



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela politécnica superior

Trabajo Fin de Grado

**MEJORAS AERODINÁMICAS
MEDIANTE TÉCNICAS DE
OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA**

Alumno: Carlos Bernal Mozas

Tutor: Carlos García Baena
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Tutor: Cándido Gutiérrez Montes
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Carlos García Baena y Cándido Gutierrez Montes, Tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: *“Mejoras aerodinámicas mediante técnicas de optimización geométrica”*, que presenta Carlos Bernal Mozas, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, 24 de Julio de 2023

El alumno: Carlos Bernal Mozas

Los tutores: Carlos García Baena y Cándido Gutierrez Montes

Gracias a mis padres por haberme apoyado siempre y a toda la gente que me llevo de esta bonita etapa.

Resumen

En este trabajo de fin de grado, se analiza la aerodinámica de vehículos pesados, en concreto, la aerodinámica de vehículos tipo tráiler y autobús, con el objetivo de tratar de mejorarla en la medida de lo posible sin reducir la funcionalidad de los mismos.

Para ello se han realizado simulaciones numéricas discretizando las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos o de Navier-Stokes en un proceso iterativo y, seguidamente, se realiza la optimización de forma mediante el método adjunto. Una vez realizadas las modificaciones geométricas, se vuelve a simular numéricamente para obtener los resultados. Para finalizar, se presentan los resultados obtenidos y se realiza una serie de conclusiones sobre estos, que han llevado a elegir y definir las mejores modificaciones.

Índice

1	Objetivo y motivación.....	12
2	Introducción	13
2.1	Estelas tras cuerpos romos	13
2.2	Fuerzas superficiales sobre un cuerpo en el seno de un fluido	14
2.2.1	Drag	16
2.3	Capa límite	16
2.4	Aerodinámica de vehículos pesados	17
2.4.1	Características del flujo alrededor de vehículos pesados	17
2.4.2	Influencia del ángulo de inclinación trasero en la aerodinámica de vehículos pesados	18
2.4.3	Efecto suelo.....	20
2.5	Mecánica de fluidos computacional (CFD).....	21
2.6	Método adjunto o “adjoint”	21
2.7	Definiciones de interés	23
2.7.1	Coeficiente de arrastre	23
2.7.2	Coeficiente de sustentación.....	24
2.7.3	Numero de MATCH	24
2.7.4	y^+	24
2.7.5	Funciones de pared	25
2.7.6	Coeficiente de presión adimensionalizada.....	25
2.7.7	Número de Courant-Friedrichs-Lewy	25
3	Descripción del problema y set up numérico.....	26
3.1	Set up numérico	27
3.2	Camión modelo GTS	29
3.2.1	Dimensiones de los vehículos	29
3.3	Sistema de coordenadas y condiciones de contorno	31
3.4	Geometrías generadas para el modelo GTS.....	32
3.5	Mallado de las geometrías.....	33
3.6	Convergencia de malla	35
4	Resultados.....	38
4.1	Resultados base.....	38
4.1.1	Modelo 1.....	38
4.1.2	Modelo 2.....	43
4.2	Modificaciones geométricas.....	46
4.2.1	Modelo 1.....	47
4.2.2	Modelo 2.....	68
4.3	Comentario de resultados.....	89

4.3.1	Modelo 1.....	89
4.3.2	Modelo 2.....	91
5	Conclusiones	94
6	Trabajo posterior.....	96
7	Bibliografía.....	97

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Multiplicidad de soluciones de estela para distintos regímenes de flujo sobre un cilindro bidimensional. (Blevins, 1990).	14
Ilustración 2: “Downforce” y “drag” sobre monoplaza de Fórmula 1 (Fernández, 2019).	16
Ilustración 3: Capa límite laminar sobre una placa plana (Fernández y Ortega, 2014).	17
Ilustración 4: Modelo Ahmed (D'Elía, 2003).	18
Ilustración 5: Modelo simplificado con ángulo de inclinación trasero (Choi, Lee y Park, 2013).	19
Ilustración 6: Flujo sobre modelo Ahmed (Choi, Lee y Park, 2013).	20
Ilustración 7: Metodología adjoint. (Tzanakis, 2014).	23
Ilustración 8: Esquema del problema	26
Ilustración 9: Métodos usados en simulaciones	28
Ilustración 10: Modelo GTS (Choi, Lee y Park, 2013)	29
Ilustración 11: Modelo 1	30
Ilustración 12: Modelo 2	30
Ilustración 13: Contorno del dominio computacional.	32
Ilustración 14: Geometría definitiva "Modelo 1".	33
Ilustración 15: Geometría definitiva "Modelo 2".	33
Ilustración 16: Malla del modelo 1.	35
Ilustración 17: Malla del modelo 2.	35
Ilustración 18: Malla definitiva modelo 1.	37
Ilustración 19: Malla definitiva modelo 2.	37
Ilustración 20: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$	38
Ilustración 21: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=20.000$	38
Ilustración 22: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$	39
Ilustración 23: Isocontorno de sensibilidad del modelo 1 a $Re=20.000$	40
Ilustración 24: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$	41
Ilustración 25: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$	41
Ilustración 26: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$	42
Ilustración 27: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$	43
Ilustración 28: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$	43
Ilustración 29: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$	44
Ilustración 30: Isocontorno de sensibilidad del modelo 2 a $Re=20.000$	44
Ilustración 31: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$	45
Ilustración 32: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$	45
Ilustración 33: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$	46
Ilustración 34: Zonas en las que se realizarán los cambios de geometría.	47
Ilustración 35: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (frontal).	47
Ilustración 36: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (frontal).	48
Ilustración 37: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (capitoné).	48
Ilustración 38: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (capitoné).	49
Ilustración 39: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (capitoné).	50
Ilustración 40: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ parte trasera horizontal).	50
Ilustración 41: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).	51
Ilustración 42: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).	51

Ilustración 43: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).....	52
Ilustración 44: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).....	52
Ilustración 45: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).	53
Ilustración 46: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).....	54
Ilustración 47: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).	54
Ilustración 48: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).....	55
Ilustración 49: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).....	55
Ilustración 50: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).	56
Ilustración 51: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).....	56
Ilustración 52: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).....	57
Ilustración 53: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (frontal).....	58
Ilustración 54: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (capitoné).	59
Ilustración 55: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).	60
Ilustración 56: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).....	60
Ilustración 57: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).....	61
Ilustración 58: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).....	61
Ilustración 59: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).....	62
Ilustración 60: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	63
Ilustración 61: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).....	63
Ilustración 62: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).....	64
Ilustración 63: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).....	64
Ilustración 64: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	65
Ilustración 65: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja).....	65
Ilustración 66: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja).....	66
Ilustración 67: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja).....	66
Ilustración 68: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja)....	67
Ilustración 69: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (frontal).....	68
Ilustración 70: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (frontal).	68
Ilustración 71: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (frontal).....	69

Ilustración 72: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).	70
Ilustración 73: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).	70
Ilustración 74: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).	71
Ilustración 75: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).	71
Ilustración 76: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).	72
Ilustración 77: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).	72
Ilustración 78: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).	73
Ilustración 79: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).	73
Ilustración 80: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).	74
Ilustración 81: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).	75
Ilustración 82: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).	75
Ilustración 83: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).	76
Ilustración 84: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).	76
Ilustración 85: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).	77
Ilustración 86: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).	78
Ilustración 87: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).	78
Ilustración 88: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).	79
Ilustración 89: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).	79
Ilustración 90: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (frontal).	80
Ilustración 91: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (capitoné).	81
Ilustración 92: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (capitone).	82
Ilustración 93: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ trasera horizontal).	82
Ilustración 94: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).	83
Ilustración 95: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).	83
Ilustración 96: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).	84
Ilustración 97: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	85
Ilustración 98: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	85
Ilustración 99: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	86
Ilustración 100: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).	86
Ilustración 101: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).	87

Ilustración 102: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).....	88
Ilustración 103: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).....	88
Ilustración 104: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja)..	89

Índice de tablas

Tabla 1: Convergencia de malla para el modelo 1.	36
Tabla 2: Convergencia de malla para el modelo 2.	36
Tabla 3: Resultados modelo 1 a $Re=20.000$ (Caso base).	89
Tabla 4: Resultados del modelo 1 a $Re=20.000$	89
Tabla 5: Resultados modelo 1 a $Re=200.000$ (Caso base).	91
Tabla 6: Resultados del modelo 1 a $Re=200.000$	91
Tabla 7: Resultados del modelo 2 a $Re=20.000$ (Caso base).	91
Tabla 8: Resultados del modelo 2 a $Re=20.000$	92
Tabla 9: Resultados modelo 2 a $Re=200.000$ (Caso base).	93
Tabla 10: Resultados modelo 2 a $Re=200.000$	93

1 Objetivo y motivación

El objetivo de este proyecto es el estudio y caracterización numérica de mejoras aerodinámicas de vehículos pesados a través del método adjunto, usando un software de mecánica de fluidos computacional (CFD). En concreto se estudiará la reducción de la fuerza de resistencia al avance en geometrías de vehículos pesados para intentar conseguir formas más aerodinámicas sin perjudicar la funcionalidad característica de este tipo de vehículos y así conseguir una reducción del consumo de combustible. Una reducción del consumo de combustible supone una reducción de gases de efecto invernadero generados por el vehículo, lo que, en consecuencia, provoca un menor impacto en el medio ambiente y cambio climático.

2 Introducción

En la siguiente introducción, se hablará sobre los fundamentos teóricos del problema, el software y los métodos utilizados para resolver dicho problema.

2.1 Estelas tras cuerpos romos

Tras los vehículos pesados, se forman grandes estelas que afectan significativamente a la aerodinámica del vehículo, y es muy importante conocer y entender la formación de estas y los distintos tipos que existen, para poder modificar la aerodinámica del vehículo. Para ello se debe tener en cuenta y entender el número de Reynolds.

Se trata de un parámetro adimensional que compara los términos convectivo y viscoso de la ecuación de la cantidad de movimiento, lo que matemáticamente se expresa como $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$, siendo:

- ρ la densidad.
- v la velocidad del flujo.
- D la longitud característica.
- μ la viscosidad dinámica.

En el numerador del número de Reynolds, tendremos el término convectivo, y en el denominador, el término viscoso, por lo que, un número alto de Reynolds, significa que el término convectivo tiene mucha más importancia que el término viscoso en el problema.

Este parámetro tiene una alta influencia en la estela que se forma tras los vehículos que se van a estudiar y que son culpables de gran parte de la fuerza de resistencia al avance que experimentan estos vehículos. Dependiendo del número del Reynolds, se tendrá un tipo de estela u otro. En la ilustración 1, se mostrará la multiplicidad de soluciones que existen para un cilindro bidimensional en función del número de Reynolds:

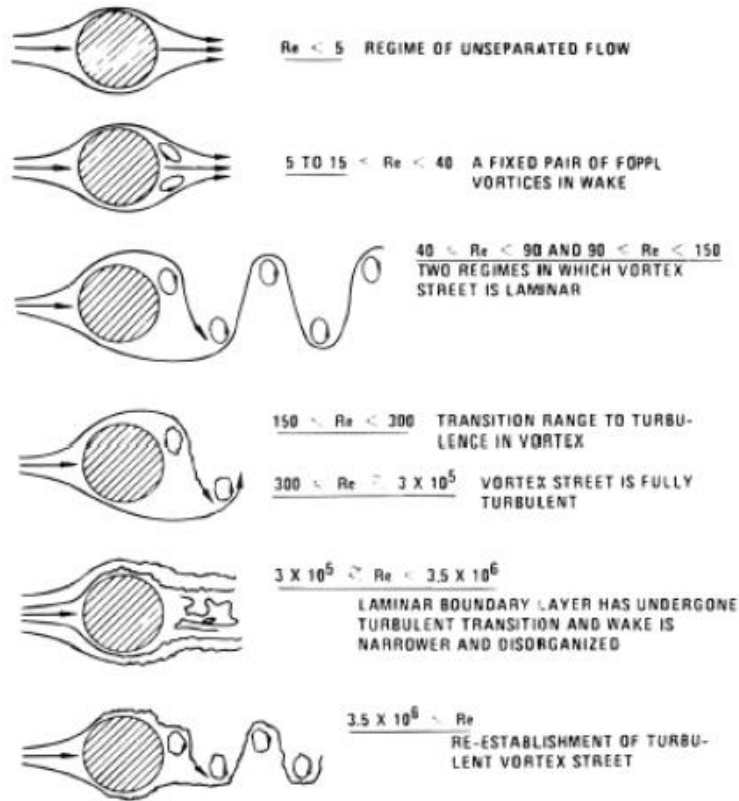


Ilustración 1: Multiplicidad de soluciones de estela para distintos regímenes de flujo sobre un cilindro bidimensional. (Blevins, 1990).

2.2 Fuerzas superficiales sobre un cuerpo en el seno de un fluido

Cuando un flujo incide sobre un cuerpo, existen dos tipos de fuerzas que actúan sobre este, las másicas y las superficiales. La ecuación que recoge las fuerzas que actúan sobre un cuerpo dentro de un flujo es la de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_{V_c(t)} \rho \bar{v} dV \right] + \int_{\Sigma_c(t)} \rho \bar{v} [(\bar{v} - \bar{v}_c) \cdot \bar{n}] d\sigma = - \int_{\Sigma_c(t)} p \bar{n} d\sigma + \int_{\Sigma_c(t)} \bar{\tau} \cdot \bar{n} d\sigma + \int_{V_c(t)} \rho \bar{f}_m dV$$

- $\frac{d}{dt} \left[\int_{V_c(t)} \rho \bar{v} dV \right]$ es la variación temporal de cantidad de movimiento dentro de un volumen de control.
- $\int_{\Sigma_c(t)} \rho \bar{v} [(\bar{v} - \bar{v}_c) \cdot \bar{n}] d\sigma$ es el flujo convectivo de cantidad de movimiento que atraviesa las superficies del contorno de nuestro volumen de control.
- $- \int_{\Sigma_c(t)} p \bar{n} d\sigma$ son las fuerzas superficiales debidas a las diferencias de presiones.

- $\int_{\Sigma_c(t)} \bar{\tau} \cdot \bar{n} d\sigma$ son las fuerzas superficiales debido a los esfuerzos viscosos.
- $\int_{V_c(t)} \rho \bar{f}_m dV$ son las fuerzas másicas.

Siendo:

- ρ la densidad.
- v la velocidad del flujo.
- v_c la velocidad de las paredes del volumen de control
- $\bar{\tau}$ el tensor de esfuerzos viscosos.
- $\bar{f}_m$ las fuerzas másicas por unidad de masa.
- p la presión.
- $\bar{n}$ la normal a la superficie.
- V_c el volumen de control.
- Σ_c la superficie del volumen de control.

En aerodinámica, debido a la baja densidad del aire, se pueden despreciar las fuerzas másicas. Además, en las condiciones de funcionamiento de este tipo de vehículos, las fuerzas debidas a los esfuerzos viscosos son despreciables frente a las fuerzas de presión, por lo que, el término más importante es el de las fuerzas de presión. Estas fuerzas de presión, al ser fuerzas superficiales, dependen de la geometría del cuerpo, siendo estas normales a la superficie del cuerpo. Buscar la geometría óptima para hacer que estas fuerzas jueguen a nuestro favor, es uno de los grandes problemas de la ingeniería.

En aerodinámica de vehículos terrestres, se pueden clasificar las fuerzas de superficie debido a diferencia de presiones, según la dirección de éstas respecto a la dirección del desplazamiento:

- Perpendicular al desplazamiento. Dependiendo del sentido, hablaremos de:
 - Sustentación o “lift”, cuando la fuerza “levanta” el cuerpo del suelo.

- Carga aerodinámica o “downforce”, cuando la fuerza “pega” el cuerpo al suelo.
- Paralela al desplazamiento. Se hablará de fuerza de arrastre o “drag”.

2.2.1 Drag

La fuerza de arrastre o “drag” se trata de una fuerza paralela y de sentido contrario al desplazamiento, que genera una resistencia al avance del cuerpo. Esta fuerza de arrastre se origina debido a la diferencia de presiones que existe entre las partes delanteras y traseras del vehículo. Esta fuerza está estrechamente relacionada con el coeficiente de arrastre C_D , parámetro que será definido en [2.7.1](#).

Es fácil entender que cuanto mayor sea la resistencia que oponga nuestro vehículo, mayor será la energía que habrá que gastar para moverlo y, por tanto, mayor será el consumo de combustible.

En la ilustración 2 se muestran las fuerzas de drag y downforce sobre un monoplaza de fórmula 1.

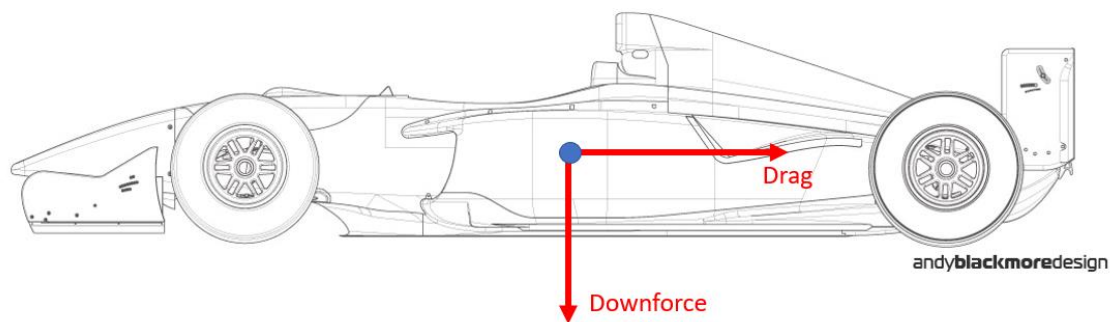


Ilustración 2: “Downforce” y “drag” sobre monoplaza de Fórmula 1 (Fernández, 2019).

2.3 Capa límite

La capa límite es una región dentro de un flujo, muy próxima a un sólido, donde el movimiento de este es perturbado debido a los esfuerzos viscosos. En esta región, al estar próxima a un sólido en cuyas paredes la velocidad del flujo es cero, se produce un gran gradiente de velocidades que provoca que los esfuerzos viscosos en esta región sean relativamente importantes. Este concepto está íntimamente relacionado con el número de Reynolds, pues de este

número, depende el tipo de capa límite que tendremos y el desprendimiento de ésta. En la ilustración 3 se muestra la capa límite laminar que genera un flujo sobre una placa plana, paralela al flujo:

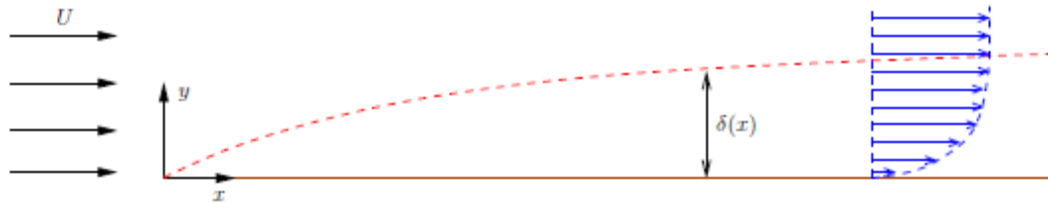


Ilustración 3: Capa límite laminar sobre una placa plana (Fernández y Ortega, 2014).

2.4 Aerodinámica de vehículos pesados

2.4.1 Características del flujo alrededor de vehículos pesados

Un tema que es imprescindible entender para realizar este trabajo es la física de flujos alrededor de vehículos terrestres pesados.

El flujo alrededor de un vehículo pesado es intrínsecamente tridimensional y presenta algunas características complejas como una capa límite turbulenta, desprendimiento y adhesión de ésta en la superficie del vehículo, desprendimiento masivo de la capa límite en los bordes de salida traseros y una gran estela asimétrica tras el vehículo, que provoca una caída de presión tras este y, como ya se ha explicado en [2.1](#), aumentará el drag en consecuencia. Todas estas características mencionadas, están estrechamente relacionadas con el consumo de combustible, la emisión de gases de efecto invernadero o estabilidad en la conducción entre otros.

El flujo alrededor de vehículos pesados terrestres, a diferencia de otros medios de transporte pesados, como aviones o barcos, se caracteriza por el desprendimiento masivo de la capa límite, lo que afecta significativamente a las fuerzas y momentos aerodinámicos experimentados por el vehículo. Este fenómeno es más notable cuando existen bordes afilados en el vehículo, pues facilita en gran medida la separación de la capa límite en estos bordes.

