

CASE STUDY

NUOVE METODOLOGIE DIAGNOSTICHE PER L'ANALISI DI PRODOTTI REALIZZATI MEDIANTE ADDITIVE MANUFACTURING

DAVIDE MAVILLONIO - ASOTECH SRL
FABRIZIO ROSI - TEC EUROLAB SRL
FABIO ESPOSITO - TEC EUROLAB SRL





INTRODUZIONE

Nell'industria moderna le problematiche di affidabilità su componenti meccanici ricoprono un ruolo importante: la tomografia accoppiata ad analisi strutturali FEM può permettere di eseguire valutazioni a fatica per migliorare i criteri di accettabilità su componenti realizzati in fusione o additive manufacturing.

Asotech e TEC Eurolab hanno unito le proprie competenze per creare un nuovo servizio che permette di individuare tramite tomografia difetti all'interno delle fusioni e di eseguire verifiche FEM a fatica della geometria rilevata; è inoltre possibile approfondire l'indagine inserendo test sperimentali di validazione ed ottimizzazione del componente.

Nell'ottica di illustrare nei dettagli le potenzialità del nuovo servizio, si sono svolte attività di tomografia industriale e analisi strutturale FEM applicate a problemi di difettosità di pale aeronautiche realizzate in additive manufacturing.



DIFETTOLOGIA E TOMOGRAFIA

Il mondo dell'additive manufacturing mostra alcuni difetti tipici della tecnologia: TEC Eurolab, con il contributo della tomografia industriale e nell'analisi metallurgica, ha sviluppato negli anni un ampio database come visibile in Figura 1; le problematiche più ricorrenti sono l'inclusione di gas e la mancata fusione.

La tomografia industriale computerizzata è un metodo di ispezione radiografico che dà informazioni su un oggetto nelle tre dimensioni a partire da un certo numero di proiezioni radiografiche prese su piani trasversali all'oggetto o sul volume completo. Tali scansioni includono le geometrie reali e gli eventuali difetti interni con risoluzioni che possono arrivare al di sotto dei 10µm. TEC Eurolab dispone di due macchine tomografiche che elaborano, in tempi rapidi, componenti anche di grandi dimensioni come basamenti di motori o pale di turbine. La prima è una NSI x5000 con tubo radiogeno microfuoco da 240kV che permette di scansionare volumi che arrivano ad occupare cilindri di 1300 mm per 500mm di diametro con risoluzioni che arrivano al di

sotto dei 10 μm per volumi piccoli. La seconda è una NSI x7000 con tubo radiogeno minifuoco da 450kV che scansiona volumi fino a cilindri di ben 3000mm per 1500mm di diametro con risoluzioni migliori di 100 μm utilizzando particolari modalità di scansione.

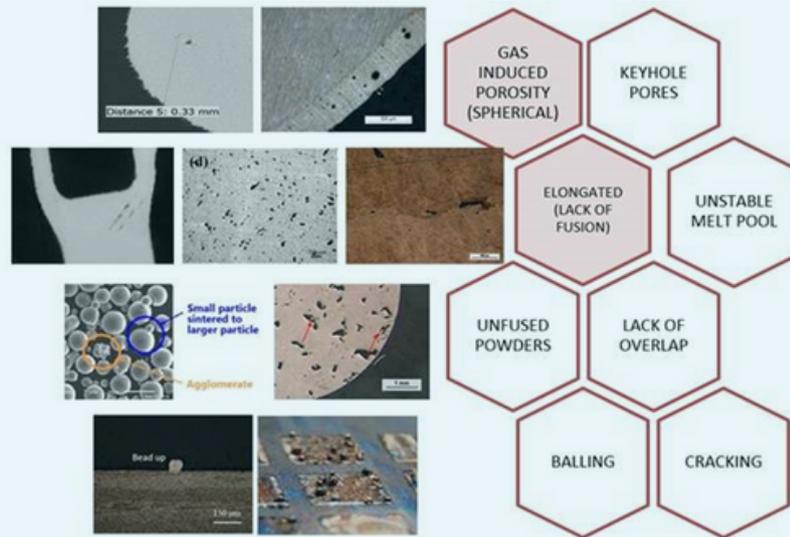


Fig. 1 - Difetti rilevabili in additive manufacturing e fusioni.

