

ANÁLISIS POR CFD DE LA CAPA LÍMITE TURBULENTO DE PLACAS PLANAS Y PERFILES CON RUGOSIDAD SUPERFICIAL

V.J. Marletta, J.M. Torres Zanardi, A.E. Scarabino, F.A. Bacchi y M.A. Herrera
Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC) - Universidad Nacional de La Plata
Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900) La Plata - Argentina.
Email: valentina.marletta@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

La rugosidad superficial es un factor que influye significativamente en el flujo y transferencia térmica, al introducir perturbaciones en el perfil de velocidad, que afectan la fricción superficial, la mezcla turbulenta y el flujo de calor entre un cuerpo y el fluido. Pese a los avances alcanzados en la comprensión de los flujos turbulentos sobre superficies rugosas, las investigaciones están lejos de concluir. Entre las razones se citan la naturaleza caótica del flujo turbulento, la falta de un número importante de estudios sistemáticos, y la gran variedad de tipos de rugosidad.

El objetivo de este trabajo es analizar las predicciones de la simulación de perfiles aerodinámicos con rugosidad y su influencia en su rendimiento aerodinámico, comparando con resultados experimentales. Para validar el modelo de rugosidad, se realizan simulaciones sobre una placa lisa y otra con diferentes valores de rugosidad uniforme, variando el número de Reynolds. Se extiende el estudio para analizar el flujo turbulento sobre perfiles con rugosidad en el borde de ataque, en particular un perfil NACA 63(3)-418, a diferentes ángulos de ataque.

Palabras clave: Turbulencia, capa límite, rugosidad, resistencia, CFD.

INTRODUCCIÓN

La pérdida de eficiencia debido a la erosión de palas de generadores eólicos y la sedimentación sobre ellas puede llegar a valores tan extremos como el 50% [1-3]. La lluvia, granizo, insectos, arena, polvo y otras partículas transportadas por el viento impactan en las palas con velocidades relativas que llegan a los 200 km/h cuando la turbina se encuentra en operación [4]. La empresa EDP Renewables [5] inspeccionó 201 palas en una granja eólica, encontrando que el 87% mostraban signos de erosión y el 50 %, signos de erosión severa en el borde de ataque, como puede verse en la **Figura 1**.



Figura 1. Ejemplo de rugosidad en el borde de ataque (LER) de una pala de aerogenerador

Entre otros parámetros, la condición de la superficie de las palas del aerogenerador es crucial para su rendimiento, seguridad y eficiencia [6-8]. La condición de la superficie alrededor del borde de ataque juega un papel crítico en las propiedades aerodinámicas y, por lo tanto, en la performance del aerogenerador. Debido al diseño de las palas y la naturaleza del flujo de aire los daños tienden a acumularse en el borde de ataque de la pala y se refiere frecuentemente como rugosidad en el borde de ataque (LER, por sus siglas en inglés *Leading Edge Roughness*).

El problema radica en el impacto que tiene una rugosidad determinada en el flujo de aire sobre un perfil aerodinámico. La rugosidad puede provocar una prematura transición de la capa límite laminar al régimen turbulento, y su efecto directo en un perfil es un aumento de la resistencia por fricción. Por otro lado, cuando la altura de rugosidad de una superficie es menor al espesor de la subcapa viscosa de la capa límite turbulenta, se dice que esta superficie es hidrodinámicamente suave y los cambios aerodinámicos son despreciables [9]. Así mismo, se define el régimen de transición de la rugosidad, donde los elementos de rugosidad son ligeramente más gruesos que la subcapa viscosa y comienzan a perturbarla. Mientras que, en el régimen totalmente rugoso, la subcapa viscosa se destruye completamente y los efectos viscosos se vuelven despreciables. En la **Figura 2.** se ilustran una capa límite laminar y una turbulenta, con sus distintas regiones [10].