Para el estudio de la aerodinámica de vehículos pesados, se toma como referencia el cuerpo Ahmed. Se trata de un modelo simplificado de vehículo pesado. Los resultados que se obtienen en este cuerpo, son aproximaciones de los resultados que se obtienen las geometrías reales, conservando las

características complejas de flujo mencionadas anteriormente. En la ilustración 4 se muestra el modelo Ahmed:

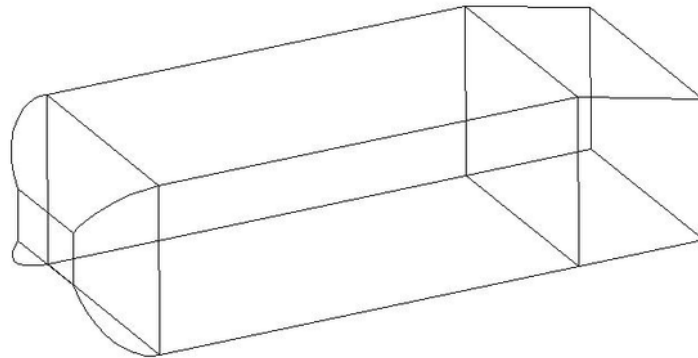


Ilustración 4: Modelo Ahmed (D'Elía, 2003).

Se ha trabajado en la mejora de este tipo de vehículos, debido a que estos están optimizados para poder transportar la mayor cantidad de carga posible, pero se ha dejado de lado la optimización aerodinámica en la mayoría de los diseños.

2.4.2 Influencia del ángulo de inclinación trasero en la aerodinámica de vehículos pesados

Ahmed *et al.* (1984), investigaron el efecto del ángulo de inclinación trasero (α) sobre la resistencia aerodinámica en un modelo de vehículo de base roma, observando las estructuras de flujo que se forman en la estela de vehículos modelo, diferenciando modelos con caja cuadrada y vehículos con caja con ángulo de inclinación trasero. Para cada uno de estos casos se obtuvieron distintos resultados. En la ilustración 5 se muestra un modelo Ahmed con ángulo de inclinación trasero.

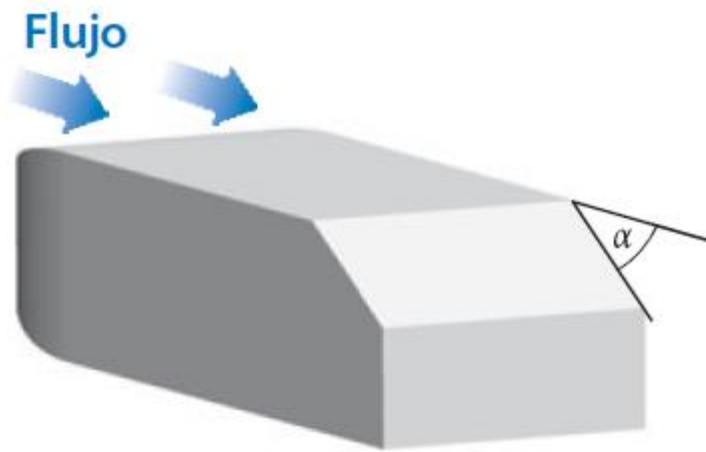


Ilustración 5: Modelo simplificado con ángulo de inclinación trasero (Choi, Lee y Park, 2013).

2.4.2.1 Vehículos con ángulo α igual a cero

En vehículos con un ángulo de inclinación cero, caso más común en camiones de gran tonelaje, se produce un desprendimiento masivo de la capa límite en el borde de salida, lo que provoca una gran burbuja de recirculación tras el vehículo. Esta burbuja de recirculación es intrínsecamente tridimensional, genera una gran caída de presión tras el vehículo y se trata de una de las grandes fuentes de arrastre aerodinámico (Choi, Lee y Park, 2013).

2.4.2.2 Vehículos con ángulo α distinto de cero

Para un ángulo $0^\circ < \alpha \leq 12,5^\circ$, el flujo permanece adherido a la superficie inclinada y la separación principal se produce en el borde de salida trasero. Para este intervalo de α , a medida que α aumenta, el drag disminuye hasta llegar al mínimo en $\alpha = 12,5^\circ$. Para $12,5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, el flujo comienza a separarse en el borde delantero de la superficie inclinada, pero se vuelve a adherir rápidamente, creando una pequeña burbuja de recirculación en la superficie inclinada cuyo tamaño crecerá a medida que crece α . En este último rango se generan un par de vórtices longitudinales contrarrotatorios en los bordes laterales de la superficie inclinada, cuya fuerza aumenta con el incremento de α , convirtiéndose en la principal fuente del incremento de drag. Cuando $\alpha > 30^\circ$, los vórtices longitudinales desaparecen y el flujo no consigue adherirse de nuevo en la superficie inclinada, por lo que los resultados obtenidos son similares a un ángulo $\alpha = 0^\circ$ (Choi, Lee y Park, 2013). En la ilustración 6 se muestran las estructuras de flujo que se forman sobre un modelo Ahmed con ángulo de inclinación trasero y

una gráfica que representa los coeficientes de arrastre respecto del ángulo de inclinación.

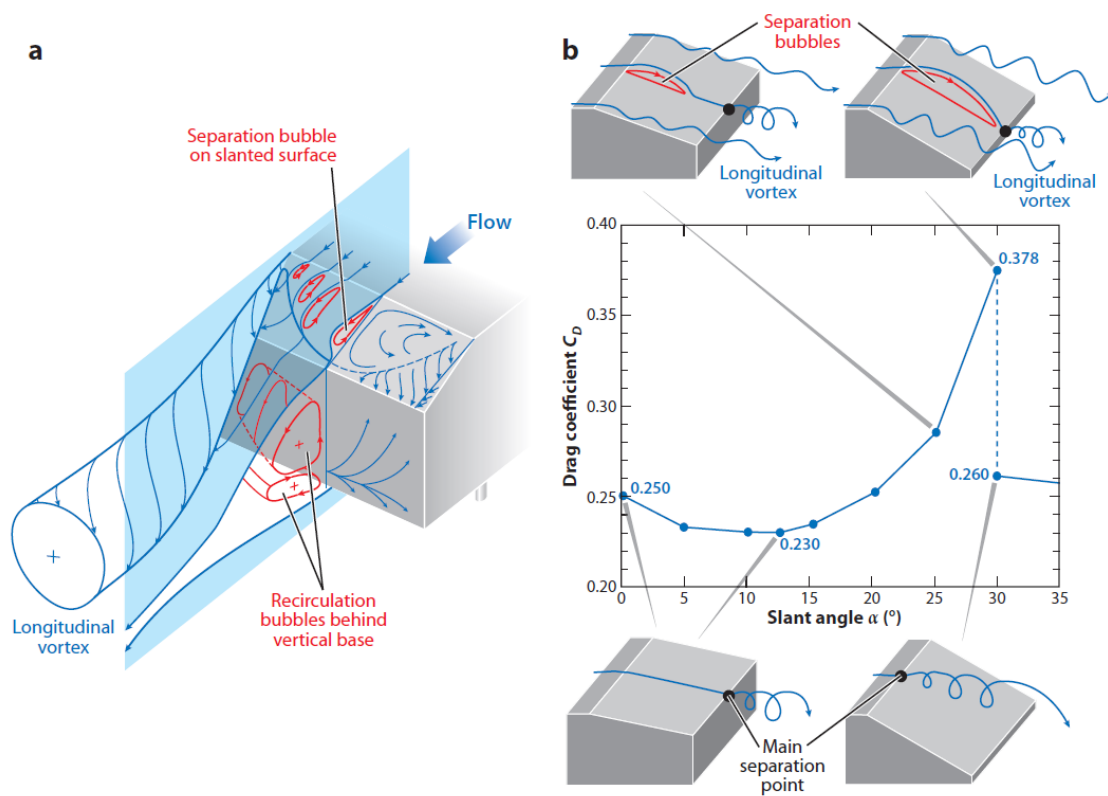


Ilustración 6: Flujo sobre modelo Ahmed (Choi, Lee y Park, 2013).

2.4.3 Efecto suelo

Cuando un cuerpo en movimiento se encuentra cerca de una pared, la proximidad a la pared tiene un notable efecto sobre las fuerzas aerodinámicas y las estructuras de flujo. A este fenómeno se le conoce como efecto suelo. Este efecto depende principalmente de dos parámetros:

- **La velocidad del cuerpo respecto al suelo.** Con un suelo móvil se demostró un menor arrastre y sustentación que con un suelo estacionario (Choi, Lee y Park, 2013).
- **La distancia al suelo.** Siewny *et al.*, (2010) realizaron una simulación turbulenta para investigar el efecto de la distancia al suelo en vehículos pesados terrestres, mostrando que el arrastre disminuye a medida que disminuye la distancia al suelo (Choi, Lee y Park, 2013).

2.5 Mecánica de fluidos computacional (CFD)

La mecánica de fluidos computacional o CFD se trata de una rama de la mecánica de fluidos que utiliza estructuras de datos y cálculo numérico para resolver problemas de mecánica de fluidos. Los softwares de CFD funcionan mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes discretizadas, ya que, la mayoría de los problemas de mecánica de fluidos, no tienen solución analítica. En la mayoría de softwares de CFD, se discretizan las ecuaciones de Navier-Stokes por el método de volúmenes finitos. Los cálculos numéricos utilizados en estos softwares, usan una serie de simplificaciones, por lo que, para estar seguro de los resultados obtenidos, hay que validarlos experimentalmente. Con el desarrollo del CFD, cada vez se consiguen simular problemas más complejos como flujos transónicos y flujos turbulentos, con mayor precisión y de forma más rápida. Las ecuaciones de Navier-Stokes, que se han utilizado para la obtención de los resultados de este TFG son las siguientes:

- Ecuación de continuidad:

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

- Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{f}_m$$

Siendo $\bar{\bar{\tau}}$, el tensor de esfuerzos y el resto de variables igual que en [2.2](#).

Existen numerosos códigos CFD como Solidworks, Simflow, OpenFoam, ParaView... pero entre todos ellos, se ha escogido Ansys Fluent, debido a que la Universidad de Jaén tiene licencia para tal software, además de que se trata de un software muy utilizado en la industria.

2.6 Método adjunto o “adjoint”

El método adjunto se trata de un método que permite optimizar formas mediante cálculo numérico de sensibilidad de la geometría respecto a cualquier variable fluida. Su ventaja radica en el hecho de que es capaz de involucrar numerosas variables independientes en el problema de optimización, con un

coste computacional relativamente bajo. Consiste en el cálculo de la sensibilidad de una función objetivo a través de variables de estado adjuntas, utilizando un algoritmo de optimización en el gradiente (Gradient-based). El cálculo de las variables de estado adjuntas se realiza en un único paso. La ventaja de este método es evidente, puesto que, en problemas de optimización topológica, el número de parámetros o variables de diseño es el número de desplazamientos de cada una de las celdas que conforman la geometría a modificar (Tzanakis, 2014).

Para implementar el método adjunto, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Definir la geometría que se quiere optimizar y generar una malla para dicha geometría.
2. Resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en cada una de las celdas computacionales de la malla generada, implementando los métodos deseados y parámetros del flujo del problema.
3. Una vez obtenidos los resultados, se definen las variables fluidas que se desean estudiar y se obtiene la sensibilidad al cambio de geometría respecto de dichas variables.
4. Una vez obtenida la sensibilidad, se modifica la geometría y malla de acuerdo a los resultados obtenidos y se vuelven a resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para la nueva geometría, obteniendo los nuevos valores de la variable fluida estudiada.

Este proceso se repetirá el número de veces que se requiera, hasta obtener los resultados deseados.

5. Finalmente, se obtendrá la geometría optimizada de acuerdo a la variable fluida de estudio y se evaluarán los resultados obtenidos.

Este proceso ha sido utilizado para la optimización de las geometrías en la industria aeroespacial desde los años 70 y, recientemente, se ha empezado a implementar en la industria automovilística y optimización de conductos (Tzanakis, 2014).

En la ilustración 7, se muestra un esquema simplificado que resume el proceso de optimización mediante el método adjunto, siendo el método que se ha utilizado en la optimización geométrica de nuestro diseño.

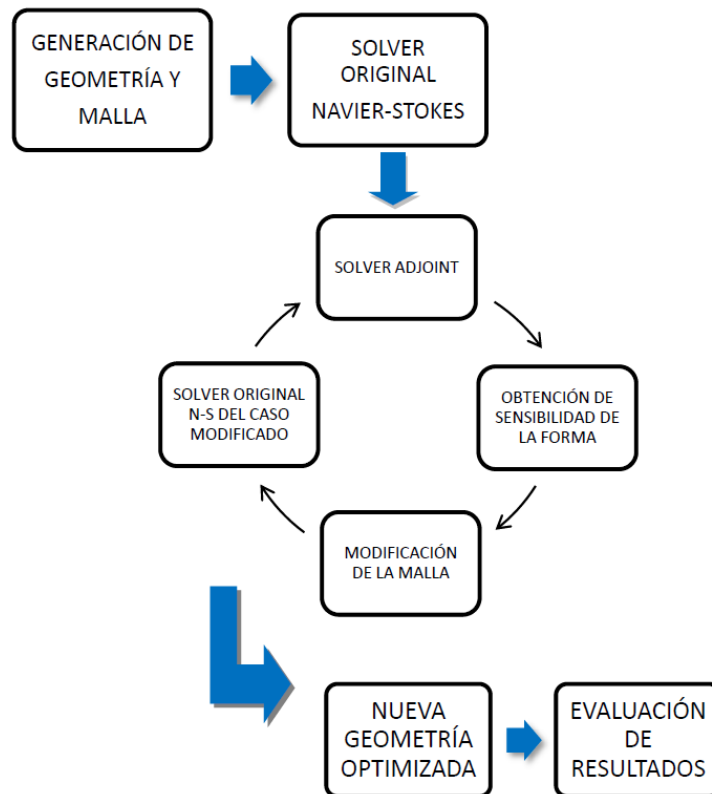


Ilustración 7: Metodología adjoint. (Tzanakis, 2014).

2.7 Definiciones de interés

En este subcapítulo, se introducirán algunas definiciones de conceptos que serán usados a lo largo del TFG.

2.7.1 Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre o C_D , es un parámetro adimensional, que nos indica como afecta la forma del cuerpo a la fuerza de arrastre. Este parámetro depende de la geometría y del Reynolds. La ecuación que relaciona el drag con C_D , es la siguiente:

$$Drag = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D$$

- ρ la densidad.
- v la velocidad del flujo.

- A el área.
- C_D el coeficiente de arrastre.

2.7.2 Coeficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación o C_L , es un parámetro adimensional, que nos relaciona la sustentación de un cuerpo, con la densidad y velocidad de un fluido y el área de referencia de un cuerpo. Al igual que C_D , depende de la geometría y del Reynolds. La ecuación que relaciona la sustentación con C_L , es la siguiente:

$$Sust = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L$$

Las variables son exactamente las mismas que en [2.7.1](#).

2.7.3 Numero de MATCH

El número de MATCH (M) es un parámetro adimensional, expresado como: $M = \frac{v}{c}$, que compara la velocidad del flujo (v) y la velocidad del sonido en el medio en el que se mueve el objeto de estudio (c).

2.7.4 y^+

y^+ es un parámetro adimensional que indica la distancia adimensionalizada desde una pared del contorno, hasta el centroide de las celdas computacionales de la primera capa. Es usado para definir el espesor de la primera capa de celdas computacionales alrededor de la superficie de estudio. Su expresión matemática es la siguiente: $y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu}$, siendo:

- ρ la densidad.
- μ la viscosidad dinámica.
- u_τ la velocidad cortante.
- y_p la distancia de la pared al centroide de las celdas de la primera capa.

2.7.5 Funciones de pared

Las funciones de pared o “wall functions” son ecuaciones empíricas usadas para calcular variables de flujo cerca de las paredes, que reducen el error generado por las interpolaciones entre celdas computacionales realizadas en las simulaciones.

2.7.6 Coeficiente de presión adimensionalizada

El coeficiente de presión o C_p , es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo en mecánica de fluidos. Su expresión matemática es la siguiente: $C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2}$, siendo:

- ρ_∞ la densidad del fluido.
- U_∞ la velocidad de flujo libre
- P la presión de trabajo.
- P_∞ la presión de referencia.

2.7.7 Número de Courant-Friedrichs-Lewy

El número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), se trata de un parámetro adimensional y representa el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito. Se aplica en la solución de ecuaciones en derivadas parciales. Con este parámetro se determina la estabilidad de una simulación. Su expresión matemática es $CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$, siendo:

- u la velocidad
- Δt el intervalo de tiempo
- Δx el intervalo de espacio

3 Descripción del problema y set up numérico

En este proyecto se analizará un flujo bidimensional, que se considerará incompresible, pues los efectos de compresibilidad empiezan a ser notorios a partir de $MACH > 0,3$, siendo una velocidad mucho mayor que la de trabajo. El flujo será de un fluido con densidad ρ y viscosidad μ y velocidad inicial horizontal U_∞ sobre un camión bidimensional de altura D , siendo todos los parámetros constantes y conocidos. Conocidos todos los datos anteriores se puede caracterizar el flujo alrededor de nuestro camión mediante el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}.$$

Se presentarán dos casos distintos, ambos con régimen turbulento de flujo. Se estudiará un caso cuyo Re será igual a 20.000 y otro caso cuyo Re será igual a 200.000. Para ambos casos se mantendrán constantes todos los parámetros, excepto la viscosidad dinámica del fluido, siendo $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, $U_\infty = 7,3 \text{ m/s}$ y $D = 0,04 \text{ m}$. Para el caso con $Re = 20.000$, se tendrá una $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, mientras que para el caso con $Re = 200.000$, se tendrá una $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$.

El esquema del problema se muestra en la ilustración 8:

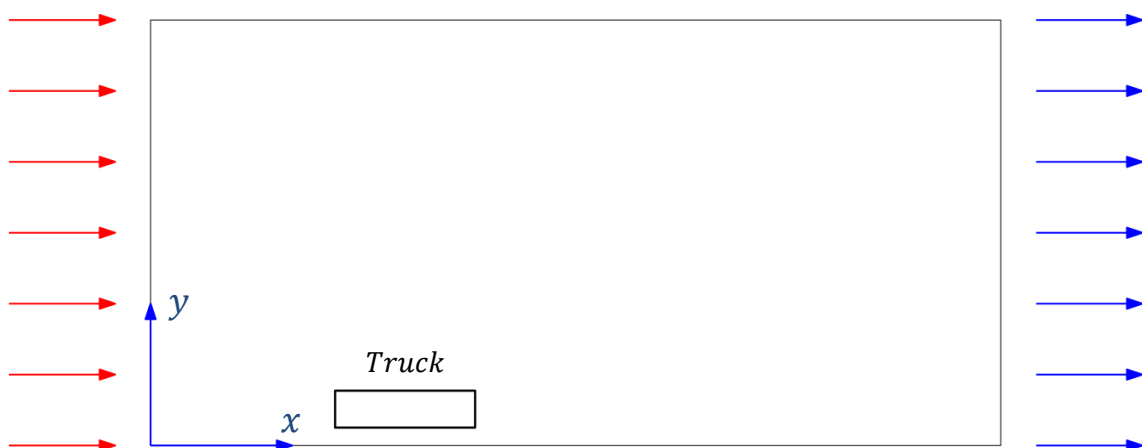


Ilustración 8: Esquema del problema

La razón por la que se ha cambiado la viscosidad dinámica en lugar de la velocidad, es porque, al variar la velocidad del flujo, el CFL cambia, por lo que

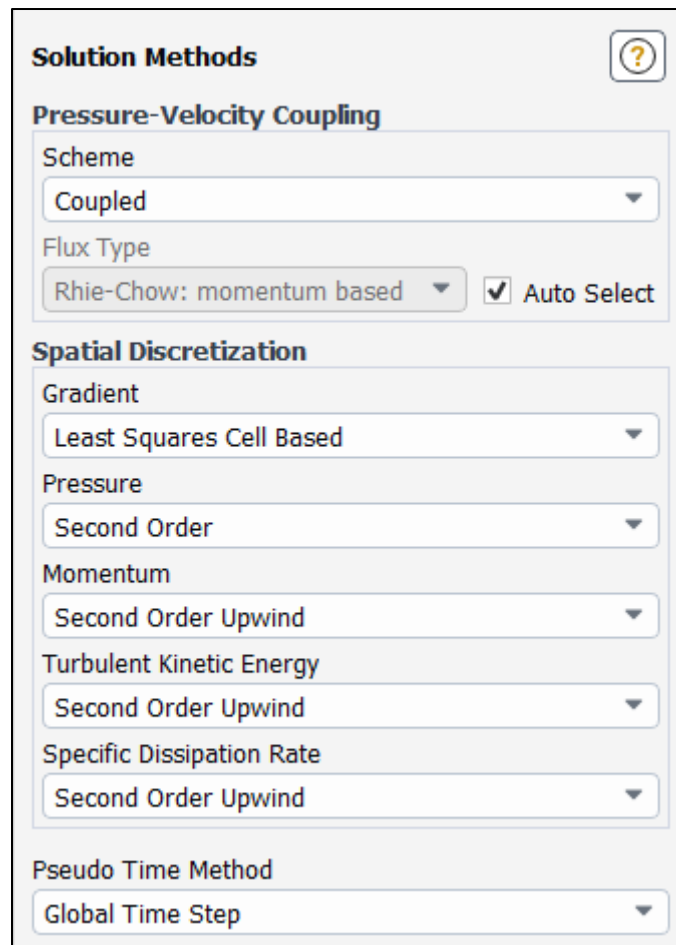
habría que cambiar el tamaño de malla en función del régimen de flujo para mantener la estabilidad de la simulación. Cambiando la viscosidad dinámica del fluido, esto no ocurre.