TOMOGRAFIA E ANALISI VIRTUALI

Con la precisione raggiunta dalla tomografia sui modelli virtuali fedeli nelle dimensioni e contenenti eventuali difetti prodotti dalle varie fasi di produzione (sia essa tradizionale o innovativa come l'additive) diventa possibile estendere le potenzialità dell'analisi agli elementi finiti anche a geometrie reali. Il modello realizzato in formato STL può quindi essere oggetto di analisi FEM per indagare le eventuali conseguenze negative dei difetti presenti o dalle differenze dimensionali. La correlazione tra analisi virtuali e sperimentazione può poi essere estesa realizzando prove a trazione o test a fatica sui componenti analizzati per validare i risultati ottenuti dalle analisi FEM a fatica. Le analisi FEM realizzabili con questa tecnica sono le stesse ottenibili partendo da modelli 3D generati con i tradizionali strumenti CAD; la differenza in questo caso, però, è la disponibilità della geometria reale del componente, difetti e imperfezioni da produzione compresi. Tutto questo offre la possibilità di indagare durante i controlli di qualità se un difetto (ricorrente o meno) possa generare inaccettabile affidabilità in componenti soggetti a fatica. La procedura proposta è quindi utile per aumentare l'affidabilità dei componenti meccanici e in generale offre un approccio innovativo per la tematica del controllo di qualità (schema, figura 2). TEC Eurolab e Asotech hanno avviato una collaborazione nella quale la prima offre le proprie competenze nel campo nella tomografia, nella realizzazione dei modelli STL e dei test sperimentali, la seconda apporta le proprie competenze nell'analisi FEM e nella progettazione per la risoluzione delle criticità.

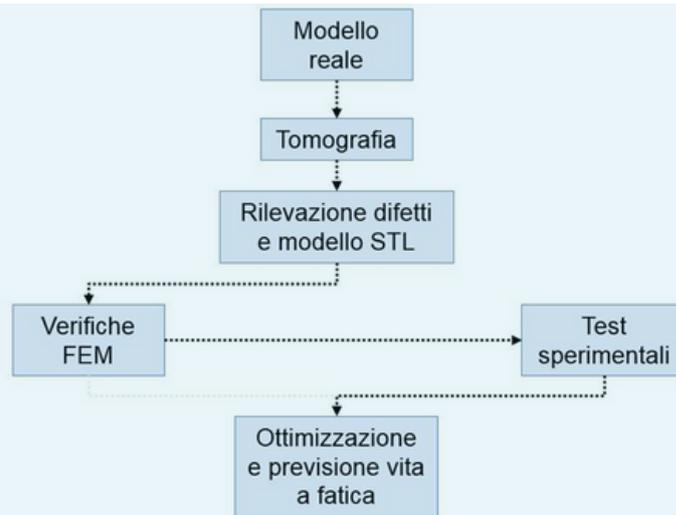


Fig.2 - Flusso logico della procedura tomografia/analisi FEM/test.

TURBINE AERONAUTICHE: CASE STUDY

A dimostrazione della potenzialità del metodo sviluppato, si è deciso di realizzare campioni di pala di turbina aeronautica in additive manufacturing in alluminio $AlSi10Mg$ (Figura 3) contenenti difetti tipici della tecnologia: porosità da gas e mancata fusione (due geometrie dedicate a quest'ultimo). Come si vede in Figura 4, i difetti stampati introdotti direttamente nel modello CAD di partenza per la generazione dell'STL di stampa e sottoposti a tomografia, sono stati rilevati dalla tomografia e tradotti in un file in formato STL.

