

# Equivalent Roughness Height for CFD Studies on Three NACA Airfoils

De Urzaa Alexis, Torres Zanardi Juan Manuel, Scarabino Ana, and Bacchi Federico

Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 116 e/ 47 y 48, La Plata, Buenos Aires, Argentina  
`scarabino@ing.unlp.edu.ar`

**Abstract.** Accurate prediction of roughness effects on the aerodynamic performance of wind turbine blades and other airfoil-based systems is essential for a reliable assessment of their performance. Surface roughness increases near-wall turbulence production and alters the mean velocity profile, resulting in higher skin friction coefficients and a modified boundary layer development, directly affecting aerodynamic loads and airfoil performance. Most experimental studies and numerical model calibrations are based on canonical configurations, such as zero-pressure-gradient boundary layers and pipe or channel flows. Although these simplified cases provide valuable insights, they do not represent the complex physics present in real-world applications, where significant pressure gradients—both favorable and adverse—are common. This study aims to evaluate the predictive capability and limitations of RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) numerical simulations in capturing surface roughness effects on the aerodynamic characteristics of airfoils by comparing numerical results with experimental data. An analysis is conducted to determine the equivalent roughness of a specific configuration applied to the leading edge of airfoils, alongside numerical simulations to evaluate the obtained predictions. This roughness configuration corresponds to the standard definition established by Abbott and von Doenhoff. The  $k - \omega$  SST turbulence model is evaluated along with various roughness corrections to quantify model accuracy and identify the conditions under which current approaches remain valid or require further development.

**Keywords:** cfd, roughness, airfoil, simulation

# Altura de Rugosidad Equivalente para Estudios en CFD sobre Tres Perfiles NACA

**Abstract.** La predicción precisa de los efectos de la rugosidad en el rendimiento aerodinámico de palas de aerogeneradores y otros sistemas basados en perfiles aerodinámicos es esencial para una evaluación fiable de su performance. La rugosidad superficial afecta el desarrollo de la turbulencia cerca de la pared y altera el perfil medio de velocidad, lo que resulta en mayores coeficientes de fricción superficial y un desarrollo modificado de la capa límite, afectando directamente las cargas aerodinámicas y performance de los perfiles. La mayoría de los estudios experimentales y calibraciones de modelos numéricos se basan en configuraciones canónicas, como capas límite con gradiente de presión nulo y flujos en tuberías o canales. Aunque estos casos simplificados aportan información valiosa, no representan la física compleja presente en aplicaciones reales, donde son comunes gradientes de presión significativos, tanto favorables como adversos. Este estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad predictiva y las limitaciones de las simulaciones numéricas RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) para capturar los efectos de la rugosidad superficial en las características aerodinámicas de perfiles aerodinámicos, mediante la comparación de resultados numéricos con datos experimentales. Se realiza un análisis para determinar la rugosidad equivalente de una configuración específica aplicada en el borde de ataque de perfiles, y simulaciones numéricas para evaluar las predicciones obtenidas. Esta configuración de rugosidad corresponde a la definición estándar establecida por Abbott y von Doenhoff. Se evaluará el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST, junto con diversas correcciones de rugosidad, para cuantificar la precisión de los modelos e identificar las condiciones bajo las cuales los enfoques actuales siguen siendo válidos o requieren desarrollo adicional.

**Keywords:** cfd, rugosidad, perfiles, simulación

## 1 Introducción

Se ha demostrado que el estado del borde de ataque de las palas de los aerogeneradores desempeña un papel relevante en sus características aerodinámicas (Gaudern, 2014; Sapre and Selig, 2014). El borde de ataque de las palas es la zona más expuesta a los factores ambientales, y su estado puede verse alterado por la acumulación de partículas de suciedad y polvo, la acumulación de hielo, la erosión superficial o la contaminación por impacto de insectos, entre otros factores. Estos efectos generan lo que se conoce como rugosidad superficial. Las pérdidas de eficiencia debidas a la erosión y sedimentación en las palas de los aerogeneradores pueden alcanzar niveles de hasta el 50% (Deshun et al., 2010; Khalfallah and Koliub, 2007). Además de estas pérdidas, deben considerarse los costos y tiempos de inactividad asociados a las tareas de mantenimiento. La lluvia, el granizo, los insectos, la arena, el polvo y otras partículas transportadas por el viento impactan contra las palas a velocidades relativas de hasta 200 km/h durante su funcionamiento (Law and Koutsos, 2020). Un estudio de EDP Renewables (Sierra and Perez, 2013) que incluyó 201 palas en un parque eólico descubrió que el 87% presentaba signos de erosión, y el 50% exhibía una erosión severa en el borde de ataque. Este proceso de degradación tarda en manifestarse visiblemente y es difícil de detectar en sus etapas iniciales. Las técnicas de diagnóstico actuales se basan en la inspección visual (Herring et al., 2019), el procesamiento de imágenes (Shihavuddin et al., 2019) y el análisis estadístico de variables operativas como la velocidad de rotación, la potencia de salida o el ángulo de paso de la pala (Gertsen, 2019; Shen, 2019). Sin embargo, la inspección visual requiere la parada de la turbina, lo que conlleva pérdidas de producción, y solo proporciona una instantánea del estado actual sin información sobre su progresión pasada o futura.

