

**ANALISI E CALCOLO**

ISSN 1128-3874

NUMERO 81, LUGLIO/AGOSTO 2017



Poste Italiane Spa - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 - n. 46) art.1, comma 1 - CNS Udine - € 6,00

# RIDURRE LE CONCENTRAZIONI DI TENSIONE CON IL MESH MORPHING

Prof. MARCO EVANGELOS BIANCOLINI

*Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa  
"Mario Lucertini", Università degli Studi di Roma  
"Tor Vergata"*

**Il mesh morphing consente di rimodellare in tempi molto brevi le geometrie agendo direttamente sulla griglia di calcolo utilizzata per la modellazione CAE. Piccole variazioni di forma possono fare una grande differenza. Cambiamenti di superfici investite da fluidi portano ad esempio ad importanti variazioni in termini di prestazioni fluidodinamiche. Anche nel caso delle prestazioni strutturali le concentrazioni di tensione, che possono essere rappresentate come addensamenti delle linee di flusso di forza in analogia con l'idraulica, possono essere influenzate sensibilmente intervenendo sulla forma ed ottimizzando il convogliamento delle linee di forza. In questo articolo l'analogia viene dimostrata con una applicazione strutturale del software RBF Morph, sviluppato dieci anni fa per le applicazioni aerodinamiche della Formula 1, che grazie alla sua integrazione con il solutore FEM ANSYS Mechanical consente di semplificare notevolmente la vita del progettista e di diminuire, come dimostrato in questo esempio, di più del 20% la sollecitazione massima alla radice di un intaglio.**

## INTRODUZIONE

Nella progettazione strutturale l'importanza delle concentrazioni di tensione dovute alle variazioni di forma può avere un effetto importante solo in alcuni casi. Le concentrazioni di tensione sono in primo luogo pericolose nel caso in cui il componente sia realizzato in materiale fragile; i materiali duttili consentono infatti di autolimitare le tensioni con una redistribuzione delle tensioni plastiche. Anche nel caso di materiali plastici le concentrazioni di tensione possono essere pericolose nel caso siano agenti sollecitazioni cicliche che portano al danneggiamento progressivo a fatica. Le sollecitazioni affaticanti risultano particolarmente pericolose soprattutto nelle zone soggette a carichi di trazione che promuovono la nucleazione e la propagazione di cricche di fatica. Il fenomeno può essere studiato con la meccanica della frattura modellando il difetto e la singolarità da esso generata o con metodi classici che si basano sulle grandezze tensionali agenti sul sistema integro per stimarne la sicurezza e la durata [1]. Nella progettazione dei componenti meccanici si ricorre spesso a modellazioni semplificate, in molti casi basate sulla teoria della trave, che consentono di calcolare in modo approssimato le tensioni nominali agenti. L'effetto delle concentrazioni di tensione può essere aggiunto successivamente mediante l'uso di tabelle e diagrammi per la progettazione che consentono di calcolare il coefficiente di concentrazione delle tensioni (fattore adimensionale superiore all'unità che, moltiplicato per la tensione nominale, consente di calcolare la tensione massima) in funzione di parametri di forma adimensionali per una vasta casistica di configurazioni notevoli. L'uso del metodo degli elementi finiti e la disponibilità di strumenti di calcolo molto potenti consente di migliorare notevolmente la precisione di calcolo delle concentrazioni di tensione anche per geometrie tridimensionali di notevole complessità. I moderni workflow CAE consentono di effettuare il calcolo FEM in tempi così brevi da rendere possibile la valutazione di