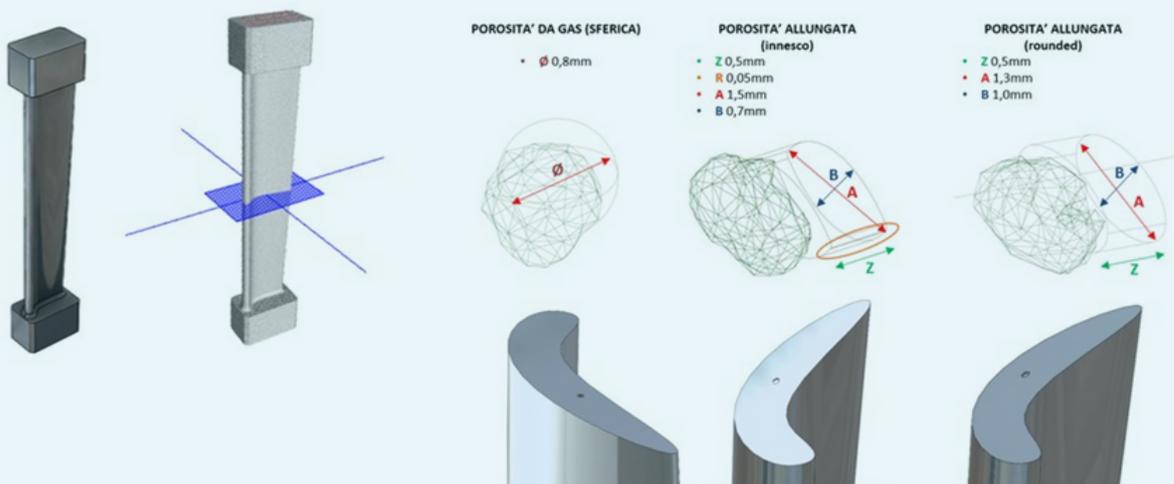


Fig. 3 - Geometria stampata

Fig. 4 - Geometria stampata e difetti

Dalla scansione tomografica risultano evidenti i difetti introdotti; in particolare, per la geometria con difetto da porosità, è evidente il mantenimento della forma sferica ($\varnothing 0,8$ mm) con parziale collasso della geometria stampata. (figura 5).

