



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ADVECCIÓN Y DIFUSIÓN DE UNA SUSTANCIA ESCALAR PASIVA EN LA ESTELA DE  
UNA PLACA PLANA BAJO FORZAMIENTO EXTERNO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**LUIS EDUARDO TAPIA DELLA ROSA**

**PROFESOR GUÍA:**

**RODRIGO HERNÁNDEZ PELLICER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**ÁLVARO VALENCIA MUSALEM**

**JUAN CARLOS ELICER CORTÉS.**

**SANTIAGO DE CHILE**

**MAYO 2009**

RESUMEN EJECUTIVO

POR: LUIS TAPIA D.

FECHA: 05/05/2009

PROF. GUÍA: Sr. RODRIGO HERNÁNDEZ P.

## “ADVECCIÓN Y DIFUSIÓN DE UNA SUSTANCIA ESCALAR PASIVA EN LA ESTELA DE UNA PLACA PLANA BAJO FORZAMIENTO EXTERNO”

El objetivo general del presente trabajo de título es estudiar a través de datos experimentales y simulaciones numéricas, la dinámica de la estela generada por un perfil plano y su interacción con un escalar pasivo. Este trabajo de título se enmarca en el proyecto Fondecyt N° 1085020.

Se construyó la geometría en base a un sistema perfil plano - alerón, compuesto por una placa plana y un alerón de acuerdo a estudios experimentales realizados en el laboratorio LEAF-NL. Las simulaciones se realizaron utilizando un modelo laminar con el software Fluent v6.3.

La validación de resultados consistió en comparar los siguientes aspectos con resultados experimentales: (i) Perfiles de velocidad de estelas sin forzamiento a diferentes números de Reynolds. (ii) Perfiles de velocidad para un forzamiento sinusoidal variando la frecuencia de forzamiento. Y (iii) contornos de fluctuación de energía cinética de la estela a diferentes frecuencias.

Luego se estudió la evolución temporal de los perfiles de velocidad para frecuencias características. Se calculó la fuerza de arrastre para distintas frecuencias de forzamiento. Se estudió la dependencia del ancho de la estela con la distancia aguas abajo del alerón. Y se realizaron simulaciones numéricas incorporando la inyección de una sustancia escalar pasiva para configuraciones de estelas anteriormente simuladas, con el objetivo de determinar el efecto de la estela en la advección y difusión de la sustancia escalar.

Del proceso de validación se concluyó que las simulaciones numéricas para estelas sin forzamiento se ajustan con datos experimentales. Para el caso con alerón forzado sinusoidalmente, se encontró la presencia de una frecuencia de resonancia  $f_r$  que aumenta el ancho de la estela y la velocidad media del perfil. Con casos forzados se obtuvo similar comportamiento al experimental, pero a frecuencias un tanto menores.

Se obtuvo que la fuerza de arrastre presenta un mínimo para  $f_r$  cuando es calculada según la teoría de perfil delgado. Y presenta dos mínimos, incluido  $f_r$ , si es calculado a partir de los esfuerzos de corte ejercidos en la superficie del alerón. Por otro lado, el ancho de la estela aguas abajo depende de la frecuencia de forzamiento, mostrando un comportamiento creciente. De las simulaciones con interacción de escalar pasivo se concluyó que la estela transporta escalar aguas abajo en el flujo manteniendo la mayor parte de este dentro de los límites de la estela. Y el medio de transporte utilizado son las estructuras de vorticidad generadas por el movimiento oscilante del alerón, las cuales en su generación adquieren escalar y lo transportan aguas abajo.

## **Agradecimientos**

En estas líneas quisiera agradecer a todas las personas que durante mis estudios y en el presente trabajo me ayudaron a salir adelante:

A mis padres y mi hermana por estar siempre a mi lado y apoyarme en mi vida.

Al profesor Rodrigo Hernández por la oportunidad de realizar el presente trabajo y darme la ayuda necesaria durante el desarrollo de la memoria.

A los profesores Álvaro Valencia y Juan Carlos Elicer por aportar con consejos y críticas durante la realización de este trabajo.

A mis amigos de siempre y los que se han agregado durante los años de universidad, quienes siempre me apoyaron cuando lo necesite.

A las personas que conforman el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Al proyecto Fondecyt N° 1085020, por el apoyo en este trabajo.

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes generales . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivos generales . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
1.4. Metodología . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes teóricos . . . . .	4
2.1.1. Ecuaciones para fluidos . . . . .	4
2.1.2. Caracterización de flujo . . . . .	5
2.1.3. Flujo en placa plana . . . . .	5
2.1.4. Flujo en la estela de una placa plana . . . . .	8
2.1.5. Fuerza de arrastre sobre un cuerpo . . . . .	9
2.1.6. Caracterización de sustancia escalar pasiva . . . . .	11
2.1.7. Concepto de vorticidad . . . . .	12
2.2. Estudios experimentales . . . . .	13
2.2.1. Estudio experimental base . . . . .	14
2.3. Métodos numéricos . . . . .	17
2.3.1. Formulación por volúmenes de control . . . . .	17
2.3.2. Discretización de ecuaciones de Navier - Stokes . . . . .	18
2.3.3. Algoritmo SIMPLE . . . . .	20
2.4. Algoritmo resolutivo . . . . .	21
2.5. Concentración y masa de sustancia escalar pasiva . . . . .	22
<b>3. Simulación numérica de estelas</b>	<b>24</b>
3.1. Geometría . . . . .	24
3.2. Mallado . . . . .	25
3.3. Condiciones de borde . . . . .	25

3.4.	Rango de variables . . . . .	27
3.5.	Parámetros de simulacion . . . . .	27
3.5.1.	Propiedades físicas del fluido . . . . .	28
3.5.2.	Propiedades físicas de sustancia escalar pasiva . . . . .	28
3.5.3.	Parámetros del solver . . . . .	28
3.5.4.	Interacción malla - paredes móviles . . . . .	29
<b>4.</b>	<b>Validación de resultados</b>	<b>30</b>
4.1.	Dimensiones de volumen de control . . . . .	30
4.2.	Tiempo de estabilización para estelas sin forzamiento . . . . .	31
4.3.	Pruebas de malla . . . . .	31
4.4.	Pruebas de paso de tiempo . . . . .	34
4.5.	Estelas sin forzamiento . . . . .	37
4.6.	Estelas en régimen forzado . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>46</b>
5.1.	Estelas bajo régimen forzado . . . . .	46
5.2.	Fuerza de arrastre . . . . .	47
5.3.	Ancho de la estela aguas abajo . . . . .	50
5.4.	Simulaciones numéricas con sustancia escalar pasiva . . . . .	54
5.4.1.	Caso N°1: Inyección de escalar en la mitad inferior de la sección de entrada . . . . .	55
5.4.2.	Caso N°2: Inyección de escalar en el borde de salida del alerón . . . . .	60
5.4.3.	Caso N°3: Inyección de escalar en los bordes laterales del alerón . . . . .	65
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>
<b>A.</b>	<b>Anexos</b>	<b>I</b>
A.1.	Visualización de estelas . . . . .	I
A.2.	Condición de pared móvil del alerón . . . . .	VIII
A.2.1.	Código UDF . . . . .	VIII
A.2.2.	Configuración en Fluent para movimiento oscilatorio del alerón . . . . .	VIII
A.3.	Inyección de sustancia escalar pasiva . . . . .	IX
A.3.1.	Códigos UDF . . . . .	IX
A.3.2.	Configuración en Fluent para inyección de sustancia escalar . . . . .	XI

# Índice de figuras

2.1. Esquema representativo de la capa límite alrededor de un perfil plano sometido a un flujo uniforme $U_\infty$ . . . . .	5
2.2. Esquema evolución del espesor de la capa límite en un perfil plano. . . . .	6
2.3. Esquema evolución del perfil de velocidad sobre una placa plana y aguas abajo. . . . .	9
2.4. Esquema representativo fuerza fluido dinámica sobre un cuerpo. $F_R$ : Fuerza fluido dinámica; $F_L$ : Fuerza de sustentación (Lift); $F_D$ : Fuerza de arrastre (Drag). . . . .	9
2.5. Placa plana perpendicular al flujo, donde la fuerza de arrastre por presión predomina sobre la fuerza por fricción. . . . .	10
2.6. Placa plana paralela al flujo, donde la fuerza de arrastre por fricción predomina sobre la fuerza por presión. . . . .	10
2.7. Sistema placa plana-alerón experimental: (1) placa fija, (2) alerón, (3) y (4) perfiles laterales, (5) rodamiento, (6) arco utilizado en el sistema de forzamiento. . . . .	15
2.8. Perfiles de velocidad $U(y)$ para el alerón en posición horizontal fijo para distintos números de Reynolds $Re_e$ : $\diamond$ , 54,6; *, 82,3; $\circ$ , 109,3; $\square$ , 151,2; $\Delta$ , 181,2. . . . .	16
2.9. Contorno de iso-fluctuaciones de energía cinética para un rango de frecuencias de forzamiento de 1 a 50 [Hz] y un número de Reynolds $Re_e=83,2$ . . . . .	17
2.10. Volumen de control para un punto de $P$ de la malla, con nodos vecinos $N, S, W, E, T$ y $B$ . . . . .	18
2.11. Esquema funcionamiento simulación numérica. . . . .	22
2.12. a) Celda de medición de sustancia escalar (rojo) con diferentes concentraciones; b) Celda equivalente donde la masa de escalar se encuentra en un volumen fijo con concentración $c = 1$ . . . . .	23
3.1. Geometría de simulación. Dimensiones: $H = 100$ [mm], $W = 220$ [mm], $L = 330$ [mm], $a = 54$ [mm], $b = 30,4$ [mm], $c = 121$ [mm] y $e = 1,65$ [mm]. . . . .	24
3.2. Esquema representativo de mallado. Dimensiones de elementos de la malla: $p_x = 1,0$ e; $p_y = 0,25$ e; $p_z = 2,0$ e; tasa de crecimiento $r=1,095$ . . . . .	25
3.3. Esquema condiciones de borde: Cara 1: velocidad de entrada uniforme; Cara 2: presión atmosférica externa; Caras 3,4,5 y 6: condición de pared; Placa: condición de pared; Alerón: condición de pared móvil. . . . .	27

3.4. Esquema en 2D de deformación de la malla para distintas posiciones de alerón: a) posición central del alerón; b) alerón en desplazamiento máximo superior; c) alerón en desplazamiento máximo inferior. . . . .	29
4.1. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ , para diferentes volúmenes de control variando la altura H: $\circ$ , 50 [mm]; $\bullet$ , 80 [mm]; $*$ , 100 [mm]. Número de Reynolds $Re_e = 183$ . . . . .	30
4.2. Gráfico diferencias de velocidad cada un segundo para $Re_e = 183$ . . . . .	31
4.3. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 10$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\circ$ malla 1; $\bullet$ malla 2; $\triangleright$ malla 3. . . . .	33
4.4. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 10$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\triangleright$ malla 3; $\square$ malla 4; $\triangleleft$ malla 5. . . . .	33
4.5. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 20$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\circ$ malla 1; $\bullet$ malla 2; $\triangleright$ malla 3. . . . .	33
4.6. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 20$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\triangleright$ malla 3; $\square$ malla 4; $\triangleleft$ malla 5. . . . .	33
4.7. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 30$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\circ$ malla 1; $\bullet$ malla 2; $\triangleright$ malla 3. . . . .	33
4.8. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 30$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\triangleright$ malla 3; $\square$ malla 4; $\triangleleft$ malla 5. . . . .	33
4.9. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 40$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\circ$ malla 1; $\bullet$ malla 2; $\triangleright$ malla 3. . . . .	34
4.10. Perfil de velocidad $U(y)$ para alerón en posición horizontal fija a $x/e = 40$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\triangleright$ malla 3; $\square$ malla 4; $\triangleleft$ malla 5. . . . .	34
4.11. Gráfico de velocidad en (30.3e, 0) para $f_r=25$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\bullet$ : $p_{t1} = 0.0004$ [s], $\circ$ : $p_{t2} = 0.00025$ [s]; $\square$ : $p_{t3} = 0.00016$ [s]. . . . .	35
4.12. Gráfico de velocidad en (30.3e, 3e) para $f_r=25$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\bullet$ : $p_{t1} = 0,0004$ [s], $\circ$ : $p_{t2} = 0,00025$ [s]; $\square$ : $p_{t3} = 0,00016$ [s]. . . . .	36
4.13. Perfil de velocidad medio $U(y)$ para $f_r=25$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\bullet$ : $p_{t1} = 0,0004$ [s], $\circ$ : $p_{t2} = 0,00025$ [s]; $\square$ : $p_{t3} = 0,00016$ [s]. . . . .	36
4.14. Esquema zona de registro de datos para estelas sin forzamiento. . . . .	37
4.15. Perfiles de velocidad experimentales para alerón en posición horizontal fija y distintos números de Reynolds: $\diamond$ , 54; $*$ , 83; $\circ$ , 109; $\square$ , 154; $\triangle$ , 181. . . . .	37
4.16. Perfiles de velocidad simulados para alerón en posición horizontal fija y distintos números de Reynolds: $\diamond$ , 54; $*$ , 83; $\circ$ , 109; $\square$ , 154; $\triangle$ , 181. . . . .	37
4.17. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds $Re_e = 54$ . $\circ$ : Caso Experimental; $\bullet$ : Simulación . . . . .	38
4.18. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\circ$ : Caso Experimental; $\bullet$ : Simulación . . . . .	38
4.19. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds $Re_e = 109$ . $\circ$ : Caso Experimental; $\bullet$ : Simulación . . . . .	38

4.20. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds $Re_e = 151$ . $\circ$ : Caso Experimental; $\bullet$ : Simulación . . . . .	38
4.21. Perfil de velocidad normalizado por $U_\infty$ para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds $Re_e = 181$ . $\circ$ : Caso Experimental; $\bullet$ : Simulación . . . . .	39
4.22. Relación entre el ancho de la estela con el número de $Re_e$ a $x/e=30,3$ : $\circ$ : Caso experimental, $\triangleleft$ : Simulación. . . . .	40
4.23. Perfiles de velocidad experimentales normalizando el eje coordenado por $\delta(Re_L)$ para números de Reynolds: $\diamond$ , 54; *, 83; $\circ$ , 109; $\square$ , 154; $\triangle$ , 181. . . . .	40
4.24. Perfiles de velocidad simulados numéricamente normalizando el eje coordenado por $\delta(Re_L)$ para números de Reynolds: $\diamond$ , 54; *, 83; $\circ$ , 109; $\square$ , 154; $\triangle$ , 181. . . . .	40
4.25. Perfiles de velocidad $U(y)$ experimentales para distintas frecuencias de forzamiento $f_0$ : *, 1 [Hz]; $\circ$ , 18 [Hz]; $\square$ , 25 [Hz]; $\triangleleft$ , 33 [Hz]; $\triangleright$ , 44 [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	41
4.26. Perfiles de velocidad $U(y)$ de simulaciones para distintas frecuencias de forzamiento $f_0$ : *, 2 [Hz]; $\circ$ , 10 [Hz]; $\square$ , 20 [Hz]; $\triangleleft$ , 33.33 [Hz]; $\triangleright$ , 40 [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	41
4.27. Perfiles de velocidad $U(y)_{rms}/U_0$ experimentales para distintas frecuencias de forzamiento $f_0$ : *, 1 [Hz]; $\circ$ , 18 [Hz]; $\square$ , 25 [Hz]; $\triangleleft$ , 33 [Hz]; $\triangleright$ , 44 [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	42
4.28. Perfiles de velocidad $U(y)_{rms}/U_0$ de simulaciones para distintas frecuencias de forzamiento $f_0$ : *, 2 [Hz]; $\circ$ , 10 [Hz]; $\square$ , 20 [Hz]; $\triangleleft$ , 33.33 [Hz]; $\triangleright$ , 40 [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	42
4.29. Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso experimental, en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ y el eje vertical normalizado $y/e$ . Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	43
4.30. Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso numérico, en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ y el eje vertical normalizado $y/e$ . Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	43
4.31. Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso experimental, en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ y el eje vertical normalizado $y/e$ . Número de Reynolds $Re_e=124$ . . . . .	43
4.32. Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso numérico, en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ y el eje vertical normalizado $y/e$ . Número de Reynolds $Re_e=124$ . . . . .	43
4.33. Contorno de iso-velocidad $U(y,t)$ normalizado por $U_0$ , caso experimental. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 25$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	45
4.34. Contorno de iso-velocidad $U(y,t)$ normalizado por $U_0$ , caso numérico. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	45



5.1.	Contorno de iso-velocidad $U(y,t)$ normalizado por $U_0$ . Frecuencia de forzamiento $f_0 = 10$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	47
5.2.	Contorno de iso-velocidad $U(y,t)$ normalizado por $U_0$ . Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	47
5.3.	Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento $D/D_0$ en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ calculada con diferentes distancias aguas abajo: $\circ$ : $0.97 e$ ; $\bullet$ : $4.90 e$ ; $\square$ : $10.06 e$ ; $\triangleright$ : $20.06 e$ ; $\triangleleft$ : $30.36 e$ ; $+$ : $40.06 e$ . Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	48
5.4.	Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento $D/D_0$ en función de la frecuencia de forzamiento calculada a $x/e = 30,3$ : $\square$ , $Re_e = 83$ ; $\circ$ , $Re_e = 124$ . . . . .	49
5.5.	Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento $D/D_0$ , en función de la frecuencia de forzamiento $f_0$ : $\square$ , $Re_e = 83$ . . . . .	50
5.6.	Esquema zona de registro de datos (en color azul) para la dependencia del ancho de la estela con la distancia aguas abajo. . . . .	50
5.7.	Representación en 2D de perfiles de velocidad aguas abajo en el flujo. . . . .	51
5.8.	Ancho de la estela normalizada por el espesor $e$ en función de la distancia aguas abajo $x$ , tomada desde el borde de salida, normalizado por el largo del sistema placa plana - alerón $L$ . Para los casos: $\bullet$ , sin forzamiento; $+$ , $f_v = 10$ [hz]; $\circ$ , $f_r = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	52
5.9.	Ancho de la estela normalizada por el espesor $e$ en función de la distancia aguas abajo $x$ , tomada desde el borde de salida, normalizado por el largo del sistema placa plana - alerón $L$ . Para el caso alerón sin forzamiento y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	53
5.10.	Ancho de la estela normalizada por el espesor $e$ en función de la distancia aguas abajo $x$ . Para el caso $f_v = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	53
5.11.	Ancho de la estela normalizada por el espesor $e$ en función de la distancia aguas abajo $x$ . Para $f_r = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	54
5.12.	Esquema condición de inyección caso número 1: Inyección de $CO$ en la mitad inferior de la sección de entrada (zona roja). . . . .	55
5.13.	Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar $c_{co} = 0.5$ (verde) para $0.4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 1 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . En azul se representa el alerón. . . . .	56
5.14.	Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar $c_{co} = 0.5$ (verde) para $0.4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 1 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . En azul se representa el alerón. . . . .	56
5.15.	Perfiles de concentración de escalar pasivo a $x/e = 30,3$ aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\bullet$ : $0,2T$ ; $\circ$ : $0,4T$ ; $\square$ : $0,6T$ ; $\triangleright$ : $0,8T$ ; $\triangleleft$ : $1T$ . Caso N°1. . . . .	56
5.16.	Perfiles de concentración de escalar pasivo a $x/e = 30,3$ aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . $\bullet$ : $0,2T$ ; $\circ$ : $0,4T$ ; $\square$ : $0,6T$ ; $\triangleright$ : $0,8T$ ; $\triangleleft$ : $1T$ . Caso N°1. . . . .	56
5.17.	Perfil promedio de concentración de sustancia escalar a $x/e = 30,3$ . $\bullet$ : $f_0 = 10$ [Hz]; $\circ$ : $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . Caso N°1. . . . .	57

5.18. Perfil <i>RMS</i> de concentración de sustancia escalar a $x/e = 30,3$ . ●: $f_0 = 10$ [Hz]; ○: $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . Caso N°1. . . . .	57
5.19. Contornos de iso - concentración de <i>CO</i> en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación $t = 7,39$ [s]. . . . .	58
5.20. Contornos de iso - vorticidad en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación $t = 7,39$ [s]. . . . .	58
5.21. Iso - concentración de <i>CO</i> en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación $t = 6,57$ [s]. . . . .	58
5.22. Contornos de iso - vorticidad en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación $t = 6,57$ [s]. . . . .	59
5.23. Masa de <i>CO</i> en el tiempo, para $y > 0$ : □, $f_0 = 10$ [Hz]; ○, $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	59
5.24. Esquema Caso N°2: Inyección de <i>CO</i> al borde de salida del alerón. . . . .	60
5.25. Visualización 3D de estela: Iso contorno de sutancia escalar $c_{co} = 0,05$ a $0,4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 2 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . . . . .	60
5.26. Visualización 3D de estela: Iso contorno de sutancia escalar $c_{co} = 0,05$ a $0,4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 2 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . . . . .	60
5.27. Masa total de <i>CO</i> en el tiempo para $f_0 = 10$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . .	61
5.28. Masa total de <i>CO</i> en el tiempo para $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . . .	61
5.29. Perfiles de concentración de escalar pasivo a $x/e = 30,3$ aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 0,2T; ○: 0,4T; □: 0,6T; ▷: 0,8T; ◁: 1T. Caso N°2. . . . .	62
5.30. Perfiles de concentración de escalar pasivo a $x/e = 30,3$ aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 0,2T; ○: 0,4T; □: 0,6T; ▷: 0,8T; ◁: 1T. Caso N°2. . . . .	62
5.31. Perfil promedio de concentración de sustancia escalar a $x/e = 30,3$ . ●: $f_0 = 10$ [Hz]; ○: $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . Caso N°2. . . . .	62
5.32. Perfil <i>RMS</i> de concentración de sustancia escalar a $x/e = 30,3$ . ●: $f_0 = 10$ [Hz]; ○: $f_0 = 20$ [Hz]. Número de Reynolds $Re_e = 83$ . Caso N°2. . . . .	62
5.33. Contornos de iso - concentración de <i>CO</i> caso N° 2, en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	63
5.34. Contornos de iso - vorticidad caso N° 2, en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	63
5.35. Contornos de iso - concentración de <i>CO</i> caso N° 2, en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	63
5.36. Contornos de iso - vorticidad caso N° 2, en el plano <i>xy</i> , para $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	64
5.37. Distribución de concentración de <i>CO</i> plano <i>yz</i> a una distancia $x/e \approx 12$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	64

5.38. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 24$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	64
5.39. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 36$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	64
5.40. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 48$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	64
5.41. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 12$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	65
5.42. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 24$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	65
5.43. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 36$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	65
5.44. Distribución de concentración de $CO$ plano $yz$ a una distancia $x/e \approx 48$ del borde de salida del alerón. $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	65
5.45. Esquema Caso N°3: Inyección de $CO$ en bordes laterales del alerón. . . . .	65
5.46. Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar $c_{co} = 0.05$ a $0.4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 3 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . . . . .	66
5.47. Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar $c_{co} = 0.05$ a $0.4T$ con $T = 1/f_0$ . Caso 3 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . . . . .	66
5.48. Perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 10 $e$ ; ○: 20 $e$ ; □: 30 $e$ ; ◀: 40 $e$ ; ▶: 50 $e$ ; Caso N°3. . . . .	66
5.49. Perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 10 $e$ ; ○: 20 $e$ ; □: 30 $e$ ; ◀: 40 $e$ ; ▶: 50 $e$ ; Caso N°3. . . . .	66
5.50. Acercamiento perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 10 $e$ ; ○: 20 $e$ ; □: 30 $e$ ; ◀: 40 $e$ ; ▶: 50 $e$ ; Caso N°3. . . . .	67
5.51. Acercamiento perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento $f_0 = 20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . ●: 10 $e$ ; ○: 20 $e$ ; □: 30 $e$ ; ◀: 40 $e$ ; ▶: 50 $e$ ; Caso N°3. . . . .	67
5.52. Iso-contornos de sustancia escalar pasiva en el plano $xz$ con el alerón forzado a $f_0=10$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	67
5.53. Iso-contornos de sustancia escalar pasiva en el plano $xz$ con el alerón forzado a $f_0=20$ [Hz] y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	67
5.54. Contornos de iso - vorticidad en el sentido del eje $z$ , para el caso sin forzamiento y un número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	68
5.55. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30.3$ , $f_0 = 10$ [Hz], $t = 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ . . . . .	69

5.56. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 10$ [Hz], $t = 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	69
5.57. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,2 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	69
5.58. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,2 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	69
5.59. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,4 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	69
5.60. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,4 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	69
5.61. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,6 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	70
5.62. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,6 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	70
5.63. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,8 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	70
5.64. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 10$ [Hz], $t = 0,8 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	70
5.65. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 20$ [Hz], $t = 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.66. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 20$ [Hz], $t = 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.67. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,2 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.68. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,2 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.69. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,4 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.70. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,4 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	71
5.71. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,6 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	72
5.72. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,6 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	72
5.73. Distribución de concentración de $CO$ a $x/e = 30,3$ , $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,8 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	72
5.74. Contornos de iso - vorticidad en $z$ a $x/e = 30,3$ , para $f_0 = 20$ [Hz], $t = 0,8 1/f_0$ y número de Reynolds $Re_e = 83$ .	72

A.1. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.5$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 1 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	II
A.2. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.5$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 1 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	III
A.3. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.05$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 2 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	IV
A.4. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.05$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 2 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	V
A.5. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.05$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 3 a $f_0 = 10$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	VI
A.6. Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar $c_{co} = 0.05$ para diferentes tiempos con $T = 1/f_0$ . Caso 3 a $f_0 = 20$ [Hz] y $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T. . . . .	VII

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes generales

En mecánica de fluidos el estudio del fenómeno ocasionado por un flujo interactuando con un cuerpo rígido ha sido de gran interés, por ejemplo, en problemas de aeronáutica [1, 2] o estudio de propulsión de organismos vivos como insectos, aves y peses (estudio citado en [3]).

Los primeros estudios realizados datan de 1912, donde von Karman (estudio citado en [3]) estudió la estela formada por un obstáculo, observó la formación de vórtices que viajan aguas abajo del fluido. Este fenómeno puede ser observado en la naturaleza, por ejemplo gracias a fotos satelitales que muestran la estela de vórtices formada por nubes al pasar sobre una isla [4].

Debido a que este tipo de fenómenos son complejos de solucionar en forma analítica, en aquella época la mayoría de los estudios se realizaron en forma experimental. Recientemente gracias al desarrollo tecnológico, es posible realizar estudios en base a simulaciones numéricas directas (DNS), lo cual ha permitido importantes avances.

En la actualidad el interés está centrado en estudiar y controlar fenómenos de este tipo para obtener resultados específicos como, por ejemplo, reducir la resistencia que ejerce el fluido sobre el cuerpo [1], retardar la transición de flujo laminar a turbulento, o estudiar la capacidad de transporte de una sustancia en la estela [5].

En el presente trabajo, se estudia de forma numérica el efecto que tiene sobre la estela el aplicar un forzamiento sinusoidal a un alerón adherido a un perfil plano y la interacción de estas estelas con una sustancia escalar pasiva.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos generales**

- El presente trabajo de título tiene como objetivo, estudiar a través de simulaciones numéricas, la dinámica de un escalar pasivo en la estela generada por un sistema placa plana-alerón, donde el alerón es forzado externamente.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Para cumplir con el objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Modelar estelas en tres dimensiones de acuerdo a parámetros experimentales obtenidos por el laboratorio LEAF-NL del Departamento de Ingeniería Mecánica [6].
- Validar los resultados obtenidos de estelas generadas con información experimental proporcionada por el laboratorio del departamento, específicamente con datos obtenidos por [7] en su trabajo de título.
- Simular numéricamente la interacción entre un escalar pasivo y estelas, en base a condiciones validadas previamente, para diferentes configuraciones de inyección de escalar.

## **1.3. Alcances**

- Se realizaron simulaciones 3D en régimen laminar, donde el fluido de trabajo será aire.
- La validación de resultados es solo a nivel de generación de estelas, en base a los datos obtenidos por [7] en su trabajo de título.
- Se utiliza funciones de forzamiento externo para el alerón con amplitudes pequeñas.

## **1.4. Metodología**

Para el cumplimiento de los objetivos, se siguió la siguiente metodología:

- Mediante investigación bibliográfica, se identificaron los modelos teóricos que rigen la mecánica de fluidos, además se identificaron parámetros de interés que caracterizan la estela formada por cuerpo sumergido en un fluido. Se estudió métodos de resolución numérica y su funcionamiento.

- Se desarrolló un modelo computacional 3D para la generación de estelas de acuerdo a las configuraciones proporcionadas por [7]. Particularmente, se tuvo información sobre la geometría de la placa-alerón utilizado y las funciones de forzamiento aplicadas sobre el alerón.
- Los resultados obtenidos se validaron con datos experimentales proporcionados por el laboratorio LEAF-NL, específicamente, los datos disponibles de [7].
- Tomando como base la generación de estelas 3D previamente validadas, se simulará la difusión y advección de un escalar pasivo para diferentes configuraciones de inyección de escalar.



## Capítulo 2

### Antecedentes

#### 2.1. Antecedentes teóricos

##### 2.1.1. Ecuaciones para fluidos

De acuerdo a lo señalado en [8], para determinar el campo de flujo de un fluido viscoso se definen tres ecuaciones fundamentales:

- Ecuación de continuidad, vale decir la expresión de conservación de masa.
- Ecuaciones de movimiento, expresión de conservación de momento.
- Ecuación termodinámica de estado.

Con esto es posible determinar las componentes ortogonales de la velocidad ( $\vec{v}$ ), la presión ( $p$ ) y la densidad ( $\rho$ ) de un fluido.

La ecuación 2.1, corresponde a la ecuación de conservación de masa en una unidad de volumen, considerando flujo no estacionario.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.1)$$

Para el caso de flujo incompresible (densidad es constante), la ecuación de conservación de masa se simplifica en la ecuación 2.2 :

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.2)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes permiten modelar la mecánica de fluidos, las ecuaciones de movimiento considerando flujo incompresible quedan descritas en la expresión 2.3 .

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.3)$$

Donde  $\vec{v}$  es el vector velocidades,  $\rho$  la densidad del fluido,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $t$  la variable temporal. El simbolo  $\nabla^2$  corresponde al operador laplaciano:  $\nabla^2 \equiv \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ .

### 2.1.2. Caracterización de flujo

De las ecuaciones de Navier-Stokes es posible deducir que los flujos producidos por cuerpos de similar geometría, son dinámicamente similares cuando los números de Reynolds para los flujos son iguales. El número de Reynolds está dado por la relación 2.4 .

$$Re_L = \frac{UL}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde  $U$  es la velocidad característica del fluido,  $L$  una longitud y  $\nu$  la viscosidad cinemática. El número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas inerciales y las viscosas. Además permite distinguir entre los diferentes regímenes de flujo, tales como laminar o turbulento.

### 2.1.3. Flujo en placa plana

Los perfiles de velocidad de un fluido sufrirán modificaciones debido a la presencia de un cuerpo en su interior. Para el caso de una placa plana delgada, se genera capa límite, que corresponde a la zona fluida cercana a la pared donde prevalecen los efectos viscosos. También puede ser definida como la zona donde la velocidad del flujo difiere al menos en 1 % de la velocidad libre. En la figura 2.1 se muestra un esquema de la capa límite alrededor de una placa plana delgada.

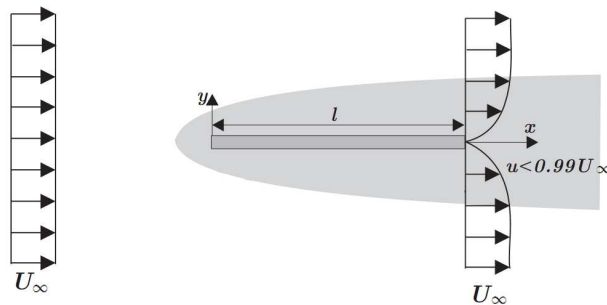


Figura 2.1: Esquema representativo de la capa límite alrededor de un perfil plano sometido a un flujo uniforme  $U_\infty$ .