El cambio de la viscosidad en lugar de la velocidad, es totalmente válido, ya que, tanto el coeficiente de arrastre (C_D) como el de sustentación (C_L), dependen únicamente del Reynolds y de la geometría, por lo que se puede variar el número de Reynolds cambiando cualquiera de las variables que lo componen.

3.1 Set up numérico

Para realizar todas las simulaciones, se ha configurado el software de la misma manera en cada una de ellas, fijando una serie de características comunes que se muestran a continuación:

- Todas las simulaciones han sido estacionarias para calcular así, la aproximación del flujo medio sobre el vehículo.
- Se utiliza el modelo turbulento SST k-omega, ya que proporciona una mejor predicción de la separación del flujo que el resto de modelos RANS y tiene un buen comportamiento ante gradientes de presiones adversos. Por otro lado, tiene algunos inconvenientes, como la producción de grandes niveles de turbulencia en zonas de estancamiento o de altas aceleraciones. Es el modelo más utilizado en la industria, debido a su alta precisión en relación al gasto computacional
- El criterio de convergencia absoluta de los residuales se dejará por defecto en 0,001, tanto en la solución del problema fluido, como en adjoint.
- Se han utilizado métodos de discretización espacial de segundo orden, ya que, aunque son más costosos computacionalmente, nos van a proporcionar una mayor precisión en los resultados. Además, para el acoplamiento presión-velocidad, se ha utilizado el método acoplado y, aunque las simulaciones son estacionarias se define un el método global time step para el “falso paso de tiempo”. Los métodos usados se muestran en la ilustración 9:



Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
Coupled

Flux Type
Rhie-Chow: momentum based ☒ Auto Select

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
Second Order

Momentum
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy
Second Order Upwind

Specific Dissipation Rate
Second Order Upwind

Pseudo Time Method
Global Time Step

Ilustración 9: Métodos usados en simulaciones

- Se realizará una inicialización híbrida y un cálculo de 300 iteraciones.
- En métodos para el cálculo con adjoint, seleccionamos “best match”, para que automáticamente nos proporcione los mejores métodos de acuerdo a los métodos usados en Navier-Stokes. De nuevo, nos proporciona métodos de segundo orden, siendo más precisos y costosos computacionalmente.
- En adjoint solver, usaremos 300 iteraciones
- Se utiliza el modo “gradient based optimizer”, modo que implementa automáticamente el método adjoint (2.6). Se han seleccionado una reducción inicial del 3,5% del drag y 20 iteraciones de diseño, en las que el propio programa adaptará el porcentaje de reducción de drag a la sensibilidad obtenida.
- El resto de parámetros se dejará por defecto.

3.2 Camión modelo GTS

El consorcio de arrastre aerodinámico de vehículos pesados, desarrolló dos modelos simplificados de vehículos “tractor-remolque” en un proyecto de investigación de varios años (McCallen *et al.* 2004) para obtener una comprensión clara de los fenómenos de flujo responsables del arrastre aerodinámico. Uno de estos dos modelos, es el modelo GTS (Ground transportation system) (Croll *et al.*, 1996, Gutiérrez *et al.*, 1996, Maddox *et al.*, 2004, McCallen *et al.*, 2004, Ortega *et al.*, 2004, Roy *et al.*, 2006, Salari *et al.*, 2004, Storms *et al.*, 2001), modelo en el que nos hemos basado para realizar nuestras optimizaciones geométricas. El modelo GTS se trata de una versión simplificada de camión en el que la cabina y el remolque están unidos suavemente sin ningún tipo de característica geométrica real y en la que carecemos de ruedas.

En la ilustración 10, se muestra el modelo 3D de camión GTS:

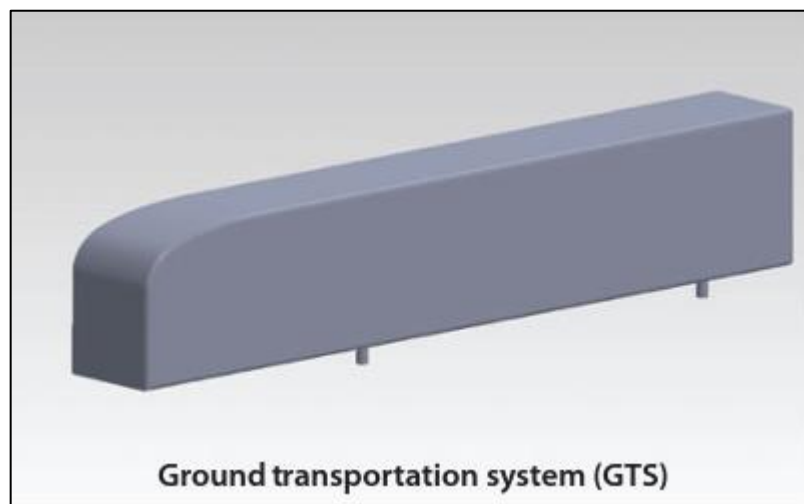


Ilustración 10: Modelo GTS (Choi, Lee y Park, 2013)

Realizando una primera observación, se puede ver que el modelo GTS no tiene ángulo de inclinación trasero y consta de un borde romo en la parte superior delantera, mientras que el resto de bordes son afilados.

3.2.1 Dimensiones de los vehículos

Como ya hemos dicho antes, el flujo del problema es bidimensional, luego, el problema a resolver será bidimensional. Las mejoras aerodinámicas se

realizarán sobre dos modelos 2D, los cuales se han definido tomando el modelo GTS como referencia.

A continuación, se muestran la normalización de ambas geometrías, a escala 1:100 y estando todas las cotas en milímetros.

- A la primera geometría la he llamado “Modelo 1”, cuya normalización se muestra en la ilustración 11:

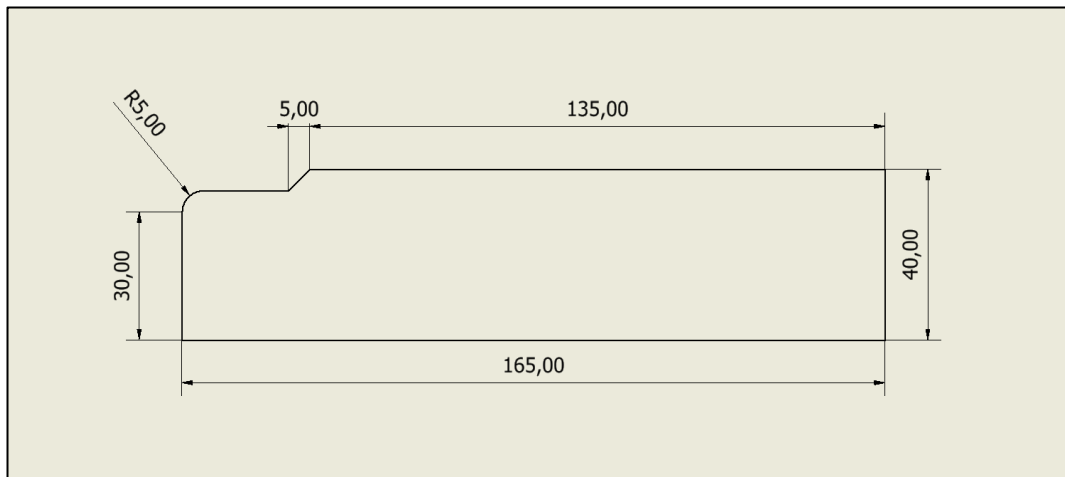


Ilustración 11: Modelo 1.

- A la segunda geometría la he llamado “Modelo 2”, cuya normalización se muestra en la ilustración 12:

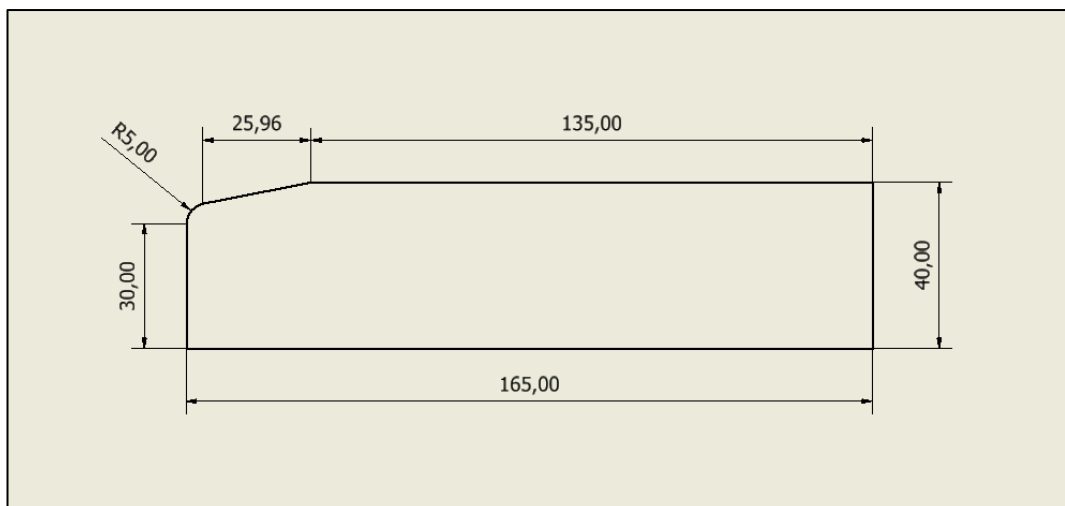


Ilustración 12: Modelo 2.

La única diferencia que existe entre ambas geometrías es en la parte delantera superior. En este sentido el Modelo 1, consta de un capitoné corto,

siendo similar a vehículos tipo tráiler, mientras que, el Modelo 2, consta de un capitoné más largo que se une directamente con el borde frontal superior, asemejándose más a un vehículo tipo autobús.

3.3 Sistema de coordenadas y condiciones de contorno

Se situará el origen de coordenadas en la entrada del flujo, parte inferior y consideraremos el eje x positivo hacia la derecha y eje y positivo hacia arriba.

A continuación, se muestran las condiciones de contorno utilizadas:

- En la entrada o “inlet”, se impone una condición de contorno de flujo uniforme $\bar{u} = (U_\infty, 0)$. En este caso $U_\infty = 7,3 \text{ m/s}$.
- En la salida o “outlet”, se impone una condición de contorno tipo Dirichlet para la presión, $p = 0$ y una condición de contorno tipo Neumann para la velocidad, $\bar{n} \cdot \nabla \bar{u} = 0$, siendo $\bar{n}$ la normal a la superficie.
- Para la parte superior o “top” se impone una condición de contorno de deslizamiento $\bar{n} \cdot \bar{u} = 0$, siendo $\bar{n}$ la normal a la superficie.
- En el suelo o “floor” se impone una condición de contorno de superficie móvil $\bar{v} = (U_\infty, 0)$, siendo $U_\infty = 7,3 \text{ m/s}$ además de una condición de no deslizamiento.
- En el camión o “truck”, se impone una condición de no deslizamiento.

En la ilustración 13, se muestra el contorno del dominio computacional:

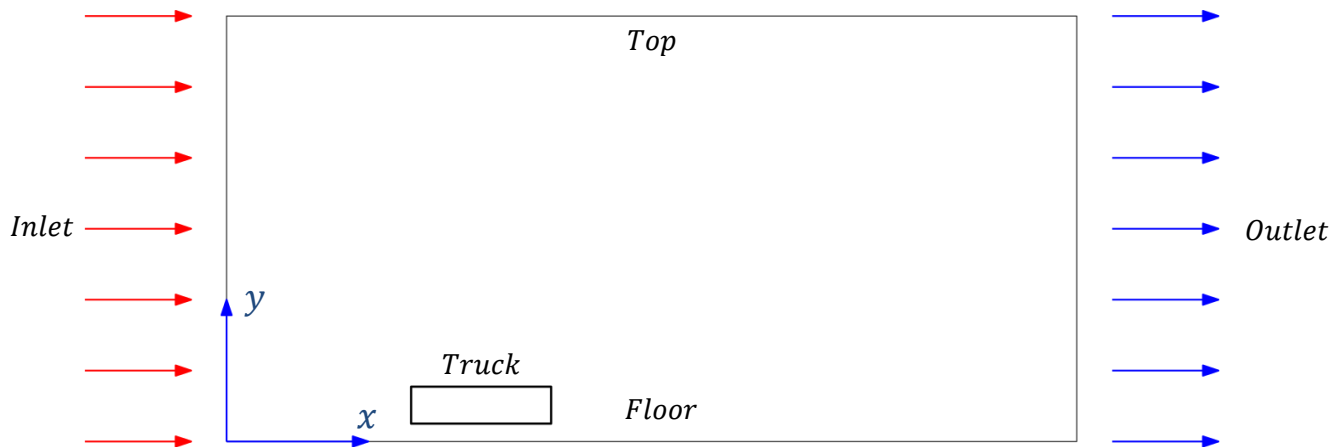


Ilustración 13: Contorno del dominio computacional.

3.4 Geometrías generadas para el modelo GTS

Una vez definidas las dimensiones de los modelos, se procede a definir las geometrías del dominio computacional. De acuerdo a la información extraída de artículos anteriores (Choi, Lee y Park, 2013), se ha definido el área de influencia del camión sobre el flujo de la siguiente manera:

- Por encima del camión, se define una altura de diez veces la altura del camión. Tanto el modelo 1, como el modelo 2 miden 0,04 m de altura, por lo que, la altura, medirá 0,4 metros.
- Por debajo del camión, se ha definido una distancia hasta el suelo de 0,005 m, que se trata de la distancia desde la base del camión, hasta el suelo.
- Por delante del camión se ha definido una distancia de cinco veces la altura del camión, lo que supone una distancia de 0,2 m.
- Por detrás del camión se ha definido una distancia de quince veces la altura del camión que supone una distancia de 0,6 m.

Aplicando dichas condiciones se obtienen las geometrías definitivas.

- En la figura 14, se muestra la geometría del modelo 1:

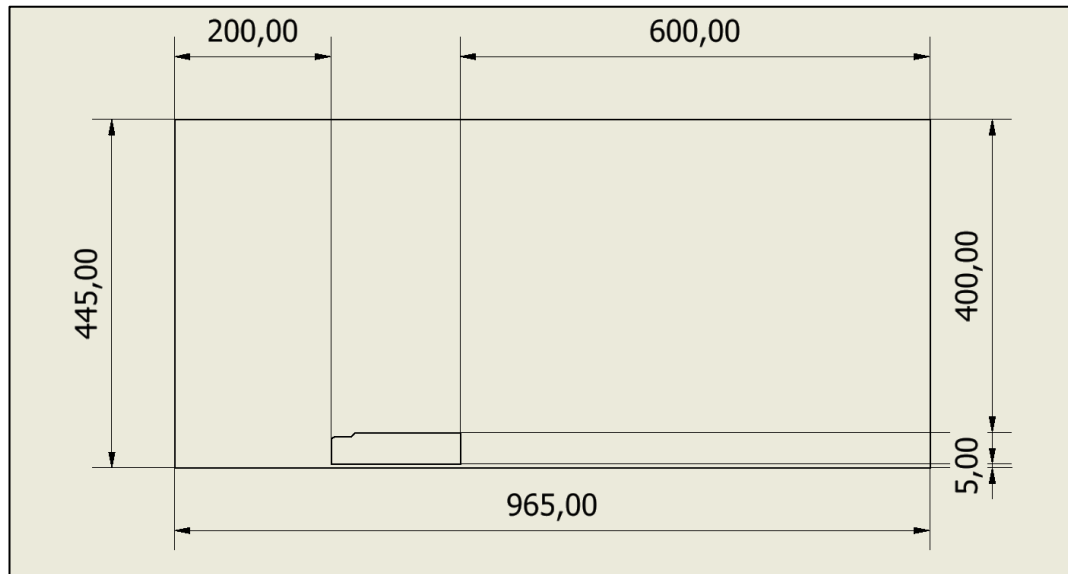


Ilustración 14: Geometría definitiva "Modelo 1".

- En la figura 15, se muestra la geometría del modelo 2:

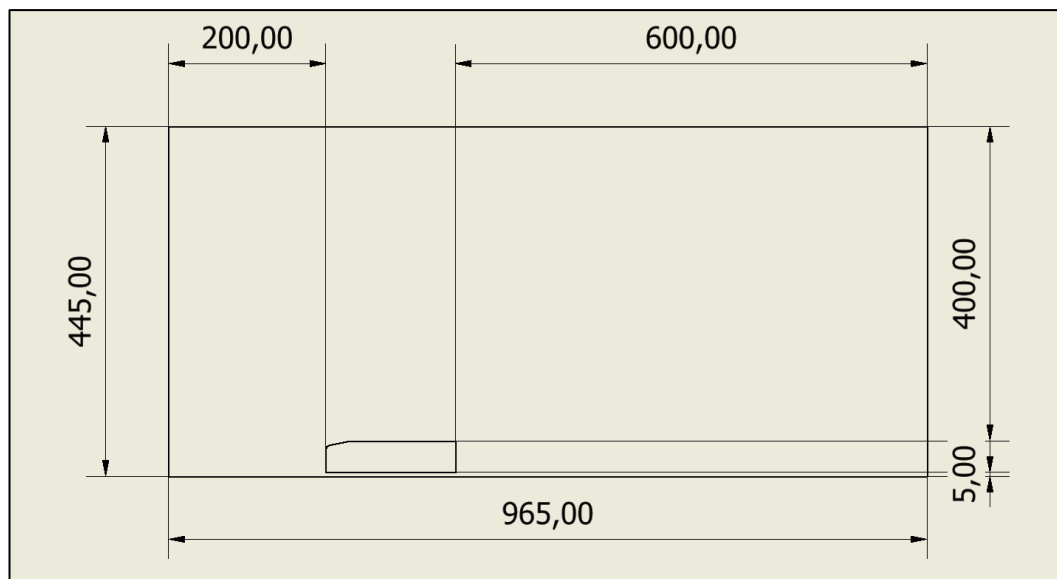


Ilustración 15: Geometría definitiva "Modelo 2".

3.5 Mallado de las geometrías

Una vez definido el dominio computacional, el siguiente paso es mallarlo para obtener el conjunto de celdas computacionales donde se resolverán las ecuaciones de Navier-Stokes y adjoint para obtener los resultados deseados. Para realizar el mallado de ambas geometrías se ha utilizado el mallador

automático de Ansys meshing, siguiendo el proceso que se explica a continuación:

1. Se cambia “physics preference” a CFD y se selecciona un tamaño de celda de 0,002 m.
2. Se realizará un refinamiento de malla cerca del camión, ya que nos permitirá capturar con mayor precisión la separación y adhesión de la capa límite, además de obtener resultados más precisos. Para ello se realizarán dos operaciones:
 - a. **Sizing.** Una operación sizing aplicada a un borde de contorno, consiste en la división de un borde en elementos de malla de tamaño independiente al tamaño de celda computacional seleccionado. Como en el siguiente apartado (3.5) se cambiará el tamaño de celda para comprobar la convergencia de malla, se fijará un valor en los bordes del camión de 0,002 m.
 - b. **Inflation.** Una operación inflation consiste en la generación de un número de capas de celdas computacionales alrededor del contorno que deseemos dentro de la geometría, sobre las que se pueden controlar el tamaño de estas, número de capas y el índice de crecimiento de las capas. Esta operación se aplicará tanto para el camión, como para el suelo, ya que, al tener un suelo móvil, también existirá capa límite en este y nos permite capturar de manera más precisa la actividad de esta. Para simulaciones en las que se necesiten una alta precisión, se utilizan valores de $y^+ \sim 1$, lo que provoca un gran refinamiento de malla, elevando bastante el coste computacional, mientras que para simulaciones en las que no se requiera excesiva precisión, se podría utilizar un valor en el intervalo $30 \leq y^+ \leq 200$. En nuestro caso, el software usa “wall functions” (2.7.5), por lo que no es necesario usar un valor muy pequeño de y^+ . El valor de y^+ será tal que $30 \leq y^+ \leq 200$. Se va a utilizar un primer espesor de celda de 0,0002 m e índice de crecimiento de 1,3. Se ha utilizado un número de 8 capas para el camión y 4 capas para el suelo.