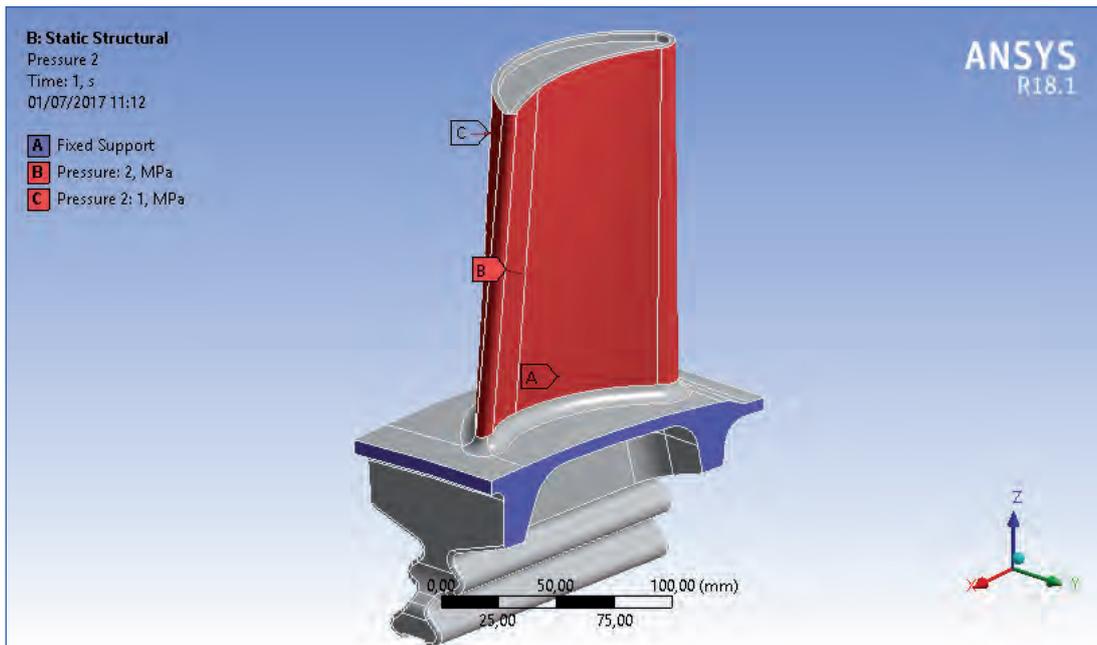


Figura 1. Modello geometrico della "Generic Turbine Blade" e condizioni di carico e di vincolo semplificate utilizzate per lo studio di questo articolo.

numerose varianti al fine di ottimizzare le prestazioni richieste al sistema in termini di valore del picco di tensione, del peso della struttura e della rigidità. Sebbene i CAD parametrici consentano di aggiornare in tempi contenuti il modello geometrico, l'aggiornamento del modello di calcolo può risultare più complicato sia per l'esigenza di dover creare una nuova griglia ma anche per il fatto che l'aggiornamento delle condizioni di carico (spesso generate interpolando campi di pressione e/o temperatura ottenuti con altri solutori) può richiedere l'aggiornamento di ulteriori calcoli CAE la cui complessità può essere molto più elevata del calcolo strutturale stesso. L'utilizzo del mesh morphing consente di creare in tempi molto contenuti dei nuovi parametri di forma intervenendo direttamente sulla mesh semplicemente aggiornando le posizioni nodali con dei campi di deformazione in grado di rappresentare la nuova geometria desiderata. Il software RBF Morph ACT Extension [2], già mostrato su questa rivista per l'ottimizzazione della forma di cerchi automobilistici [3], consente di rendere un modello FEM parametrico in tempi molto brevi senza dover aggiornare la griglia e le condizioni al contorno e si presta molto bene alle esigenze di ottimizzazione di forma.

### GEOMETRIA DI UNA PALETTA DI TURBINA

Il caso di studio Generic Turbine Blade presentato in questo articolo è stato creato e messo a disposizione da ANSYS Inc. ed è rappresentativo delle esigenze delle aziende che operano

nel settore delle turbomacchine. La geometria è rappresentata in Figura 1 dove si può notare la paletta (con profilo alare ottimizzato per le prestazioni fluidodinamiche), il raccordo di collegamento con la zona di calettamento e la geometria di collegamento alla girante; le condizioni al contorno sono state in questo caso semplificate vincolando le superfici evidenziate in colore blu e caricando le superfici in colore rosso con delle pressioni costanti.

La struttura è stata discretizzata in modo da avere una risoluzione sufficientemente elevata nelle zone maggiormente sollecitate. La griglia di calcolo è formata da circa 430.000 nodi e 300.000 elementi tetraedrici parabolici. Le superfici dei raccordi sono state discretizzate con una spaziatura di 1.5 mm ed una spaziatura di 3 mm è stata definita nelle altre zone (Figura 2). Il picco di tensione si registra alla radice dell'innestaggio ed è dovuto al carico di flessione a cui

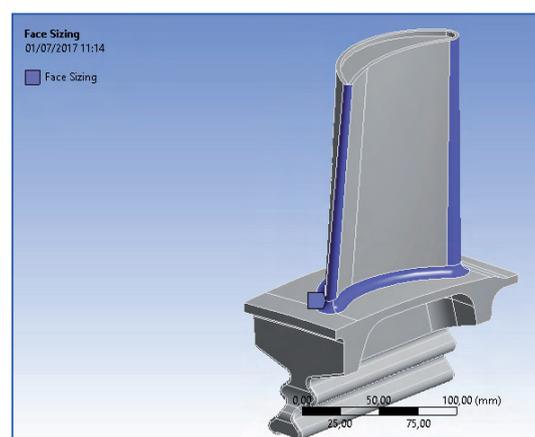


Figura 2. Le zone di infittimento della griglia (1.5 mm) sono evidenziate in colore blu.