Dentro de este marco, la simulación numérica permite investigar este efecto analizando la influencia de factores como la velocidad del viento, la cantidad y el tamaño de las partículas transportadas y las propiedades del material de la pala, ofreciendo una versatilidad significativamente mayor que las pruebas de campo o los experimentos en túneles de viento. La literatura actual demuestra la creciente aplicación de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), tanto para calcular la degradación del rendimiento (Wang et al., 2021) como para modelar el proceso de erosión en sí (Duthé et al., 2021).

La forma en que la rugosidad superficial afecta finalmente al rendimiento de un cuerpo depende en gran medida de su tamaño. Como muestra Nikuradse (Nikuradse, 1933), todas las superficies poseen rugosidad, pero cuando su altura se sitúa por debajo de la subcapa viscosa, dentro de la capa límite, su efecto se considera despreciable. Sin embargo, a medida que su altura aumenta, el efecto sobre la resistencia y la sustentación se vuelve cada vez ms significativo.

El libro clásico de Ira H. Abbott y Albert E. von Doenhoff, *Theory of Wing Sections* (Abbott and Von Doenhoff, 1959), sigue siendo una de las referencias experimentales más importantes para la aerodinámica, porque recopila un gran volumen de datos de perfiles alares cuidadosamente medidos, obtenidos principalmente en los túneles de viento de la NACA (National Advisory

Committee for Aeronautics). El trabajo proporciona mediciones detalladas de los coeficientes de sustentación ( $C_l$ ), resistencia ( $C_d$ ) y momento ( $C_m$ ) para diferentes perfiles en una amplia gama de números de Reynolds y ángulos de ataque, lo que lo convierte en un conjunto de datos de referencia fundamental para validar los modelos CFD modernos. Dado que los experimentos se realizaron con procedimientos rigurosos y repetibles, las polares resultantes se siguen utilizando ampliamente para evaluar la precisión de los modelos de turbulencia, los métodos de predicción de la transición y los “solvers” numéricos. Un aspecto de interés del conjunto de datos es la inclusión de pruebas con rugosidad estándar, en las que se aplicó una distribución controlada de elementos de rugosidad superficial cerca del borde de ataque para simular la contaminación de la superficie o las imperfecciones de fabricación. Estas pruebas de rugosidad permiten a los investigadores evaluar la sensibilidad del rendimiento del perfil alar a la transición de la capa límite, proporcionando un caso de referencia adicional para las simulaciones CFD que intentan modelar los efectos de la rugosidad y la transición temprana en las características de sustentación y resistencia. Relacionar la "rugosidad estándar" experimental de Abbott (Abbott and Von Doenhoff, 1959; Abbott et al., 1945) con los modelos de rugosidad aplicados en CFD, como ANSYS Fluent, no es directo. En las pruebas originales del túnel de viento de la NACA, la rugosidad consistía en granos de carburo de silicio discretos aplicados en una franja estrecha cerca del borde de ataque para provocar una transición temprana de la capa límite. Por el contrario, los modelos de turbulencia de CFD suelen representar la rugosidad a través de una “altura de rugosidad de grano de arena equivalente” uniforme,  $K_{s\ eq}$  debido a que la rugosidad experimental está localizada y compuesta por elementos discretos que pueden tener diferentes separaciones, mientras que el parámetro de CFD asume una superficie idealizada uniforme, no existe una conversión directa entre el tamaño del grano físico y la altura de rugosidad numérica. Como resultado, la reproducción de los efectos de la rugosidad experimental en CFD de los perfiles alares de dichos experimentos requiere aproximación o calibración empírica.

