



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Área de Conocimiento: Mecánica de Fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio experimental de la influencia de la deformación en un modelo de ala con perfil aerodinámico NACA0012 sobre los vórtices de punta de ala usando PIV2D

Autor: Alejandro Torremocha Naranjo

Tutor: Carlos del Pino Peñas

Co-tutor: Manuel Garrido Martín

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Málaga, 4 de septiembre de 2023

Estudio experimental de la influencia de la deformación en un
modelo de ala con perfil aerodinámico NACA0012 sobre los
vórtices de punta de ala usando PIV2D

Alejandro Torremocha Naranjo



Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis padres, a mi hermano y al resto de mi familia por su apoyo. También, me gustaría agradecer a mi tutor Carlos por su ayuda, paciencia e implicación, así como a mi cotutor Manolo por su ayuda y paciencia. Además, agradecer a Pedro por ayudarme con mis dudas sobre el trabajo. Por último, agradecer también a mis amigos por su apoyo, así como a Sergio el técnico del laboratorio y a los profesores del departamento de Mecánica de Fluidos por su ayuda.



RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado, se va a realizar un estudio para comparar el comportamiento de los vórtices generados por alas de un perfil NACA0012, para distintas deformaciones y distintos ángulos de ataque, para un número de Reynolds 3×10^4 . Las deformaciones que se van a comparar son las de ala deformada ($\rho = 0\%$), ala poco deformada ($\rho = 2\%$) y ala muy deformada ($\rho = 4\%$). Por otro lado, los ángulos de ataque (α) que servirán de objeto de estudio de este trabajo serán 7° , 8° y 9° .

Primeramente, para la realización del trabajo, se describe el método PIV, que será el método con el que se procesarán las imágenes grabadas para cada caso. Este método, realiza un seguimiento de las partículas para poder determinar el campo de velocidad, y, para ello, utiliza un método estadístico de correlación cruzada.

Por otro lado, mostraremos el montaje experimental del canal de arrastre con todos sus componentes, así como los pasos necesarios para su realización de ensayos.

También, describiremos las variables adimensionales que se han utilizado para comparar los distintos vórtices de cada caso, como son la velocidad azimutal máxima adimensional, el radio donde se produce el máximo de la velocidad azimutal, la circulación adimensional máxima y la vorticidad máxima. Todas estas variables se representarán frente a la distancia axial, z/c . Además, se compararán distintas velocidades azimutales frente al radio para distintas z/c . Se ha observado que tanto la velocidad azimutal máxima adimensional, como la circulación máxima adimensional y la vorticidad máxima adimensional crecen para el ángulo de ataque, independientemente de la deformación ρ . Esta es la principal conclusión de este trabajo, ya que en cuanto a la influencia de las deformaciones, no hemos podido llegar a observar un patrón claro que pudiéramos explicar, por lo que no hemos visto una tendencia clara. Lo que hemos podido observar es que el vórtice se disipa más para altas deformaciones, $\rho = 4\%$, ya que sus velocidades de giro máxima y su vorticidad máxima son menores que los modelos sin deformación o poco deformado.

Cabe destacar, que se analizarán los modelos teóricos de Batchelor y de Moore & Saffman, y el ajuste de estos a los casos experimentales, siendo el modelo de Moore & Saffman el que mejor se ajusta de los dos para los casos estudiados. Además, para alas deformadas el ajuste para el modelo de Moore & Saffman ha sido mejor, junto con un peor ajuste del modelo de Batchelor para z/c pequeñas.

Palabras Clave: Velocimetría por imágenes de partículas (PIV), vórtices de estela de ala, modelos de alas rígidas y deformadas, Matlab[®].



ABSTRACT

In this Final Degree Project, we carry a experimental study out to compare the behavior of the vortices generated by wing models using a NACA0012 airfoil, for different deformations and different angles of attack, and a constant Reynolds number, $Re=3 \times 10^4$. We compare the effect of The deformations of non-deformed wing ($\rho = 0\%$), slightly deformed wing ($\rho = 2\%$) and highly deformed wing ($\rho = 4\%$). Besides, we change the angle of attack (α) from 7° to 9° .

Firstly, we describe the 2D- PIV method for the realization of the work. This technique consists of recording images and pos-process them for each case of study. This method tracks the particles in order to determine the velocity field, using a statistical method of cross-correlation.

Secondly, we will show the experimental setup of the towing tank with all its components, as well as the necessary steps to perform the tests.

Thirdly, we will describe the dimensionless variables that have been used to compare the different vortices in each case, such as the maximum dimensionless azimuthal velocity, the radius where the maximum azimuthal velocity occurs, the maximum dimensionless circulation and the maximum vorticity. All these variables will be plotted against the axial distance, z/c . In addition, different azimuthal velocities will be compared versus radius for different z/c . It has been observed that both the maximum azimuthal velocity and the maximum vorticity increase for the angle of attack, independent of the deformation ρ . This is the main conclusion of this work. We observe that the vortex dissipates more for high deformations, $\rho = 4\%$, since its maximum azimuthal velocities and maximum vorticity are lower than the undeformed or slightly deformed wing models.

It should be noted that the theoretical models of Batchelor and Moore & Saffman will be analyzed, as well as their fit to the experimental cases, with the Batchelor model being the best fitting of the two theoretical models for the cases studied.

Key words: Particle Image Velocimetry, wingtip vortices, deformed and rigid wing models, Matlab[®].

Índice general

	Página
Agradecimientos	5
Declaración de Originalidad	6
Resumen	8
Abstract	10
Índice General	11
Índice de Figuras	13
1. Introducción	17
1.1. Breve resumen de técnicas de visualización y medida	17
1.1.1. Antecedente histórico	17
1.1.2. Velocimetría de imágenes mediante partículas, <i>PIV</i>	18
1.2. Motivación y antecedentes	19
1.2.1. Motivación	19
1.2.2. Breve descripción de la técnica DPIV	21
1.2.2.1. Partículas trazadoras	21
1.2.2.2. Localizaciones de las imágenes de partículas	21
1.2.2.3. Correlación cruzada	22
1.2.3. Revisión de la técnica PIV con sus accesos abiertos y libres	24
1.3. Objetivos	24
1.4. Organización del documento	25
2. Descripción del experimento	27
2.1. Introducción	27
2.2. Esquema del experimento y componentes	27
2.2.1. Resumen de las partes de la instalación experimental	27
2.2.2. Pasos para la realización del experimento	32
2.2.3. Grabación y procesado de imágenes de PIV con programa DPIVSoft en Matlab [®]	38
2.2.4. Variables de estudio	39
2.2.5. Resultado previo para su validación	41
3. Resultados	45
3.1. Introducción	45
3.2. Efecto del ángulo de ataque	46



3.2.1. Ala rígida	46
3.2.2. Alas deformadas	51
3.3. Comparación de resultados y efecto de la deformación	61
3.3.1. Comparación de los parámetros teóricos	80
4. Conclusiones y trabajos futuros	89
4.1. Principales conclusiones del trabajo	89
4.2. Trabajos futuros	91
Bibliografía	91

Índice de figuras

	Página
1.1. Tres modelos de densidad de partículas de imagen: Densidad baja (PTV), densidad media (PIV) y densidad alta (LSV) [2].	19
1.2. Influencia del winglet en el vórtice generado por el ala de un avión.	20
1.3. Correlación cruzada, disponible en esta página web.	23
2.1. Montaje completo del canal de arrastre en 3D.	28
2.2. Canal de arrastre con la guía y la cámara.	28
2.3. Soporte de la guía para poner el ala.	29
2.4. Cámara con la que vamos a grabar los experimentos.	29
2.5. Láser colocado de forma lateral (a) y láser colocado en la sección baja del canal (b).	30
2.6. Sección de los láseres con la guía.	31
2.7. Bote de partículas utilizadas para ver los vórtices.	31
2.8. Vista superior de los tres modelos de ala [17].	32
2.9. Vista frontal del ala sin deformación ($\rho = 0\%$) y ala muy deformada (azul) ($\rho = 4\%$) [17].	32
2.10. Explicación de la relación de aspecto.	33
2.11. Menu principal de CNC 4.03.	33
2.12. Cantidad de partículas adecuadas con tiempo de exposición 7900 μs y EDR 1000 μs	36
2.13. Programa que procesa las grabaciones.	37
2.14. Target de calibración [17] (izquierda) y foto del calibrado (derecha).	37
2.15. Visualización de una partícula del vórtice en dos frames consecutivos para ala rígida y ángulo de ataque 7° sin realce.	38
2.16. Campo de velocidad ala rígida 7° para el conjunto de imágenes de la figura 2.15.	39
2.17. Figura 7 del artículo de 2011 para $\alpha = 12^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$, $Re=4 \times 10^4$ [5].	42
2.18. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$, $Re=3 \times 10^4$ para comparar con [5].	43
3.1. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.	46

3.2. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.	47
3.3. Circulación máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.	48
3.4. Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.	49
3.5. Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para ala rígida.	50
3.6. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.	51
3.7. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala ligeramente deformada.	52
3.8. Circulación media adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.	53
3.9. Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.	53
3.10. Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para ala ligeramente deformada (rosa).	55
3.11. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.	56
3.12. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.	57
3.13. Circulación media adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.	58
3.14. Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.	58
3.15. Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para ala muy deformada (azul).	60
3.16. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 9^\circ$ para todas las alas.	61
3.17. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 8^\circ$ para todas las alas.	62
3.18. Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 7^\circ$ para todas las alas.	63
3.19. Velocidad azimutal adimensional frente a z/c para todos los casos.	64
3.20. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ para las tres deformaciones de ala.	65
3.21. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 8^\circ$ y para las tres deformaciones de ala.	65
3.22. Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 7^\circ$ y para las tres deformaciones de ala.	66
3.23. Radio máximo adimensional frente a z/c para todos los casos.	67
3.24. Circulación media adimensional frente a z adimensional $\alpha = 9^\circ$ para todos los casos.	68

3.25. Circulación media adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 8^\circ$ para las tres deformaciones de ala.	68
3.26. Circulación media adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 7^\circ$ para las tres deformaciones de ala.	69
3.27. Circulación media adimensional frente a z/c para todos los casos.	70
3.28. Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.	71
3.29. Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 8^\circ$ y todas las deformaciones.	71
3.30. Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 7^\circ$ y todas las deformaciones.	72
3.31. Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para todos los casos.	73
3.32. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 9^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$	74
3.33. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 8^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$	76
3.34. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 7^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$	77
3.35. Máximo de la velocidad azimutal máxima adimensional frente a los distintos ángulos de ataque para todos los casos de deformación.	78
3.36. Máximo de la velocidad máxima adimensional frente a los distintos ángulos de ataque para todos los casos de deformación.	79
3.37. Parámetro S frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.	81
3.38. Parámetro b frente a z/c para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.	82
3.39. Parámetro n frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y para todas las deformaciones.	83
3.40. Parámetros z_{0B} (a) y z_{0MS} (b) frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.	83
3.41. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$	85
3.42. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 2\%$	86
3.43. Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 4\%$	87



Capítulo 1

Introducción

1.1. Breve resumen de técnicas de visualización y medida

1.1.1. Antecedente histórico

Ludwig Prandtl fue el promotor en las técnicas de visualización y uno de los mejores maestros que históricamente ha tenido la Mecánica de Fluidos. Así, utilizó técnicas de visualización de flujos en un túnel de agua para estudiar aspectos de flujos transitorios separados detrás de alas y otros objetos. Utilizaba, por aquél entonces, partículas de mica en la superficie del agua para estudiar las estructuras del flujo estacionario y transitorio. Cambiando el número de algunos parámetros del modelo, como el ángulo de incidencia, la velocidad de flujo incidente, transición de un flujo estacionario a otro transitorio, Prandtl ganó conocimientos en muchas características básicas del fenómeno del flujo transitorio. Sin embargo, no era posible una descripción cuantitativa sobre la velocidad del flujo en aquel entonces [1].

Hoy en día es viable extraer información cuantitativa sobre el campo de velocidad de flujo, es decir, es posible determinar los valores de un campo de velocidad de un flujo concreto. Para obtener una visualización del flujo se utiliza una réplica del túnel de agua de Prandtl con uno o varios láseres por iluminación y una cámara de vídeo para captar el flujo, con partículas en suspensión.

1.1.2. Velocimetría de imágenes mediante partículas, *PIV*

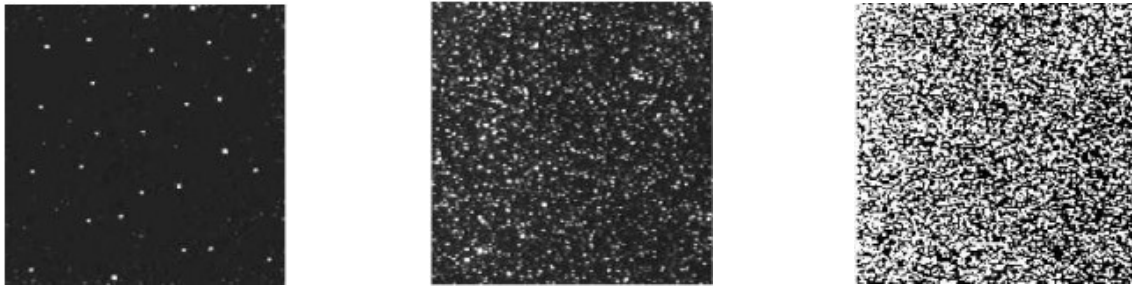
Este método es conocido en inglés como *particle image velocimetry* [2]. Para poder llevar a cabo este método deben añadirse partículas de rastreo, de las cuales hablaremos más adelante. Estas partículas deben ser visualizadas dos veces en un intervalo de tiempo pequeño. Además, la luz del láser reflejada por las partículas debe ser grabada en, al menos, dos frames para obtener así información del campo de velocidad. Estas partículas son no intrusivas, es decir, no afectan al devenir del flujo transparente que se estudia.

Para evaluar la grabación del PIV digital, las imágenes de las grabaciones son divididas en pequeñas subáreas llamadas "áreas de interrogación". Para calcular el vector de desplazamiento local, para la primera y la segunda iluminación, se realizará mediante métodos estadísticos (ver capítulo 1.2.2.3), asumiendo que las partículas en un área de interrogación se mueven de manera homogénea y se mueven con el flujo local. Por tanto, la proyección del vector local del flujo de velocidad en el plano de luz se calcula conociendo el tiempo entre las dos instantáneas debidamente iluminadas. Cabe destacar que para que los gradientes de velocidad no tengan una influencia significativa en los resultados, los tamaños de las áreas de interrogación deben ser lo suficientemente pequeñas. Este proceso, se repite para cada área de integración de la grabación del PIV.

Entre otras cosas, se tendrán en cuenta distintos aspectos para emplear adecuadamente la herramienta PIV. Entre ellos, caben destacar dos aspectos: (1) el tamaño de las partículas, ya que las partículas pequeñas seguirán mejor el flujo; (2) el correcto enfoque de las partículas y (3) la densidad de las partículas en la grabación, las cuales tendrán que tener una distribución homogénea, con una densidad media para poder utilizar el método de PIV, ya que sino se tendrían que utilizar otros métodos y el método del PIV no sería posible de realizar. Como podemos ver en la figura 1.1, según la densidad de imagen, de la cantidad de partículas en el agua, se utiliza un método u otro, aunque a nosotros nos interesa el método PIV, de ahí que busquemos una densidad media. Por tanto, el número de partículas debe ser el correcto.

El método del PIV está siendo muy utilizado hoy en día para la aerodinámica moderna, ya que ayuda a entender mejor los fenómenos de los flujos transitorios y turbulentos. Por este motivo, el PIV es un método muy utilizado para el estudio de los vórtices o flujos en rotación que se producen al final del ala de un avión, como es nuestro caso de estudio. Además, los datos experimentales deben tener una alta resolución tanto espacial como temporal, para poder ser procesados correctamente.

Para resolver tanto grandes como pequeñas escalas de la estructura del flujo, es necesaria una alta resolución espacial de los datos del campo que vamos a



(a) Densidad baja

(b) Densidad media

(c) Densidad alta

Figura 1.1: Tres modelos de densidad de partículas de imagen: Densidad baja (PTV), densidad media (PIV) y densidad alta (LSV) [2].

analizar. esto influye de manera directa en el equipo de grabación necesario para los experimentos. Por este motivo, usaremos una cámara de alta velocidad (de hasta 60000 imágenes por segundo aunque usaremos típicamente sólo 125 imágenes por segundo) de 1 mega pixel. Esta cámara ya ha dado resultados muy positivos en el grupo de investigación para estudiar el flujo en rotación detrás de alas rígidas [3, 4]. La novedad y el alcance de este trabajo de investigación será incluir la deformación en el modelo de ala con perfil NACA0012.

1.2. Motivación y antecedentes

1.2.1. Motivación

La dinámica de los vórtices que se producen detrás de las alas de un avión, es un tema que ya se lleva varios años tratando en el grupo de investigación TEP-146 de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga [3, 4, 5, 6]. Esto es debido a que los vórtices generados afectan a la estabilidad de los aviones que van detrás del que los genera, sobre todo en las operaciones de despegue y aterrizaje en las pistas del aeropuerto. Por este motivo, se llevan estudiando los vórtices desde el siglo pasado con gran variedad de investigaciones y hoy en día sigue habiendo investigaciones sobre este tema, ya que es un tema sobre el que todavía quedan cosas por saber. En concreto, tecnologías que permitan su atenuación para así aumentar la frecuencia de los vuelos en los aeropuertos.

Por tanto, Se siguen estudiando, hoy día, formas para disminuir la influencia de estos vórtices, y que así no duren tanto en la pista del aeropuerto, y su influencia para el avión que vaya detrás sea menor. Esto es debido a que entre despegue y aterrizaje se deben esperar entre 3 o 4 minutos. Por tanto, esto provoca un tráfico aéreo, que

puede ser disminuido, si conseguimos entender bien estos vórtices de ala, y formas correctas de mitigación de estos, como las que se están estudiando en el departamento de Mecánica de fluidos de esta Universidad. Estas formas de mitigación son mediante control activo, pero también existe el control pasivo, mediante los winglets, que permiten reducir la intensidad del vórtice, evitando que se mezcle el flujo de aire del intradós con el del extradós.

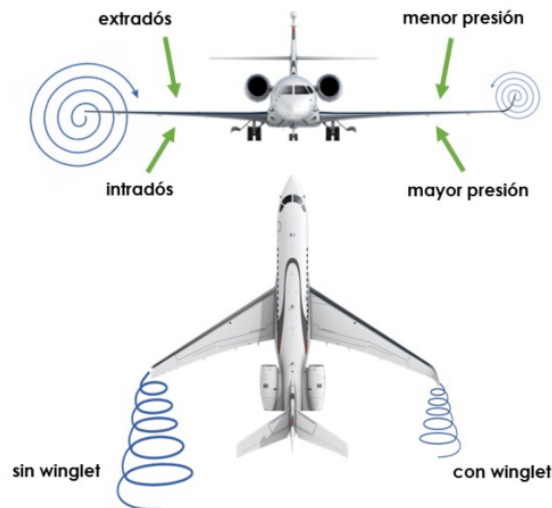


Figura 1.2: Influencia del winglet en el vórtice generado por el ala de un avión.

Además, desde el principio, ha ido apareciendo distintos modelos teóricos para intentar modelar el comportamiento de los vórtices, como son el modelo de Batchelor [7] y el modelo de Moore & Saffman [8], entre otros.

Como hemos dicho anteriormente, la dinámica de los vórtices es un tema complejo con cosas aún por estudiar. Entre otros aspectos, la deformación a la que se someten las alas de los aviones debido a la carga estructural y el peso de la aeronave no sabemos cómo afecta a la intensidad de estos vórtices. En consecuencia, se ha realizado este trabajo, para poder comparar distintas deformaciones del ala con distintos ángulos de ataque, y así poder ver la influencia de estas dos características en los vórtices. El estudio novedoso que se realiza en este TFG, tal y como se ha mencionado, forma parte de una línea de investigación activa del área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga.

Hoy en día, además, las alas aeronaves se fabrican con materiales más ligeros, véase Afonso y sus colaboradores (2017) [9] para ver desarrollos recientes en ingeniería aeroespacial donde se relacionan la alta relación de aspecto con las deformaciones en el ala. La influencia de la deformación del ala en el coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque y, por lo tanto, en la pendiente de sustentación solamente ha sido estudiado recientemente por Zhong y sus colaboradores [10]. Sin embargo, los vórtices generados por las alas de los aviones

y su relación con la deformación continúan siendo actualmente objeto de estudio e investigación.

1.2.2. Breve descripción de la técnica DPIV

1.2.2.1. Partículas trazadoras

La técnica del PIV [2] está basada en la determinación directa de las dos dimensiones fundamentales: longitud y tiempo. Por otro lado, la técnica de medida es indirecta, ya que determina la velocidad de la partícula, en lugar de la velocidad del fluido. Por eso, las propiedades fluidas de las partículas tienen que ser comprobadas para evitar discrepancias significativas entre el movimiento del fluido y el de las partículas. Por este motivo, es necesario tener en cuenta estos fundamentos:

- Propiedades correspondientes a la Mecánica de Fluidos. Las primeras aplicaciones del PIV han demostrado que surgen dificultades para proporcionar una siembra de partículas de alta calidad en flujos de gases, en comparación con las aplicaciones en flujos de líquidos. El diámetro de las partículas debe ser muy pequeño para asegurar un buen seguimiento del movimiento del fluido. Por otro lado, el diámetro de las partículas no debe ser muy pequeño, ya que, también, se tienen que tener en cuenta las propiedades de dispersión de la luz. Por lo tanto, hay que encontrar un punto medio para el diámetro de las partículas.
- Comportamiento de dispersión de la luz. A menudo, es más eficaz y económico aumentar la intensidad de la imagen eligiendo correctamente las partículas y su dispersión de la luz, que incrementando la potencia del láser. Además, hay una clara tendencia a que la intensidad de la luz dispersada aumente al aumentar el diámetro de las partículas.

Por todo esto, se ha elegido el tamaño correcto de las partículas para la realización de los experimentos llevados a cabo en este trabajo y que ya se ha probado con éxito en otros trabajos de investigación previos [3, 4]. En la sección 2.2.1 se hablará sobre el tipo de partículas que se han utilizado en nuestro experimento.

1.2.2.2. Localizaciones de las imágenes de partículas

El algoritmo PIV calcula el campo de velocidad, como hemos mencionado antes, mediante la detección del desplazamiento de sus partículas:

$$\vec{v}(x, y, t) = \frac{\Delta \vec{L}(x, y, t)}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Para poder calcular el desplazamiento de las partículas ($\Delta \vec{L}(x, y, t)$), se subdivide la imagen en áreas o también llamado *ventanas de interrogación* en el PIV. El cálculo de la posición individual de cada partícula no es viable, por tanto, se calcula la posición del grupo de partículas de cada ventana de interrogación mediante técnicas estadísticas, en la que fue pionero el profesor Adrian [11], donde se definieron las características y limitaciones de la evaluación estadística del PIV. Se concretaron los métodos de autocorrelación y posteriormente se ampliaron al análisis de correlación cruzada en 1988. La descripción más detallada fue dada posteriormente por Westerwheel [12], con una descripción matemática más completa del DPIV (PIV digital). Para determinar el desplazamiento de las partículas de una ventana de interrogación, y así compararla con la segunda imagen, en nuestro caso se utiliza la correlación cruzada [2]. Por tanto, es necesario una correlación cruzada de dos fotogramas de grabaciones expuestas individualmente por una cámara y, a continuación, ampliar la teoría para la evaluación de grabaciones expuestas de forma secuencial por dos o más cámaras (PIV en tres dimensiones o PIV en un volumen). En nuestro caso, al ser un PIV en dos dimensiones, sólo será necesaria la identificación de unas partículas usando una sola cámara.

Las ventanas de interrogación suelen tener un tamaño de $16 \times 16 \text{ px}^2$, donde caben más o menos en torno a 5 u 8 partículas por ventana. Se pueden realizar distintas pasadas, empezando con unas ventanas iniciales de $64 \times 64 \text{ px}^2$, hasta llegar a los $16 \times 16 \text{ px}^2$, es decir, se pueden emplear algoritmos con múltiples iteraciones espaciales. Este tamaño de $16 \times 16 \text{ px}^2$ viene determinada por la capacidad de megapíxel de la cámara y también del tamaño de las partículas utilizadas en el experimento.

1.2.2.3. Correlación cruzada

El proceso de correlación cruzada en nuestro caso, implica tomar una ventana de píxeles en la primera imagen y buscar una región similar en la segunda imagen. Cabe destacar, que la imagen se guarda como una matriz de píxeles. La ventana se desplaza en pasos discretos por toda la imagen, y para cada posición de la ventana, se calcula un valor que representa el parecido entre los valores de píxeles en las dos ventanas. La posición de la ventana donde tengamos mayor similitud nos indicará el desplazamiento de la partícula ($[\Delta x_{\text{optimo}}, \Delta y_{\text{optimo}}]$) en un intervalo de tiempo (Δt). Formalmente, se puede expresar la correlación cruzada a una ventana de interrogación como:

$$R_{I_1, I_2}(\Delta x, \Delta y) = \int_{a_I} I_1(x, y) I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy, \quad (1.2)$$

siendo a_I el área de interrogación, la ecuación la podemos dejar de esta manera para el PIV digital (*DPIV*):

$$R_{I_1, I_2}(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I_1(x_i, y_j) I_2(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y). \quad (1.3)$$

En la figura 1.3 podemos ver una explicación simplificada de la correlación cruzada:

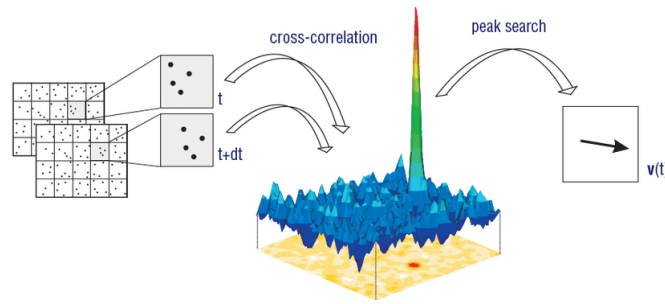


Figura 1.3: Correlación cruzada, disponible en esta página web.

Por tanto, I_1 e I_2 representan el campo de intensidad de la imagen para el tiempo de la primera y de la segunda exposición, respectivamente, solo que en I_2 la posición de los píxeles (x_i, y_j) de I_1 están desplazados una distancia $(\Delta x, \Delta Y)$. Entonces R_{I_1, I_2} presenta su máximo cuando $(\Delta x, \Delta y)$ sea igual al desplazamiento que ha tenido el grupo de partículas de I_1 en el intervalo de tiempo Δt . Al ser el mismo grupo de partículas, estas serán muy similares y ahí R_{I_1, I_2} presentará su máximo, con lo que obtendremos unos desplazamientos de x e y óptimos $([\Delta x_{\text{óptimo}}, \Delta y_{\text{óptimo}}])$. Con esto, obtenemos la velocidad instantánea, situada en el centro de la ventana de interrogación durante un cierto intervalo de tiempo:

$$\vec{u}_n = \frac{\Delta \vec{l}_{\text{óptimo}}}{\Delta t}, \quad (1.4)$$

siendo el módulo del desplazamiento $|\Delta \vec{l}_{\text{óptimo}}| = \sqrt{\Delta x_{\text{óptimo}}^2 + \Delta y_{\text{óptimo}}^2}$.

1.2.3. Revisión de la técnica PIV con sus accesos abiertos y libres

Cabe destacar que para calcular el campo de velocidad, es decir, para aplicar la técnica PIV en este trabajo se ha empleado el programa *DPIVSoft*, ya desarrollado Patrice Meunier y Tomas Leweke [13]. Este programa se ha mejorado por la Universidad de Málaga porque fue ampliado a tres dimensiones y se añadieron pestañas para cargar datos de cámaras sincronizadas con láser pulsante o cámaras de alta velocidad con láser continuo (este último caso es el nuestro). El departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga, para ampliar la capacidad de este programa, llevó el código de Matlab *DPIVSoft* a una alternativa completa de código abierto en Python, que utiliza la biblioteca OpenCL para acelerar el procesamiento para paralelizar el código en varias CPUs y GPUs [14].

Este código *DPIVSoft*, implementado en Matlab, utiliza la técnica PIV para obtener campos de velocidad de vórtices. El programa realiza un algoritmo de doble paso con desplazamiento de ventana usando la deformación de imagen, iteraciones múltiples y precisión de subpíxeles, con lo que es posible reproducir con precisión una gran variedad de flujos de vórtices con gradientes de alta velocidad [14]. Por tanto, será interesante utilizar el campo de velocidad obtenido con este código, para detectar los vórtices en el flujo en este trabajo de fin de grado.