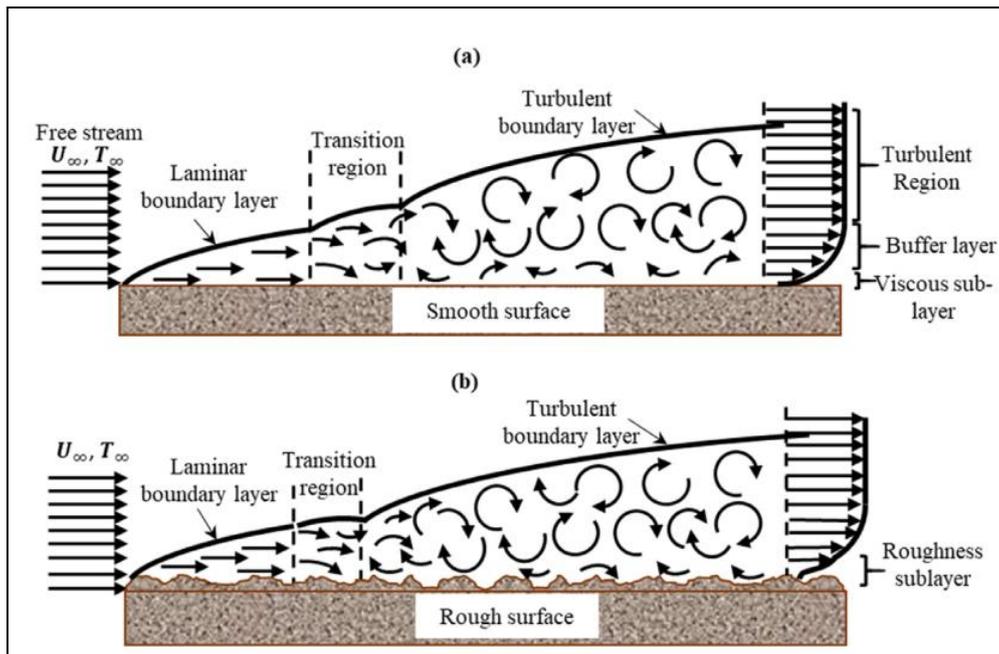


Figura 2. Capa Límite sobre una superficie lisa (a) y una con rugosidad (b) [1]

En este marco, la simulación permite investigar de forma cualitativa estos efectos con mucha mayor versatilidad que realizando ensayos de campo o en túnel de viento. En particular, se modela la rugosidad de forma numérica, integrándola en las ecuaciones que resuelven el campo de flujo, para tener en cuenta su influencia, y así poder comparar con datos experimentales para validar sus resultados. Sin embargo, trabajos publicados de simulación del flujo en perfiles aerodinámicos con rugosidad, presentan diferencias con los resultados experimentales. Por ejemplo, Kruse et al [11, 12] obtiene diferencias de aproximadamente 15% en los máximos coeficientes de sustentación y de un 12% en los coeficientes de resistencia a un número de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ y algo menor para $5 \cdot 10^6$, con respecto a los resultados experimentales en el perfil NACA 63(3)-418, en los mismos experimentos que utilizamos en este trabajo para evaluar el modelo numérico.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo una serie de simulaciones numéricas de CFD (Computational Fluid Dynamics) con el software *ANSYS*, mediante el solver *Fluent*, y las herramientas de modelado de geometría y mallado, *Design Modeler* y *Ansys Meshing*, respectivamente.

Inicialmente, para validar el modelo numérico utilizados, se realizaron simulaciones para un flujo turbulento sobre una placa plana lisa de longitud $L=50\text{ m}$ con diferentes modelos de turbulencia y realizando un estudio de convergencia de malla. Se probaron otras longitudes, pero la mencionada resultó la más práctica porque se abarca la mayor cantidad de números de Reynolds sin llegar a velocidades extremadamente altas.

Posteriormente se simuló un flujo de capa límite turbulenta desde el inicio, sobre la misma placa, pero con diferentes valores de rugosidad uniforme de escala de grano de arena nominal K_s , variando el número de Reynolds para un valor de rugosidad relativa L/K_s fijo. Estos resultados se compararon con las curvas del coeficiente de resistencia total (C_d) en función del número de Reynolds, propuestas por Schlichting y Prandtl [9], a partir de los resultados obtenidos por Nikuradse con tubos enarenados.

Una vez validado el modelo de rugosidad, se llevó a cabo el modelado y mallado para un perfil NACA 63(3)-418 para ángulos de ataque de -5 a 15° , el cual es el rango donde la curva de potencia de una turbina eólica es máxima [11]. Se realizó para un $Re=3.000.000$ y $Re=5.000.000$, que se obtuvo a partir de un valor de cuerda $c=1m$, densidad del fluido $\rho=1kg/m^3$, velocidad $V=1 m/s$ y la viscosidad μ de forma que cumpla el valor de Reynolds, y las configuraciones descritas en la **Tabla 1**.

