

INCREMENTO DELLE PRESTAZIONI DI UN COMPRESSORE MEDIANTE MICROSTRUTTURE

E. FERRANTE*, G. PISCITELLI*, E. COSTA*, M.L.G DE ALBENIZ**, P. LEITL**, A. FLANSCHGER**

L'efficienza delle turbomacchine sta diventando sempre più rilevante al fine di ridurre consumi di combustibile e usura, con lo scopo di aumentare l'affidabilità e la sostenibilità ambientale dei sistemi nei quali queste sono installate. L'ottimizzazione nella progettazione e nella scelta dei materiali risulta quindi fondamentale e, a tal proposito, un contributo importante deriva dallo studio dell'effetto che l'introduzione di microstrutture su alcuni componenti ha nel processo di miglioramento delle prestazioni delle turbomacchine. Queste strutture, chiamate riblet, sono costituite da minuscole superfici scanalate allineate al flusso che riducono la resistenza nello strato limite turbolento. L'uso di strumenti numerici può fornire una valutazione precisa dei benefici sia in termini di aumento dell'efficienza che di riduzione delle emissioni di CO₂ e di rumore, impattando positivamente su tutti quei settori che sfruttano l'applicazione di turbomacchine. Le attività presentate in questo articolo sono state realizzate all'interno del progetto di ricerca ReSISTant, cofinanziato dalla Commissione Europea all'interno del programma H2020.

(*) RINA CONSULTING S.P.A.,
Viale Cesare Pavese 305, 00144, Roma, Italia
(**) BIONIC SURFACE TECHNOLOGIES GmbH,
Liebenauer Hauptstraße 2-6, 8041 Graz, Austria

INTRODUZIONE

I riblet, anche chiamati strutture “a pelle di squalo”, sono strutture scanalate di ridottissime dimensioni che vengono tipicamente realizzate su superfici di componenti investite da un flusso di fluido per migliorarne le prestazioni aerodinamiche ed acustiche. Queste strutture mirano a ridurre la resistenza fluidodinamica modificando il comportamento locale del flusso, poiché limitano la turbolenza in prossimità della parete. I riblet presentano una dimensione caratteristica dell'ordine dei micron e possono avere diverse forme come ad U, a dente di sega (triangolare), a V (trapezoidale) ed a forma di lama. Tre tipologie di queste forme sono mostrate nella Fig. 1 [1]. Le prestazioni dei riblet in termini di riduzione

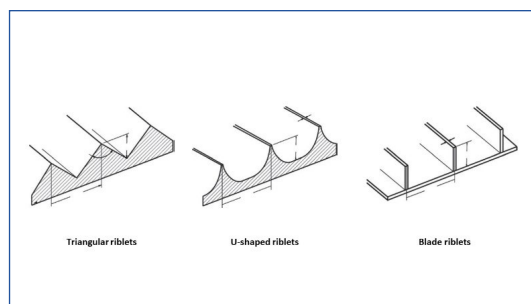


Fig. 1 - Forme tipiche dei riblet [1].

di resistenza al flusso dipendono fortemente dalla sezione trasversale, dalla spaziatura trasversale, dal rapporto di aspetto e dalla precisione nella produzione. Il loro principio di funzionamento è quello di guidare il flusso in modo che il ricircolo ed i vortici locali siano evitati o, almeno, limitati (vedi Fig. 2 [1]). Per quanto riguarda le prestazioni attese, le superfici micro-strutturate riducono la resistenza di attrito delle superfici piane fino al 10% [2]. Tuttavia, sebbene numerose ricerche

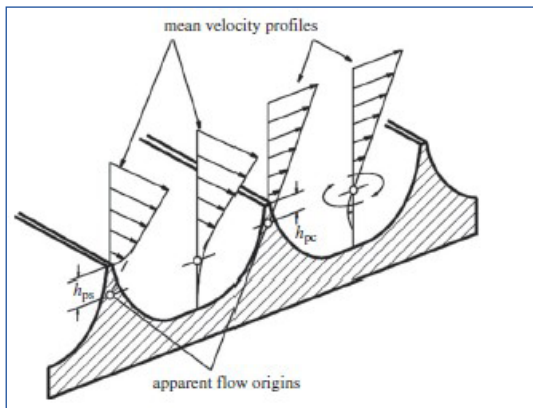


Fig. 2 - Rappresentazione dei profili di velocità e delle altezze di protrusione sia nella direzione del flusso principale, h_{ps} , che in direzione ortogonale, h_{pc} [1].