Las ecuaciones de Navier-Stokes para capa límite pueden ser simplificadas para un número de Reynolds alto o una viscosidad muy baja, por lo que la capa límite queda representada en el caso permanente y laminar por las ecuaciones 2.5 y 2.6 :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

Con las siguientes condiciones de borde:  $u = v = 0$  para  $y = 0$  y  $u = U(x)$  cuando  $y = \infty$ .

### Espesor de la capa límite

El espesor de la capa límite ( $\delta$ ) corresponde a la distancia desde la pared (placa), hasta donde la velocidad del flujo difiere en 1 % de la velocidad exterior. En la figura 2.2 se muestra un esquema representativo del espesor de la capa límite en en perfil plano.

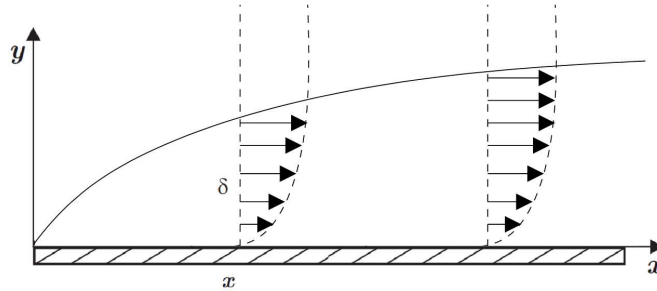


Figura 2.2: Esquema evolución del espesor de la capa límite en un perfil plano.

H.Blasius (citado en [8]) encontró una solución para el espesor de la capa límite. Estudió el caso de un flujo alrededor de un perfil plano, considerando flujo estacionario, con velocidad libre  $U_\infty$  en la dirección  $x$  (figura 2.2) y con velocidad potencial del flujo constante es decir  $\partial p / \partial x = 0$ . Así las ecuaciones de capa límite (ecuaciones 2.5 y 2.6) quedan:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.8)$$

Donde ahora las condiciones de borde para resolver el sistema son:

$$u = v = 0 \text{ para } y = 0 \quad (2.9)$$

$$u = U_\infty \text{ para } y = \infty \quad (2.10)$$

Luego es posible considerar que si los perfiles son normalizados adecuadamente se puede obtener perfiles idénticos. Es posible escribir los perfiles de velocidad en la capa límite como  $u/U_\infty = \phi(y/\delta)$ , donde la función  $\phi$  es la misma para toda distancia del extremo de salida del perfil plano.

Para el caso de un perfil plano que es acelerado repentinamente en el flujo, se tiene que  $\delta \propto \sqrt{vt}$ , donde  $t$  representa el tiempo. Es posible reemplazar  $t$ , por el tiempo que demora una partícula del fluido en llegar a la distancia  $x$  si viaja a la velocidad libre del flujo  $U_\infty$ , con esto se obtiene que  $\delta \propto \sqrt{vx/U_\infty}$ . Ahora es posible introducir una coordenada adimensional  $\eta \propto y/\delta$ , con lo que:

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{vx}} \quad (2.11)$$

Luego la ecuación de continuidad se puede integrar introduciendo una función de corriente  $\psi(x,y)$ :

$$\psi = \sqrt{vxU_\infty} f(\eta) \quad (2.12)$$

Donde  $f(\eta)$  corresponde a la función de corriente adimensional. Así la componente  $u$  de la velocidad queda:

$$u = \frac{\delta \psi}{\delta y} = \frac{\delta \psi}{\delta \eta} \frac{\delta \eta}{\delta y} = U_\infty f'(\eta) \quad (2.13)$$

Con  $f'(\eta) = \delta f(\eta)/\delta \eta$ . De igual forma, la componente  $v$  queda:

$$v = -\frac{\delta \psi}{\delta x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{vU_\infty}{x}} (\eta f' - f) \quad (2.14)$$

Ahora la ecuación para capa límite (ecuación 2.7) aplicando las nuevas variables y simplificando queda:

$$f' f'' + 2f''' = 0 \quad (2.15)$$

Con las condiciones de borde:  $f = 0$ ,  $f' = 0$  para  $\eta = 0$  y  $f' = 1$  para  $\eta = \infty$ .

Si es resuelta la ecuación anterior, se tiene que la velocidad  $v$  es diferente de cero y tiene la siguiente expresión:

$$v_{\infty} = 0,8604U_{\infty} \sqrt{\frac{v}{xU_{\infty}}} \quad (2.16)$$

Lo que señala que existe un flujo hacia afuera en el borde de salida del perfil plano.

J. M. Burgers y B. G. van der Hegge (citados en [8]), encontraron la relación 2.17, que liga el número de Reynolds de acuerdo al espesor de la capa límite ( $Re_{\delta}$ ) con el número de Reynolds según la distancia del borde de ataque ( $Re_x$ ).

$$Re_{\delta} = 5\sqrt{Re_x} \quad (2.17)$$

De la expresión 2.17 se deriva 2.18, que relaciona el espesor de la capa límite y la distancia al borde de ataque.

$$\frac{\delta}{x} = 5 \frac{1}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.18)$$

#### 2.1.4. Flujo en la estela de una placa plana

Las ecuaciones de capa límite son también aplicables cuando existe un estrato en que la influencia de la fricción es dominante al interior de un fluido [8]. En el caso de la estela detrás de una placa plana, ocurre que los dos perfiles de velocidad se unen formando un solo perfil. En la figura 2.3 se muestra un esquema de la evolución del perfil de velocidad del flujo al pasar por una placa plana.

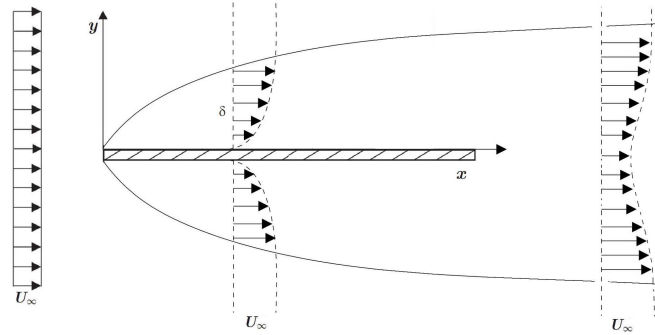


Figura 2.3: Esquema evolución del perfil de velocidad sobre una placa plana y aguas abajo.

La magnitud de la depresión en la curva de velocidad está directamente relacionada con la fuerza de arrastre del cuerpo. A medida que se aumenta la distancia aguas abajo de la placa, el perfil llega a un punto donde se hace independiente del cuerpo. Sin embargo, en las proximidades del cuerpo está determinado por la capa límite en el cuerpo, y su forma depende de sí el flujo se ha separado o no.

### 2.1.5. Fuerza de arrastre sobre un cuerpo

La fuerza de arrastre corresponde a la componente paralela a la dirección del flujo de las fuerzas fluido dinámicas aplicadas sobre el cuerpo (ver figura 2.4).

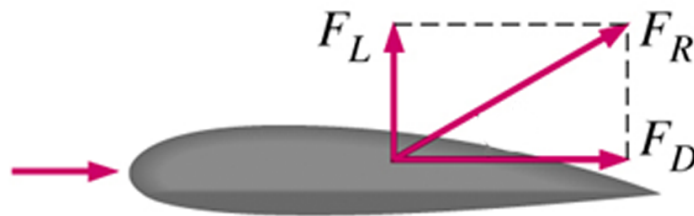


Figura 2.4: Esquema representativo fuerza fluido dinámica sobre un cuerpo.  $F_R$ : Fuerza fluido dinámica;  $F_L$ : Fuerza de sustentación (Lift);  $F_D$ : Fuerza de arrastre (Drag).

Analíticamente es posible determinar el arrastre ( $D$ ) mediante la siguiente expresión:

$$D = \int_S (-p\delta + \tau) ds \quad (2.19)$$

Donde  $p$  es la presión,  $\delta$  corresponde al producto punto entre la dirección del flujo y el vector normal de la superficie del cuerpo,  $\tau$  el esfuerzo de corte sobre el cuerpo generado por el fluido y  $S$  la superficie del cuerpo.

Con respecto al esfuerzo de corte, en el caso que el fluido sea de carácter Newtoniano, vale decir que la viscosidad no varía con el esfuerzo de corte que se aplique, entonces la deformación tendrá un comportamiento lineal con respecto al esfuerzo de corte. Lo anterior se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.20)$$

Donde  $\mu$  representa la viscosidad dinámica,  $u$  la velocidad del flujo e  $y$  la dirección normal a la superficie del cuerpo.

Así la fuerza de arrastre se puede descomponer en dos fenómenos, uno el arrastre producido por presión y el arrastre producido por fricción (En ecuación 2.19 términos  $-p\delta$  y  $\tau$  respectivamente). En las figuras 2.5 y 2.6 se muestran casos donde predomina un tipo de arrastre sobre el otro.

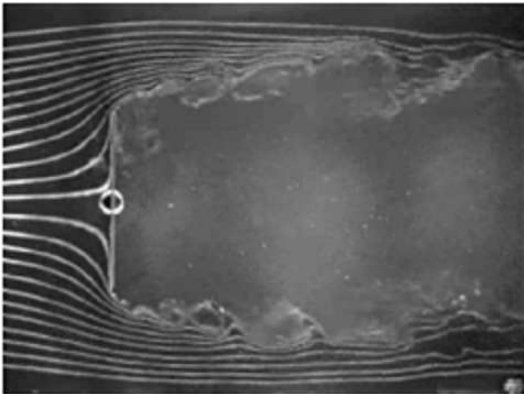


Figura 2.5: Placa plana perpendicular al flujo, donde la fuerza de arrastre por presión predomina sobre la fuerza por fricción.

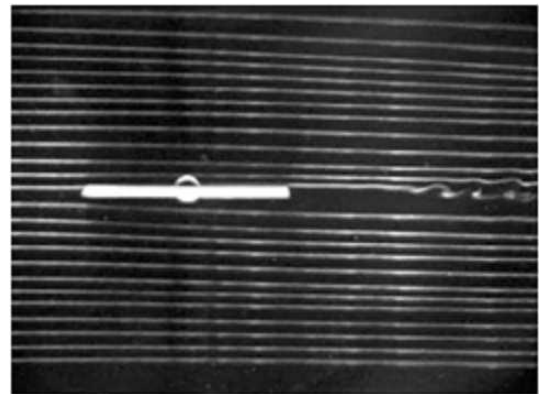


Figura 2.6: Placa plana paralela al flujo, donde la fuerza de arrastre por fricción predomina sobre la fuerza por presión.

Por otro lado, según lo explicitado en [8], la fuerza de arrastre ( $D$ ) también puede ser calculada a partir de los perfiles de velocidad aguas abajo, según la ecuación 2.21.

$$D = b\rho U_\infty^2 \delta_2 \quad (2.21)$$

Donde  $\delta_2$  es el espesor de momentum, dado por la ecuación 2.22 .

$$\delta_2 = \frac{1}{U_\infty^2} \int_{y=0}^{\infty} u(U_\infty - u) dy \quad (2.22)$$

Además W. Tollmien (citado en [8]) verificó que la ecuación 2.23 es capaz de describir los perfiles de velocidad en la estela para distancias aguas abajo superiores a tres largos de placa ( $x > 3l$ ).

$$\frac{U_\infty - u(x,y)}{U_\infty} = \frac{0,644}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{l}bv\right)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{4} \frac{y^2 U_\infty}{xv}\right) \quad (2.23)$$

### 2.1.6. Caracterización de sustancia escalar pasiva

Una sustancia escalar pasiva, corresponde a una cantidad que tiene magnitud pero no una dirección en el espacio. Además no modifica los campos de velocidad y presión del fluido en el que está inserto. Ejemplos cotidianos de este tipo de sustancia son: tinta en agua o humo en el aire.

Una sustancia de este tipo esta gobernada por dos fenómenos:

- Advección, que corresponde a la variación de un escalar debido a un campo vectorial, regida por la expresión 2.24 .

$$\vec{v} \cdot \nabla c = u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.24)$$

Donde  $\vec{v} = u\hat{x} + v\hat{y} + w\hat{z}$ , corresponde a la velocidad y  $c$  a la magnitud del escalar.

- Difusión, que corresponde a la variación de un escalar debido a un gradiente de concentración del mismo, la ley que describe este fenómeno es la Ley de Fick (Ecuación 2.25).

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D\nabla^2 c = \frac{\partial c}{\partial t} - D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

Asumiendo que el coeficiente de difusión ( $D$ ) es independiente de la magnitud de sustancia escalar.

Luego se tiene la expresión 2.26 que describe de forma completa la fluido mecánica de una sustancia escalar pasiva:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D\nabla^2 c + \vec{v} \cdot \nabla c = \dot{S}_c \quad (2.26)$$

Donde  $\dot{S}_c$  corresponde a la fuente de escalar.



Además para caracterizar el flujo en donde coexisten procesos de transporte de cantidad de movimiento y masa, se utiliza el número adimensional de Schmidt (ecuación 2.27). Definido como el cociente entre la difusión de cantidad de momentum (viscosidad), y la difusión de masa (coeficiente de difusión).

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.27)$$

### 2.1.7. Concepto de vorticidad

La vorticidad se define como la cantidad de rotación de un fluido en un punto. Matemáticamente la vorticidad es un vector y está definida como el rotor del vector de velocidad:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{V} \quad (2.28)$$

Donde  $\vec{\omega}$  corresponde al vector vorticidad,  $\vec{V}$  la velocidad y  $\vec{\nabla}$  corresponde al operador vectorial conocido como rotacional o simplemente rotor, el cual cuantifica la tendencia de un campo vectorial (en este caso campo vectorial de velocidad) a inducir rotación alrededor de un punto. Su definición matemática, en coordenadas cartesianas, está dada por:

$$\vec{\nabla} \times \vec{V} = \left( \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \hat{x} + \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \hat{z} \quad (2.29)$$

O el determinante de la siguiente matriz:

$$\vec{\nabla} \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix} \quad (2.30)$$

Este concepto será utilizado para comprender de mejor forma el comportamiento de la estela y como la vorticidad influye al momento de inyectar sustancia escalar pasiva en el flujo.

## 2.2. Estudios experimentales

Experimentalmente, el estudio de estelas ha sido desarrollado en túneles de viento (o agua), ya que de esta forma es posible controlar variables, como por ejemplo, velocidad de flujo y turbulencia. Además permite reducir factores externos no deseados que puedan perturbar el sistema al momento de realizar mediciones.

La aplicación controlada de perturbaciones externas puede ser introducida al flujo de dos maneras, de forma pasiva o activa [1]. Las técnicas pasivas (o en estado estacionario), incluyen el uso por ejemplo de calefactores pasivos, barreras, cintas o elementos rugosos.

El forzamiento activo se subdivide en dos categorías: técnicas globales y técnicas locales. Las técnicas globales corresponden a las que modifican el flujo en su totalidad, por ejemplo forzamiento acústico, y reguladores variables de presión. Las técnicas locales corresponden a alteraciones en sólo las condiciones iniciales del sistema, como por ejemplo el uso de alerones en movimiento, cintas vibrantes o calefactores activos.

En [1] se estudia la estela producida por un perfil alar, sumergido en agua, el cual consta de calefactores ubicados en ambos bordes. Estos calefactores inyectan pulsos de calor de forma alternada, modificando los campos de velocidad aguas abajo en el fluejo. Este estudio demostró la efectividad de este sistema de forzamiento para amplificar o cancelar ondas en la estela. Obtuvo como resultado que para el caso de la estela forzada a frecuencia de máxima amplificación, la fuerza de arrastre se redujo entre 10 % y 30 %, esto se asocia a que ocurre un fenómeno similar al de forzamiento mecánico, donde el movimiento del perfil desplaza la capa límite adherida.

Un estudio en el mismo ámbito [5], analiza los patrones de vorticidad en la estela generada por un perfil alar con movimiento oscilante. El montaje consiste en un canal de agua de bajas velocidades donde es sumergido un perfil alar tipo NACA 0012. Se estudió el cambio en la estela cuando se aplica una función sinusoidal al perfil alar, variando la frecuencia y la amplitud de la oscilación.

Para frecuencias muy bajas, se observó en la estela una suave ondulación que transporta la cadena de vórtices de von Karman. Para frecuencias mayores se observaron cadenas de vorticidad diferentes al caso sin forzamiento. Se encontró un caso especial para una frecuencia y amplitud determinada, donde la estructura de la estela presenta dos vorticidades en el mismo sentido cada medio ciclo de oscilación. En este caso los perfiles de velocidad se asemejan a una estructura de doble estela. Además en [5] se señala que es posible construir estelas con patrones de tres vórtices del mismo signo por media oscilación para amplitudes mayores a dos grados.

Otro resultado importante en [5], consiste en que a cierta frecuencia se produce el alineamiento de las vorticidades, obteniéndose para la posición central un aumento considerable en la velocidad del flujo. Para esta frecuencia se minimiza la fuerza de arrastre. También se estudió el comportamiento

axial de las estelas, además se inyecta tinta (sustancia escalar pasiva), en los extremos laterales del perfil alar. Se observó que al incrementar la frecuencia, aumenta la velocidad axial de forma prácticamente lineal. Y a medida que aumenta la distancia aguas abajo en el flujo, la sustancia escalar es transportada hacia el centro de la estela.

Con respecto a la vorticidad generada por el borde de una superficie (tip vortex), en [2] se realiza un estudio experimental, en el que se compara la estela de un perfil alar NACA 0012 para distintos generadores de vorticidad. Además se estudia la influencia de los generadores sobre el tip vortex. Los resultados mostraron que es posible obtener sustanciales redistribuciones de la circulación en la estela, debido a que se produce la fusión del tip vortex con los vórtices de los generadores, en el caso que ambas vorticidades tengan el mismo sentido. Se midió que el radio del vórtice resultante puede aumentar hasta en un factor 5 en comparación al tip vortex sin perturbar. Además los generadores de vorticidad de tipo triangular reducen la pérdida de sustentabilidad.

### **2.2.1. Estudio experimental base**

La presente sección tiene como objetivo describir en forma general el estudio experimental de [3] y [7], en el cual se basan las simulaciones numéricas realizadas en este trabajo.

#### **Montaje experimental**

En la figura 2.7 se muestra un esquema representativo del sistema placa plana-alerón utilizado por [7]. Este sistema fue dispuesto dentro en el túnel de viento ubicado en el Laboratorio de Estudios Avanzados de Fenómenos No Lineales (LEAF-NL).

Además se acopló el equipamiento necesario para el forzamiento del alerón como también el equipo necesario para realizar mediciones.

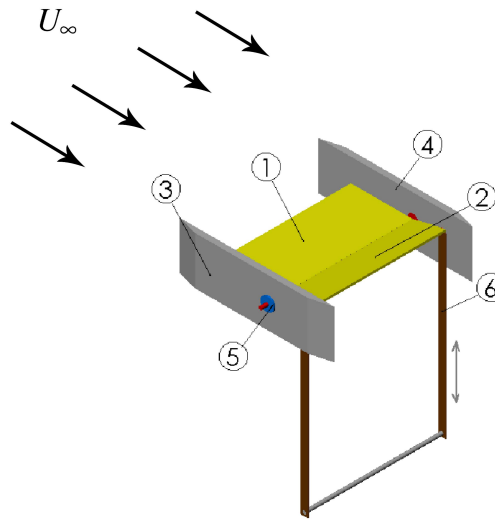


Figura 2.7: Sistema placa plana-alerón experimental: (1) placa fija, (2) alerón, (3) y (4) perfiles laterales, (5) rodamiento, (6) arco utilizado en el sistema de forzamiento.

### Rango de variables

El estudio experimental trabajó en los siguientes rangos:

- Número de Reynolds: Desde un valor de 50 a 200 considerando la expresión 2.31:

$$Re_e = \frac{U_\infty e}{\nu} \quad (2.31)$$

Donde  $e = 1,65$  [mm], corresponde al espesor del alerón.

- Función de forzamiento: se aplicó al alerón una función de forzamiento sinusoidal de la forma:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.32)$$

Donde  $\alpha_0$  es el ángulo que caracteriza la amplitud. Como se midió la amplitud en el borde de salida  $A_0$ , esta se varió en el siguiente rango:

$$0,1e \leq A_0 \leq 0,6e \quad (2.33)$$

y  $f_0$  la frecuencia.  $f_0$  se varió en los siguientes rangos:

$$1 \leq f_0 \leq 50 \text{ [Hz]} \quad (2.34)$$

## Resultados experimentales

Primero se estudió el comportamiento del flujo sin forzamiento externo del alerón y en posición horizontal. Se observó que el ancho de la estela depende según una ley de potencia del número de Reynolds.

En la figura 2.8 se muestran los perfiles de velocidad para diferentes números de Reynolds  $Re_e$ , en el caso del alerón en posición fija horizontal. Los perfiles fueron obtenidos a una distancia aguas abajo de  $x/e=30,3$ .

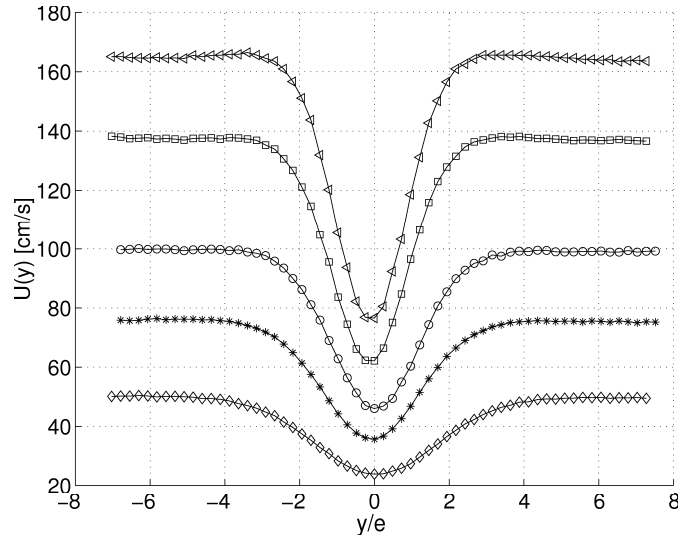


Figura 2.8: Perfiles de velocidad  $U(y)$  para el alerón en posición horizontal fijo para distintos números de Reynolds  $Re_e$ :  $\diamond$ , 54,6; \*, 82,3;  $\circ$ , 109,3;  $\square$ , 151,2;  $\Delta$ , 181,2.

Definiendo el ancho de la estela  $\Lambda(Re_e)$ , como la distancia a lo largo del eje  $y$  donde se cumple que  $|(U(y) - U_\infty)/U_\infty| > 1\%$ . Se observó que la ecuación que relaciona  $\Lambda(Re_e)$  y  $Re_e$  está dada por la expresión 2.35.

$$\frac{\Lambda(Re_e)}{e} = 61Re_e^{-0,45} \quad (2.35)$$

Luego se estudió el comportamiento de la estela bajo régimen forzado sinusoidalmente. Para una amplitud fija, se observó una resonancia para una frecuencia de forzamiento ( $f_r$ ). Se determinó que esta resonancia ocurre cuando el tiempo que toma en recorrer una partícula una distancia  $b$  (alerón), es cercano al tiempo que demora una oscilación del alerón. Esto queda expresado en la ecuación 2.36.

$$F = \frac{t_b}{t_0} = \frac{b \cdot f_r}{U_\infty} \approx 1 \quad (2.36)$$

Vale decir que cuando se cumple esta relación, la transferencia de impulso es máxima y se crea un ensanchamiento de la estela.

Esto se puede observar en la figura 2.9, donde se grafica los contornos de energía cinética asociados a las fluctuaciones de velocidad con respecto a la frecuencia de forzamiento  $f_0$  y el eje espacial  $y/e$ . Para un número de Reynolds  $Re_e = 83,2$ , se observó que para un intervalo de frecuencia alrededor de 25 [Hz] (frecuencia de resonancia  $f_r$ ), las fluctuaciones de energía cinética cubren una región más amplia.

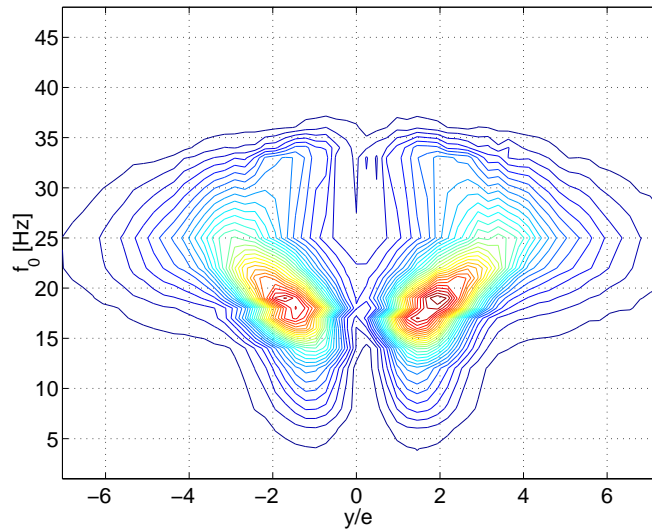


Figura 2.9: Contorno de iso-fluctuaciones de energía cinética para un rango de frecuencias de forzamiento de 1 a 50 [Hz] y un número de Reynolds  $Re_e=83,2$

## 2.3. Métodos numéricos

### 2.3.1. Formulación por volúmenes de control

En la realización de simulaciones numéricas es necesario determinar el algoritmo con el que se discretizará el dominio. El método utilizado en el software Fluent es a una formulación por volúmenes de control [10]. Este método consiste en dividir el dominio en un conjunto de volúmenes los cuales tienen un nodo en su centro. Estos nodos son los que conforman la malla.

En la figura 2.10 se muestra un esquema en tres dimensiones de la malla usando la formulación por volúmenes de control. Donde  $P$  representa un nodo cualquiera en la malla y los nodos  $N$ ,  $S$ ,  $W$ ,  $E$ ,  $T$  y  $B$  los nodos vecinos al nodo  $P$ .

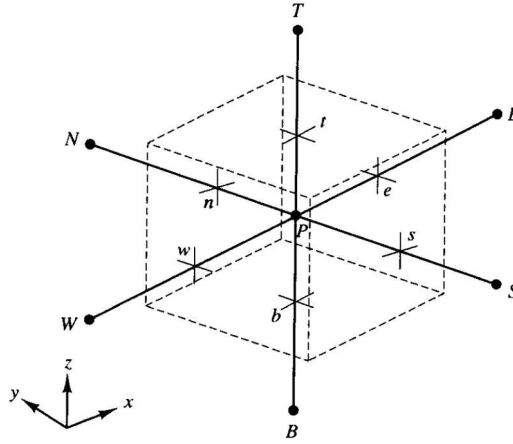


Figura 2.10: Volumen de control para un punto de  $P$  de la malla, con nodos vecinos  $N, S, W, E, T$  y  $B$ .

Con esta estructura es posible realizar la integración de las ecuaciones de movimiento y conservación de masa de la variable en estudio para cada volumen de control. Esto se realiza para obtener una discretización de las ecuaciones que son las que se resuelven numéricamente.

### 2.3.2. Discretización de ecuaciones de Navier - Stokes

Para la integración de las ecuaciones de Navier - Stokes con el método de volúmenes de control, el campo de presión es evaluado en el punto  $P$  (figura 2.10), mientras que las velocidades se evalúan en los bordes del mismo. De esta forma las velocidades se evalúan en los puntos  $e, w, n, s, t$  y  $b$ . Este desplazamiento de malla de las velocidades hacia los bordes del volumen de control se realiza con el objetivo de interpolar solo velocidades y no presiones ya que existen ecuaciones simples para la interpolación de velocidad y no así para la presión.

Luego la discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes [10] quedan de la forma:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (2.37)$$

Donde:

$$a_I = D_i A (|P_i|) + [[-F_i, 0]] \quad \text{para } I \in [E, N, T] \text{ y para } i \in [e, n, t] \quad (2.38)$$

$$a_I = D_i A (|P_i|) + [[F_i, 0]] \quad \text{para } I \in [W, S, B] \text{ y para } i \in [w, s, b] \quad (2.39)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (2.40)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y \Delta z + a_P^0 \phi_P^0 \quad (2.41)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.42)$$

Donde  $\phi_i$  es el valor de la variable en el nodo  $i$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  representan el ancho, largo y alto del volumen de control,  $\Delta t$  el paso de tiempo,  $\rho$  la densidad, además el término de fuente  $S$  ha sido linealizado de la forma  $S = S_C + S_P \phi_P$ . El término genérico  $X_P^0$  corresponde al valor de  $X$  en el nodo  $P$  para el tiempo anterior.

También se define  $D_i$  como:

$$D_i = \frac{\Gamma_i \Delta y \Delta z}{(\delta x)_i} \text{ para } i \in [e, w] \quad (2.43)$$

$$D_i = \frac{\Gamma_i \Delta z \Delta x}{(\delta y)_i} \text{ para } i \in [n, s] \quad (2.44)$$

$$D_i = \frac{\Gamma_i \Delta x \Delta y}{(\delta z)_i} \text{ para } i \in [t, b] \quad (2.45)$$

Donde  $\Gamma_i$  es el coeficiente de difusión de la variable  $\phi$ . Además se define  $F_i$ , que representa las tasa de flujo de masa en la cara  $i$ :

$$F_i = (\rho u)_i \Delta y \Delta z \text{ para } i \in [e, w] \quad (2.46)$$

$$F_i = (\rho v)_i \Delta z \Delta x \text{ para } i \in [n, s] \quad (2.47)$$

$$F_i = (\rho w)_i \Delta x \Delta y \text{ para } i \in [t, b] \quad (2.48)$$

Y  $P_i$  es definido como la relación:



$$P_i = \frac{F_i}{D_i} \text{ para } i \in [e, w, n, s, t, b]. \quad (2.49)$$

El operador  $[[X, Y]]$  entrega el valor máximo entre  $X$  e  $Y$ . Y la función  $A(|P|)$  refleja el esquema de interpolación del flujo total de la variable en estudio. En la siguiente tabla se muestra la forma de la función  $A(|P|)$  dependiendo del tipo esquema:

Tabla 2.1: Función  $A(|P|)$  para distintos esquemas de interpolación.

<b>Esquema de interpolación</b>	$A( P )$
Diferencias centrales	$1 - 0,5 P $
Aguas arriba	1
Híbrido	$[[0, 1 - 0,5 P ]]$
Ley de potencia	$[[0, (1 - 0,1 P )^5]]$
Exponencial	$ P  / (\exp( P ) - 1)$

### 2.3.3. Algoritmo SIMPLE

El algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) descrito en [10] y [11] es comúnmente utilizado para la realización de simulaciones numéricas, ya que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes cuando se desconoce el campo de presiones. Este algoritmo se encuentra incorporado en el software comercial Fluent, utilizado para realizar la simulaciones. A continuación se describe en forma básica el funcionamiento de este algoritmo:

1. Impone un campo de presiones  $p^*$ .
2. Resuelve las ecuaciones de momentum para obtener velocidades aproximadas,  $u^*$ ,  $v^*$  y  $w^*$ .
3. Resuelve las ecuaciones de corrección para la presión  $p$ .
4. Calcula un nuevo campo de presión, agregando a la presión impuesta las correcciones,  $p' = p + p^*$ .
5. Calcula  $u$ ,  $v$  y  $w$  a través de sus valores encontrados y utilizando la formulas de corrección de la velocidad.
6. Resuelve las ecuaciones discretizadas para otras variables (tales como temperatura, concentración, o turbulencia) en el caso que afecten el campo del flujo. Si una variable en particular no afecta el campo de flujo, es recomendable calcularla una vez que este ha convergido.