è soggetta la paletta. Poiché l'ottimizzazione si riferisce alla fatica si è presa in considerazione la tensione principale massima al fine di evidenziare le zone sollecitate con la massima trazione: la tensione di picco risulta essere pari a circa 195 MPa (Figura 3).

to flettente nel caso di cambiamento di sezione con un raggio di raccordo assegnato.

Figura 3. Mappa della tensione principale massima calcolata con il FEM.

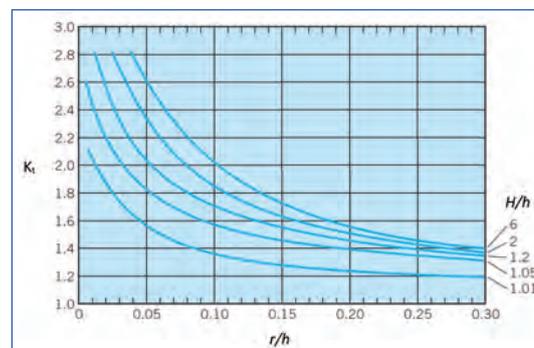
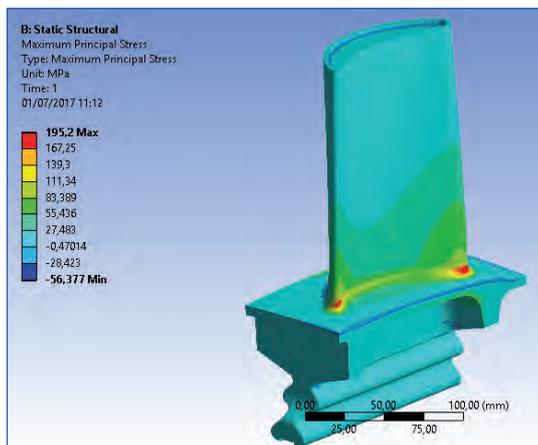


Figura 6. Andamento del fattore di concentrazione delle tensioni per lo schema notevole a cui può essere ricondotto il problema in esame [1].

### STRATEGIA ADOTTATA PER L'OTTIMIZZAZIONE DI FORMA

La Figura 4 mostra una sezione della paletta e l'andamento delle tensioni all'interno, un dettaglio della concentrazione delle tensioni è mostrato nella Figura 5.

Il metodo delle linee di flusso (mostrato in Figura 7 per il caso di un componente soggetto a trazione pura) consente di valutare la posizione e l'intensità del picco di tensione in base all'addensamento delle linee di flusso stesse.

Figura 4. Rappresentazione della mappa delle tensioni all'interno della struttura mediante una sezione trasversale all'incavo.

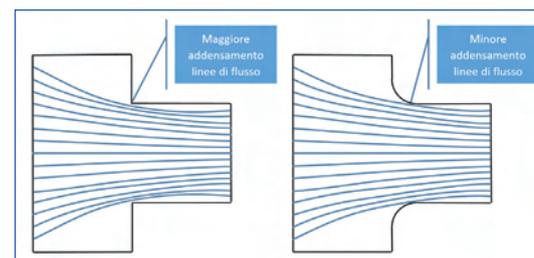
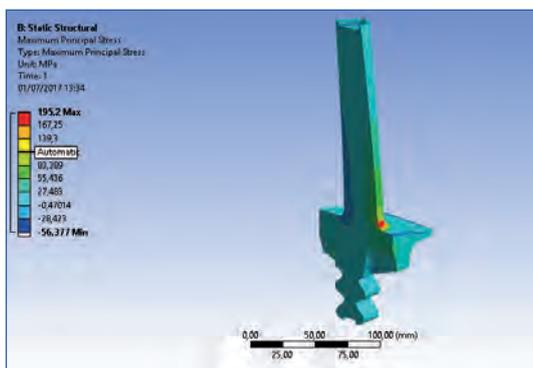
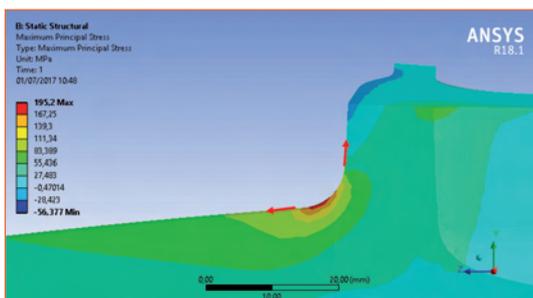