En cuanto a las simulaciones CFD, existen actualmente numerosos modelos de turbulencia en los que se han introducido correlaciones de rugosidad superficial, basadas en resultados de experimentos previos. Tal es el del modelo de turbulencia RANS  $k-\omega$  *SST* de Menter (Menter, 1994), al que Hellsten y Laine (Hellsten and Laine, 1997) introdujeron una modificación para añadir una correlación para superficies rugosas, basada en la altura de rugosidad equivalente de grano de arena  $K_s$ . Dejan a criterio del lector la determinación de la altura de rugosidad equivalente, basándose en las diferentes posibilidades de rugosidad encontradas en una superficie.

Numerosos estudios han intentado encontrar una relación entre las características de la rugosidad, como su forma, altura y distribución, y la rugosidad equivalente de grano de arena. Un ejemplo de esto es Schlichting (Schlichting, 1936), quien buscó determinar la relación entre la geometría de las partículas, la distancia entre ellas y la altura geométrica de la rugosidad con la rugosidad equivalente. Más tarde, Coleman (Coleman et al., 1984) publicaron un

estudio evaluando el efecto de las suposiciones de Schlichting en el valor final de la rugosidad equivalente. Basándose en una mayor disponibilidad de resultados experimentales, demostraron que los valores de rugosidad equivalente de grano de arena obtenidos por Schlichting deberían ser, en realidad, más bajos. Estos resultados se utilizarán más adelante en este trabajo.

En el presente trabajo, se aborda el problema de determinar una relación entre la geometría y la distribución de la materia particulada en una superficie y su correspondiente altura de rugosidad equivalente  $K_{s\ eq}$ , con el objetivo de ser utilizada en simulaciones CFD. Este estudio sirve como continuación de investigaciones previas realizadas por este grupo respecto a la aerodinámica de perfiles alares y la rugosidad superficial, específicamente el trabajo de Marletta et. al. (Marletta et al., 2023). En su estudio, se validó la misma combinación de modelo de turbulencia y rugosidad utilizada aquí, recreando las curvas de  $C_d$  vs.  $Re$  para varias alturas de rugosidad equivalente en una placa plana, mostrando una buena concordancia con los datos empíricos de Schlichting. Mientras que Marletta et. al. (Marletta et al., 2023) se centraron en la rugosidad de tipo lija comercial (P120, P60 y P40) en un perfil NACA 63<sub>3</sub>-418, el presente estudio busca una relación entre el porcentaje de superficie cubierta por el particulado, tal como se presenta en la definición de rugosidad estándar de Abbott y von Doenhoff, y una rugosidad equivalente de grano de arena basada en los trabajos de Schlichting y Coleman. Esta relación puede utilizarse entonces como una condición de rugosidad superficial en el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST. Finalmente, se evaluará la validez de esta relación comparando los resultados de la simulación CFD con los resultados experimentales de rugosidad estándar.