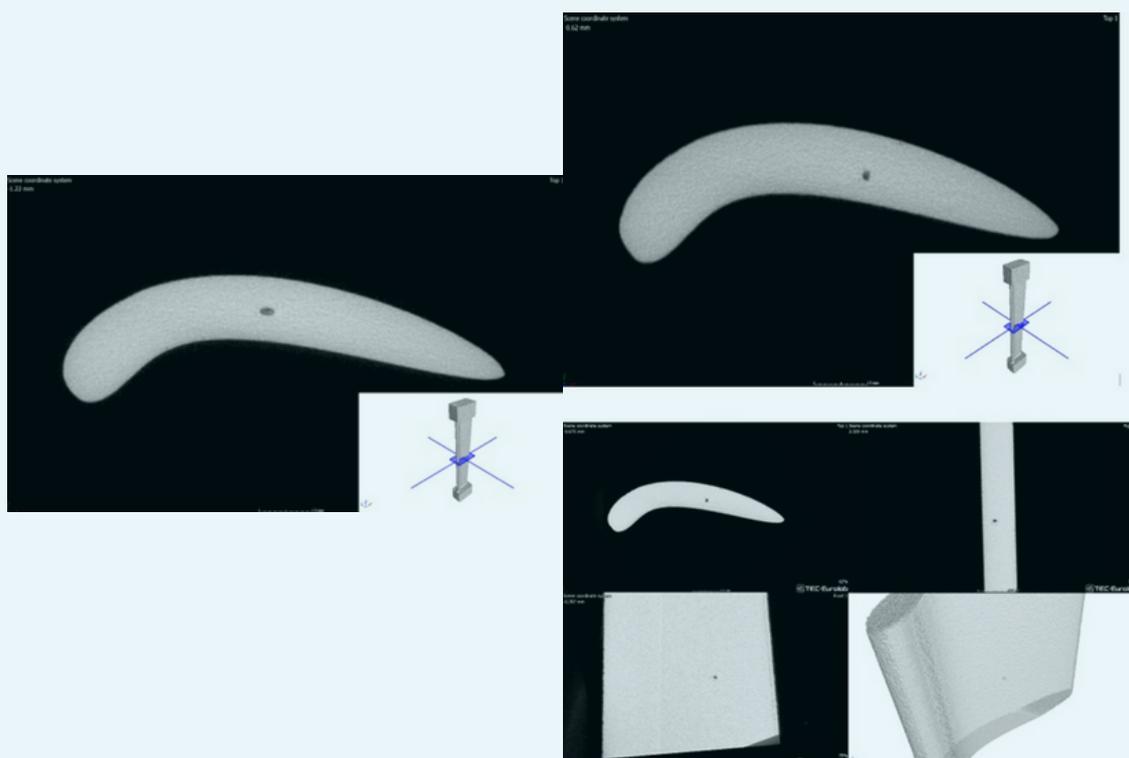


Fig. 5 - Risultati tomografia

VERIFICA A FATICA DELLA PALA

Asotech, partendo dai file STL generati dalla tomografia, ha eseguito una analisi a fatica sulla pala con il fine di stabilire la vita del componente: data la volontà di eseguire una correlazione tra i risultati virtuali e quelli sperimentali, si è deciso di imporre una semplice forza di trazione/compressione alternata (Figura 6).



Fig. 6 Impostazione modello FEM in Ansys Workbench

Durante l'analisi, si è prestata particolare attenzione alla meshatura dei modelli, con l'introduzione di elementi più raffinati in prossimità del difetto e dei raggi di raccordo ai masselli; queste, infatti, sono le zone più soggette a potenziali cedimenti a fatica.

Per quanto riguarda il materiale, si è assunto un modello isotropo con caratteristiche tipiche dell'alluminio e vita a fatica di 2'000'000 di cicli con ampiezza pari a 100 MPa. Per quanto riguarda il difetto dovuto a gas, si è imposta una forza alternata di 10'000 N applicata sul massello. Le analisi FEM mostrano una marcata criticità sia sul raggio di raccordo sia nella zona con il difetto; nella zona di raccordo, le tensioni appaiono molto diffuse ed omogenee e non sono presenti singolarità: con il valore di forza sopraindicato, la vita a fatica stimata sul raccordo è di circa 680'000 cicli. Nella zona del difetto, invece, sono evidenti effetti di bordo sulle zone irregolari della mesh (Figura 7);

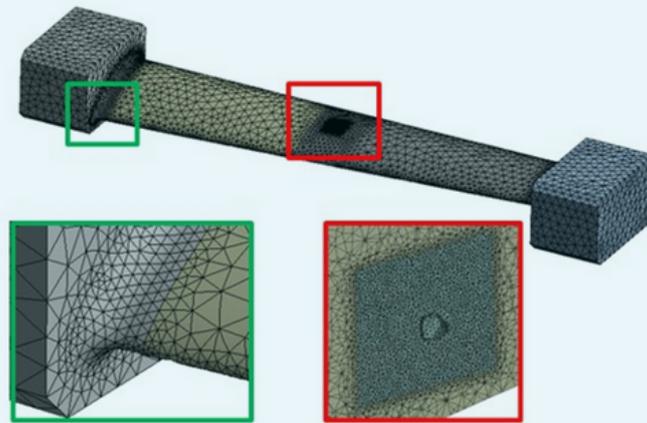


Fig. 7 - Mesh utilizzata per l'analisi

è ipotizzabile che in queste zone il componente plasticizzi localmente, ma difficilmente si avrà propagazione della cricca.

Per le altre geometrie analizzate i risultati ottenuti sono molto simili. In particolare, la pala con mancata fusione, eccitata da una forza alternata di 7'500 N, mostra una possibile rottura a fatica sul raggio di raccordo dopo 1'380'000 cicli. Le analisi sull'ultimo difetto mostrano invece una criticità dopo 1'500'000 cicli con una forza di 6'750 N (Figura 8).