7. Asigna el nuevo campo de presión  $p$ , como campo aproximado  $p^*$ , retorna al paso 2 y repite el procedimiento hasta obtener una solución convergida.

Otro algoritmo utilizado es una modificación del algoritmo anterior, llamado SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent), el cual sigue de forma general los mismos pasos que el algoritmo SIMPLE, con la diferencia que considera una corrección más precisa (en paso 5) de las velocidades.

Para calcular las variables en las fronteras de cada elemento se utiliza el esquema upwind de segundo orden. De esta forma, se obtiene una mayor precisión en las caras de la celda a través de una expansión en series de Taylor. Luego al escoger este enfoque, la variable en la frontera  $\phi_f$  es calculada usando la siguiente relación:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta s \quad (2.50)$$

Donde  $\phi$  y  $\nabla\phi$  son el valor en el centro de la celda y su gradiente en la celda aguas arriba,  $\Delta s$  es el vector desplazamiento desde el centroide de la celda aguas arriba hasta la cara del centroide. Este criterio requiere de la determinación del gradiente  $\nabla\phi$  en cada celda. Este gradiente es calculado usando el teorema de la divergencia, que escrito en su forma discreta queda:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{caras}} \tilde{\phi}_f A \quad (2.51)$$

Donde los valores en las caras de  $\phi_f$  son calculados promediando  $\phi$  desde dos celdas adyacentes a la cara. Finalmente, el gradiente  $\nabla\phi$  es limitado de manera que no sean introducidos nuevos máximos o mínimos.

## 2.4. Algoritmo resolutivo

En la figura 2.11 se muestra un esquema del funcionamiento de una simulación de flujo transiente que utiliza el algoritmo SIMPLE. Consiste básicamente en utilizar el campo de presión obtenido en un tiempo  $t$  como campo inicial impuesto para el tiempo siguiente  $t + \Delta t$ .

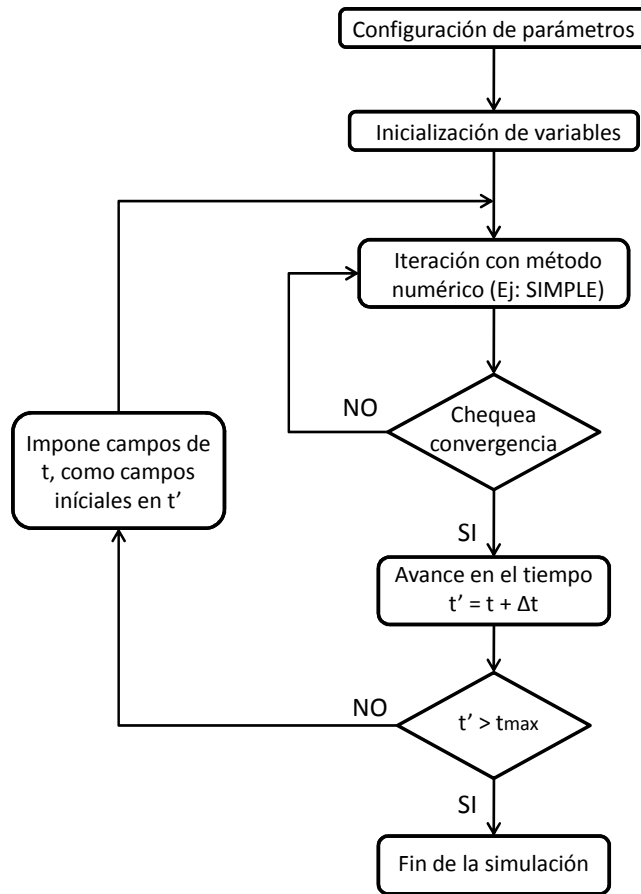


Figura 2.11: Esquema funcionamiento simulación numérica.

## 2.5. Concentración y masa de sustancia escalar pasiva

La concentración de sustancia escalar ( $c$ ) se define como la fracción entre la masa de escalar contenida en una celda y la masa total de la celda. Tomando como ejemplo monóxido de carbono como sustancia escalar y aire como fluido transportador, según lo señalado en [9], entonces en cada elemento se tiene que la concentración de escalar es:

$$c_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_{CO} + m_{air}} \quad (2.52)$$

Donde  $m_{CO}$  y  $m_{air}$ , corresponden a la cantidad de masa presente de monóxido de carbono y aire respectivamente en una unidad de volumen. Luego podemos definir:

$$m_{CO} = \rho_{CO} \cdot v_{CO} \quad (2.53)$$

$$m_{air} = \rho_{air} \cdot v_{air} \quad (2.54)$$

Donde  $\rho_{CO}$  y  $\rho_{air}$  son las densidades del monóxido de carbono y el aire respectivamente.  $v_{CO}$  y  $v_{air}$ , son el volumen equivalente que ocuparían cada gas si estos se encontraran totalmente separados (figura 2.12).

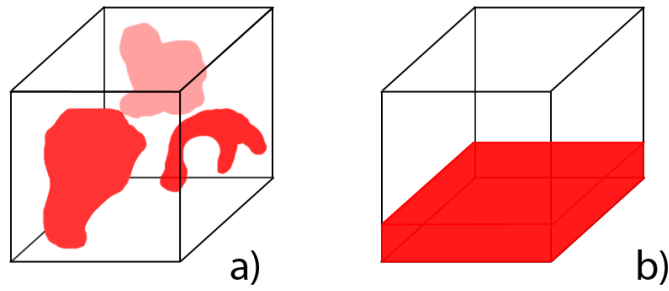


Figura 2.12: a) Celda de medición de sustancia escalar (rojo) con diferentes concentraciones; b) Celda equivalente donde la masa de escalar se encuentra en un volumen fijo con concentración  $c = 1$ .

De esta forma es posible decir que:

$$v_t = v_{CO} + v_{air} \quad (2.55)$$

Donde  $v_t$  corresponde al volumen del elemento. Dado que son conocidos  $v_t$  (de la malla),  $\rho_{CO}$ ,  $\rho_{air}$  (propiedades conocidas) y  $c_{CO}$  (valor entregado de la simulación numérica). Es posible combinar las ecuaciones 2.52, 2.53, 2.54 y 2.55, para obtener el valor de la masa de escalar en cada elemento de volumen:

$$m_{CO} = v_t \rho_{CO} \frac{c_{CO}}{c_{CO} + \frac{\rho_{CO}}{\rho_{air}} (1 - c_{CO})} \quad (2.56)$$

Luego si queremos calcular la masa de escalar ( $M_{CO}$ ) en un volumen dado ( $V_T$ ) se debe realizar:

$$M_{CO} = \sum_{V_T} m_{CO}(v_t) \quad \forall v_t \in V_T \quad (2.57)$$

## Capítulo 3

# Simulación numérica de estelas

La simulación numérica de estelas se llevó a cabo utilizando el software comercial CFD Fluent en su versión 6.3, además se utilizó el software Gambit para la confección de la geometría y el mallado de esta. Adicionalmente para el pos-procesamiento de los datos se utilizó el software Matlab en su versión 7.0.

### 3.1. Geometría

Para la realización de las simulaciones se utilizó la geometría mostrada en la figura 3.1, consiste básicamente ubicar el sistema placa plana - alerón en un volumen de control con forma de paralelepípedo, semejante a la geometría de un túnel de viento. Cabe señalar que el sistema placa plana - alerón esta ubicado a una distancia de una altura a partir de la sección de entrada.

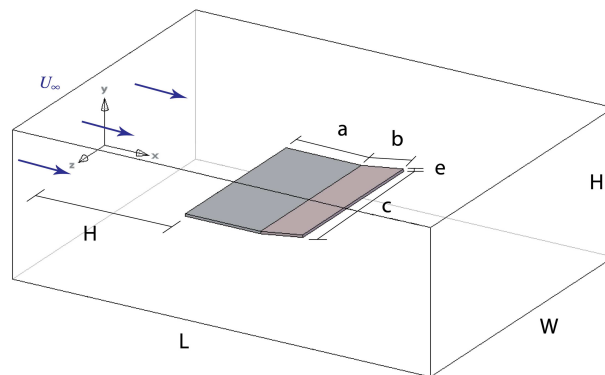


Figura 3.1: Geometría de simulación. Dimensiones:  $H = 100$  [mm],  $W = 220$  [mm],  $L = 330$  [mm],  $a = 54$  [mm],  $b = 30,4$  [mm],  $c = 121$  [mm] y  $e = 1,65$  [mm].

El sistema placa plana-alerón posee la siguientes dimensiones: largo de la placa  $a = 54$  [mm], largo del alerón  $b = 30,4$  [mm], ancho  $c = 121$  [mm] y espesor  $e = 1,65$  [mm]. Las dimensiones del volumen de control utilizado son: alto  $H = 100$  [mm], ancho  $W = 220$  [mm] y largo  $L = 330$  [mm].

### 3.2. Mallado

En la figura 3.2 se muestra de manera cualitativa la discretización espacial utilizada. El mallado longitudinal y transversal está basado en elementos rectangulares equiespaciados. El mallado vertical (eje  $y$ ) consta de dos sectores, uno equiespaciado en torno al eje horizontal ( $p_y = ctte$ ) y luego un mallado con tasa de crecimiento constante ( $r = L_{i+1}/L_i = ctte$ ) hacia las paredes del volumen. De esta manera se genera un mallado 3D en base a elementos cúbicos de ocho nodos.

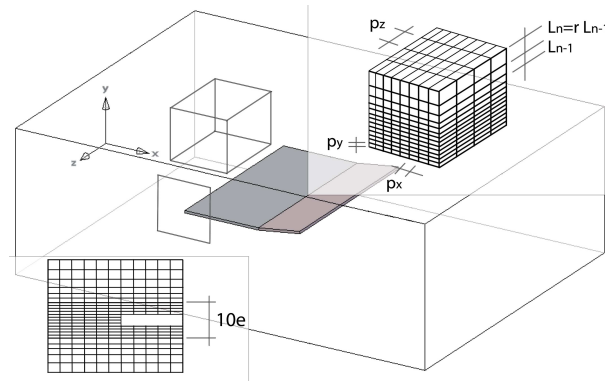


Figura 3.2: Esquema representativo de mallado. Dimensiones de elementos de la malla:  $p_x = 1,0 e$ ;  $p_y = 0,25 e$ ;  $p_z = 2,0 e$ ; tasa de crecimiento  $r=1,095$ .

Dado que se conocen las regiones de mayores gradientes de velocidad en la estela, el mallado se realizó en base a una discretización que otorgue una resolución razonable para estos gradientes. Por tal motivo se utilizó un valor de  $p_y = 0,25e$ ,  $p_x = 1,0e$ , una razón  $r = 1,095$  con tamaño inicial igual a  $p_y$  y un paso constante en el eje  $z$  de  $p_z = 2,0e$ , donde  $e$  corresponde al espesor del sistema placa plana - alerón.

### 3.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde utilizadas para realizar las simulaciones numéricas son las siguientes:

- Sección de entrada: En esta sección, representada en la figura 3.3 por la cara 1, se impone una condición de velocidad uniforme (ecuación 3.1). Este valor es modificado para obtener diferentes números de Reynolds en el flujo.

$$\vec{v}(x = 0, t) = U \cdot \hat{x} \quad (3.1)$$

- Sección de salida: Representada en el esquema por la cara 2, se impone una condición de presión constante externa e igual a la presión atmosférica.

$$p(x = L, t) = p_{atm} \quad (3.2)$$

- Paredes laterales: A estas superficies representadas en la figura 3.3 por las caras 3, 4, 5, y 6, se les impone una condición de pared, es decir que la velocidad del flujo en las superficies de las paredes es igual a cero (ecuación 3.3 y 3.4).

$$\vec{v}(y = \pm H/2) = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{v}(z = \pm W/2) = 0 \quad (3.4)$$

- Placa plana: Para las superficies que conforman la placa plana (54 x 121 x 1,65[mm]) se impone, al igual que en las paredes laterales, condición de pared.
- Alerón: En el caso de las superficies que conforman el alerón (30,4 x 121 x 1,65[mm]), se impone una condición de pared móvil.

El tipo de movimiento impuesto resulta del siguiente análisis. El forzamiento experimental de acuerdo a lo visto en la sección 2.2.1 corresponde a un movimiento angular del tipo:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.5)$$

De acuerdo a [7] la amplitud del forzamiento es pequeña, por tanto el movimiento del alerón se puede aproximar de la siguiente manera:

$$Y(t) = b \sin(\alpha) \approx b\alpha \quad (3.6)$$

Donde  $b$  es el ancho del alerón. De esta forma el movimiento equivalente corresponde a un movimiento oscilatorio vertical de la forma:

$$Y(t) = b\alpha = b\alpha_0 \sin(2\pi ft) = A \sin(2\pi ft) \quad (3.7)$$

Donde  $A = b\alpha_0$  la amplitud del movimiento oscilatorio. En el software Fluent se debe imponer la función de desplazamiento en términos de la velocidad [9]. Entonces para la condición de pared móvil, se impone la derivada de la expresión 3.7, obteniéndose la expresión 3.8.

$$\dot{Y}(t) = A2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (3.8)$$

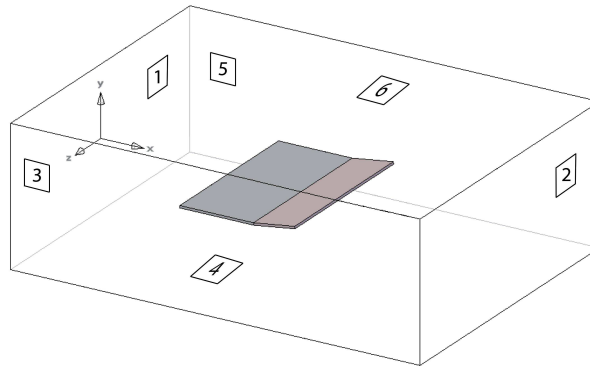


Figura 3.3: Esquema condiciones de borde: Cara 1: velocidad de entrada uniforme; Cara 2: presión atmosférica externa; Caras 3,4,5 y 6: condición de pared; Placa: condición de pared; Alerón: condición de pared móvil.

### 3.4. Rango de variables

#### ■ Número de Reynolds

Se realizaron simulaciones para los siguientes números de Reynolds ( $Re_e$ ): 54, 83, 109, 124, 154 y 181. Donde el número de Reynolds se calculó según la expresión 3.9.

$$Re_e = \frac{Ue}{\nu} \quad (3.9)$$

Donde  $e = 1,65$  [mm] es el espesor del sistema placa plana - alerón,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  [ $m^2/s$ ] la viscosidad cinemática del aire y  $U$  la velocidad libre. El número de Reynolds se varió modificando la velocidad en la sección de entrada.

#### ■ Función de forzamiento

De acuerdo a lo señalado en la sección 3.3, al alerón se impone la velocidad que tendría un movimiento sinusoidal (ecuación 3.3 y 3.4).

Para esta función se utilizó una amplitud de  $A = 0,2 e$ . En el caso de las frecuencias, se realizaron simulaciones para los siguientes valores:  $f = 2; 5; 10; 12,5; 16; 20; 25; 33,3; 40$  y  $50$  [Hz]. La razón de utilizar estas frecuencias y no otras se debe a que estas frecuencias son divisibles por el paso de tiempo, lo que simplifica el manejo de los datos en post procesamiento.

### 3.5. Parámetros de simulación

Los parámetros que se describen a continuación, fueron configurados en el software Fluent para realizar las diferentes simulaciones numéricas.



### 3.5.1. Propiedades físicas del fluido

Las características del fluido utilizado son:

- Fluido: Aire.
- Densidad =  $1,225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Viscosidad =  $1,8375 \text{ e-5 [kg/ms]}$

### 3.5.2. Propiedades físicas de sustancia escalar pasiva

Las características de la sustancia escalar pasiva son las siguientes:

- Sustancia: Monóxido de carbono ( $CO$ ).
- Densidad =  $1,123 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Viscosidad =  $1,75 \text{ e-5 [kg/ms]}$
- $C_p = 1043 \text{ [J/kgK]}$
- Difusividad másica =  $2,88 \text{ e-5 [m}^2\text{/s]}$

### 3.5.3. Parámetros del solver

Como parámetros del solver se impuso que:

- Formulación implícita de las ecuaciones.
- Dependencia temporal de las ecuaciones (Régimen transiente) con una aproximación temporal de primer orden.
- Esquema de interpolación aguas arriba de segundo orden para las ecuaciones de momentum y concentración de sustancia escalar.
- Método SIMPLE para la corrección del campo de presiones.
- Modelo de viscosidad laminar.
- Sin transferencia de calor (ecuación de la energía).
- Sin gravedad.

- Paso de tiempo de  $p_t = 0,00025$  [s].
- El criterio de convergencia tal que el residuo máximo sea igual a  $10^{-4}$  para las ecuaciones de momentum (en  $x$ ,  $y$  y  $z$ ) y continuidad, criterio de  $10^{-3}$  para las ecuaciones de concentración de elementos escalares y con un número de iteraciones máximo igual a 50.

### 3.5.4. Interacción malla - paredes móviles

Dado que en este caso se tiene un objeto móvil, alerón con movimiento oscilatorio, fue necesario determinar la forma con que interactúa la malla con las paredes móviles del alerón.

La técnica utilizada para la adaptación de la malla fue usar un remallado de tipo "Layering", con la salvedad que los factores de división (Split factor) y de colapso (Collapse factor) se fijaron fuera del rango posible de deformación de los elementos, así la malla solo se deforma y no ocurre el remallado. Esto es posible dado que en el sentido vertical la malla alrededor del alerón tiene un paso de 0,25 e y la amplitud del forzamiento sinusoidal (en la dirección vertical también) es  $A = 0,2$  e, por lo que no se generan volúmenes negativos.

En la figura 3.4, se muestra una representación en dos dimensiones de la deformación de la malla alrededor del borde de salida del alerón. Se muestra la disposición de la malla para la posición central y para los desplazamientos máximos del alerón.

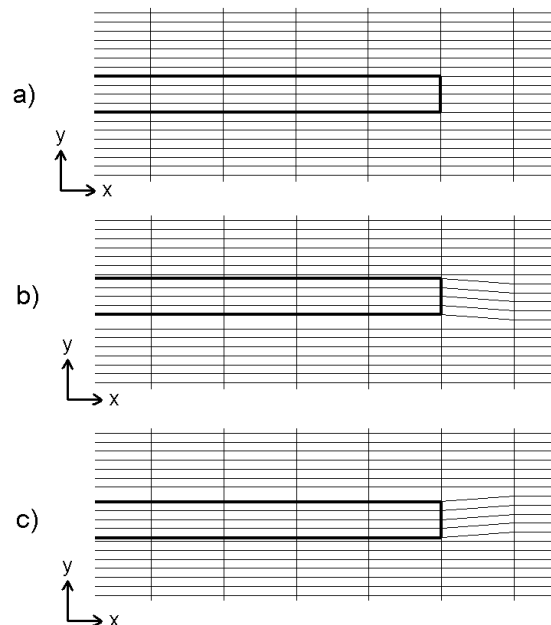


Figura 3.4: Esquema en 2D de deformación de la malla para distintas posiciones de alerón: a) posición central del alerón; b) alerón en desplazamiento máximo superior; c) alerón en desplazamiento máximo inferior.

## Capítulo 4

### Validación de resultados

#### 4.1. Dimensiones de volumen de control

Para estimar la distancia necesaria entre el sistema placa-plana alerón y las paredes del volumen de control, se realizó simulaciones en 2D para diferentes anchos. En la figura 4.1 se observa tres perfiles de velocidad a una distancia de  $x/e = 30,3$  aguas abajo desde el borde de salida del alerón. Se comparó para las siguientes alturas (H): 50 [mm], 80 [mm] y 100 [mm]. Estas simulaciones se realizaron para un número de Reynolds  $Re_e = 183$ .

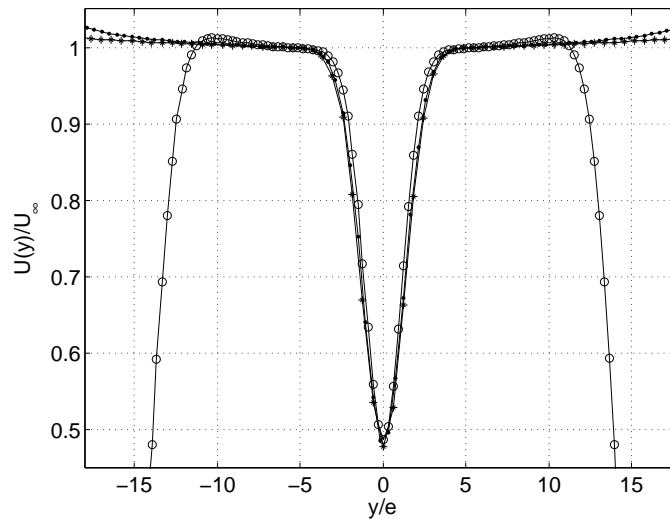


Figura 4.1: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$ , para diferentes volúmenes de control variando la altura H: o, 50 [mm]; ●, 80 [mm]; \*, 100 [mm]. Número de Reynolds  $Re_e = 183$ .

Se aprecia que la influencia de la capa límite en las paredes es notoria para el caso de 50 [mm] de

ancho y decae para los casos de 80 y 100 [mm]. A partir de este resultado se optó por utilizar un ancho de 100 [mm].

## 4.2. Tiempo de estabilización para estelas sin forzamiento

Para determinar el tiempo que demora la estela en presentar un estado estacionario, en el caso sin forzamiento, se simuló un caso 2D para un número de Reynolds de  $Re_e = 183$  donde se registro los perfiles de velocidad a una distancia aguas abajo de  $x/e = 30,3$ . A partir de los perfiles obtenidos se graficó los cambios de velocidad cada un segundo (ver figura 4.2).

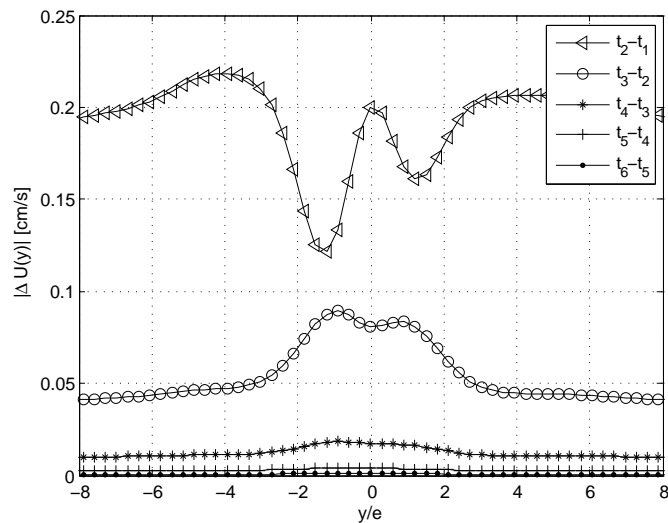


Figura 4.2: Gráfico diferencias de velocidad cada un segundo para  $Re_e = 183$ .

A partir de la figura 4.2, se determina que desde los 6 [s] de simulación, el perfil de velocidad no cambia en forma considerable.

## 4.3. Pruebas de malla

La prueba de malla, tiene como objetivo verificar que las variables ajenas al fenómeno no afecten de forma significativa a los campos de flujo obtenidos en las simulaciones numéricas. La idea es que los resultados sean independientes de la densidad del mallado y las dimensiones del dominio espacial.

Para llevar a cabo la prueba de malla se comparó los perfiles de velocidad para las siguientes mallas:

Tabla 4.1: Configuración de mallado para la prueba de malla.

Simulación	Discretización de la malla				Número de elementos
	px [mm]	py [mm]	pz [mm]	r	
1	1,65	1,6500	3,3	1,064	459079
2	1,65	0,8250	3,3	1,082	687666
3	1,65	0,5500	3,3	1,095	847115
4	1,65	0,4125	3,3	1,098	1029612
5	1,65	0,3300	3,3	1,110	1142965

Básicamente se utilizó el mallado descrito en la sección 3.2 donde se varió el paso en el eje  $y$  ( $p_y$ ) y la razón de crecimiento  $r$ . En estas simulaciones se utilizó un paso de tiempo de  $p_t = 0,002[s]$  y en la condición de borde de entrada se impuso una velocidad de tal forma de obtener un número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

Los resultados a comparar posteriormente, corresponden a 6 [s] de tiempo de simulación. A continuación se muestran los tiempos reales requeridos para realizar estas simulaciones.

Tabla 4.2: Tiempo real utilizado en las simulaciones numéricas.

Simulación	Tiempo de simulación	Tiempo requerido
	[s]	[hrs]
1	6	3,22
2	6	4,73
3	6	6,40
4	6	6,98
5	6	7,53

Para los casos simulados numéricamente se comparó los perfiles de velocidad  $U(y)$  a distintas distancias aguas abajo a partir del borde de salida del alerón. De la figuras 4.3 a 4.10 se muestran los perfiles de velocidad a  $x/e$  igual  $10e$ ,  $20e$ ,  $30e$  y  $40e$ . Se observa que para mallas de mayor densidad de elementos (malla 4 y 5), los perfiles se comienzan a asemejan, esto quiere decir que el fenómeno se hace independiente de la malla.

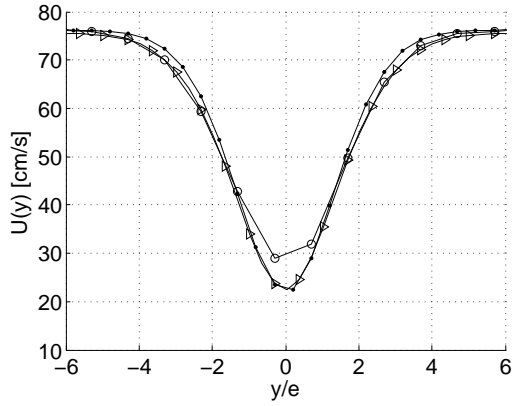


Figura 4.3: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 10$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\circ$  malla 1;  $\bullet$  malla 2;  $\triangleright$  malla 3.

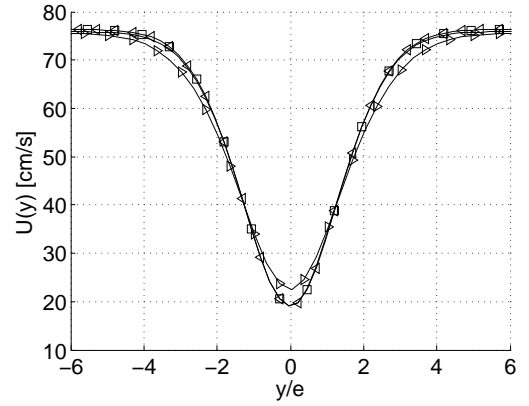


Figura 4.4: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 10$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\triangleright$  malla 3;  $\square$  malla 4;  $\triangleleft$  malla 5.

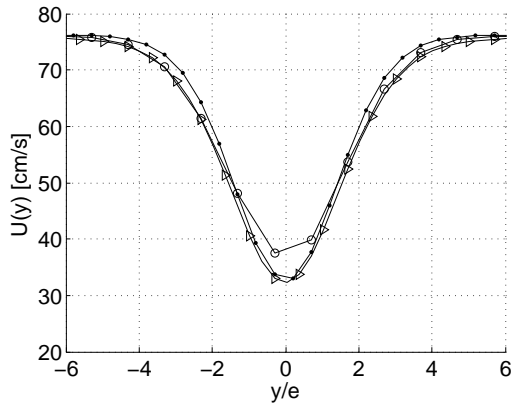


Figura 4.5: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 20$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\circ$  malla 1;  $\bullet$  malla 2;  $\triangleright$  malla 3.

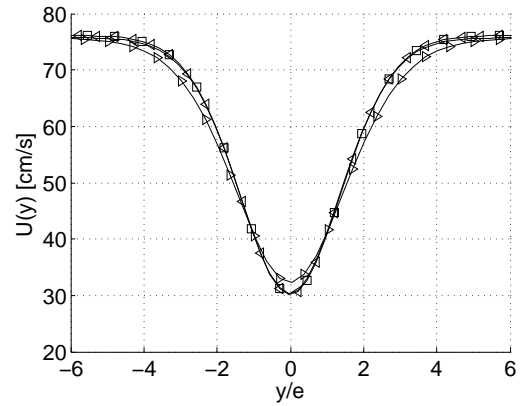


Figura 4.6: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 20$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\triangleright$  malla 3;  $\square$  malla 4;  $\triangleleft$  malla 5.

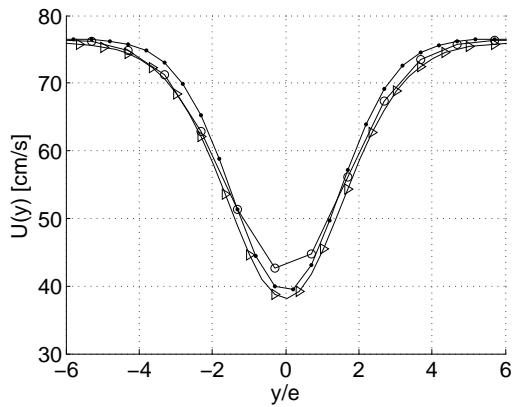


Figura 4.7: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 30$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\circ$  malla 1;  $\bullet$  malla 2;  $\triangleright$  malla 3.

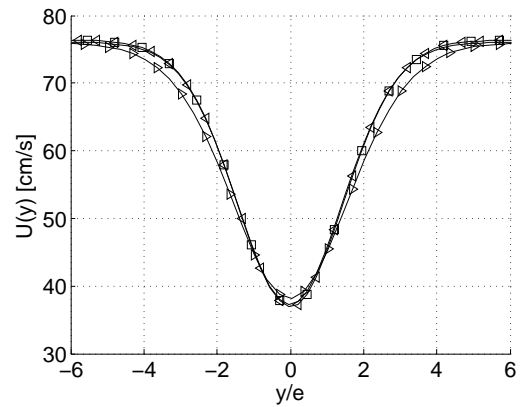


Figura 4.8: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 30$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\triangleright$  malla 3;  $\square$  malla 4;  $\triangleleft$  malla 5.

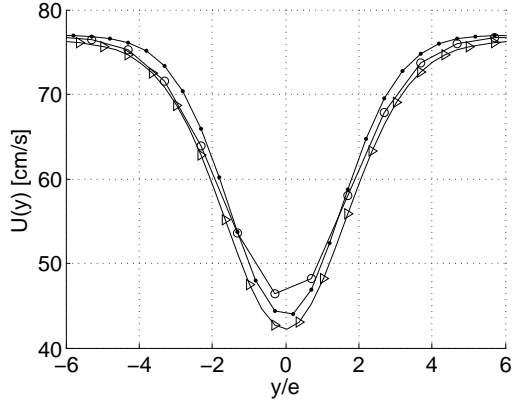


Figura 4.9: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 40$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\circ$  malla 1;  $\bullet$  malla 2;  $\triangleright$  malla 3.

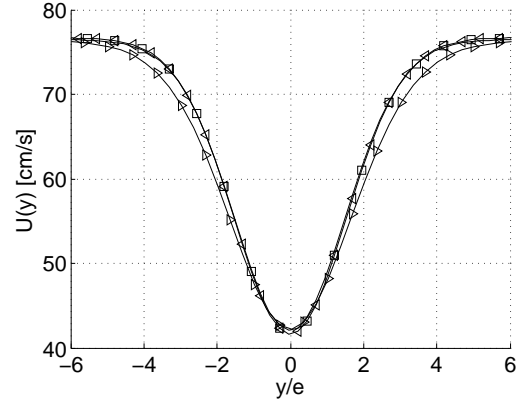


Figura 4.10: Perfil de velocidad  $U(y)$  para alerón en posición horizontal fija a  $x/e = 40$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\triangleright$  malla 3;  $\square$  malla 4;  $\triangleleft$  malla 5.

Dados los perfiles presentados, se escogió la malla número 4 para las simulaciones posteriores, ya que a partir de esta malla el perfil de velocidad no se modifica.