Finalmente, la malla del modelo 1 quedaría como se muestra en la ilustración 16:

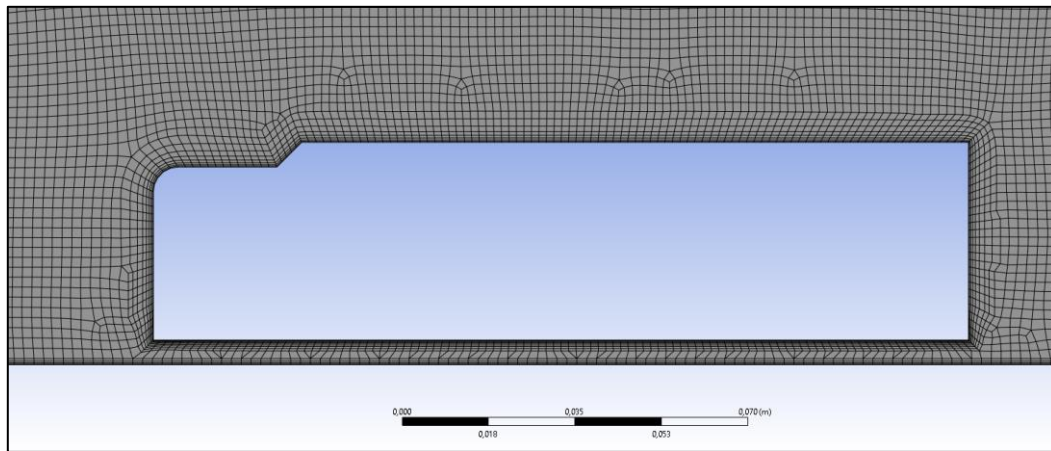


Ilustración 16: Malla del modelo 1.

Realizando exactamente los mismos pasos y escogiendo exactamente los mismos valores, se obtiene la malla base para el modelo 2, la cual, se muestra en la ilustración 17:

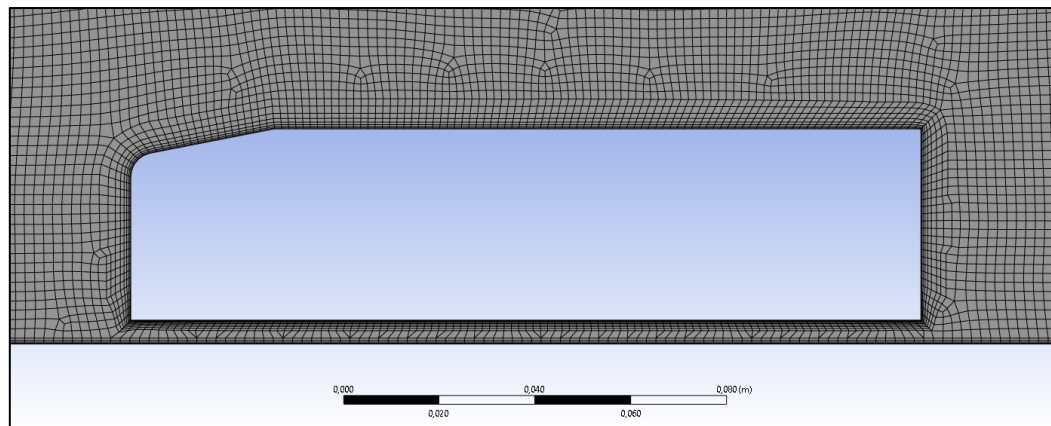


Ilustración 17: Malla del modelo 2

3.6 Convergencia de malla

La malla óptima para un problema es aquella que proporciona unos resultados precisos con un coste computacional reducido. Obviamente, cuantas más celdas computacionales tenga la malla utilizada, más precisos serán los resultados, pero a partir de cierto número de celdas, los resultados varían muy poco y merece la pena reducir el número de celdas para tener un menor coste computacional. En este apartado se comparará los resultados de los casos base con 110.000 elementos y nodos, con otros dos casos, en los que tendremos unos

50.000 y 20.000 elementos y nodos y se comprobará si es factible utilizar una malla menos refinada para obtener un menor coste computacional.

Utilizando los parámetros, modelos y métodos por defecto, se realizan simulaciones con las tres mallas anteriormente mencionadas, tanto para el modelo 1, como para el modelo 2 a $Re=20.000$ y $Re=200.000$, y se mide el arrastre aerodinámico sobre el camión para cada una de las simulaciones.

Para el modelo 1 se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 1:

Modelo 1	Nº elementos	Drag (N)		Error (%)	
		Re 20.000	Re 200.000	Re 20.000	Re 200.000
	110.000	0,8629	0,8076	-	-
	50.000	0,8736	0,8119	1,2	0,5
	20.000	0,8894	0,8126	3,07	0,62

Tabla 1: Convergencia de malla para el modelo 1.

Para el modelo 2 se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 2:

Modelo 2	Nº elementos	Drag (N)		Error (%)	
		Re 20.000	Re 200.000	Re 20.000	Re 200.000
	110.000	0,8240	0,7354	-	-
	50.000	0,8275	0,7401	0,4	0,64
	20.000	0,8347	0,7500	1,30	1,99

Tabla 2: Convergencia de malla para el modelo 2.

Podemos observar que, para las mallas de 50.000 elementos, el error es bastante pequeño, pero en las mallas de 20.000 elementos, sobre todo en el modelo 1, el error empieza a ser más notorio, por lo que vamos a usar las mallas de 50.000 elementos para nuestras simulaciones.

La malla definitiva para el modelo 1 se muestra en la ilustración 18:

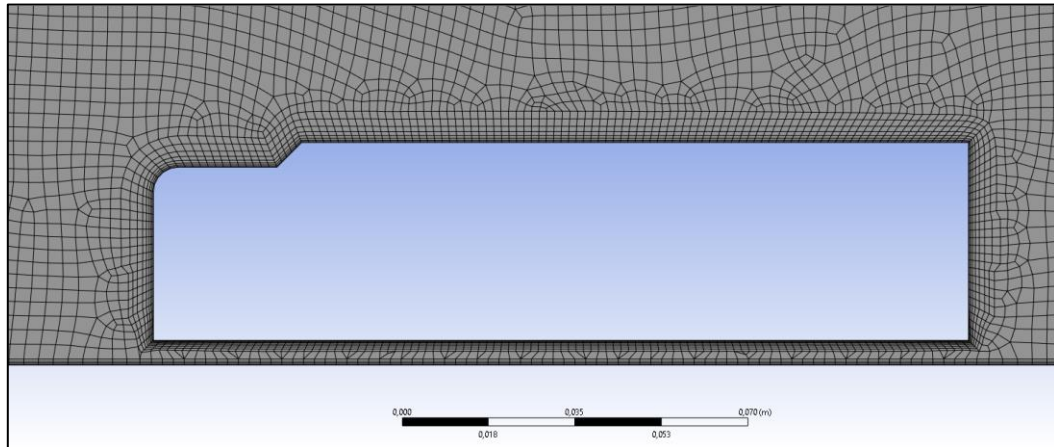


Ilustración 18: Malla definitiva modelo 1.

La malla definitiva para el modelo 2 se muestra en la ilustración 19:

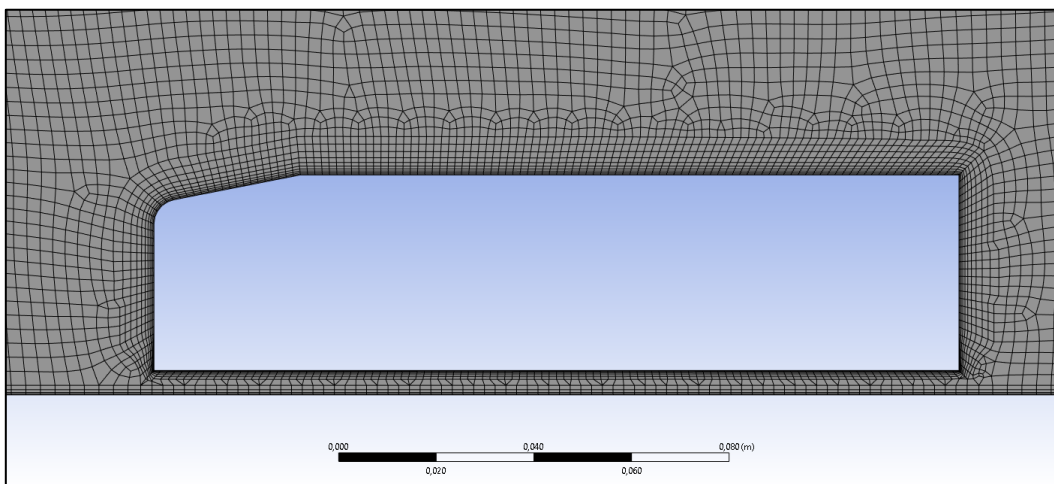


Ilustración 19: Malla definitiva modelo 2.

4 Resultados

4.1 Resultados base

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para los modelos 1 y 2 sin ningún tipo de modificación, para, posteriormente, compararlos con los resultados de los modelos modificados. Se utiliza la misma escala para todos los isocontornos, excepto los de sensibilidad, puesto que los rangos en cada caso son muy distintos. Como ya se ha informado anteriormente, se realizarán simulaciones a $Re=20.000$ y $Re=200.000$.

4.1.1 Modelo 1

4.1.1.1 Re=20.000

Una vez realizada la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

- Se muestran los isocontornos de velocidad y presión en las ilustraciones 20 y 21 respectivamente:

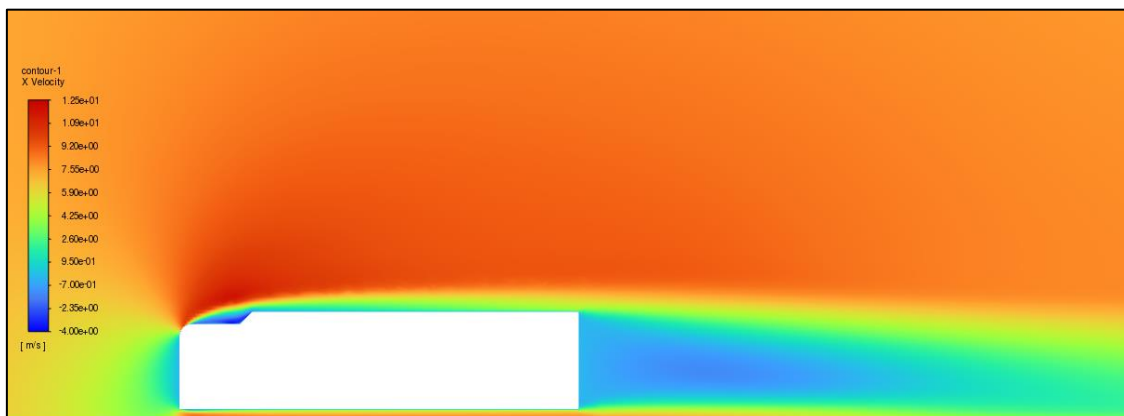


Ilustración 20: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$.

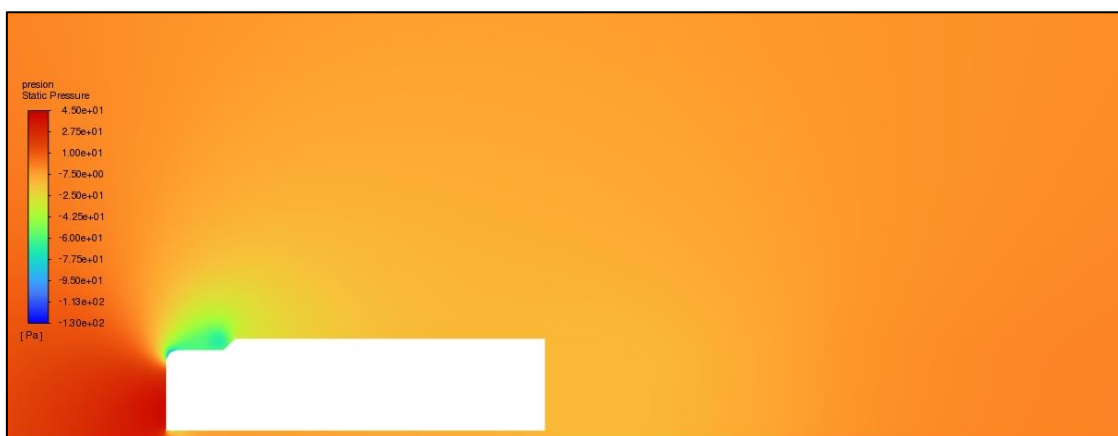


Ilustración 21: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=20.000$.

En cuanto a los isocontornos de velocidad en x y presión, se puede observar que el flujo, al chocar con la cabina del camión, reduce significativamente su velocidad provocando así, una zona de alta presión. Por debajo del camión, se puede ver que el flujo se acelera, debido a que la sección de paso se ve significativamente reducida, disminuyendo así la presión estática bajo el camión. A este efecto, se le conoce como efecto Venturi y está estrechamente relacionado con el efecto suelo. Tras el borde superior delantero se produce un desprendimiento de flujo que da lugar a una pequeña burbuja de recirculación, donde se reduce significativamente la presión. Tras el capitoné el flujo se adhiere a la caja del camión generando una muy pequeña y fina recirculación y finalmente, se desprende en el borde de salida trasero, generando una gran burbuja de recirculación tras el vehículo, cuya longitud se ha calculado y será mostrada en los resultados del TFG.

- Se muestra en la ilustración 22, la gráfica XY de presión:

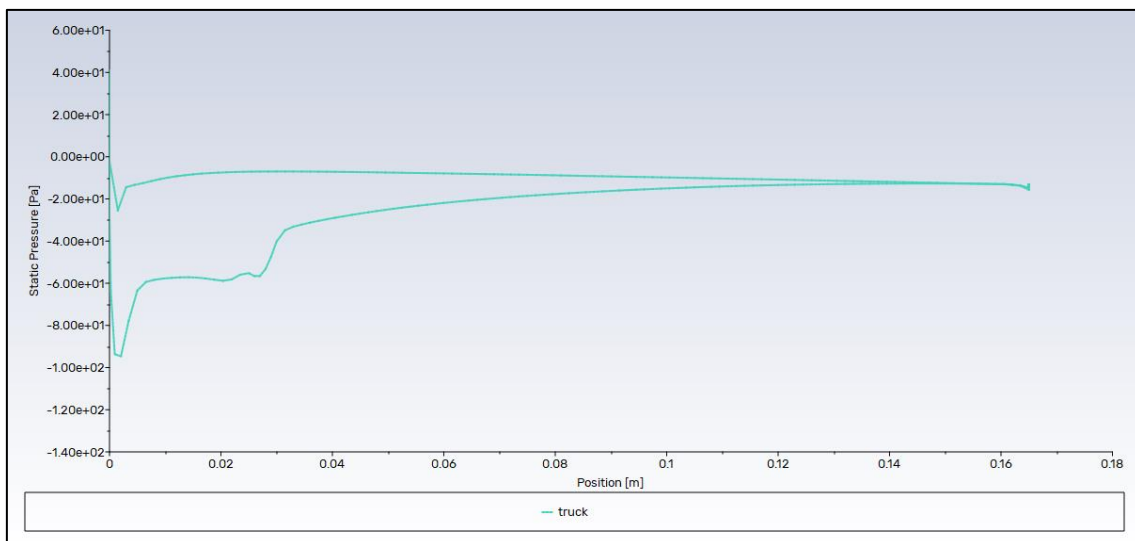


Ilustración 22: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$.

Lo primero que se debe conocer para interpretar esta gráfica, es que la parte inferior de la gráfica, corresponde con la parte superior del vehículo y la parte superior de la gráfica, con la base del vehículo. Se puede ver que, en la parte delantera, existe una gran diferencia de presión que se mantiene hasta el capitoné, debido a que en la parte inferior del camión se tiene una alta presión, mientras que en la parte superior del camión se produce una caída de presión debido a la separación del flujo. Tras el capitoné, se recupera presión en la parte

superior del camión y se igualan con la presión de la base a lo largo de la caja hasta llegar a la parte trasera. Debido a que, a lo largo del camión, la presión en la base es mayor que en la parte superior, el vehículo estará sometido a una fuerza de lift. Además, aunque es difícil de apreciar, la presión media en la parte delantera es bastante mayor que en la parte trasera, por lo que, como ya sabíamos, está sometido a una fuerza de drag.

- Se muestra en la ilustración 23, los isocontornos de sensibilidad:

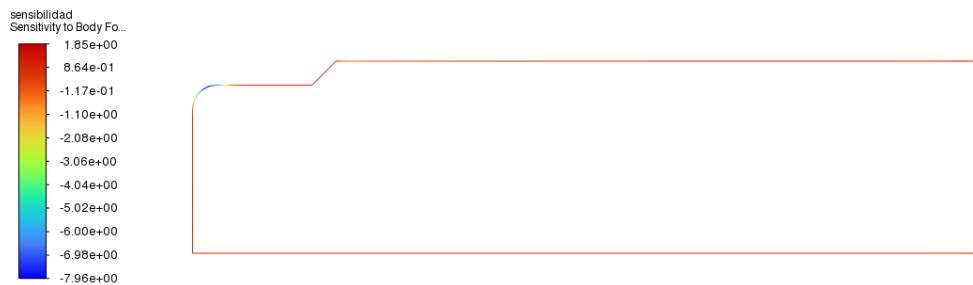


Ilustración 23: Isocontorno de sensibilidad del modelo 1 a $Re=20.000$.

Tras calcular el campo de sensibilidad para la fuerza en x, se puede observar que, en el borde superior delantero y trasero, tenemos una sensibilidad bastante baja, lo que nos indica que las modificaciones tratarán de meter esas zonas hacia adentro. En el capitoné, borde de salida inferior y en el final de caja, tenemos una sensibilidad muy alta, lo que indica que se tratará de sacar hacia afuera tales partes.

- Se obtiene un valor de drag=0,8736 N, con un coeficiente de arrastre $C_D=1,4263$

4.1.1.2 Re=200.000

Una vez realizada la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

- Se muestran los isocontornos de velocidad en x y presión en las ilustraciones 24 y 25 respectivamente:

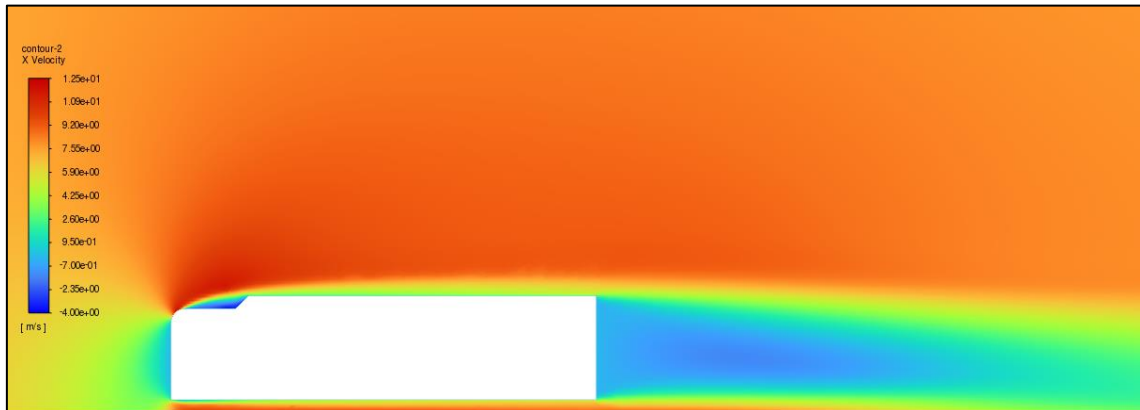


Ilustración 24: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a Re=200.000.

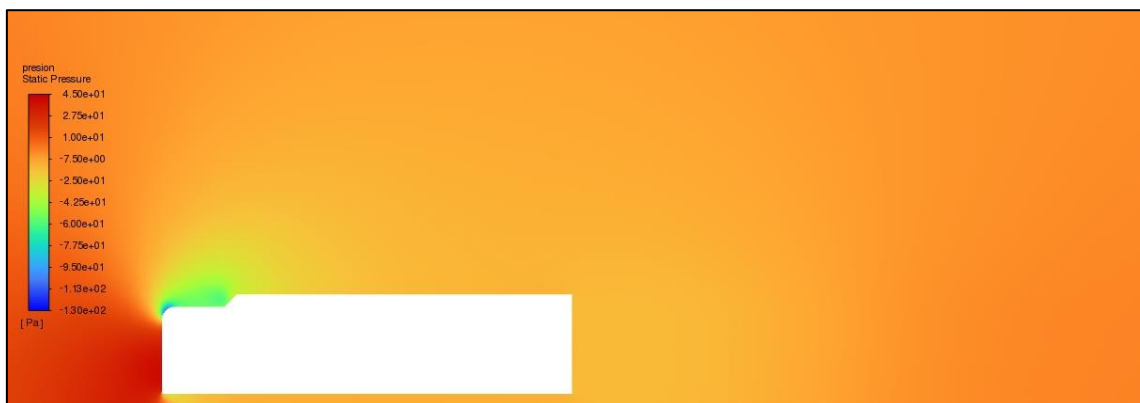


Ilustración 25: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a Re=200.000.