## 2 Metodología

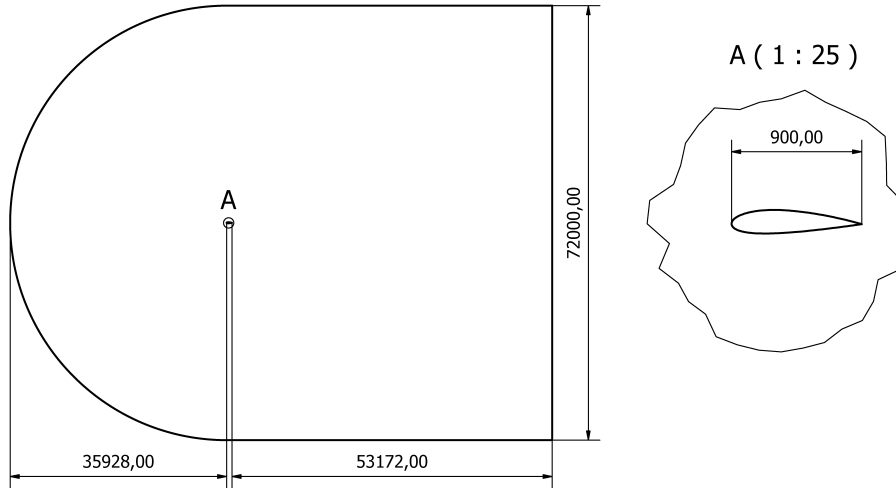
### 2.1 Ensayos en perfiles

En los ensayos reportados por Abbott y von Doenhoff (Abbott and Von Doenhoff, 1959), cada perfil es evaluado bajo diferentes condiciones, incluyendo variaciones en los regímenes de velocidad y configuraciones geométricas. En particular, el análisis de perfiles con rugosidad en el borde de ataque es de interés para el presente trabajo. En estos ensayos, definieron un tipo específico de rugosidad para ser utilizado de manera común en todos los perfiles: la "rugosidad estándar": granos con un diámetro de 0,011 pulgadas (0,2794 mm), aplicados únicamente en el borde de ataque, tanto en la superficie superior como en la inferior, hasta una distancia de 0,08 veces la cuerda del perfil. Estos granos cubren un área que varía entre el 5% y el 10% del borde de ataque. Nuestro objetivo será encontrar una manera de reproducir estos experimentos mediante simulaciones CFD. Las pruebas se realizaron en el túnel de viento de baja turbulencia del Centro de Investigación Langley. Las condiciones de turbulencia alcanzables en este túnel llegan a valores de intensidad de turbulencia tan bajos como 0,1-0,2% (Doenhoff and Frank T. Abbott, 1947), y el número de Reynolds en los ensayos de perfiles con rugosidad estándar es de  $6 \times 10^6$ . Estas condiciones se replicarán en las simulaciones.

El modelo de turbulencia  $k-\omega$  *SST* no utiliza la rugosidad geométrica  $K$  como entrada, sino la rugosidad equivalente  $K_s$  o rugosidad equivalente de grano de arena (Hellsten and Laine, 1997). Para cada rugosidad técnica, la rugosidad equivalente puede encontrarse a partir de ensayos donde se determina la distribución de velocidad  $u^+(y)$  en la capa límite sobre una superficie con la rugosidad técnica a evaluar (Schlichting and Gersten, 2017). Este parámetro depende tanto de la altura geométrica de la rugosidad como de su distribución. Schlichting presenta la rugosidad equivalente como una función de la distribución de las partículas, su altura y su diámetro. Basándose en la distancia entre partículas definida por Schlichting (Schlichting and Gersten, 2017) y considerando como representativa de la rugosidad estándar un área cubierta del 7,5%, se puede calcular la altura de rugosidad equivalente resultante, relacionando el área cubierta por las partículas con su rugosidad equivalente en granos de arena. En este caso, el valor del parametro  $K_{s\ eq}$  es:  $K_{s\ eq} = 3,6755 \times 10^{-4}$  m.

## 2.2 Configuración de las simulaciones

Para las simulaciones se utilizaron tres perfiles NACA: NACA 0012, NACA 2418 y NACA 63<sub>3</sub>-418. El dominio analizado se presenta en la Figura 1. Sus dimensiones fueron definidas de forma de evitar que las condiciones de contorno interfiriesen con la evolución del campo de flujo alrededor de los perfiles.



**Fig. 1.** Dominio utilizado para las simulaciones, dimensiones expresadas en mm.

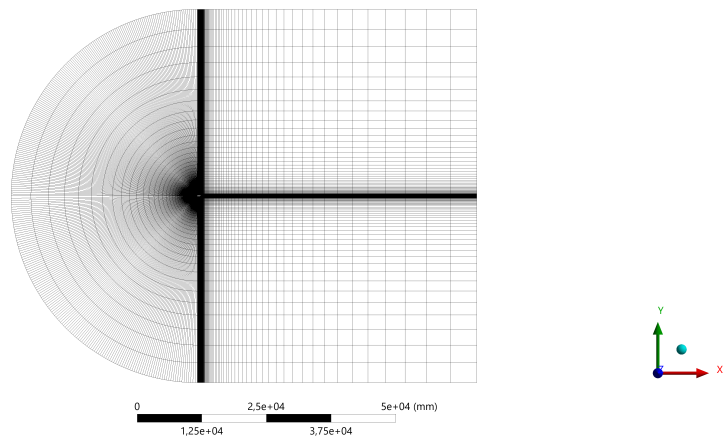
La malla fue estructurada y se seleccionó luego de un análisis de sensibilidad en el que se variaron dos parámetros: (1) altura del primer elemento y (2) número de elementos longitudinales sobre la superficie del perfil. Para cada malla propuesta, se realizaron simulaciones RANS con el modelo de turbulencia  $k-\omega$  *SST* utilizando un alto nivel de rugosidad en el perfil. Como indica Hellsten (Hellsten and Laine, 1997 y Hellsten, 1998), una superficie rugosa (con un régimen totalmente rugoso) requiere una malla más densa que una superficie lisa. Según Nikuradse (Nikuradse, 1933), el comportamiento del flujo depende del parámetro de rugosidad  $K_s^+ = K_s u^* / \nu$ . Para  $K_s^+ > 70$ , la rugosidad perturba la subcapa viscosa y el flujo entra en un régimen completamente rugoso. En el presente trabajo, las simulaciones preliminares utilizando la altura de rugosidad equivalente igual a  $3,6755 \times 10^{-4}$  m arrojaron valores de  $K_s^+$  mayores a 140 en todos los perfiles estudiados. Entonces, con el valor de rugosidad mencionado, se simularon tres ángulos de ataque: -4, 0 y 4 grados. A partir de este análisis, se calculó la variación máxima en los coeficientes de resistencia y sustentación con respecto a la primera malla propuesta.

