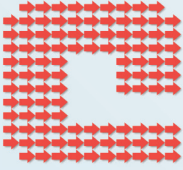


EFFETTO DELLA RUGOSITÀ DI PARETE SU FLUSSI TURBOLENTI



di Stefano Leonardi, Jorge Bailon-Cuba e Luciano Castillo

Per capire l'effetto di una distribuzione random di rugosità, abbiamo portato a termine la simulazione diretta del flusso turbolento in un canale con 3 differenti superfici rugose sulla parete inferiore: (I) una distribuzione di 10 prismi ad altezza random, (II) la stessa distribuzione di prismi rimuovendo i 4 più piccoli, (III) una distribuzione uniforme di prismi mantenendo la stessa area totale. L'attività di simulazione è stata svolta grazie alla collaborazione con il CASPUR, che ha messo a disposizione la propria infrastruttura di calcolo ad alte prestazioni.

Prof. Stefano Leonardi
University of Puerto Rico
at Mayaguez
Dep. Mech. Engineering
sleonardi@me.uprm.edu

Dott. Jorge Bailon-Cuba
Technical University of Ilmenau
Ilmenau, Germany
jorge.bailon-cuba@tu-ilmenau.de

Dott. Luciano Castillo
Rensselaer Polytechnic Institute
Dep. of Mech. Eng., Aeronautical
and Mechanics
Troy, NY (US)
castil2@rpi.edu

• Abstract

Direct numerical simulations of a turbulent channel flow with 2D wedges of random height on the bottom wall have been performed. In addition, two other simulations have been carried out to assess the effect of the geometry on the overlying flow. In the first simulation, the four smallest elements were removed while in the other a uniform distribution of wedges with the same area was used. Two Reynolds numbers were studied, $Re_b=2500$ and $Re_b=5000$ which correspond in case of smooth walls to $Re_t=180$ and 300 respectively. Roughness on the wall induces separated regions, the reattachment occurring on the walls of the wedges or on the bottom walls. The pressure gradients on the walls increase the ejections and inrushes towards the wall. As a consequence the flow is more isotropic. The mechanism inducing an improved isotropy has been explained in the paper by spectra and budgets of Reynolds stress.

The comparison of the 3 surfaces has shown that near the wall, the uniformly distributed roughness represents only a poor approximation of the surface with wedges of random height. The Reynolds stresses, pressure distribution and spectra on the modified wall agree well with those on the random surface.

Pressure distribution, Reynolds stress budgets, spectra, and turbulence intensities have been compared to identify the geometrical parameters which can define a random rough wall. Energy spectra show the pitch to height ratio of the largest elements to be the more appropriate.

The mechanism leading to an increase of isotropy near the rough surface has been explained through the budgets of turbulence intensities.

Numerical simulations of turbulent channels have been exploited thanks to CASPUR, which provided its high performance computing infrastructure.

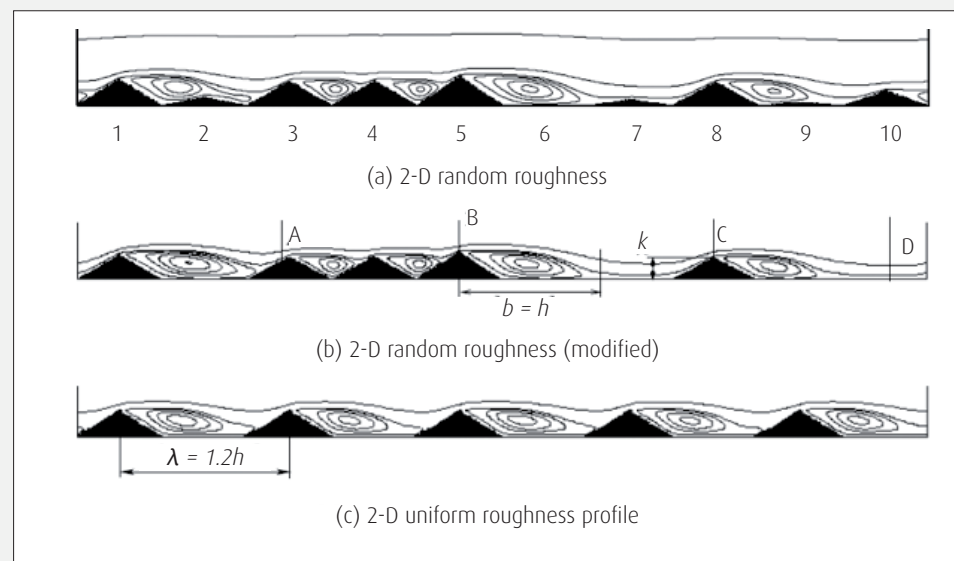
La rugosità di parete ha un ruolo chiave in molte applicazioni industriali come flussi in oleodotti, scambiatori di calore, turbine per motori aeronautici. La maggior parte degli studi su pareti rugose si basa su geometrie bi-tri dimensionali de-