#### 4.4. Pruebas de paso de tiempo

El paso de tiempo utilizado para realizar simulaciones numéricas debe ser el adecuado considerando factores como: la discretización de la malla, la magnitud de las velocidades utilizadas y condiciones variables en el tiempo.

Un criterio comúnmente utilizado, corresponde a que el paso de tiempo no supere la relación entre el paso espacial y la velocidad máxima:

$$\Delta t < \frac{\Delta x_{min}}{v_{max}} \quad (4.1)$$

Si consideramos que las mayores velocidades son en la dirección del eje  $x$ , considerando un número de Reynolds  $Re_e = 83$ , entonces para la malla elegida se tiene que:

$$\Delta t < \frac{P_x}{U_\infty} = 0,0022 \quad (4.2)$$

Además de esto se debe considerar el movimiento del alerón, ya que el paso de tiempo y la frecuencia de forzamiento determinarán el número de posiciones que tendrá el alerón durante la simulación numérica.

Para determinar el paso de tiempo necesario considerando este aspecto, se realizó una simulación numérica donde se fue variando el paso de tiempo.

A continuación se muestra una tabla resumen de la simulación realizada:

Tabla 4.3: Tabla resumen simulación numérica variando paso de tiempo.

Paso de tiempo [s]	Frecuencia de forzamiento [Hz]	Pasos de tiempo por periodo [pasos/T]	Tiempo medio real de simulación por periodo [hrs/T]	Tiempo real medio real de simulación por paso de tiempo [min/paso]
0,0004	25	100	2,284	1,370
0,00025	25	160	2,678	1,004
0,00016	25	250	3,433	0,824

En la figura 4.11 se muestra la evolución de la velocidad en el punto de coordenadas  $(30.3e, 0)$  a partir del borde de salida del alerón. La adquisición de datos se realizó cada un décimo de periodo. Además se modificó el paso de tiempo para observar la influencia de este sobre la velocidad. Se puede apreciar que para el primer cambio de paso de tiempo, la respuesta del fluido al forzamiento de alerón se modifica de forma notoria, aumentando la velocidad media. Para el segundo cambio de paso de tiempo, se observa que la velocidad aumenta levemente. Por otro lado la amplitud de la oscilación no se ve afectada por los cambios de paso de tiempo.

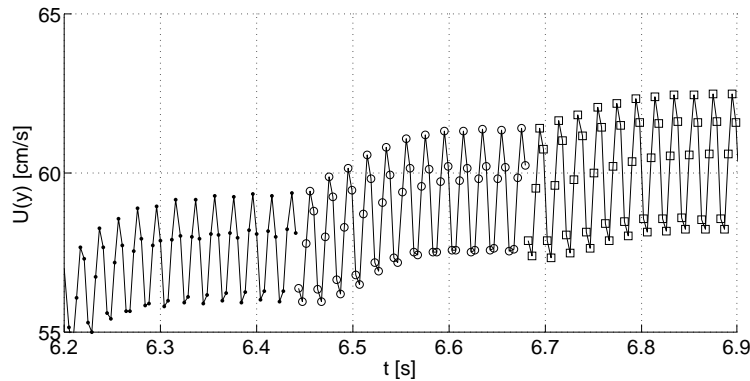


Figura 4.11: Gráfico de velocidad en  $(30.3e, 0)$  para  $f_r=25$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\bullet$ :  $p_{t1} = 0.0004$  [s],  $\circ$ :  $p_{t2} = 0.00025$  [s];  $\square$ :  $p_{t3} = 0.00016$  [s].

En la figura 4.12 se muestra la evolución de la velocidad en el punto de coordenadas  $(30.3e, 3e)$  a partir del borde de salida del alerón. En este caso se aprecia que la velocidad media permanece constante independiente del paso de tiempo, mientras que la amplitud de oscilación se modifica con el paso de tiempo.



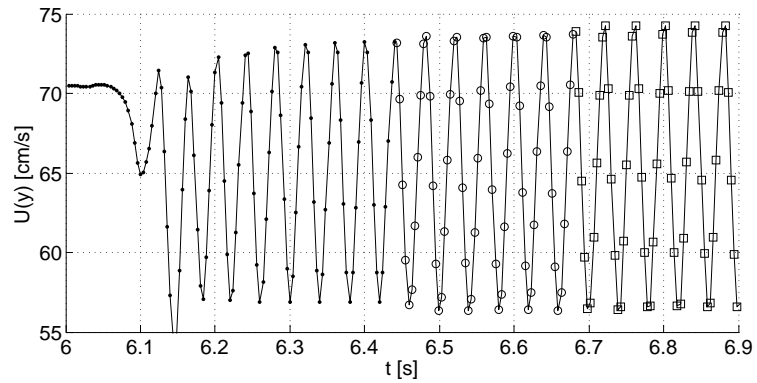


Figura 4.12: Gráfico de velocidad en  $(30.3e, 3e)$  para  $f_r=25$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●:  $p_{t1} = 0,0004$  [s], ○:  $p_{t2} = 0,00025$  [s]; □:  $p_{t3} = 0,00016$  [s].

Luego se comparo los perfiles de velocidad media para una distancia de  $x/e=30,3$  para los distintos pasos de tiempo. En la figura 4.13 se observa que los perfiles son similares salvo para el primer paso de tiempo.

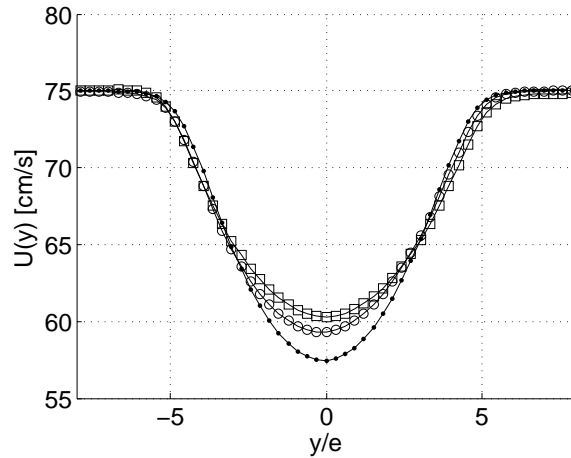


Figura 4.13: Perfil de velocidad medio  $U(y)$  para  $f_r=25$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●:  $p_{t1} = 0,0004$  [s], ○:  $p_{t2} = 0,00025$  [s]; □:  $p_{t3} = 0,00016$  [s].

Considerando los tiempos de simulación y los perfiles de velocidad se opto por utilizar un paso de tiempo de  $0,00025$  [s], ya que son necesarios al menos  $0,3$  [s] de simulación para alcanzar un estado periódico estable, por lo que los tiempos de simulación aumentan de forma considerable.

### 4.5. Estelas sin forzamiento

Para geometrías en tres dimensiones (3D) se realizaron simulaciones numéricas sin forzamiento del alerón, en posición fija horizontal, para distintos números de Reynolds. La comparación con resultados experimentales de [7] se realizó en el eje de simetría vertical a una distancia  $x/e = 30,3$  aguas abajo desde el borde de salida del alerón (ver figura 4.14).

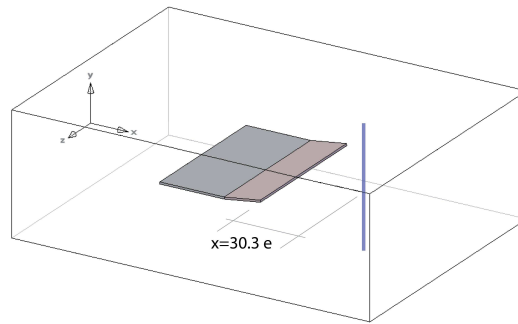


Figura 4.14: Esquema zona de registro de datos para estelas sin forzamiento.

En las figuras 4.15 y 4.16 se observan los perfiles de velocidad obtenidos para la configuración descrita anteriormente donde la posición en el eje  $y$  es normalizada por el espesor  $e$  del sistema placa plana - alerón.

En las figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 se comparan perfiles de velocidad experimentales con simulaciones numéricas de estelas sin forzamiento para diferentes números de Reynolds. Los perfiles son normalizados por su correspondiente velocidad libre  $U_\infty$  y el eje  $y$  normalizado por el espesor del alerón. Además en el caso de las simulaciones los datos corresponden a un tiempo igual a  $t=6$  [s].

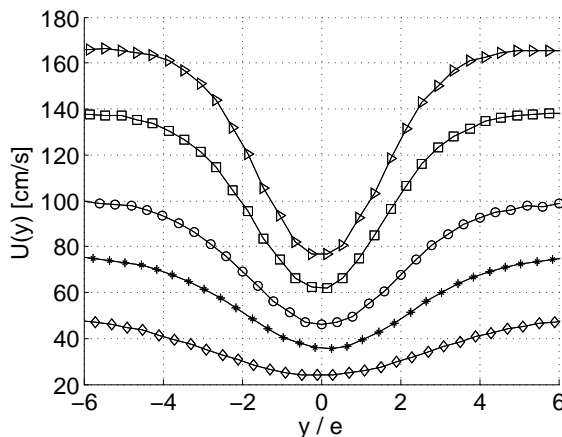


Figura 4.15: Perfiles de velocidad experimentales para alerón en posición horizontal fija y distintos números de Reynolds:  $\diamond$ , 54; \*, 83; o, 109;  $\square$ , 154;  $\triangle$ , 181.

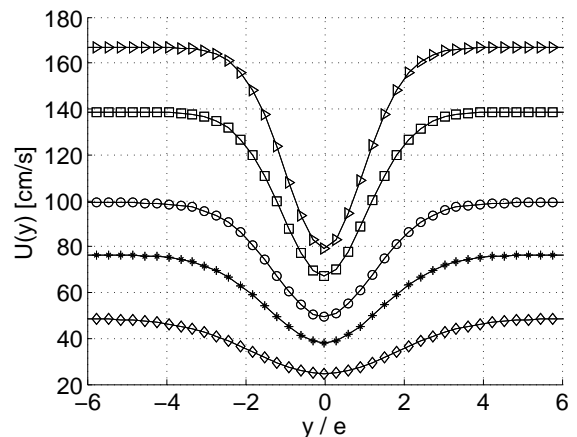


Figura 4.16: Perfiles de velocidad simulados para alerón en posición horizontal fija y distintos números de Reynolds:  $\diamond$ , 54; \*, 83; o, 109;  $\square$ , 154;  $\triangle$ , 181.

En el caso de  $Re_e = 54$  (figura 4.17) la diferencia de la simulación con el caso experimental no superan el 6,3 %, mientras que para  $Re_e = 83$  (figura 4.18) las diferencias no superan el 6,4 %. Para  $Re_e = 109$  y  $Re_e = 151$  (figuras 4.19 y 4.20) se tiene una diferencia máxima cercana al 7,3 %. Mientras que para  $Re_e = 181$  la simulación no difiere en más del 2,5 %. Se observar que las simulaciones realizadas difieren con los perfiles experimentales principalmente en la zona central ( $\pm 1e$ ). Además en los casos experimentales el cuociente entre la velocidad mínima y la velocidad de flujo libre alcanza un valor de 0,46, mientras que para las simulaciones este cuociente es levemente más elevado, alcanzando un valor de 0,51.

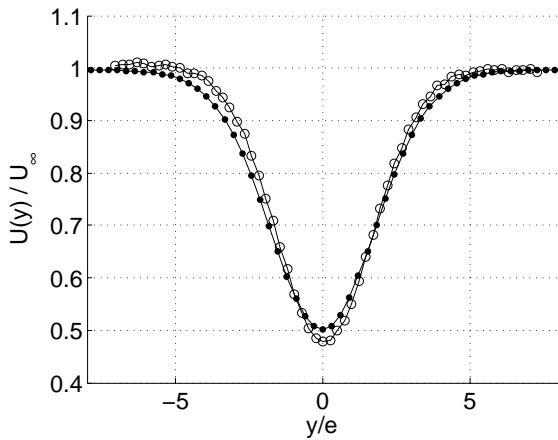


Figura 4.17: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$  para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds  $Re_e = 54$ .  $\circ$ : Caso Experimental;  $\bullet$ : Simulación

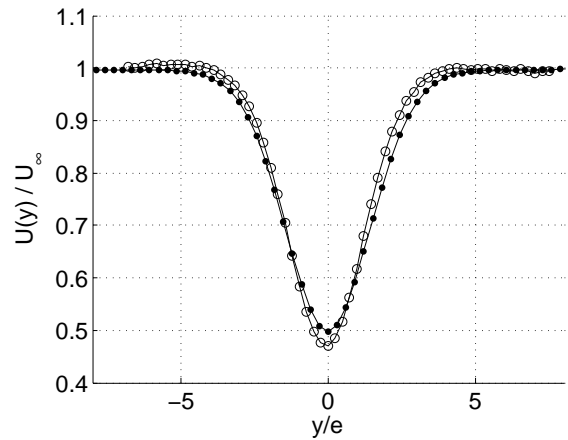


Figura 4.18: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$  para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\circ$ : Caso Experimental;  $\bullet$ : Simulación

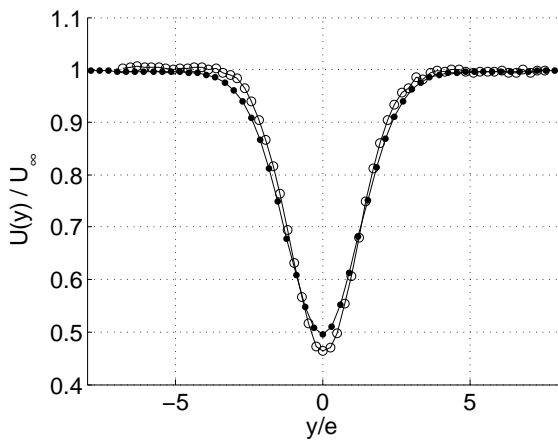


Figura 4.19: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$  para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds  $Re_e = 109$ .  $\circ$ : Caso Experimental;  $\bullet$ : Simulación

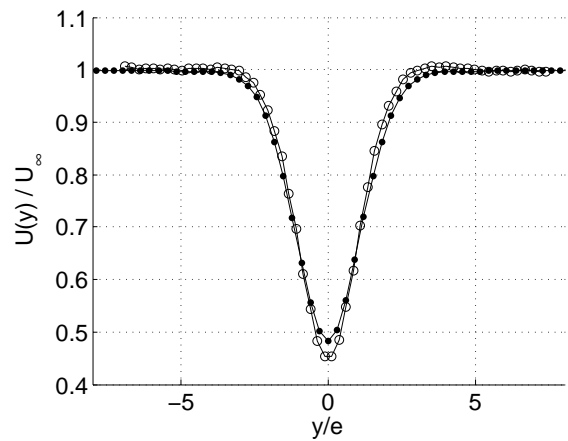


Figura 4.20: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$  para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds  $Re_e = 151$ .  $\circ$ : Caso Experimental;  $\bullet$ : Simulación

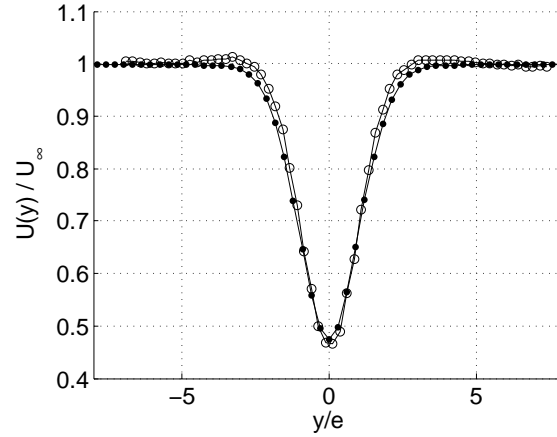


Figura 4.21: Perfil de velocidad normalizado por  $U_\infty$  para alerón en posición horizontal fija y número de Reynolds  $Re_e = 181$ .  $\circ$ : Caso Experimental;  $\bullet$ : Simulación

En las figuras 4.17 a la 4.21 se observa que el ancho de la estela disminuye a medida que aumenta el número de Reynolds. Para determinar la dependencia del ancho de la estela con el número de Reynolds se define el ancho  $\Lambda$ , como la distancia a lo largo del eje  $y$  donde la velocidad difiere en más de un 1 % de la velocidad libre del flujo (ecuación 4.3).

$$\left| \frac{U(y) - U_\infty}{U_\infty} \right| > 1\% \quad (4.3)$$

En la figura 4.22 se observa la relación entre el ancho de la estela con el número de Reynolds, donde el ancho de la estela depende según una ley de potencia del número de Reynolds. Para el caso experimental se tiene la relación 4.4:

$$\frac{\Lambda(Re_e)}{e} = 58Re_e^{-0.45} \quad (4.4)$$

Mientras que para la simulación se tiene la relación 4.5:

$$\frac{\Lambda(Re_e)}{e} = 67Re_e^{-0.45} \quad (4.5)$$

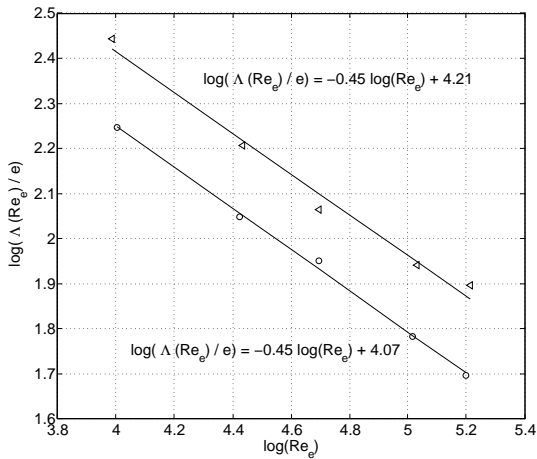


Figura 4.22: Relación entre el ancho de la estela con el número de  $Re_e$  a  $x/e=30,3$ :  $\circ$ : Caso experimental,  $\triangle$ : Simulación.

Para los perfiles obtenidos, ahora normalizando el eje  $y$  por el espesor de la capa límite en el extremo de salida del alerón, se observa en las figuras 4.23 y 4.24 que los perfiles son similares tanto para el caso experimental como para las simulaciones numéricas realizadas. Se obtiene que el ancho de la estela para el caso experimental es de 1,97 veces el espesor de la capa límite al final del sistema placa - alerón, mientras que para los casos simulados el ancho de la estela alcanza un valor promedio de 1,45 veces.

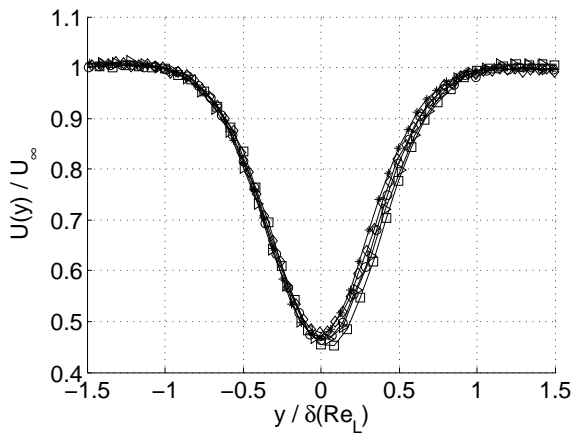


Figura 4.23: Perfiles de velocidad experimentales normalizando el eje coordenado por  $\delta(Re_L)$  para números de Reynolds:  $\diamond$ , 54; \*, 83;  $\circ$ , 109;  $\square$ , 154;  $\triangle$ , 181.

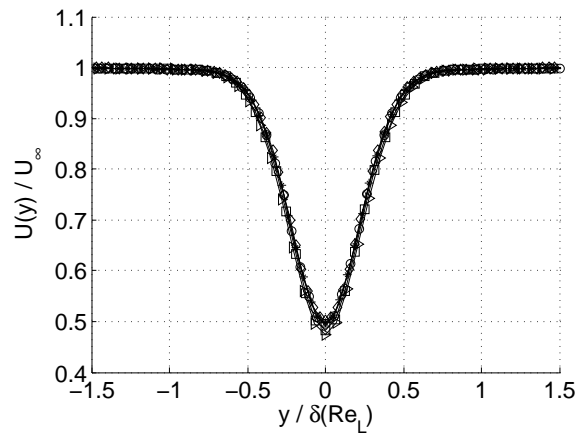


Figura 4.24: Perfiles de velocidad simulados numéricamente normalizando el eje coordenado por  $\delta(Re_L)$  para números de Reynolds:  $\diamond$ , 54; \*, 83;  $\circ$ , 109;  $\square$ , 154;  $\triangle$ , 181.

## 4.6. Estelas en régimen forzado

Se estudió la respuesta de la estela ante un forzamiento del alerón, en que se aplicó una función sinusoidal de la forma  $Y(t) = A\sin(2\pi f_0 t)$ , donde la amplitud usada fue  $A = 0,2e$  y se varió la frecuencia  $f_0$  en un rango de 2 [Hz] a 40 [Hz]. Para comparar con resultados experimentales, se registró datos en la misma región señalada en la sección 4.5.

Llamando  $U(y)$  a los perfiles de velocidad promediados en el tiempo, se grafican los perfiles  $U(y)$  en la figuras 4.25 y 4.26, para distintas frecuencias  $f_0$  en los casos experimentales y numéricos respectivamente. Se observa en ambos casos que la estela es sensible solo para un rango de frecuencias, ya que para frecuencias muy bajas y frecuencias sobre los 40 [Hz], el perfil  $U(y)$  obtenido es similar al perfil sin forzamiento.

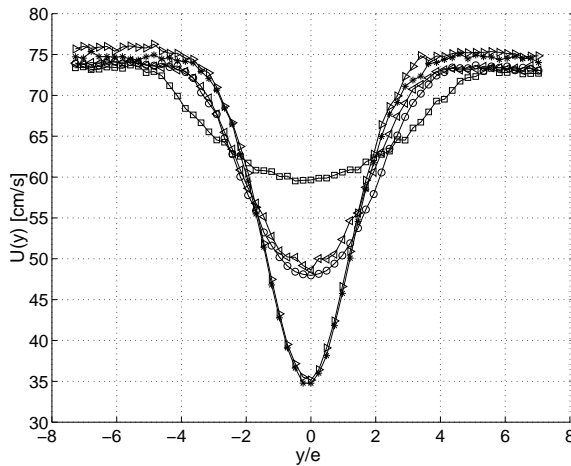


Figura 4.25: Perfiles de velocidad  $U(y)$  experimentales para distintas frecuencias de forzamiento  $f_0$ : \*, 1 [Hz]; o, 18 [Hz]; □, 25 [Hz]; ◁, 33 [Hz]; ▷, 44 [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$

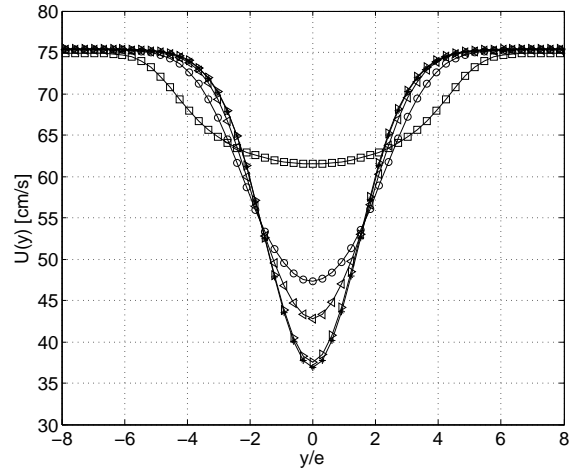


Figura 4.26: Perfiles de velocidad  $U(y)$  de simulaciones para distintas frecuencias de forzamiento  $f_0$ : \*, 2 [Hz]; o, 10 [Hz]; □, 20 [Hz]; ◁, 33.33 [Hz]; ▷, 40 [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$

Además se observa que en ambos casos existe una frecuencia de resonancia ( $f_r$ ), donde la estela aumenta su velocidad en el centro y el ancho del perfil se incrementa notablemente. Para el caso experimental esta frecuencia se encuentra cercana a los  $f_r \approx 25$  [Hz], mientras que para las simulaciones se ubica alrededor de los  $f_r \approx 20$  [Hz].

Calculando el valor cuadrático medio para los perfiles  $U(y)$ , es posible determinar las fluctuaciones de velocidad para la diferentes frecuencias de forzamiento. En las figuras 4.27 y 4.28 se observan los perfiles de velocidad  $U(y)_{rms}$  tanto experimental como simulados a diferentes frecuencias  $f_0$ , para número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Los perfiles  $U(y)_{rms}$ , fueron normalizados por el perfil sin forzamiento  $U_0$  respectivo.

Se aprecia que existen dos máximos para cada frecuencia, los cuales se presentan en forma simétrica con respecto al eje, estos máximos se ubican a una distancia aproximada de un espesor ( $1e$ ), salvo para la frecuencia de resonancia  $f_r$ . Esto ocurre tanto para el caso experimental como para el numérico.

En  $f_r$  se observa un desplazamiento notorio, ubicándose el máximo a una distancia de tres espesores ( $3e$ ). Se aprecia también que las máximas fluctuaciones alcanzan valores cercanos al 20% con respecto al perfil sin forzamiento  $U_0$ , con una diferencia de 4 unidades entre el caso experimental con el numérico. Además para la frecuencia de resonancia  $f_r$ , el forzamiento al alerón presenta mayor amplificación en la estela.

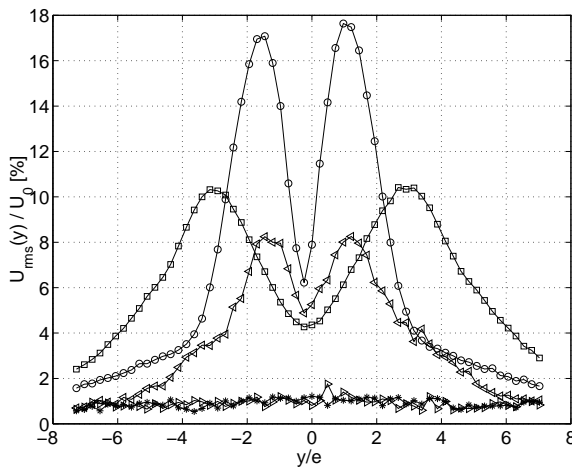


Figura 4.27: Perfiles de velocidad  $U(y)_{rms}/U_0$  experimentales para distintas frecuencias de forzamiento  $f_0$ : \*, 1 [Hz]; o, 18 [Hz]; □, 25 [Hz]; ◁, 33 [Hz]; ▷, 44 [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$

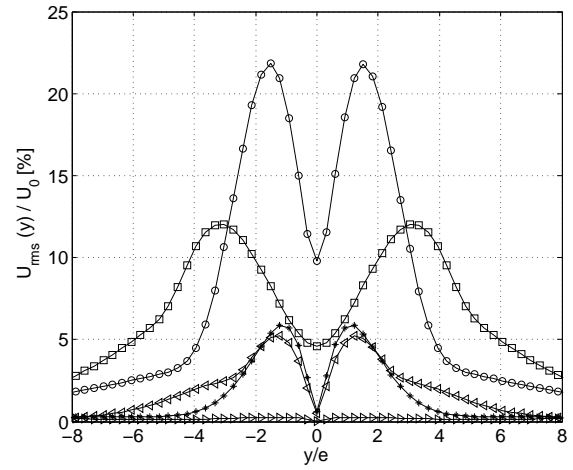


Figura 4.28: Perfiles de velocidad  $U(y)_{rms}/U_0$  de simulaciones para distintas frecuencias de forzamiento  $f_0$ : \*, 2 [Hz]; o, 10 [Hz]; □, 20 [Hz]; ◁, 33.33 [Hz]; ▷, 40 [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$

De acuerdo a lo señalado en [7], es conveniente dividir la velocidad de un fluido en dos componentes, en su velocidad media  $U(y)$  y otra dependiente del tiempo que represente las fluctuaciones de velocidad  $u(y,t)$ :

$$U(y,t) = U(y) + u(y,t) \quad (4.6)$$

Luego la energía cinética asociada al fluido es proporcional al cuadrado de la velocidad, por lo que se tiene:

$$E = \frac{1}{2} (U^2(y) + 2U(y)u(y,t) + u^2(y,t)) \quad (4.7)$$

En las figuras 4.29, 4.30, 4.31 y 4.32 se observan los contornos de iso-energía cinética, para un

número de Reynolds  $Re_e = 83$  y  $Re_e=124$ , considerando la componente correspondiente a las fluctuaciones de energía ( $\langle u^2 \rangle_{y,t}$ ). Se utilizó la velocidad  $(U(y)_{rms})^2$ , ya que es equivalente al término anterior pero sin normalización.

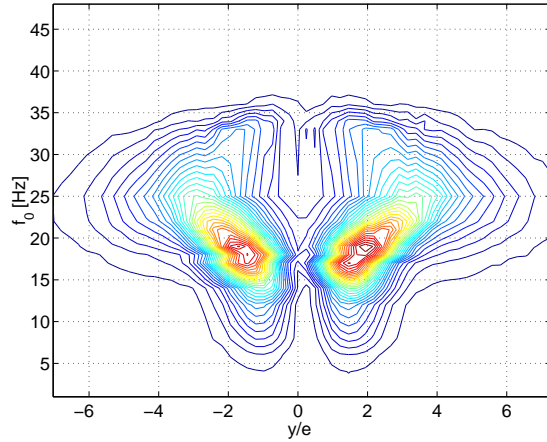


Figura 4.29: Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso experimental, en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$  y el eje vertical normalizado  $y/e$ . Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

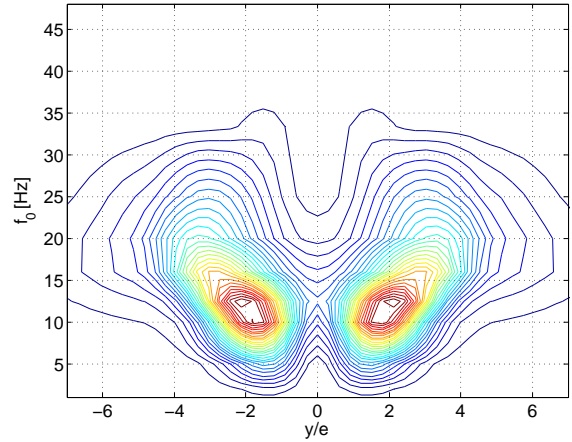


Figura 4.30: Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso numérico, en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$  y el eje vertical normalizado  $y/e$ . Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

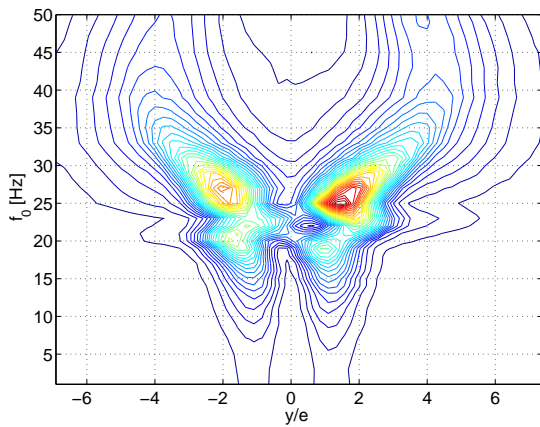


Figura 4.31: Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso experimental, en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$  y el eje vertical normalizado  $y/e$ . Número de Reynolds  $Re_e=124$ .

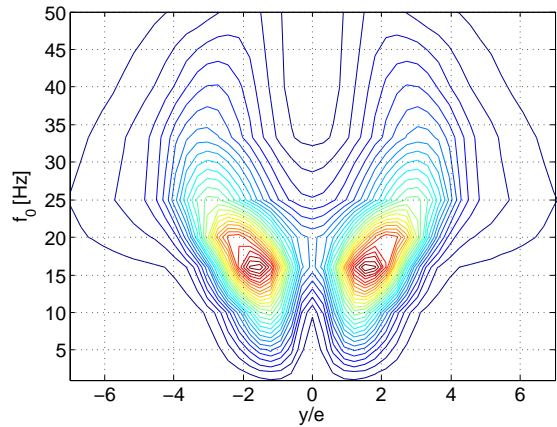


Figura 4.32: Contorno de energía de fluctuaciones de velocidad caso numérico, en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$  y el eje vertical normalizado  $y/e$ . Número de Reynolds  $Re_e=124$ .