**Table 1.** Descripción de las mallas analizadas y resultados del análisis de malla. Las máximas diferencias de los coeficientes son calculadas con respecto a los resultados de la malla 1.  $h_{pe}$  es la altura del primer elemento normal a la superficie del perfil, y "No. de elem. long." es el número de elementos a lo largo de la superficie del perfil.

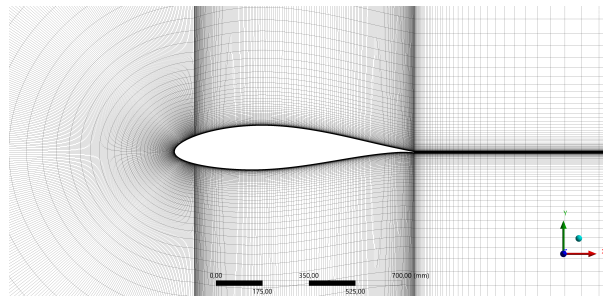
| Malla   | $h_{pe}$ [mm] | No. de elem. long. | Max. Dif. Cl [%] | Max. Dif. Cd [%] |
|---------|---------------|--------------------|------------------|------------------|
| Malla 1 | 0,0002        | 590                | -                | -                |
| Malla 2 | 0,0001        | 590                | 0,49             | 0,99             |
| Malla 3 | 0,0002        | 784                | 0,50             | 0,54             |

El análisis presentado en la Tabla 1 se centra en el perfil NACA 2418, aunque los resultados son consistentes en todos los casos. La malla de referencia (malla 1) se basa en un valor muy bajo de  $y^+$  : 0,01 para el caso liso, con el fin de satisfacer el requisito de bajo  $y^+$ . La malla 2 refina entonces este valor. Por otro lado, la malla 3 busca resaltar el efecto de una mayor discretización de la superficie del perfil. En ambos casos, la diferencia con respecto a la malla de referencia no es significativa. Sin embargo, para la malla 3, la convergencia mejoró notablemente, por lo que se utilizó esta malla. Al replicar la malla 3 para los perfiles restantes, se obtiene un recuento de elementos similar, resultando el tamaño de la malla de, aproximadamente, 144.000 celdas.

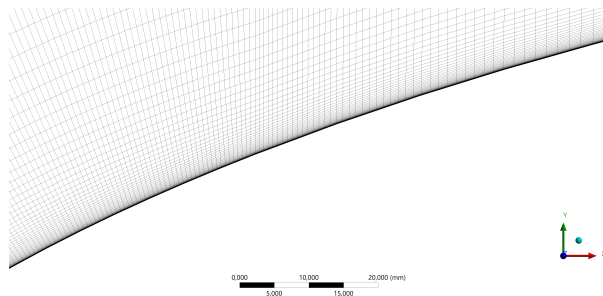
Las Figuras 2 y 3 muestran una vista más general de la malla utilizada. Posteriormente, la Figura 4 presenta una vista detallada cerca del borde de ataque.



**Fig. 2.** Malla utilizada, vista general.



**Fig. 3.** Malla utilizada, vista sobre el perfil.



**Fig. 4.** Malla utilizada, vista sobre la interfaz entre el borde de ataque y el extrados.



Las condiciones de entrada se definen a partir de dos requisitos: el número de Reynolds y la intensidad de turbulencia. En cuanto al número de Reynolds, los experimentos reportados por Abbott y von Doenhoff para los tres perfiles analizados con rugosidad estándar corresponden a un número de Reynolds de 5,8 a 6,0 millones. Por lo tanto, considerando una cuerda de perfil de 0,9 m, una densidad de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad dinámica de  $1,789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , la velocidad de entrada debe ser de unos 94 m/s para los tres casos.