Se utilizaron tres valores de rugosidades en el borde de ataque, a partir de lo propuesto en los ensayos en túnel de viento de Krog Kruse *et al.* [11,12], en el cual se hizo uso de papel de lija P40, P60 y P120 para modelar la rugosidad. A su vez se aplicó la rugosidad en tres porcentajes de cuerda: 3%, 4% y 8% como se muestra en la **Figura 3**. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las simulaciones realizadas junto con el valor de rugosidad equivalente K_s para cada papel de lija, definido a partir de un estudio de Flack y Schultz [11,13]. Se verificaron los resultados del coeficiente de resistencia y sustentación del perfil con los provistos por los estudios experimentales mencionados.

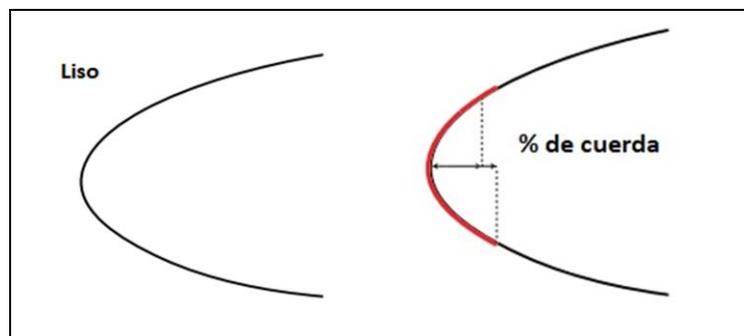


Figura 3. Diferentes configuraciones de rugosidad de borde de ataque

Tabla 1. Resumen de simulaciones realizadas para el perfil aerodinámico

Nro. Simulación/ Experimento	Tamaño de Grano	K_s [μm]	Nro. Reynolds	% de cuerda de LER
1	Liso	0	$3 \cdot 10^6$	-
2	Liso	0	$5 \cdot 10^6$	-
3	P120	357	$3 \cdot 10^6$	3%
4	P120	357	$3 \cdot 10^6$	8%
5	P60	955	$3 \cdot 10^6$	8%
6	P40	1637	$5 \cdot 10^6$	4%
7	P120	357	$5 \cdot 10^6$	4%

CONFIGURACIÓN NUMÉRICA

Las simulaciones son en dos dimensiones, estacionarias, del tipo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) con modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*). Las ecuaciones son resueltas con el algoritmo SIMPLE y los términos convectivos son discretizados con el esquema QUICK. No se presentaron problemas de convergencia en las simulaciones, obteniéndose residuos ponderados menores a 10^{-6} .

El modelo de turbulencia utilizado posee una extensión para tener en cuenta la rugosidad superficial [10]. Para esto se definen dos parámetros para caracterizar la misma: la altura de rugosidad equivalente, K_s , y una constante C_s que depende del tipo de rugosidad y que, por lo general, toma por defecto un valor de 0.5.

Según el modelo utilizado, se recomienda que la altura adimensional y^+ del elemento adyacente a la pared sea por lo menos menor a 1. En este caso la malla se dimensionó para obtener un y^+ menor a 0.1.

DOMINIO Y MALLADO

Para el perfil se planteó un dominio tipo C, con un radio de 12.5m y una extensión lateral de 20m respecto al borde de fuga, como se muestra en la **Figura 4**. Sobre el borde circular y los laterales superior e inferior se impone una condición de velocidad de entrada, variable en dirección según el ángulo de ataque. En el borde derecho se plantea una condición de presión atmosférica de salida, mientras que sobre el perfil se tiene una condición de pared.

Se implementó una malla no estructurada, para tener mayor independencia en el alineamiento de los elementos respecto a la dirección del flujo. Se cubrió el perfil con aproximadamente 400 elementos tanto en intradós como en extradós, refinando aún más en la zona del borde de ataque y el borde de fuga. Se creó un “Inflation” para poder asegurar que el primer elemento cumpla con el requisito de y^+ planteado. Por último, se creó un cuerpo de influencia alrededor del perfil, con la capacidad de rotar para cada ángulo de ataque, alineándose con la dirección del flujo para así poder capturar la estela del perfil con mayor precisión. Este se extiende un tamaño de tres veces la cuerda hacia atrás, respecto al borde de ataque y con un arco de influencia de 30° . La malla resultante contiene alrededor de 96200 elementos. Las **Figuras 4, 5 y 6** muestran la malla con diferentes niveles de aproximación.