Figura 7. Metodo delle linee di flusso della forza per mostrare come una forma raccordata consenta di ridurre la concentrazione di tensione.

Figura 5. Dettaglio della concentrazione di tensione nella vista in sezione. Le frecce rosse indicano i movimenti da applicare agli estremi del raccordo al fine di variane la forma e quindi di addolcire la transizione e ridurre la concentrazione di tensione.



L'andamento osservato nella sezione laterale è riconducibile allo schema notevole riportato nella Figura 6 che consente di valutarne l'entità per una barra rettangolare soggetta a momen-

La tensione massima viene solitamente osservata in prossimità della zona con sezione retta minima dove si ha simultaneamente l'aumento della tensione nominale e il massimo addensamento delle linee di flusso. Un raggio di raccordo più ampio consente di facilitare il passaggio delle linee di flusso riducendone l'addensamento e rendendo più dolce la transizione con un effetto benefico sul picco di tensione.

Tuttavia nello studio in esame il componente ha una complessa forma tridimensionale e il principio ingegneristico non risultata di immediata applicazione. Il mesh morphing consente di applicare il concetto semplice alla geometria costruttiva della paletta. La forma del raccordo può essere ottenuta agendo in due posizioni: il punto di passaggio fra raccordo e geometria del profilo alare e il punto di collegamento fra il raccordo e la zona cilindrica del mozzo. Lo spostamento dei due punti secondo le frecce

della Figura 5 consente di cambiare la forma del raccordo.

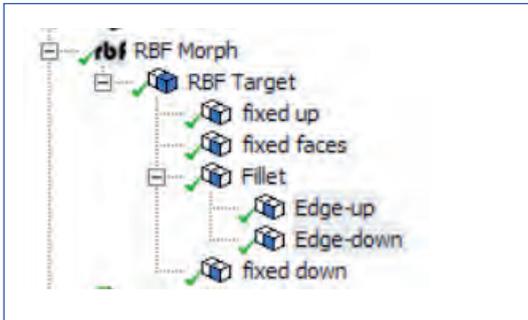


Figura 8. L'albero mostra il set-up di RBF Morph. Il volume di morphing viene controllato da nodi fissi, per delimitare l'azione del campo di deformazione, e dalla geometria del raccordo la cui forma viene controllata agendo sull'intensità dei movimenti dei bordi.

L'effetto desiderato può essere ottenuto sulla mesh tridimensionale rimodellando la forma del raccordo e propagando l'effetto nella mesh di volume mediante il set-up mostrato nell'albero di Figura 8. La superficie del raccordo è controllata dalle due curve evidenziate in Figura 9: un operatore di offset nella superficie di apparte-

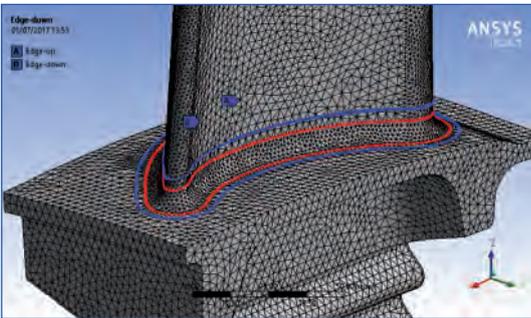


Figura 9. I punti RBF utilizzati per controllare la geometria del raccordo sono mostrati in configurazione originale (rosso) e nella posizione finale (blu) per una coppia di valore dei due parametri di forma.