terministiche (barre quadrate, cilindri, cubi). Tuttavia la rugosità ha una distribuzione casuale di altezze e densità. Alcuni esperimenti hanno tentato di riprodurre la distribuzione *random* di rugosità con carta abrasiva (Nikuradse 1933, Flack *et al.* 2005). Cheng & Castro (2002) hanno confrontato due superfici, una fatta di cubi ad altezza costante, ed una con cubi ad altezza random ma con lo stesso volume totale. Ikeda & Durbin (2007) hanno portato a termine una *Direct Numerical Simulation* (DNS) del flusso in un canale con elementi rettangolari di rugosità. Hanno considerato due superfici, una ad altezza uniforme e una con due altezze, aumentando e diminuendo alternativamente del 15% l'altezza media degli elementi di rugosità. La variazione nell'altezza degli elementi di rugosità determina un aumento del 43% del *drag* totale rispetto al caso con altezze uniforme.

Il presente studio, ha lo scopo di chiarire come una superficie rugosa random influenza il flusso turbolento in un condotto. Le equazioni di Navier-Stokes sono state discretizzate in una griglia cartesiana usando un metodo alle differenze finite centrate (Orlandi 2000). L'integrazione temporale è fatta attraverso un metodo Runge-Kutta con *fractional step* accurato al secondo ordine, a bassa occupazione di memoria. I termini viscosi sono trattati impliciti e quelli convettivi espliciti. La rugosità è simulata attraverso la tecnica dei contorni immersi (Orlandi & Leonardi 2006).

Figura 1

Linee di corrente mediate nel tempo e z.



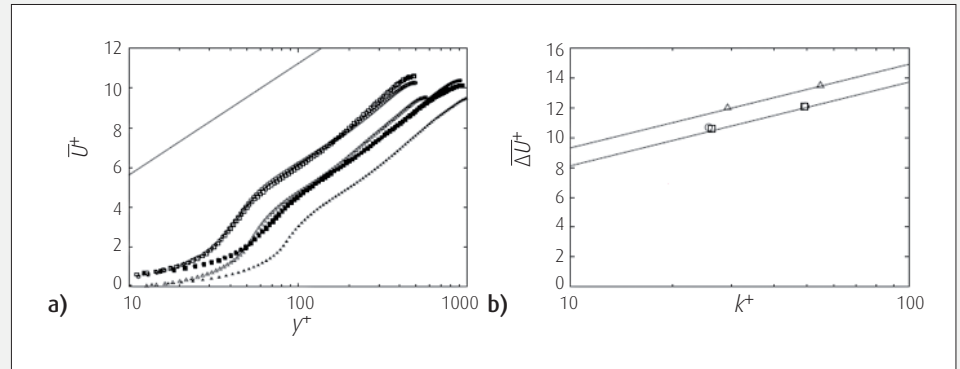
Nel presente studio, è stato considerato il flusso turbolento in un canale con la parete inferiore rugosa e la parete superiore liscia. Tre casi sono stati presi in esame, il primo (Figura 1a), "random", ha dieci prismi di base costante e altezza casuale sulla parete. Il secondo (Figura 1b), "modificato", presenta la stessa distribuzione di prismi della superficie random, tranne i quattro più piccoli elementi che sono stati eliminati. La terza superficie considerata (Figura 1c), "uniforme", presenta una distribuzione uniforme di prismi, di area totale equivalente alla superficie random. Sono stati considerati due numeri di Reynolds, $Re_b = U h/n = 2500$ e $Re_b = 5000$ con U velocità media ed h altezza del canale. In caso di una parete liscia, i numeri di Reynolds corrispondono a $Re_t = U_t h/n = 180$ e 300.