En estas figuras se observa la frecuencia de resonancia  $f_r$ , donde las fluctuaciones de velocidad alcanzan su mayor extensión a lo largo del eje  $y$ . Además para  $Re_e = 83$  se observan zonas de máxima energía de fluctuación de velocidad en  $y/e = \pm 1.5$ , estas ocurren a 17 [Hz] y 10 [Hz], para los casos experimental y numérico respectivamente. Esta frecuencia, que se denominó  $f_v$ , corresponde a



otra frecuencia de resonancia, cuyo valor es la mitad de la frecuencia de desprendimiento de vórtices (resultados obtenidos por [7]).

Se aprecia que la zona de alta energía de fluctuación de velocidad, a medida que aumenta la frecuencia se desplaza alejándose del origen y disminuyendo su intensidad. En la frecuencia  $f_r$ , alcanza su máximo desplazamiento ubicándose en  $y/e = \pm 3$ .

Los resultados numéricos, contrastados con los resultados experimentales, muestran que la estela se comporta de forma similar, pero a frecuencias menores. Este fenómeno se puede asociar a que el movimiento del alerón en el caso experimental corresponde a una oscilación armónica de la forma:

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin(2\pi f_0 t) \quad (4.8)$$

Donde  $\alpha_m$  corresponde al ángulo que caracteriza la amplitud y  $f_0$  la frecuencia del movimiento de rotación del alerón. Mientras que en el caso numérico, el movimiento del alerón corresponde a una aproximación del caso experimental, ya que como el ángulo  $\alpha_m$  es pequeño, es posible aproximar la función de forzamiento a una oscilación vertical de la forma:

$$Y(t) = A \sin(2\pi f_0 t) \quad (4.9)$$

Donde la amplitud  $A$  es pequeña. Dados los resultados obtenidos es de suponer que el tipo forzamiento del alerón, en el caso numérico, genera que el alerón obstruya mayor fluido que el forzamiento en el caso experimental. Por lo que la respuesta de la estela al forzamiento se modifica.

Para comparar el comportamiento temporal de la estela, se estudió los contornos de iso-velocidad para la frecuencia de forzamiento  $f_r$  correspondiente en cada caso. Se utilizó  $f_0 = 25$  [Hz] para el caso experimental y  $f_0 = 20$  [Hz] en el caso numérico, ambos en  $Re_e = 83$ . Los datos registrados corresponden a la región señalada en la sección 4.5. En las figuras 4.33 y 4.34 se aprecian los contornos de iso-velocidad donde el eje temporal  $t$  medido en segundos se multiplicó con la frecuencia, de tal forma de obtener una cantidad adimensional que representa el número de oscilaciones que ha realizado el alerón, mientras que el eje de coordenadas se normalizó por el espesor del alerón. Además los perfiles de velocidad se normalizaron por el perfil de velocidad sin forzamiento  $U_0$ .

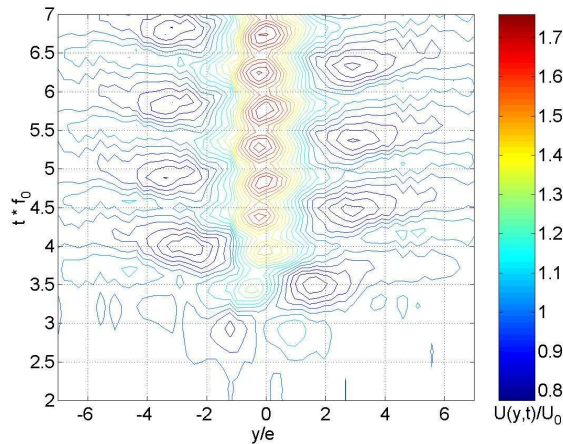


Figura 4.33: Contorno de iso-velocidad  $U(y,t)$  normalizado por  $U_0$ , caso experimental. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 25$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

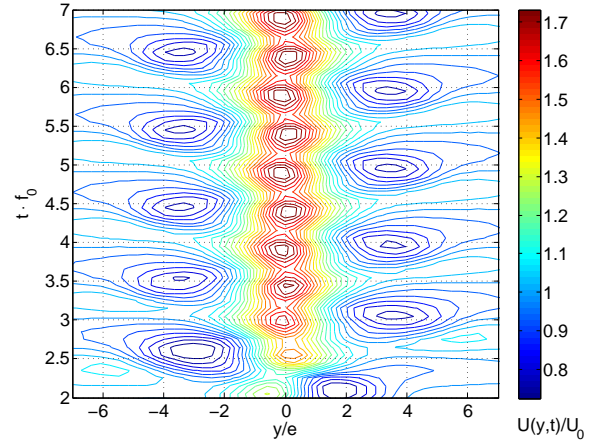


Figura 4.34: Contorno de iso-velocidad  $U(y,t)$  normalizado por  $U_0$ , caso numérico. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

En estas figuras se observa que los contornos de iso-velocidad experimental y numérico muestran similar comportamiento. En ambos se presentan estructuras de velocidad baja (formas circulares de azul intenso), separados aproximadamente cada un periodo de oscilación. Además estas estructuras se ubican a 3 espesores en ambos sentidos, tanto para el caso experimental como para el caso numérico. En el centro se encuentran estructuras de alta velocidad, las cuales ocurren al doble de la frecuencia de forzamiento  $f_0$ , esto se debe a que estas estructuras son generadas junto con las estructuras de baja velocidad y se alinean para la frecuencia de resonancia  $f_r$ . Además la escala de velocidad es similar en ambos casos, donde los valores mínimos están cercanos a 0,8 veces la velocidad sin forzamiento  $U_0(y)$  y los máximos a 1,7  $U_0(y)$ .

Se observa que el tiempo que demora la estela en alcanzar un estado periódico constante en el caso numérico es diferente que el caso experimental. Esto puede ser asociado a que experimentalmente existe un tiempo de reacción entre el momento de registro de datos y el inicio de forzamiento del alerón.

## Capítulo 5

# Resultados y análisis

### 5.1. Estelas bajo régimen forzado

Según los resultados obtenidos en 4.6 y por [7], existen dos frecuencias de resonancia  $f_v$  y  $f_r$ . En las figuras 5.1 y 5.2 se grafican los contornos de iso - velocidad en el tiempo a distancia  $x/e = 30.3$  para ambas frecuencias y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

En estas figuras se aprecia la formación de estructuras pareadas de alta y baja velocidad, alternadas a una frecuencia igual a  $f_0$ . Se aprecia que para el caso  $f_0 = 20$  [Hz], se produce el alineamiento de las estructuras de alta velocidad y a la vez las estructuras de baja velocidad se desplazan alejándose del eje central. Además comparado con el caso de  $f_0 = 10$  [Hz] se alcanzan mayores velocidades.

A partir de estos resultados es posible comprender de mejor forma la figura 4.30. Como se puede apreciar en el caso de 10 [Hz], los mayores cambios de velocidad en el eje temporal corresponden a la posiciones  $y/e = \pm 1$ . En esas posiciones se intercalan espacios de tiempo donde la velocidad se reduce con respecto al perfil sin forzar (sectores azules) con intervalos de tiempo donde la velocidad aumenta de forma considerable (sectores rojos). En consecuencia para estas posiciones se producen las mayores fluctuaciones de velocidad.

Para el caso forzado a 20 [Hz], figura 4.30, tenemos que las mayores fluctuaciones de velocidad se producen en  $y/e = \pm 3$ . Como se puede ver en la figura 5.2, se produce el alineamiento de las zonas de alta velocidad. Por tanto ahora las mayores fluctuaciones se ubican en  $y/e = \pm 3$ , donde la velocidad varía hasta un 20 % la velocidad en el caso sin forzar.

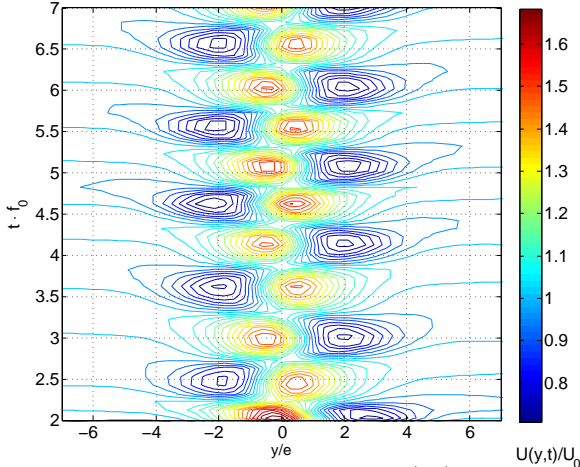


Figura 5.1: Contorno de iso-velocidad  $U(y,t)$  normalizado por  $U_0$ . Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 10$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

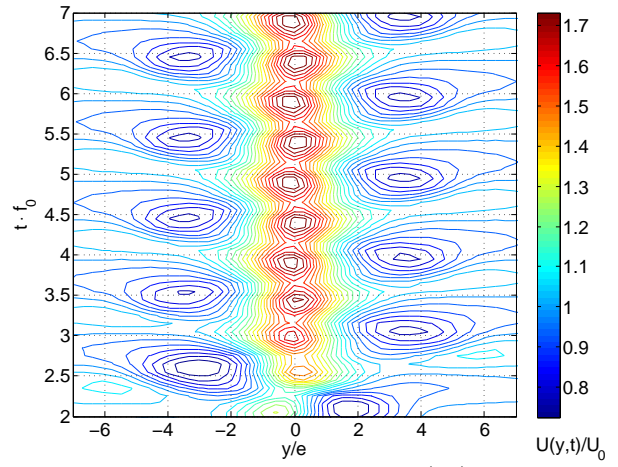


Figura 5.2: Contorno de iso-velocidad  $U(y,t)$  normalizado por  $U_0$ . Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

## 5.2. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre, corresponde a la fuerza generada por la fricción entre un sólido y un fluido. Esta fuerza es aplicada al objeto en el sentido contrario al sentido del movimiento del flujo.

De acuerdo a lo señalado en la sección 2.1.4, una forma de determinar la fuerza de arrastre ( $D$ ) es a partir del perfil de velocidad de la estela a una distancia agua abajo:

$$D = b\rho \int_{y=0}^{\infty} u(U_{\infty} - u) dy \quad (5.1)$$

Calculando la fuerza de arrastre según lo anterior y utilizando el perfil de velocidad del eje central para distintas distancias aguas abajo, se obtiene el gráfico 5.3, donde se observa la fuerza de arrastre en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$ , calculada según la expresión 5.1, donde la fuerza de arrastre es normalizada por el arrastre para el caso sin forzamiento ( $D_0$ ).

Se observa que el cálculo de la fuerza de arrastre es dependiente de la distancia aguas abajo en el flujo. A medida que se aleja del borde de salida del alerón se observa que las curvas de arrastre toman un comportamiento similar. Estas curvas muestran la existencia de un mínimo en  $f_0 = 20$  [Hz], que coincide con la frecuencia de resonancia  $f_r$ .

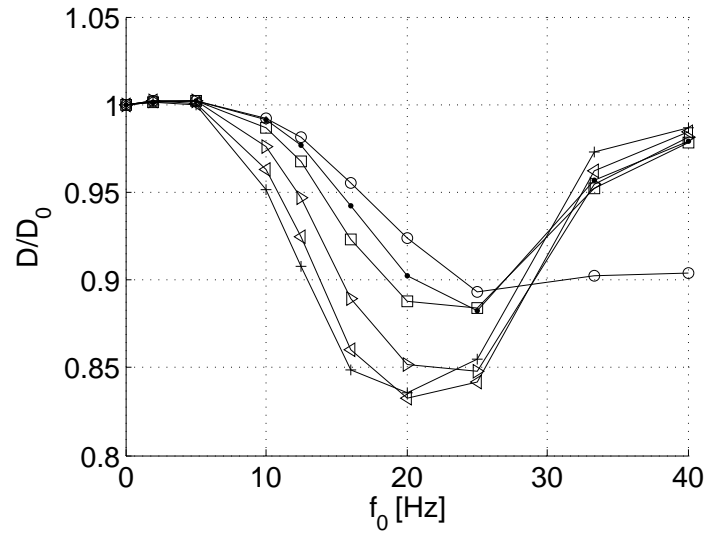


Figura 5.3: Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento  $D/D_0$  en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$  calculada con diferentes distancias aguas abajo:  $\circ$ : 0.97  $e$ ;  $\bullet$ : 4.90  $e$ ;  $\square$ : 10.06  $e$ ;  $\triangleright$ : 20.06  $e$ ;  $\triangleleft$ : 30.36  $e$ ;  $+$ : 40.06  $e$ . Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

También se estudió la fuerza de arrastre para distintos números de Reynolds, en la figura 5.4 se muestra la relación de la fuerza de arrastre con la frecuencia de forzamiento calculada según la teoría de perfil plano a una distancia de  $x/e=30.3$  para número de Reynolds  $Re_e = 83$  y  $Re_e=124$ .

Se observa que la fuerza de arrastre es dependiente del número de Reynolds, ya que el mínimo se traslada a una frecuencia mayor (33.3 [Hz]) para  $Re_e = 124$ , que corresponde a la frecuencia de resonancia para este régimen. Además se modifica la reducción del arrastre, puesto que para  $Re_e = 83$  la fuerza de arrastre se reduce más del 15 %, mientras que para  $Re_e=124$  alrededor del 12 %. Este resultado nos indica, mirando el sistema placa plana - alerón como un objeto en movimiento, que es requerida menor energía para impulsar un objeto, si este oscila a la frecuencia óptima  $f_r$  de acuerdo la velocidad a la que se desplaza.

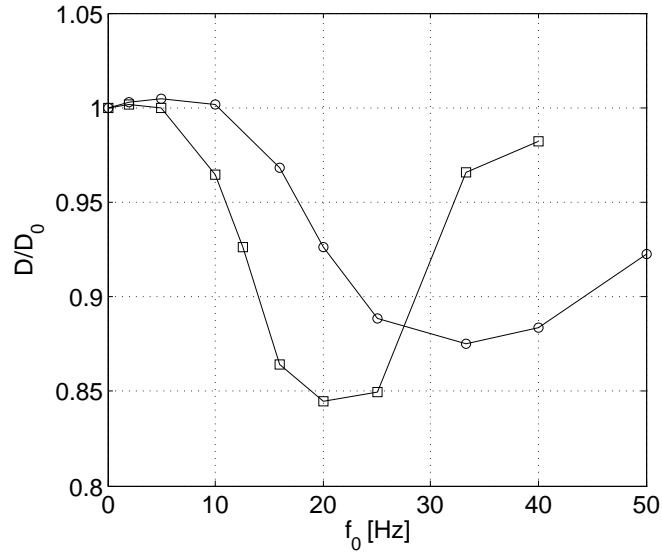


Figura 5.4: Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento  $D/D_0$  en función de la frecuencia de forzamiento calculada a  $x/e = 30,3$ : □,  $Re_e = 83$ ; ○,  $Re_e = 124$ .

La realización de simulaciones, permite obtener información en regiones que experimentalmente no son posibles. Esta cualidad hace posible calcular la fuerza de arrastre utilizando su definición:

$$D = \int_S (-p\delta + \tau) ds \quad (5.2)$$

En la figura 5.5 se muestra la dependencia de la fuerza de arrastre  $D$  con la frecuencia de forzamiento  $f_0$  del alerón, para un número de Reynolds  $Re_e = 83$  y calculada de acuerdo a lo señalado anteriormente. Este resultado se obtuvo a partir del promedio de la fuerza de arrastre para un periodo de oscilación del alerón. Se aprecia que el arrastre presenta dos mínimos, que corresponden a la frecuencia viscosa  $f_v = 10$  [Hz] y a la frecuencia de resonancia  $f_r = 20$  [Hz]. Para estas frecuencias la fuerza de arrastre se reduce aproximadamente un 13 %.

Las figuras 5.3 y 5.5 muestran un comportamiento diferente de la fuerza de arrastre en  $Re_e = 83$ . Esto se puede asociar que en el caso de la figura 5.3 se calcula en base a un perfil de velocidad que pasa por el eje central de la estela, mientras que en la segunda figura, el arrastre es calculado a partir de los datos de presión y velocidad de toda la superficie, utilizando mayor información que en el primer caso.

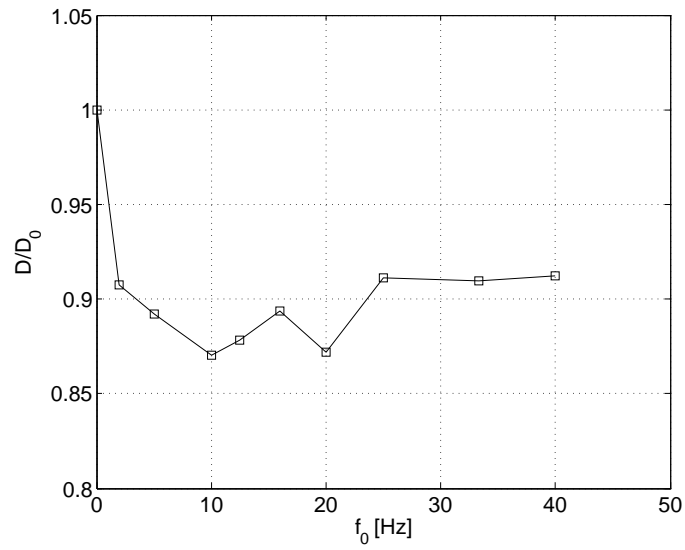


Figura 5.5: Fuerza de arrastre normalizada por arrastre sin forzamiento  $D/D_0$ , en función de la frecuencia de forzamiento  $f_0$ :  $\square$ ,  $Re_e = 83$ .

### 5.3. Ancho de la estela aguas abajo

Con el objetivo de investigar el comportamiento de la estela, se llevó a cabo el estudio de la dependencia que tiene el ancho de la estela  $\Lambda$  con la distancia aguas abajo (coordenada  $x$ ). Para realizar esto se registró datos de velocidad en el espacio representado por la figura 5.6, vale decir un plano contenido en el plano  $xy$  tomando como origen el borde de salida del sistema placa plana - alerón (zona coloreada azul en figura 5.6).

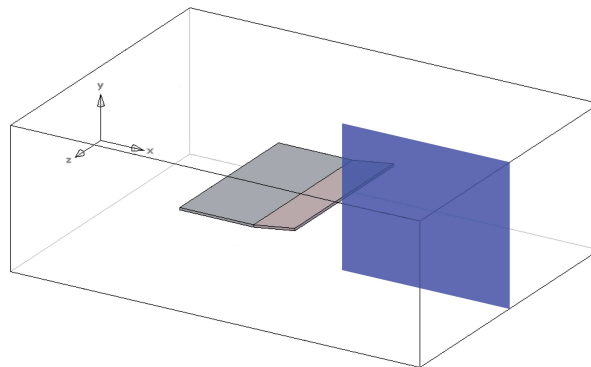


Figura 5.6: Esquema zona de registro de datos (en color azul) para la dependencia del ancho de la estela con la distancia aguas abajo.

Se utilizó para el ancho de la estela  $\Lambda(x)$  la misma definición descrita en la sección 4.5 (ver ecuación 4.3), aplicada sobre el perfil de velocidades promediados temporalmente. El periodo de tiempo considerado corresponde al intervalo donde la estela presenta un comportamiento periódico estable. En la figura 5.7 se muestra un esquema representativo, en dos dimensiones, de los perfiles de velocidad y anchos de la estela para diferentes distancias aguas abajo en el flujo, a partir del borde de salida del alerón.

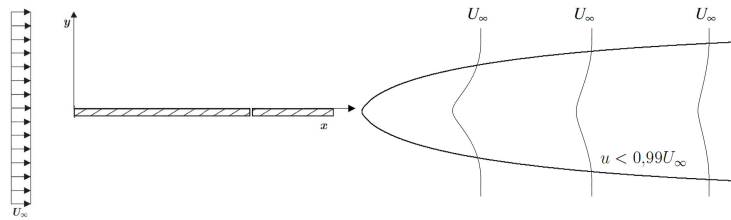


Figura 5.7: Representación en 2D de perfiles de velocidad aguas abajo en el flujo.

En la figura 5.8 se observa la evolución del ancho de la estela  $\Lambda(x)$  aguas abajo a partir del borde de salida, para los casos: sin forzamiento, 10 [Hz] y 20 [Hz]. Donde  $\Lambda(x)$  se normalizó por el espesor  $e$  y el eje de coordenadas  $x$  se normalizó por el largo del sistema placa plana - alerón  $L$ . Estas simulaciones fueron realizadas para un número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

En esta figura se observa que el ancho de la estela  $\Lambda(x)$ , desde el origen a una distancia  $x/L \approx 0,25$  posee un comportamiento lineal, el cual acompaña al perfil plano y es dependiente de la frecuencia de oscilación del alerón. Luego en un tramo posterior a  $x/L \approx 0,25$  la estela mantiene un ancho constante. Finalmente desde  $x/L \approx 0.4-0.6$  hacia adelante el ancho de la crece nuevamente de forma lineal. Esto no ocurre en el caso sin forzamiento donde se mantiene constante a partir de  $x/L \approx 0,25$ .



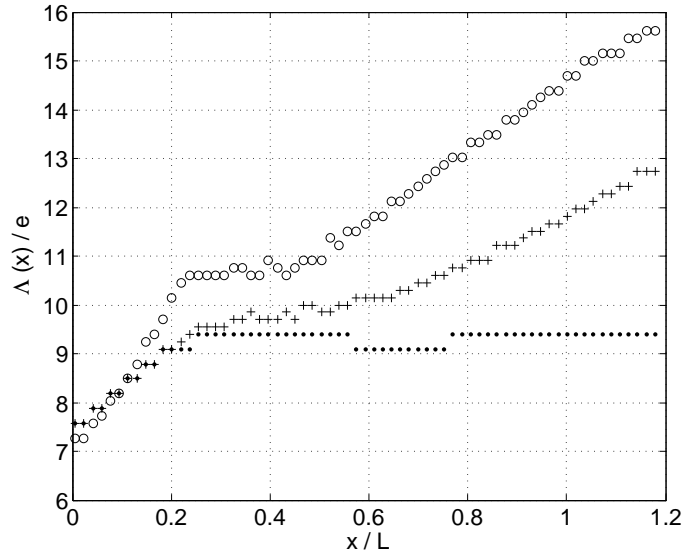


Figura 5.8: Ancho de la estela normalizada por el espesor  $e$  en función de la distancia aguas abajo  $x$ , tomada desde el borde de salida, normalizado por el largo del sistema placa plana - alerón  $L$ . Para los casos: •, sin forzamiento; +,  $f_v = 10$  [Hz]; o,  $f_r = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

En las figuras 5.9 , 5.10 y 5.11 se observa la dependencia del ancho de la estela  $\Lambda(x)$  con la distancia aguas abajo, en este caso se han ajustados las curvas que mejor representen el comportamiento de la estela para los diferentes casos. Se puede observar que la tasa de crecimiento en el primer tramo (hasta  $x/L \approx 0.2$ ) es considerablemente mayor a la tasa de crecimiento de la estela en el último tramo.

Para la frecuencia de resonancia  $f_r = 20$  [Hz], figura 5.10, se observa que a  $x/L \approx 0,25$  y  $x/L \approx 0,4$  existen cambios de pendiente definidos. Mientras que para el caso de la frecuencia  $f_v = 10$  [Hz], figura 5.10, estos cambios se ubican en  $x/L \approx 0,25$  y  $x/L \approx 0,6$ .

Se aprecia que para  $f_r$  el ancho de la estela crece siempre a una tasa mayor que para  $f_v$ , si además de esto, son considerando los resultados obtenidos en 4.6, es de suponer que para  $f_r$  el ancho de la estela es mayor que para el resto de la frecuencias independiente de la distancia aguas abajo.

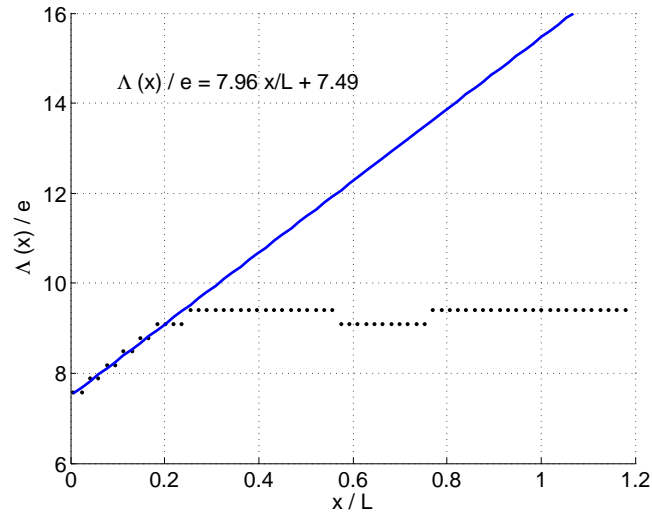


Figura 5.9: Ancho de la estela normalizada por el espesor  $e$  en función de la distancia aguas abajo  $x$ , tomada desde el borde de salida, normalizado por el largo del sistema placa plana - alerón  $L$ . Para el caso alerón sin forzamiento y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

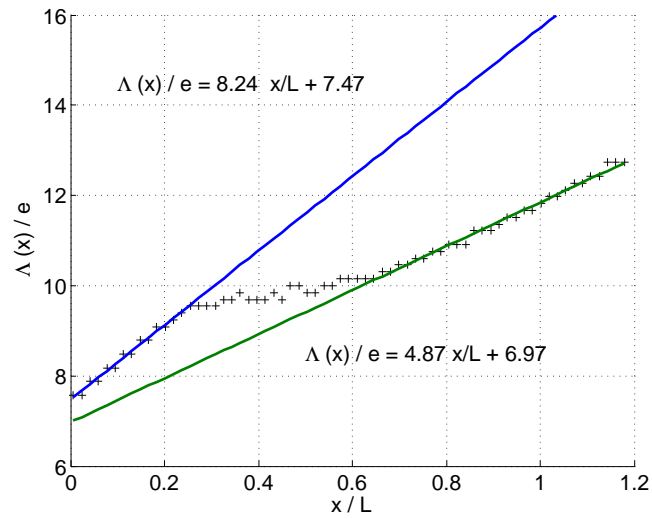


Figura 5.10: Ancho de la estela normalizada por el espesor  $e$  en función de la distancia aguas abajo  $x$ . Para el caso  $f_v = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

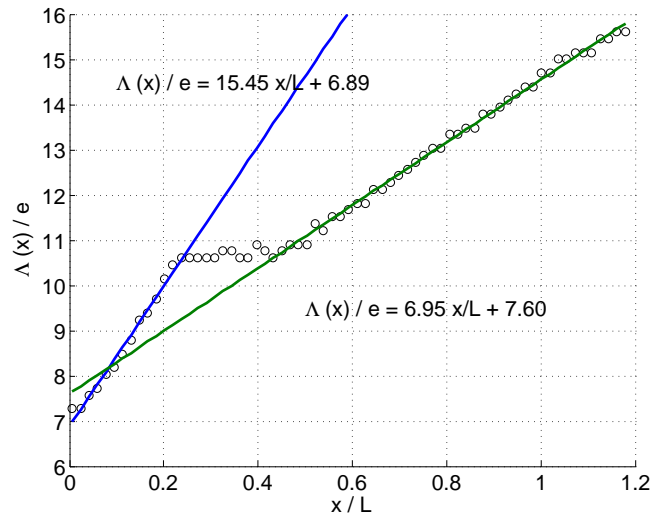


Figura 5.11: Ancho de la estela normalizada por el espesor  $e$  en función de la distancia aguas abajo  $x$ . Para  $f_r = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

#### 5.4. Simulaciones numéricas con sustancia escalar pasiva

En esta sección se analizará la interacción de una sustancia escalar pasiva con estelas generadas por el sistema placa plana - alerón. Una sustancia escalar pasiva corresponde a una cantidad que tiene magnitud pero no una dirección en el espacio. Además no modifica los campos de velocidad y presión del fluido en el que está inserto.

Para todos los casos expuestos, se utilizó monóxido de carbono ( $CO$ ) como sustancia escalar pasiva. En la tabla 5.1 se muestra un resumen de sus propiedades físicas.

Tabla 5.1: Propiedades físicas del monóxido de carbono.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1,1233	$[kg/m^3]$
Cp	1043	$[J/(kgK)]$
Conductividad térmica	0,025	$[W/mK]$
Viscosidad	1,75E-05	$[kg/ms]$
Peso molecular	28,01055	$[kg/kg_{mol}]$

De tal forma que en el volumen de control se tendrá una mezcla aire - monóxido de carbono cuyas propiedades de mezcla son las listadas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Propiedades físicas de la mezcla aire - monóxido de carbono.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad mezcla	ley de mezcla en base a fracción volumétrica	$[kg/m^3]$
Difusividad másica	2,88E-05	$[m^2/s]$

Se eligió  $CO$ , ya que es uno de los gases que presenta densidad similar a la del aire y el número de Schmidt de la mezcla es igual a 0,541, es decir, existe mayor efecto difusivo, caso desfavorable para el transporte. Por tal motivo es posible estudiar la capacidad de transporte que tenga la estela.

#### 5.4.1. Caso N°1: Inyección de escalar en la mitad inferior de la sección de entrada

Este caso consiste en la inyección de monóxido de carbono en la sección de entrada de fluido, donde la inyección de escalar es solo en la parte inferior de la entrada, vale decir para  $y < 0$ . En la figura 5.12 se observa un esquema de la condición de borde impuesta, donde la zona enrojecida representa concentración de  $CO$  igual a 1.

En el software Fluent para definir las zonas inyección de escalar se debe crear una UDF, programada en lenguaje C, en este código se debe indicar la concentración (entre 0 y 1) y en qué zonas de la cara será aplicada. Para este caso se configuró que la sección de entrada tuviera  $c_{CO} = 1$  para  $y < 0$ . En la sección A.3 del anexo se encuentra la UDF utilizada para estas simulaciones.

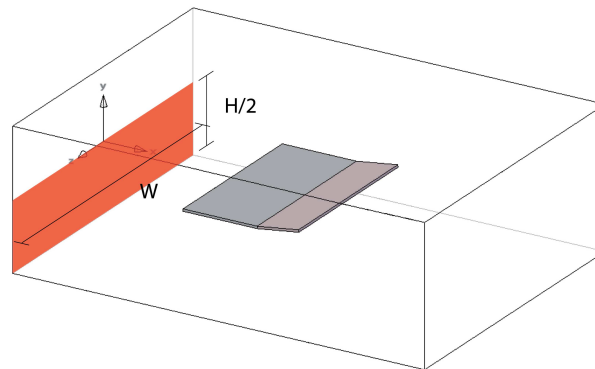


Figura 5.12: Esquema condición de inyección caso número 1: Inyección de  $CO$  en la mitad inferior de la sección de entrada (zona roja).

Para realizar el estudio del comportamiento de monóxido de carbono, primero se dejó simulando sin forzamiento del alerón hasta que el volumen de control quedara lleno de monóxido en su mitad in-

ferior y la estela alcanzara un régimen periódico estable. Una vez alcanzado este estado, se procedió a forzar el alerón a las frecuencias  $f_v = 10$  [Hz] y  $f_r = 20$  [Hz], para un número de Reynolds de  $Re_e = 83$ .

En las figuras 5.13 y 5.14 se visualiza en tres dimensiones de la distribución de sustancia escalar pasiva en la estela dado un forzamiento de alerón a 10 [Hz] y 20 [Hz] respectivamente. Donde en verde se representa el iso-contorno de concentración y en azul el alerón.