1.3. Objetivos

La pretensión esencial de este Trabajo Final de Grado es la de analizar la influencia de distintos modelos de ala para el perfil NACA0012. Estos modelos de ala que se van a analizar son: ala no deformada ($\rho = 0\%$), ala poco deformada ($\rho = 2\%$) y ala muy deformada ($\rho = 4\%$). Además de ver la diferencia de los vórtices en cuanto a la deformación del ala, también, se verá la diferencia en función del ángulo de ataque (α), para 7° , 8° y 9° .

Para poder comparar los vórtices tanto entre ángulos de ataque, como entre deformaciones, utilizaremos una serie de variables adimensionales, las cuales son: velocidad azimutal máxima adimensional, el radio máximo, la circulación media y la vorticidad máxima. Por otro lado, también se analizará la velocidad azimutal adimensional frente al radio para distintas cuerdas. Finalmente, se analizarán los parámetros teóricos que se definirán posteriormente en el capítulo 3 como son S y z_{0B} del modelo teórico de Batchelor y b , n y z_{0MS} del modelo teórico de Moore & Saffman para ángulo de ataque 9° y los tres tipos de deformación.

1.4. Organización del documento

La estructuración de los capítulos del Trabajo Fin de Grado, quedará de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se han descrito la motivación y alcance del trabajo y el método del PIV, junto con la revisión bibliográfica del estado de la cuestión.
- Capítulo 2: Descripción del experimento. En este capítulo se describirán los pasos llevados a cabo para la correcta realización de los experimentos, así como las partes de la instalación experimental, junto con una breve descripción de las variables de estudio y la validación de los resultados experimentales.
- Capítulo 3: Resultados. Se comentarán los datos experimentales obtenidos y se compararán entre ellos para los distintos casos de estudio de este trabajo.
- Capítulo 4: Conclusiones y trabajos futuros. En cuanto a este capítulo, se llevarán a cabo las conclusiones finales así como trabajos futuros.
- Bibliografía: En este apartado se encuentran los artículos referenciados en este trabajo.



Capítulo 2

Descripción del experimento

2.1. Introducción

Se ha estimado oportuno realizar como primera actividad en este trabajo, tal y como se ha explicado en el capítulo 1, una descripción de las partes que conforman el experimento, los tipos de modelos de alas que se han estudiado mediante PIV en dos dimensiones (PIV2D) y también analizar con cierto detalle el procedimiento o metodología para hacer los ensayos experimentales. Hay que tener en cuenta que en este trabajo se ha analizado el flujo para una velocidad incidente prácticamente constante, en un modelo de ala rígida y dos deformadas para varios ángulos de ataque (7° , 8° y 9°).

2.2. Esquema del experimento y componentes

2.2.1. Resumen de las partes de la instalación experimental

Cabe destacar que los experimentos se han realizado en el laboratorio de Aerodinámica de Vehículos en la Escuela de Ingenierías Industriales. Este laboratorio cuenta con un canal de arrastre, en el cual se han realizado los experimentos de este trabajo de fin de grado. Este canal de arrastre contiene agua, ya que como explicaremos en otro capítulo es posible extrapolar casos reales de vórtices de alas de avión del aire al agua, como veremos en la sección 2.2.2. En la figura 2.1 podemos ver el montaje del canal de arrastre con todos sus componentes, que se mencionarán a continuación. Como podemos ver en la figura 2.2, en la parte superior del canal de arrastre, encima del canal de arrastre en unos soportes, tenemos la guía,

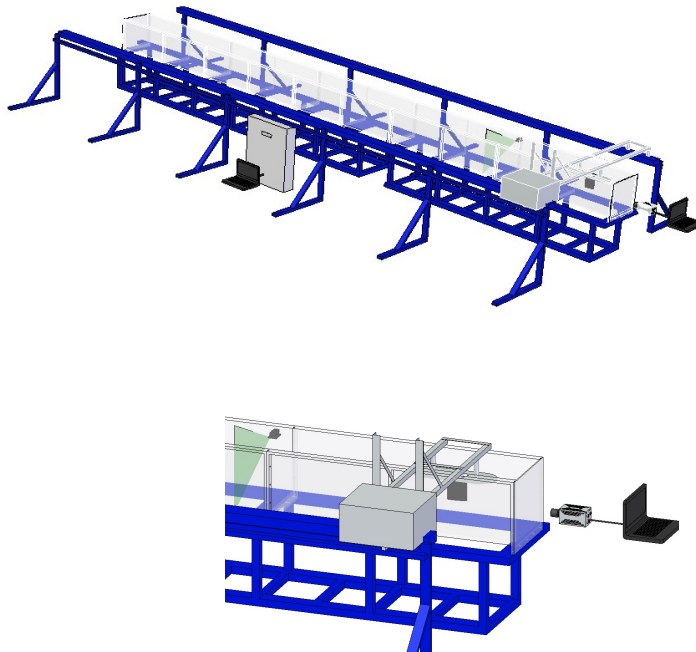


Figura 2.1: Montaje completo del canal de arrastre en 3D.

controlada por servomotores. Para más detalles del montaje, se puede consultar la referencia de Gutierrez-Castillo y sus colaboradores [4].

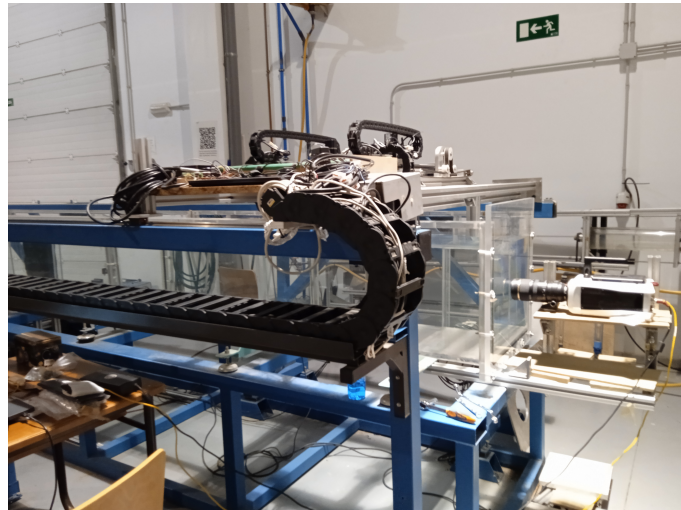


Figura 2.2: Canal de arrastre con la guía y la cámara.

La guía lleva un soporte, donde se atornilla el modelo del ala del que queremos obtener los experimentos correspondientes. Este soporte, lo podemos ver en la figura 2.3.

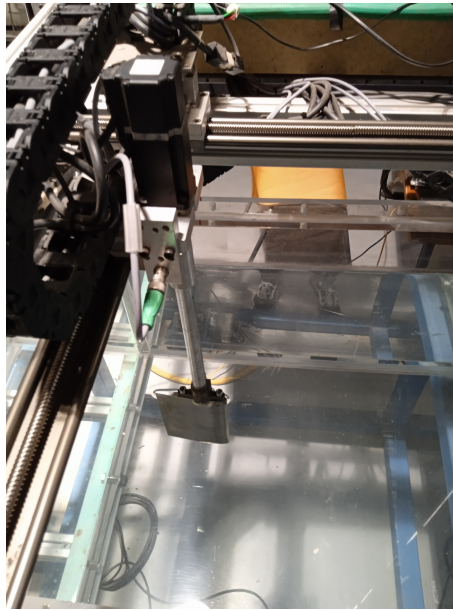


Figura 2.3: Soporte de la guía para poner el ala.

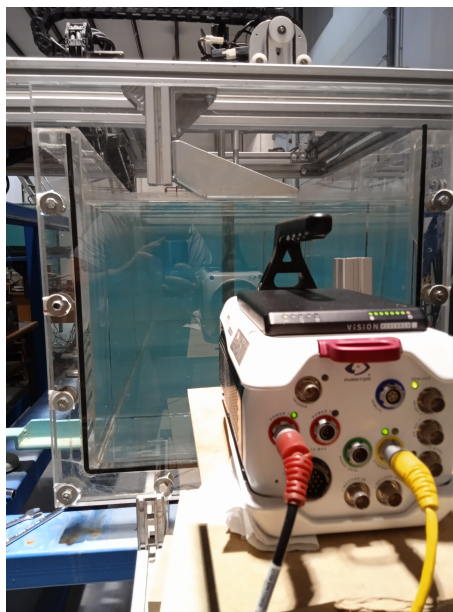


Figura 2.4: Cámara con la que vamos a grabar los experimentos.

El ala se controlará mediante unos servomotores. Sin embargo, la guía se controlará mediante un código de Matlab[®] ya implementado por el departamento.

Por otro lado, utilizaremos la cámara de alta velocidad, que ha sido empleada en investigaciones previas en el área de Mecánica de Fluidos [15, 16], como podemos ver en la figura 2.4, para grabar los experimentos. La cámara está situada en un extremo del canal de arrastre, a una altura adecuada para que pueda grabar bien

el vórtice que genera el ala. Esta cámara deberá estar situada de manera que el plano de la sección que se ilumina con los láseres, sea perpendicular a la lente de la cámara. Esta cámara irá conectada a un portátil, desde el que se controlará dicho dispositivo.

En este trabajo, se han utilizado dos láseres. Uno de los láseres se encuentra incidiendo de forma lateral, como podemos ver en la figura 2.5 (a).

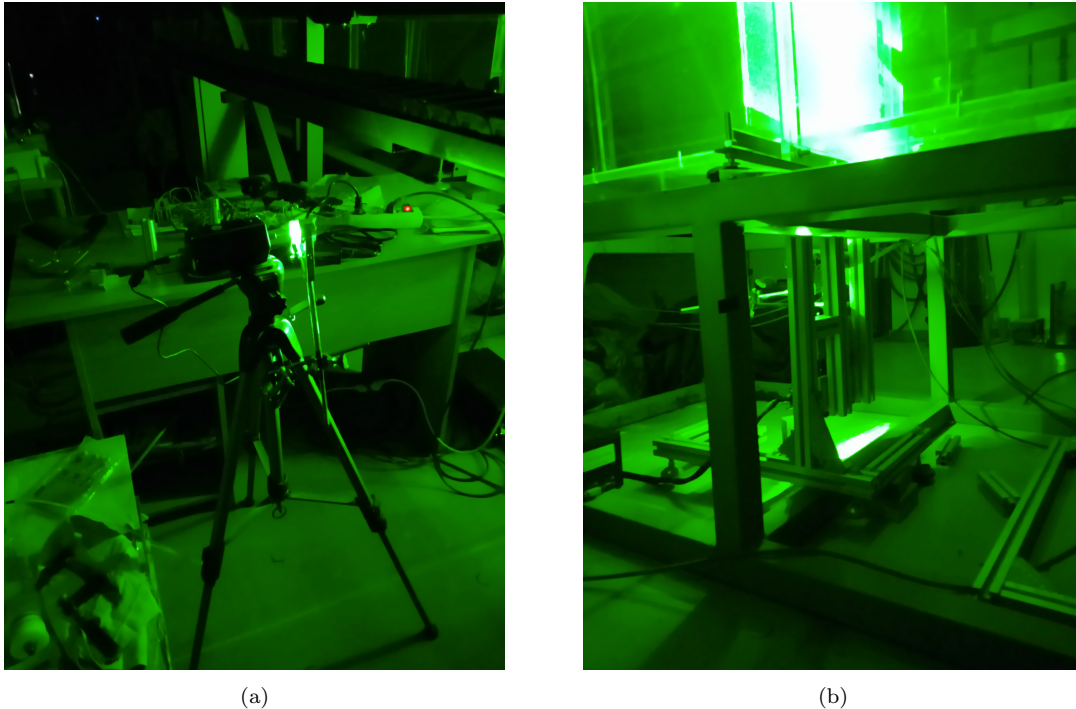


Figura 2.5: Láser colocado de forma lateral (a) y láser colocado en la sección baja del canal (b).

En algunos experimentos con alas muy deformadas, y debido a la falta de iluminación que se encontró, se ha utilizado otro láser, debajo del canal, véase la figura 2.5 (b). Para poder utilizar los dos láseres a la vez, hay que hacer coincidir las secciones que estos iluminan en el canal. En ambos láser se dispone de una lente cilíndrica y esférica para que el puntero láser se abra en un plano 2D (lente cilíndrica) y su espesor sea lo menor posible en la zona de medida (lente esférica), Este espesor es inferior a dos milímetros en el haz láser en la zona donde se graban las partículas.

En la figura 2.6 podemos ver dónde está situada la sección iluminada por dichos láseres, y por donde al pasar los distintos modelos de ala para distintos ángulos, se verán los vórtices generados que serán objeto de estudio de este trabajo.

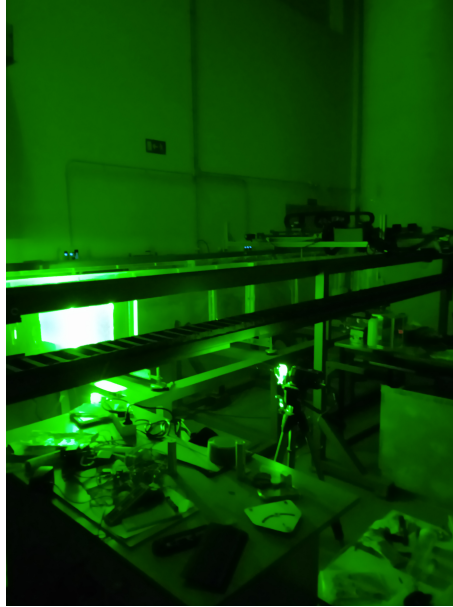


Figura 2.6: Sección de los láseres con la guía.

Por otro lado, es importante resaltar la utilización de partículas esféricas recubiertas de plata de $10\ \mu\text{m}$, que reflejarán la luz que incide sobre estas, ver su contenedor en la figura 2.7. Gracias a estas partículas, que están en suspensión en el agua, se podrán ver arrastradas de forma no intrusiva por los vórtices que se generan al paso de los distintos tipos de ala por la sección que ilumina el plano láser y que puede estar formado, tal y como se ha explicado, por uno o dos láseres. Este haz láser será siempre perpendicular al movimiento del modelo de ala (con o sin deformación) y también, paralelo a la lente de la cámara de alta velocidad [16].



Figura 2.7: Bote de partículas utilizadas para ver los vórtices.

Por último, destacar que se han utilizado 3 tipos de alas del modelo NACA0012:

- Ala rígida sin deformar ($\rho = 0\%$).
- Ala un poco deformada ($\rho = 2\%$), a la que denominaremos como ala rosa.
- Ala muy deformada ($\rho = 4\%$), a la que llamaremos ala azul.

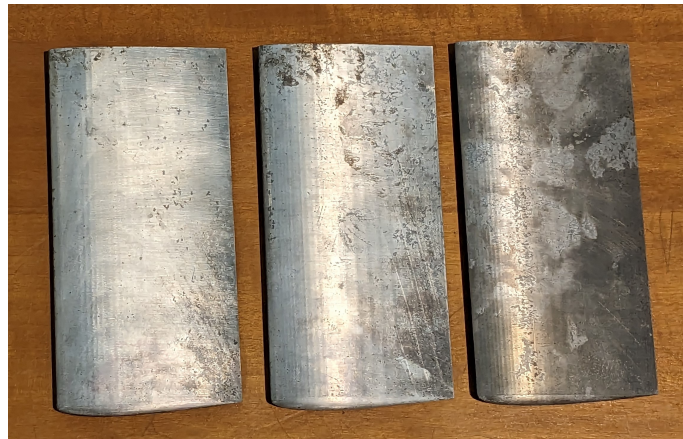


Figura 2.8: Vista superior de los tres modelos de ala [17].



Figura 2.9: Vista frontal del ala sin deformación ($\rho = 0\%$) y ala muy deformada (azul) ($\rho = 4\%$) [17].

Como podemos ver en las figuras 2.8 y 2.9, las alas son todas con una relación longitud del ala y envergadura de 2 (*aspect ratio* ó AR igual a 2), es decir, la envergadura del ala ($s=200$ mm) es el doble que la cuerda del ala ($c=100$ mm), como podemos ver en el esquema representado en la figura 2.10. Así, relación de aspecto es la envergadura del ala entre la cuerda del ala. Además, todos los modelos corresponden a un perfil aerodinámico NACA0012.

2.2.2. Pasos para la realización del experimento

Para la realización de los experimentos, se ha llevado a cabo una serie de pautas, para que todo funcione correctamente en la ejecución de un ensayo experimental.

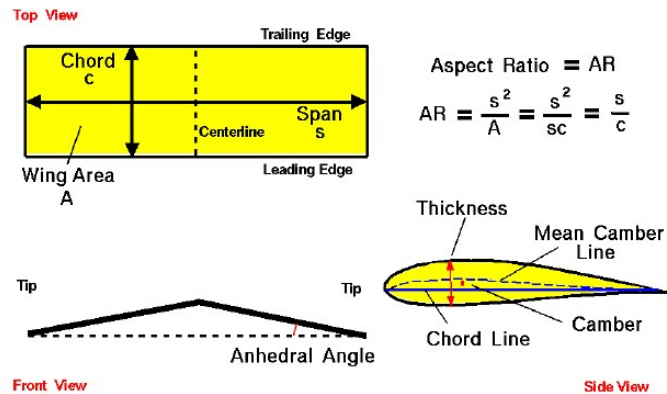


Figura 2.10: Explicación de la relación de aspecto.

Primeramente, se coloca el modelo de ala NACA0012, ya sea el ala rígida, el modelo de ala poco deformada (rosa) o el modelo de ala muy deformada (azul). Una vez hecho esto, se encienden los servomotores que controlan el giro y la posición del ala, y los que ayudarán a colocar el ala correspondiente en el ángulo que queramos. Para que funcionen los servomotores, tenemos que abrir el programa que controla los servomotores, llamado CNC 4.03.

Dentro del programa CNC 4.03, tenemos que inicializar los servomotores, dándole al botón *reset*, como podemos ver marcados en la figura 2.11.

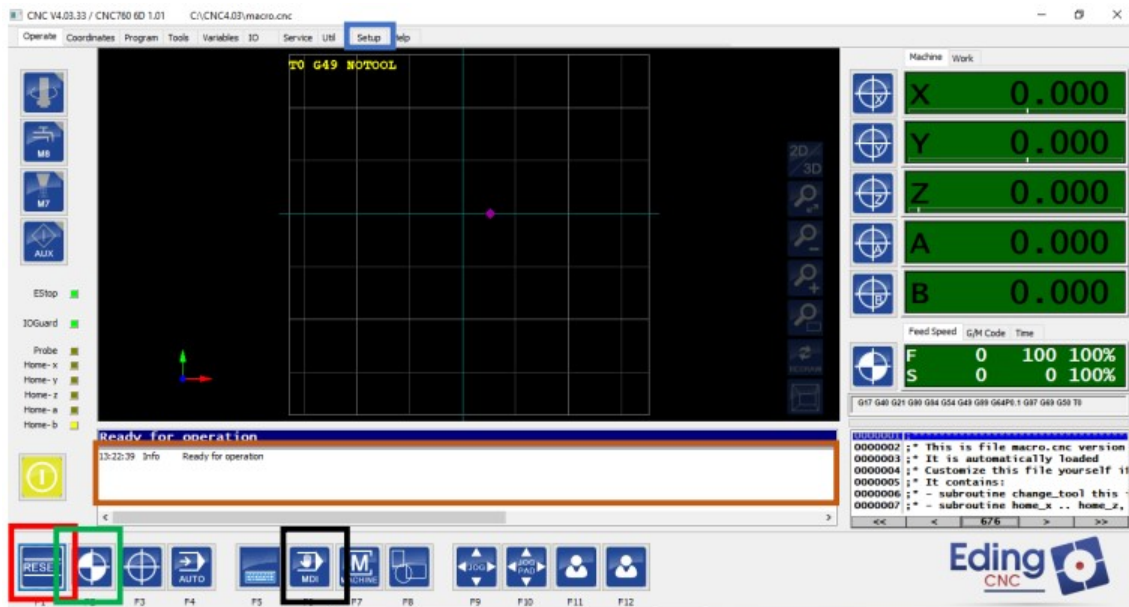


Figura 2.11: Menu principal de CNC 4.03.

Una vez que hemos inicializado los servos, estos deben salirnos con el mensaje de “RDY”, lo que significa que los servos están listos.

El siguiente paso será indicar el ángulo de ataque del que queremos estudiar su vórtice, mediante el comando: G53 F600 X0 Y0 Z0 A0 B-8. El ángulo de ataque, será el valor que va detrás de la letra B pero con el signo negativo, ya que el modelo es un ala izquierda y queremos que tenga el ángulo en sentido antihorario. Además, el número que ponemos sería el valor del ángulo de ataque, si no fuera porque al atornillar el ala, los agujeros del ala, no están igual de alineados que los tornillos de la sujeción. Por esta razón, el origen del ángulo de ataque tiene un cero distinto dependiendo de la deformación del modelo del ala. Por tanto, cabe destacar, que los 0º del ángulo de ataque se ha intentado obtener cogiendo puntos de referencia del canal y, para ello, se han utilizado el inclinómetro digital e imágenes.

Cabe indicar, que nuestro objeto de estudio han sido ala rígida, ala poco deformada (rosa) con una deformación en la punta del 2 % de su envergadura ($\rho=2\%$) y ala muy deformada (azul) con una deformación del 4 % de su envergadura ($\rho=4\%$) para ángulos de ataque de 7º, 8º y 9º para todos los casos.

Una vez que tenemos el ángulo de ataque que queremos, pasamos a usar el programa que mueve la guía a lo largo del canal de arrastre. Este programa ha sido implementado en Matlab® por el departamento de Mecánica de Fluidos. Para su funcionamiento, lo que necesitamos indicar nosotros es:

- El número de Reynolds (Re), cuyo valor será siempre $Re=30000$. Este valor es el máximo que se puede alcanzar por el servomotor de la guía lineal que arrastra el modelo de ala.
- La viscosidad del agua (ν), la cual se obtendrá a partir de otra función en Matlab®, desarrollada por el departamento de Mecánica de Fluidos. En esta función, donde la viscosidad depende de la temperatura, se indica la temperatura del agua del canal, y con esto, se obtiene el valor de la viscosidad a utilizar.
- Distancia a la que debe llegar la guía. En este caso, se puso 7.5 metros, pero posteriormente en el procesado y el post procesado, se han cortado las grabaciones a 39 cuerdas del plano láser (3900 mm después del paso del modelo de ala).
- Longitud característica (L_c), la cuál será la cuerda del ala $L_c=c$. En todos los casos c es 100 mm ó 0.1 m.

Con estos parámetros, se obtiene la velocidad a la que debe ir la guía para un valor del número de Reynolds 3×10^4 . La velocidad se obtiene despejando de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{W_{\infty}c}{\nu}. \quad (2.1)$$

Cabe destacar, que podemos extrapolar del aire al agua siempre que el número de Reynolds sea constante. Todos los experimentos se han realizado sobre el agua, ya que se obtienen mejores resultados [18]. La equivalencia del número de Reynolds entre aire y agua será la siguiente:

$$Re = \frac{W_{\infty\text{agua}}c}{\nu_{\text{agua}}} = \frac{W_{\infty\text{aire}}c}{\nu_{\text{aire}}}. \quad (2.2)$$

El valor de $Re=3 \times 10^4$ es típico de vehículos aéreos no tripulados o UAVs (modelos de aviones más pequeños usados en servicios de vigilancia, por ejemplo). Los valores típicos de número de Reynolds de un avión real serían más elevados, del orden de un millón. En cualquier caso, al ser los números de Reynolds tan elevados, la dinámica de los vórtices se asemeja mucho al real debido a que se pueden desprestigiar, en primera aproximación, los efectos viscosos.

Una vez hemos hecho todo este proceso, tenemos que asegurarnos una correcta configuración de la cámara con la que vamos a grabar los experimentos. Para ello, primeramente, aumentamos o hacemos *zoom* al máximo a las partículas en suspensión y vamos moviendo la rueda de enfoque de la cámara, hasta que se vea lo más nítido posible. Después magnificamos la imagen, es decir, hacemos un poco de *zoom* digital para que se vea el vórtice bien. Una vez hecho esto, dentro del programa donde se cortan los vídeos ya capturados por la cámara y tras pasados a la memoria del computador, se han elegido unos valores para un serie de parámetros en el procesado de las imágenes, siendo estos los siguientes:

- Resolución. Para estos experimentos, se ha elegido una resolución de 1280x800.
- Velocidad de cuadros. La cámara grabará a 125 imágenes por segundo ó 125 fps frame per second.
- Tiempo de exposición. Este será de 7900 μs .
- EDR. Se ha elegido un valor de 1000 μs

Hay un caso, el cuál es el de ángulo de ataque 9° y ala rígida, donde el tiempo de exposición que se utilizó fue de 5000 μs .

Se han elegido estos valores de tiempo de exposición y de EDR, debido a que se deben ver las partículas lo más nítidas posibles. Además, como se ha mencionado

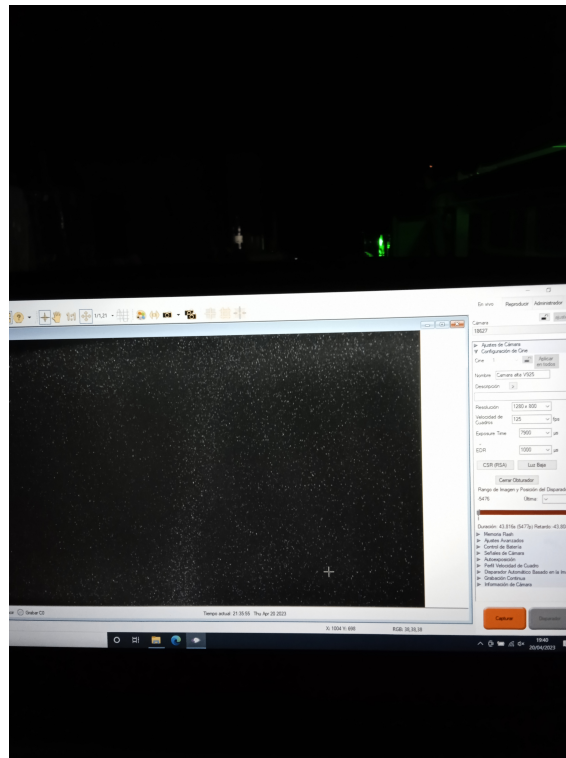


Figura 2.12: Cantidad de partículas adecuada con tiempo de exposición $7900 \mu s$ y EDR $1000 \mu s$.

en el capítulo 1, la cantidad de partículas que debe haber no deben ser ni más de la cuenta ni pocas, y esto se ha realizado con la experiencia previa y viendo que la densidad fuera la correcta, para visualizar bien los vórtices, véase figura 2.12.

Cada vez que grabamos uno de los casos, recortamos la grabación justo cuando el ala deja de pasar por la sección del láser, tal y como se muestra en la figura 2.13. Cabe destacar que cada caso de estudio, para un ángulo de ataque y un modelo de ala, se grabará tres veces, para después realizar su procesamiento correspondiente y post procesado, donde se realizará la media de los tres experimentos para obtener los parámetros fluidos que queremos estudiar (velocidad acimutal máxima, radio donde se produce la velocidad acimutal máxima, vorticidad, y circulación).

Para poder pasar de píxeles a metros, y así establecer una relación entre píxeles y metros, debemos realizar un calibrado cada vez que configuramos los parámetros de la cámara o si cambiamos el zoom de esta. Esto es necesario para obtener los valores de los campos de velocidad en m/s.

Como podemos ver en la figura 2.14, el aparato que utilizamos para realizar la calibración, tiene unos puntos blancos, cuya separación entre estos es de 10 mm. El aparato, se coloca alineado con el plano láser y se graba con la cámara, para obtener una captura de este, para así, posteriormente, obtener la relación

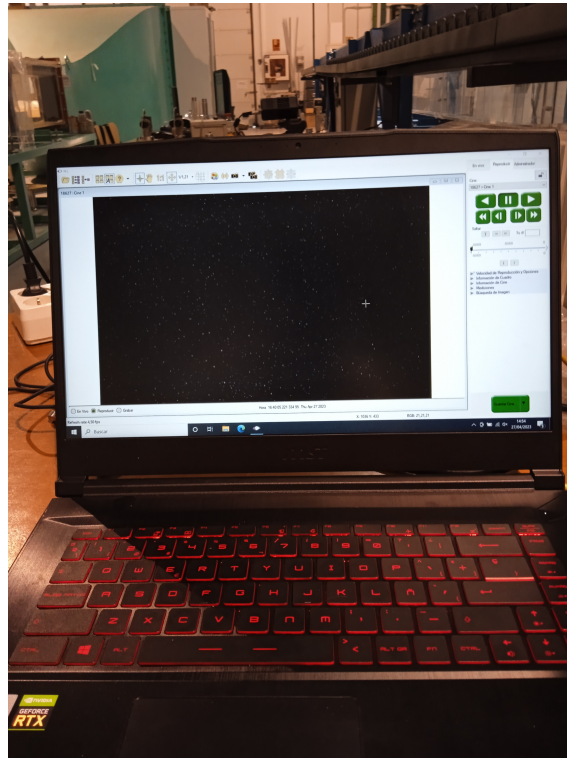


Figura 2.13: Programa que procesa las grabaciones.