En cuanto a la intensidad de turbulencia (TI), el túnel de viento utilizado permite valores de intensidad de turbulencia en torno al 0,1-0,2%. Como explican Spalart y Rumsey (Spalart and Rumsey, 2007), el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST presenta un decaimiento en la intensidad de turbulencia a medida que el flujo se desarrolla, que puede ser mayor o menor dependiendo de los valores de  $k$  y  $\omega$  definidos en la entrada, o de los valores de TI y el cociente entre la viscosidad turbulenta del flujo y la viscosidad dinámica del fluido. Este decaimiento sigue una ley, a partir de la cual se pueden determinar las condiciones de turbulencia de entrada para lograr la intensidad de turbulencia deseada alrededor del cuerpo bajo análisis. Con el dominio propuesto y la velocidad de entrada definida, los valores que permitieron establecer la TI alrededor de los perfiles en 0,1-0,2% fueron una intensidad de turbulencia de entrada del 0,4% y una relación de viscosidades turbulenta a laminar de 40.

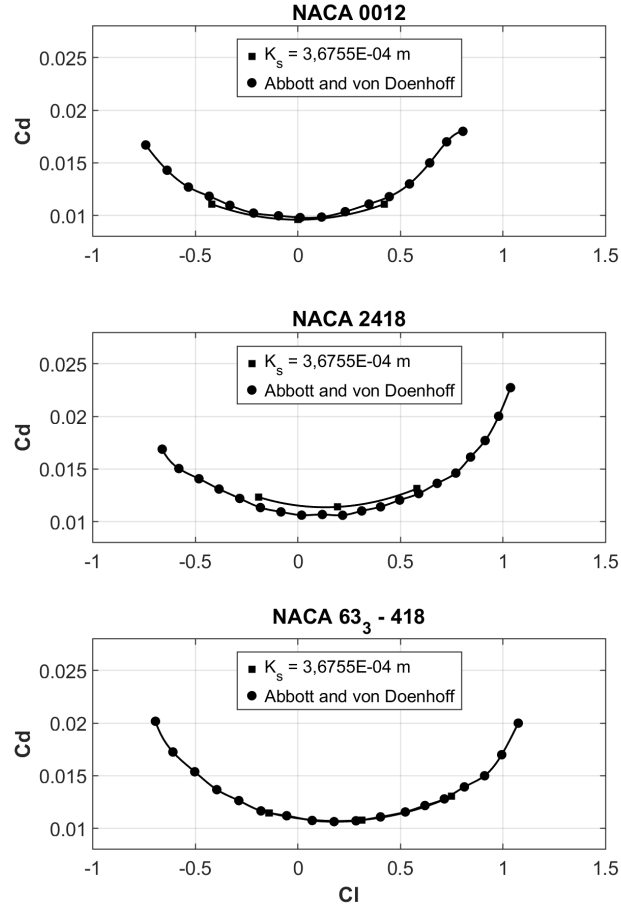
### 3 Resultados

A continuación, se llevó a cabo la simulación de cada perfil. Se simularon ángulos de ataque de -4, 0 y 4 grados. La Figura 5 presenta una comparación entre los resultados de coeficientes de resistencia en función del coeficiente de sustentación, obtenidos por las simulaciones, y los resultados obtenidos por Abbott y von Doenhoff para los tres perfiles analizados.

La primera gráfica se corresponde con el perfil NACA 0012. Se puede observar que la curva obtenida mediante las simulaciones se encuentra ligeramente por debajo de la experimental, lo que podría indicar la necesidad de utilizar un valor de rugosidad equivalente mayor. Sin embargo, la diferencia no es significativa en el rango de ángulos de ataque simulados, y el ajuste puede considerarse aceptable.

La segunda gráfica muestra la misma curva polar para el perfil NACA 2418. En este caso, la curva de la simulación se sitúa ligeramente por encima de los resultados experimentales. La diferencia se mantiene acotada en este rango de bajos ángulos de ataque.

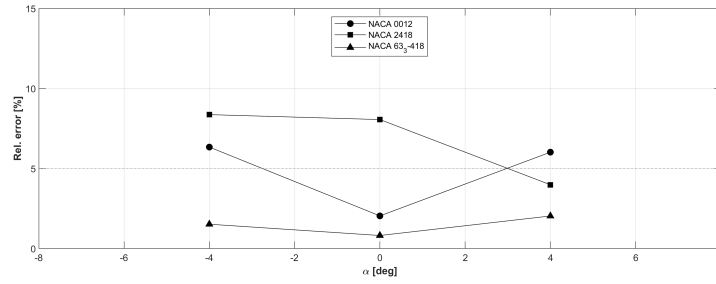
Finalmente, la tercera gráfica presenta la curva polar para el perfil NACA 633-418. Se observa que los resultados de la simulación se ajustan a los experimentales mejor que en los otros casos. La diferencia permanece baja para el rango de ángulos de ataque simulados.