En cuanto a los isocontornos de velocidad y presión, se puede observar que, respecto al Re=20.000, la burbuja de recirculación que se forma tras el borde superior frontal, es de menor tamaño. Además, se puede observar, que el flujo está bastante más pegado que en el caso Re=20.000. El resto de características son similares.

- Se muestra la gráfica XY de la presión en la ilustración 26:

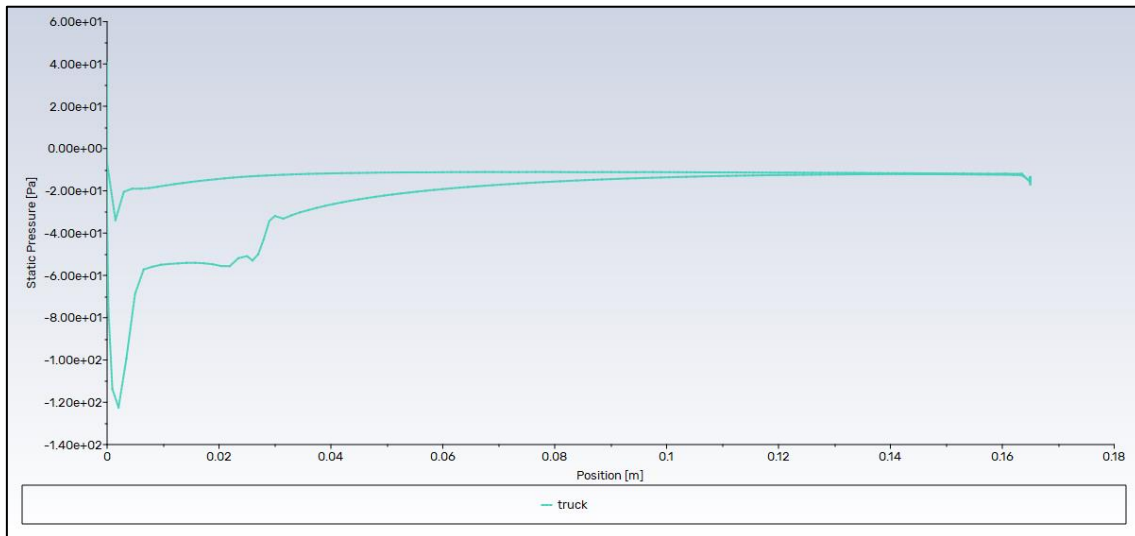


Ilustración 26: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$.

Se puede ver que, respecto al caso $Re=20.000$, se produce un aumento de la diferencia de presión en la base y parte superior de la parte frontal, debido a que se produce una caída de presión más brusca en el borde superior delantero que en el caso $Re=20.000$, produciendo así un aumento del lift.

- Los campos de sensibilidad son similares al caso $Re=20.000$.
- Como cabría esperar, se obtiene un menor valor de drag que en el caso $Re=20.000$. Drag= 0,8246 N

4.1.2 Modelo 2

4.1.2.1 Re=20.000

Una vez realizada la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

- En las ilustraciones 27 y 28, se muestran los isocontornos de velocidad en x y presión, respectivamente:

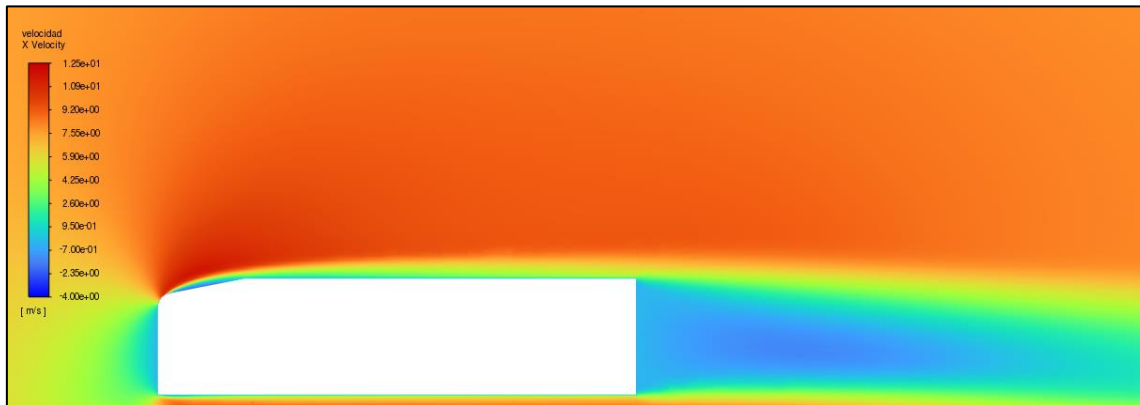


Ilustración 27: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a Re=20.000.

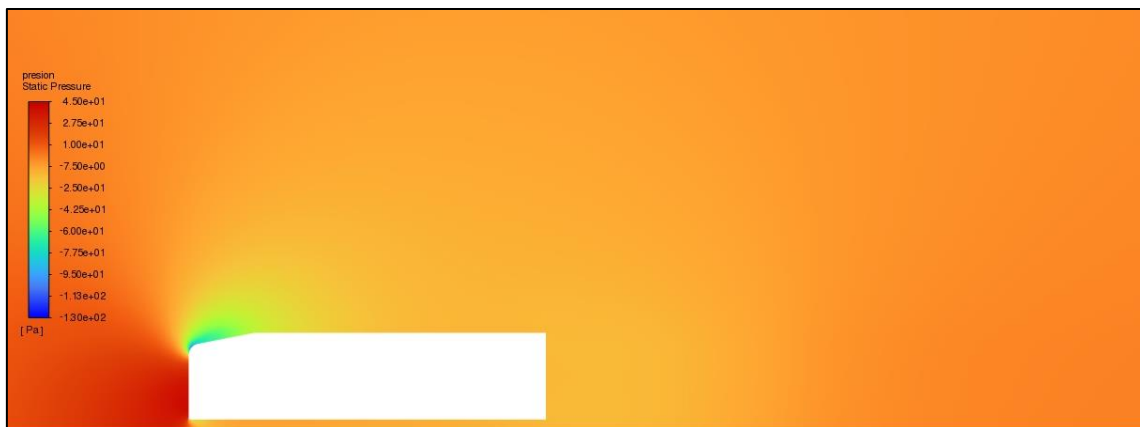


Ilustración 28: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a Re=20.000.

Frente al modelo 1 a Re=20.000, se observa que, debido a que el capitoné se une directamente con el borde frontal superior, la burbuja de recirculación se ve significativamente reducida y, en consecuencia, lo hace también la zona de baja presión. También se puede observar, que el flujo se adhiere a la caja del vehículo algo antes. Se puede ver que debido a que prácticamente no hay desprendimiento, el drag se ve reducido respecto al modelo 1. El resto de características son similares.

- En la ilustración 29, se muestra la gráfica XY de presión:

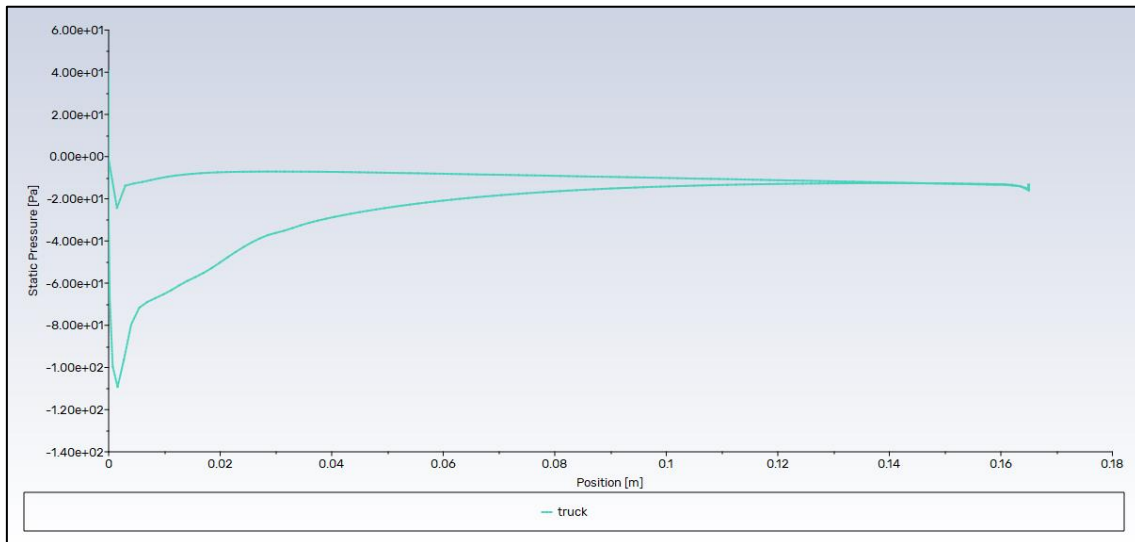


Ilustración 29: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$.

En comparación con el modelo 1 a $Re=20.000$, se puede observar que, en la parte superior de la cabina, el cambio de presión es más gradual, mientras que el modelo 1, eran cambios más repentinos de presión, el resto de características es similar al modelo 1 a $Re=20.000$

- En la ilustración 30, se muestran los campos de sensibilidad:

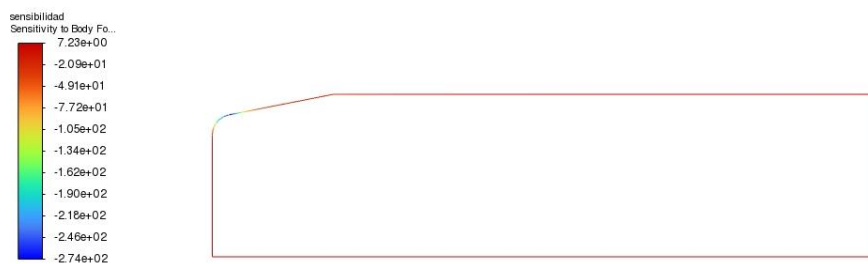


Ilustración 30: Isocontorno de sensibilidad del modelo 2 a $Re=20.000$.

Tras calcular el campo de sensibilidad para la fuerza en x, se puede observar que, en el borde superior delantero, tenemos una sensibilidad bastante baja, lo que nos indica que las modificaciones tratarán de meter esas zonas hacia adentro. En el capitoné, borde de salida inferior y superior y en el final de caja, tenemos una sensibilidad muy alta, lo que indica que se tratará de sacar hacia afuera tales partes.

- Se obtiene un valor de $\text{drag}=0,8284 \text{ N}$ y un coeficiente de arrastre $C_D= 1.3512$, lo que indica una mejor aerodinámica que el modelo 1.

4.1.2.2 Re=200.000

Una vez realizada la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

- En las ilustraciones 31 y 32, se muestran los isocontornos de velocidades en x y presión, respectivamente:

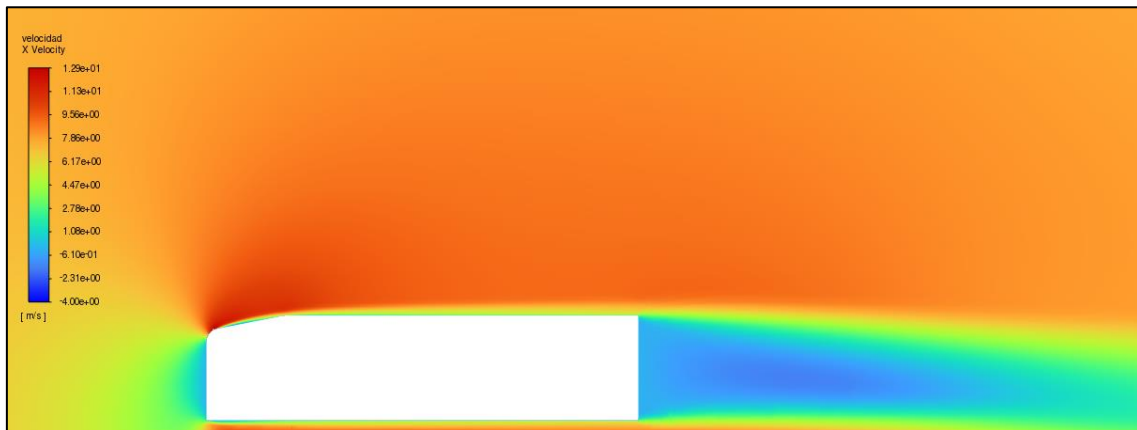


Ilustración 31: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a Re=200.000.

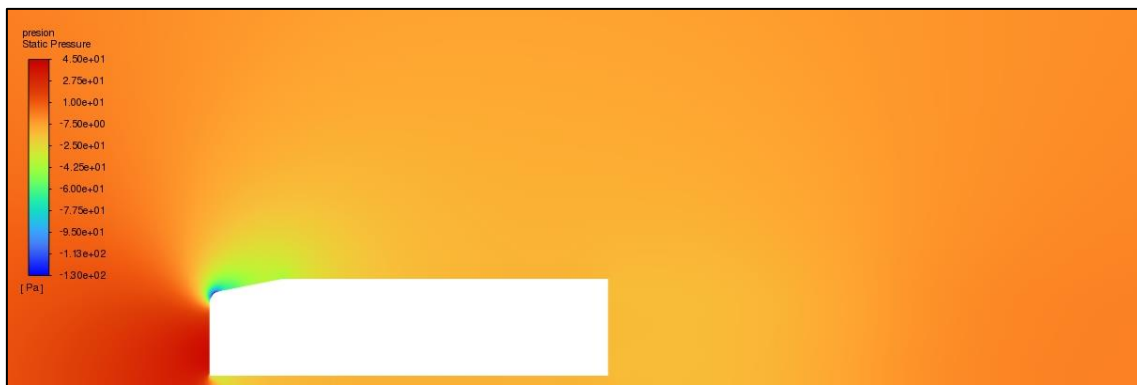


Ilustración 32: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a Re=200.000.

En comparación al modelo 2 a $\text{Re}=20.000$, se observa que la pequeña burbuja de recirculación que existía en el capitoné, ha desaparecido. También se observa que el flujo está más pegado en todo momento. El resto de características son similares.

- En la ilustración 33 se muestra la gráfica XY de presión:

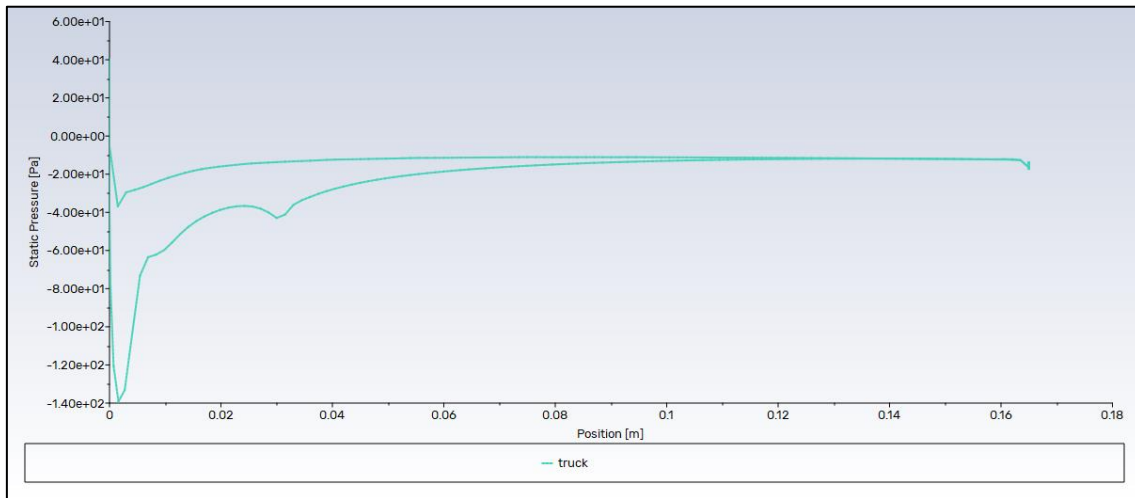


Ilustración 33: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$.

En comparación con el modelo 2 a $Re=20.000$, se pueden apreciar significativas diferencias. En el borde superior delantero, se puede observar una mayor caída de presión, lo que, en consecuencia, aumenta el lift pero, a lo largo de la cabina disminuye la diferencia de presión que existía en $Re=20.000$, por lo que el lift en la cabina se ve reducido. El resto de características son similares.

- Los campos de sensibilidad son similares respecto al modelo 2 a $Re=20.000$
- Se obtiene un valor de drag= 0,7445 N, un valor menor que a $Re=20.000$

4.2 Modificaciones geométricas.

Todas las modificaciones han sido realizadas por el modo “gradient based optimizer” de Ansys Fluent, el cual implementa el método adjoint.

Se vuelve a hacer hincapié en que las modificaciones se van a realizar para $Re=20.000$ y para $Re=200.000$.

Se realizarán modificaciones en el borde romo delantero, capitoné, parte trasera horizontal, parte trasera vertical y en el final de caja. En la ilustración 34 se muestra las zonas en las que se realizaran los cambios de geometría:

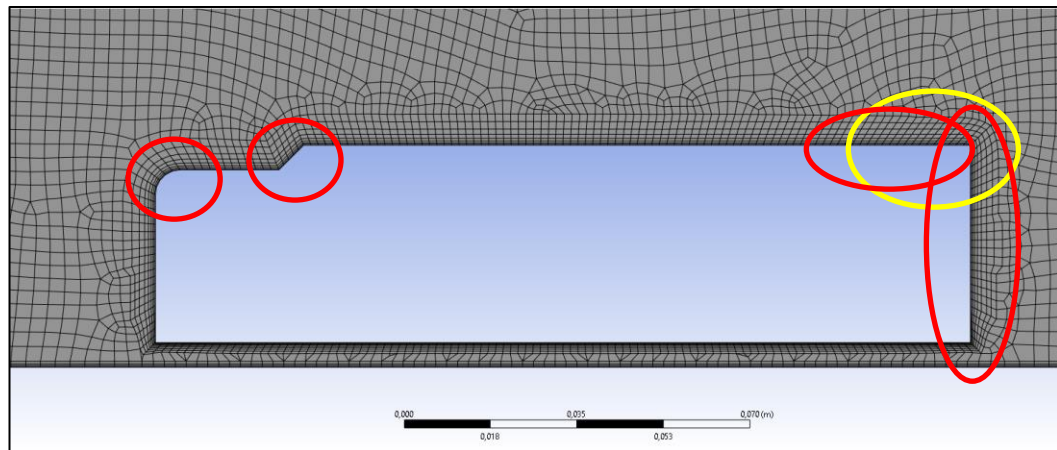


Ilustración 34: Zonas en las que se realizarán los cambios de geometría.

4.2.1 Modelo 1

4.2.1.1 Re=20.000

4.2.1.1.1 Borde romo delantero

- En la ilustración 35 se muestra la gráfica Drag-iteraciones:

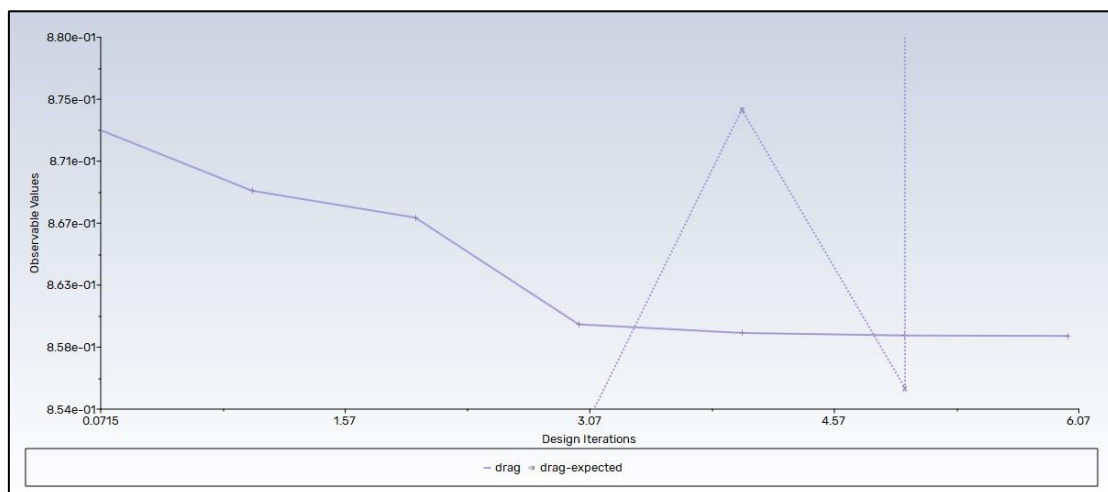


Ilustración 35: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a Re=20.000 (frontal).