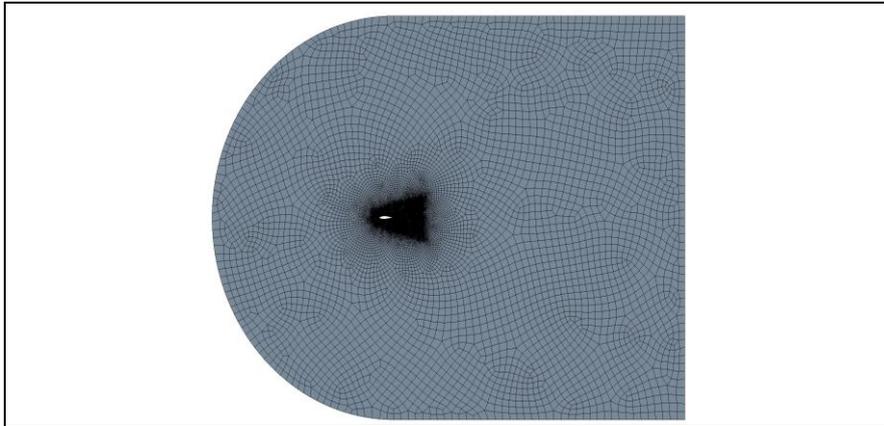


Figura 4. Mallado del dominio total y el cuerpo de influencia

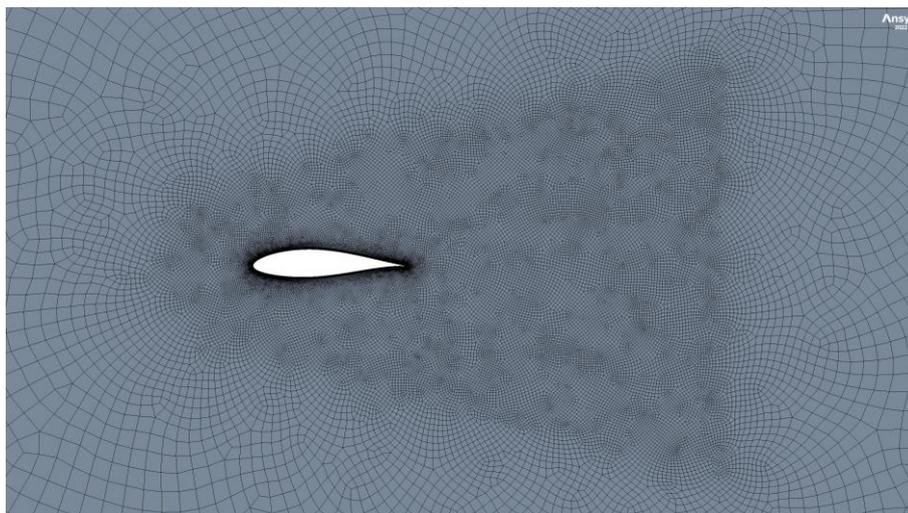


Figura 5. Mallado del cuerpo de influencia rotante con el ángulo de ataque

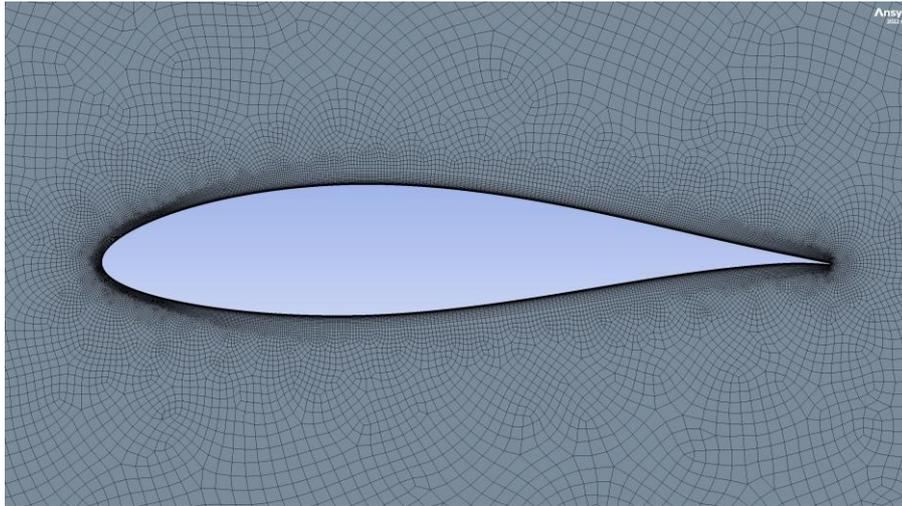


Figura 6. Mallado de cerca del NACA 63(3)-418 refinado en el borde de ataque y de fuga

RESULTADOS

PLACA PLANA

Las simulaciones de placa plana con rugosidad superficial uniforme fueron comparadas con las curvas semiempíricas de Schlichting [9] para valores diferentes de rugosidad relativa y demostraron muy buena concordancia, como se puede apreciar en la **Figura 7**. También se verifica que, efectivamente, para un valor de L/K_s fijo, si se varía la velocidad sobre la placa, existe un punto a partir del cual el coeficiente de resistencia es independiente del número de Reynolds. Este punto se denomina límite de la región del flujo rugoso completamente desarrollado.