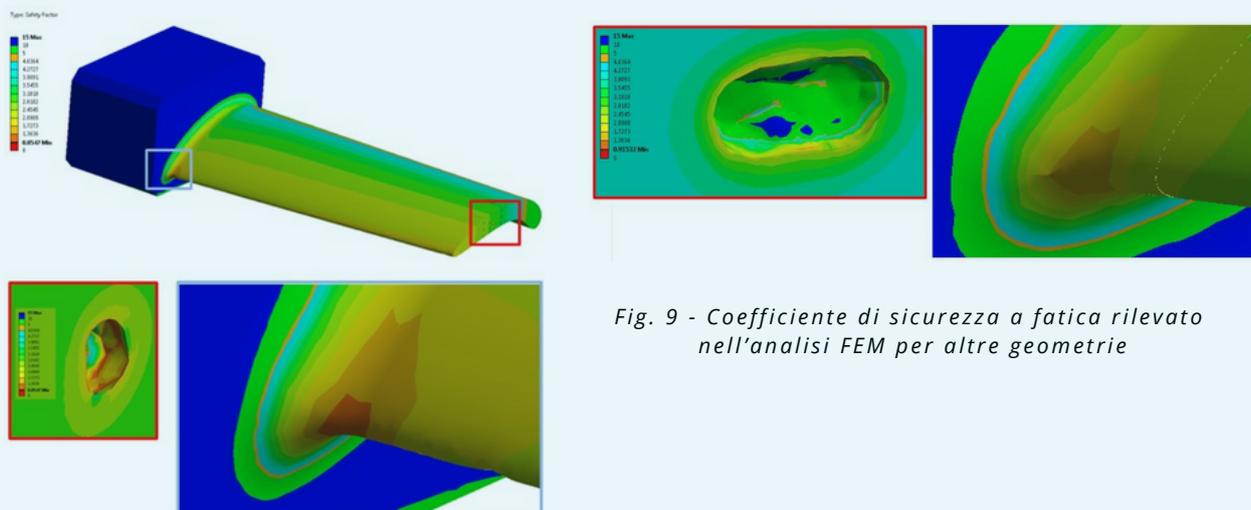


Fig. 9 - Coefficiente di sicurezza a fatica rilevato nell'analisi FEM per altre geometrie

Fig. 8 - Coefficiente di sicurezza a fatica rilevato nell'analisi FEM

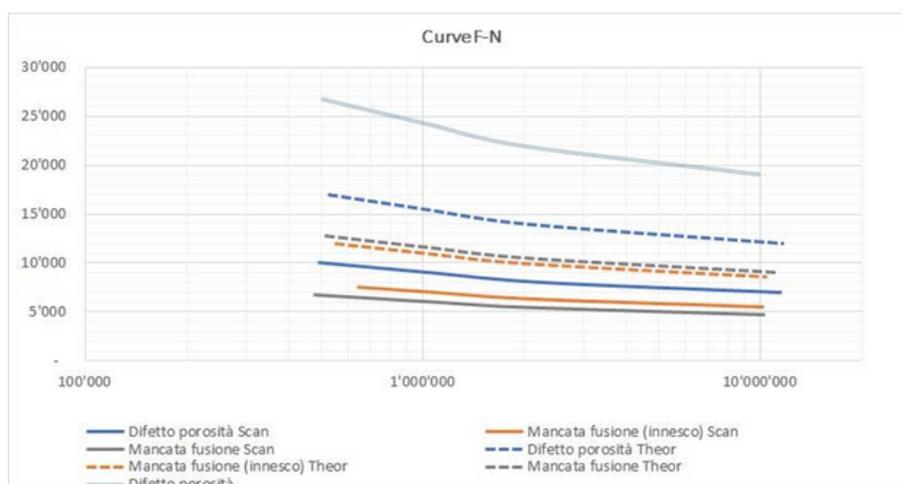


Fig. 10 - Andamento coefficiente di sicurezza a fatica

Nel grafico è visibile l'andamento della vita a fatica dei vari componenti con il confronto tra la geometria reale e quella teorica. Si può notare come l'introduzione dell'utilizzo degli STL abbia permesso da una parte una migliore correlazione dei dati e dall'altra di correggere la stima della vita a fatica con valori in media inferiori del 30% (Figura 10).