Para interpretar esta gráfica, debemos saber que, en morado oscuro, se representa la evolución del drag frente a las iteraciones de cambio de geometría, mientras que, en violeta, se muestra el drag que se espera en cada iteración. Se puede apreciar que, en las 3 primeras iteraciones, se produce una reducción importante del drag y, a partir de la tercera iteración, los cambios que se producen no son muy significativos debido a que la sensibilidad se reduce en cada iteración. En este caso se han realizado 6 iteraciones debido a que, la séptima iteración, supondría un aumento del drag.

El drag del vehículo modificado ha sido de $\text{Drag}=0,8593 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 1,64%. El nuevo coeficiente de arrastre sería $C_D=1.4029$.

- En la ilustración 36 se muestra la geometría modificada:

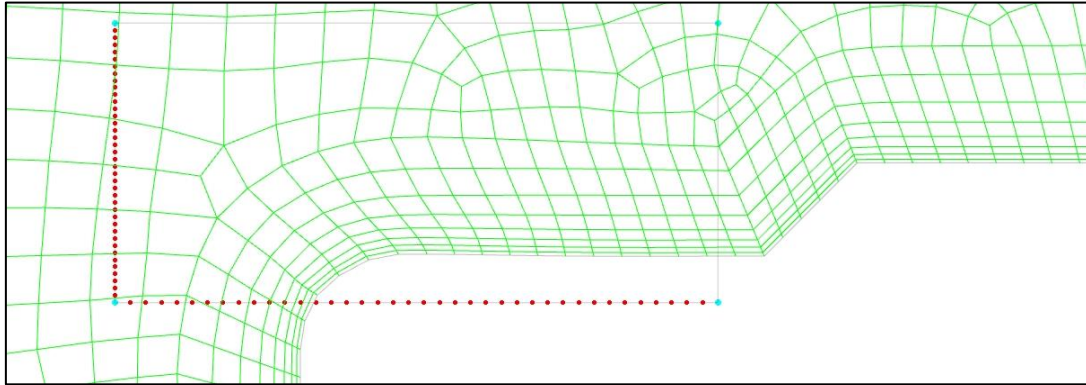


Ilustración 36: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (frontal).

El cambio en la geometría es difícilmente apreciable, pero si analizamos la forma del vehículo en la región modificada, se trata de meter mínimamente el borde superior delantero hacia adentro, con el propósito de dirigir el flujo y facilitar la adhesión tras el capitoné. Caso base ([4.1.1.1](#))

- Los isocontornos de presión y velocidad y la gráfica XY de presiones no muestran ninguna diferencia significativa respecto del modelo base.

4.2.1.1.2 Capitoné

- En la ilustración 37 se muestra la gráfica Drag-iteraciones:

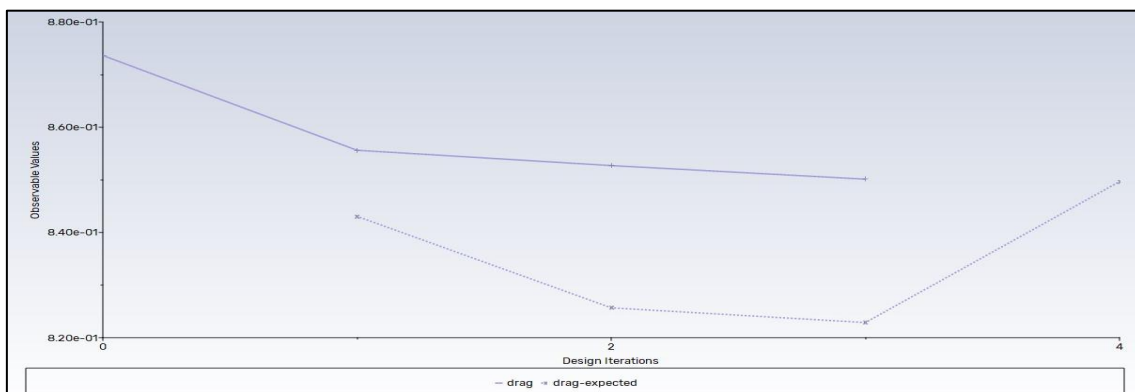


Ilustración 37: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (capitoné).

Se puede apreciar que en la primera iteración se ha conseguido reducir el drag significativamente, mientras que las dos restantes no han producido una mejora destacable de la aerodinámica del vehículo. Se aprecia que, en la cuarta iteración, se esperaba que aumentase el drag, por lo que finalizó la optimización en la tercera iteración.

El drag obtenido tiene un valor de $\text{Drag}=0,8501 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 2,69%. El nuevo coeficiente de arrastre es $C_D=1.3879$.

- En la ilustración 38 se muestra la malla de la geometría modificada:

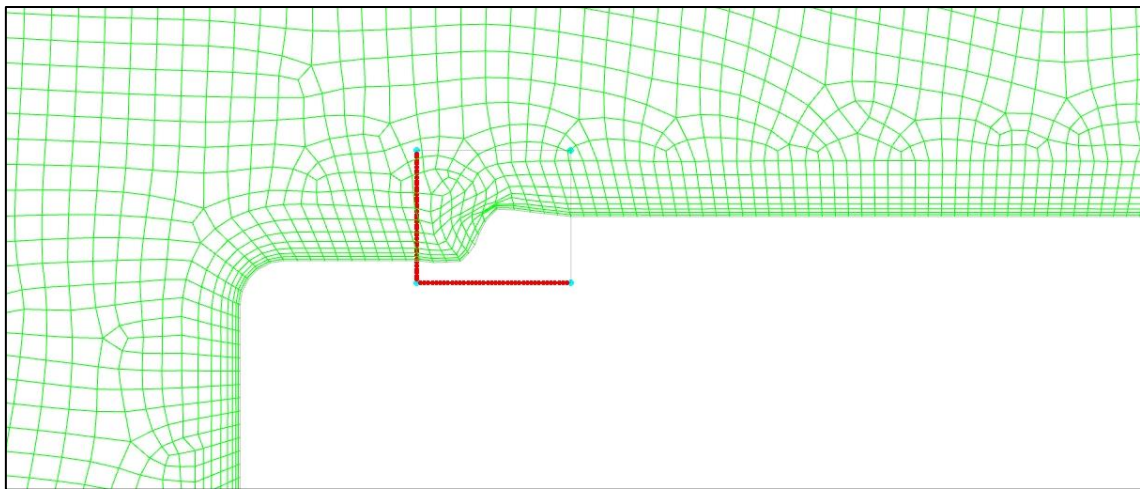


Ilustración 38: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $\text{Re}=20.000$ (capitoné).

Si analizamos la geometría del vehículo en la región de modificación, podemos observar que trata de elevar el capitoné. Caso base ([4.1.1.1](#))

- Los isocontornos de presión y la gráfica XY no nos muestran ninguna diferencia significativa respecto al modelo base.

- El isocontorno de velocidades en x, se muestra en la ilustración 39:

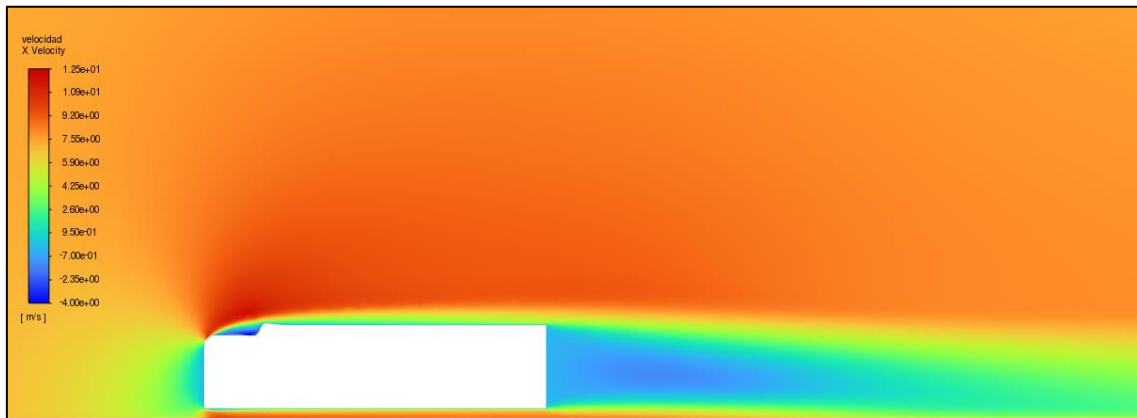


Ilustración 39: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (capitoné).

En el isocontorno de velocidades se pueden apreciar diferencias significativas. Si nos fijamos en el capitoné, podemos observar que el flujo se adhiere completamente a este, desapareciendo así la fina recirculación que se generaba tras este en el modelo base. Caso base ([4.1.1.1](#))

4.2.1.1.3 Parte trasera horizontal

- En la ilustración 40, se muestra la gráfica drag-iteraciones:

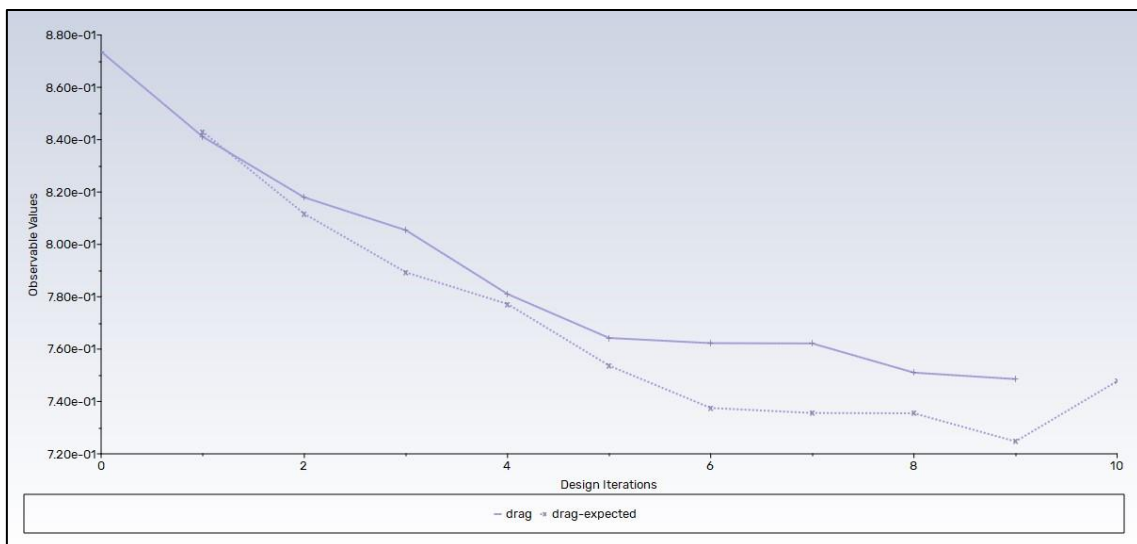


Ilustración 40: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ parte trasera horizontal).

En esta modificación geométrica se pueden observar cambios bastante interesantes. Se puede ver que hasta la iteración 5 se realizan reducciones bastante significativas de drag, mientras que de la iteración 5 en adelante, las

reducciones son menores. En este caso se realizan 9 iteraciones, ya que, en la décima, se produce un aumento del drag.

El valor de drag obtenido es $\text{Drag}=0,7485 \text{ N}$, lo que supone una muy buena mejora del 14,31%. El nuevo coeficiente de arrastre es $C_D= 1.2221$

- En la ilustración 41 se muestra la malla de la geometría modificada:

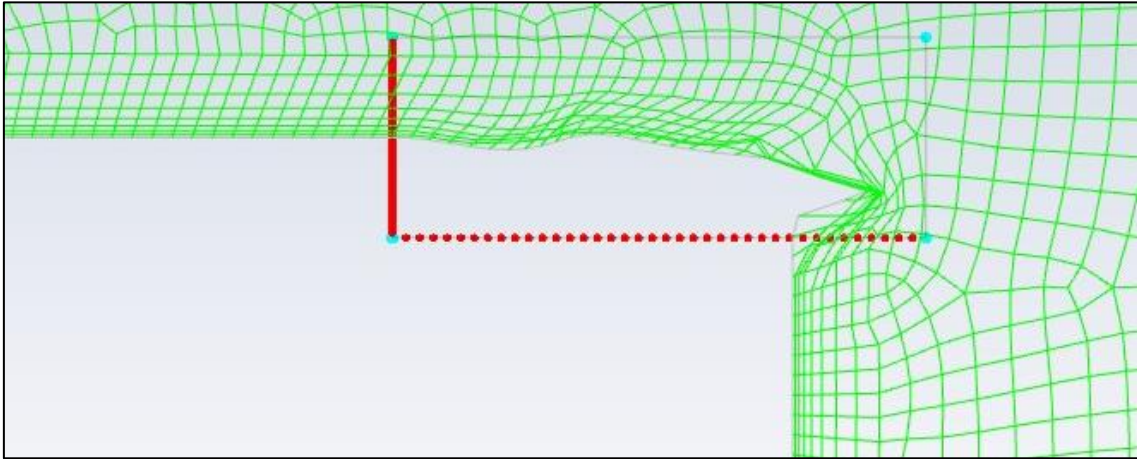


Ilustración 41: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).

En esta modificación geométrica, se puede apreciar un cambio significativo. Primero de todo tenemos una hendidura acompañada de un pequeño montículo, que finalmente acaba en un borde afilado con un ángulo de inclinación hacia abajo. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En las ilustraciones 42 y 43 se muestran los isocontornos de presión y velocidades en x, respectivamente:



Ilustración 42: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).

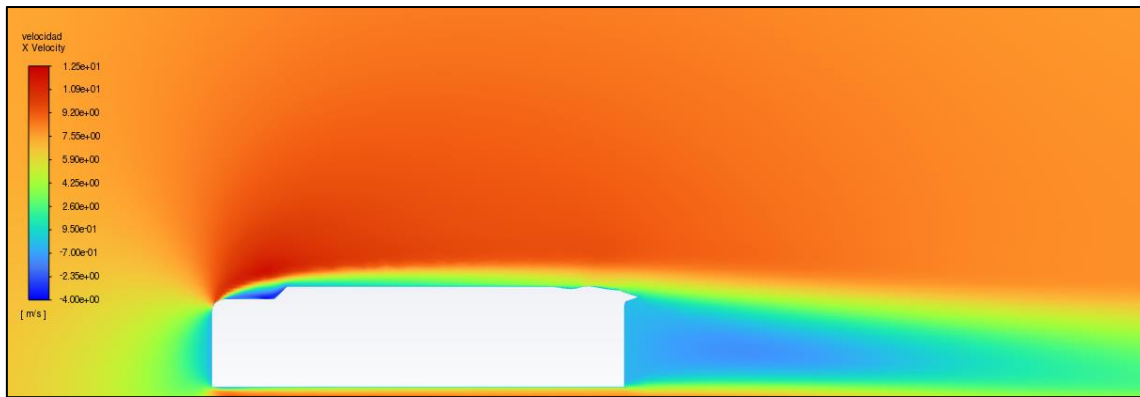


Ilustración 43: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).

Frente al caso base, se puede observar que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que nos indica una pequeña aceleración del flujo. A la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando así una pequeña ganancia de presión y, debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo se desprende con un ángulo de inclinación hacia abajo, provocando así una reducción significativa del tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En la ilustración 44 se muestra la gráfica XY de presión:

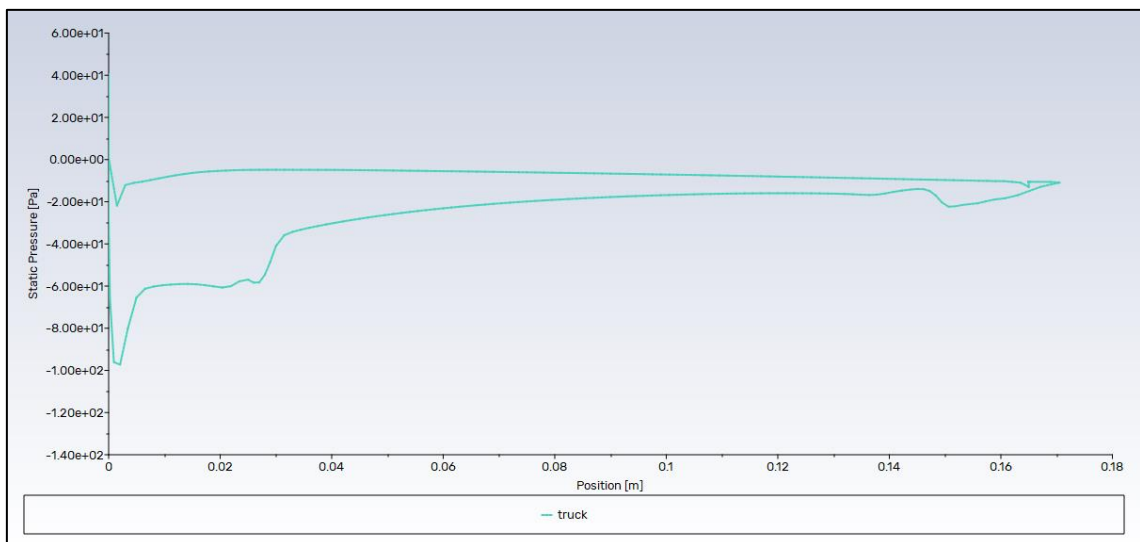


Ilustración 44: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera horizontal).

Frente al caso base, se pueden apreciar cambios notables a lo largo de la caja del camión. Se produce un aumento en la diferencia de presión entre la base y la parte superior de la caja, provocando un aumento del lift. Además, se puede

apreciar la caída de presión mencionada en el isocontorno de presión. Además, se aprecia una ganancia de presión en la hendidura, lo que en consecuencia, ha provocado una desaceleración del flujo. Caso base ([4.1.1.1](#))

4.2.1.1.4 Parte trasera vertical

- En la ilustración 45 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

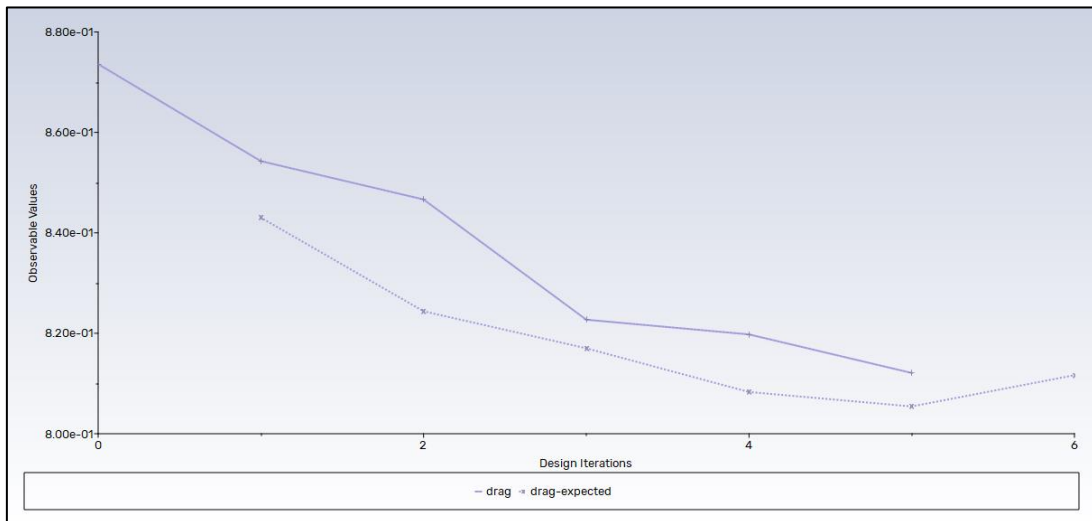


Ilustración 45: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).

Se pueden apreciar mejoras significativas entre en las primeras 3 iteraciones, mientras que en las 2 últimas, los cambios son menos notables. En la sexta iteración se espera un aumento del drag, por lo que solo se han realizado 5 iteraciones.

Se ha obtenido un valor de $Drag=0,8121$ N, lo que supone una mejora del 7,04%. El coeficiente de arrastre asociado a esta geometría es $C_D= 1.3258$.

- En los isocontornos de presión, no podemos destacar ningún cambio significativo respecto al modelo base.