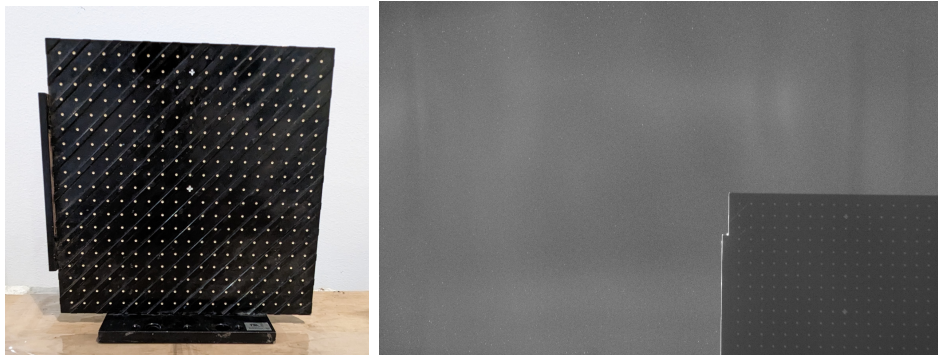


Figura 2.14: Target de calibración [17] (izquierda) y foto del calibrado (derecha).

píxel/metro. Además, podemos ver la imagen de la derecha, de la figura 2.14, que se ha utilizado para la conversión de píxeles a metros antes del post-procesado.

2.2.3. Grabación y procesado de imágenes de PIV con programa DPIVSoft en Matlab[®]

En este apartado, vamos a exponer uno de los casos que se han estudiado en este trabajo, por ejemplo, la primera toma para ángulo de ataque 7° , para el caso de ala rígida ($\rho = 0\%$).

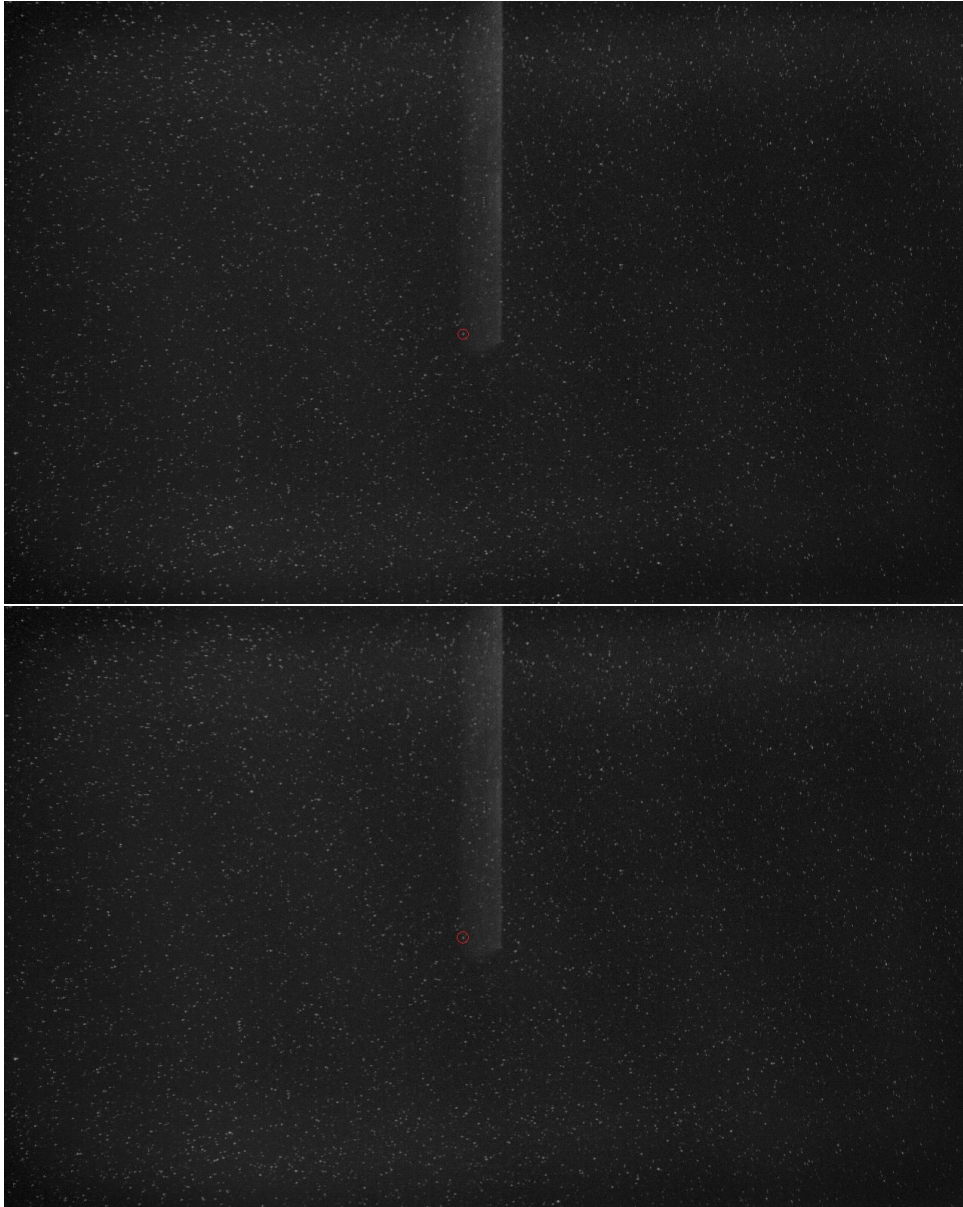


Figura 2.15: Visualización de una partícula del vórtice en dos frames consecutivos para ala rígida y ángulo de ataque 7° sin realce.

Como podemos ver en la figura 2.15, se han cogido dos imágenes consecutivas de la grabación para ala rígida y ángulo de ataque 7° , y se ha marcado una partícula

con un círculo rojo. Podemos ver, entre un frame y el siguiente, el desplazamiento de la partícula para un espacio de tiempo determinado. Con esto, realizando la metodología explicada en el capítulo 1, obtenemos el campo de velocidad cada dos imágenes. El campo de velocidad que sirve de ejemplo, se muestra en la figura 2.16 donde se observa un vórtice en la posición correspondiente en píxeles al punto (450, 250).

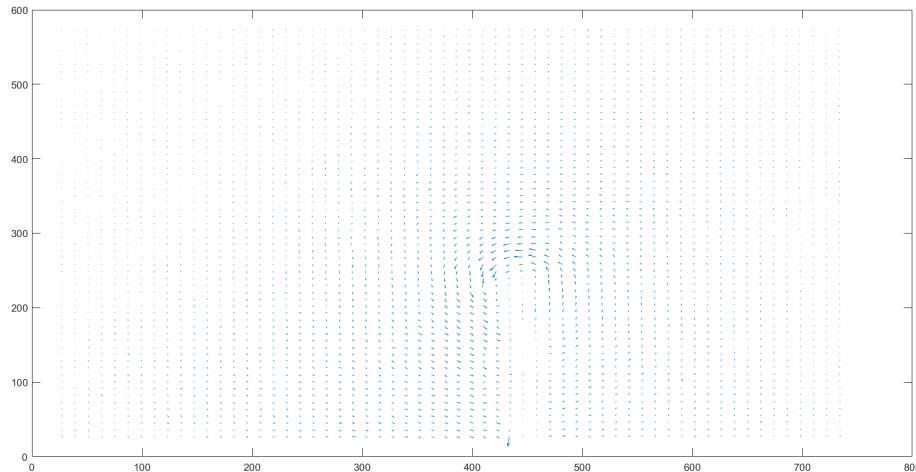


Figura 2.16: Campo de velocidad ala rígida 7° para el conjunto de imágenes de la figura 2.15.

Cabe destacar que, al procesar las imágenes, se ha utilizado un realce de estas. Con el realce lo que se hace es eliminar el ruido aleatorio y el fondo, y quedándonos así con las partículas trazadoras únicamente. Este realce se obtiene mediante un filtrado y destacar así las partículas frente a un fondo oscuro (negro).

2.2.4. Variables de estudio

En esta sección, se va a comentar brevemente las variables que se han estudiado en el capítulo 3, como son la velocidad azimutal adimensional máxima, el radio adimensional donde se produce la velocidad acimutal máxima, la circulación adimensional máxima y la vorticidad máxima.

En cuanto a la velocidad azimutal (v_θ) es una de las componentes de la velocidad en un sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , en la dirección θ . En el caso de los vórtices, representa la velocidad de giro para cada θ . Para adimensionalizar la velocidad azimutal, se divide esta por la velocidad característica W_∞ , que es la velocidad que le hemos impuesto al ala para que se mueva por el canal de arrastre, ver ecuación de la definición del número de Reynolds (2.1). Realmente lo que se

hace es comparar la velocidad azimutal con la velocidad característica, y ver así la influencia en relación con su flujo circundante:

$$\bar{v}_\theta = \frac{v_\theta}{W_\infty}. \quad (2.3)$$

Así, la velocidad adimensional máxima, será la velocidad de giro a lo largo de r/c donde se haya producido su valor máximo. Por esto, el radio máximo adimensional será el valor del radio donde se haya producido el máximo de la velocidad azimutal adimensional. Para adimensionalizar el radio, se divide entre la cuerda (c) del ala, que en los tres modelos es la misma.

Por otro lado, también se estudiará la circulación máxima adimensional. La circulación [19] se define como:

$$\Gamma \equiv \int_L \vec{v} \cdot d\vec{l}, \quad (2.4)$$

aplicando el teorema de Stokes:

$$\Gamma = \oint_L \vec{v} \cdot d\vec{l} = \int_S d\vec{s} \cdot (\nabla \wedge \vec{v}) \quad (2.5)$$

Así, la circulación adimensional será:

$$\Gamma_{adim} = \frac{\Gamma}{2\pi c W_\infty}. \quad (2.6)$$

La circulación adimensional indicará la intensidad del vórtice. Es una medida de la rotación del vórtice. al indicar cómo de intenso o cuánto está enrollado el flujo alrededor del centro del vórtice. La circulación puede estimarse como:

$$\Gamma_{adim} \simeq 2\pi v_{\theta max} r_{max}. \quad (2.7)$$

Finalmente, la otra variable que se estudiará es la vorticidad [19]:

$$\vec{w} \equiv \nabla \wedge \vec{v}. \quad (2.8)$$

La vorticidad es una medida de la rotación local del flujo. La vorticidad adimensional se determina de la siguiente manera:

$$\bar{w} = \frac{wc}{W_{\infty}}, \quad (2.9)$$

por tanto, la vorticidad adimensional indica también la intensidad de la rotación local en el vórtice. La vorticidad adimensional máxima se obtiene cogiendo el valor máximo de \bar{w} con respecto al radio. Con esto se obtiene una vorticidad máxima adimensional para cada distancia axial z/c .

Cabe destacar que post-procesado de los campos de velocidad para determinar las distintas variables, se ha realizado con una serie de funciones de Matlab[®] implementadas por el departamento de Mecánica de Fluidos.

Además, el ajuste de los experimentos a los parámetros correspondientes a los teóricos de Batchelor y Moore & Saffman, que se verán en el capítulo 3, en el subapartado 3.3.1, también se han realizado mediante una función de Matlab implementada por el departamento de Mecánica de Fluidos.

2.2.5. Resultado previo para su validación

Para comprobar que los datos experimentales tomados en este trabajo, vamos a comparar la figura 7 del artículo [5], donde se comparan medidas de PIV en tres dimensiones con los modelos teóricos de Moore & Saffman y de Batchelor (estos modelos se explicarán en el capítulo 3 y no forman parte de esta validación aunque existe también un buen acuerdo). En el caso del artículo [5], la figura 7 es para un caso de ala rígida, número de Reynolds 4×10^4 y ángulo de ataque (α) igual a 12° , pero aún así, se espera un comportamiento parecido, ya que en nuestros casos el número de Reynolds siempre es 3×10^4 , el ala es rígida, igual, y el ángulo de ataque es 9° , que es relativamente parecido. Por tanto, el comportamiento experimental tiene que ser muy similar, y eso es lo que se ha comprobado. Esta gráfica del artículo se muestra en la figura 2.17. Podemos ver como el máximo de la velocidad acimutal va disminuyendo, a partir de $z/c=4$.

Las gráficas experimentales obtenidas para z/c con valor 3, 4, 6, 12 y 16, respectivamente, se muestran en la figura 2.18. Si nos fijamos en los datos experimentales de la figura 2.17, podemos observar el mismo comportamiento cuantitativa con la velocidad acimutal máxima disminuyendo a partir de $z/c=3$ y un radio donde se produce este máximo cercano a $r/c=0.06$. Por tanto, damos por validados los datos experimentales.

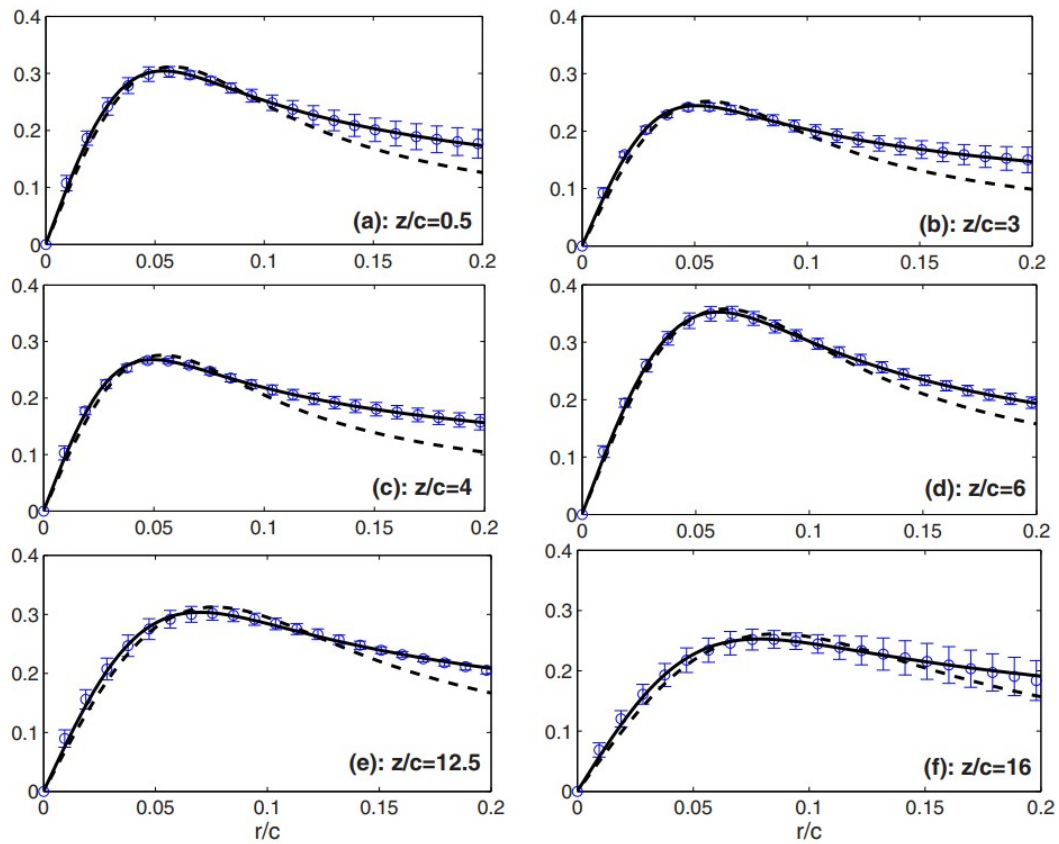


Figura 2.17: Figura 7 del artículo de 2011 para $\alpha = 12^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$, $Re=4 \times 10^4$ [5].

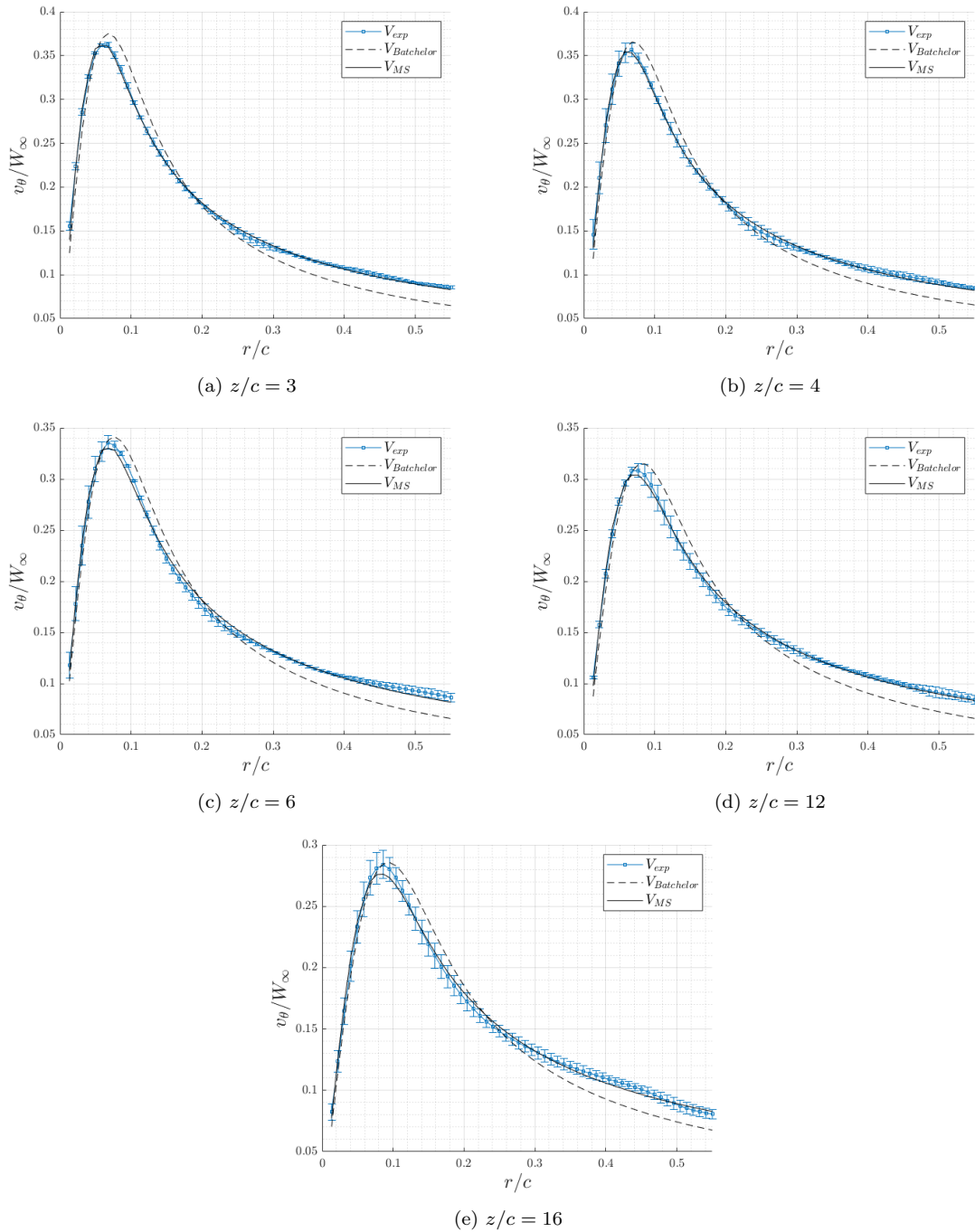


Figura 2.18: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$, $Re = 3 \times 10^4$ para comparar con [5].



Capítulo 3

Resultados

3.1. Introducción

En este capítulo se van a presentar, comentar y comparar los resultados obtenidos de los distintos casos de estudio, esto es, tres deformaciones y tres ángulos de ataque. Como se ha mencionado anteriormente, se han estudiado tres modelos de ala del perfil NACA0012. Los tres modelos son ala rígida sin deformar ($\rho = 0\%$), ala ligeramente deformada ($\rho = 2\%$) y ala muy deformada ($\rho = 4\%$). Recordemos que al ala ligeramente deformada, en algunos casos se le llamará ala rosa y al ala muy deformada se le denotará como ala azul, todo esto por simplicidad. Para cada uno de los tres modelos de ala, estudiaremos el comportamiento de distintas variables para tres ángulos de ataque, los cuales serán 7° , 8° y 9° . También, como hemos mencionado con anterioridad, el número de Reynolds se ha mantenido en un valor fijo de 3×10^4 y el *aspect ratio* de todos los modelos es de 2 ($AR=s/c=2$).

Destacar también que los experimentos se han realizado tres veces para cada caso, y con estas tres grabaciones por experimento, se ha utilizado un valor promedio de estos tres experimentos para tener unos valores más fiables. Además, junto a estos valores se ha calculado la desviación típica, para poder indicar así, el error cometido.

Con todo esto, intentaremos ver la influencia del ángulo de ataque en los distintos modelos de ala, así como comparar los distintos modelos entre sí, según su deformación y así llegar a una conclusión final.

3.2. Efecto del ángulo de ataque

3.2.1. Ala rígida

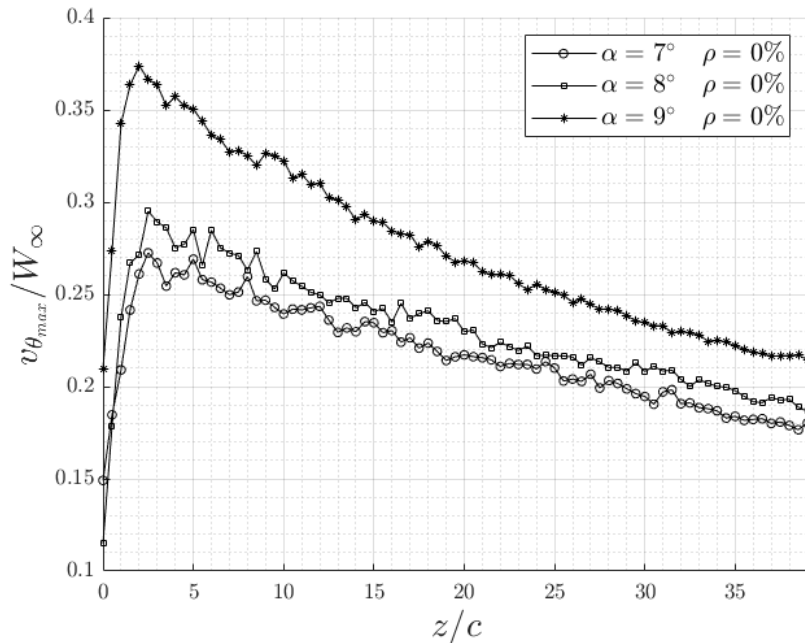


Figura 3.1: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.

Para el caso de ala rígida, la influencia del ángulo de ataque en este modelo de ala lo podemos ver en la figura 3.1, donde se representa a la velocidad azimutal máxima adimensional frente a la z adimensional hasta 39 cuerdas. En esta gráfica, podemos ver como las curvas para los tres ángulos de ataque tienen una tendencia ascendente conforme el ala se va alejando del plano láser, siendo el máximo para el caso de ángulo de ataque 9° en $z/c=2$ y para 7° y 8° en torno a $z/c=2.5$, aproximadamente. El valor de la velocidad azimutal máxima adimensional tiene un crecimiento muy rápido en las primeras cuerdas, hasta que una vez que las tres gráficas llegan al máximo, este valor comienza a descender más lentamente conforme el ala se va alejando. Esto quiere decir que el vórtice va perdiendo velocidad de giro máxima, para los tres casos, conforme el ala se va alejando del plano de medida.

Al comparar la influencia del ángulo de ataque, podemos ver como para 7° , los valores de velocidad azimutal máxima adimensional son menores y van aumentando conforme aumenta el ángulo de ataque, tanto para 8° como para 9° . La velocidad de giro máxima del vórtice es mayor para 9° a lo largo de z/c , no habiendo tanto cambio entre 7° y 8° , como el salto entre valores de 8° y 9° . También, podemos ver como la velocidad de giro máxima del vórtice para 9° tiene una pendiente desce

ligeramente mayor, por lo que el vórtice va perdiendo velocidad de giro máxima de una manera más abrupta, en comparación con los otros ángulos de ataque.

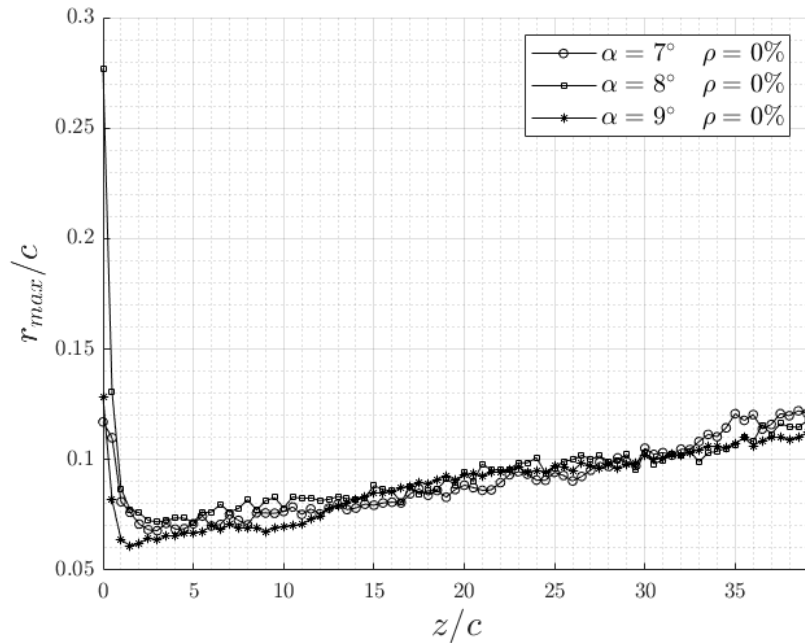


Figura 3.2: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.

Como podemos ver en la figura 3.2, el radio máximo adimensional, tiene un crecimiento prácticamente lineal para los tres ángulos de ataque. Los valores de los tres ángulos son muy parecidos y tienen el mismo comportamiento. En los tres casos, el radio máximo comienza a aumentar a partir de aproximadamente $z/c=1.5$ para ángulo de ataque 9° , a diferencia de ángulos de ataque 7° y 8° , que es partir de $z/c=2.5$ aproximadamente, como hemos indicado antes. El aumento del radio máximo adimensional frente a z/c , supone un aumento de la distancia entre la velocidad azimutal máxima y el centro del vórtice, lo que quiere decir que el vórtice se va expandiendo radialmente y perdiendo intensidad. Cabe destacar que este valor tiene una pendiente de crecimiento poco pronunciada para ambos casos y los valores son muy similares, como hemos podido ver en la gráfica de la velocidad azimutal máxima adimensional 3.1. Esto quiere decir que el comportamiento de expansión del vórtice es muy parecido para los tres casos, siendo un poco más compacto el vórtice para ángulo de ataque 9° , para cuerdas más pequeñas.

La conclusión que podemos obtener de las dos gráficas anteriores es que el ángulo de ataque para un ala sin deformación tiene más influencia en la evolución axial de la velocidad azimutal máxima que en la evolución del radio donde se produce ese máximo.