**Fig. 5.** Comparación entre los resultados experimentales obtenidos por Abbott y von Doenhoff (Abbott and Von Doenhoff, 1959) y los resultados de las simulaciones, para los tres perfiles analizados, con una rugosidad equivalente de  $3,6755 \times 10^{-4}$  m. Los ángulos de ataque evaluados han sido -4, 0 y 4 grados.

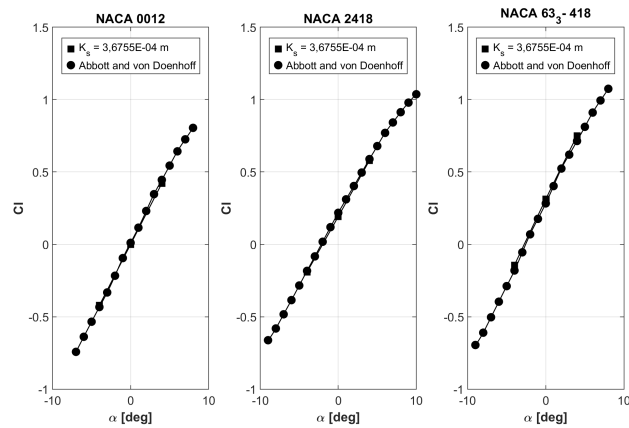
La Figura 6 presenta el error relativo de los coeficientes de resistencia en función del ángulo de ataque, utilizando el coeficiente de resistencia experimental como referencia para cada perfil en cada ángulo de ataque. También se indica con una línea discontinua el punto donde el error supera el 5%. Como se observó en las curvas polares de cada perfil, en todos los casos los resultados de la simulación son cercanos a los experimentales. Los perfiles NACA 0012 y NACA 63<sub>3</sub>-418 presentan las menores diferencias, mientras que el error máximo obtenido para

el perfil NACA 2418 fue cercano al 8%. Aun así, en términos generales, para el rango de ángulos de ataque, todos los perfiles presentan una diferencia inferior al 10%, cercana al 5%. Los perfiles NACA 0012 y NACA 63<sub>3</sub>-418 presentan menos error que el NACA 2418, situándose cerca o por debajo del 5% en todo el rango.



**Fig. 6.** Error relativo con respecto a los coeficientes de resistencia experimentales en función del ángulo de ataque para cada perfil analizado.

Por último, la Figura 7 muestra las curvas del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque para los tres perfiles analizados. Se puede observar que los resultados de la simulación se ajustan con precisión a la curva de sustentación en todo el rango de ángulos de ataque analizados. Para el rango de bajos ángulos de ataque, el error es muy bajo para los coeficientes de sustentación.



**Fig. 7.** Curvas de los coeficientes de sustentación en función del ángulo de ataque para cada perfil analizado.

## 4 Conclusiones

Este estudio evaluó la precisión de las simulaciones CFD para predecir los incrementos de resistencia causados por partículas esféricas distribuidas regularmente, identificando específicamente la altura de rugosidad equivalente de grano de arena ( $K_s$ ) que mejor se alinea con la evidencia experimental. Se analizaron tres perfiles NACA (NACA 0012, NACA 2418 y NACA 63<sub>3</sub>-418) con rugosidad en el borde de ataque. Basándose en la investigación establecida de Schlichting, se propuso un valor de rugosidad equivalente correspondiente a una cobertura superficial del 7,5%. Las simulaciones realizadas a ángulos de ataque de -4, 0 y 4 grados demostraron que los coeficientes de sustentación y resistencia resultantes reflejan fielmente las curvas experimentales para bordes de ataque rugosos.

La aplicación de un único valor representativo,  $K_s = 3,6755 \times 10^{-4}$  m, proporcionó un ajuste sólido para la polar de resistencia-sustentación de los perfiles NACA 0012 y NACA 63<sub>3</sub>-418. Aunque los resultados para el NACA 2418 se desviaron aproximadamente un 8%, las predicciones del coeficiente de sustentación en todos los modelos mostraron un alto grado de correlación con los datos experimentales. Por consiguiente, este valor de  $K_s$  sirve como una aproximación fiable para estimar el  $C_d$  de perfiles con rugosidad estándar en el borde de ataque dentro del régimen de bajos ángulos de ataque. Esto permite utilizar la amplia base de datos experimentales del libro de Abbott y von Doenhoff para validar otros modelos numéricos con rugosidad superficial aplicados a perfiles aerodinámicos.