concordino sulla riduzione ottenibile in termini di resistenza fluidodinamica, il principio secondo cui queste nervature operino per alterare lo strato limite turbolento è ancora dibattuto e la giustificazione fisica del loro effetto non è stata, di fatto, del tutto formulata [1]. Dal punto di vista della realizzazione di riblet volta ad ottenere la qualità superficiale richiesta, ad oggi le metodologie per la loro posa sulle superfici sono la smerigliatura manuale, la burattatura o rivestimenti semplici. Tuttavia questi processi sono caratterizzati da tempi lunghi e costosi processi di finitura. Un avanzamento tecnologico è quindi richiesto anche in questo contesto.

BACKGROUND E POSIZIONAMENTO DEL PROGETTO

L'applicazione di riblet per la riduzione della resistenza fluidodinamica è oggetto di ricerca da molti anni. Negli anni '70 e '80 importanti studi sperimentali furono eseguiti alla NASA da Walsh & Weinstein [3], così come da Bechert et al. [4] [5] in Germania. Tali test hanno provato che il meccanismo di riduzione della resistenza è collegato alla forma della sezione trasversale dei riblet. A tal fine, gli obiettivi principali del progetto ReSiStant sono lo sviluppo, l'implementazione e la dimostrazione di fattibilità industriale di riblet micro-strutturati da applicare nei motori degli aerei (Demonstrator 1) e in compressori industriali (Demonstrator 2) per ridurre la resistenza, il consumo

di combustibile e le emissioni generate. A fine progetto si prevede il raggiungimento di un technology readiness level (TRL) pari a 7. Nel progetto di ricerca è previsto l'uso massimo di analisi CFD per predire il posizionamento e le dimensioni ottimali dei riblet, garantendo altresì la fattibilità del loro processo produttivo. In questo articolo vengono descritte le attività numeriche sul Demonstrator 2, per il quale sono stati utilizzati riblet trapezoidali.

DESCRIZIONE E APPLICAZIONE DEL MODELLO DI RIBLET

Il modello predittivo per la riduzione della resistenza dovuta all'applicazione dei riblet è stato sviluppato e implementato da Bionic Surface Technologies GmbH, coordinatore del progetto [6]. In particolare è stata valutata sperimentalmente la riduzione dell'attrito considerando riblet trapezoidali con una distanza tra due creste consecutive di $90 \mu\text{m}$ e $120 \mu\text{m}$ per diverse velocità di flusso. I risultati ottenuti in termini di coppia sono stati confrontati con gli output della simulazione numerica realizzata con il software commerciale a volumi finiti ANSYS® Fluent® [7]. La soluzione Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) è stata opportunamente personalizzata in modo da consentire una velocità di scorrimento a parete in grado di riprodurre l'effetto dei riblet. La procedura per l'applicazione del modello di riblet prevede diverse fasi. Nella prima fase la simulazione CFD della configurazione di base del sistema è stata compiuta assumendo le superfici come perfettamente lisce. Successivamente, in base ai risultati, l'algoritmo dei riblet interviene sulle superfici di interesse per calcolare la distribuzione ideale delle nervature. Quest'ultima informazione è stata utilizzata per identificare il compromesso ottimale tra il guadagno raggiunto in termini di riduzione della resistenza e l'effettiva fattibilità di fabbricazione. A seguito della stima del posizionamento e della dimensione delle nervature, un'analisi CFD è stata eseguita includendo, stavolta, le dimensioni dei riblet reali. I risultati finali hanno lo scopo di quantificare un eventuale guadagno in termini di efficienza

nel caso della configurazione dei riblet risultante dal processo di ottimizzazione.

DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO E APPROCCIO

Il Demonstrator 2 è un compressore radiale industriale, la cui geometria consta di due domini principali: uno stazionario comprendente la voluta e il diffusore, ed uno rotante che è costituito da una girante a tredici pale. Al fine di diminuire le richieste computazionali nelle analisi numeriche è stato considerato un solo segmento della girante sfruttando la simmetria assiale del dominio rotorico. Con questo tipo di approccio si ha che il segmento simulato presenta interfacce periodiche ai suoi confini laterali (vedi Fig. 3) ed è collegato al dominio stazionario usando l'approccio del piano di miscelazione. Ciò significa che la simulazione è indipendente dal tempo grazie alla formulazione del Multi-Reference-Frame (MRF).

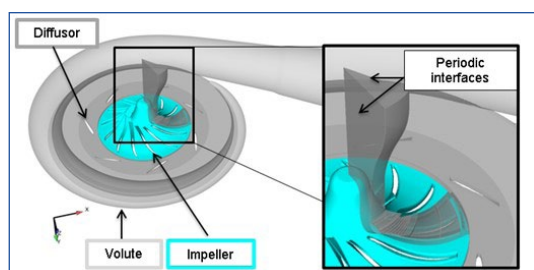


Fig. 3 - Rappresentazione della geometria analizzata del Demonstrator 2.

La figura 4 mostra la mappa del compressore rappresentata in maniera qualitativa a causa della riservatezza dei dati. La mappa riporta i profili operativi della macchina per quattro valori del numero di Mach (Mu_2) all'ingresso del dominio di calcolo. L'espressione di Mu_2 è la seguente

$$Mu_2 = \frac{U_{ref}}{a_1}$$

essendo U_{ref} la velocità periferica sul bordo posteriore e a_1 la velocità del suono all'ingresso. L'aumento di tale valore sposta le curve da sinistra in basso a destra in alto. Come visibile, tre coppie di valori di portata massica e rapporto di pressione definiscono ciascun profi-

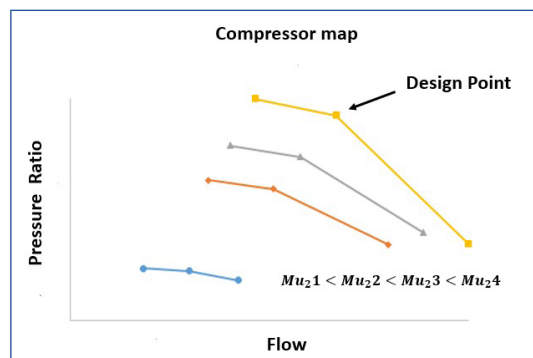


Fig. 4 - Mappa del compressore.

lo identificando anche la linea del “surge” (a sinistra), quella di massima efficienza (centro) e la linea del “choking” (a destra). Riguardo la strategia di progettazione, la presenza dei riblet è stata studiata numericamente prendendo in considerazione il punto ottimale del più alto numero di Mach della mappa, poiché tale punto è caratterizzato da elevate sollecitazioni (sforzo di taglio sulla parete). Tale punto operativo, evidenziato in fig. 4, è denominato punto di design (DP).

REALIZZAZIONE E SET-UP DEL MODELLO NUMERICO

Pulizia e mesh CAD - A partire dal materiale e dai dati forniti dal produttore del compressore, sono stati importati i file CAD per sottoporli alla fase di pulizia delle geometrie al fine di ottenere superfici idonee per la successiva fase di meshatura. Tale operazione è stata svolta con svolta con il software ANSYS® ICEM CFD™ [8]. Il volume complessivo occupato dal fluido è stato diviso in 5 domini che sono stati poi discretizzati adottando diverse strategie di meshing e tipologie di elementi. In particolare, il volume della girante è stato modellato usando celle poliedriche ed esaedriche, mentre il diffusore ed i volumi delle volute sono stati discretizzati mediante una mesh ibrida composta da celle poliedriche, tetraedriche e pentaedriche. Nelle aree di interesse per l'uso dei riblet, descritte successivamente, la mesh in prossimità della parete è stata generata per ottenere un y^+ a parete inferiore a 1 (vedi dettaglio della distribuzione delle celle mostrato in Fig. 5). La griglia di calcolo finale dell'intero volume del compressore è di 16,7 milioni di celle.