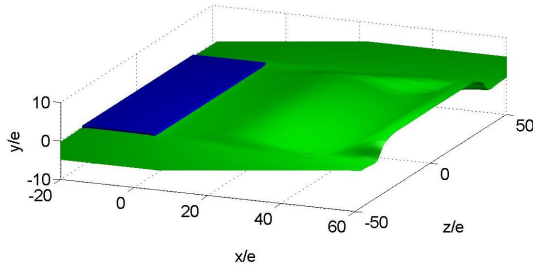


Figura 5.13: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0.5$  (verde) para  $0.4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 1 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . En azul se representa el alerón.

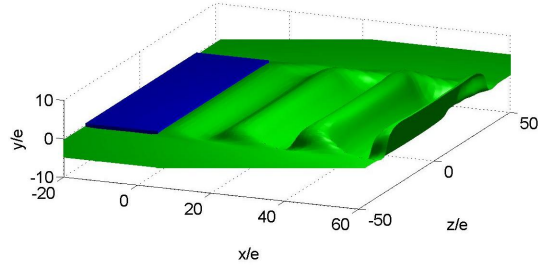


Figura 5.14: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0.5$  (verde) para  $0.4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 1 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . En azul se representa el alerón.

Primero se estudió los perfiles de concentración de sustancia escalar pasiva para diferentes tiempos para ambas frecuencias. En las figuras 5.15 y 5.16 se observan los perfiles de concentración a una distancia de  $x/e = 30,3$ . Para el caso de  $f_0 = 10$  [Hz], todos los perfiles presentan un comportamiento similar, con un punto de inflexión en  $c_{CO} = 0,5$ , mientras que para  $f_0 = 20$  [Hz] los perfiles se modifican de forma notoria con el tiempo, además se producen múltiples puntos de inflexión dependiendo el caso.

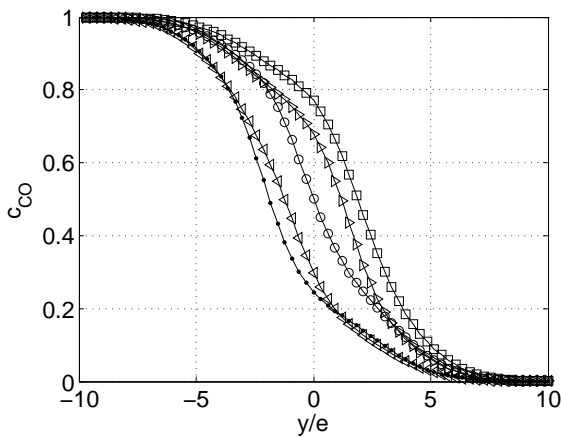


Figura 5.15: Perfiles de concentración de escalar pasivo a  $x/e = 30,3$  aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●: 0,2T; ○: 0,4T; □: 0,6T; ▷: 0,8T; ◁: 1T. Caso N°1.

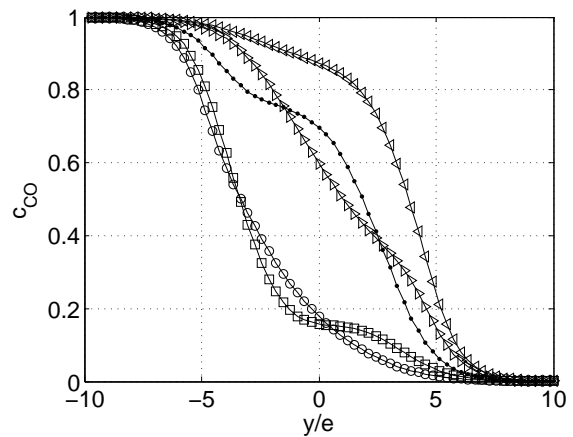


Figura 5.16: Perfiles de concentración de escalar pasivo a  $x/e = 30,3$  aguas abajo en el flujo para distintos tiempos Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●: 0,2T; ○: 0,4T; □: 0,6T; ▷: 0,8T; ◁: 1T. Caso N°1.

En las figuras 5.17 y 5.18 se observan los perfiles medios y  $rms$  respectivamente de concentración

de sustancia escalar. Se observa que el perfil promedio se modifica con la frecuencia de forzamiento, pero en el eje central ( $y = 0$ ), la concentración de escalar es la misma (en promedio) para ambas frecuencias. Con respecto a las fluctuaciones de concentración, se observa que para  $f_0 = 20$  [Hz] se tienen mayores valores a lo largo del eje  $y$ , además el ancho de las variaciones no se ve modificado de forma considerable.

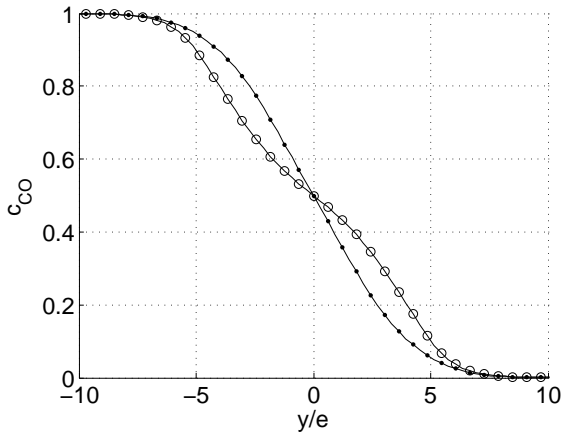


Figura 5.17: Perfil promedio de concentración de sustancia escalar a  $x/e = 30,3$ .  $\bullet$ :  $f_0 = 10$  [Hz];  $\circ$ :  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Caso N°1.

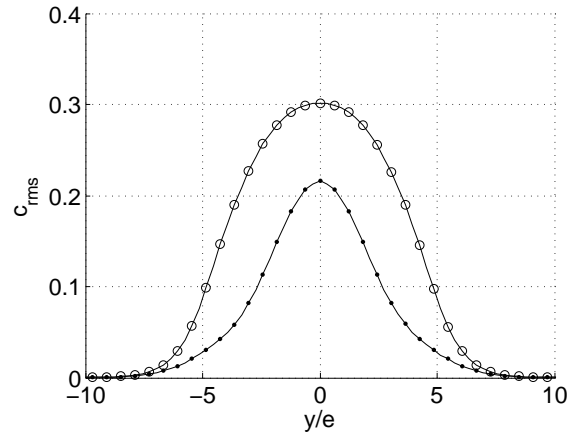


Figura 5.18: Perfil RMS de concentración de sustancia escalar a  $x/e = 30,3$ .  $\bullet$ :  $f_0 = 10$  [Hz];  $\circ$ :  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Caso N°1.

Luego se estudió del comportamiento de sustancia escalar pasiva en el plano  $xy$  aguas abajo a partir del borde de salida de alerón (ver figura 5.6).

En las figuras 5.19, 5.21, se observan los contornos de iso - concentración de  $CO$  para las frecuencias de forzamiento 10 [Hz] y 20 [Hz] respectivamente. Es posible observar la longitud de onda  $\lambda$  asociada a la oscilación de la estela. Donde a mayor frecuencia de oscilación menor es la longitud de onda asociada. Para el caso  $f_0 = 10$  [Hz] se tiene una longitud de onda  $\lambda \approx 35 x/e$ , mientras que para  $f_0 = 20$  [Hz] se tiene  $\lambda \approx 20 x/e$ .

Por otro lado para la frecuencia de resonancia  $f_r = 20$  [Hz], el valor de la longitud de onda se aproxima al largo del alerón  $b \approx 18,5 x/e$ . Este resultado concuerda con lo indicado por [7], que señala que para la frecuencia de resonancia se cumple que el número adimensional  $F = bf_r/U_\infty \approx 1$ , donde  $b$  es el largo del alerón. En las simulaciones realizadas, el valor de  $F$  más cercano a la unidad fue obtenido para  $f_0 = 20$  [Hz] ( $Re_e = 83$ ) con  $F = 0,87$ . Donde las diferencias con [7], se pueden asociar a factores como el tipo de movimiento del alerón (analizado anteriormente) o que la frecuencia de resonancia exacta se encuentre a un valor cercano a 20 [Hz].

En las figuras 5.20, 5.22 se muestran los contornos de iso - vorticidad para las frecuencias de forzamiento 10 [Hz] y 20 [Hz] respectivamente. En el plano  $xy$  y un número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

Se observa la formación de zonas de vorticidad de forma alternada con igual magnitud pero de signo contrario, que disminuyen su intensidad a medida que viajan aguas abajo.

Analizando los contornos de iso - vorticidad con los de iso - concentración de  $CO$ , se observa que existe una relación entre la difusión de sustancia escalar y las estructuras de vorticidad en la estela. Se puede apreciar que la interfaz aire -  $CO$  no permanece constante aguas abajo, sino que esta varía a medida que ocurren las ondulaciones en la estela. Por ejemplo en la figura 5.21 para  $x/e = 30$  se observa claramente que la distancia del contorno de  $c_{CO} = 0,9$  a  $c_{CO} = 0,5$  es menor que de la distancia del contorno de  $c_{CO} = 0,5$  a  $c_{CO} = 0,1$ . Este comportamiento puede ser explicado por la presencia de estructuras de vorticidad, que transportan una determinada cantidad de sustancia escalar pasiva, sin permitir mayor mezcla entre ella y el exterior. De esta forma las estructuras de vorticidad fuerzan el adelgazamiento o ensanche de la interfaz aire -  $CO$ .

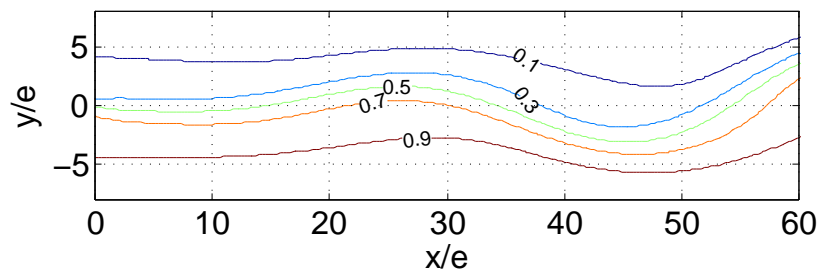


Figura 5.19: Contornos de iso - concentración de  $CO$  en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación  $t = 7,39$  [s].

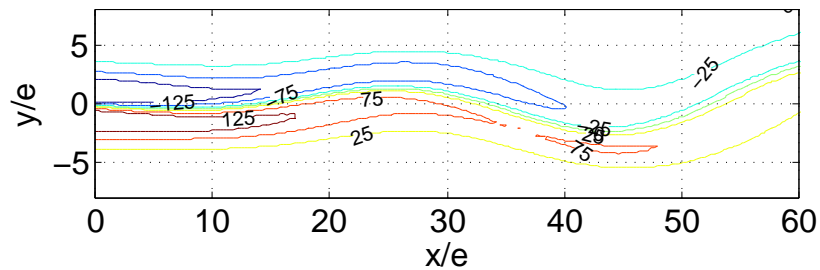


Figura 5.20: Contornos de iso - vorticidad en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación  $t = 7,39$  [s].

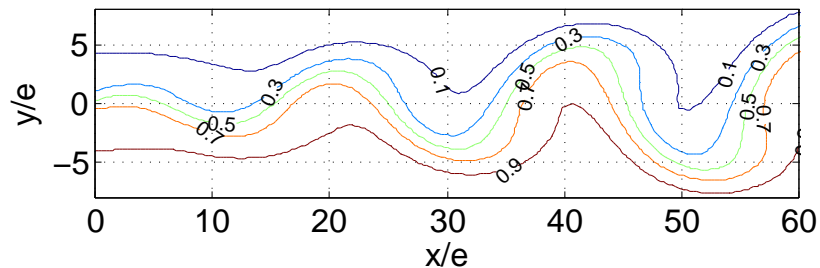


Figura 5.21: Iso - concentración de  $CO$  en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación  $t = 6,57$  [s].

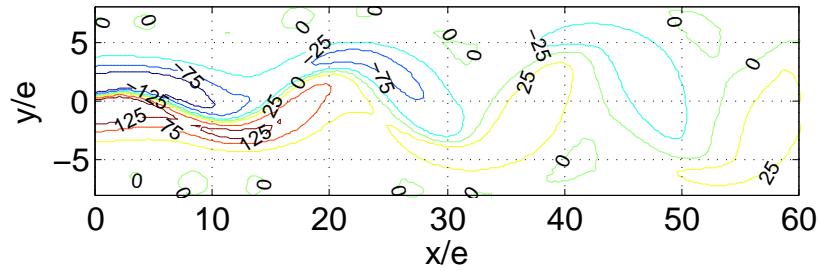


Figura 5.22: Contornos de iso - vorticidad en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Tiempo de simulación  $t = 6,57$  [s].

Otro aspecto que puede ser de interés, es estudiar la capacidad que tiene la estela de transportar  $CO$  desde el hemisferio inferior al superior, vale decir según la nomenclatura utilizada, de  $y < 0$  a  $y > 0$ .

En la figura 5.23 se observa la masa de  $CO$  existente en el hemisferio superior del volumen de control dependiente del tiempo, para 10 [Hz] y 20 [Hz].

Para ambas frecuencias se aprecian dos pendientes marcadas entre los 0 y 0,2 [s]. La primera, entre  $t = 0$  [s] y  $t = 0,1$  [s] se asocia al tiempo que demora la estela a alcanzar un comportamiento periódico, mientras que la segunda entre 0,1 y 0,2 [s] ya se alcanzó régimen periódico. Aquí se observa que la tasa de transporte de  $CO$  al hemisferio superior para  $f_0 = 20$  [Hz], es mayor que para 10 [Hz], esto se puede asociar que para  $f_0 = 20$  [Hz], la estela posee mayor ancho en el sentido vertical (visto en 5.3) y las zonas de vorticidad ocupan mayor volumen, por lo que el transporte de  $CO$  es mayor.

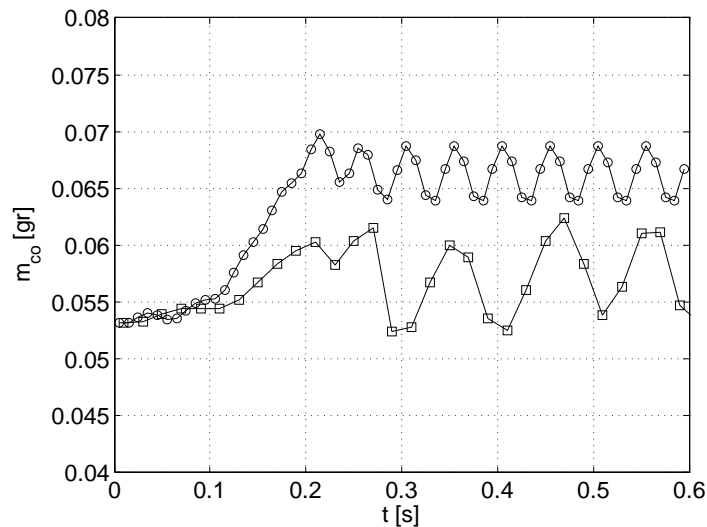


Figura 5.23: Masa de  $CO$  en el tiempo, para  $y > 0$ :  $\square$ ,  $f_0 = 10$  [Hz];  $\circ$ ,  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .



### 5.4.2. Caso N°2: Inyección de escalar en el borde de salida del alerón

El segundo caso simulado con inyección de sustancia escalar pasiva, consiste en inyectar monóxido de carbono en el borde de salida del alerón. Para realizar esto se impuso una condición de borde de concentración de  $CO$  igual a 1 sobre los últimos 5 [mm] ( $\approx 0,16 b$ ) en la superficie del alerón. En la figura 5.24 se muestra un esquema representativo de la condición de borde utilizada para la simulación, donde la superficie enrojecida representa donde se impone  $c_{CO} = 1$ .

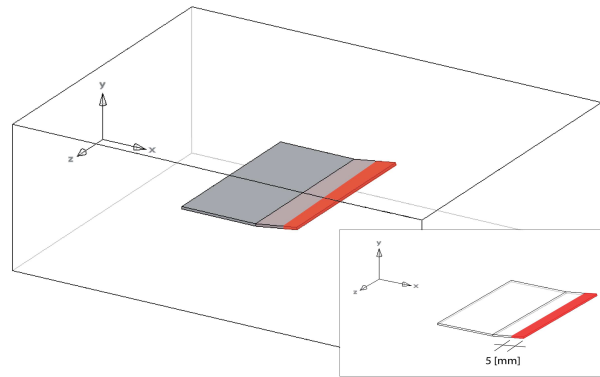


Figura 5.24: Esquema Caso N°2: Inyección de  $CO$  al borde de salida del alerón.

Para realizar el estudio del comportamiento de monóxido de carbono, primero se simuló hasta que la estela alcanzara un régimen periódico estable. Luego de alcanzar este estado, se procedió a imponer la condición de borde para la inyección de  $CO$ . Esto se realizó para las frecuencias de  $f_v = 10$  [Hz] y  $f_r = 20$  [Hz] y un número de Reynolds de  $Re_e = 83$ .

En las figuras 5.25 y 5.26 se observa una visualización en tres dimensiones de la distribución de sustancia escalar pasiva en la estela dado un forzamiento de alerón a 10 [Hz] y 20 [Hz] respectivamente. Donde en verde se representa el iso-contorno de concentración y en azul el alerón.

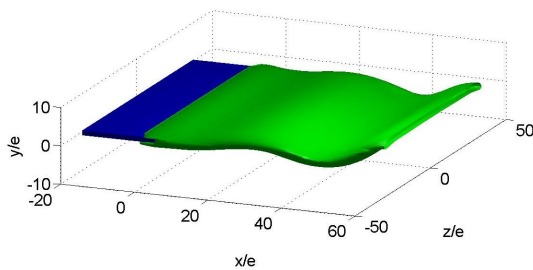


Figura 5.25: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0,05$  a  $0,4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 2 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ .

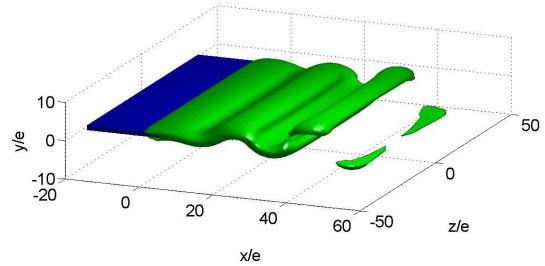


Figura 5.26: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0,05$  a  $0,4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 2 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ .

Primero se procedió a conocer la tasa de inyección de sustancia escalar pasiva, para ambas frecuencias (10 y 20 [Hz]). En las figuras 5.27 y 5.28 se muestra la masa total de  $CO$  en el volumen de simulación a medida que transcurre el tiempo. Se aprecia que en ambos casos se tiene un comportamiento lineal y luego alcanza un valor estacionario. Se alcanza régimen estacionario, dado que el monóxido de carbono alcanza las fronteras del volumen de simulación, por tanto la masa  $CO$  inyectada es igual a la masa de  $CO$  que sale del volumen de control.

Si en estas figuras solo se considera el tiempo en que el  $CO$  no ha alcanzado los límites del volumen de control, es posible calcular la tasa de inyección de sustancia escalar. Se observa que la tasa de inyección es levemente superior para  $f_0 = 20$  [Hz], lo cual indica que la inyección de escalar es dependiente de la frecuencia de forzamiento del alerón.

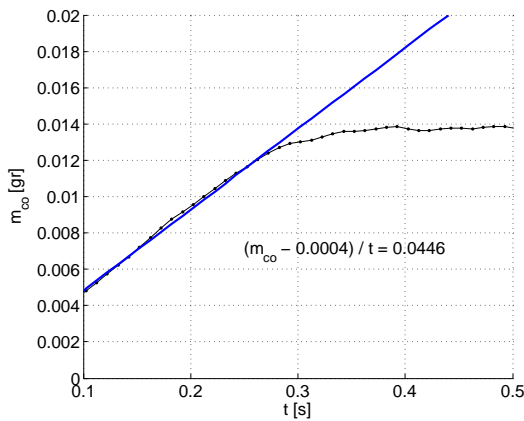


Figura 5.27: Masa total de  $CO$  en el tiempo para  $f_0 = 10$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

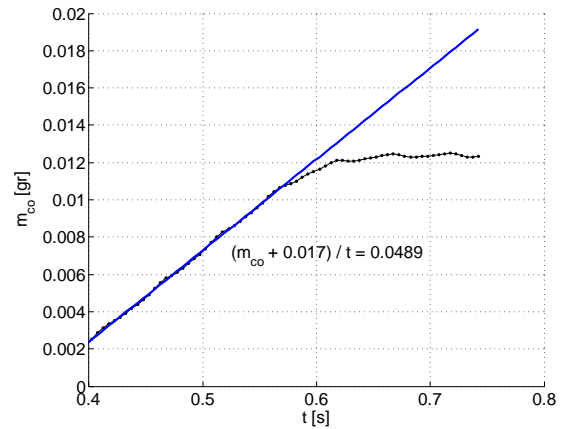


Figura 5.28: Masa total de  $CO$  en el tiempo para  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

En las figuras 5.29 y 5.30 se observan los perfiles de concentración a una distancia de  $x/e = 30,3$ .

Para el caso de  $f_0 = 10$  [Hz], los perfiles presentan una distribución tipo campana, la que se desplaza en el eje y dependiendo en que etapa de oscilación se encuentre el alerón. Se observa que el máximo de concentración de sustancia escalar oscila en  $\pm 2 e$ . Mientras que para  $f_0 = 20$  [Hz] se tiene que las máximas concentraciones se tienden a ubicar en  $\pm 3,5 e$ . La tendencia de los máximo a ubicarse a alturas definidas puede estar relacionada con la presencia de estructuras de vorticidad ya que como se observó en la sección 4.6, en la figuras 4.28 y 4.30, las máximas fluctuaciones de velocidad o energía ocurren en posiciones similares.

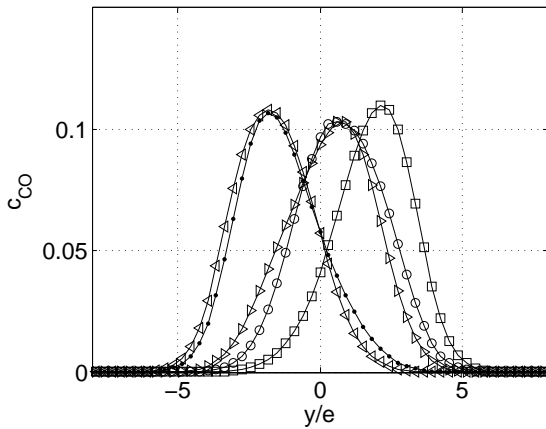


Figura 5.29: Perfiles de concentración de escalar pasivo a  $x/e = 30,3$  aguas abajo en el flujo para distintos tiempos. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\bullet$ : 0,2T;  $\circ$ : 0,4T;  $\square$ : 0,6T;  $\triangleright$ : 0,8T;  $\triangleleft$ : 1T. Caso N<sup>o</sup>2.

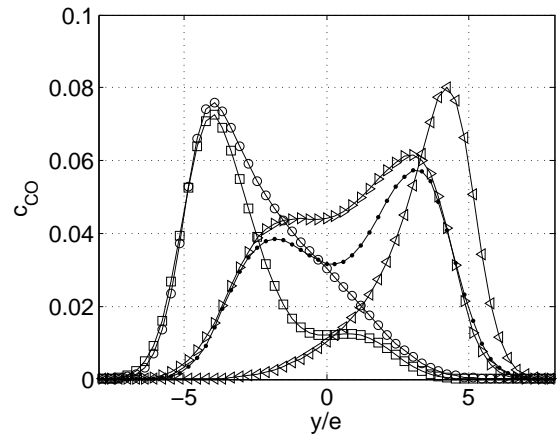


Figura 5.30: Perfiles de concentración de escalar pasivo a  $x/e = 30,3$  aguas abajo en el flujo para distintos tiempos. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\bullet$ : 0,2T;  $\circ$ : 0,4T;  $\square$ : 0,6T;  $\triangleright$ : 0,8T;  $\triangleleft$ : 1T. Caso N<sup>o</sup>2.

Además comparando ambos gráficos se observa que para la frecuencia de resonancia  $f_r$ , la estela se modifica en una zona más amplia la distribución de concentración de escalar. Esto se puede ver de mejor manera en las figuras 5.31 y 5.32 donde se visualiza el perfil de concentración promedio y *rms* para ambas frecuencias. El perfil promedio muestra que para la frecuencia de resonancia aumenta el intervalo con presencia de escalar pasivo. Por otro lado se observa que las curvas *rms* de concentración de sustancia escalar tienen similar comportamiento a las variaciones de velocidad vista en la sección 4.6, figura 4.28.

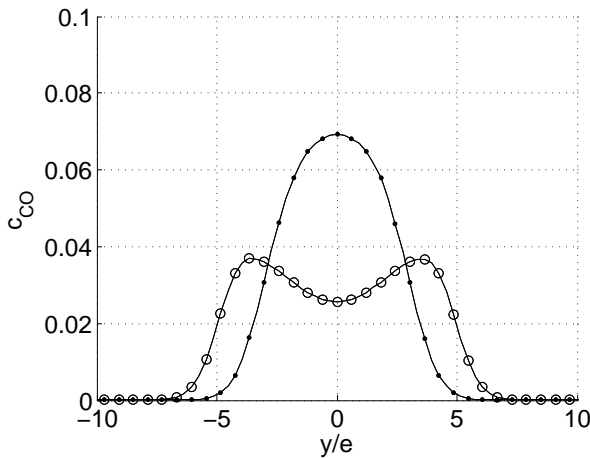


Figura 5.31: Perfil promedio de concentración de sustancia escalar a  $x/e = 30,3$ .  $\bullet$ :  $f_0 = 10$  [Hz];  $\circ$ :  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Caso N<sup>o</sup>2.

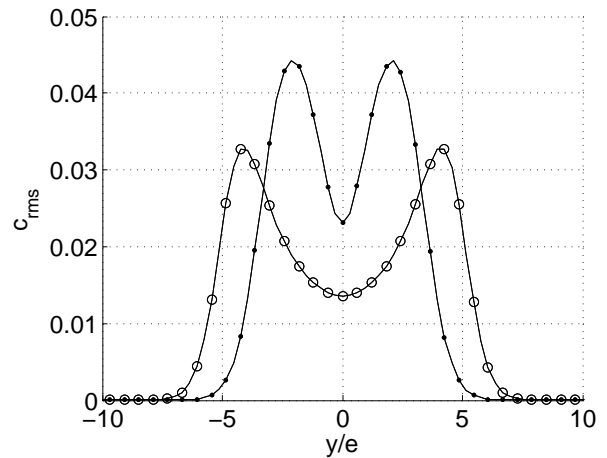


Figura 5.32: Perfil RMS de concentración de sustancia escalar a  $x/e = 30,3$ .  $\bullet$ :  $f_0 = 10$  [Hz];  $\circ$ :  $f_0 = 20$  [Hz]. Número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Caso N<sup>o</sup>2.

Luego se estudió el comportamiento de la sustancia escalar pasiva, pero ahora en el plano  $xy$  en el eje central ( $z = 0$ ) a partir del borde de salida del alerón.

En las figuras 5.33, 5.35 y 5.34, 5.36 se observan los contornos de iso - concentración de  $CO$  e iso - vorticidad respectivamente para ambas frecuencias. Se aprecia que el  $CO$  queda contenido al interior de la estela, siendo transportada aguas abajo por esta. Además la envolvente que limita la estela en las figuras de iso - concentración, tienen la misma estructura de la envolvente formada por los contornos de iso - vorticidad. Esto quiere decir que la estela está delimitada por la presencia de vorticidad.

También se observa que las estructuras de vorticidad, por ejemplo contornos de  $\pm 25$  en figura 5.36, transportan mayor concentración de  $CO$  en sus partes posteriores, lo cual está asociado al momento de formación y desprendimiento de las vorticidades. Además, estas estructuras de vorticidad pierden intensidad a medida que avanzan aguas abajo, lo que se traduce en una disminución sustancia escalar en su interior, la cual difunde aumentando el ancho de la estela.

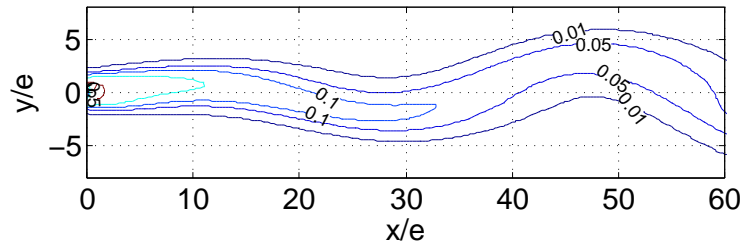


Figura 5.33: Contornos de iso - concentración de  $CO$  caso N° 2, en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

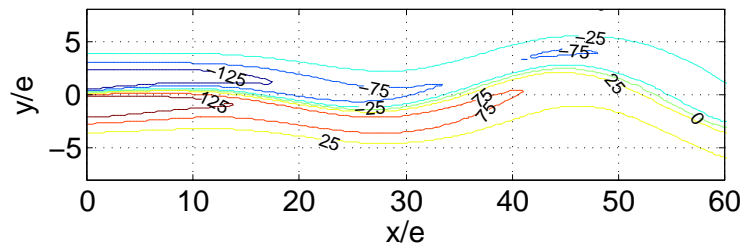


Figura 5.34: Contornos de iso - vorticidad caso N° 2, en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

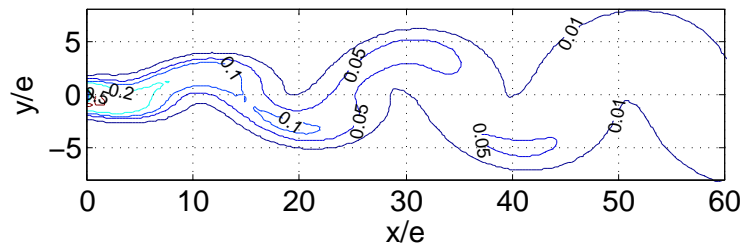


Figura 5.35: Contornos de iso - concentración de  $CO$  caso N° 2, en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

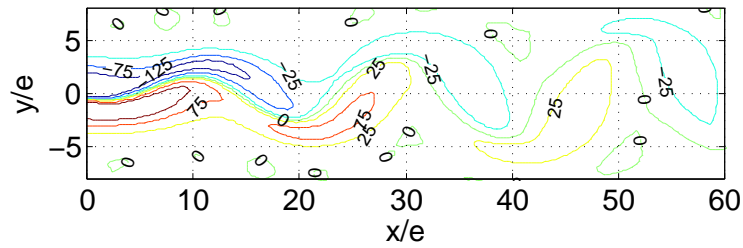


Figura 5.36: Contornos de iso - vorticidad caso N° 2, en el plano  $xy$ , para  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

Para ver si existe transporte de  $CO$  en los planos perpendiculares al flujo, se observó la distribución de sustancia escalar para distintos planos  $yz$  aguas abajo. De la figura 5.37 a la figura 5.44 se muestran las distribuciones de  $CO$  a diferentes alturas aguas abajo. Donde la escala representa concentración de  $CO$ .

Se aprecia de la figuras 5.37 a 5.40 que para el intervalo que corresponde al ancho del alerón ( $\pm 36 z/e$ ), la distribución de  $CO$  es prácticamente constante, en el sentido del eje  $z$ . Esto ocurre independiente de la posición aguas abajo. Solo se observa una leve deformación en la distribución de  $CO$  hacia el centro del eje  $y$ , en los bordes del alerón (figuras 5.38 y 5.40).

Para el caso de  $f_0 = 20$  [Hz], se observa que las concentraciones son menores que para el plano equivalente a  $f_0 = 10$  [Hz], pero abarcan mayor área. Por otro lado la distribución en el sentido del eje  $z$  es constante, salvo para  $z/e \approx 30$ , donde se observa de forma notoria una mayor concentración de  $CO$  (de figura 5.42 a 5.44 ). Esto se puede explicar a la generación de vorticidad debido borde del alerón (tip vortex), esta vorticidad será estudiada con mayor detalle más adelante.