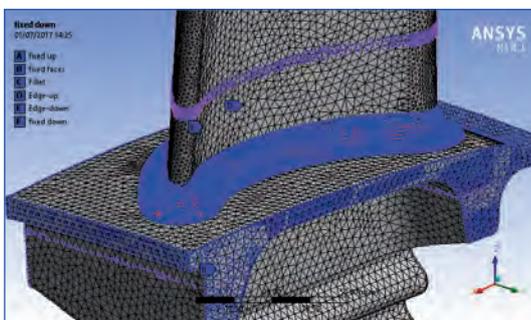


Figura 11. Punti RBF utilizzati per il morphing della mesh di volume.

enza della curva di collegamento con il mozzo, ed uno spostamento lungo il profilo della curva superiore consentono di generare il campo RBF necessario per rimodellare la superficie.

L'aggiornamento della mesh di calcolo (Figura 10) si ottiene mediante una RBF che porta i punti della superficie del raccordo nella posizione desiderata, mantiene fissi i punti ai bordi del dominio di morphing e deforma in modo regolare le altre superfici e la mesh di volume all'interno del dominio. L'effetto per una coppia di valori di intensità di movimento delle due curve è rappresentato in Figura 11.

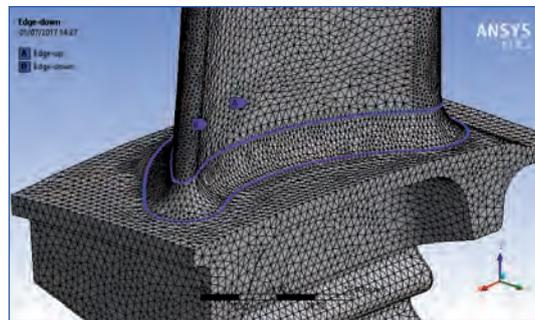


Figura 12. Effetto del campo RBF sull'intera mesh per una coppia di valori dei due parametri di forma (notare come i nodi si siano spostati dalle posizioni dei punti rossi a quelle dei punti blu).

La dimensione del volume di morphing è stata definita in modo da avere abbastanza spazio per deformare la mesh (comprimendo o allungando gli elementi finiti). Il tempo per il morphing è molto breve (circa 15 secondi) e coinvolge circa 125000 nodi della griglia di calcolo.

Il set-up RBF utilizzato per il calcolo è stato messo a punto dopo qualche tentativo interagendo manualmente con l'interfaccia di ANSYS Mechanical e sfruttando i comandi "Morph" e "Undo" che consentono di ripetere l'operazione fino a che non si arriva all'effetto desiderato monitorando la qualità della mesh prima e dopo la deformazione. Il set-up è stato quindi trasformato da interattivo a parametrico semplicemente imponendo un valore nullo alle intensità delle modifiche e marcando con una "P" la check box pertinente; il parametro di output è stato ottenuto marcando con la "P" il valore massimo della tensione principale massima (Figura 12).

### ESPLORAZIONE INTERATTIVA DELLO SPAZIO DI PROGETTO

L'aggiornamento del calcolo richiede pochi minuti. Una volta creato il modello di calcolo l'analista può passare alla "regia" popolando direttamente la tabella dei parametri di ANSYS Workbench; i Design Point così valutati sono mostrati nella Figura 13. Per il candidato mi-

Figura 12. Definizione dei parametri di input e output per il processo di ottimizzazione.