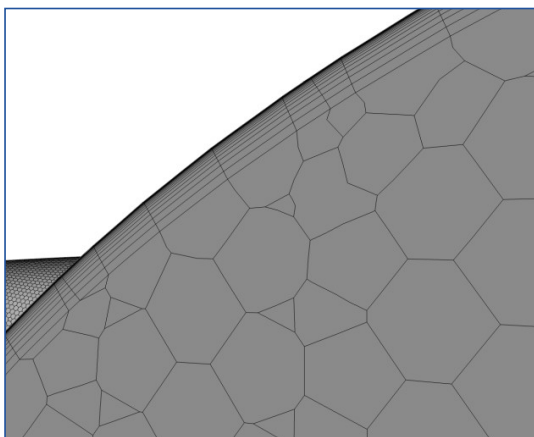


Fig. 5 - Dettaglio della mesh della voluta in prossimità della parete.

Set-up dell'analisi CFD - Tutti i casi numerici, che identificano i punti della mappa del compressore, condividono approssimativamente lo stesso set-up. Il software impiegato è stato ANSYS® Fluent®. Nello specifico è stato utilizzato il solutore pressure-based, la turbolenza è stata simulata con il modello k-omega Shear Stress Transport (SST) e si è supposto che l'aria si comporti come un fluido comprimibile con condizioni di riferimento uguali a quelle ambiente. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, sia all'imbocco della girante che in uscita della voluta è stata imposta una pressione. Le parti in rotazione sono state imposte definendone l'asse e il valore del numero di giri. Per quanto riguarda gli schemi di discretizzazione, il Least Squares Cell Based è stato utilizzato per il gradiente, lo Standard per la pressione e il Second Order Upwind per i parametri legati alla densità, alla quantità di moto, all'energia ed alla turbolenza.

Inoltre, per migliorarne la precisione nel calcolo è stata abilitata la funzionalità per la correzione del gradiente (WFGC). L'analisi è stata lanciata adottando l'inizializzazione ibrida e la soluzione è stata considerata convergente quando tutti i residui sono diminuiti di almeno tre ordini di grandezza e le variazioni della portata massica e dell'efficienza politropica presentavano un'oscillazione con un'ampiezza inferiore allo 0,05% del loro valore medio.

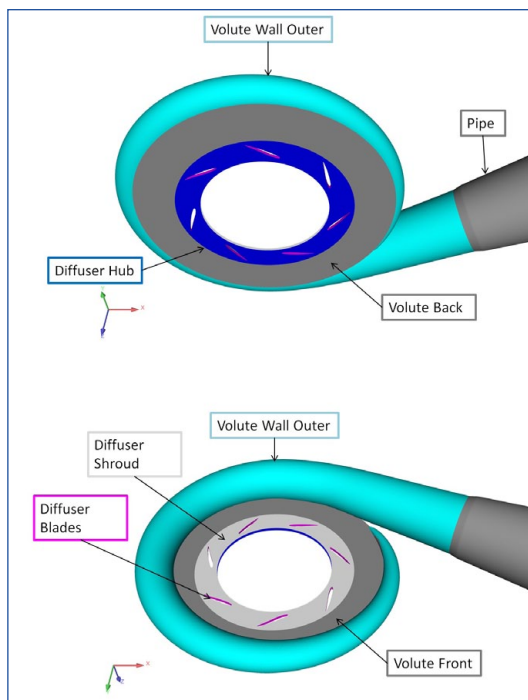


Fig. 6 - Aree di interesse per l'applicazione dei riblet.