En la figura 3.3, podemos ver como la circulación adimensional media estimada

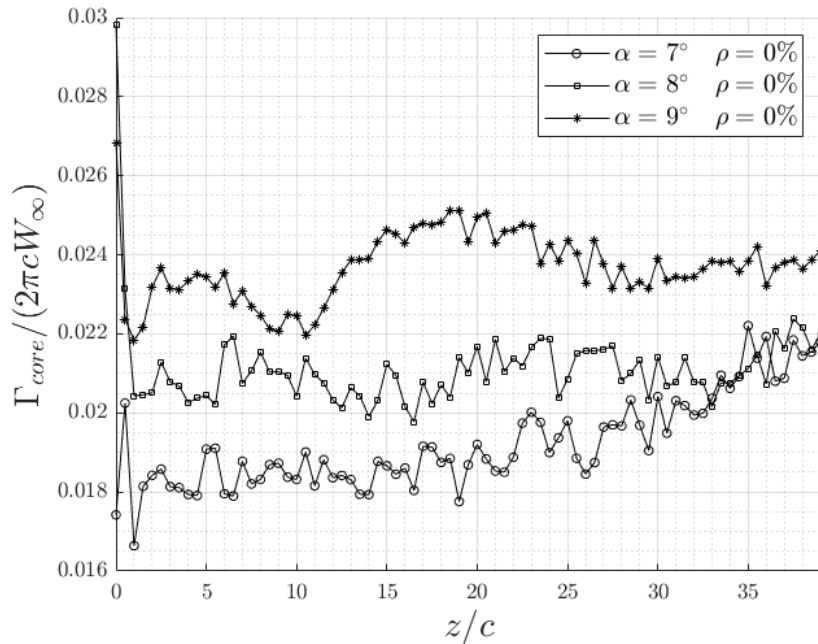


Figura 3.3: Circulación máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.

con la ecuación (2.7) se mueve en torno a un rango de valores, pero siendo prácticamente constante, sobretodo para $\alpha=8^\circ$ y 9° . En el caso de ángulos de ataque 8° y 9° , la circulación media estimada oscila entre un rango de 0.02 y 0.0225 para 8° , y entre 0.0219-0.0259 para 9° , aproximadamente. Cabe destacar, que la circulación adimensional media para 9° tiene un rango de valores más amplio. Con esto, podemos decir que la energía máxima del vórtice es ambos casos es prácticamente constante, y que conforme aumentamos el ángulo, esta energía máxima es mayor. En otras palabras, el vórtice es más intenso y tiene también mayor sustentación a medida que aumenta el ángulo de ataque, tal y como era de esperar. Sin embargo, también podemos ver como para unas distancias axiales a partir de $z/c=22-25$ aproximadamente, la circulación media adimensional para $\alpha = 7^\circ$ deja de ser tan constante y aumenta ligeramente, lo que quiere decir que el vórtice deja de ser tan estable, ya que su intensidad aumenta ligeramente, en comparación con los otros dos casos, que son más estables. Todo esto dentro de un rango de valores muy pequeños, como podemos observar en el eje de ordenadas de la figura 3.3. Este aumento sea ficticio y probablemente sea debido a que para 7 grados de ángulo de ataque las partículas de PIV tengan un campo mayor de visión que las ventanas de interrogación que se ha establecido. En consecuencia, los datos de PIV ya no sean del todo correctos ni tampoco la estimación de Γ_{core} .

En la figura 3.4 representamos la vorticidad máxima definida en la ecuación (2.9). En esta caso mostramos como para cuerdas pequeñas cerca del ala, los valores de vorticidad máxima adimensional aumentan para los tres casos, llegando a un máximo

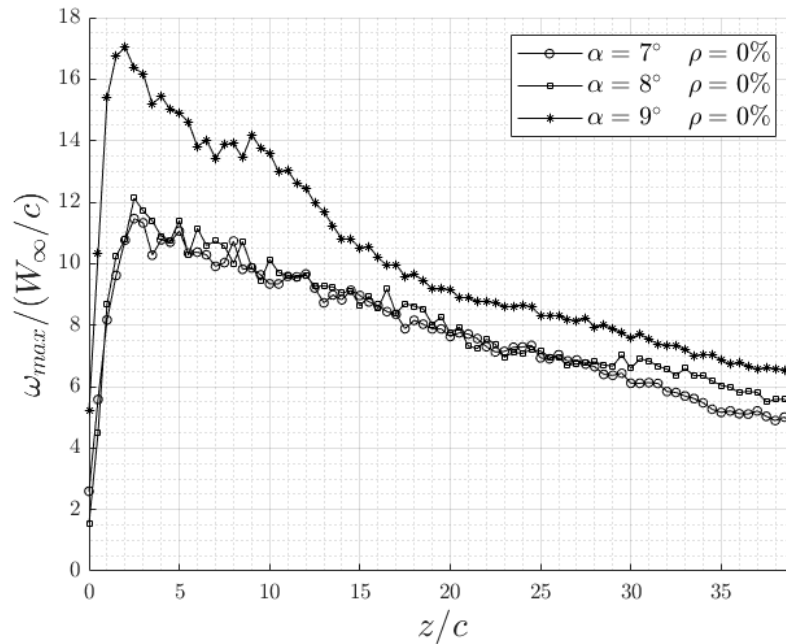


Figura 3.4: Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala rígida.

de una manera pronunciada para el caso de $\alpha = 9^\circ$. Ese máximo para el ángulo de ataque 9° está en $z/c=2$ y para 7° y 8° está en 2.5 cuerdas aproximadamente. La tendencia de las tres gráficas es la misma, ya que después de ese máximo, la vorticidad máxima adimensional tiende a disminuir linealmente. En el caso de $\alpha = 7^\circ$ y 8° , los valores coinciden prácticamente, hasta $z/c=29$ aproximadamente, donde el valor de la vorticidad para $\alpha = 8^\circ$ tiene un valor ligeramente mayor. Con esto, podemos indicar que la velocidad máxima de rotación del vórtice aumenta sobretodo cuando pasamos de 8° a 9° . Para 9° , hay un descenso ligeramente más pronunciado de la velocidad máxima de rotación del vórtice, sobretodo para cuerdas entre 2 y 15 aproximadamente. La rotación del vórtice para 8° tiene un máximo de la vorticidad máxima adimensional ligeramente mayor que para 7° , pero la diferencia de valores de rotación entre estos dos ángulos no son significativas en comparación con los valores para $\alpha = 9^\circ$.

Una vez que hemos comparado distintas variables máximas adimensionales según su ángulo de ataque para el modelo de ala rígida, y hemos visto su evolución conforme el ala se alejaba, hasta $z/c=39$, seguidamente, estudiaremos la velocidad azimutal adimensional con respecto a r adimensional (r/c) para distintas cuerdas.

En la figura 3.5 podemos ver la velocidad azimutal adimensional frente a r/c para distintas z/c .

La velocidad azimutal adimensional tiende a aumentar hasta un valor máximo en

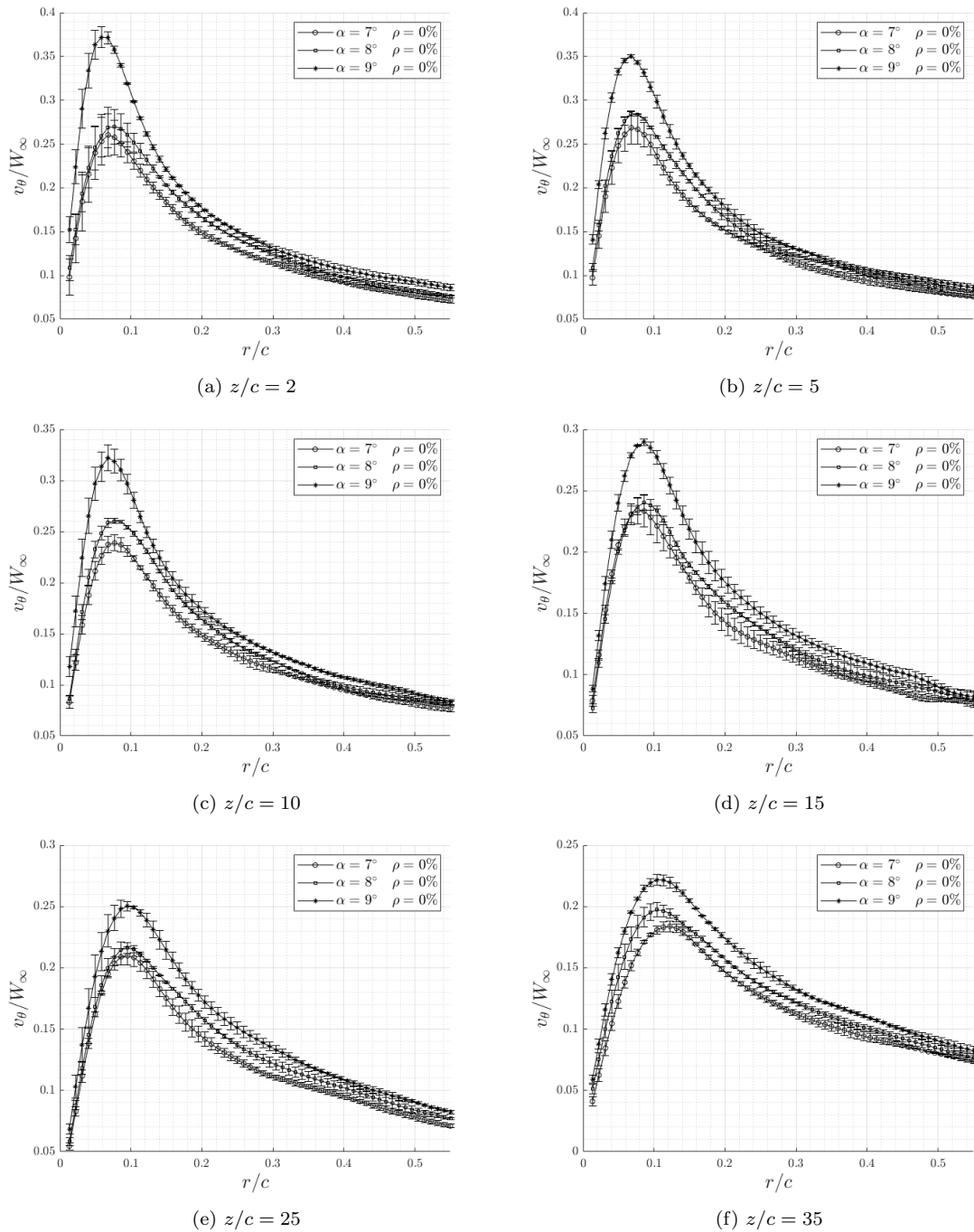


Figura 3.5: Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para al rígida.

una cierta r/c (radio máximo adimensional, r_{max}/c) para los tres ángulos de ataque, tal y como se observa en 3.5. Ese valor máximo de la velocidad irá disminuyendo conforme el ala se va alejando, como se ha mencionado en la figura 3.1, aunque para 8° y 7° el valor de la velocidad azimutal máxima adimensional tiende a disminuir

más lentamente, con una pendiente menor. La evolución de \bar{v}_θ con respecto a r/c es prácticamente una tendencia lineal hasta llegar a su valor máximo, sobretodo para z/c pequeñas. Además, en cuerdas pequeñas, podemos notar que la velocidad azimutal adimensional para 9° tiene un máximo más acentuado, por lo que la pendiente con la que aumenta hasta este máximo y luego disminuye esta variable, a lo largo de r/c es mayor que para los otros dos ángulos de ataque, siendo la pendiente de 8° mayor que la de 7° . También, el radio adimensional donde se produce el máximo para todos los casos aumenta ligeramente conforme aumenta z/c , por lo que el radio del vórtice se va expandiendo ligeramente para los tres casos, como hemos mencionado anteriormente (ver figura 3.2). Por tanto, el vórtice para $\alpha = 9^\circ$ parece estar más compacto al tener un radio donde se produce el máximo menor, pero este vórtice tiene una capacidad de expansión mucho mayor, llegando a velocidades de giro parecidas y ligeramente superiores a los de las alas deformadas. Sin embargo, para $\alpha = 8^\circ$ y 7° , los valores de la velocidad del vórtice a lo largo de r/c son más parecidos, y la diferencia entre los valores máximos y los más alejados del centro del vórtice es ligeramente parecida y menor que para el caso de $\alpha = 9^\circ$.

3.2.2. Alas deformadas

A continuación, se van a comentar los casos para ala poco deformada, es decir, $\rho = 2\%$.

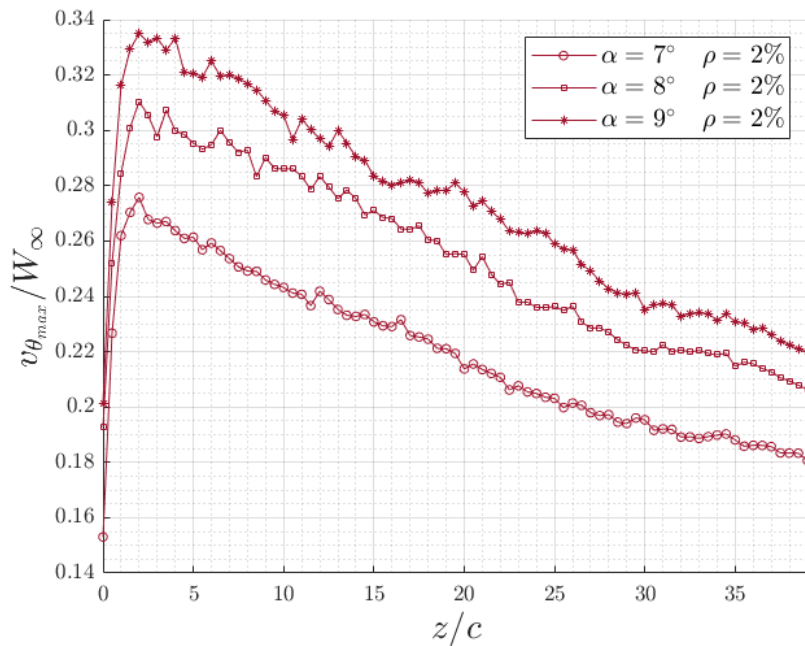


Figura 3.6: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.

En primer lugar, como podemos ver en la figura 3.6, la velocidad azimutal máxima adimensional ($\bar{v}_{\theta max}$), aumenta su valor conforme aumenta el ángulo de ataque. Las tres gráficas presentan el mismo comportamiento, aumentando hasta un valor máximo, alcanzándose para los tres casos aproximadamente en $z/c=2$, y posteriormente descendiendo con una pendiente bastante parecida. Todo esto quiere decir que el vórtice aumenta su velocidad de giro máxima conforme aumenta el ángulo de ataque del ala.

Mostramos a continuación la evolución axial de \bar{r}_{max} en la figura 3.7 que tiene un mínimo menor para $\alpha = 7^\circ$. Esto significa que el vórtice estará más compacto para $\alpha = 7^\circ$, y para 8° y 9° estará más expandido radialmente, agrandándose en los tres casos conforme el ala se va alejando, con la misma tendencia, pero con valores de radio más pequeños en el caso de 7° . Esto quiere decir que el vórtice se va expandiendo conforme aumenta la distancia axial z/c , pero seguirá siendo más compacto para $\alpha = 7^\circ$. Para valores del ángulo de ataque $\alpha=8^\circ$ y 9° el radio máximo adimensional tiene valores más parecidos.

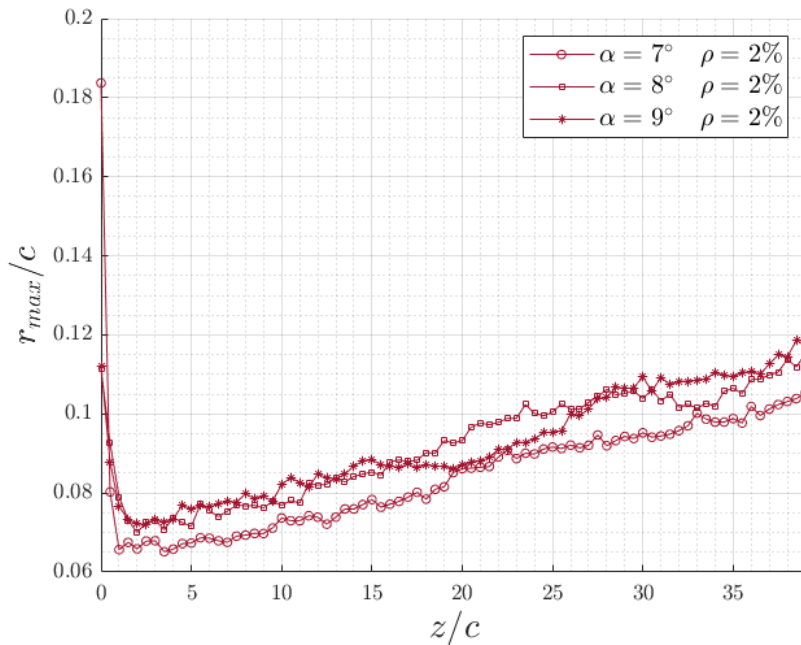


Figura 3.7: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala ligeramente deformada.

Representamos la circulación media adimensional para ala ligeramente deformada ($\rho = 2\%$) en la figura 3.8. Los resultados muestran que conforme el ángulo de ataque aumenta, el valor de la circulación aumenta, habiendo una diferencia mayor con respecto a $\alpha = 7^\circ$, donde la circulación tendrá un valor menor. En los tres casos el valor se mantiene prácticamente constante, dentro de un rango de valores. Esto significa que el vórtice es más intenso a mayor ángulo de ataque y que el modelo de ala deformada aumenta también la fuerza de sustentación con el ángulo de ataque.

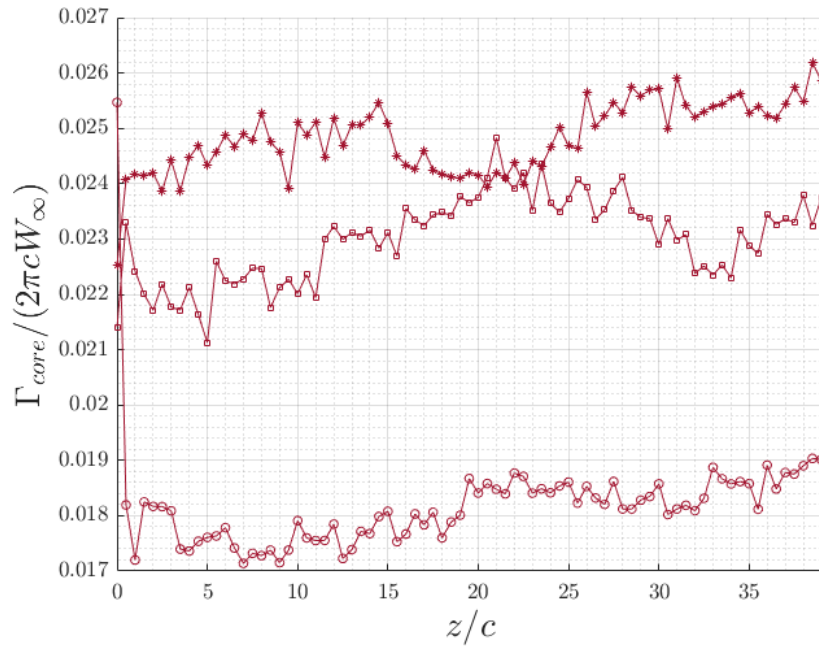


Figura 3.8: Circulación media adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.

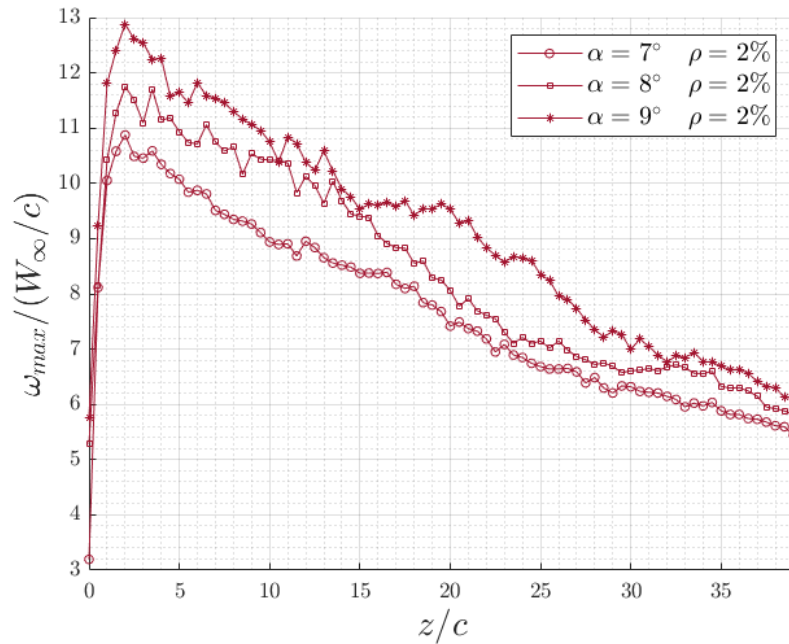


Figura 3.9: Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala poco deformada.

Si analizamos la figura 3.9, podemos ver como el valor de vorticidad máxima adimensional aumenta conforme aumenta su ángulo de ataque. Cabe destacar que

las pendientes de descenso de las tres gráficas con respecto a z/c son muy parecidas. Por tanto, la rotación local va disminuyendo y va haciendo que el vórtice sea menos intenso debido a la difusión viscosa. Por tanto, para aproximadamente $z/c=2$, la rotación local máxima de los tres vórtices disminuye de una forma similar, ya que sus pendientes son parecidas.

A continuación, vamos a hablar de la figura 3.10, donde se compara la \bar{v}_θ con respecto al radio adimensional para distintas cuerdas. Podemos observar que, conforme nos alejamos del ala axialmente, las velocidades azimutales adimensionales máximas van disminuyendo, tal y como comentamos en la figura 3.6 para el mismo ala poco deformada. Todas las gráficas presentan un máximo de la velocidad azimutal a una cierta distancia del centro del vórtice, y conforme el ala se aleja de la sección, el radio donde se produce el máximo aumenta, como hemos indicado en la figura 3.7, y esto quiere decir que el vórtice se expande radialmente bajando su velocidad de rotación. Cabe destacar que el vórtice es más compacto para $\alpha = 7^\circ$, y este va de más a menos compacto conforme aumenta el ángulo de ataque, aunque la diferencia no es tan notoria. Una vez que \bar{v}_θ llega a su máximo, las pendientes con las que disminuye la velocidad azimutal máxima a lo largo de r/c son bastante parecidas para los tres casos, y estas pendientes van disminuyendo su valor conforme nos alejamos a z/c mayores.

Todo esto quiere decir, que la diferencia entre los ángulos de ataque, es que la velocidad azimutal adimensional es mayor para ángulos de ataque mayores, es decir, el vórtice tendrá una mayor velocidad de giro conforme aumentamos el ángulo de ataque del ala.

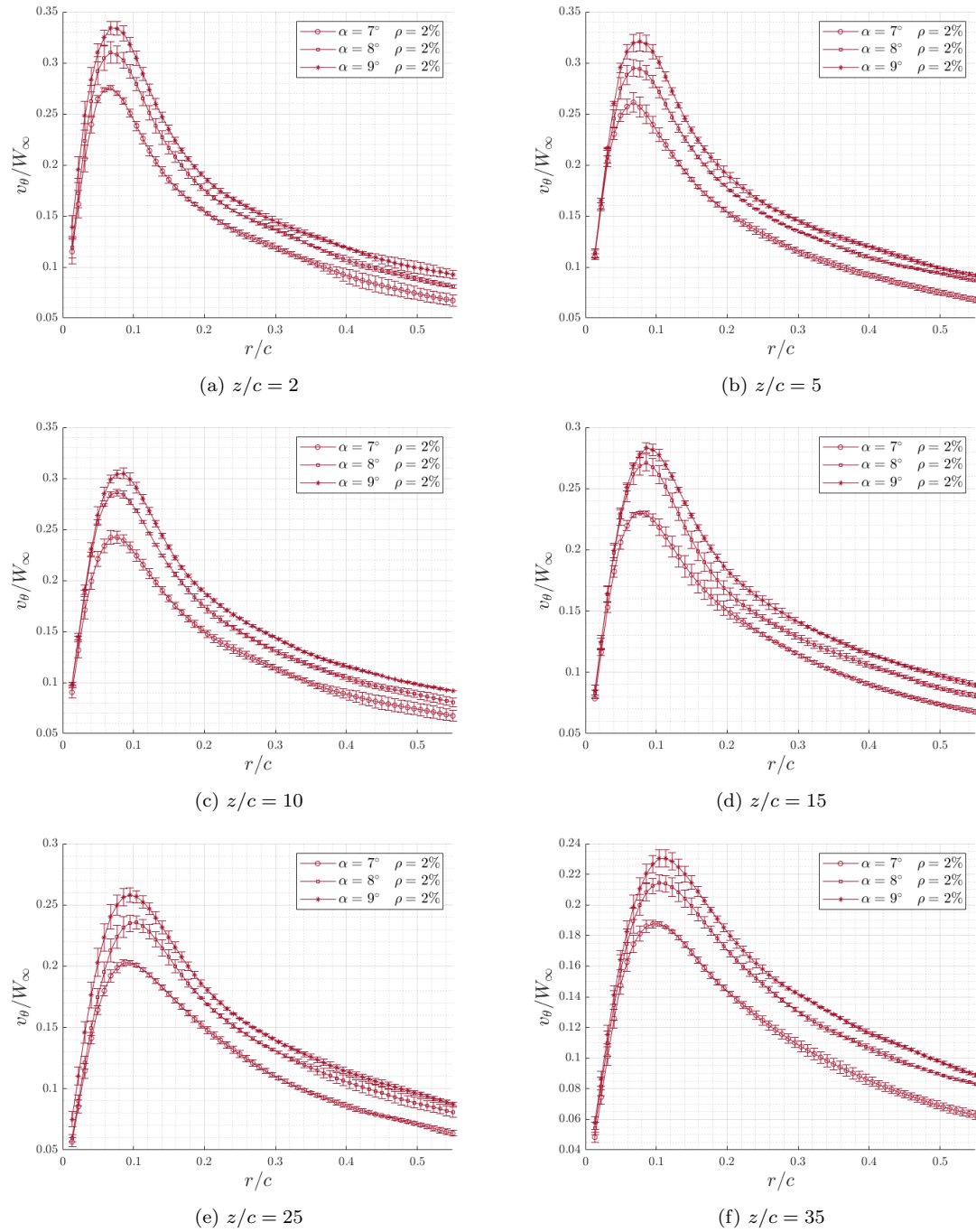


Figura 3.10: Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para ala ligeramente deformada (rosa).

Seguidamente, hablaremos de los mismos casos pero para ala muy deformada ($\rho = 4\%$). En estos casos, también hablaremos de la influencia del ángulo de ataque para este tipo de deformación.

En la figura 3.11, mostramos la velocidad azimutal máxima adimensional frente a z/c hasta un máximo de 39 cuerdas.

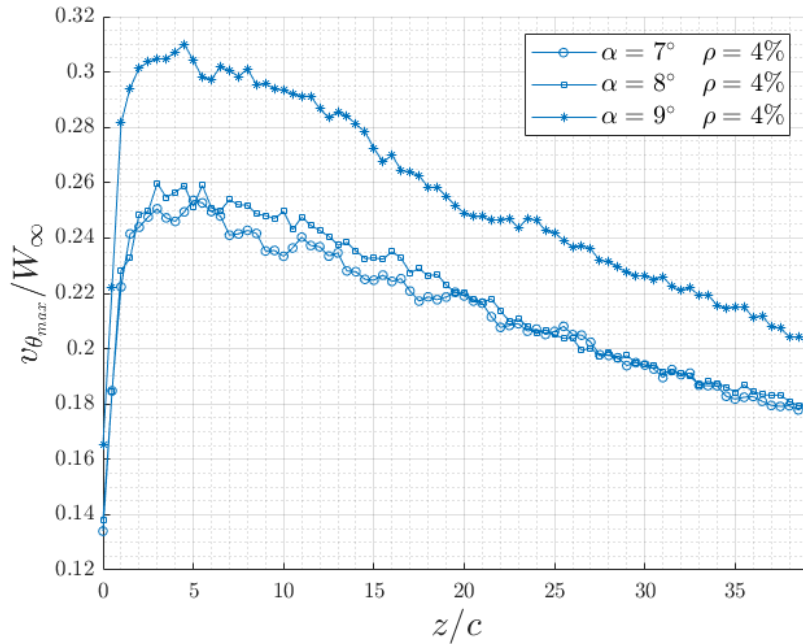


Figura 3.11: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.

Como podemos ver en la figura 3.11, los valores de $\bar{v}_{\theta_{max}}$ para 9° son mayores que para 7° y 8° , existiendo una diferencia menos notable entre los valores para 7° y 8° , siendo bastante estas evoluciones muy similares, e iguales prácticamente para las cuerdas finales. En el caso de 8° , los valores son un poco mayores que para 7° hasta las 20 cuerdas aproximadamente. La pendiente de disminución del valor de $\bar{v}_{\theta_{max}}$ para 9° es la más pronunciada que las pendiente de los otros dos ángulos de ataque.