La Figura 1 mostra le linee di corrente mediate nel tempo e nella direzione laterale. Il flusso separa al vertice superiore del prisma. Quando il rapporto tra l'altezza del prisma e la distanza tra due elementi successive è grande, il flusso riattacca sulla parete inferiore (ad esempio il prisma 5 produce una separazione ed il flusso riattacca appena prima il prisma 7). La superficie ottenuta rimuovendo i 4 elementi più piccoli presenta linee di corrente molto simili alla superficie random. Tuttavia, quando l'elemento 7 viene eliminato, il flusso rimane parallelo alla parete inferiore per una distanza più grande. Nel caso della parete a rugosità uniforme, il flusso riattacca sulla parete del prisma successivo. In corrispondenza dei punti di ristagno, la pressione presenta un picco ed aumenta le *ejections*. L'integrale della distribuzione di pressione sulla parete, proiettata nella direzione del flusso dà la resistenza di pressione del flusso. La distribuzione random di elementi e quella modificata hanno una resistenza di pressione molto simile, mentre quella relativa alla distribuzione uniforme di prismi è più alta.

Figura 2

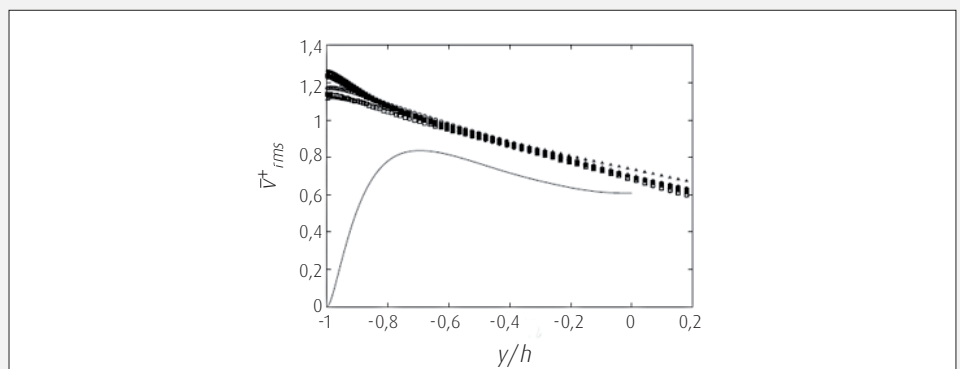
Profilo di velocità in unità di parete (a) e funzione di rugosità (b): random γ modificata ∇ uniforme. Simboli pieni $Re_b=5000$, vuoti $Re_b=2500$. Linea solida, parete liscia.



L'effetto della rugosità è usualmente quantificato per mezzo della funzione di rugosità, che equivale allo spostamento verso il basso del profilo di velocità in unità di parete con rispetto alla parete liscia (Figura 2a). I profili di velocità relative alla superficie random e modificata quasi si sovrappongono sia a $Re_b=2500$ e $Re_b=5000$. La superficie con rugosità uniforme presenta una più grande funzione di rugosità quindi è più accurato modellare una rugosità *random* rimuovendo i quattro più piccoli elementi che usare una serie di prismi equispaziati a densità equivalente. Per un tipo "k" di rugosità la funzione di rugosità varia con l'altezza del prisma in unità di parete $DU^+=1/k \ln k^+ + B$ (Perry, Schofield & Joubert 1969). La Figura 2b mostra che le tre superfici presentano un comportamento di tipo "k".