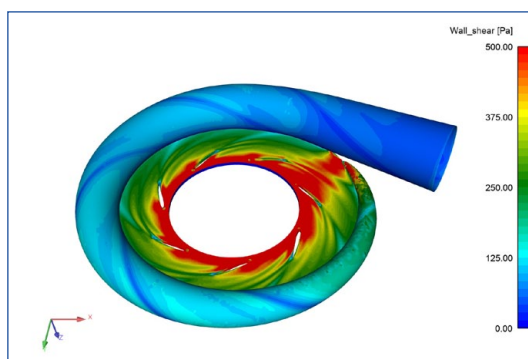


Fig. 7 - Distribuzione dello sforzo di taglio a parete sulla baseline (vista dall'alto).

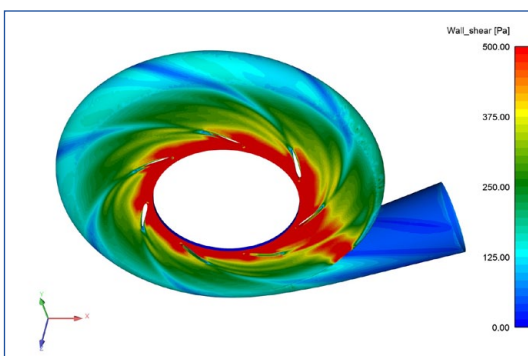


Fig. 8 - Distribuzione dello sforzo di taglio a parete sulla baseline (vista dal basso).

RISULTATI OTTENUTI DAL MODELLO DEI RIBLET

Simulazione sulla configurazione di base - Per scegliere le superfici su cui simulare la presenza dei riblet sono state considerate due aree specifiche del compressore: la voluta (volute) e il diffusore (diffuser). Entrambe le aree sono mostrate in fig. 6. In fig. 7 e fig. 8 è mostrata, in una vista dall'alto e dal basso rispettivamente, la distribuzione degli sforzi di taglio sulle superfici del compressore (baseline) in condizioni di regime stazionario. Grazie a questo risultato, si può notare che tale grandezza raggiunge valori compresi tra 250 Pa e 500 Pa sul diffusore, mentre sulla voluta i valori degli sforzi di taglio variano tra 50 Pa e 250 Pa. Per queste ragioni tali aree sono caratterizzate dal massimo potenziale per l'applicazione dei riblet e, conseguentemente, proprio su queste aree ne è stata simulata la presenza.

Simulazione con dimensioni ideali dei riblet - Supponendo che il set-up numerico in presenza dei riblet sia lo stesso di quello con superfici perfettamente lisce, un aumento del flusso di massa, o alternativamente dell'efficienza poliotropica, è da attribuire ad una riduzione delle perdite di carico sulle pareti. Questa affermazione è valida dal momento che l'impostazione delle condizioni al contorno sulle superfici di ingresso e uscita riguarda parametri di pressione, temperatura e turbolenza. Per determinare l'effetto dei riblet sulle diverse parti del compressore, sono state simulate diverse configurazioni che prevedevano di rendere conto, in modo selettivo, delle superfici più rilevanti identificate. Le tre configurazioni considerate, denominate A, B e C, prevedono riblet rispettivamente sul diffusore (A), sulla voluta (B) o su entrambe (C=A+B). I parametri di output di interesse sono la portata massica, l'efficienza poliotropica ed il rapporto di temperatura (definito come il rapporto tra la temperatura totale in uscita e in ingresso). È stato calcolato che il massimo potenziale dei riblet viene sfruttato quando vengono applicate sia sul diffusore che sulla voluta. Di fatto è in corrispondenza di

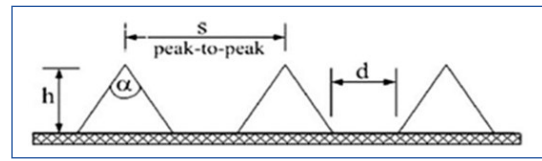


Fig. 9 - Geometria dei riblet.

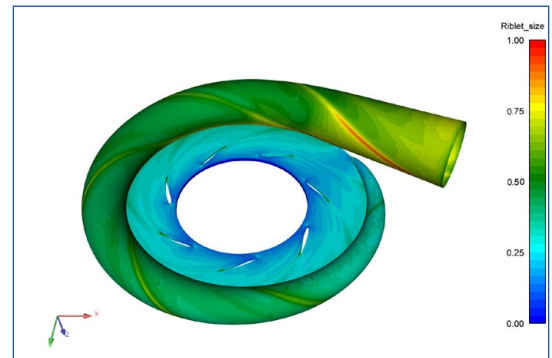


Fig. 10 - Dimensione ideale dei riblet per diffusore e voluta (vista dall'alto).