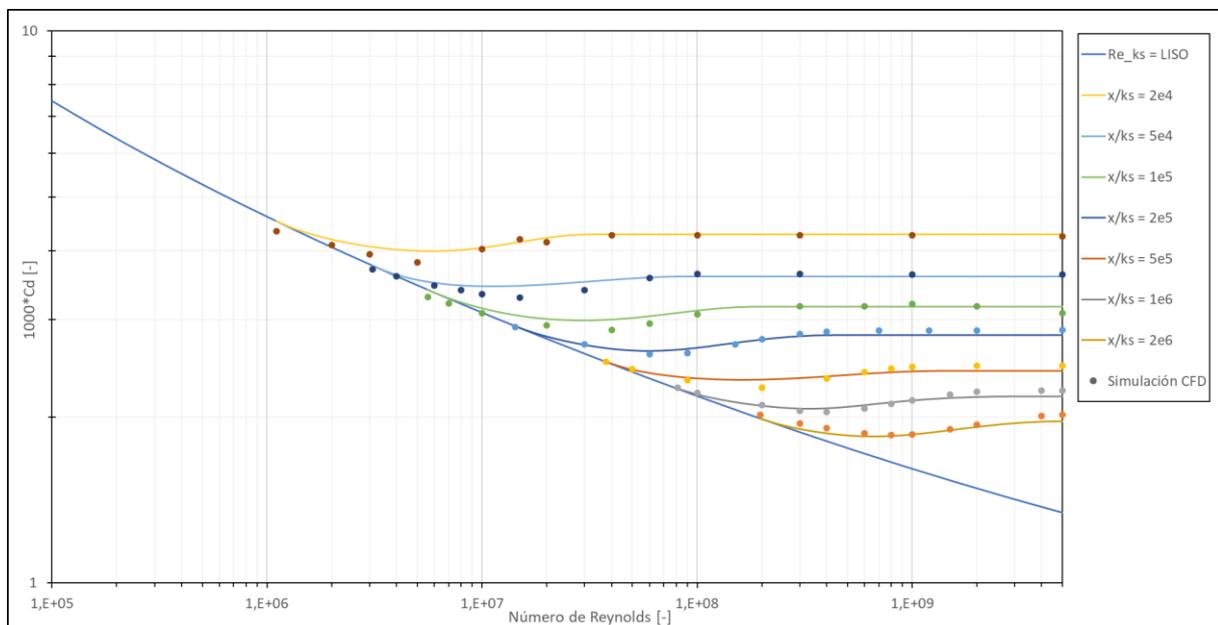


Figura 7. Resultados de la placa plana rugosa en comparación con la ley de resistencia de una placa enarenada de Schlichting y Prandtl [9].

PERFIL AERODINÁMICO

La **Figura 10** muestra los datos experimentales del perfil liso [12] de cuatro estudios diferentes en comparación con la simulación en CFD, ya que esto sirve como base para las simulaciones con

rugosidad. Se observa a la izquierda la sustentación en función del ángulo de ataque, que va desde aproximadamente -5° hasta 15° , y a la derecha se muestra la sustentación en función de la resistencia. El perfil aerodinámico liso experimental muestra una pérdida de sustentación a un ángulo de ataque menor que la simulación, probablemente debido a efectos del túnel y la simplificación del modelo de turbulencia. La sustentación máxima se sobreestima en las simulaciones, con un error máximo de aproximadamente 15% respecto a los datos de la NASA.