Figura 3

Rms di velocità verticale in unità di parete. Simboli come in Fig. 2.



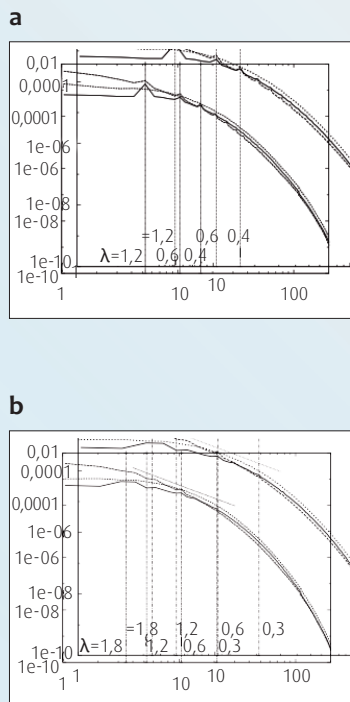


Figure 4

Spettri di velocità in direzione del flusso (---), direzione laterale (...), direzione verticale (—). Sinistra, rugosità uniforme, destra, rugosità random.

I gradienti di velocità sulla parete inducono un maggiore mescolamento del flusso. Le intensità turbolente aumentano rispetto ad una parete liscia. Le fluttuazioni di velocità verticale aumentano maggiormente di quelle in direzione del flusso. Vicino alla parete, le superfici "random" e "modificata" hanno distribuzioni di intensità turbolente molto simili mentre la parete uniforme presenta livelli di rms della velocità più alti. Mediando nella direzione del flusso, nella direzione laterale e nel tempo otteniamo una curva di rms per ogni superficie. Per $y/h > 0.8$ le distribuzioni di v_{rms}^+ per le tre superficie si sovrappongono e non dipendono dal numero di Reynolds.

Per capire come la distribuzione random modifica il flusso turbolento, sono stati calcolati gli spettri di velocità. La parete "uniforme" presenta un picco di energia in corrispondenza della distanza dei prismi. Picchi di entità inferiore sono presenti a sottomultipli di tale distanza. Nel caso di parete random, l'energia è distribuita più uniformemente a varie lunghezze d'onda. Tuttavia il picco più alto corrisponde alla distanza tra i due prismi più alti, il quinto e ottavo. La superficie modificata presenta un comportamento alla superficie random, quindi l'aver rimosso gli elementi più piccoli non influenza molto la distribuzione di energia turbolenta nel flusso.

In conclusione, vicino la parete, la distribuzione uniforme di elementi è solo una povera approssimazione della superficie random. Le intensità turbolente, la distribuzione di pressione e spettri relativi alla parete modificata sono in buon accordo con quelli sulla parete random. Quindi rimuovere i 4 elementi più piccoli non influenza sensibilmente il flusso. Da ciò deduciamo che la caratterizzazione di una superficie random va fatta attraverso il rapporto tra la distanza ed altezza delle più grandi protuberanze sulla parete.

• Bibliografia

- Cheng, H. & Castro, I. P. (2002). Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, **104**(2), 229-59.
- Flack, K. A., Schultz, M. P., & Shapiro T. A. (2005). Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls. *Physics of Fluids*, **17**(3) 035102, 1-9.
- Ikeda, T. & Durbin, P. A. (2007). Direct simulation of a rough-wall channel flow. *J. Fluid Mech.*, **571**, 235-63.
- Nikuradse, J. (1933). Forschungshelft, No. 361, Translated *NACA TM 1292*.
- Orlandi, P. (2000). *Fluid Flow Phenomena: A Numerical Toolkit*, Dordrecht, Kluwer.
- Orlandi, P., & Leonardi, S. (2006). DNS of turbulent channel flows with two- and three-dimensional roughness. *Journal of Turbulence*, **7**(53).
- Perry, A. E., Schofield, W. H., & Joubert, P. N. (1969) Rough wall turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, **37**, 383-413.