En cuanto al radio máximo adimensional, r_{max}/c frente a la distancia axial, z/c , observamos una tendencia bastante parecida para los tres ángulos de ataque, tal y como se muestra en la figura 3.12. En esta figura, podemos ver como los valores del radio máximo adimensional en las primeras cuerdas coinciden más para los tres casos, y conforme nos alejamos a cuerdas mayores los valores tienden a ir creciendo, pero con una diferencia más notable entre ellos que para z/c bajas. A partir unas 12 cuerdas, aproximadamente, podemos ver como el radio máximo adimensional tiene valores mayores para 9° , además que su pendiente es ligeramente más pronunciada.

Por esto, podemos decir que el vórtice se expande radialmente más a medida que aumentamos el ángulo de ataque, pero las tendencias en términos de evolución axial son muy parecidas. Por tanto, no hay realmente tanta diferencia entre ellas, aunque para 7° sí se nota que el vórtice está más compacto, ya que los valores son menores.

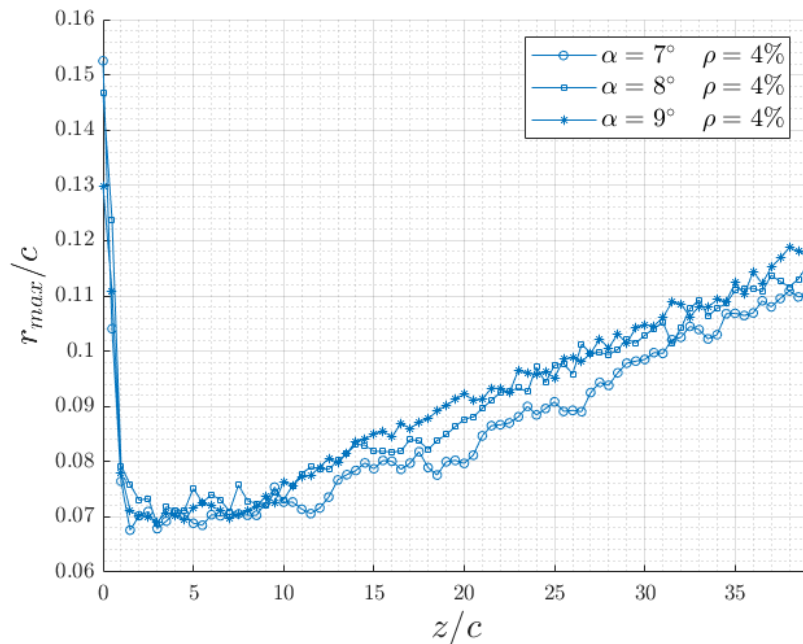


Figura 3.12: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.

Por otro lado, en la figura 3.13 representamos nuevamente la circulación media frente a la distancia axial. Podemos ver como al comparar en función del ángulo de ataque las tres curvas para los tres casos, la circulación adimensional media a lo largo de todo z/c será mayor para 9° , habiendo más diferencia entre esta y los otros dos casos. Los valores de la circulación para 8° grados también serán mayores, pero con una diferencia mucho menor entre esta y los valores de la circulación adimensional máxima para 7° . Todo esto quiere decir, que para ala muy deformada ($\rho = 4\%$) la intensidad máxima del vórtice aumenta conforme aumenta el ángulo de ataque. Además, no todos los casos se mantienen constantes y su valor tiende a aumentar, aunque ligeramente, conforme aumenta la distancia z/c .

Seguidamente, representamos en la figura 3.14 la vorticidad máxima frente a la distancia axial. En este caso de máxima deformación, la vorticidad adimensional máxima presenta valores mayores para todo z/c para el mayor ángulo de ataque estudiado, $\alpha = 9^\circ$, así como pendientes más pronunciadas tanto para alcanzar su valor máximo, el cual se da aproximadamente en $z/c=2$, como para la disminución posterior del valor máximo. Por otro lado, para 7° y 8° los valores de vorticidad adimensional máxima son menores, sus pendientes un poco menos pronunciadas,

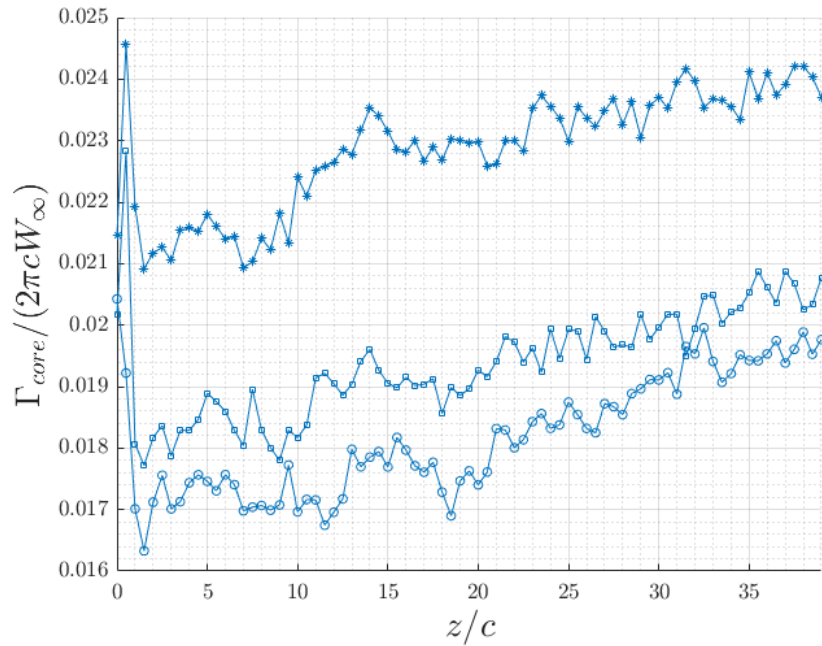


Figura 3.13: Circulación media adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.

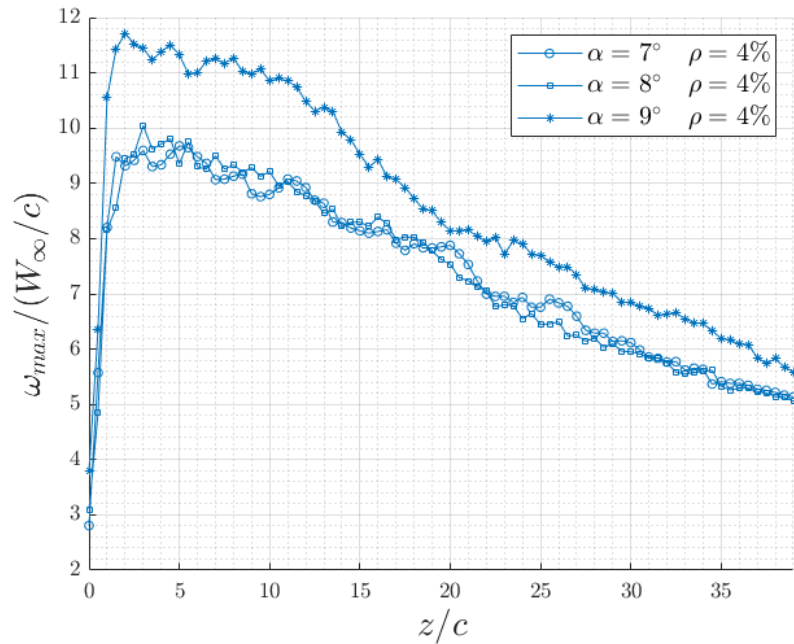


Figura 3.14: Vorticidad máxima adimensional frente a z adimensional para los distintos ángulos de ataque para ala muy deformada.

y ambas gráficas prácticamente coinciden. Por todo esto, podemos decir, que la intensidad de rotación local máxima en los vórtices para 9° son mayores, y se

alcanzan valores máximos mayores que para ángulos de ataque menores. También, para 7° y 8° no encontramos grandes diferencias, siguiendo el vórtice para ambos casos un comportamiento parecido.

Por último, vamos a analizar la velocidad azimutal adimensional en función de r/c para distintas cuerdas, ver figura 3.15. En este caso de máxima deformación, los valores para $\alpha = 9^\circ$ son mayores, al igual que su pendiente hasta alcanzar el valor de $\bar{v}_{\theta_{max}}$. Por tanto, la velocidad de giro va aumentando en mayor medida para el caso de 9° , conforme nos vamos alejando del centro del vórtice, hasta que llega a su máximo, y la velocidad comienza a disminuir al principio más para $\alpha = 9^\circ$. A partir de una determinada posición radial r/c , que variará según la distancia axial z/c , las pendientes con las que disminuye la velocidad de giro del vórtice con respecto a r/c serán iguales para los tres casos. Los comportamientos para 7° y 8° son prácticamente iguales, aunque los valores para 8° son ligeramente mayores pero muy parecidos a los del caso de 7° . Conforme aumenta la distancia axial z/c , el vórtice va disminuyendo su velocidad de giro, así como se va expandiendo radialmente. En otras palabras, el valor de r/c donde se produce el máximo de la velocidad azimutal va aumentando, como hemos comentado en los anteriores casos. Este comportamiento es independiente del tipo de deformación.

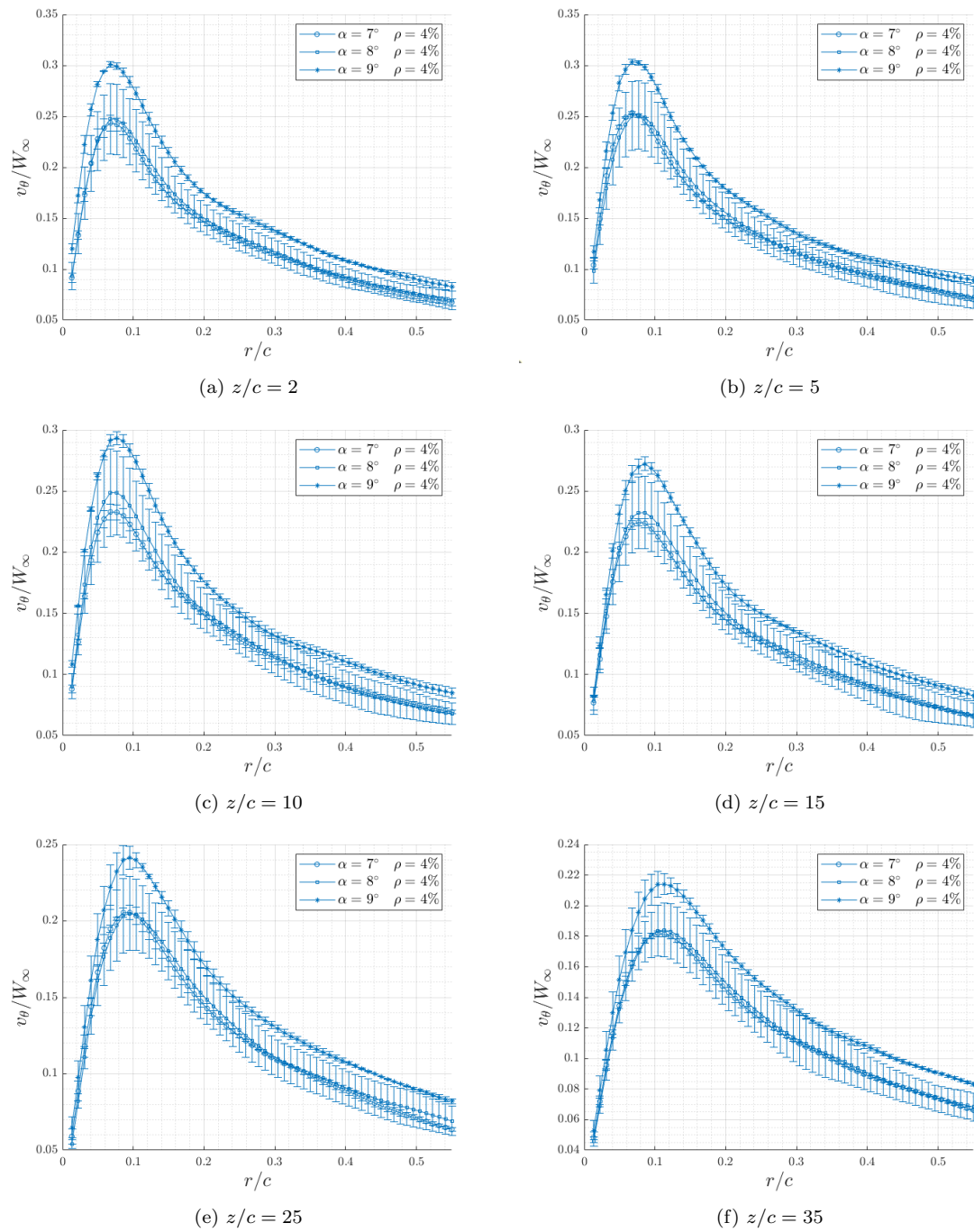


Figura 3.15: Velocidad azimutal adimensional, frente al radio adimensional para distintas z/c para ala muy deformada (azul).

3.3. Comparación de resultados y efecto de la deformación

En esta sección, analizaremos la influencia de la deformación para el caso de la velocidad azimutal adimensional máxima, el radio adimensional donde se produce la velocidad azimutal máxima, la circulación adimensional media y la vorticidad adimensional máxima en función de z/c . Con esto intentaremos ver la influencia de la deformación en los vórtices, mediante el estudio del comportamiento de estas variables. Además, en esta sección, representaremos el máximo en z/c de la velocidad azimutal adimensional máxima y de la vorticidad adimensional máxima, ya que así se podrá comparar mejor la influencia de la deformación para los distintos ángulos de ataque, y llegar así a mejores conclusiones finales sobre su influencia en los vórtices.

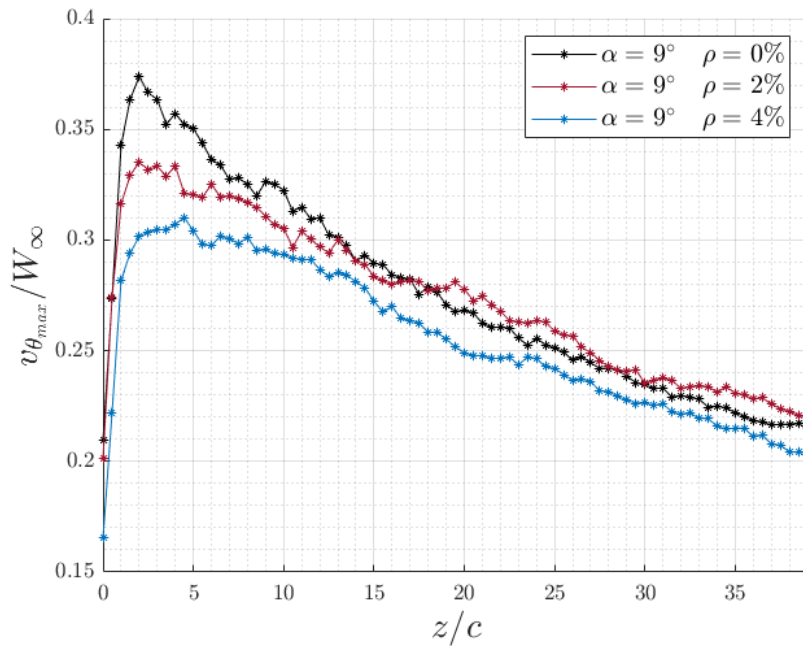


Figura 3.16: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 9^\circ$ para todas las alas.

Primeramente, en la figura 3.16, podemos ver como para $\alpha = 9^\circ$, la velocidad azimutal máxima adimensional es mayor conforme pasamos de ala muy deformada ($\rho = 4\%$), a ala ligeramente deformada ($\rho = 2\%$) hasta llegar al ala sin deformar ($\rho = 0\%$), en ese orden. La velocidad azimutal máxima adimensional tiene para los tres casos de deformación un comportamiento bastante parecido, siendo mayor la pendiente hasta llegar al valor máximo de $\bar{v}_{\theta_{max}}$ para ala sin deformar, y disminuyendo esta a lo largo que aumenta la deformación. Por tanto, podemos decir que a más deformación, la velocidad de giro máxima del vórtice aumenta para este ángulo de ataque. Además, la pendiente con la que decrecen los valores de $\bar{v}_{\theta_{max}}$ para

ala rígida es mayor, por lo que la velocidad del vórtice para ala rígida disminuye más rápido. Sin embargo, la pendiente de descenso de los valores para el caso de ala poco deformada y muy deformada es muy parecida, por lo que el valor de velocidad azimutal máxima adimensional va disminuyendo de una forma similar.

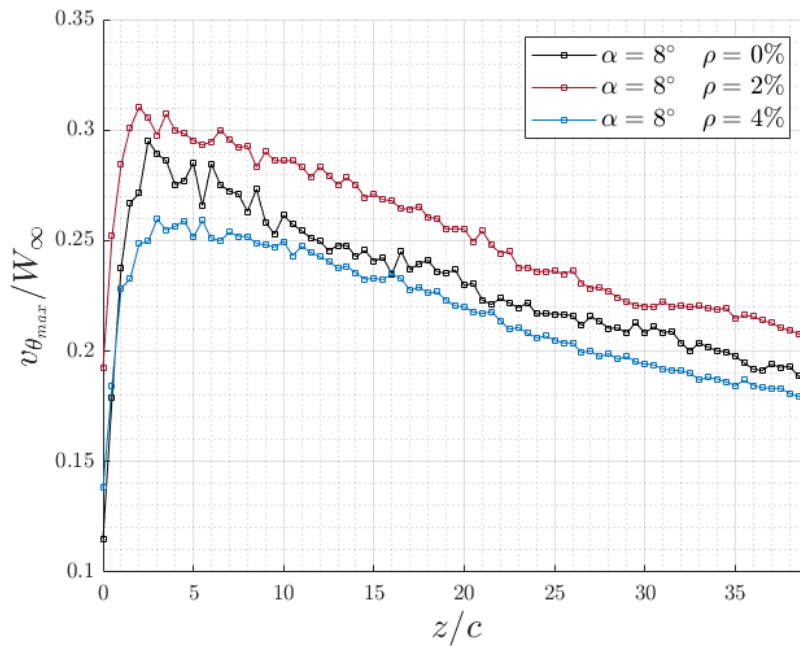


Figura 3.17: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 8^\circ$ para todas las alas.

Para el caso de $\alpha = 8^\circ$, según se ve en la figura 3.17, observamos como para ala ligeramente deformada la $\bar{v}_{\theta_{max}}$ es mayor que para ala rígida, no siguiendo así el mismo patrón que para $\alpha = 9^\circ$. Por tanto, la velocidad de giro máxima para cada z/c , será mayor para un vórtice generado por un ala con deformación $\rho = 2\%$, siguiéndole el ala sin deformar, cuyos valores serán mayores a los del ala muy deformada $\rho = 4\%$. Las pendientes con las que disminuyen los valores máximos de la gráfica son prácticamente iguales, siendo ligeramente más pronunciada la pendiente para ala sin deformar.

En la figura 3.18 se analizará el comportamiento de $\bar{v}_{\theta_{max}}$ frente a la distancia axial para $\alpha = 7^\circ$. En ella, se muestra como los valores de la velocidad azimutal máxima adimensional para $\rho = 0\%$ y $\rho = 2\%$ son prácticamente iguales, habiendo una pequeña diferencia de estos casos de deformación con respecto a $\rho = 4\%$ para cuerdas menores que $z/c=10$ aproximadamente. Esto quiere decir que para 7° , la comparación entre alas con pequeñas deformaciones y alas sin deformar es que la velocidad del giro del vórtice es prácticamente la misma a lo largo de z/c , pero cuando aumentamos la deformación a $\rho = 4\%$, esta velocidad de giro es menor para cuerdas pequeñas, y al tener una pendiente un poco menos pronunciada, conforme

nos vamos alejando a cuerdas mayores, esta velocidad empieza a parecerse más a los casos de $\rho = 0\%$ y $\rho = 2\%$.

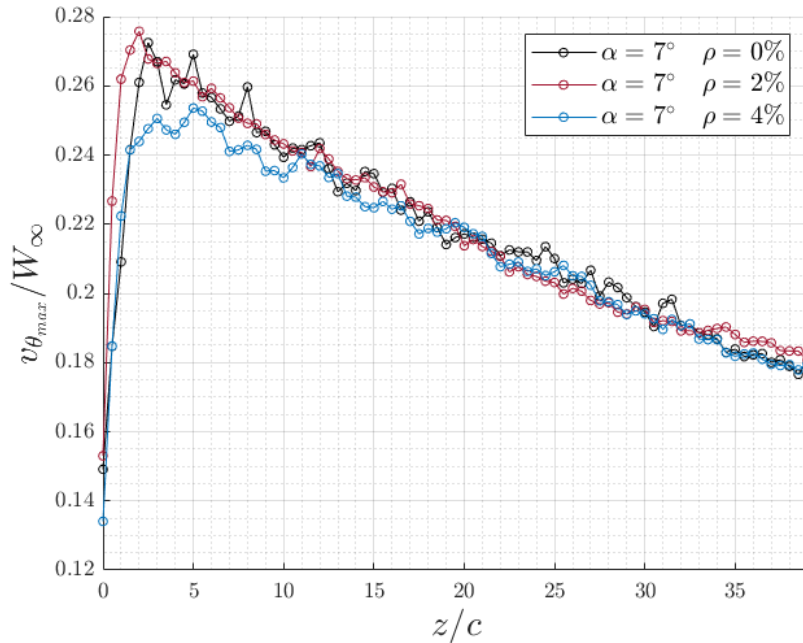


Figura 3.18: Velocidad azimutal máxima adimensional frente a z adimensional $\alpha = 7^\circ$ para todas las alas.

En la figura 3.19 hemos representado los datos de velocidad máxima azimutal en función de la distancia axial en distintas subfiguras dependiendo de la deformación para así resumir los datos de otra manera. Podemos ver como a medida que aumenta el ángulo de ataque para cada deformación, aumentan los valores de la velocidad máxima adimensional. Esto ocurre para todos los casos de deformación del ala. Por otro lado, también podemos destacar, que para deformaciones de $\rho = 4\%$ las velocidades son menores, por tanto, el vórtice se disipa más, al tener una velocidad de giro máxima menor.

Los valores del radio donde la velocidad azimutal adimensional es máxima frente a la distancia axial se representan en la figura 3.20 para $\alpha=9^\circ$. En ella, los resultados muestran como para el caso de ala no deformada, los valores del radio donde la velocidad azimutal adimensional es máxima son menores, esto quiere decir que parece que el vórtice está más compacto para $\rho = 0\%$. Parece que para cuerdas pequeñas, los valores del radio máximo adimensional para ala no deformada son menores, pero no hay un comportamiento claro que no lleve a unas conclusiones claras. Sin embargo, la pendiente para $\rho = 4\%$ parece ser ligeramente mayor que para $\rho = 2\%$, pero la pendiente más pronunciada es la de $\rho = 0\%$. Para el ala sin deformar, la expansión radial del vórtice parece ser mayor que en el resto de casos a lo largo de z/c . En los otros dos casos de deformación, sus comportamientos son más parecidos, por eso no se llegan a conclusiones claras en sus comparaciones.

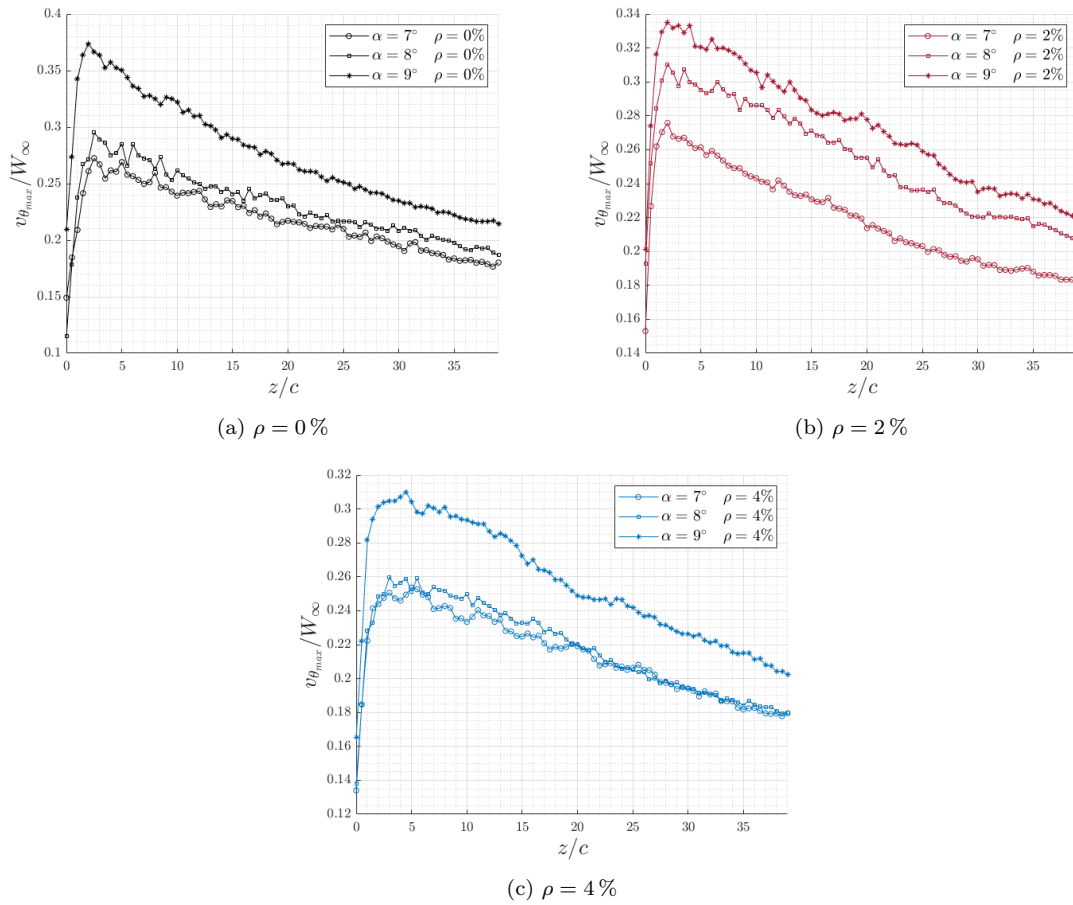


Figura 3.19: Velocidad azimutal adimensional frente a z/c para todos los casos.

Seguidamente, para el caso de $\alpha = 8^\circ$ y $\alpha = 7^\circ$ (ver figuras 3.21 y 3.22 respectivamente), los resultados de PIV muestran como los valores para las tres deformaciones tienen un comportamiento prácticamente igual. El radio en el que se alcanza la velocidad de giro máxima del vórtice a lo largo de z/c para estos dos casos, se podría decir que tiene el mismo comportamiento y valores. Todo esto quiere decir que el radio del vórtice para estos dos ángulos de ataque, para las tres deformaciones se expande de una manera muy parecida.

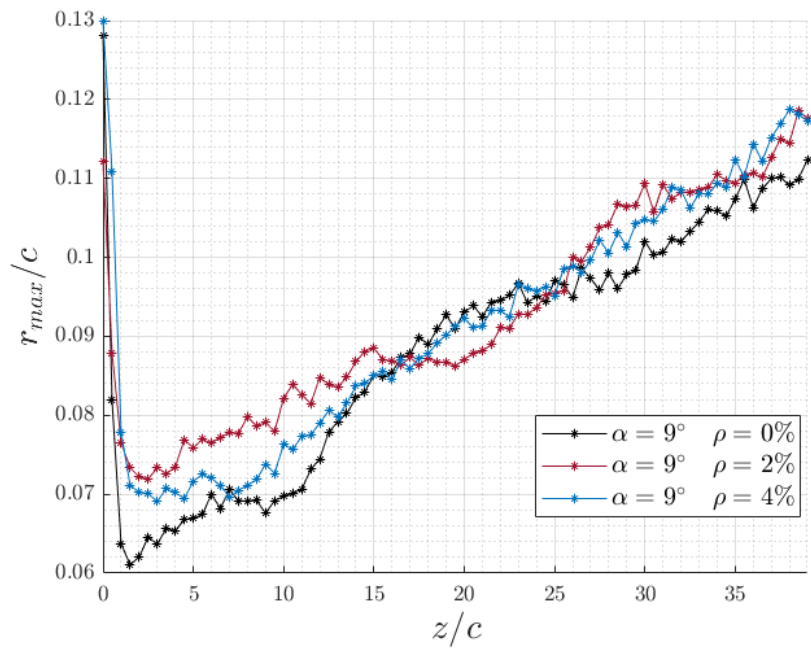


Figura 3.20: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ para las tres deformaciones de ala.