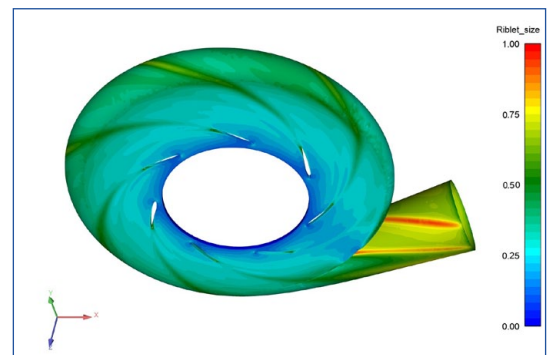


Fig. 11 - Dimensione ideale dei riblet per diffusore e voluta (vista dal basso).

queste aree che lo sforzo di taglio a parete è maggiore. In particolare, per la Configurazione C si ottiene un aumento della portata massica pari a 0.51%, un aumento dell'efficienza poliotropica del 0.22% ed un decremento del rapporto di temperatura pari a 0.03%.

Stima della dimensione reali dei riblet - Nel caso dei riblet a V che sono state adottate nel progetto, il parametro per fissarne la dimensione è la distanza tra due picchi successivi che è chiamata "s" (vedi fig. 9). Una volta fissata questa grandezza è possibile calcolare i rimanenti parametri geometrici, ovvero l'altezza "h" e l'angolo di apertura "α". La fig. 10 e la fig. 11 mostrano uno dei

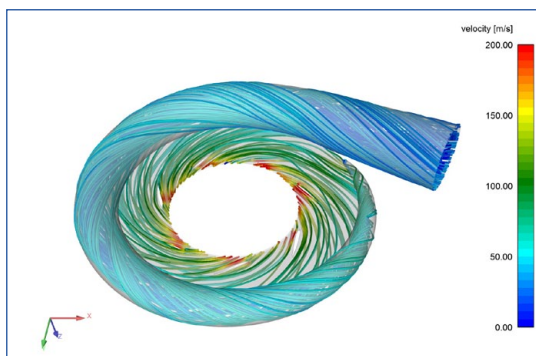


Fig. 12 - Linee di flusso su diffusore e voluta (vista dall'alto).

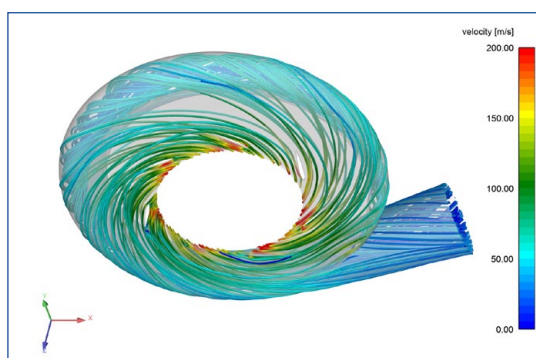


Fig. 13 - Linee di flusso su diffusore e voluta (vista dal basso).

risultati computazionali più importanti, cioè la dimensione ideale dei riblet (normalizzata per ragioni di confidenzialità) sulle superfici del compressore.

Nella fig. 12 e nella fig. 13 sono presentate le linee di flusso a parete. Dal punto di vista produttivo i riblet dovrebbero essere applicati seguendo queste linee per massimizzarne l'impatto. In generale, una deviazione massima di 15° tra la linea di flusso e l'orientamento dei riblet risulta accettabile.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro descrive l'applicazione di una procedura numerica per supportare la progettazione e la produzione dei riblet sulle superfici di turbomacchine per aumentarne l'efficienza durante il funzionamento in condizioni nominali. La procedura proposta prevede l'uso di un solutore CFD commerciale, la cui soluzione viene personalizzata per