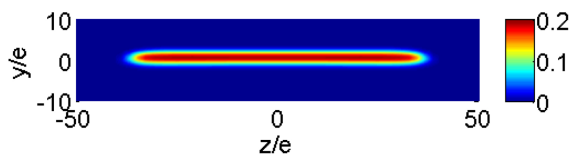


Figura 5.37: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 12$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

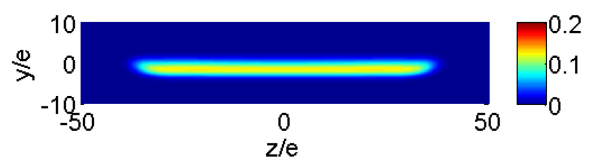


Figura 5.38: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 24$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

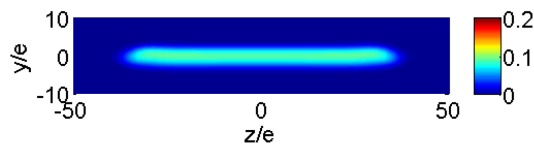


Figura 5.39: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 36$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

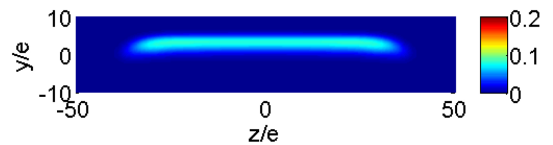


Figura 5.40: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 48$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

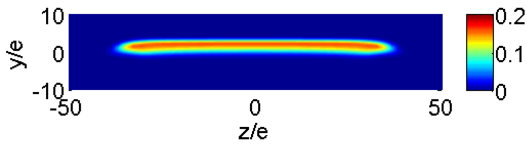


Figura 5.41: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 12$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

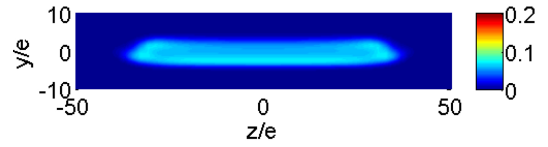


Figura 5.42: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 24$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

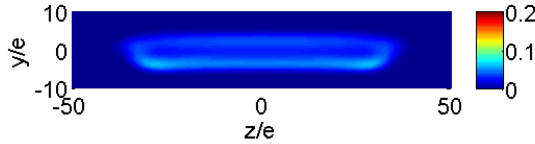


Figura 5.43: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 36$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

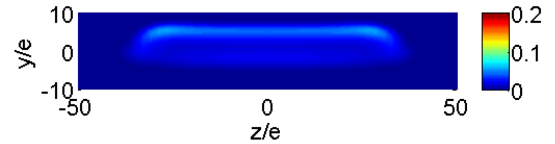


Figura 5.44: Distribución de concentración de  $CO$  plano  $yz$  a una distancia  $x/e \approx 48$  del borde de salida del alerón.  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

### 5.4.3. Caso N°3: Inyección de escalar en los bordes laterales del alerón

El tercer caso de simulaciones con inyección de sustancia escalar pasiva corresponde a inyectar  $CO$  desde ambos bordes del alerón. En la figura 5.45 se muestra un esquema representativo de la condición de borde impuesta, donde la zona enrojecida representa la superficie donde se impone concentración de  $CO$  igual 1 (franjas en los bordes del alerón de 6 [mm]).

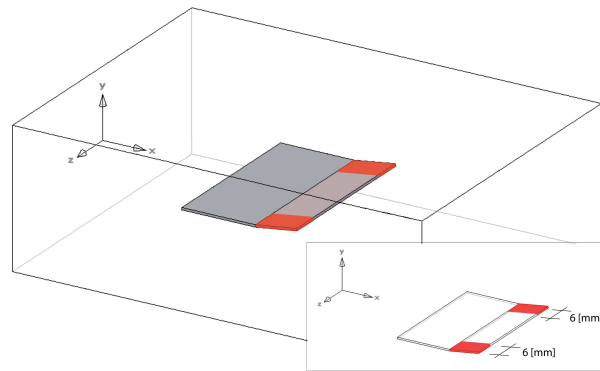


Figura 5.45: Esquema Caso N°3: Inyección de  $CO$  en bordes laterales del alerón.

Para realizar el estudio del comportamiento de monóxido de carbono, primero se simuló hasta que la estela alcanzara un régimen periódico estable. Luego de alcanzar este estado, se procedió a imponer

la condición de borde para la inyección de  $CO$ . Esto se realizó para las frecuencias de  $f_v = 10$  [Hz] y  $f_r = 20$  [Hz] y un número de Reynolds de  $Re_e = 83$ .

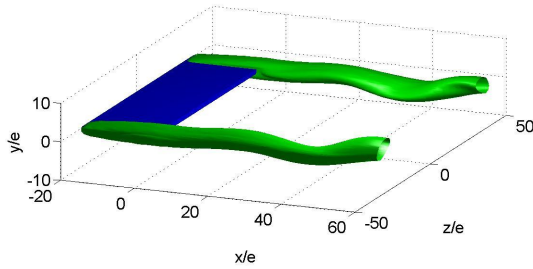


Figura 5.46: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0.05$  a  $0.4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 3 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ .

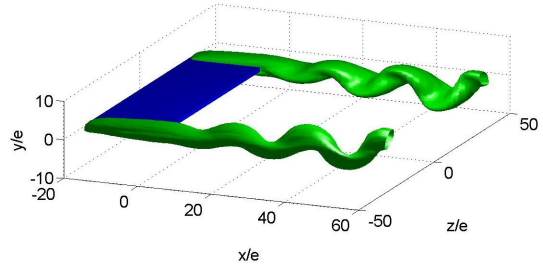


Figura 5.47: Visualización 3D de estela: Iso contorno de sustancia escalar  $c_{CO} = 0.05$  a  $0.4T$  con  $T = 1/f_0$ . Caso 3 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ .

Primero se estudió los perfiles de concentración promedio a distintas distancias aguas abajo en flujo. En las figuras 5.48 y 5.49 se muestran los perfiles para 10 [Hz] y 20 [Hz]. Dada la configuración de inyección se optó por observar los perfiles a lo largo del eje  $z$ .

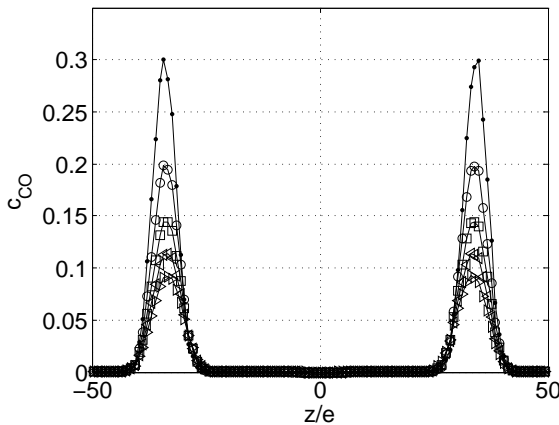


Figura 5.48: Perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\bullet$ : 10 e;  $\circ$ : 20 e;  $\square$ : 30 e;  $\triangleleft$ : 40 e;  $\triangleright$ : 50 e; Caso N°3.

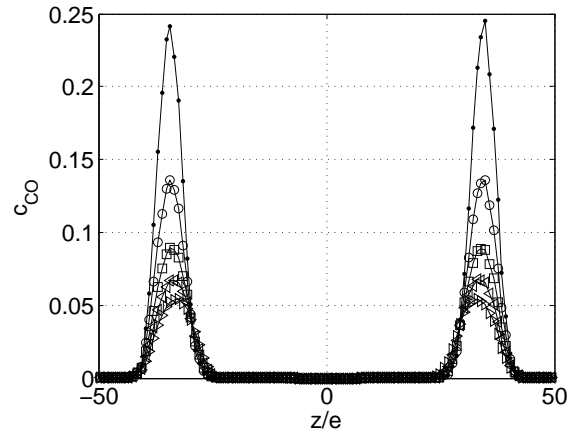


Figura 5.49: Perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .  $\bullet$ : 10 e;  $\circ$ : 20 e;  $\square$ : 30 e;  $\triangleleft$ : 40 e;  $\triangleright$ : 50 e; Caso N°3.

Se observa que a medida que aumenta la distancia aguas abajo en el flujo, los perfiles de concentración disminuyen en magnitud, esto debido a los efectos difusivos. Ahora si se observa las figuras 5.50 y 5.51, se ve que el ancho del perfil de concentración en la dirección  $z$  permanece constante con la distancia aguas abajo para  $f_0 = 10$  [Hz], pero para 20 [Hz], el ancho del perfil aumenta levemente a medida que aumenta la distancia aguas abajo. Además para caso forzado a 20 [Hz] se aprecia que los máximos a diferentes distancias aguas abajo se desplazan levemente hacia el centro del sistema.

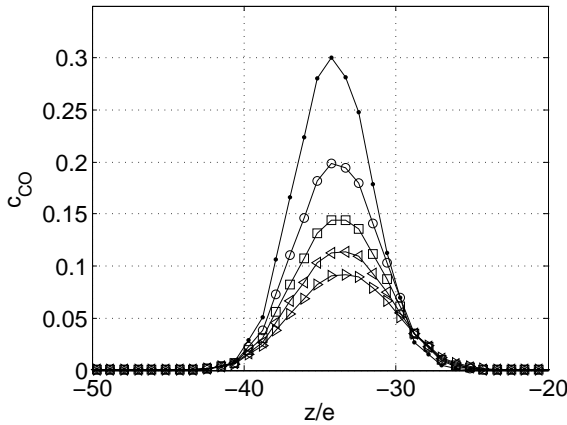


Figura 5.50: Acercamiento perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●: 10 e; ○: 20 e; □: 30 e; △: 40 e; ▷: 50 e; Caso N°3.

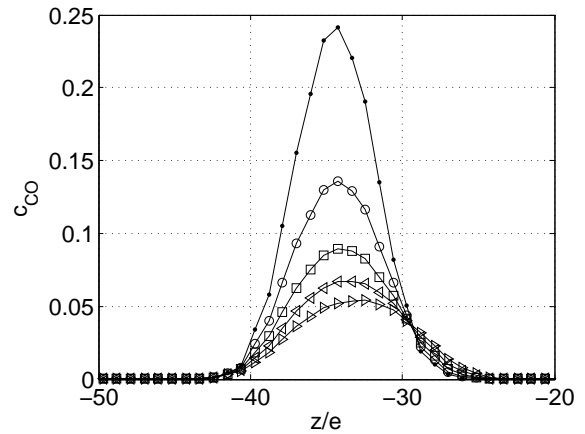


Figura 5.51: Acercamiento perfiles de concentración de escalar promedio para diferentes distancias aguas abajo en la estela. Frecuencia de forzamiento  $f_0 = 20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ . ●: 10 e; ○: 20 e; □: 30 e; △: 40 e; ▷: 50 e; Caso N°3.

El comportamiento de la sustancia escalar se observa de mejor forma en las figuras 5.52 y 5.53 donde se muestran los iso-contornos de concentración de sustancia escalar para un tiempo donde el alerón se encuentra en la posición central.

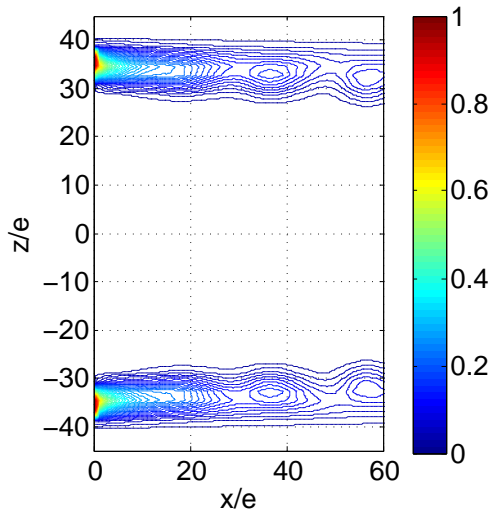


Figura 5.52: Iso-contornos de sustancia escalar pasiva en el plano  $xz$  con el alerón forzado a  $f_0=10$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

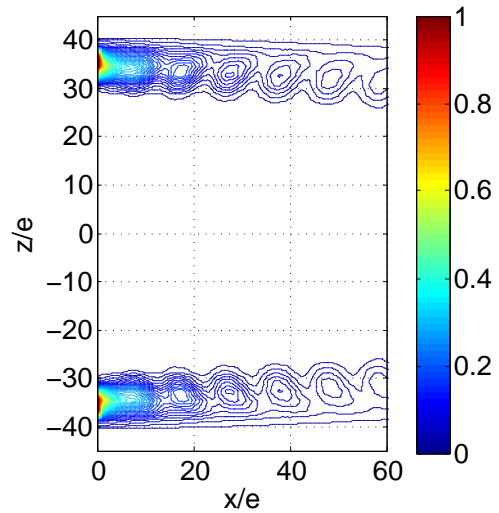


Figura 5.53: Iso-contornos de sustancia escalar pasiva en el plano  $xz$  con el alerón forzado a  $f_0=20$  [Hz] y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

Antes de estudiar lo que ocurre en el plano  $yz$  se obtuvo los contornos de iso - vorticidad en el



sentido del eje  $z$ , para el caso sin forzamiento y un número de Reynolds  $Re_e = 83$ . Ver figura 5.54. En esta figura se observa que la vorticidad generada en esta dirección es simétrica con respecto al eje  $z$  y con respecto al eje  $y$ , pero en sentido contrarios. Dada su ubicación espacial, es evidente que estas estructuras son generadas por el flujo al pasar por el borde del sistema placa plana - alerón. Se aprecia que para cada borde se generan cuatro regiones de vorticidad, dos de mayor tamaño, y dos más pequeñas más alejadas del eje  $z/e = 0$ .

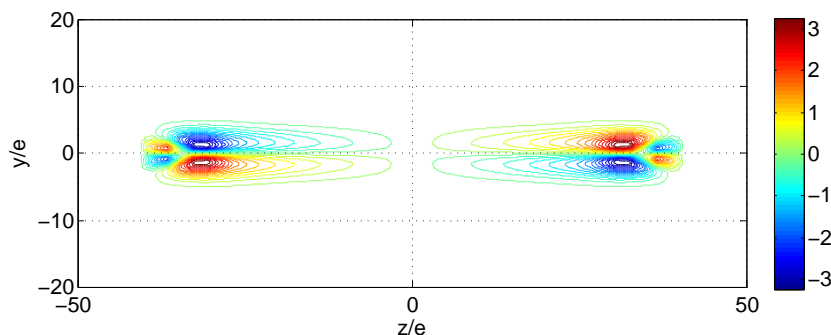


Figura 5.54: Contornos de iso - vorticidad en el sentido del eje  $z$ , para el caso sin forzamiento y un número de Reynolds  $Re_e = 83$

Se procedió a comparar las distribuciones de concentración de  $CO$  con los contornos de iso - vorticidad para distintos tiempos y frecuencias de 10 [Hz] y 20 [Hz].

De la figura 5.55 a la 5.74, se observan las distribuciones de  $CO$  y los contornos de iso - vorticidad en la dirección  $z$ . La medición de datos se realizó en un plano perpendicular a la dirección del flujo a una distancia de  $x/e = 30,3$  desde el borde de salida del sistema placa plana - alerón.

Con respecto a las estructuras de vorticidad, se observa que el forzamiento del alerón modifica la estructura inicial sin forzamiento. A medida que el alerón se mueve desde su amplitud máxima, por ejemplo desde su posición máxima superior, la vorticidad ya existente pierde su intensidad y desplaza hacia  $z/e \approx 30$  a medida que el tiempo transcurre. A la vez que ocurre esto, debido al movimiento del alerón, se generan dos vorticidades de signo contrario a la estructura anterior. Una ubicada aproximadamente en  $y/e = 0$  y  $z/e = 36$  de forma mas bien circular, y otra levemente más arriba y hacia el centro de forma más alargada. A medida que continúa el movimiento el alerón estas dos vorticidades se fusionan y comienzan a perder intensidad, ya que el alerón llega a su posición máxima inferior, donde se repite el ciclo. Este comportamiento se observa en forma general para ambas frecuencias, salvo que para el caso de  $f_0 = 20$  [Hz], las dos zonas de vorticidad señaladas anteriormente se forman conectadas.

Se observa para ambas frecuencias, que la ubicación de la sustancia escalar pasiva está directamente relacionada con las vorticidades en la dirección  $z$  ( $w_z$ ). Ya que las mayores concentraciones de  $CO$ , permanecen en las zonas de mayor vorticidad. Esto indica que el método de transporte de la estela

de sustancia escalar pasiva, es por medio de las estructuras de vorticidad que esta genera.

Por otro lado estos resultados explican las distribuciones de  $CO$  obtenidas para las simulaciones en el Caso N°2, donde aguas abajo a la altura de los bordes del alerón se obtenían mayores concentraciones de  $CO$ , que para zonas intermedias.

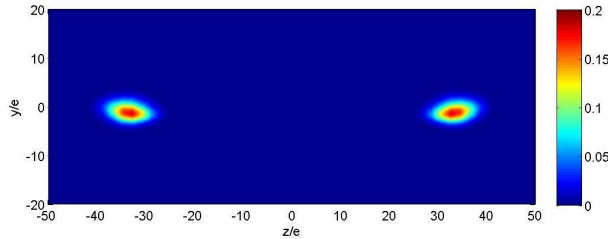


Figura 5.55: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

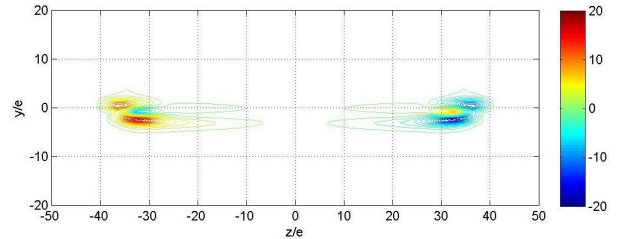


Figura 5.56: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

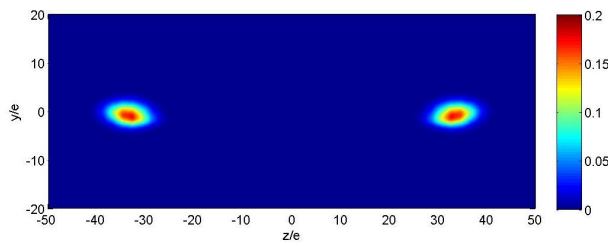


Figura 5.57: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,2 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

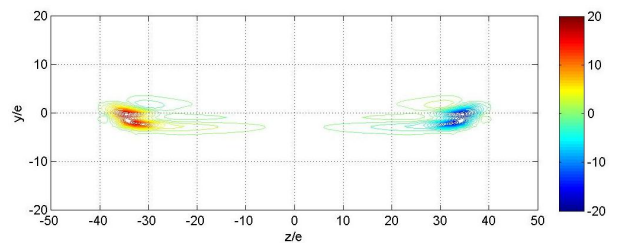


Figura 5.58: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,2 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

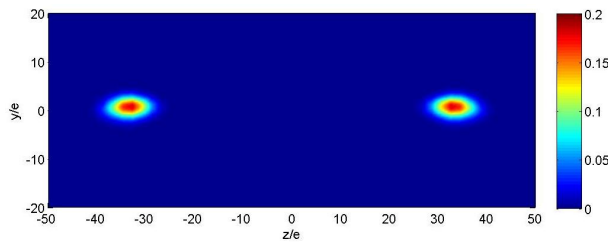


Figura 5.59: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,4 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

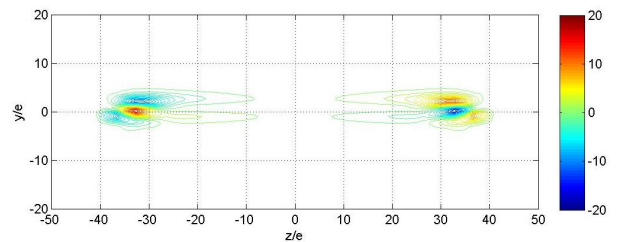


Figura 5.60: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,4 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

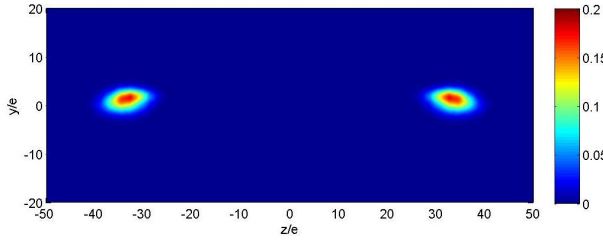


Figura 5.61: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,6 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

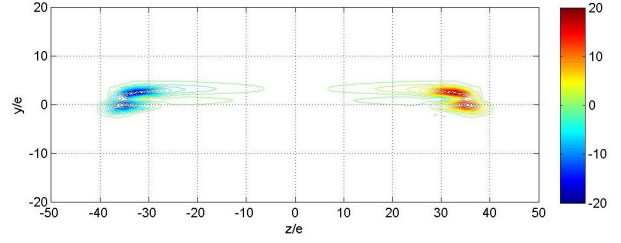


Figura 5.62: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,6 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

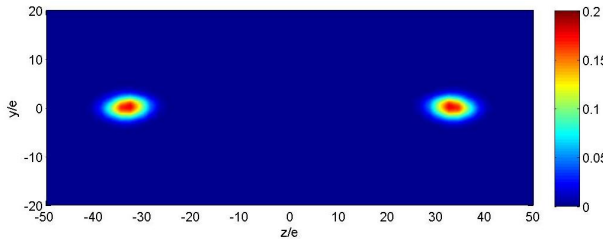


Figura 5.63: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,8 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

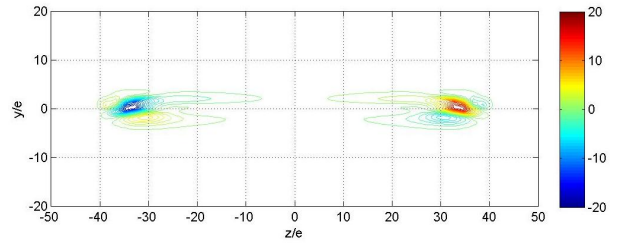


Figura 5.64: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 10$  [Hz],  $t = 0,8 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

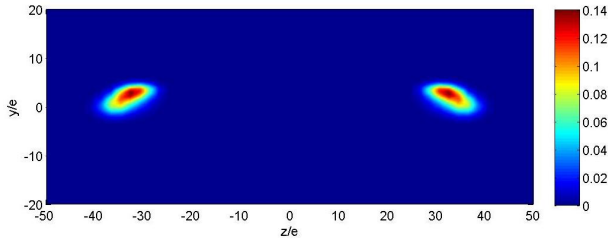


Figura 5.65: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

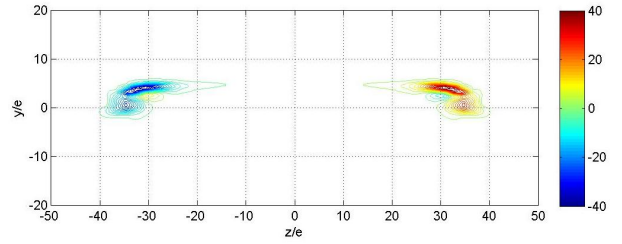


Figura 5.66: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

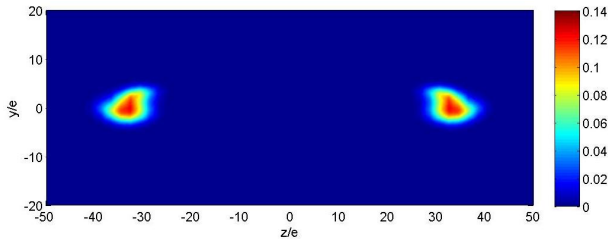


Figura 5.67: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,2 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

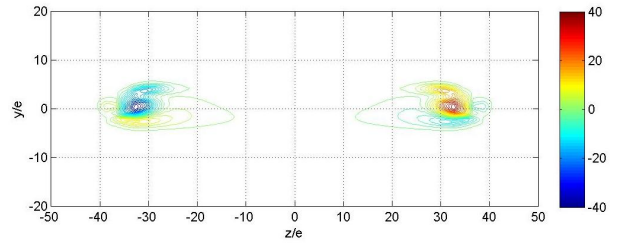


Figura 5.68: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,2 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

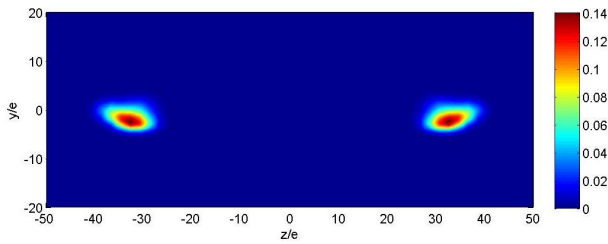


Figura 5.69: Distribución de concentración de  $CO$  a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,4 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

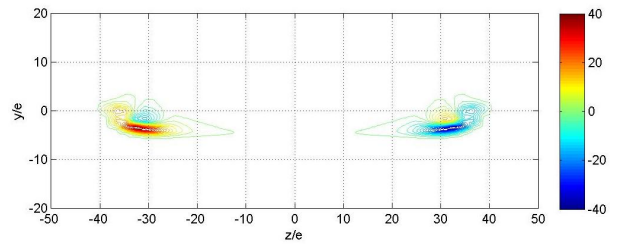


Figura 5.70: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,4 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

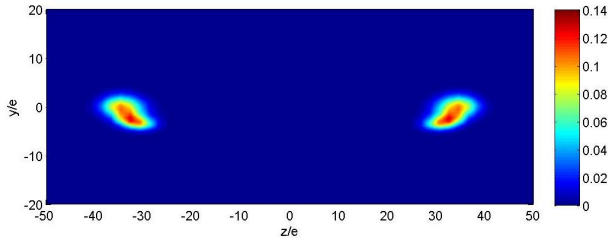


Figura 5.71: Distribución de concentración de CO a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,6 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

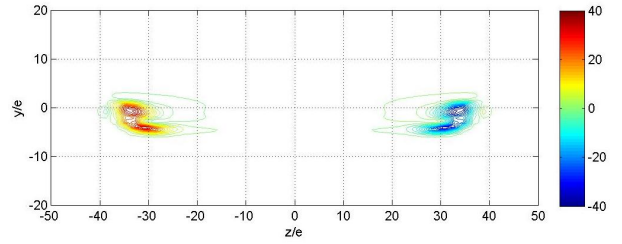


Figura 5.72: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,6 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

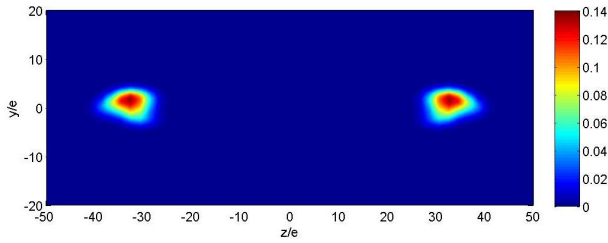


Figura 5.73: Distribución de concentración de CO a  $x/e = 30,3$ ,  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,8 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

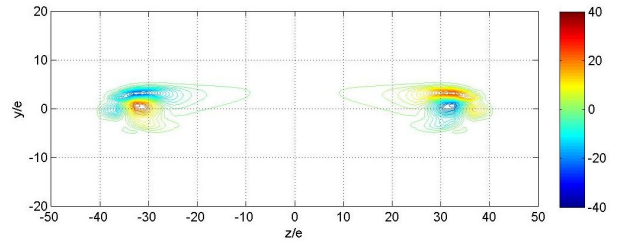


Figura 5.74: Contornos de iso - vorticidad en  $z$  a  $x/e = 30,3$ , para  $f_0 = 20$  [Hz],  $t = 0,8 1/f_0$  y número de Reynolds  $Re_e = 83$ .

## Capítulo 6

### Conclusiones

El presente trabajo de título consistió en la realización de diversas simulaciones numéricas con el objetivo de estudiar la interacción entre una sustancia escalar pasiva y estelas generadas por un perfil plano en cuyo extremo esta adherido un alerón. Este alerón fue forzado de forma sinusoidal a distintas frecuencias. A continuación se mencionan los principales resultados obtenidos en el presente estudio:

- Se comparó simulaciones de estelas con resultados experimentales recopilados, para un posicionamiento horizontal fijo del alerón. Se obtuvo que los perfiles de velocidad obtenidos numéricamente, para distintos números de Reynolds, no difieren en más de un 8 % con los perfiles de velocidad experimentales. Además se obtuvo que el ancho de la estela sigue una ley de potencia del número de Reynolds al igual que el caso experimental, con una diferencia del 13 %.
- Se estudió y comparó el comportamiento de estelas bajo forzamiento del alerón para casos simulados y antecedentes experimentales. Se comparó los perfiles promedio de velocidad para diferentes frecuencias y similar número de Reynolds. Se obtuvo que la estela es sensible a un cierto rango de frecuencias de forzamiento (entre 2 [Hz] y 40 [Hz]), fuera de este rango los perfiles de velocidad son similares al perfil sin forzamiento. Se detecta la presencia de una frecuencia de resonancia  $f_r$ , la cual aumenta el ancho de la estela y eleva la velocidad mínima, esta frecuencia es menor para el caso simulado comparado con los datos experimentales.
- Se observó los perfiles de fluctuaciones de velocidad para casos simulados y datos experimentales recopilados. Se aprecia similar comportamiento en ambos casos, la presencia de dos máximos simétricos con respecto al eje horizontal, los cuales se alejan una mayor distancia para el caso de la frecuencia  $f_r$ .
- Se comparó los contornos de energía cinética correspondiente a las fluctuaciones de velocidad. Se observa que tanto el caso experimental como los casos simulados presentan similar comportamiento pero para este último ocurre a menores frecuencias. Una razón para este comportamiento se debe a que la función de oscilación impuesta en el caso numérico es una aprox-

imación del caso experimental. Ya que para el caso experimental, el movimiento del alerón es de rotación armónico, mientras para el caso numérico corresponde a un movimiento vertical oscilatorio. Se puede suponer que el tipo movimiento en el caso numérico obstruye mayor cantidad de fluido que el caso experimental, trasladando la respuesta en frecuencia a frecuencias menores.