Las investigaciones futuras se centrarán en ampliar el conjunto de datos para incluir una mayor variedad de perfiles alares y en refinar  $K_{s\ eq}$  en función de distribuciones específicas del área superficial. Se espera que este enfoque optimice aún más la alineación entre las predicciones de CFD y las observaciones experimentales, permitiendo el estudio de la degradación de performance por incrementos de rugosidad en sistemas como turbinas eólicas, palas de helicópteros y alas de aeronaves con modelos numéricos validados y confiables.

## References

- Abbott, I. H., & Von Doenhoff, A. E. (1959). *Theory of Wing Sections - Including a Summary of Airfoil Data*. Dover Publications, Inc.
- Abbott, I. H., Doenhoff, A. E. V., & Jr., L. S. S. (1945). Report No. 824 - Summary of Airfoil Data (N. A. C. F. Aeronautics, Ed.).
- Coleman, H. W., Hodge, B. K., & Taylor, R. P. (1984). A Re-Evaluation of Schlichting's Surface Roughness Experiment. *Journal of Fluids Engineering*, 106(1), 60–65.
- Deshun, L., Rennian, L., Congxin, Y., & Xiuyong, W. (2010). Effects of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–4.
- Doenhoff, A. E. V., & Frank T. Abbott, J. (1947). Technical Note No. 1283 - The Langley Two-dimensional Low-turbulence Pressure Tunnel (L. M. A. L. National Advisory Committee For Aeronautics, Ed.).
- Duthé, G., Abdallah, I., Barber, S., & Chatzi, E. (2021). Modeling and Monitoring Erosion of the Leading Edge of Wind Turbine Blades [7262]. *Energies*, 14(21).
- Gaudern, N. (2014). A Practical Study of the Aerodynamic Impact of Wind Turbine Blade Leading Edge Erosion [12031]. *Journal of Physics: Conference Series* 524.
- Gertsen, T. (2019). Data-Driven Leading Edge Erosion Detection for Wind Turbine Blades Using SCADA Data. *Master's Thesis, TU Delft, Delft, The Netherlands*.
- Hellsten, A. (1998). Some Improvements in Menter's  $k-\omega$  SST Turbulence Model. *AIAA 29th Fluid Dynamics Conference*, 1–11.
- Hellsten, A., & Laine, S. (1997). Extension of the  $k-\omega$ -SST Turbulence Model for Flows Over Rough Surfaces. *AIAA 22nd Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 252.
- Herring, R., Dyer, K., Martin, F., & Ward, C. (2019). The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions [109382]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115.
- Khalfallah, M. G., & Koliub, A. M. (2007). Effect of dust on the performance of wind turbines. *Desalination*, 209, 209–220.
- Law, H., & Koutsos, V. (2020). Leading edge erosion of wind turbines: Effect of solid airborne particles and rain on operational wind farms. *Wind Energy*, 23, 1955–1965.
- Marletta, V., Torres Zanardi, J. M., Herrera, M., & Scarabino, A. (2023). Análisis por CFD de la capa límite turbulenta de placas planas y perfiles con rugosidad superficial. *7mo. Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 7)*.
- Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
- Nikuradse, J. (1933). Technical Memorandums No. 1292 - Laws of Flow in Rough Pipes (N. A. C. F. Aeronautics, Ed.).

- Sapre, A. S. C. A., & Selig, M. S. (2014). Effect of Leading Edge Erosion on Wind Turbine Blade Performance. *Wind Energy*, 17(10), 1531–1542.
- Schlichting, H. (1936). Technical Memorandums No. 823 - Experimental Investigation of the Problem of Surface Roughness (N. A. C. F. Aeronautics, Ed.).
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory*. Springer.
- Shen, J. (2019). Classification of Wind Turbine Blade Performance State through Statistical Methods. *Master's Thesis, University of Windsor, Windsor, ON, Canada*.
- Shihavuddin, A., Chen, X., and Anders Nymark Christensen, V. F., Riis, N. A. B., Branner, K., Dahl, A. B., & Paulsen, R. R. (2019). Wind Turbine Surface Damage Detection by Deep Learning Aided Drone Inspection Analysis [676]. *Energies*, 12(4).
- Sierra, A. H., & Perez, E. G. (2013). Wind farm owner's view on rotor blades: from Operation and Maintenance to design requirements [Accessed April 10, 2026]. *International Conference Wind Turbines Rotor Blade Operation and Maintenance*.
- Spalart, P. R., & Rumsey, C. L. (2007). Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations. *AIAA Journal*, 45(10), 2544–2553.
- Wang, Y., Wang, L., Duan, C., Zheng, J., Liu, Z., & Ma, G. (2021). CFD simulation on wind turbine blades with leading edge erosion. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 59(4), 579–593.