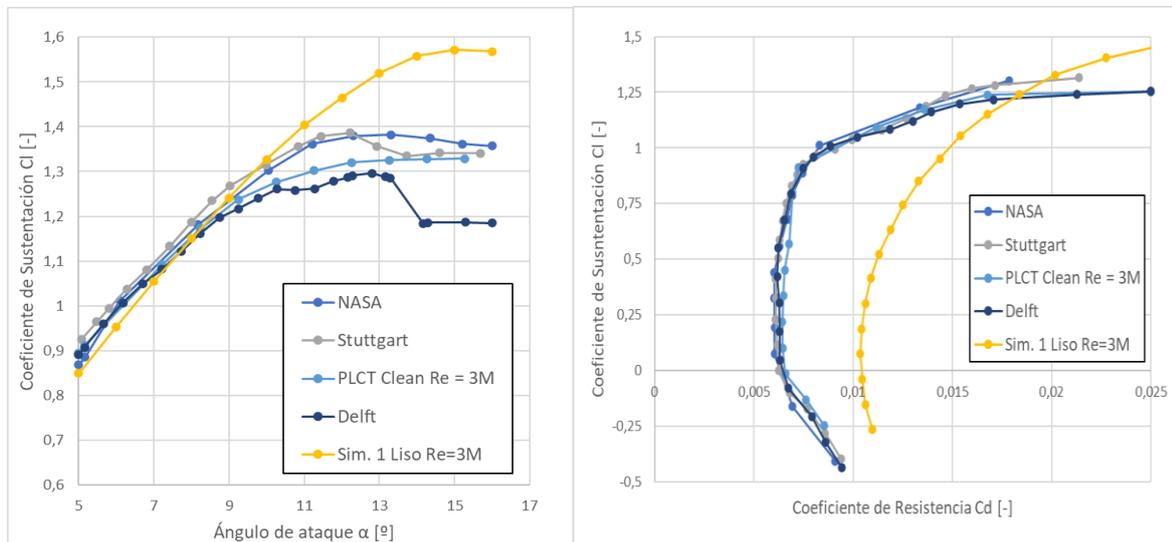


Figura 8. Resultados de Cd y Cl de la simulación para un perfil liso para $Re = 3 \cdot 10^6$.

En cuanto al coeficiente de resistencia, los datos experimentales muestran el “pozo de laminaridad”, una zona de mayor eficiencia donde la resistencia es mínima. La **Figura 9** muestra que esta zona no se reproduce en las simulaciones, probablemente debido al hecho de que se parte de un modelo donde se asume que el flujo es turbulento desde el principio.

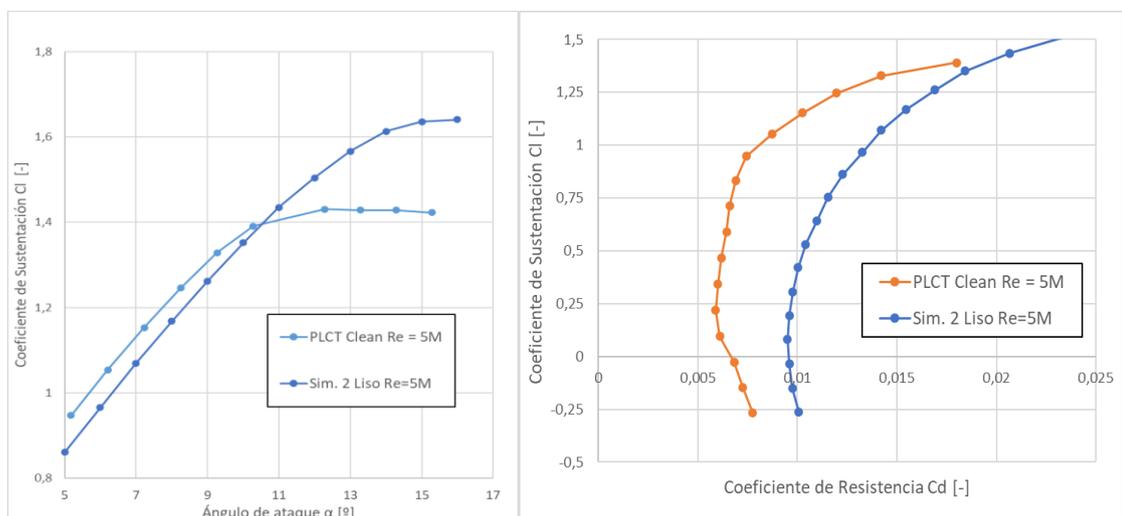


Figura 9. Resultados de Cd y Cl de la simulación para un perfil liso para $Re = 5 \cdot 10^6$.

A continuación, se presentan los resultados para los perfiles con rugosidad junto con las curvas experimentales en túneles de viento [11,12].