- En la ilustración 46 se muestra la malla de la geometría modificada:

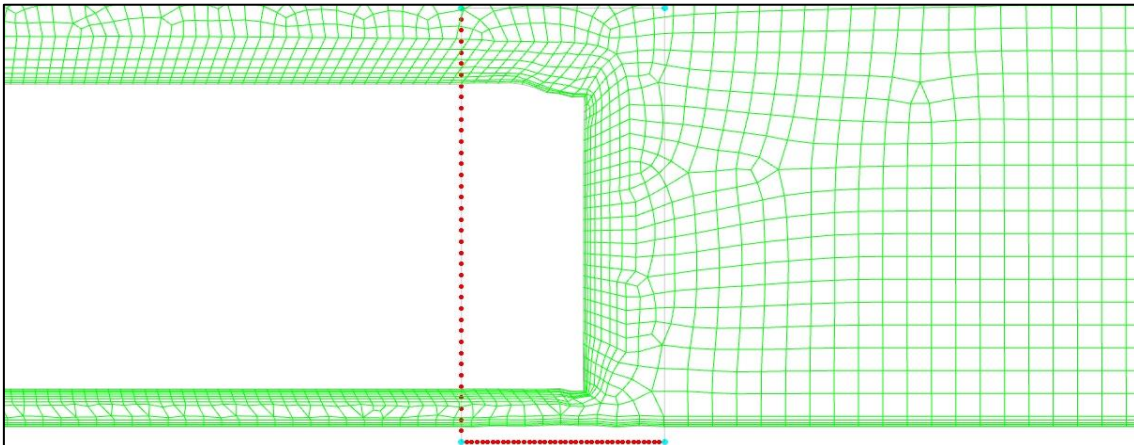


Ilustración 46: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).

En esta modificación, se puede apreciar como el borde superior trasero se mete hacia adentro, generando lo que se conoce como *boat tail*, mientras que el borde de salida inferior, se trata de sacar hacia afuera. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En la ilustración 47 se muestra el isocontorno de velocidades en x:

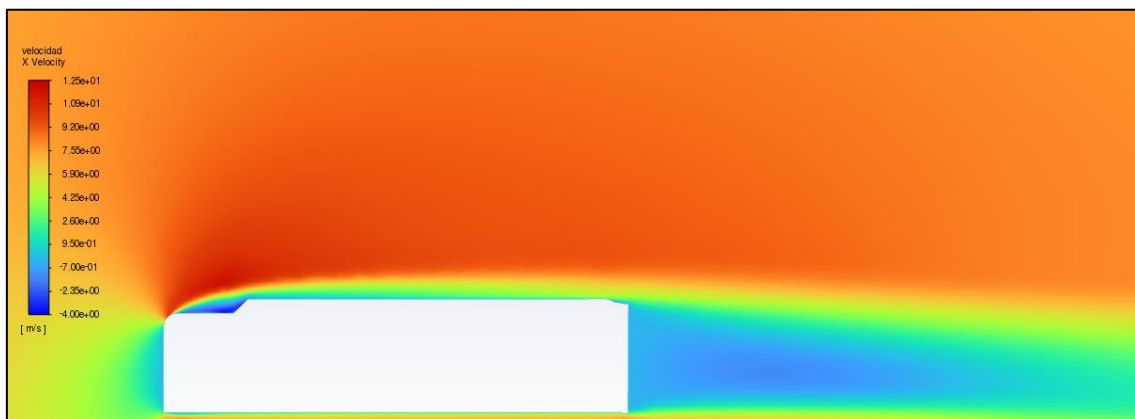


Ilustración 47: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).

Frente al caso base, se puede apreciar que el flujo se frena en el *boat tail*, debido a que aumenta la sección de paso, generando así una ganancia de presión. Además, debido a que el flujo trata de seguir en *boat tail*, sale por el borde de salida con un ángulo hacia abajo, reduciendo así la burbuja de recirculación tras el vehículo. En la parte de abajo, podemos ver que se produce una aceleración del flujo provocada por la reducción de la sección de paso, lo que genera una pequeña pérdida de presión. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En la ilustración 48 se muestra la gráfica XY de presiones:

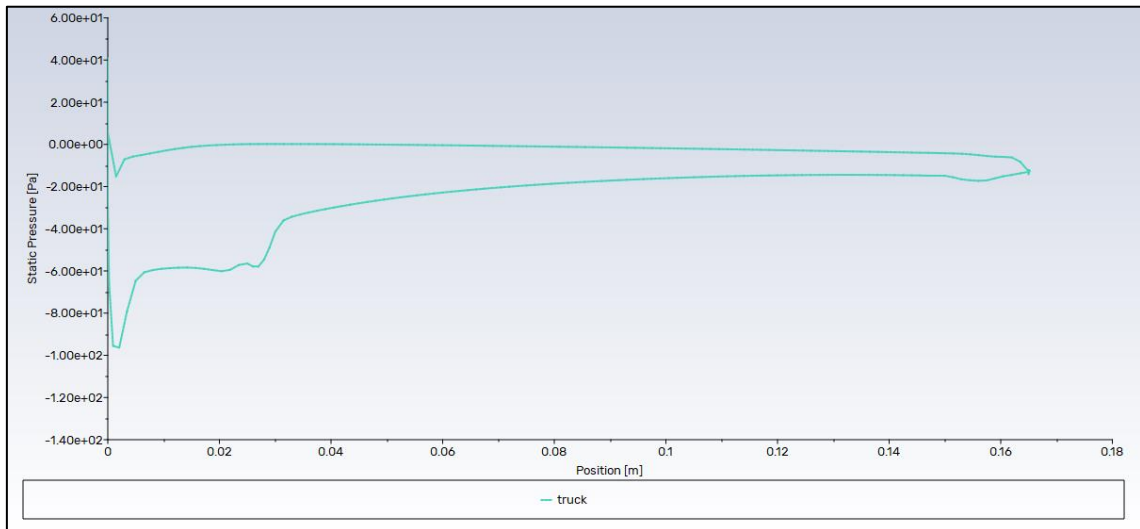


Ilustración 48: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (parte trasera vertical).

Se puede apreciar un aumento significativo en la diferencia de presiones entre la base y la parte superior de la caja, a lo largo de esta, lo que provoca en consecuencia, un aumento del lift. Además, al final de la caja, se pueden observar tanto la ganancia de presión provocada por el *boat tail*, como la caída de presión provocada por la reducción del paso en la base del vehículo. Caso base ([4.1.1.1](#))

4.2.1.1.5 Final de caja

- En la ilustración 49, se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

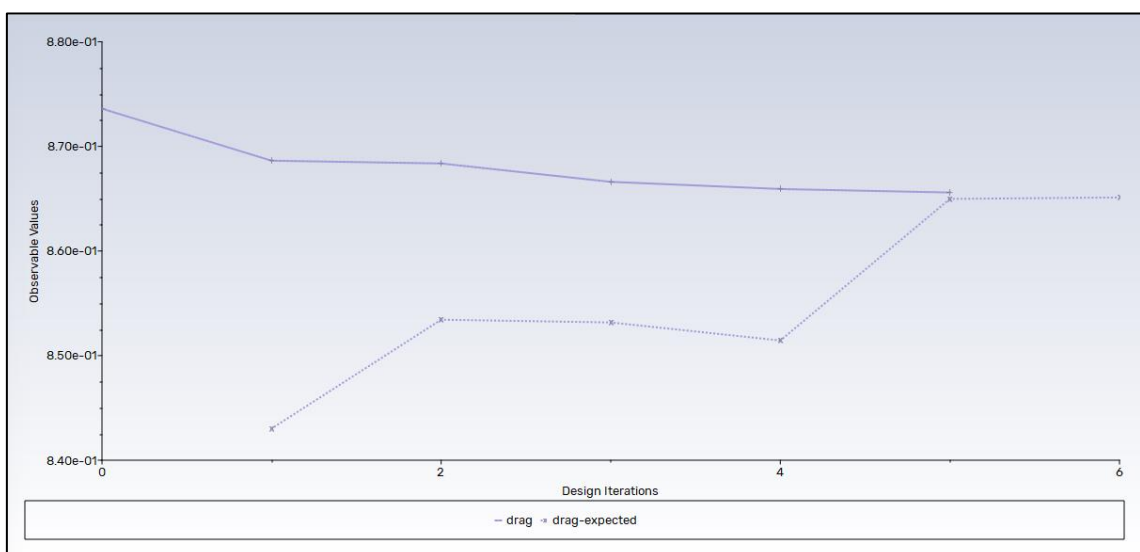


Ilustración 49: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).

Se han realizado 5 iteraciones en las que se ha reducido relativamente poco el drag respecto al resto de modificaciones. El sexto cambio de geometría supondría un aumento del drag, por lo que se han realizado 5 iteraciones únicamente.

El drag obtenido en esta geometría ha sido $\text{Drag}=0,8656 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 0,92%, bastante más baja que el resto de modificaciones. El coeficiente de arrastre obtenido para esta geometría es de $C_D = 1.4132$.

- En la ilustración 50 se muestra la malla de la geometría modificada:

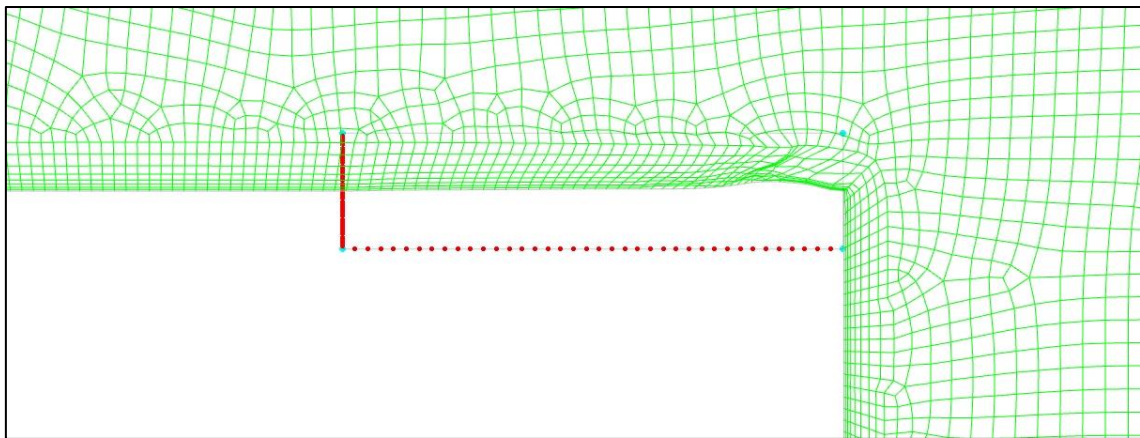


Ilustración 50: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).

Analizando la forma del vehículo en la región de modificación, se puede apreciar al final de la caja, un pequeño montículo. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En la ilustración 51 se muestran los isocontornos de velocidad en x:

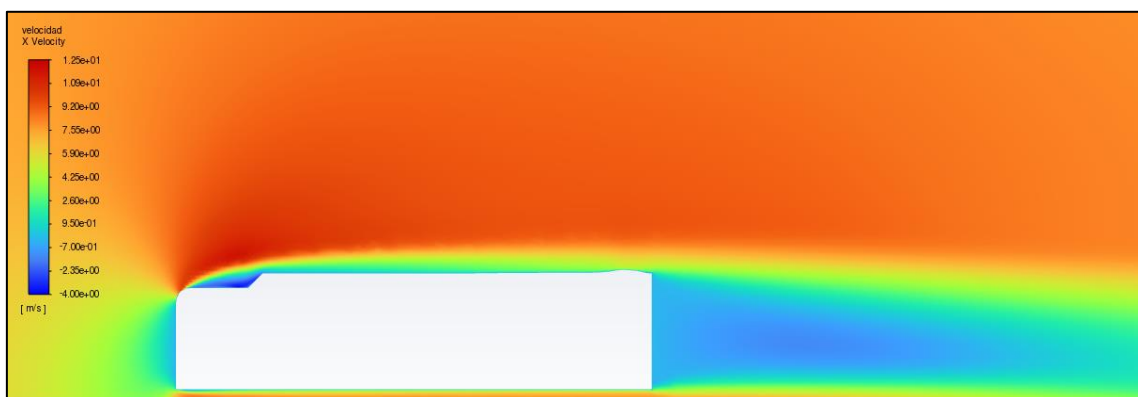


Ilustración 51: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).

Observando los isocontornos de velocidad, se puede ver que el flujo se acelera al llegar al montículo, lo que provocará una pequeña caída de presión, mientras que, a la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando una ganancia de presión en esta. Caso base ([4.1.1.1](#))

- En la ilustración 52 se muestra la gráfica XY de presiones:

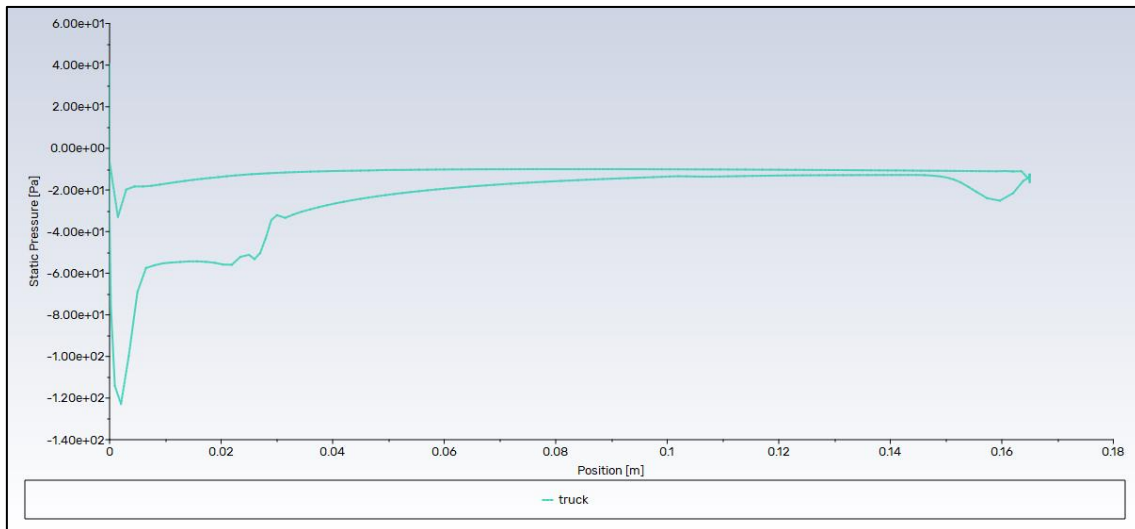


Ilustración 52: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=20.000$ (final de caja).

Analizando la gráfica XY de presiones, se puede observar que, al final de la caja, se refleja la pérdida de presión y la posterior ganancia de esta, mencionadas ambas en el isocontorno de velocidad. En consecuencia, se generará un pequeño aumento del lift. Caso base ([4.1.1.1](#)).

- Los isocontornos de presión no muestran diferencias significativas respecto al caso base.

4.2.1.2 **Re=200.000**

4.2.1.2.1 Borde romo delantero

- En la ilustración 53, se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

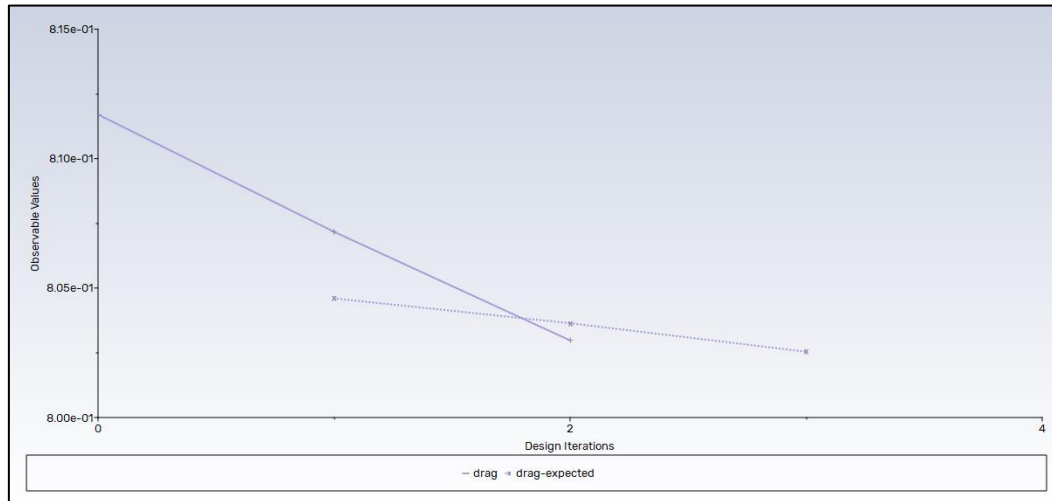


Ilustración 53: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a Re=200.000 (frontal).

En esta modificación geométrica se puede ver que se realizan dos iteraciones en las que se consigue una pequeña reducción del drag. En este caso se realizan 2 iteraciones, ya que, en el tercer cambio de geometría, se produciría un aumento del drag

El valor de drag obtenido es $\text{Drag}=0,803 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 1,1% respecto al caso base. El nuevo coeficiente de arrastre es $C_D= 1.3109$

- La nueva geometría obtenida es similar a la que se ha obtenido para el caso a $\text{Re}=20.000$, por lo que, el cambio en la geometría es efectivo para ambos Reynolds ([4.2.1.1](#)).
- No se aprecian cambios significativos en los isocontornos de presión y velocidad y en la gráfica XY de presión respecto al caso base ([4.1.1.2](#)).

4.2.1.2.2 Capitoné

- En la ilustración 54, se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

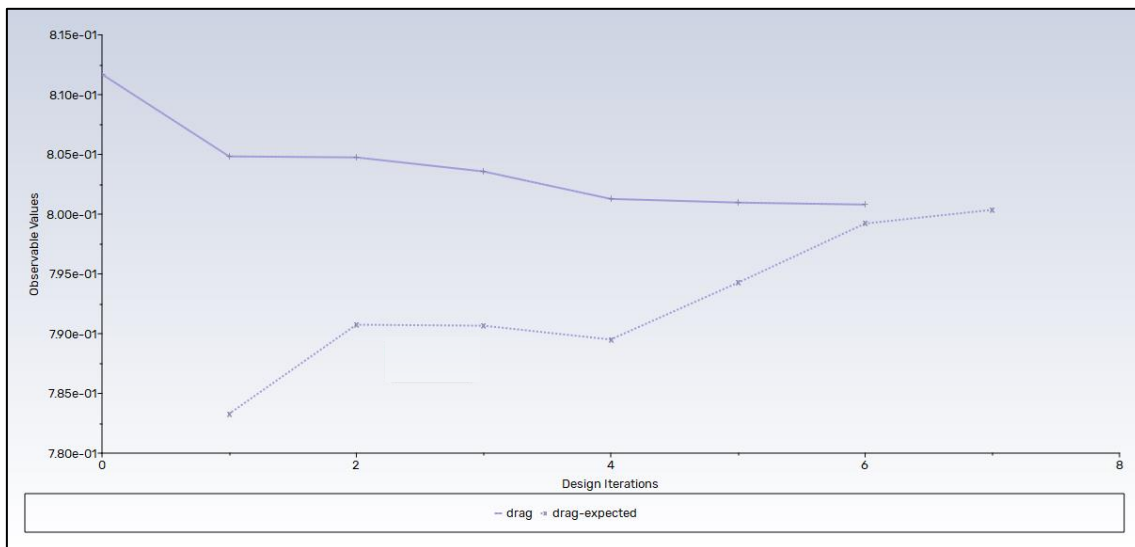


Ilustración 54: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (capitoné).

Se puede apreciar que en las primeras 4 iteraciones se ha conseguido reducir el drag significativamente, mientras que las dos restantes no han producido una mejora destacable de la aerodinámica del vehículo. En la séptima iteración se iba a generar un aumento de drag, por lo que finalmente, se han realizado 6 iteraciones

El drag obtenido tiene un valor de $Drag=0,8007\text{ N}$, lo que supone una mejora del 1,37%. El nuevo coeficiente de arrastre es $C_D=1.3879$

- La nueva geometría obtenida es similar a la que se ha obtenido para el caso a $Re=20.000$ ([4.2.1.2](#)).
- Los isocontornos de presión y velocidades y la gráfica XY de presión no nos muestran diferencias significativas respecto al caso base ([4.1.1.2](#)).

4.2.1.2.3 Parte trasera horizontal

- En la ilustración 55, se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

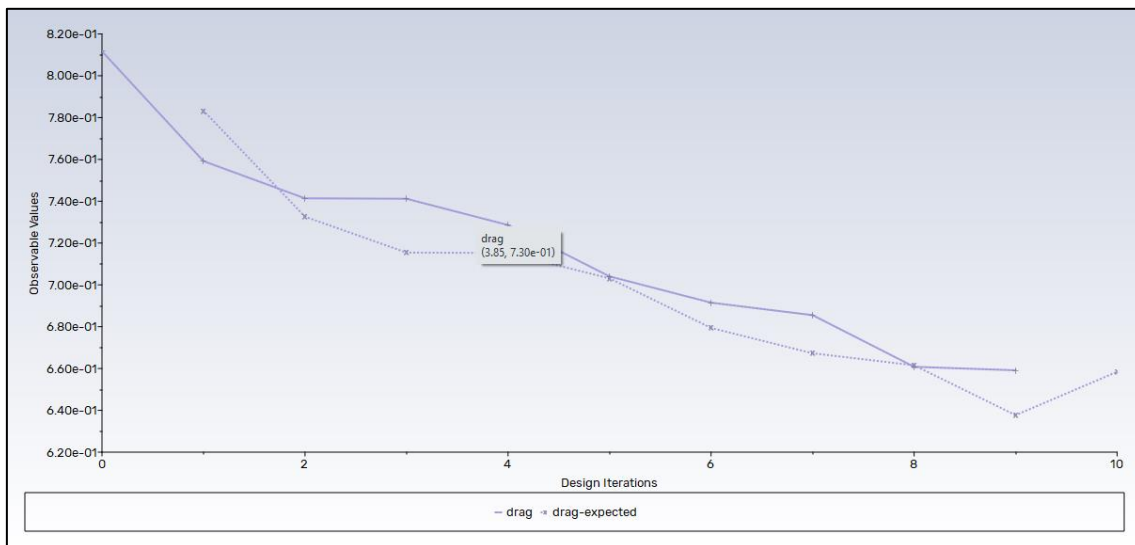


Ilustración 55: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

En esta modificación geométrica se pueden observar cambios bastante interesantes. Se puede observar que el programa realiza 9 iteraciones con las que se consigue reducir significativamente el drag. De nuevo, no se completan las 20 iteraciones, ya que, en la iteración 10, se produce un aumento del drag.