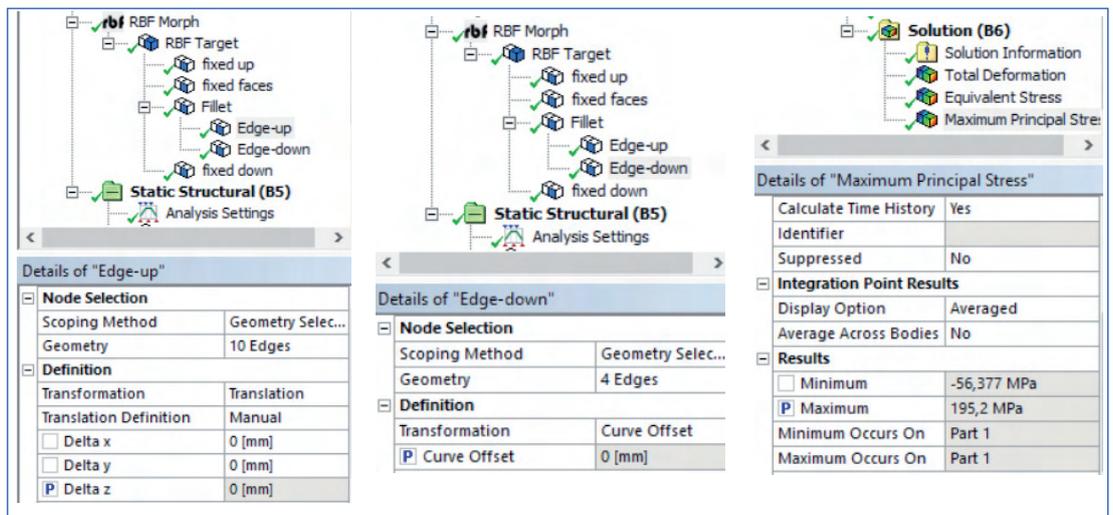


Figura 13. Esplorazione manuale dello spazio parametrico ed effetto sulla tensione massima.

Table of Design Points						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P2 - Edge-up Delta z	P3 - Edge-down Curve Offset	P1 - Maximum Principal Stress Maximum	Ret...	Retained Data
2	Units	mm	mm	MPa		
3	DP 0 (Current)	0	0	195,2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	DP 2	1	0	176,53	<input type="checkbox"/>	
5	DP 3	1	1	180,71	<input type="checkbox"/>	
6	DP 4	2	0	168,39	<input type="checkbox"/>	
7	DP 5	2	1	172,19	<input type="checkbox"/>	
8	DP 6	2	-1	176,44	<input type="checkbox"/>	
9	DP 7	2	0,5	170,52	<input type="checkbox"/>	
10	DP 8	2	0,25	169,54	<input type="checkbox"/>	
11	DP 9	2	0,1	168,83	<input type="checkbox"/>	
12	DP 10	2	-0,1	167,94	<input type="checkbox"/>	
13	DP 11	2	-0,5	167	<input type="checkbox"/>	
14	DP 12	2,5	-0,5	162,8	<input type="checkbox"/>	
15	DP 13	3	-0,5	160,03	<input type="checkbox"/>	
16	DP 14	3,5	-0,5	157,63	<input type="checkbox"/>	
17	DP 15	4	-0,5	156,62	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	DP 16	4	-1	160,74	<input type="checkbox"/>	
19	DP 17	4	0	161,41	<input type="checkbox"/>	

gliore (DP 15) si è marcata la box Retain Data in modo da poter effettuare un post processing completo. È importante sottolineare che semplicemente cambiando il DP corrente è possibile ispezionare i risultati ed è altresì importante ricordare che con RBF Morph è necessario selezionare come DP corrente il DP0 (parametri nulli) prima di generare nuovi DP altrimenti le nuove variazioni di forma verranno imposte rispetto ad una configurazione già deformata portando a risultati non desiderati.

### OTTIMIZZAZIONE AUTOMATICA

I due parametri di forma possono essere anche guidati utilizzando un metodo completamente automatico. In questo esempio si è utilizzato il software DX mediante il workflow mostrato in Figura 14. Il metodo DOE e della superficie di risposta consentono di valutare in modo com-

pletamente automatico i DP. L'interpolazione dei DP consente di valutare in modo continuo (anche se approssimato) la risposta del sistema nello spazio parametrico come mostrato dalla Figura 15. È importante sottolineare che i parametri di Workbench possono essere guidati da molti ottimizzatori disponibili. Un esempio basato sul software modeFRONTIER è riportato nel riferimento [4].

### RISULTATI DELL'OTTIMIZZAZIONE

La bontà del risultato ottenuto è stata verificata confrontando il modello originale ed il modello deformato. La Figura 16 mostra come la geometria con raccordo ottimizzato consenta di estendere la zona "calda" con una importante riduzione del picco della sollecitazione e con una qualità accettabile della griglia. Per meglio comprendere l'effetto di riduzione della ten-



Figura 14. Workflow per l'ottimizzazione automatica utilizzando il software Workbench ed il modulo di ottimizzazione DesignXplorer.

sione nella zona della concentrazione si è confrontato l'andamento nella sezione di Figura 17 che oltre a mostrare la migliore distribuzione di tensione consente di apprezzare la nuova forma più smussata del raccordo.