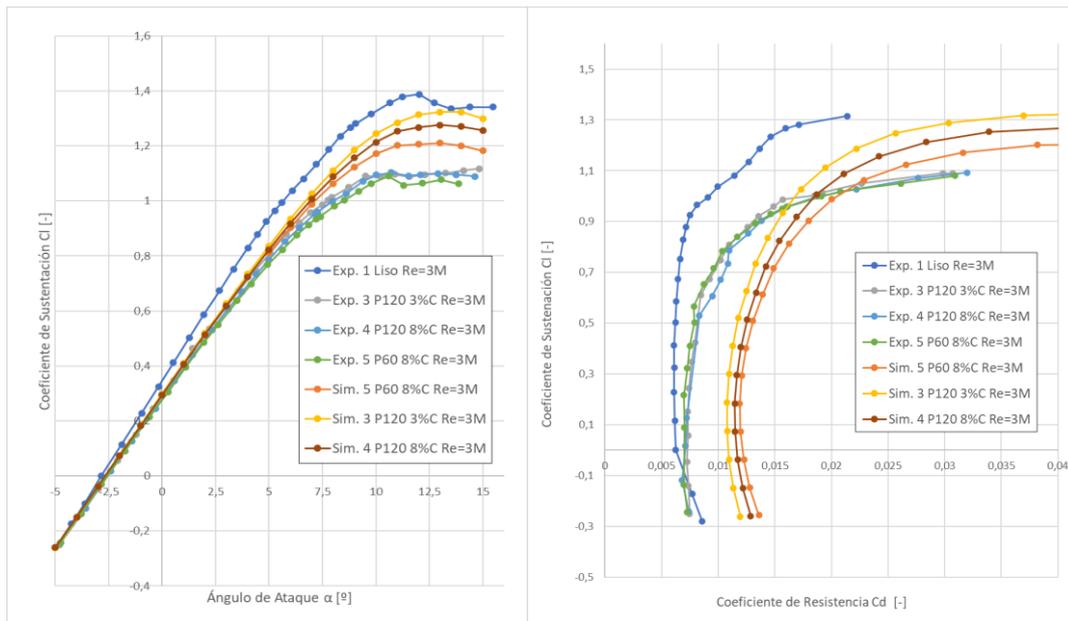


Figura 10. Resultados de Cd y Cl de la simulación para un perfil con rugosidad para $Re=3 \cdot 10^6$.

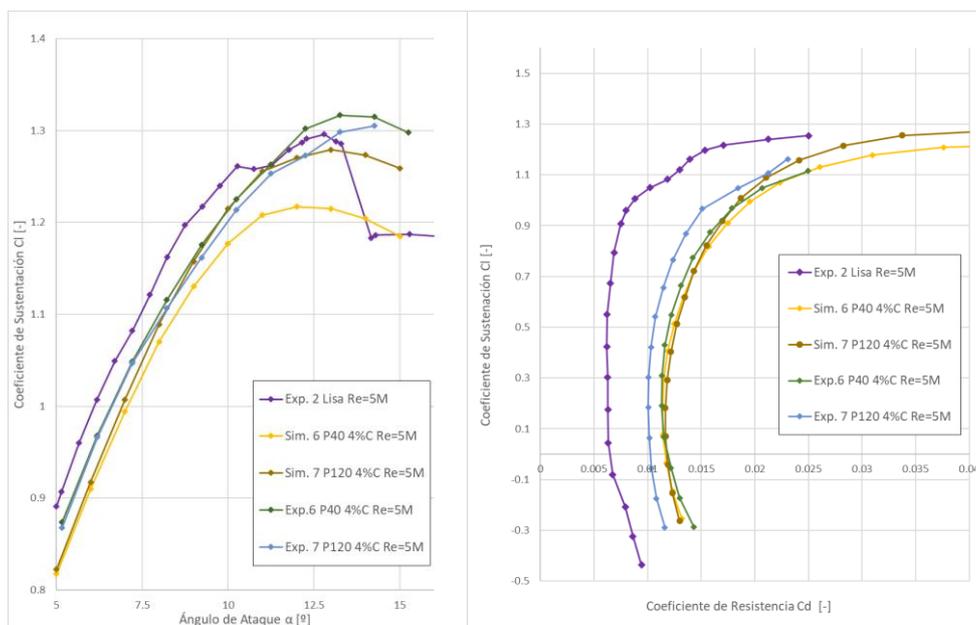


Figura 11. Resultados de Cd y Cl de la simulación para un perfil con rugosidad para $Re = 5 \cdot 10^6$.

En las Figuras 10 y 11 se puede observar la concordancia del coeficiente de sustentación hasta un ángulo de ataque de casi 7° . Para el caso del coeficiente de resistencia sí se ve un cierto error y corrimiento de la curva, sin embargo, este es de menos del 10%.