- Se verificó la evolución temporal del perfil de velocidad para la frecuencia  $f_r$  del caso numérico con el experimental. Se observa similar comportamiento en ambos casos, donde se produce el alineamiento de las estructuras de alta velocidad, quedando de esta forma al doble de la frecuencia de forzamiento.
- Se calculó la fuerza de arrastre ejercida por el flujo sobre el sistema placa plana - alerón. Calculando el arrastre según la teoría de perfil delgado, se obtuvo que para la frecuencia de resonancia  $f_r$  se alcanza un mínimo, reduciéndose la fuerza alrededor de un 15 %. Mientras que calculando la fuerza de arrastre según la definición analítica, se obtuvo la presencia de dos mínimos, para la frecuencia  $f_r$  y la frecuencia denominada  $f_v$ . Para este caso la reducción de fuerza de arrastre es alrededor del 13 %.
- Se determinó la dependencia del ancho de la estela con la distancia aguas abajo. Se obtuvo que el ancho de la estela en función de la distancia aguas abajo es una función creciente, donde el ancho de la estela es dependiente de la frecuencia en que oscila el alerón. Se desprende que para la frecuencia de resonancia  $f_r$ , el ancho de la estela alcanza su mayor ancho.
- Se realizó simulaciones para estudiar la interacción de una sustancia escalar pasiva con estelas en forzamiento. Para el primer caso simulado, mitad superior con aire y mitad inferior con escalar pasivo, se estudió perfiles, contornos de iso - concentración e iso - vorticidad. La distribución de concentración de sustancia escalar está directamente relacionada con las estructuras de vorticidad generadas por la estela, ya que al desplazarse desvían las concentraciones de escalar en vez de incorporarlas. Se midió la masa de escalar que se eleva por sobre el plano horizontal, se obtuvo que para la frecuencia  $f_r$  se transporta mayor masa.
- En el segundo caso simulado de interacción de sustancia escalar pasiva, el cual consistía en la inyección de  $CO$  en el borde de salida del alerón, se obtuvo que la condición de borde impuesta es dependiente de la frecuencia de oscilación. Además se observó que en las estructuras de vorticidad generadas por la estela transportan mayor cantidad de escalar pasivo en sus zonas posteriores. Se estudió las distribuciones axiales de escalar pasivo para distintas posiciones aguas abajo en el flujo, se observó que para una frecuencia de  $f_0 = 10$  [Hz] no se aprecian cambios considerables de concentración, mientras que para  $f_0 = 20$  [Hz] se aprecia mayores concentraciones hacia los extremos laterales de la estela.
- El tercer caso simulado numéricamente, consistió en la inyección de escalar pasivo en los bordes laterales del alerón. Contrastando las distribuciones de escalar pasivo con los contornos de iso

- vorticidad en la dirección paralela al flujo, se obtuvo que el  $CO$  permanece contenido en los vortices generados por los bordes de alerón. Donde la mayor concentración de escalar pasivo se ubica en los máximos valores de vorticidad. Además para  $f_0 = 20$  [Hz] se evidencia que las zonas de mayor concentración se desplazan hacia el centro en la dirección  $z$ . Se concluye que el método de transporte de escalar pasivo en estelas es por medio de las regiones de vorticidad que son generadas por el movimiento oscilante del alerón.



## Bibliografía

- [1] Gharib M. and Williams-Stuber K., Experiments on the forced wake of an airfoil. *J. Fluid Mech*, Vol. 208, pp. 225-255, (1989).
- [2] Andrew L. Heyes, David A.R. Smith, Modification of a wing tip vortex by vortex generators. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 9, pp.469-475, (2005).
- [3] Hernández R. H. and Vial M., Frequency response of the wake of a flat plate, *J. EPL*, (2008).
- [4] NASA Earth Observatory. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=2613>
- [5] Manoochehr M. Koochesfahani, Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil. *AIAA Journal*, Vol. 27, NO. 9, (1989).
- [6] Lab for advanced studies in non linear phenomena. <http://www.leafnl.uchile.cl/>
- [7] Vial M. Estudio de la propagación de ondas en la estela de un perfil plano. "Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico ", Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, (2002).
- [8] Schlichting H., Boundary-Layer Theory, *McGraw Hill*, New York, (1968).
- [9] Fluent 6.3 Documentation, *Fluent Inc.* (2006).
- [10] Patankar S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Taylor&Francis*, Estados Unidos, pp.113-131, (1980).
- [11] D. S. Jang, R. Jetli, and S. Acharya, Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLEC Algorithms for the Treatment of the Pressure-Velocity Coupling in Steady Flow Problems. *Numerical Heat Transfer*, Vol. 10, pp.209-228, (1986).
- [12] F. Schwertfirm and M. Manhart, DNS of passive scalar transport in turbulent channel flow at high Schmidt numbers. *J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1204-1214, (2007).

## **Apéndice A**

### **Anexos**

#### **A.1. Visualización de estelas**

A continuación se muestran visualizaciones de estelas en tres dimensiones para los diferentes casos simulados con interacción de sustancia escalar pasiva. Los ejes coordenados se normalizaron por el espesor del sistema placa plana - alerón. En color verde se muestran los iso-contornos de concentración de escalar y en color azul se muestra las paredes del alerón.

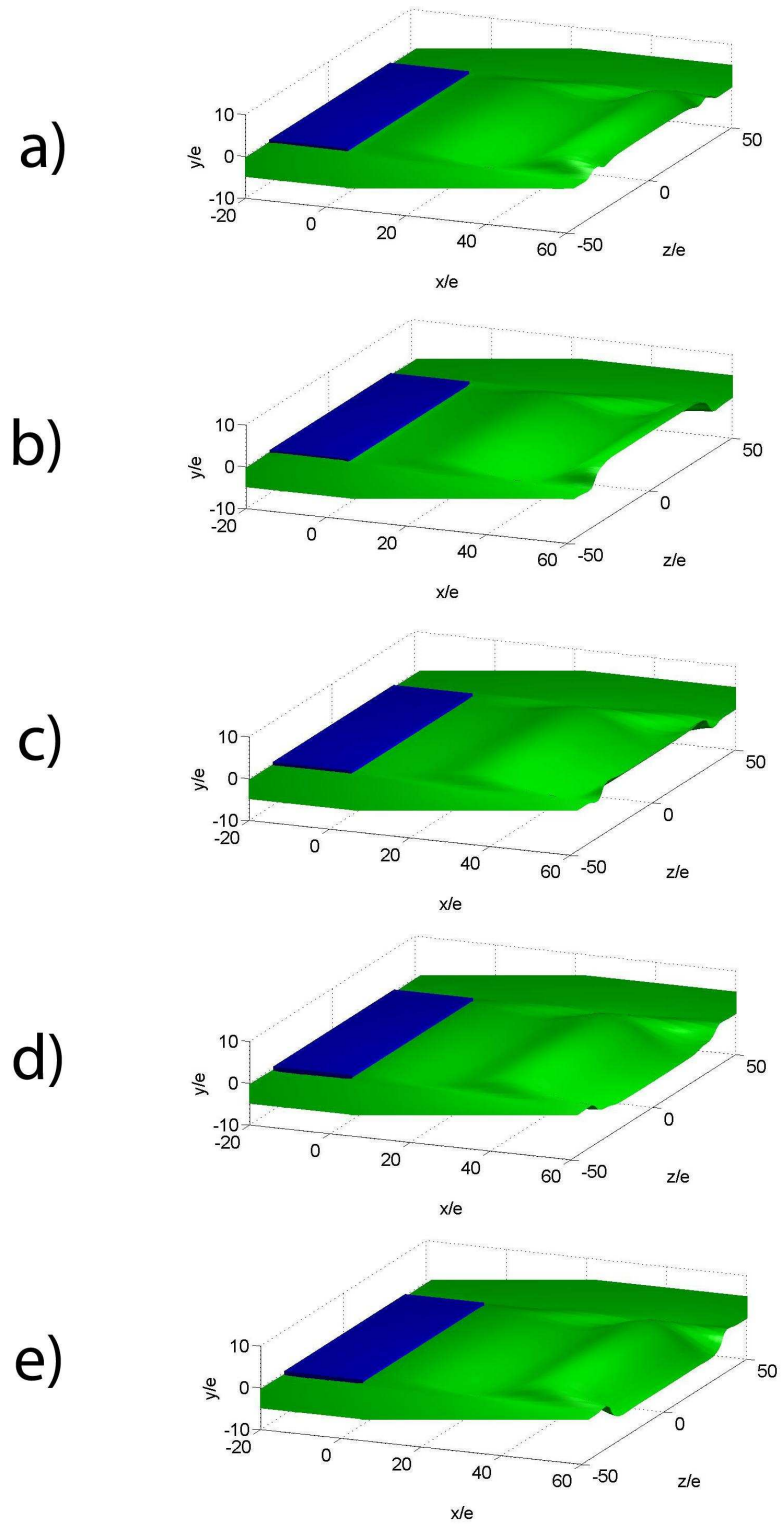


Figura A.1: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{CO} = 0.5$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 1 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a)  $0,2T$ ; b)  $0,4T$ ; c)  $0,6T$ ; d)  $0,8T$ ; e)  $1,0T$ .

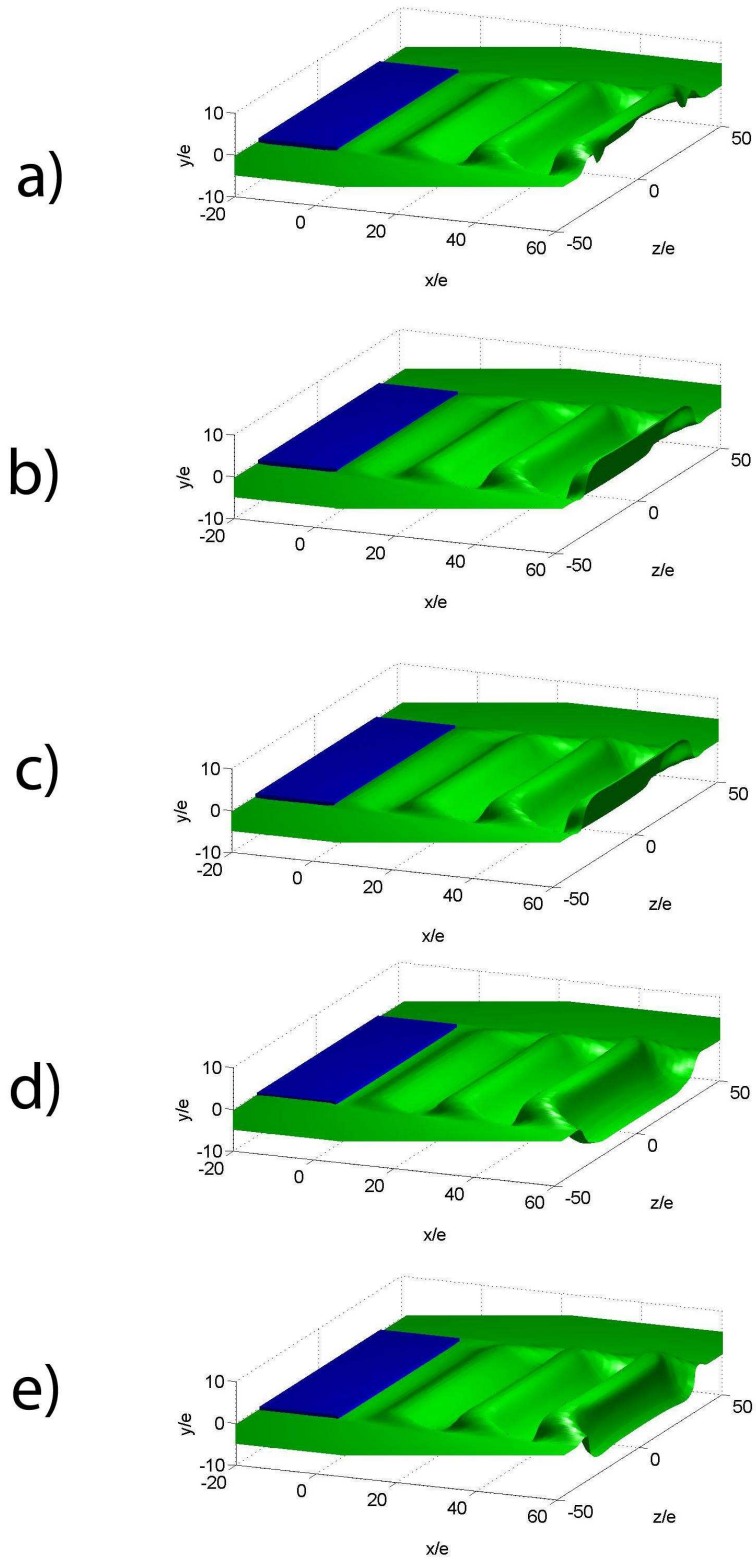


Figura A.2: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{co} = 0.5$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 1 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a)  $0,2T$ ; b)  $0,4T$ ; c)  $0,6T$ ; d)  $0,8T$ ; e)  $1,0T$ .

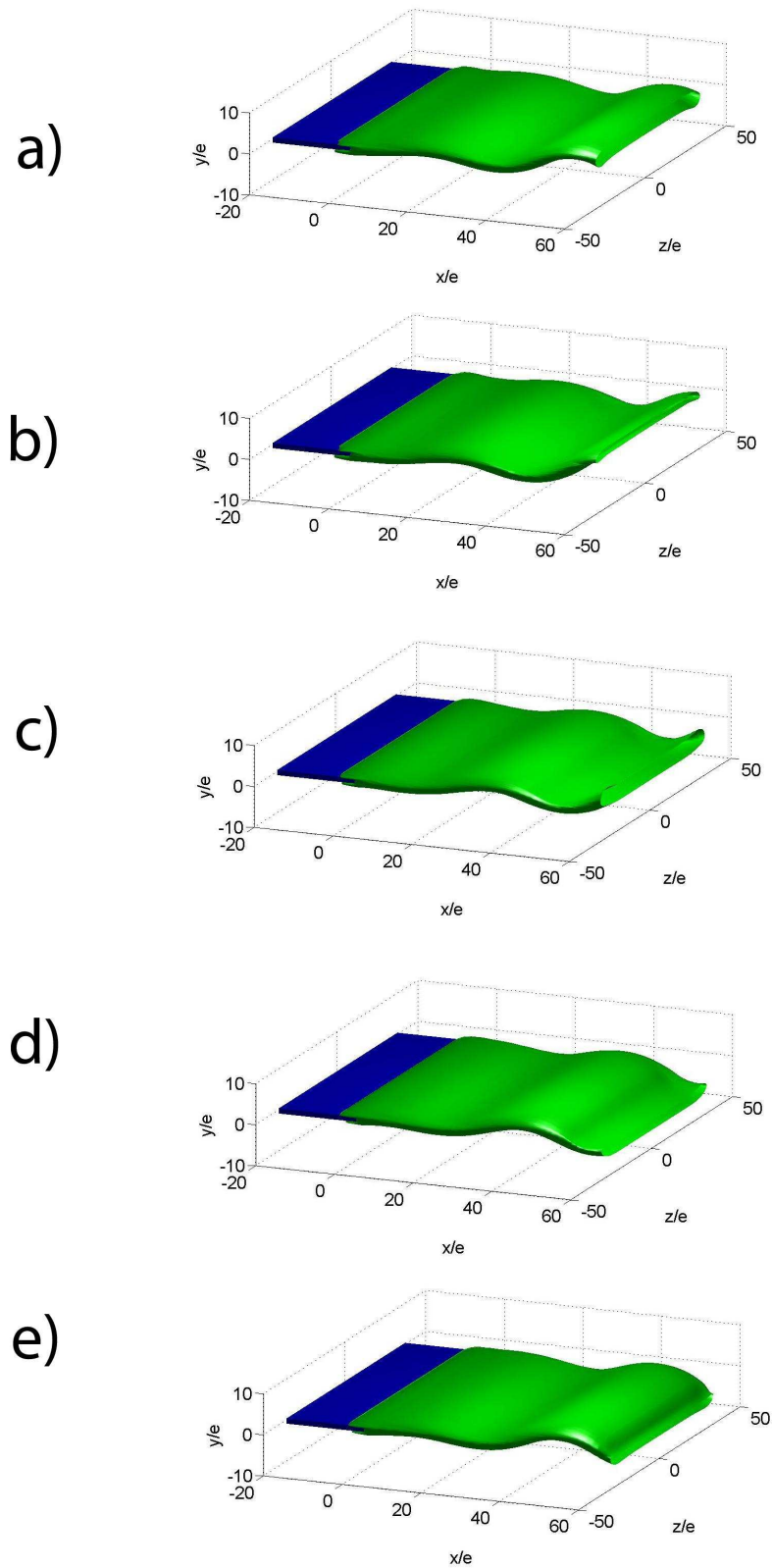


Figura A.3: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{co} = 0.05$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 2 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a) 0,2T; b) 0,4T; c) 0,6T; d) 0,8T; e) 1,0T.

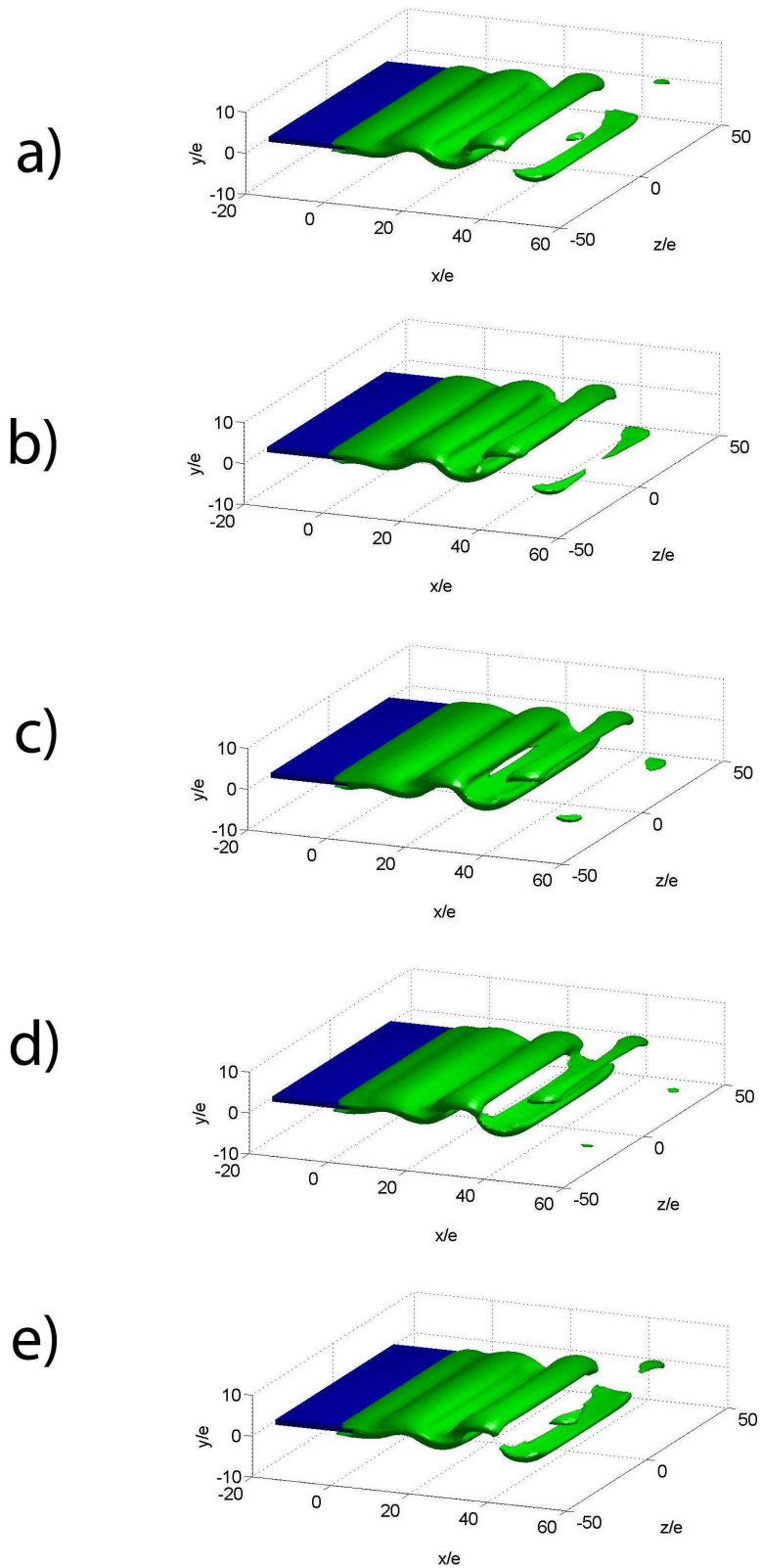


Figura A.4: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{co} = 0.05$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 2 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a)  $0,2T$ ; b)  $0,4T$ ; c)  $0,6T$ ; d)  $0,8T$ ; e)  $1,0T$ .

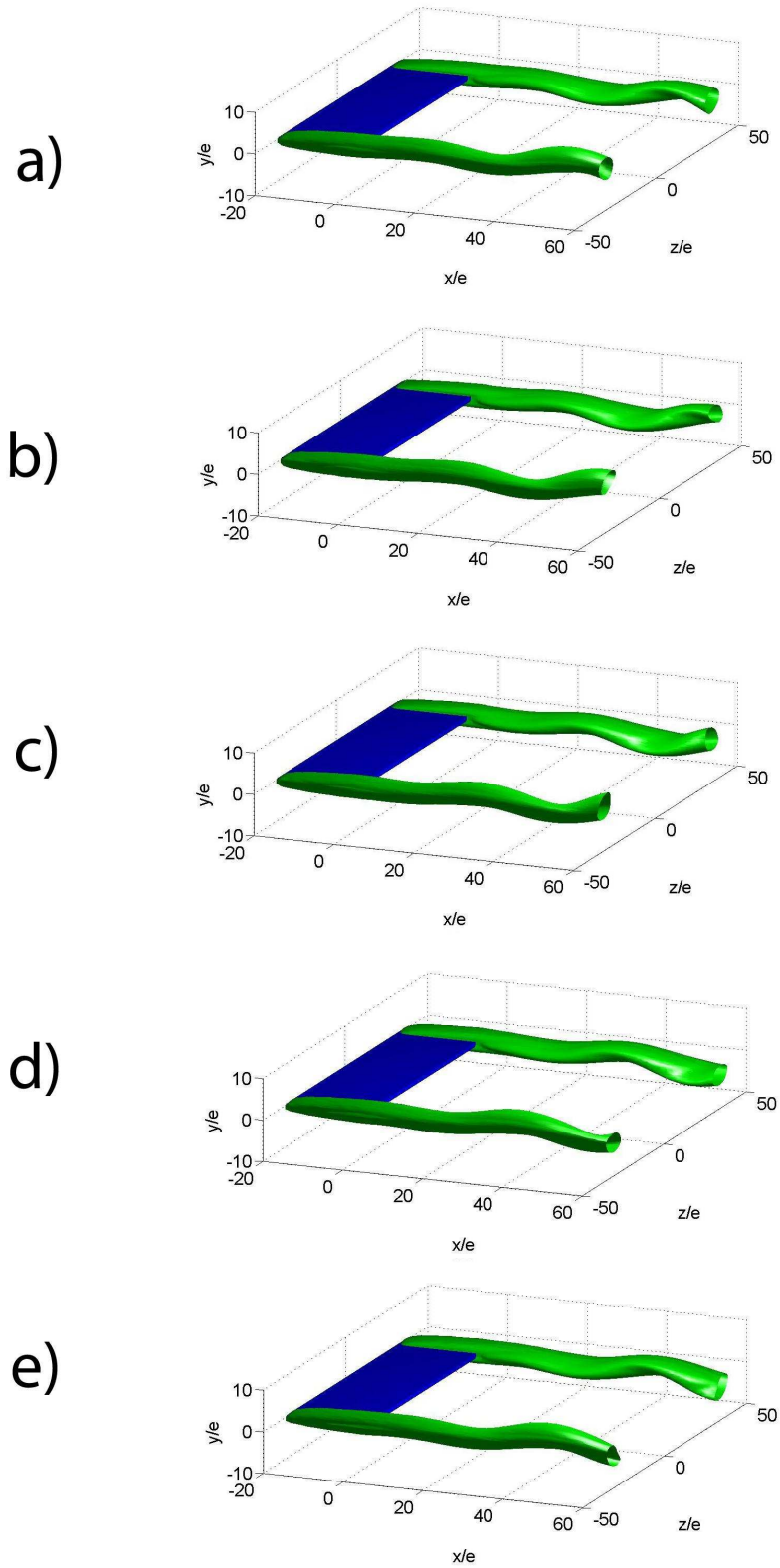


Figura A.5: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{co} = 0.05$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 3 a  $f_0 = 10$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a)  $0.2T$ ; b)  $0.4T$ ; c)  $0.6T$ ; d)  $0.8T$ ; e)  $1.0T$ .

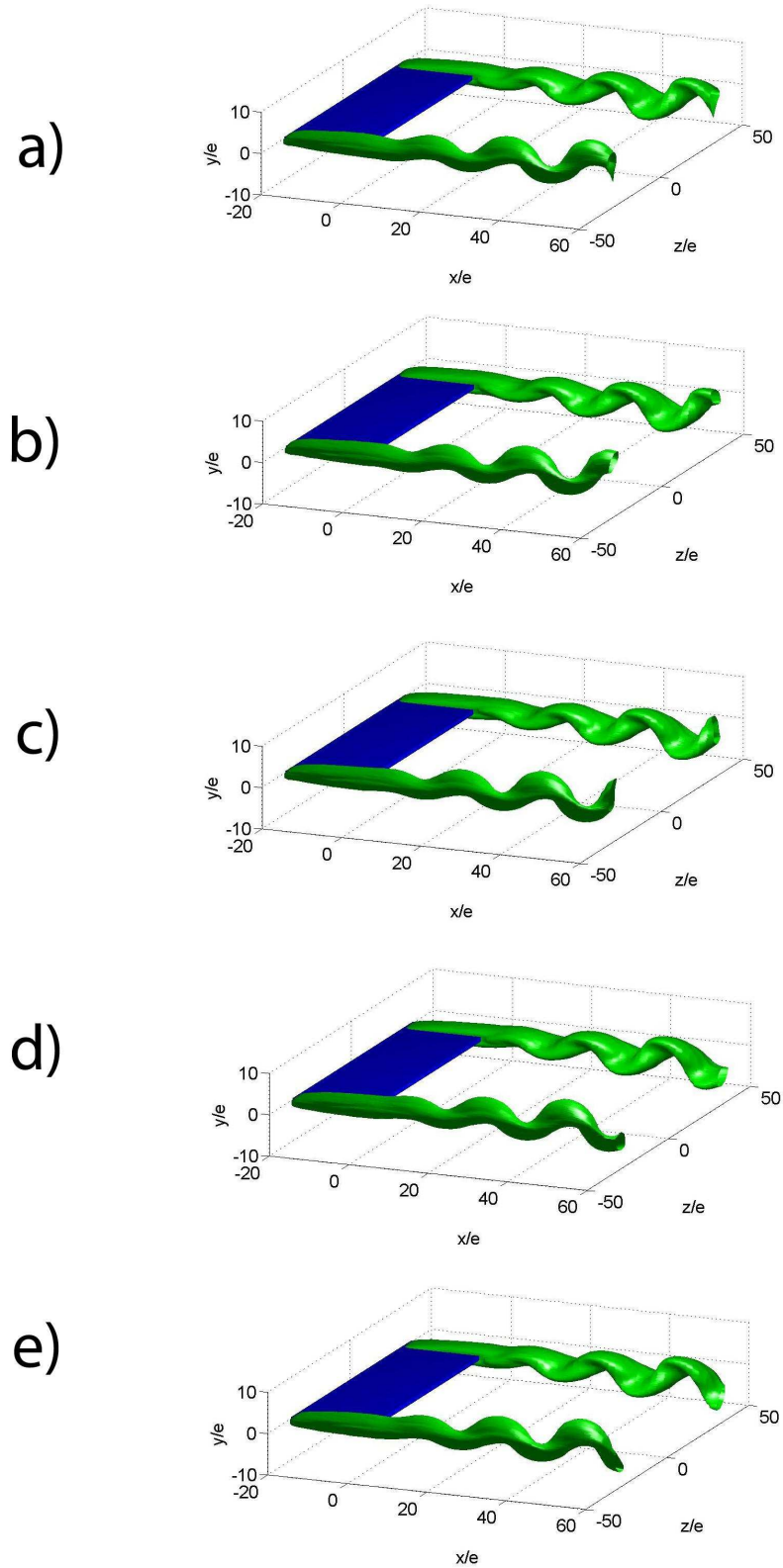


Figura A.6: Visualización 3D de estela: Iso contorno de escalar  $c_{co} = 0.05$  para diferentes tiempos con  $T = 1/f_0$ . Caso 3 a  $f_0 = 20$  [Hz] y  $Re_e = 83$ . a)  $0,2T$ ; b)  $0,4T$ ; c)  $0,6T$ ; d)  $0,8T$ ; e)  $1,0T$ .



## A.2. Condición de pared móvil del alerón

A continuación se detalla el código y el procedimiento necesario para imponer la condición de pared móvil en el alerón.

### A.2.1. Código UDF

El código utilizado para imponer el movimiento oscilatorio del alerón es el siguiente:

```
#include "udf.h"

real pi;

real A;

real frec;

DEFINE_CG_MOTION(vel, dt, vel, omega, time, dtime)
{
    pi=3.14159265;
    A=0.2*0.00165;
    frec=20.0;
    vel[1] = A*2.*pi*frec*cos(2.*pi*frec*time);
}
```

### A.2.2. Configuración en Fluent para movimiento oscilatorio del alerón

Para utilizar el código anterior en el software CFD Fluent se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Cargar UDF:

- Ir a *Define/User – Defined/Functions/Compiled*.
- En *SourceFile* hacer click en *Add* y buscar el archivo de la UDF por ejemplo "vel.c".
- En *Library Name* colocar nombre en de la librería a crear, por ejemplo "libudf".
- Click en *Build*.

- Click en *Load*.

## 2. Asignar UDF al alerón:

- Ir a *Define/Boundary Condition*.
- En *Zone* seleccionar el nombre que representa el alerón, por ejemplo "aleron".
- Click en *Set*.
- En las opciones de *Wall Motion* seleccionar *Moving Wall*, se activará las opciones de *Panel Motion*.
- En *Panel Motion* cambiar la opción por defecto *Translational* por la opción *Components*, se activará las opciones *Velocity Component*.
- Cambiar el valor *Constant* por la UDF, en este caso *vely*, en la selección desplegable del eje deseado, por ejemplo eje y.
- Click en *Ok*.
- Click en *Close*.

## A.3. Inyección de sustancia escalar pasiva

### A.3.1. Códigos UDF

En la realización de simulaciones con inyección de sustancia escalar pasiva se programaron los códigos expuestos a continuación.

- Caso N°1: Inyección de escalar en la mitad inferior de la sección de entrada.

```
# include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(specie_placa, thread, position)
{
    real p[ND_ND];
    real x;
    real y;
    real z;
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
```

```

F_CENTROID(p,f,thread);
z=p[2];
y=p[1];
x=p[0];
if (y  $\leq$  0)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
}
end_f_loop(f, thread)
}

```

- Caso N°2: Inyección de escalar en el borde de salida del alerón.

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(specie, thread, position)
{
real p[ND_ND];
real x;
real y;
real z;
face_t f;
begin_f_loop(f, thread)
{
F_CENTROID(p,f,thread);
x=p[0];
y=p[1];
z=p[2];
if (x  $\leq$  -5./1000.)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
}
}

```

```
end_f_loop(f, thread)
}
```

- Caso N°3: Inyección de escalar en los bordes laterales del alerón.

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(specie, thread, position)
{
real p[ND_ND];
real x;
real y;
real z;
face_t f;
begin_f_loop(f, thread)
{
F_CENTROID(p,f,thread);
x=p[0];
y=p[1];
z=p[2];
if (z >= 54.5/1000.)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1;
else if (z <= -54.5/1000.)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1;
else
F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
}
end_f_loop(f, thread)
}
```

### A.3.2. Configuración en Fluent para inyección de sustancia escalar

Para utilizar los códigos descrito anteriormente en el software CFD Fluent se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Activar transporte de sustancia escalar:

- Ir a *Define/Models/Species/Transport&Reaction*.
- En el menú *Model* activar *SpeciesTransport*. Se activará *MixtureMaterial*.
- En *MixtureMaterial* seleccionar *carbon – monoxide – air*.
- Click en *Apply*.
- Click en *Ok*.

2. Cargar UDF:

- Ir a *Define/User – Defined/Functions/Compiled*.
- En *SourceFile* hacer click en *Add* y buscar el archivo de la UDF por ejemplo "specie.c".
- En *Library Name* colocar nombre en de la librería a crear, por ejemplo "lib\_udf2".
- Click en *Build*.
- Click en *Load*.

3. Asignar UDF a cara de destino:

- Ir a *Define/Boundary Condition*.
- En *Zone* seleccionar la cara de destino.
- Click en *Set*.
- En la pestaña *Species* en el campo *CO* cambiar *Constant* por el nombre que se designo en la UDF, por ejemplo "specie\_placa".
- Click en *Ok*.

De esta forma se asigna la distribución de escalar, programada en la UDF, a la cara deseada.