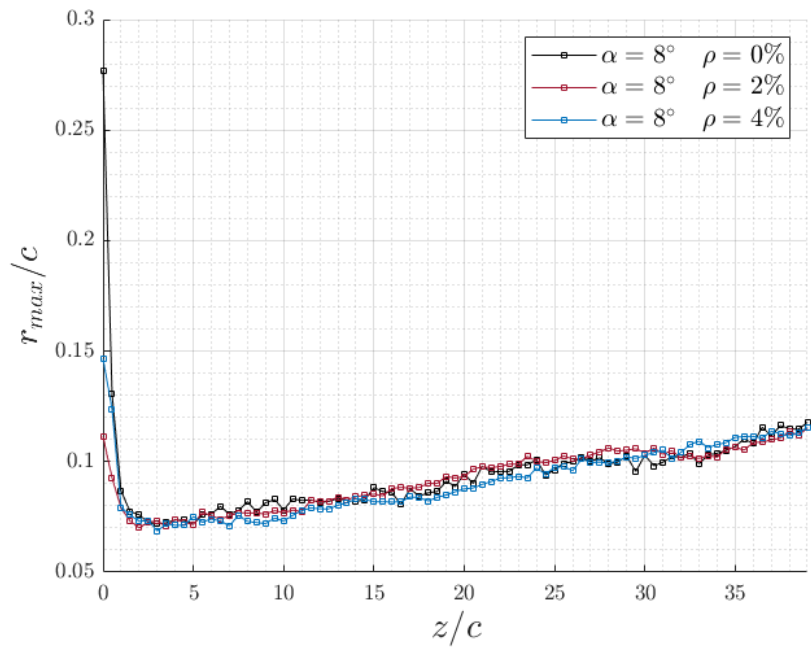


Figura 3.21: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 8^\circ$ y para las tres deformaciones de ala.

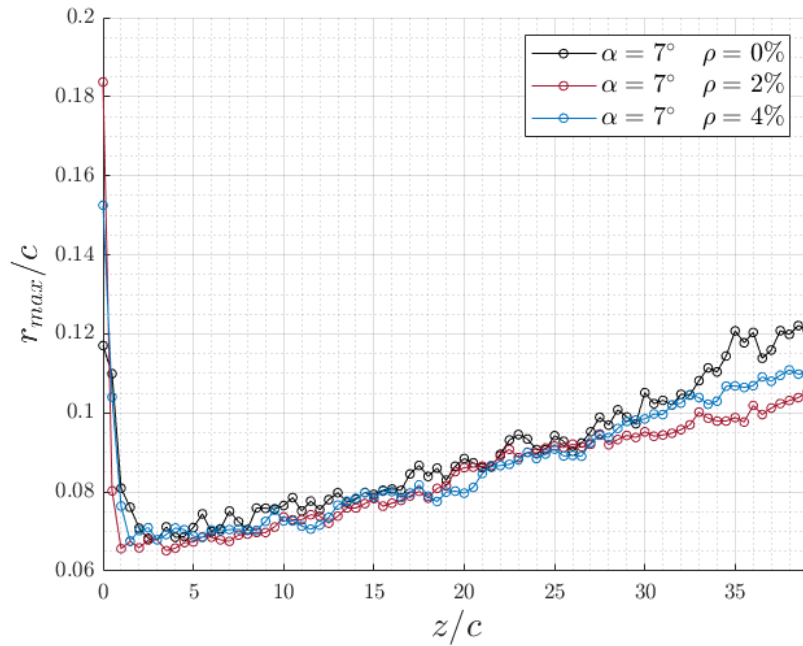


Figura 3.22: Radio máximo adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 7^\circ$ y para las tres deformaciones de ala.

A continuación, en la figura 3.23 vamos a unir todos los casos del radio máximo adimensional, correspondiendo cada subfigura a una deformación del ala. Se puede concluir que el radio máximo aumenta con la distancia axial independientemente de la deformación que tenga a partir de una determinada cuerda $z/c \approx 2$. Además, la deformación hace que se note más la diferencia entre los ángulos de ataque. Esto es evidente al observar la diferencia entre las figuras 3.23 (a) y (c).

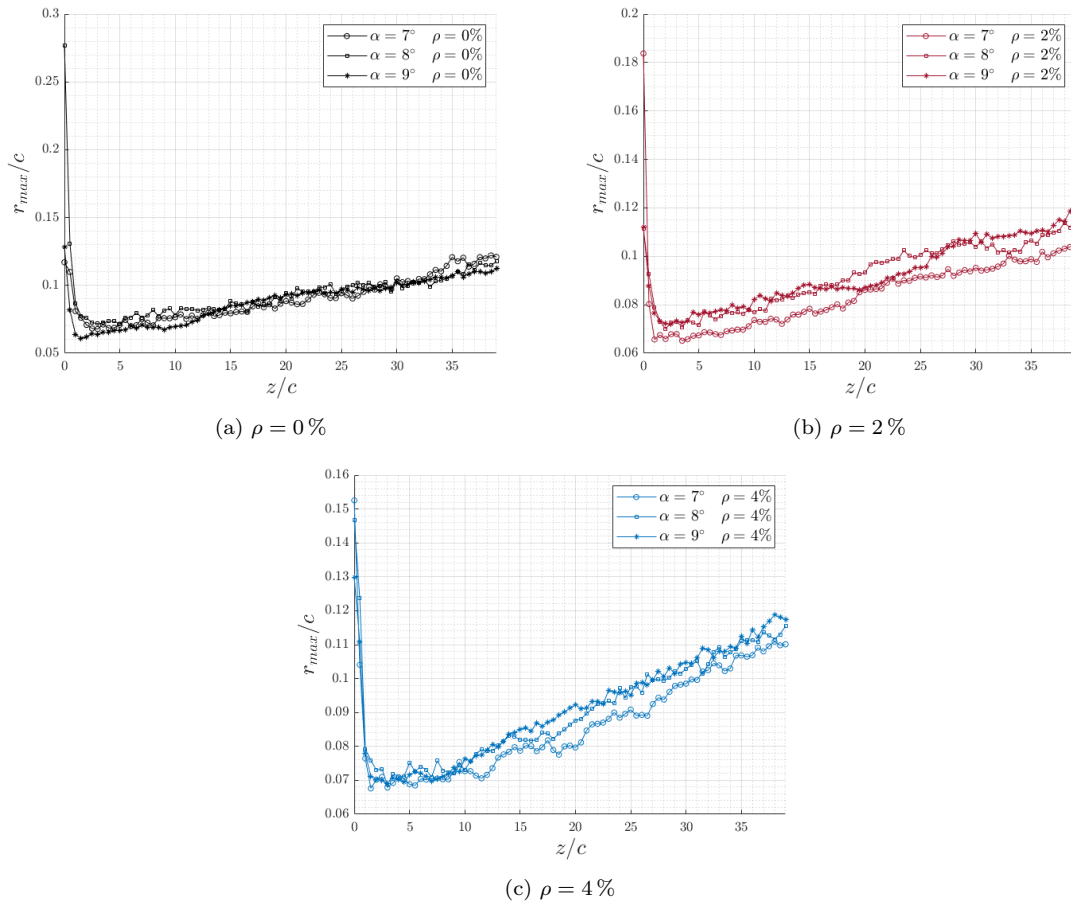


Figura 3.23: Radio máximo adimensional frente a z/c para todos los casos.

En la figura 3.24 analizaremos la circulación media adimensional para los tres tipos de deformación, para $\alpha = 9^\circ$. Como podemos ver en los resultados de PIV, para un ala ligeramente deformada la circulación adimensional media es mayor en casi todos los valores de z/c , esto quiere decir que la intensidad máxima del vórtice será mayor para $\rho = 2\%$, siguiéndole para ala sin deformar, hasta acabar con los valores más bajos en el caso de ala muy deformada $\rho = 4\%$, salvo para cuerdas finales donde los valores de $\rho = 0\%$ y de $\rho = 4\%$ son muy parecidos. A medida que aumentamos la deformación del ala, la circulación máxima adimensional tiene un ligero crecimiento a lo largo de z/c .

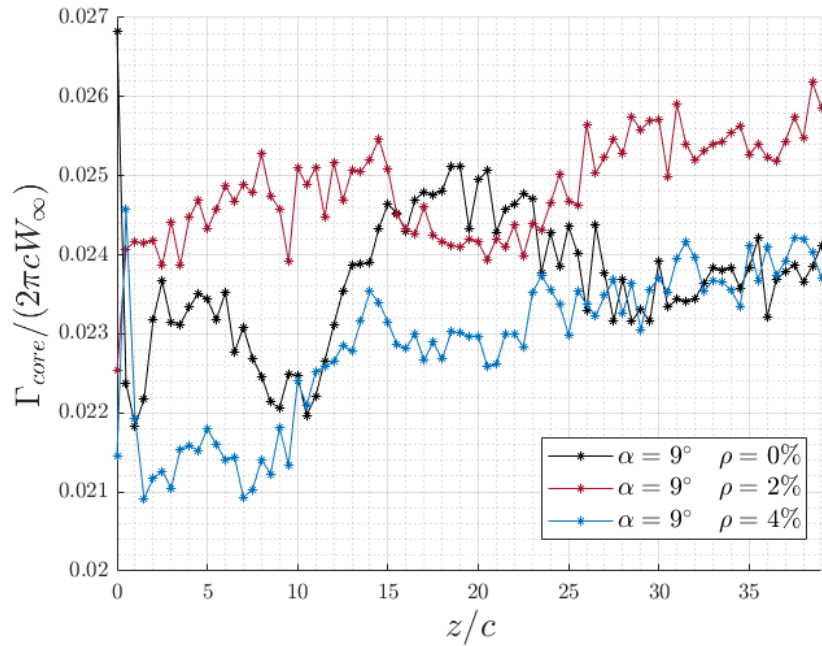


Figura 3.24: Circulación media adimensional frente a z adimensional $\alpha = 9^\circ$ para todos los casos.

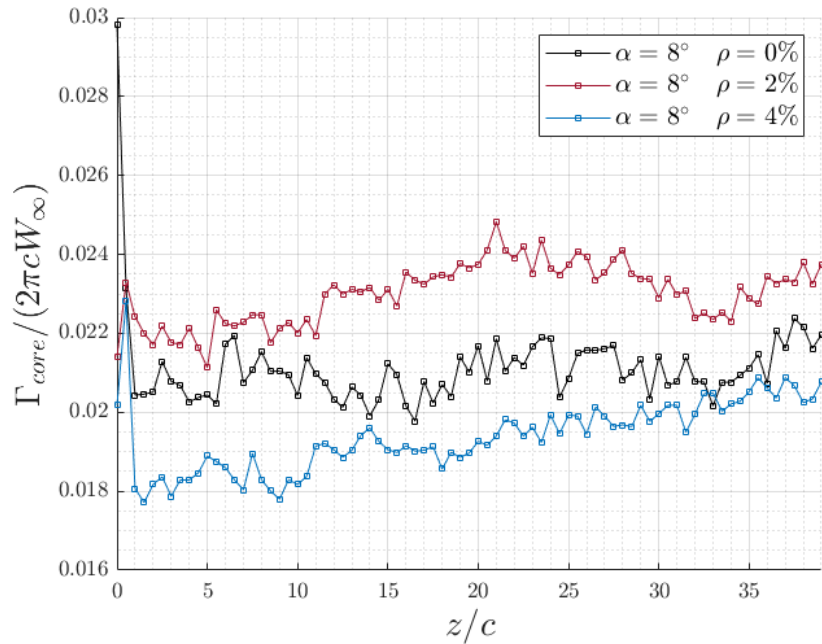


Figura 3.25: Circulación media adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 8^\circ$ para las tres deformaciones de ala.

En la figura 3.25, correspondiente a un ángulo de ataque de 8° , los valores de circulación media para $\rho = 2\%$ están por encima que para ala sin deformar y

que ala muy deformada, siendo los valores de este último caso los más bajos. La intensidad máxima en el vórtice a lo largo de z/c será menor para $\rho = 4\%$, como ya corroboramos al mostrar los resultados de la velocidad azimutal máxima.

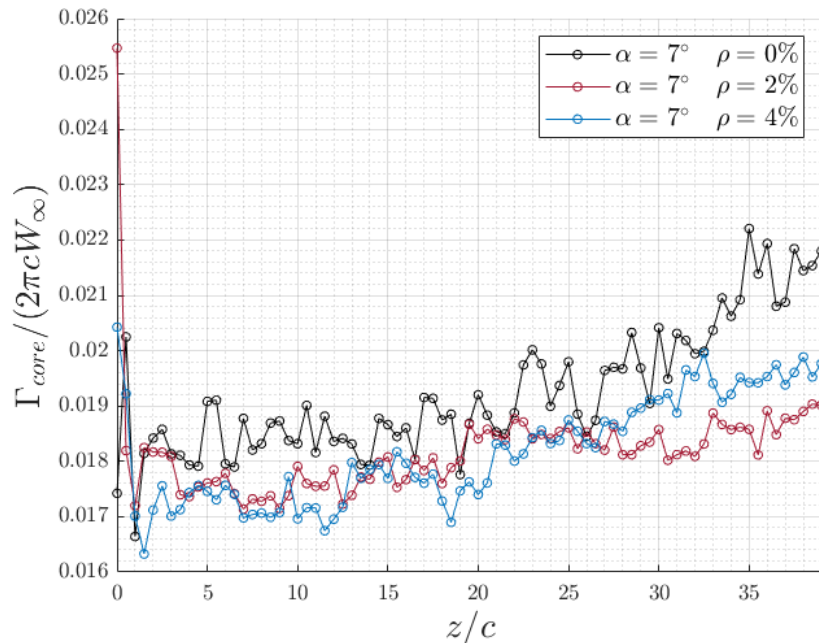


Figura 3.26: Circulación media adimensional frente a z adimensional para $\alpha = 7^\circ$ para las tres deformaciones de ala.

Finalmente, podemos ver en la figura 3.26, para un ángulo de ataque de 7° , como el ala no deformada muestra una circulación media adimensional que aumenta conforme nos alejamos a cuerdas mayores. Además, los valores para $\rho = 0\%$ son mayores que para $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$, siendo los valores para las alas deformadas bastante parecidos.

En la figura 3.27 podemos ver como a medida que aumenta el ángulo de ataque, la circulación media adimensional aumenta, independientemente de la deformación. Sin embargo, al comparar las deformaciones, tendremos comportamientos distintos dependiendo del ángulo de ataque. Pudiendo destacar que para ala muy deformada, la circulación media adimensional tiene un ligero aumento conforme z/c va aumentando. Las comparaciones y los rangos en los que fluctúan los valores son muy pequeños, por lo que se podrían considerar los parámetros constantes dentro de un error de 10^{-3} .

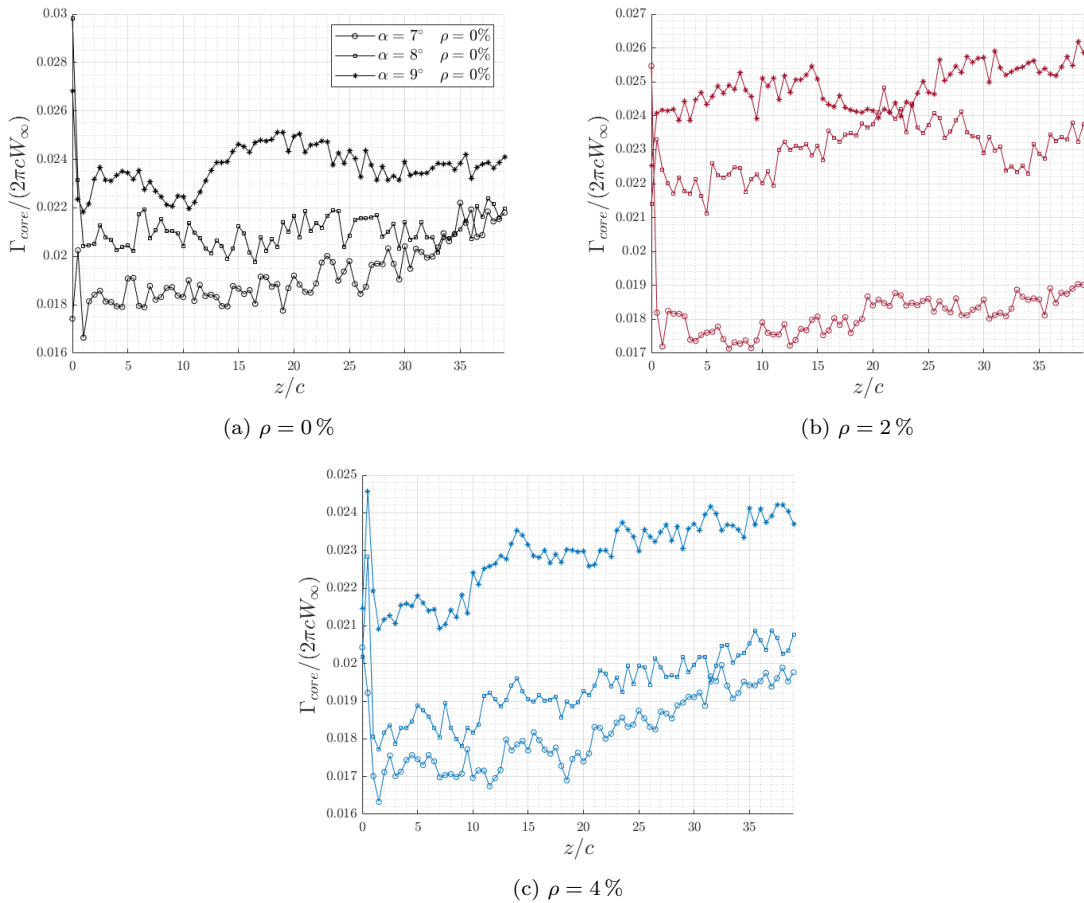


Figura 3.27: Circulación media adimensional frente a z/c para todos los casos.

En la figura 3.28, podemos ver como la vorticidad máxima adimensional presenta un máximo para los tres casos aproximadamente en el mismo valor de z/c . En el caso de ala no deformada tenemos, hasta $z/c=17$, aproximadamente, valor por encima del ala poco deformada y ala muy deformada, cuyos valores de estas dos son parecidos. Además, la pendiente de descenso de la vorticidad máxima adimensional para ala no deformada es mayor que en el resto de casos. Si cogemos desde el valor máximo hasta $z/c=17$, podemos ver que la pendiente de descenso para el ala no deformada es mucho mayor, mientras que para los otros dos alas es prácticamente igual, siendo un poco menor la del ala muy deformada. A partir de $z/c=17$ los valores de vorticidad máxima adimensional para ala no deformada se parecen más a los de las alas deformadas, y tienen valores más parecidos. Todo esto quiere decir, que para $\alpha = 9^\circ$, el vórtice tiene una rotación local máxima mayor para las primeras cuerdas conforme menos deformada esté el ala.

En el caso de la figura 3.29, podemos decir que para $\alpha = 8^\circ$ los valores de vorticidad máxima adimensional se parecen más entre ala no deformada y ala poco deformada, habiendo más diferencia entre estos y los de ala muy deformada. Esto

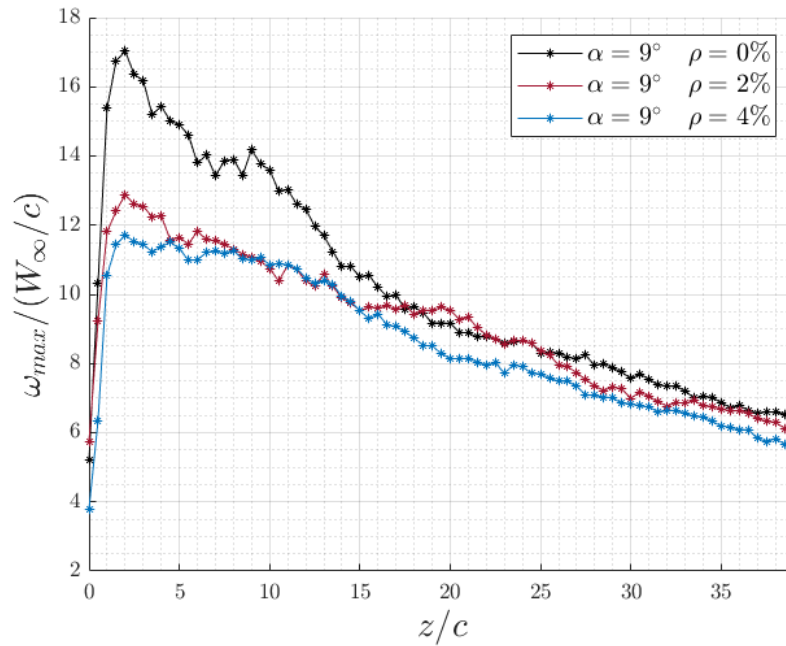


Figura 3.28: Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.

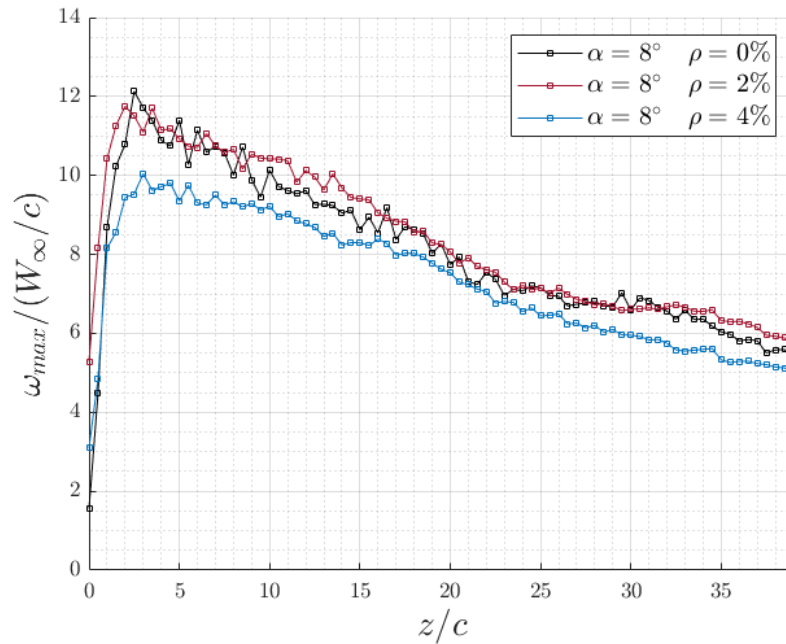


Figura 3.29: Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 8^\circ$ y todas las deformaciones.

quiere decir que para $\alpha = 8^\circ$, la deformación se nota más en la rotación local máxima del vórtice cuando tenemos una deformación de $\rho = 4\%$, y para deformaciones en

el ala de $\rho = 2\%$ no encontramos diferencia con respecto al ala deformada.

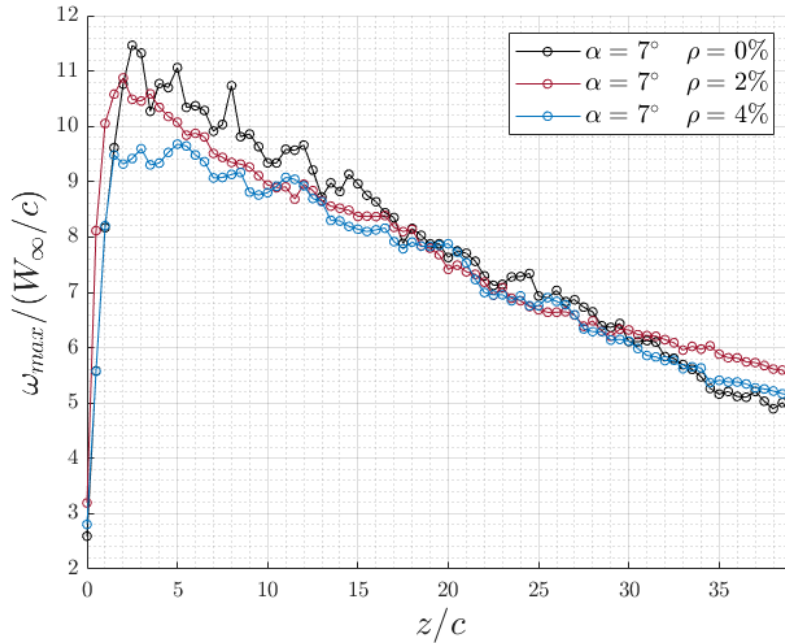


Figura 3.30: Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para $\alpha = 7^\circ$ y todas las deformaciones.

Por otro lado, para la figura 3.30, podemos ver como la vorticidad máxima adimensional para $\alpha = 7^\circ$, los valores para ala rígida son ligeramente superiores. Su valor máximo se alcanza para una z/c en torno a 2.5, y para alas deformadas el máximo de las funciones se alcanza un poco antes. Además, la pendiente con la que disminuyen los valores de rotación máxima local para cada z/c es más pronunciada, aunque a partir de cuerdas grandes ($z/c=15$), los valores de las tres alas se parecen más, hasta llegar a cuerdas de $z/c=30$. A partir de ahí, la rotación local máxima para ala rígida es muy parecida a la del ala muy deformada, y menores que para ala de pequeñas deformaciones. Todo esto quiere decir que el vórtice para ala no deformada tiene una rotación local máxima mayor para z/c más pequeñas, siguiéndole en orden de más a menos el ala poco deformada y, por último el ala muy deformada. Todo cambia para cuerdas entre 17 y 30, donde los valores son similares. Para cuerdas finales, el vórtice para ala poco deformada mantiene mayor rotación local máxima.

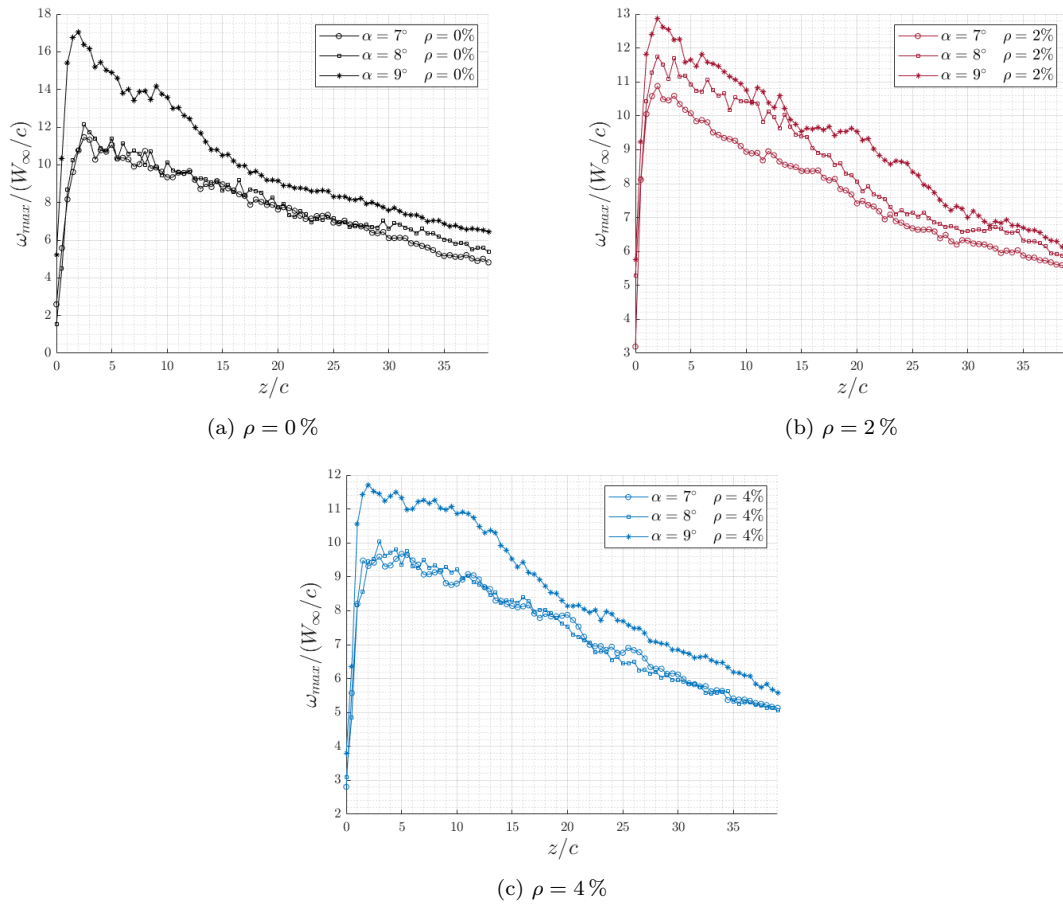


Figura 3.31: Vorticidad máxima adimensional frente a z/c para todos los casos.

En la figura 3.31, podemos ver como conforme aumenta el ángulo de ataque aumenta la vorticidad máxima adimensional. Aunque para ángulos de ataque entre $\alpha = 7^\circ$ y $\alpha = 8^\circ$, se nota una ligera diferencia, sobre todo para ala ligeramente deformada. Sin embargo, en cuanto a la deformación, no hay un patrón claro para determinar un comportamiento claro, ya que no parece influir en esta variable.