CONCLUSIONES

Se logró validar el modelado de las tensiones de corte con CFD para placas planas con distintas rugosidades, verificando los valores del coeficiente de fricción total indicados por la ley de resistencia de Schlichting. Por otro lado, los resultados de las simulaciones del perfil NACA 63(3)-418 fueron consistentes con otras simulaciones de otros autores ([11]), presentando la misma escala máxima de error para el Cd y en la zona de entrada en pérdida para el Cl. Estas discrepancias con los valores experimentales confirman las dificultades y desafíos que aún presentan los modelos simplificados de

rugosidad, aún cuando estén validados con el problema base del flujo sobre la placa plana sin gradiente de presión.

Los resultados de los cuatro tipos de papel de lija con diferentes alturas de rugosidad y extensión sobre el perfil mostraron un comportamiento y magnitudes similares a los resultados experimentales. Si comparamos las curvas del perfil liso respecto a las que tienen rugosidad, se puede observar un aumento en la resistencia total, una disminución de la pendiente de sustentación y del coeficiente de sustentación máximo. Por otro lado, si comparamos las curvas con igual extensión de rugosidad sobre el borde de ataque, pero con alturas de rugosidad diferentes (Sim. 4 y 5 de la **Fig. 10**), podemos concluir que para una mayor altura de rugosidad (o menor tamaño de papel de lija) hay un aumento de la resistencia y una disminución del coeficiente de sustentación máximo. Esta misma degradación se puede ver si aumentamos la extensión de la rugosidad sobre el borde de ataque, para un mismo tamaño de papel de lija (Sim. 3 y 4 de la **Fig. 10**). Se deja para un trabajo futuro analizar los cambios aerodinámicos para una misma rugosidad y un mayor rango de números de Reynolds.

Respecto al pozo de laminaridad en las curvas del perfil liso, podrían obtenerse resultados más precisos haciendo uso de un modelo de transición laminar-turbulento. Sin embargo, en los experimentos con rugosidad no se observa esta zona, probablemente debido a que la rugosidad de borde de ataque hace que el flujo sobre el perfil se vuelva turbulento desde el inicio, dejando de ser un problema para las simulaciones.

El trabajo futuro contempla aplicar estos modelos y otros que incluyan la transición laminar-turbulenta, a otros perfiles de uso común en turbinas eólicas y eventualmente otras turbomáquinas, para poder predecir las pérdidas de eficiencia esperables por la rugosidad debida a la acumulación de suciedad, erosión u otras causas.

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el proyecto PICT 2019 – 00570, “Efectos de erosión, suciedad y hielo en palas de aerogeneradores”.

REFERENCIAS

1. M. Kadivar, D. Tormey, G. McGranaghan: A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories, *International Journal of Thermofluids*, 2021. Vol 10.
2. M. Khalfallah and A. Koliub: Effect of dust on the performance of wind turbines; *The Ninth Arab International Conference on Solar Energy (AICSE-9)*, Kingdom of Bahrain, Elsevier Desalination, 2007, Vol 209, Issues 1-3, pages 209-220.
3. L. Deshun, L. Rennian, Y. Congxin and W. Xiuyong: Effects of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil; *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010.
4. H. Law and V. Koutsos: Leading edge erosion of wind turbines: Effect of solid airborne particles and rain on operational wind farms; *Wind Energy*, 2020.
5. A.H. Sierra and E.G. Perez: Wind farm owner's view on rotor blades: from O&M to design requirements; *International Conference Wind Turbines Rotor Blade O&M*, 2013.
6. A. Sareen, C.A. Sapre and M.S. Selig: Effects of leading-edge erosion on wind turbine blade performance; *Wind Energy*, 2014.
7. R. van Rooij and W.A. Timmer: Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils; *J Solar Energy Eng Trans ASME*, 2003, 125, pp 468-478.
8. R.W. Hooker: The aerodynamic characteristics of airfoils as affected by surface roughness; *NACA-TN-457 Langley Memorial Aeronautical Laboratory*; 1933.
9. H. Schlichting; “Teoría de la Capa Límite”; 1951, Ed. Urmo.
10. F. Menter: Development of a rough wall boundary condition for ω -based turbulence models; *ANSYS Technical Report*, 2004.
11. E.K. Kruse, N. Sørensen, C. Bak and M.S. Nielsen: CFD simulations and evaluation of applicability of a wall roughness model applied on a NACA 633-418 airfoil; *Wind Energy*, 2020, pp 1–12.
12. E.K. Kruse, C. Bak and A.S. Olsen: Wind tunnel experiments on a NACA 633-418 airfoil with different types of leading-edge roughness; *Wind Energy*, 2021.
13. K.A. Flack and M.P. Schultz: Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime; *J Fluids Eng.*, 2010.