PROVE A FATICA

Per validare i risultati ottenuti dalle analisi FEM, sono stati disposti dei test a fatica con l'utilizzo presso TEC Eurolab di un sistema servo-idraulico per prove dinamiche HB500 Zwick/Roell (Figura 11):



Fig. 11 - Macchina per test a fatica

il dispositivo permette test a fatica con frequenza fino a 30 Hz, carichi fino a 500 kN e provini con dimensioni fino a 1000 mm e massa di 250 kg. I test hanno mostrato un'ottima correlazione tra sperimentazione e realtà virtuale; la metodologia proposta è quindi robusta e permette di introdurre difetti reali nell'analisi FEM e di ottenere ottime corrispondenze con i test sperimentali (Tabella 1).

Difetto	Forza applicata	Cicli FEM	Cicli test a fatica
Porosità da gas	10'000 N	680'000	612'600
Mancata fusione con innesco	7'500 N	1'380'000	1'480'000
Mancata fusione	6'750 N	1'500'000	1'547'000

Tabella 1 - Risultati ottenuti

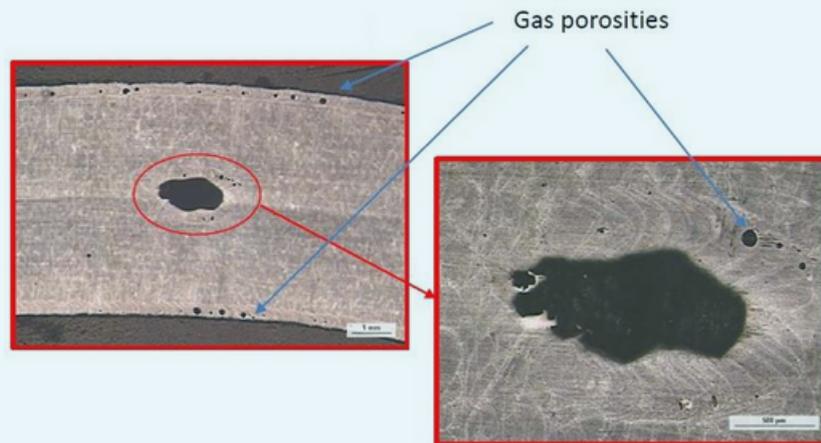
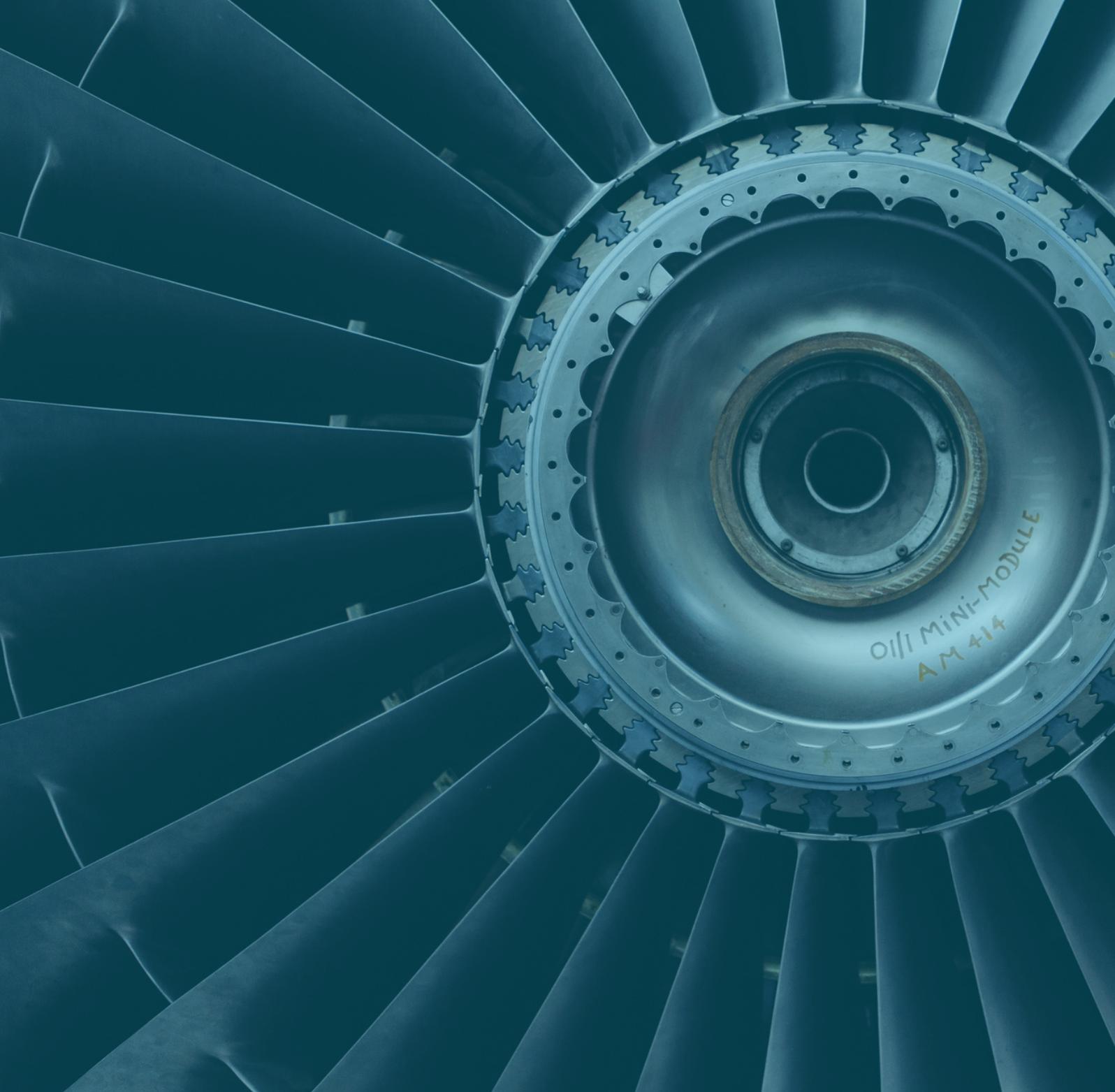


