura di domain split opportuna. La metodologia sviluppata, utilizzata nel caso in esame per la previsione della vita a fatica di un componente, risulta essere applicabile anche per rappresentare effetti più generici, tra cui ad esempio la mappatura dei difetti o di altre caratteristiche locali del materiale, il trattamento termico, gli stress residui di saldatura ed altro ancora. L'attuale implementazione, che supporta file di risultati in formato SOL 101 e SOL 400, è teoricamente estendibile anche per altre applicazioni di calcolo.

### Meritor

Meritor è una multinazionale americana specializzata nella progettazione, produzione e commercializzazione di componenti per veicoli industriali, veicoli speciali e militari e conta 11.000 dipendenti in 20 Paesi. La Meritor HVS Cameri S.p.A sorge a Cameri a fianco dell'Aeroporto Militare, con una superficie totale pari a 136.000 mq (di cui 80.000 coperti) e uno staff di 550 persone. Lo stabilimento, che ha visto gli albori agli inizi del secolo come scuola di volo prima e poi come officina per la produzione di aerei, dopo il secondo conflitto mondiale si converte alla produzione di autobus e filobus sino alla fine degli anni '70, quando alla proprietà Iveco subentra

in compartecipazione la Rockwell Int. per la produzione di assali e freni per veicoli industriali. Da metà degli anni '80 la proprietà passa al 100% agli americani. Da Rockwell nasce così nel 1997 la Meritor, spin-off del settore automotive. Oggi lo stabilimento di Cameri può annoverare tra i suoi principali clienti i più grandi produttori di veicoli industriali e commerciali europei. Inoltre, Cameri è Headquarter Europeo del gruppo per la progettazione, la ricerca e lo sviluppo dell'assale: azienda sensibile all'ambiente e all'ecologia, Meritor ha posto grande attenzione anche alla progettazione di ponti elettrici per uso urbano.

### Phitec Ingegneria

Phitec Ingegneria è una società di servizi e consulenza nata a Rivoli (TO) nel 2002, specializzata in simulazioni numeriche basate sul metodo degli elementi finiti (FEM) nel settore meccanico e fluidodinamico (CFD) applicate alla ricerca e allo sviluppo prodotto. Il team della società è composto da 30 persone di cui 21 laureate in ingegneria meccanica, aeronautica e civile. A supporto degli ingegneri la società è dotata di un cluster di calcolo da oltre 128 processori che permette di eseguire analisi in transitorio (crash

oppure fluidodinamiche) in poche ore. La missione di Phitec Ingegneria è di sviluppare continuamente competenze e innovazioni ingegneristiche per fornire ai clienti servizi competitivi e efficaci, dalla fase di concezione a quella di testing del prodotto, attraverso simulazioni numeriche di elevata qualità. I servizi di Phitec Ingegneria rappresentano un significativo contributo all'accuratezza, efficienza e know-how nel campo delle simulazioni strutturali per i principali OEM del settore dei trasporti in Italia e all'estero.