A continuación, se va a estudiar el comportamiento de la velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas cuerdas. Para esto, agruparemos según el ángulo de ataque del ala y compararemos los tres tipos de deformación.

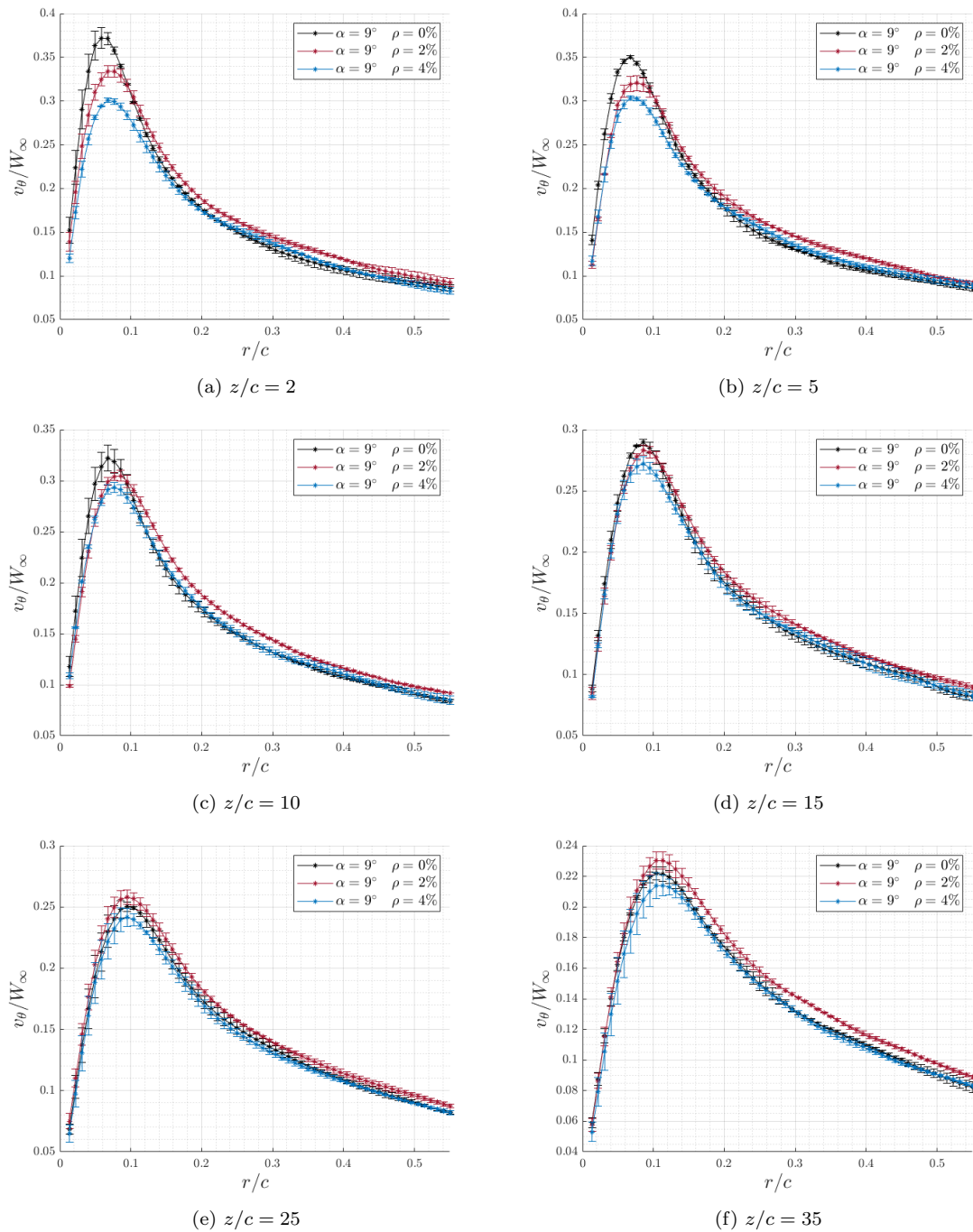


Figura 3.32: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 9^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$.

Como podemos ver en la figura 3.32, para $z/c=2$ y 5 (campo cercano al ala), la pendiente para deformación $\rho = 0\%$ alcanza el máximo de una forma más abrupta. Después, un poco menos pronunciada tenemos la pendiente para $\rho = 2\%$, y finalmente, la pendiente menos pronunciada para $\rho = 4\%$. Además, los valores para z/c pequeñas son mayores conforme menos deformada esté el ala. Los valores para ala poco deformada, comienzan a superar a los del ala no deformada para cuerdas finales.

Por tanto, podemos decir que la velocidad de giro del vórtice para $\alpha = 9^\circ$ disminuye más que los valores para ala poco deformada conforme aumenta z/c . También indicar que las evoluciones radiales de la velocidad acimutal de ala muy deformada disminuyen menos que los de ala no deformada, pero siguen estando con niveles inferiores. Todo esto quiere decir que, para $\alpha = 9^\circ$, el ala no deformada presenta mayores velocidades de giro, pero tiene una disminución más acentuada y para ala muy deformada al ser las velocidades de giro menores, el vórtice es menos intenso.

Además, los vórtices de los tres casos comienzan a expandirse de la misma forma para cuerdas finales, a partir de $z/c=15$ ó 25. Conforme nos alejamos del punto donde se produce el máximo, a partir de r/c entre 0.07 y 0.12, podemos ver como para $\rho = 2\%$ los valores de \bar{v}_θ , son mayores que para las otras dos deformaciones, para todas las cuerdas hasta aproximadamente $z/c=15$ o un poco más. A partir de cuerdas mayores, los valores de la velocidad azimutal adimensional serán mayores en $\rho = 0\%$ para prácticamente todo el dominio radial r/c . Además, para cuerdas pequeñas, conforme nos alejamos del radio donde se produce el máximo, \bar{v}_θ tiene intervalos de r/c donde la velocidad azimutal adimensional para $\rho = 4\%$ es muy parecida al caso de $\rho = 0\%$.

En resumen, para z/c pequeños, también podemos ver, como hemos mencionado antes, que el vórtice para alas deformadas tiene una ligera expansión mayor, y conforme los vórtices se van disipando, los vórtices se parecen más. Además, para cuerdas finales o z/c grandes, los resultados muestran como el decrecimiento de los valores a lo largo de r/c es parecido para los tres casos.

Para $\alpha = 8^\circ$, como podemos ver en la figura 3.33, los valores para el ala ligeramente deformada son mayores, siguiéndole los valores de ala no deformada y finalmente, los valores de ala muy deformada para todo r/c . Las velocidades de giro del vórtice son distintas para cada caso y no se pueden llegar a conclusiones claras al comparar las deformaciones. Sin embargo, la velocidad de giro del vórtice para ala muy deformada es siempre menor. Antes de llegar al máximo, los valores son muy parecidos cerca del centro del vórtice con una tendencia lineal hasta llegar al máximo de cada curva. Las pendientes con las que decrecen los valores a lo largo de r/c dejan de ser tan pronunciadas para cuerdas mayores ($z/c=25$ ó 35).

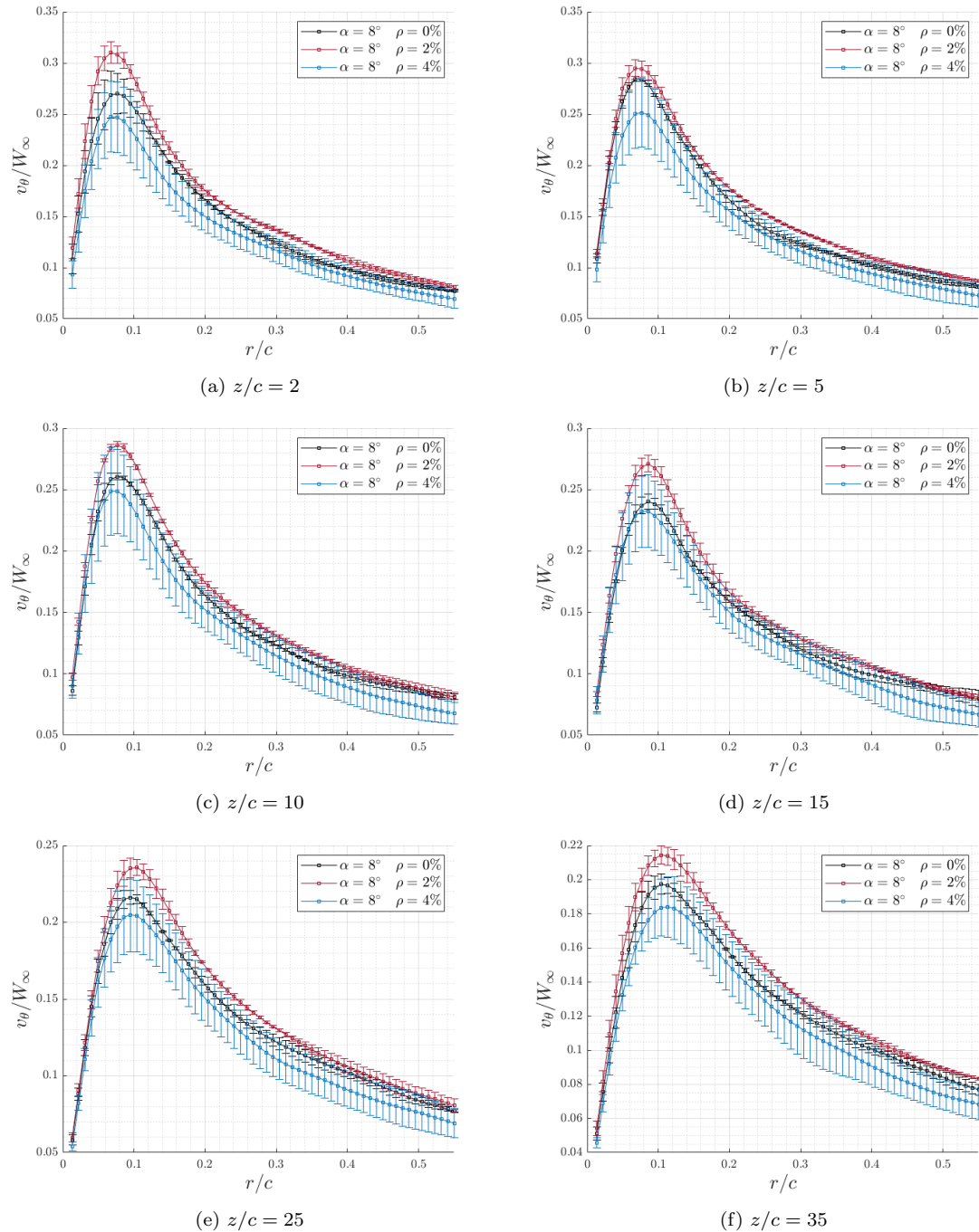


Figura 3.33: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 8^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$.

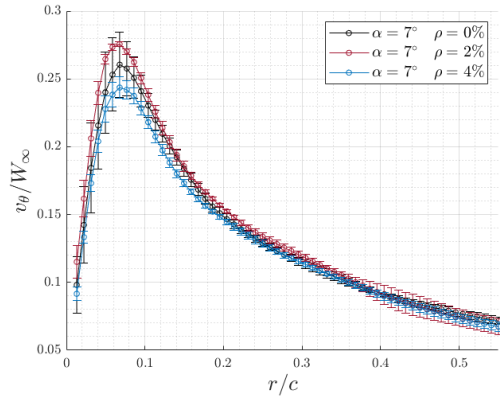
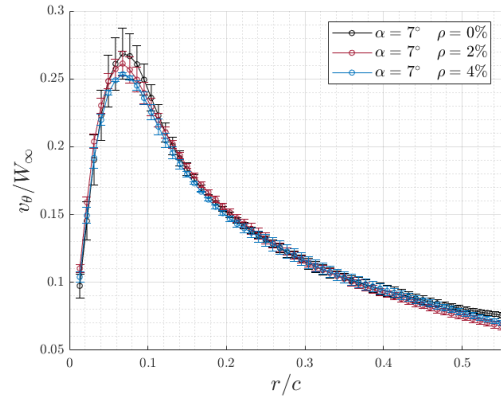
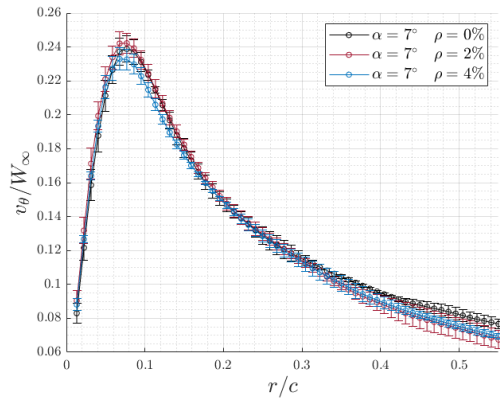
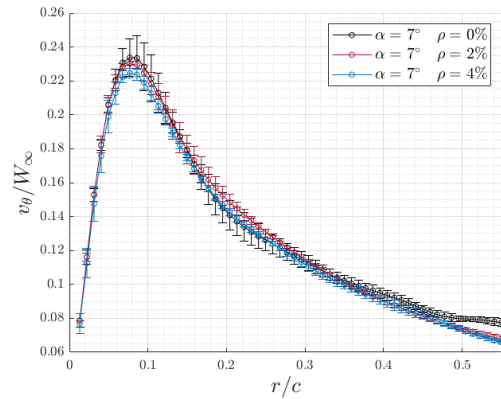
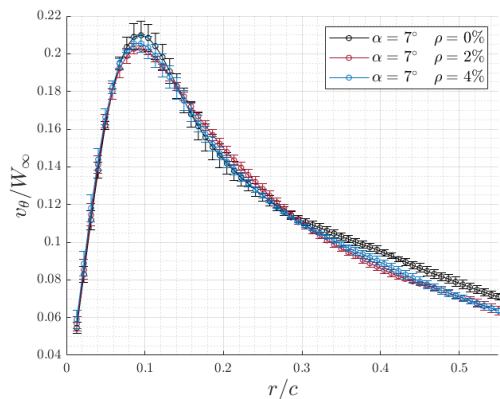
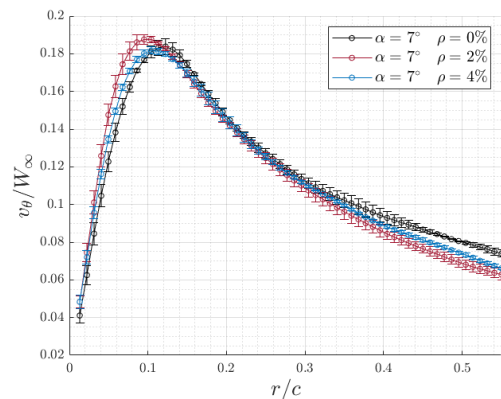
(a) $z/c = 2$ (b) $z/c = 5$ (c) $z/c = 10$ (d) $z/c = 15$ (e) $z/c = 25$ (f) $z/c = 35$

Figura 3.34: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c para $\alpha = 7^\circ$ para $\rho = 0\%$, $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$.

Para el caso del ángulo de ataque $\alpha = 7^\circ$, podemos ver en la figura 3.34 como la dependencia radial de las velocidades de giro son prácticamente iguales, independientemente de la deformación. Esto parece que ocurre a partir de $z/c=10$, aproximadamente. Para $z/c=2$ sí hay diferencias en $r/c=0.05$ entre los valores máximos, donde los valores para ala poco deformada vuelven a ser mayores que para ala no deformada, y estos, mayores que los de ala muy deformada. Sin embargo, tanto cerca del centro del vórtice como lejos, los valores son más parecidos. Sin embargo, lejos del centro del vórtice, para r/c grandes, y en el caso de ala no deformada los valores son ligeramente mayores, y a partir de aproximadamente $z/c=15$.

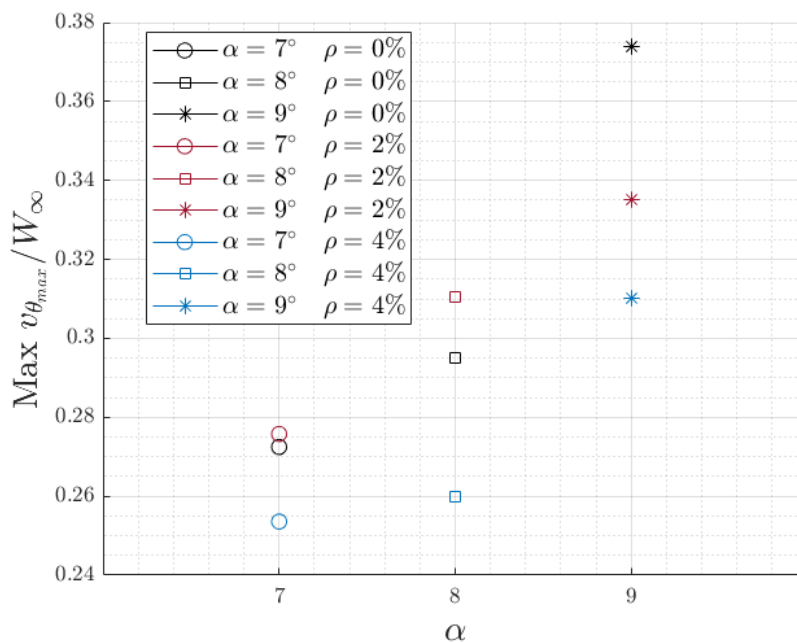


Figura 3.35: Máximo de la velocidad azimutal máxima adimensional frente a los distintos ángulos de ataque para todos los casos de deformación.

A continuación, compararemos todos los resultados máximos de la velocidad azimutal máxima adimensional en la figura 3.35. Los resultados muestran como conforme aumenta el ángulo de ataque, los valores máximos aumentan para los tres casos de deformación. El máximo de la velocidad azimutal máxima adimensional es mayor que el resto de valores para el caso de ala ligeramente deformada, para $\alpha = 7^\circ$ y 8° . Sin embargo, para 9° es mayor el máximo para ala no deformada, siguiéndole el máximo para $\rho = 2\%$, y con el valor menor, $\rho = 4\%$. Por tanto, el salto entre 8° y 9° para ala no deformada desde un valor de 0.295, hasta un valor de 0.375 es mayor que para el resto de casos. El salto para el ala ligeramente deformada va desde, aproximadamente, 0.31 hasta 0.335 y el salto para ala muy deformada va, aproximadamente, desde 0.26 hasta 0.31. Por eso, la tendencia de los vórtices a aumentar el máximo de su velocidad de giro máxima, es más leve para alas deformadas, en comparación con el ala no deformada. Además, podemos

decir que para deformaciones de $\rho = 4\%$, la disipación del vórtice es mayor, ya que las velocidades máximas son menores. Podemos inferir otro comportamiento y es que las tendencias de evolución del máximo de la velocidad azimutal de $\rho = 0\%$ y $\rho = 4\%$ son muy similares entre $\alpha = 7^\circ$ y $\alpha = 9^\circ$ ya que el crecimiento no es lineal. Sin embargo, para $\rho = 2\%$ sí parece que la subida es lineal.

Por otro lado, también podemos destacar, que no hay un patrón claro al incrementar la deformación, por lo que a pesar de haber un claro aumento conforme incrementamos el ángulo de ataque independientemente de la deformación, no sabemos darle una explicación física para el ala muy deformada, ya que lo esperable era que el máximo de la velocidad azimutal máxima estuviera por encima del caso de ala ligeramente deformada. El mecanismo físico que hay detrás de la deformación para explicar este cambio de tendencia no está claro y sería necesario realizar simulaciones numéricas para entender bien este detalle.

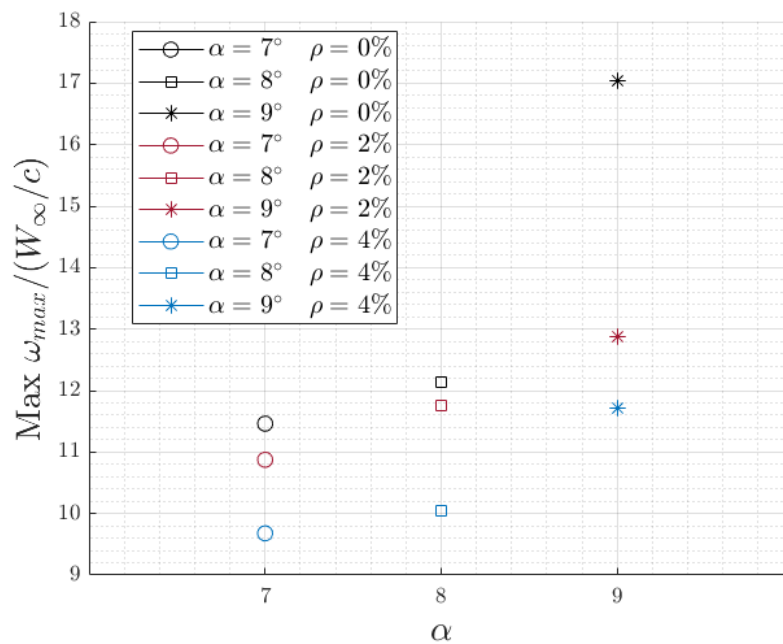


Figura 3.36: Máximo de la velocidad máxima adimensional frente a los distintos ángulos de ataque para todos los casos de deformación.

Para el caso de la figura 3.36, donde podemos ver una comparación de todos los máximos de la vorticidad adimensional máxima, podemos ver como conforme aumenta el ángulo de ataque, aumenta el valor máximo para los tres casos. Además, al disminuir la deformación, el valor del máximo aumenta. Por tanto, el máximo de la rotación local máxima es mayor al aumentar el ángulo de ataque y al disminuir la deformación del ala. Para el caso de ala no deformada ($\rho = 0\%$), el salto de 8° a 9° es mayor que para alas deformadas. Además, para ala deformada y ligeramente deformada, los valores se parecen más para ángulos 7° y 8° y hay más diferencia

con respecto a ala muy deformada, y para 9° la diferencia es mucho más notable para $\rho = 0\%$ y para $\rho = 2\%$, disminuyendo la diferencia de los valores para alas deformadas. Nuevamente podemos inferir otro comportamiento y es que las tendencias de evolución del máximo de la vorticidad máxima de $\rho = 0\%$ y $\rho = 4\%$ son muy similares entre $\alpha = 7^\circ$ y $\alpha = 9^\circ$ ya que el crecimiento no es lineal. Sin embargo, para $\rho = 2\%$ el incremento es claramente lineal.

Las conclusiones a las que podemos llegar son que conforme aumentamos el ángulo de ataque, la rotación local del vórtice aumenta, y también, se corrobora de la figura 3.36, que el vórtice se disipa más para $\rho = 4\%$. Además, en el caso de la vorticidad parece haber un patrón más claro, pero no se pueden llegar a conclusiones finales, ya que hemos observado una tendencia clara, pero no hay un mecanismo físico con el que le podamos dar una explicación.

3.3.1. Comparación de los parámetros teóricos

Para finalizar el trabajo, se ha estimado oportuno ajustar los experimentos a los parámetros teóricos de dos modelos (Batchelor [7] y Moore & Saffman [8]) para el caso de ángulo de ataque $\alpha = 9^\circ$, comparando la diferencia para los tres tipos de deformación que estamos estudiando en este trabajo.

Los parámetros teóricos que vamos a comparar son: S , b , n , z_{0B} y z_{0MS} [5], de los modelos teóricos de Batchelor y Moore& Saffman. El parámetro S es utilizado en el modelo de Batchelor, y es igual a la circulación adimensional, siendo su significado físico la intensidad del vórtice. Así como z_{0B} , que será el centro virtual del vórtice para el modelo teórico de Batchelor.

El valor de S se define como:

$$S = \frac{\Gamma_0}{2\pi c W_\infty}, \quad (3.1)$$

donde Γ_0 es la circulación, c la cuerda del ala y W_∞ es la velocidad característica del ala.

Por otro lado, los parámetros b y la potencia n son utilizados en el modelo teórico de Moore & Saffman, ambos parámetros relacionados con la circulación del vórtice. El parámetro z_{0MS} será el centro virtual del vórtice para el modelo de Moore & Saffman.

Con esto, se han utilizado los valores experimentales de la velocidad adimensional,

para obtener los parámetros que mejor ajustan los modelos teóricos a los valores experimentales a lo largo de z/c . Para esto, se han utilizado una serie de funciones implementadas por el departamento de Mecánica de Fluidos.

Para más información sobre los modelos de Batchelor y Moore & Saffman y sobre los orígenes virtuales, ver el artículo [5]. De forma resumida, lo que se hace es que los orígenes axiales se desplazan a los orígenes virtuales. La justificación física que se indica en el artículo mencionado es que el origen axial a lo largo de la corriente en estos dos modelos no está definido y depende del proceso de enrollamiento que hay detrás de la punta del ala. Al elegir los valores de z_{0B} y z_{0MS} , que mejor se ajustan a los modelos, se obtiene un ajuste mejor a los datos experimentales.

Para ver que los parámetros permiten un buen ajuste de los modelos, deben permanecer lo más constantes posibles a lo largo de z/c .

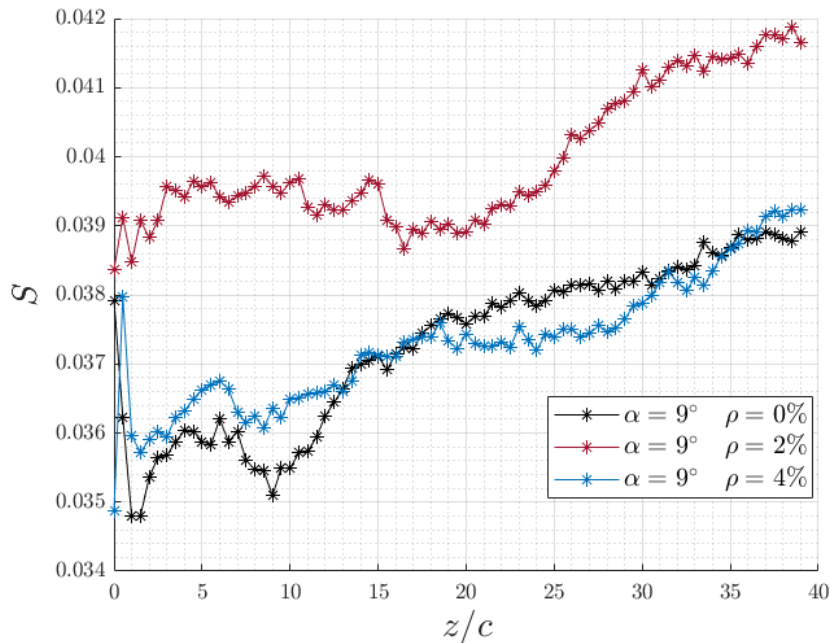


Figura 3.37: Parámetro S frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.

Representamos los valores de S frente a z/c en la figura 3.37. Observamos como los valores para ala ligeramente deformada son mayores que para ala no deformada y ala muy deformada, los cuales tienen un mayor parecido. El rango de valores en los que se mueven los valores de S a lo largo de z/c son aproximadamente: 0.0349-0.039 para $\rho = 0\%$; 0.0382-0.0419 para $\rho = 2\%$ y 0.0359-0.0392 para $\rho = 4\%$, por lo que podríamos decir que los valores se mantienen más o menos constantes a lo largo de z/c , con un error del orden de las milésimas (10^{-3}). Los valores para ala no deformada aumentan ligeramente más y no son tan estables en torno a un

valor, si los comparamos con los valores de las alas deformadas, que fluctúan pero se mantienen dentro de un rango ligeramente menor de fluctuaciones. Todo esto, dentro de su error. Cabe destacar que todo esto se está explicando para valores muy pequeños, como podemos ver en el eje y de la figura. Cabe destacar que estos valores de ala no deformada son muy parecidos a los publicados previamente [5], corroborando así la bondad de los experimentos realizados en este trabajo.