Fig. 12 - Analisi metallografica in prossimità del difetto

Successivamente ai test sperimentali, analisi metallografiche (Figura 12) hanno evidenziato che, come previsto dalle analisi FEM, nella zona del difetto non è avvenuta la propagazione della cricca. Inoltre, sono evidenti alcune porosità da gas vicino alla zona del difetto che, però, non hanno influito sulla resistenza strutturale del componente.

CONCLUSIONI

Nel presente elaborato si è sperimentata una metodologia efficace per la simulazione ad elementi finiti di componenti che presentano al loro interno difetti, di materiale o di processo, per appurarne la criticità nelle condizioni di esercizio. Definire i criteri di accettabilità di tali difetti, tenendo conto delle specifiche applicazioni, risulta spesso complicato e, per evitare il rischio di cedimenti critici, in fase di controllo qualità si utilizzano coefficienti di sicurezza elevati che comportano lo scarto dei componenti stessi a causa di difetti che potrebbero invece risultare accettabili. Ad un esame più approfondito la tomografia computerizzata è risultata lo strumento migliore per la rilevazione di tali difettosità e per l'esportazione di una superficie utile (reverse engineering) per la successiva simulazione. Cardine del presente elaborato è, quindi, la sinergia fra la tomografia industriale, la simulazione agli elementi finiti ed il test sperimentale che comprova i risultati finali: con la tomografia è infatti possibile ricostruire l'intero volume 3D del componente in esame rilevandone le dimensioni reali e riproducendone le difettosità di materiale, mentre con gli elementi finiti è possibile sfruttare tale virtualizzazione per simulare il pezzo reale stesso, comprensivo delle difettosità rilevate dalla tomografia e della geometria reale anziché la geometria CAD ideale. Infine, con il test sperimentale è stato possibile comprovare la validità della procedura utilizzata attestata dall'allineamento tra i risultati simulati e quelli ottenuti con la prova sul campo.



FOLLOW US ON **in**



 **TEC·Eurolab**