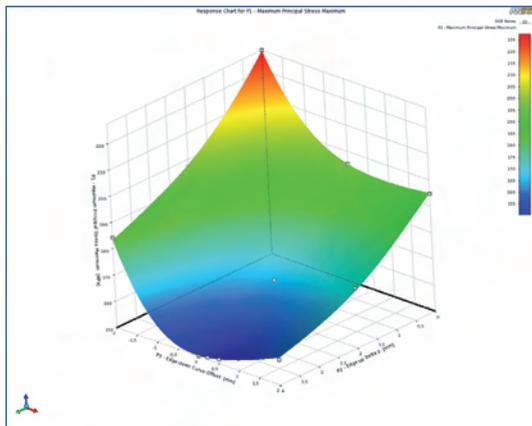


Figura 15. Rappresentazione della risposta del sistema ai due parametri tramite una superficie tridimensionale.

### VERIFICA DEI RISULTATI OTTENUTI

Poiché il morphing ha portato ad un cambiamento anche nella zona caricata dalla pressione è necessario sincerarsi che le riduzioni di tensione registrate siano effettivamente dovute alla nuova geometria e non ad una riduzione indesiderata del carico applicato. Per questo motivo si è proceduto a confrontare in modo quantitativo non solo la variazione della tensione ma anche della forza e del momento risultante. L'importante riduzione della tensione di picco (22.5%) è ottenuta con una configurazione della mesh che porta ad una leggera (ed accettabile) variazione

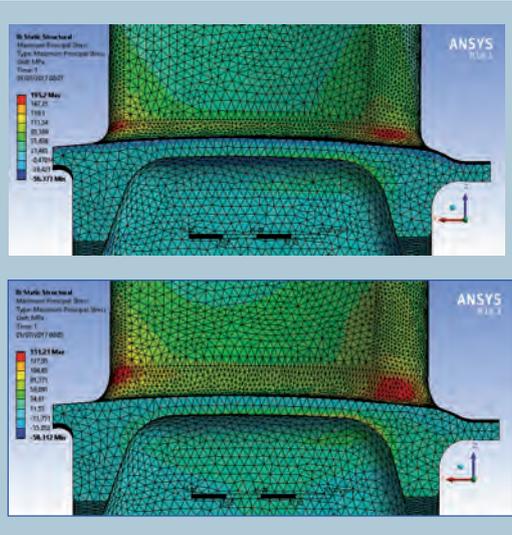


Figura 16. Confronto fra la geometria originale e quella ottimizzata.

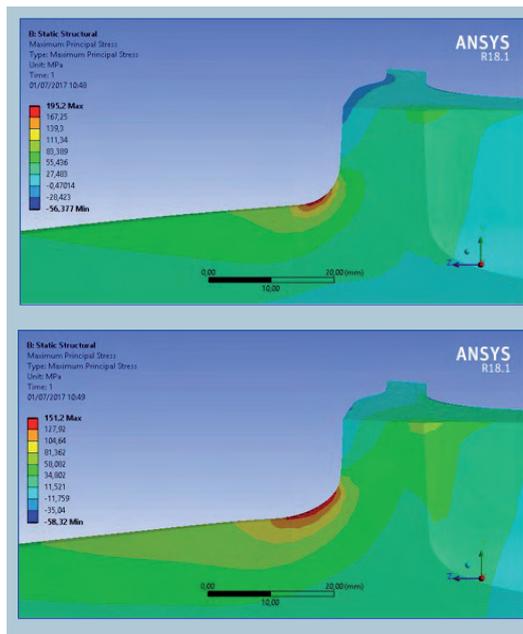


Figura 17. Confronto fra la geometria originale e quella ottimizzata nella sezione di taglio e con particolare della zona di raccordo.

del momento flettente risultante (0.6%) e della forza trasversale risultante (2.4%).

### RICOSTRUZIONE DEL MODELLO CAD DELLA PALETTA

Poiché la nuova geometria non corrisponde ad una rappresentazione analitica del raccordo è necessario procedere alla ricostruzione del nuovo CAD partendo dalla mesh deformata. Il workflow prevede l'uso di una macro che genera della Named Selection nodali corrisponden-