tenere conto dell'effetto dei riblet in funzione della loro dimensione e disposizione attraverso un modello convalidato dagli autori in un lavoro precedente. L'applicazione dei riblet sul compressore industriale studiato può portare ad un aumento dell'efficienza (+ 0,22% dell'efficienza politropica) abbassando la resistenza che le superfici esercitano sul flusso del fluido (+ 0,51% della portata di massa). L'area di maggiore interesse per l'applicazione dei riblet è quella del diffusore. La dimensione ideale identificata per i riblet pone grandi sfide in termini di realizzazione, fabbricazione e deposizione. Tali aspetti saranno analizzati nel progetto ReSI-STant (la valutazione della dimensione finale del riblet, la validazione tramite test sperimentali e la stima tecnico-economica della fattibilità di produzione) poichè anche un piccolo aumento dell'efficienza della turbomacchina può portare ad enormi risparmi in termini di costi ed energia, ad una riduzione dell'inquinamento e, quindi, ad un impatto positivo sia sulla mobilità che sulla produzione di energia.

BIBLIOGRAFIA

1. Brian, D. and Bhushan, B., "Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review," *Phil. Trans. R. Soc. A* 368, 4775-4806, 2010, doi:10.1098/rsta.2010.0201
2. Hage W., "ur Widerstandsverminderung von dreidimensionalen Riblet-Strukturen und anderen Oberflächen", Dissertation, Mensch & Buch Verlag, 2004
3. Walsh, M., Weinstein, L., "Drag and heat-transfer characteristics of small longitudinally ribbed surfaces," *AIAA Journal* 17 (1979) 770-771;
4. D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J.G.T. van der Hoeven and G. Hoppe "Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with adjustable geometry", *J. Fluid*

Mech, vol 338, pp. 59-87 Cambridge University Press, Journal of Fluid Mechanics, 1997.

5. D.W. Bechert, M. Bartenwerfer, G.Hoppe, W.-E. Reif "Drag reduction mechanisms derived from shark skin", IN: ICAS, Congress, 15th, London, England, September 7-12, Proceedings Volume 2 (A86-48976 24-01) New York, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1044-1068 ICAS Fluid Mechanics and Heat Transfer, 1986.
6. Peter A. Leidl, Stefan Kuntzagk, Andreas Flanschger, and Kai Pfingsten. "Experimental and numerical investigation of the reduction in skin friction due to riblets applied on the surface of a Taylor-Couette cell", AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2019-1625), doi: 10.2514/6.2019-1625
7. ANSYS Inc., ANSYS Fluent software, website: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (accessed in May 2019)
8. ANSYS Inc., ANSYS ICEM CFD software, website: <https://www.ansys.com/services/training-center/platform/introduction-to-ansys-icem-cfd> (accessed in May 2019)

RICONOSCIMENTI

Le attività descritte nel documento sono state svolte all'interno del progetto ReSISant, un progetto di ricerca cofinanziato nel programma quadro HORIZON 2020 con Grant Agreement n. 760941.

INCREASE TURBOMACHINERY PERFORMANCE THROUGH THE USE OF MICRO- STRUCTURES

Turbomachinery efficiency is becoming more and more relevant to reduce fuel consumption and mechanical wear of machines with the aim of increasing their environmental sustainability and reliability. Optimized material identification and design are, therefore, always more important. This paper shows how turbomachines can be optimized by the effect of micro-structures created over the shapes of their constituting components to increase turbomachinery efficiency via coating solutions. These structures, called riblet, consist of tiny streamwise grooved surfaces which reduce the drag in the turbulent boundary layer. Numerical and experimental studies give a first estimation of the impact of riblet in industrial compressors. In this case, the riblet structures reduce the aerodynamic shear stress losses. The areas of higher interest are the diffuser and the volute, where the higher losses happen. The optimal size, position and effect on performance are analyzed via simulation. The use of such an effective numerical means may give a precise evaluation about benefits in terms of efficiency increase as well as of CO₂ and noise emissions reduction. The presented activities were performed in the Framework of the ReSISant project, which was co-financed by the European Commission under the Grant Agreement n. 760941.