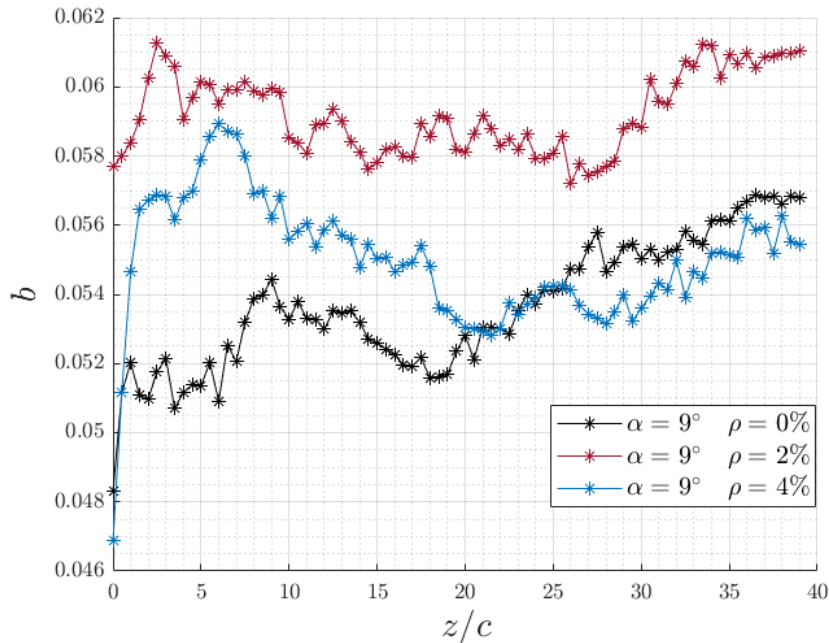


Figura 3.38: Parámetro b frente a z/c para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.

En la figura 3.38 representamos el valor de la intensidad del vórtice del modelo de Moore & Saffman b frente a la distancia axial adimensional z/c . Los valores para las alas deformadas son más constantes, mientras que para ala no deformada los valores son más inestables comparados con los otros dos casos. Conforme z/c aumenta, estos valores para $\rho = 0\%$ aumentan un poco, en comparación con los de deformación $\rho = 2\%$ y $\rho = 4\%$. Sin embargo, se pueden considerar constantes dentro de un error del orden de 10^{-3} . Por tanto, tenemos un valor medio constante de ala no deformada inferior, luego sube al ala poco deformada para bajar nuevamente al aumentar la deformación al valor original del ala no deformada. Como se ha comentado, no hay una explicación física para esta tendencia de subida y bajada del valor medio de b .

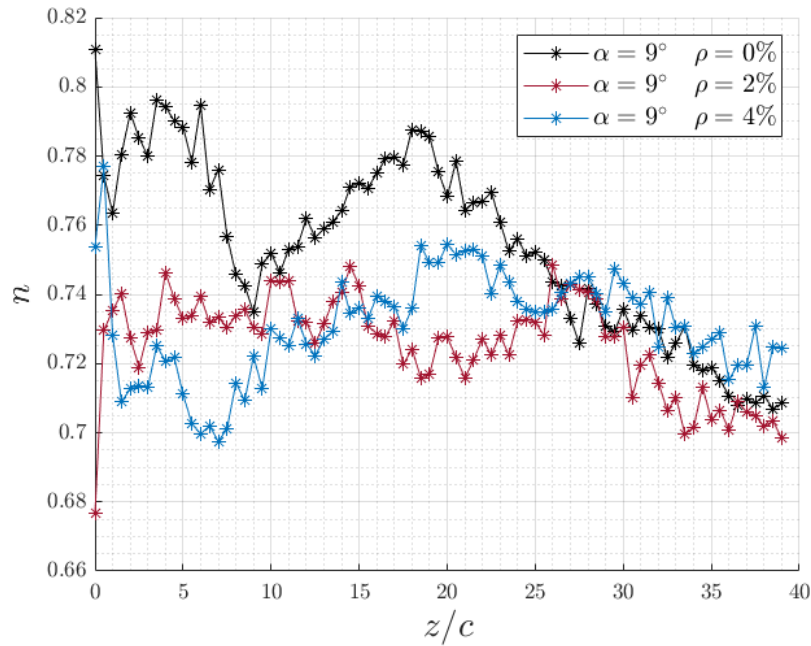
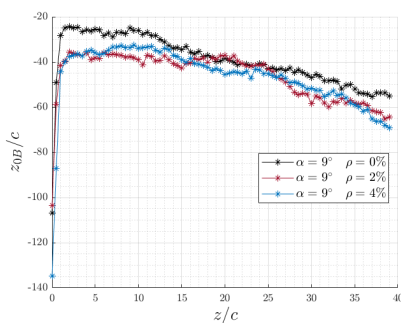
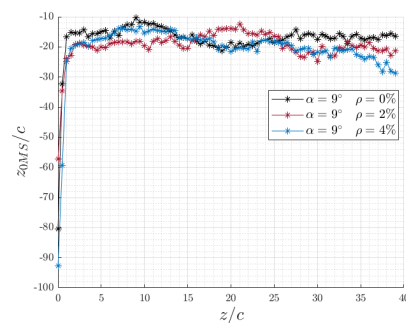


Figura 3.39: Parámetro n frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y para todas las deformaciones.

Si nos fijamos en el valor de n frente a z/c representado en la figura 3.39, podemos ver como para el valor medio de n de alas deformadas y no deformadas podemos decir que oscilan en torno a un valor de $n=0.735$ independientemente de la deformación. Esto quiere decir que el decaimiento radial de la velocidad azimutal es prácticamente idéntico para un valor de $\alpha = 9^\circ$, tal y como se puede observar para grandes r/c y cualquier z/c en la figura 3.32.



(a)



(b)

Figura 3.40: Parámetros z_{0B} (a) y z_{0MS} (b) frente a z adimensional para $\alpha = 9^\circ$ y todas las deformaciones.

En la figura 3.40 (a) podemos ver como el origen virtual de Batchelor decrece para los tres casos, pero estos tres casos son similares, siendo algo mayores para ala no deformada. Mientras tanto, en la figura (b), los parámetros del origen virtual de

Moore & Saffman son más similares entre sí y no disminuyen. Por esto, parece que el modelo de Moore & Saffman tiene un mejor ajuste con respecto al origen virtual. El hecho de que los valores de Batchelor sean mayores a los de Moore & Saffman validan el buen ajuste de los modelos [5].

Finalmente, vamos a ver el ajuste de los modelos experimentales a la velocidad azimutal adimensional frente a r/c para distintas cuerdas. Como podemos ver, en la figura 3.41 para $\alpha = 9\%$ $\rho = 0\%$, para todas las z/c representadas, el modelo de Moore&Saffman se ajusta mejor a lo largo de todo r/c , mientras que el de Batchelor se ajusta bien cerca del centro del vórtice, pero antes de llegar al máximo hay una diferencia más notable entre el ajuste y los valores experimentales de la velocidad azimutal adimensional, y esta diferencia empieza a notarse más conforme z/c aumenta. Por tanto, conforme aumenta z/c el modelo de Batchelor se ajusta peor también para valores de r/c pequeños, es decir, cerca del centro del vórtice.

Como podemos ver, en la figura 3.41 para $\alpha = 9\%$ $\rho = 0\%$, para todas las z/c representadas, el modelo de Moore & Saffman se ajusta mejor a lo largo de todo r/c , mientras que el de Batchelor se ajusta bien cerca del centro del vórtice, pero antes de llegar al máximo hay una diferencia más notable entre el ajuste y los valores experimentales de la velocidad azimutal adimensional, y esta diferencia empieza a notarse más conforme z/c aumenta. Por tanto, conforme aumenta z/c el modelo de Batchelor se ajusta peor también para valores de r/c pequeños, es decir, cerca del centro del vórtice.

Seguidamente, en la figura 3.42, si la comparamos con la figura 3.41, podemos ver como el modelo de Batchelor se ajusta peor para ala con deformación $\rho = 2\%$, a lo largo de todo r/c . La diferencia entre el ajuste de Batchelor y los valores experimentales, también se nota ligeramente antes de alcanzar el máximo de \bar{v}_θ , para valores más cercanos al vórtice.

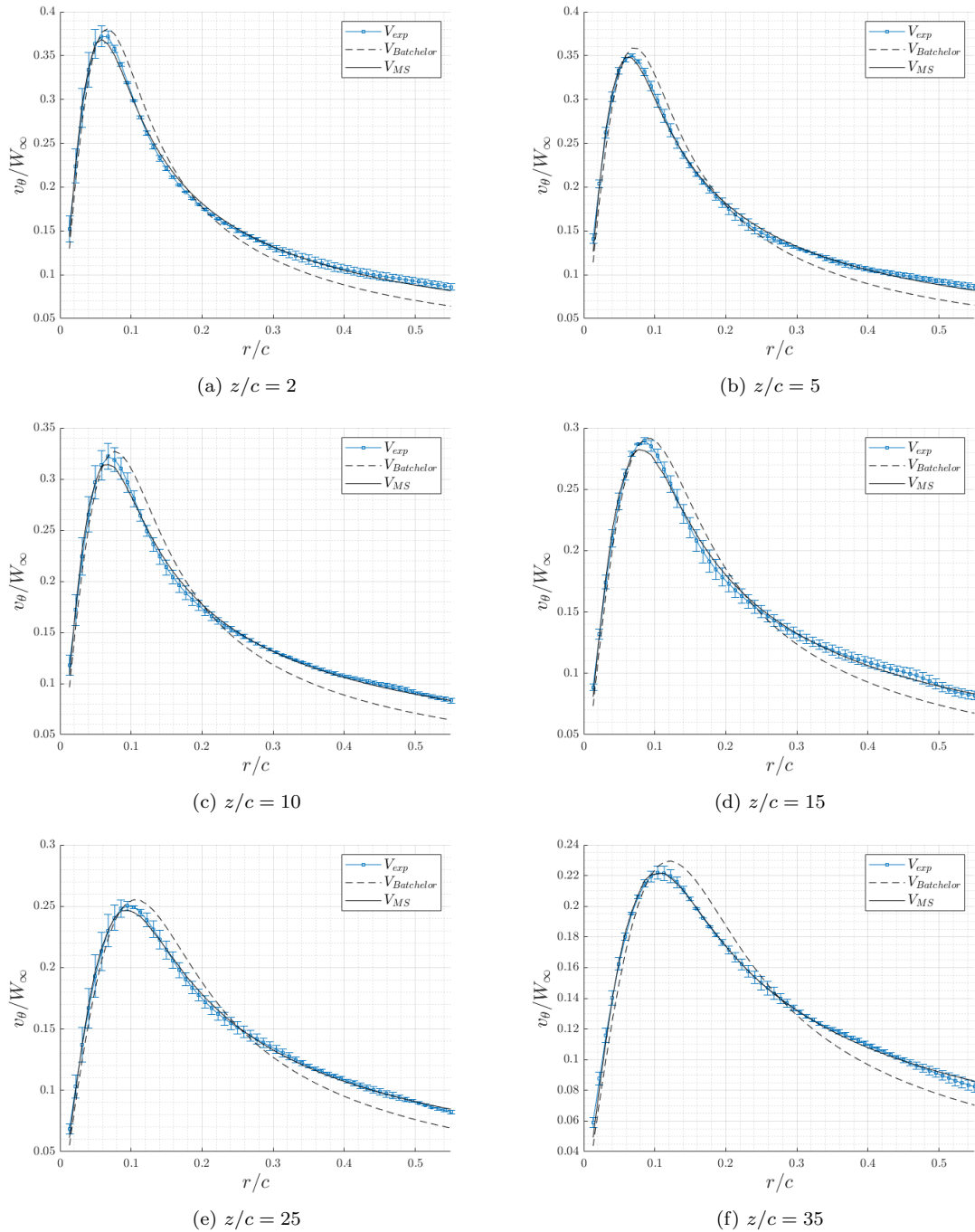


Figura 3.41: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 0\%$.

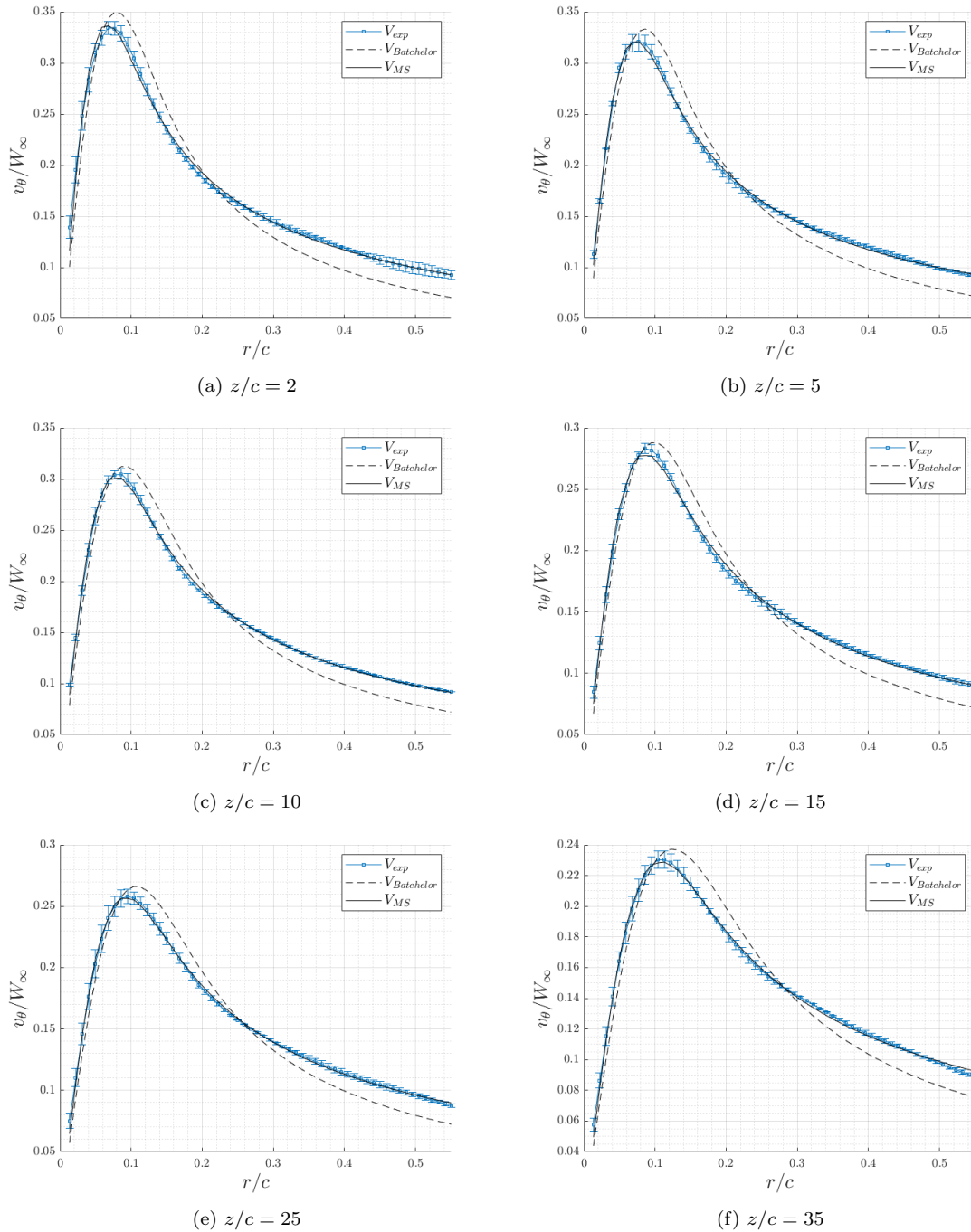


Figura 3.42: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 2\%$.

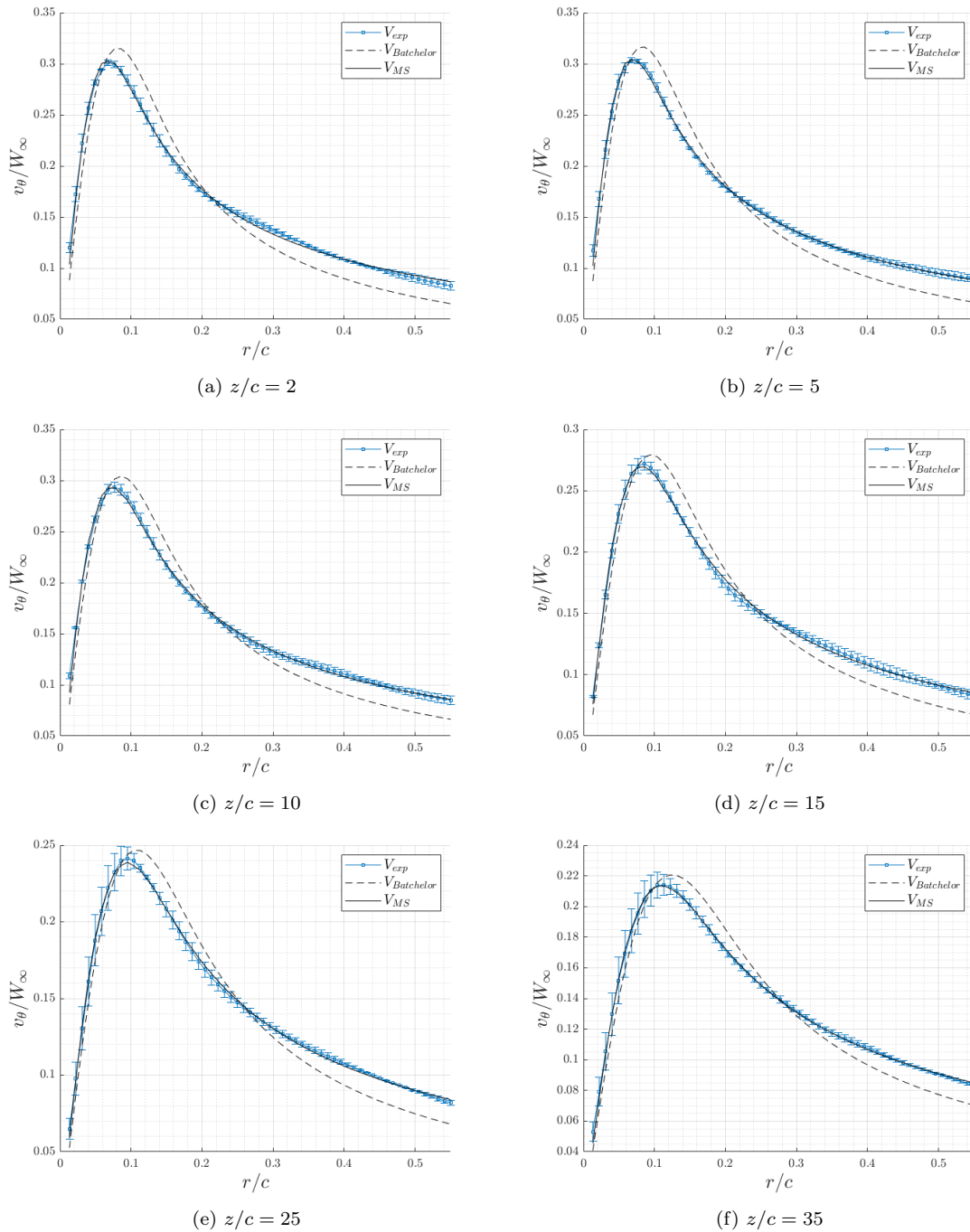


Figura 3.43: Velocidad azimutal adimensional frente al radio adimensional para distintas z/c comparando con los modelos teóricos para $\alpha = 9^\circ$ para la deformación $\rho = 4\%$.

Finalmente, podemos ver como en la figura 3.43 el modelo de Batchelor para ala muy deformada ($\rho = 4\%$), también se ajusta peor en comparación con el ala no deformada. Por esto, podemos decir que el modelo de Batchelor parece que se ajusta mejor para ala no deformada que para los dos casos de ala deformada, sobretodo



para cuerdas pequeñas. Sin embargo, el modelo de Moore & Saffman en ambos casos de ala deformada tiene un ajuste excelente para cualquier grado de deformación.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajos futuros

4.1. Principales conclusiones del trabajo

En este trabajo, se ha comparado la influencia en los vórtices producidos en el extremo de un modelo de ala con un perfil NACA0012 de dos variables: el ángulo de ataque y la deformación a lo largo de la envergadura en el modelo del ala. Todo ello para un número de Reynolds constante e igual a 3×10^4 . Los ángulos de ataque que se han comparado han sido $\alpha = 7^\circ$, 8° y 9° . Además, las deformaciones en el extremo del ala que se han comparado son un porcentaje del valor de la envergadura (200 mm), esto es, sin deformación ($\rho = 0\%$), y con deformación pequeña o grande (2% y 4%). La técnica usada ha sido PIV en dos dimensiones gracias a la cual se ha conocido tanto el campo de velocidad del torbellino de punta de ala como otras variables muy usadas en aerodinámica como son la vorticidad o la circulación.

Primeramente, hemos comparado la influencia del ángulo de ataque para distintas deformaciones. Los resultados muestran como los valores de velocidad azimutal máxima adimensional aumentan conforme aumentamos el ángulo de ataque, independientemente de la deformación. Podemos inferir otro comportamiento y es que las tendencias de evolución del máximo de la velocidad azimutal de $\rho = 0\%$ y $\rho = 4\%$ son muy similares entre $\alpha = 7^\circ$ y $\alpha = 9^\circ$ ya que el crecimiento no es lineal. Sin embargo, para $\rho = 2\%$ el incremento del máximo de todos los z/c de la velocidad máxima azimutal frente al ángulo de ataque sí es lineal.

En cuanto al radio donde se produce el máximo de la velocidad azimutal máxima, podemos afirmar que en todos los casos de estudio los vórtices se expanden conforme aumenta la distancia axial, independientemente de su deformación, por lo que en todos los casos presentan un comportamiento parecido de expansión radial debido a la difusión viscosa. La deformación no parece alterar ese mecanismo de

expansión radial porque los valores finales de r_{max}/c son cercanos a 0.11 en $z/c=39$ independientemente de la deformación y el ángulo de ataque, ver figura 3.23.

Por otro lado, hemos podido observar, que la circulación media adimensional presenta valores prácticamente constantes, ya que el intervalo en el que fluctúan sus valores son intervalos pequeños, del orden de 10^{-3} . Además, este valor aumenta conforme aumentamos el ángulo de ataque, independientemente de la deformación.

Seguidamente, podemos decir que la vorticidad máxima adimensional aumenta conforme aumentamos el ángulo de ataque, por lo que la rotación local del vórtice aumentará conforme aumentamos el ángulo. Este aumento es insignificante entre 7 y 8 grados para un modelo sin deformación o alta deformación.

En cuanto al ángulo de ataque, por tanto, podemos confirmar que su aumento tiende a aumentar las variables del vórtice en términos de velocidad acimutal y vorticidad máximas. Sin embargo, a la hora de comparar la deformación y aumento de la misma, no hemos podido observar una tendencia clara en la velocidad azimutal máxima porque no hay un mecanismo físico con el que podamos explicar el comportamiento que hemos observado, es decir, valores bajos sin deformación, altos a deformaciones intermedias y muy bajos de nuevo con un alta deformación conforme aumenta el ángulo de ataque. Lo que sí confirmamos es que para altas deformaciones del 4%, el vórtice ha tenido tanto las velocidades azimutales máximas como vorticidades máximas menores en comparación a los otros dos casos de deformación, véase en las figuras 3.35 y 3.36.

En cuanto al ajuste de los modelos teóricos de Batchelor y de Moore & Saffman a los valores de velocidad azimutal adimensional, para el caso de ángulo de ataque 9° , hemos podido observar como los parámetros teóricos S , b y n a lo largo de z/c se mantienen prácticamente constantes. Por otro lado, para el caso del origen virtual para el modelo de Batchelor (z_{0B}), hemos podido ver como para z/c grandes este valor crecía para las tres deformaciones, siendo un valor bastante parecido para las tres deformaciones, y ligeramente mayor al resto para ala rígida. Sin embargo, para el origen virtual para el modelo de Moore & Saffman, z_{0MS} hemos podido ver como para los tres casos de deformación, los valores se han mantenido más constantes que en el caso del modelo de Batchelor.

Con todo esto, hemos podido observar como el modelo de Moore & Saffman se ajusta mejor a lo largo de z/c y para todo r/c , independientemente de la deformación. El modelo de Batchelor se ajusta bien para valores de r/c bastante pequeños y cerca del centro del vórtice (máxima velocidad azimutal), pero conforme aumentamos la distancia axial z/c esa diferencia se hace mayor. Además, para el modelo de Batchelor, conforme aumentamos z/c el modelo se ajusta peor a los valores de velocidad azimutal experimental. Por otro lado, para ala deformadas, podemos ver como el modelo de Batchelor se ajusta peor, sobre todo para cuerdas

pequeñas.

4.2. Trabajos futuros

Una vez que se ha realizado con éxito el Trabajo de fin de Grado, sería necesario realizar estos trabajos futuros:

1. Realizar un análisis en más detalle para distintos números de Reynolds con el que se han realizado los experimentos de este trabajo. Así, se podrían estudiar en el canal de arrastre no sólo $Re=30000$ sino también otros más bajos como $Re=10000$ ó 20000 para ver la influencia de la deformación con la velocidad de avance.
2. Realizar el mismo experimento que en este trabajo, comparando distintos ángulos de ataque y distintas deformaciones, pero realizando el PIV en 3D.
3. Ampliar los datos a números de Reynolds mayores y menores en otras instalaciones para ver la influencia del ángulo de ataque y de las tres deformaciones que se han utilizado en este trabajo.
4. Ampliar el rango de comparación de alas deformadas a deformaciones mayores del ala, por ejemplo de un $\rho = 8\%$.
5. Medir, simultáneamente al PIV 2D ó 3D, la fuerza mediante un sensor para así conocer los coeficientes de arrastre y sustentación.



Bibliografía

- [1] C. Willert, M. Schulze, S. Waltenspül, D. Schanz, and J. Kompenhans. Prandtl's flow visualization film c1 revisited. In *13th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, pages 1–10, 2019.
- [2] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans. *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer, 2018.
- [3] J. Hermenegildo García-Ortiz, A. Domínguez-Vázquez, J.J. Serrano-Aguilera, L. Parras, and C. del Pino. A complementary numerical and experimental study of the influence of reynolds number on theoretical models for wingtip vortices. *Computers & Fluids*, 180:176 – 189, 2019.
- [4] P. Gutierrez-Castillo, M. Garrido-Martin, T. Bölle, J. H. García-Ortiz, J. Aguilar-Cabello, and C. del Pino. Higher order dynamic mode decomposition of an experimental trailing vortex. *Physics of Fluids*, 34(10):107116, 10 2022.
- [5] C. del Pino, L. Parras, M. Felli, and R. Fernandez-Feria. Structure of trailing vortices: Comparison between particle image velocimetry measurements and theoretical models. *Physics of Fluids*, 23:013602, 2011.
- [6] C. del Pino, J. M. López-Alonso, L. Parras, and R. Fernandez-Feria. Dynamics of the wing-tip vortex in the near field of a NACA 0012 airfoil. *The Aeronautical Journal*, 115:1166, 2011.
- [7] G.K. Batchelor. Axial flow in trailing line vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 20:645–658, 12 1964.
- [8] D.W. Moore and P.G. Saffman. Axial flow in laminar trailing vortices. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 33:491–508, 1973.
- [9] F. Afonso, J. Vale, D. Oliveira, F. Lau, and A. Suleman. A review on non-linear aeroelasticity of high aspect-ratio wings. *Progress in Aerospace Sciences*, 89:40–57, 2017.

- [10] M Zhong, S. Zheng, G. Wang, J. Hua, and R. Gebbink. Correlation analysis of combined and separated effects of wing deformation and support system in the CAE-AVM study. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(3):429–438, 2018.
- [11] Ronald J. Adrian. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 39:159–169, 2005.
- [12] J. Westerweel. *Digital particle image velocimetry: Theory and application*. Delft University Press, 1995.
- [13] P. Meunier and T. Leweke. Analysis and treatment of errors due to high velocity gradients in particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 35:408–421, 2003.
- [14] J. Aguilar-Cabello, L. Parras, and C. del Pino. DPIVSoft-OpenCL: A Multicore CPU-GPU Accelerated Open Source Code for 2D Particle Image Velocimetry. *Software X*, online, 2022.
- [15] J. H. García-Ortiz, A. Domínguez-Vázquez, J. J. Serrano-Aguilera, L. Parras, and C. del Pino. A complementary numerical and experimental study of the influence of Reynolds number on theoretical models for wingtip vortices. *Computers and Fluids*, 180:176–189, 2019.
- [16] J. H. García-Ortiz, F. J. Blanco-Rodríguez, L. Parras, and C. del Pino. Experimental observations of the effects of spanwise blowing on the wingtip vortex evolution at low Reynolds numbers. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 80:133–145, 2020.
- [17] P. Solís. *Análisis experimental mediante PIV2D de vórtices en estelas de modelos de alas deformadas*. Trabajo fin de máster, Universidad de Málaga, 2023.
- [18] A. Jiménez. *Estudio experimental sobre la influencia de la relación entre la cuerda y la envergadura de un perfil aerodinámico en los vórtices de estela de ala*. Trabajo fin de grado, Universidad de Málaga, 2018.
- [19] R. Fernández Feria and J. Ortega Casanova. *Mecánica de fluidos: Notas de clase*. 2019.