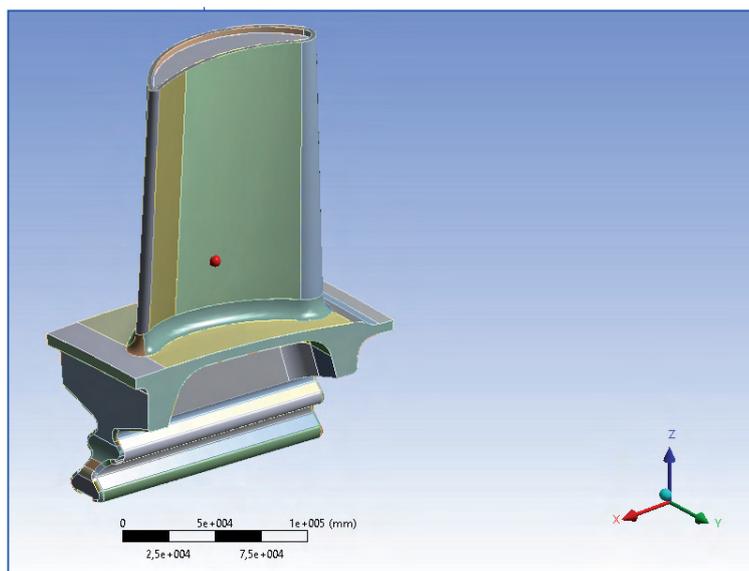


Figura 18. Modello CAD della geometria ottimizzata.

ti alla topologia del modello CAD originale; la mesh provvista di queste informazioni topologiche viene trasferita a FEModeler che consente di ricostruire le singole superfici mediante delle interpolanti NURBS. La fase più complessa del processo che consiste nell'identificazione delle superfici viene in questo caso saltata poiché il risultato è già fornito mediante le Named Selection. Il nuovo CAD generato (Figura 18) è quindi formato dallo stesso numero di superfici del CAD iniziale. Le geometrie CAD iniziali e finali sono mostrate nella Figura 19.

### CONCLUSIONI

Lo studio mostra come il mesh morphing possa semplificare notevolmente il processo di ottimizzazione di forma. Concetti semplici, facilmente intuitibili e quantificabili su geometrie piane, possono essere applicati con semplicità sulla geometria reale della palette. La riduzione di tensione ottenuta è importante (22.5%) e può corrispondere ad una maggiore durata del componente o ad un suo alleggerimento. Il metodo mostrato porta a forme delle nuove geometrie che non possono essere rappresentate con geometrie analitiche semplici. La ricostruzione mediante NURBS con il metodo proposto consente di ottenere rapidamente la nuova forma che può essere quindi utilizzata per completare il processo di sviluppo industriale.

È importante notare come le forme poco convenzionali (ma significativamente ottimizzate)

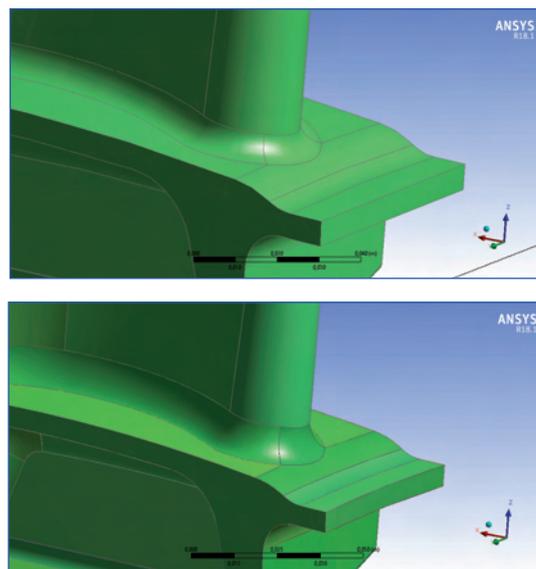


Figura 19. Confronto fra il modello CAD della geometria originale e di quella ottimizzata.

ottenibili con il mesh morphing possono costituire una barriera avvalendosi di metodi di fabbricazione classici. Tale limite può tuttavia diventare un'opportunità se si ricorre a metodi di fabbricazione basati sull'Additive Manufacturing [5,6].

### RIFERIMENTI

- [1] Fundamentals of Machine Component Design. ROBERT C. JUVINALL, KURT M. MARSHAK JOHN WILEY & SONS, INC.
- [2] RBF Morph web page [www.rbf-morph.com](http://www.rbf-morph.com)
- [3] M.E. Biancolini, Cerchioni più leggeri con il mesh morphing, *Analisi & Calcolo*, N.72, Gennaio-Febrero 2016
- [4] R. Cenni, C. Groth, M.E. Biancolini. Structural optimisation using advanced radial basis functions mesh morphing. *AIAS 2015* - 503
- [5] Cloud-based Additive Manufacturing <http://www.fortissimo-project.eu/experiments/515>
- [6] "Fortissimo launches service to broker HPC resources" published in the December 2016 Issue of *Scientific Computing World*.