El valor de drag obtenido es $Drag=0,6591N$, lo que supone una muy buena mejora del 18,82%. El nuevo coeficiente de arrastre es $C_D= 1.0761$

- En la ilustración 56 se muestra la malla de la geometría modificada:

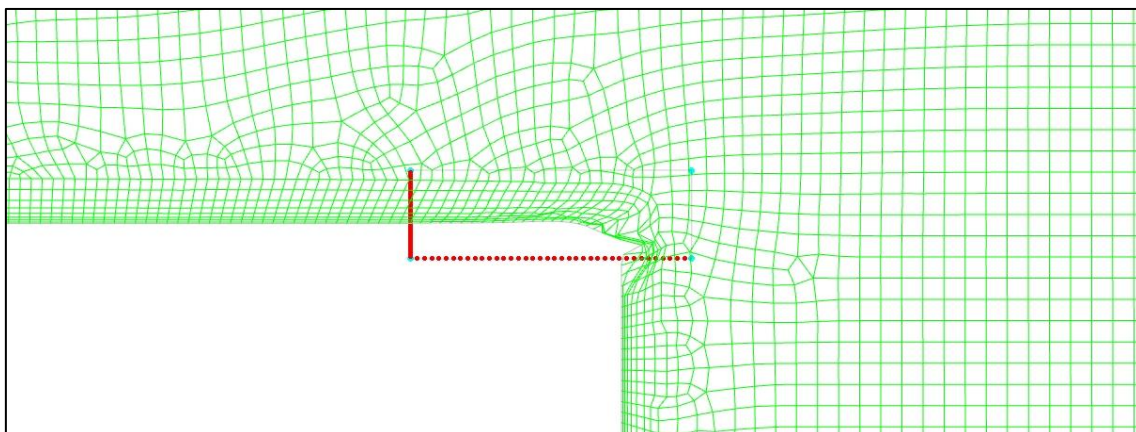


Ilustración 56: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

Si analizamos la geometría en la zona de modificación, podemos observar que se genera un pequeño montículo acompañado de un saliente que acaba en pico con ángulo de inclinación hacia abajo. La geometría es muy similar a la obtenida para el $Re=20.000$, pero en este caso, la geometría carece de la hendidura. Caso base ([4.1.1.2](#))

- En las ilustraciones 57 y 58 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:



Ilustración 57: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

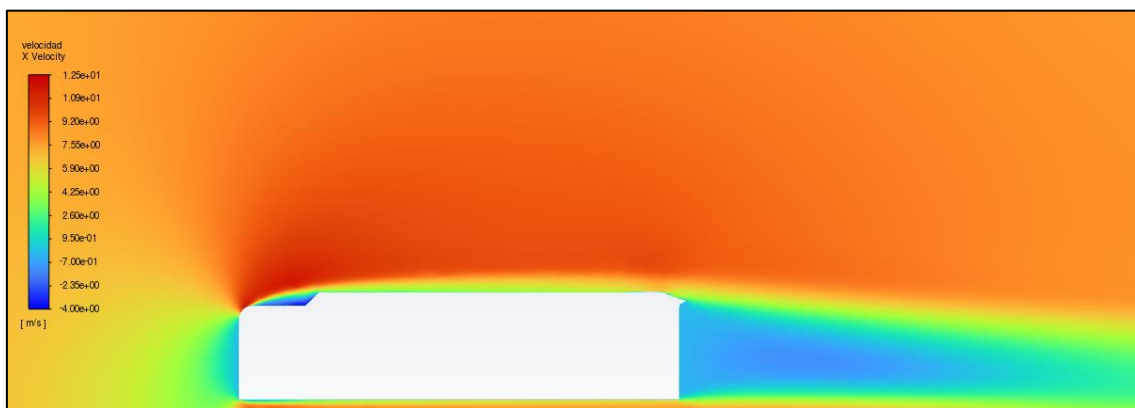


Ilustración 58: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

Frente al caso base, se puede observar que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que nos indica una pequeña aceleración del flujo. A la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando así una pequeña ganancia de presión y, debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo se desprende con un ángulo de inclinación hacia abajo, provocando así una

reducción significativa del tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo. Se puede observar como la estela se ve significativamente reducida. Caso base (4.1.1.2)

- En la ilustración 59 se muestra la gráfica XY de presión:

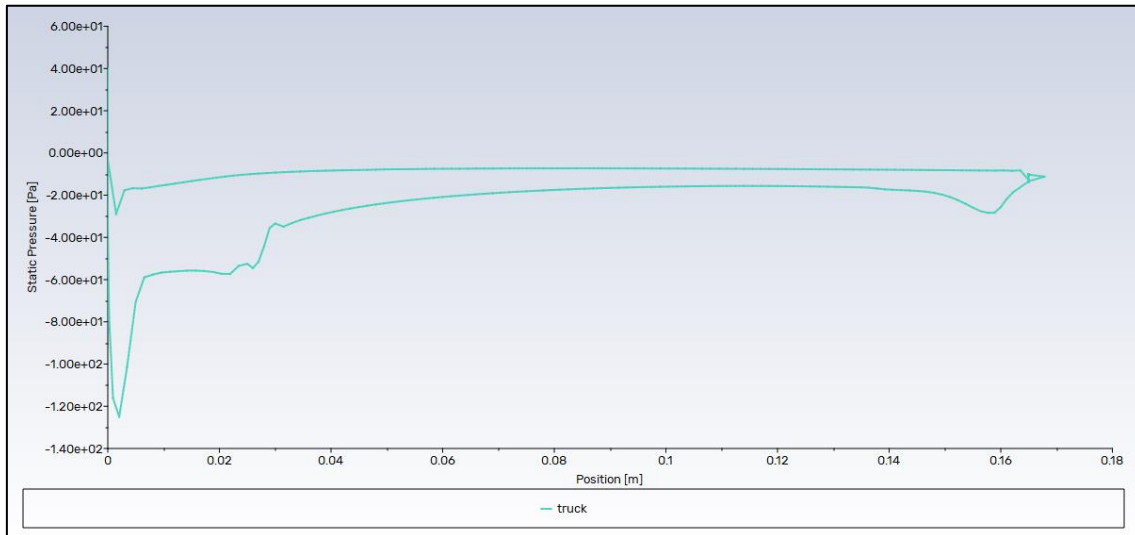


Ilustración 59: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

Frente al caso base, se pueden apreciar cambios notables a lo largo de la caja del camión. Se produce un aumento en la diferencia de presión entre la base y la parte superior de la caja, provocando un aumento del lift. Además, se puede apreciar la caída de presión en el montículo y la ganancia de presión tras este. También se puede apreciar un pequeño pico que representa el saliente de la nueva geometría. Caso base (4.1.1.2)

4.2.1.2.4 Parte trasera vertical

- En la ilustración 60 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

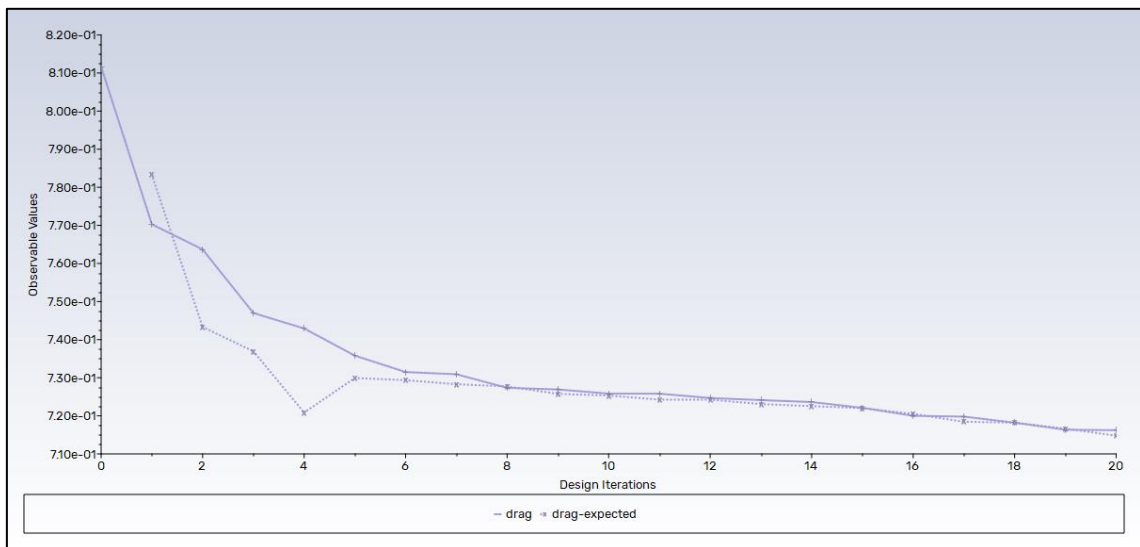


Ilustración 60: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Analizando la gráfica podemos observar que en este caso se han realizado las 20 iteraciones de diseño, reduciendo además significativamente el drag.

Para este caso se ha obtenido un valor de Drag= 0,7162 N, lo que supone una mejora del 11,79%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.1693$.

- En la ilustración 61 se muestra la malla de la geometría modificada:

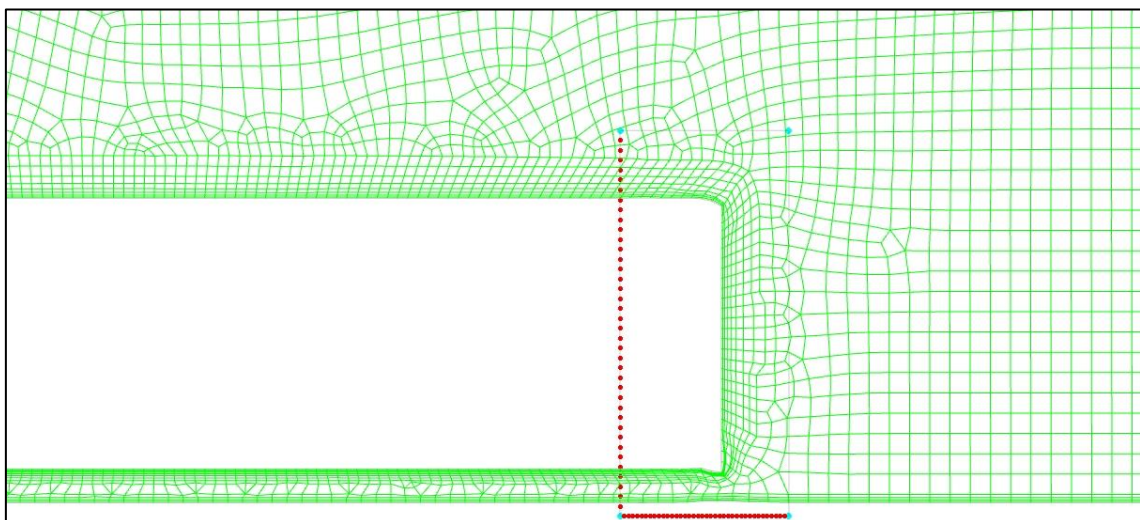


Ilustración 61: Malla de la modificación de la geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Se puede apreciar un pequeño montículo al final de la caja en la parte superior, terminando en un ángulo de salida hacia abajo, mientras que, en la parte inferior, se trata de sacar el borde inferior trasero hacia afuera. Caso base (4.1.1.2)

- En las ilustraciones 62 y 63 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, redpectivamente:

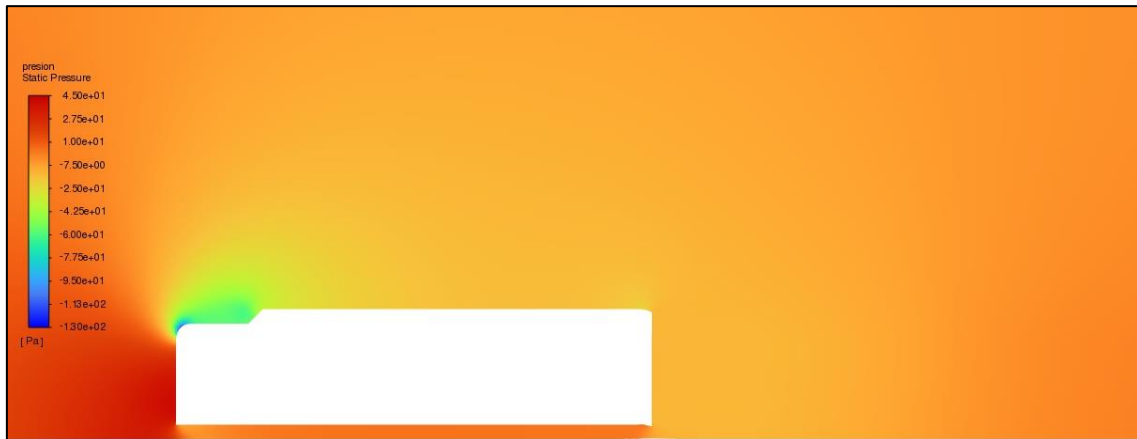


Ilustración 62: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

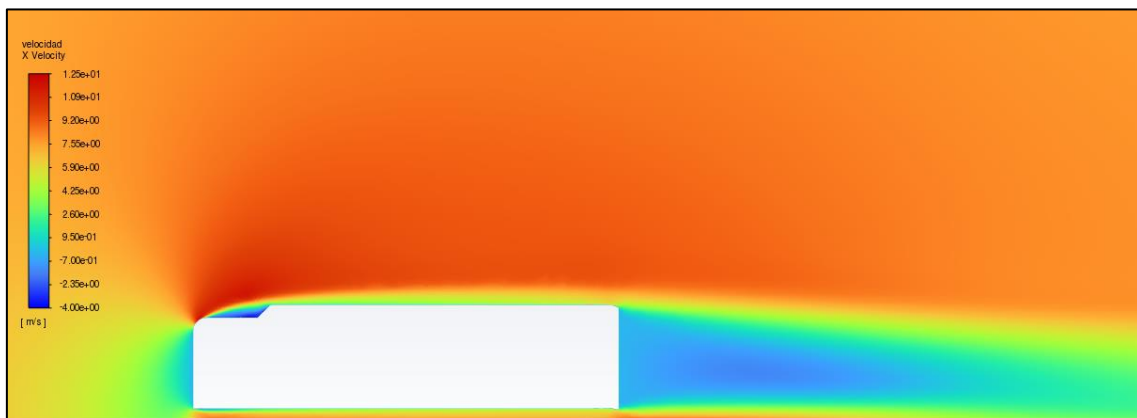


Ilustración 63: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Analizando los isocontornos de presión y velocidad, podemos ver que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que indica una aceleración del flujo. Tras este se vuelve a recuperar presión provocando así una desaceleración del flujo. Debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo sale con un ángulo de inclinación hacia abajo, que reduce significativamente el tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo.

Respecto a la parte inferior, se puede observar cómo, el saliente, acelera el flujo y disminuye la presión, simulando una tobera. Caso base ([4.1.1.2](#))

- En la ilustración 64 se muestra la la gráfica XY de presiones:

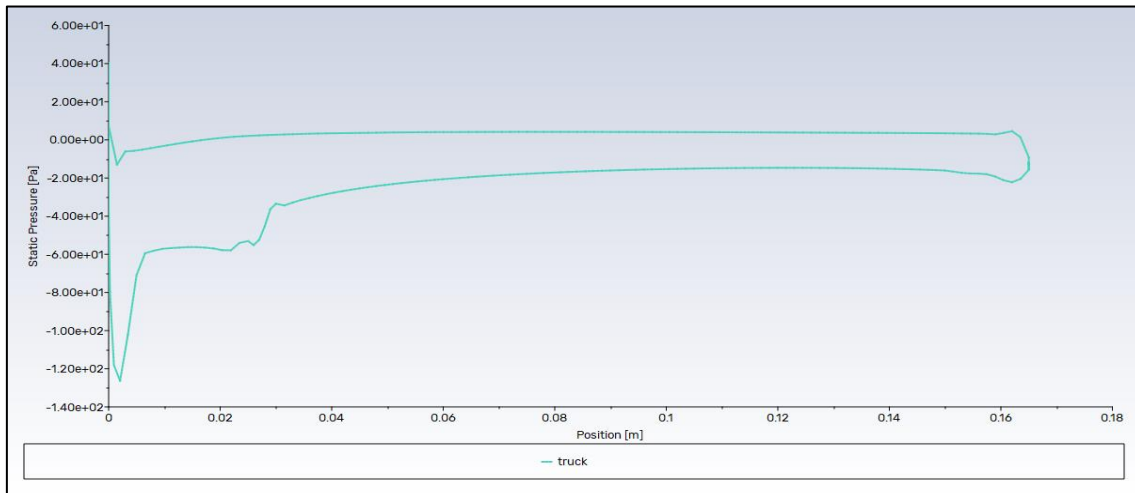


Ilustración 64: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Respecto al caso base, se puede observar que aumenta la diferencia de presiones entre la base y parte superior del vehículo a lo largo de la caja, lo que produce un gran aumento en el lift. Además, quedan reflejadas en la gráfica, las pérdidas y ganancias de presión mencionadas en los isocontornos de presión y velocidad. Caso base ([4.1.1.2](#))

4.2.1.2.5 Final de caja

- En la ilustración 65 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

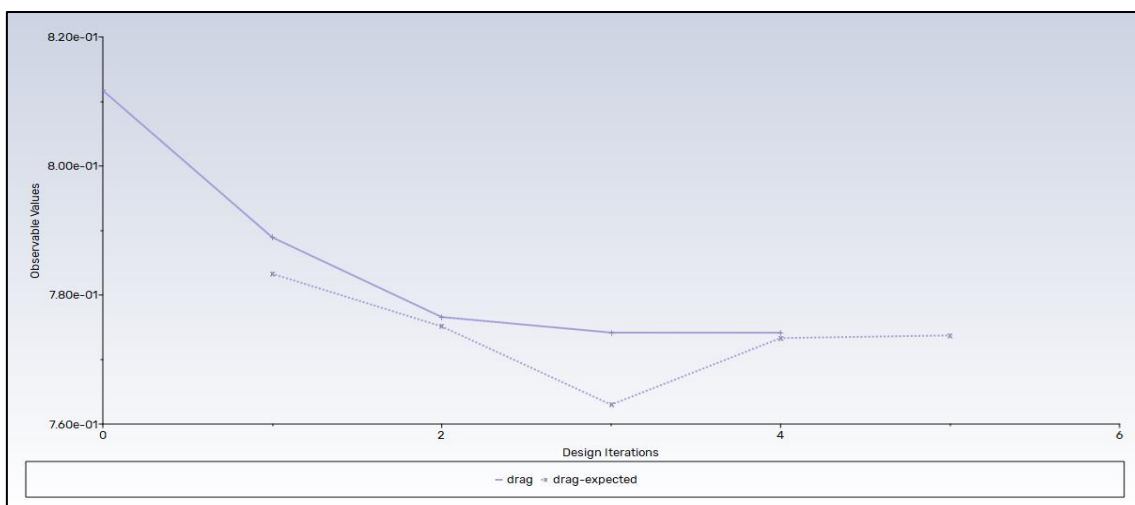


Ilustración 65: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja).

Analizando la gráfica podemos observar que en las dos primeras iteraciones se produce una reducción significativa del drag, mientras que en las dos últimas apenas se producen cambios.

El drag obtenido en esta geometría ha sido $\text{Drag}=0,7741 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 4,65%, bastante más significativa que en $\text{Re}=20.000$. El coeficiente de arrastre obtenido para esta geometría es de $C_D = 1.2639$

- La nueva geometría obtenida es similar a la que se ha obtenido para el caso a $\text{Re}=20.000$, por lo que se puede extrapolar el cambio geométrico a este caso ([4.2.1.1.5](#))
- En las ilustraciones 66 y 67 se muestran los isocontornos de velocidad en x y presión:

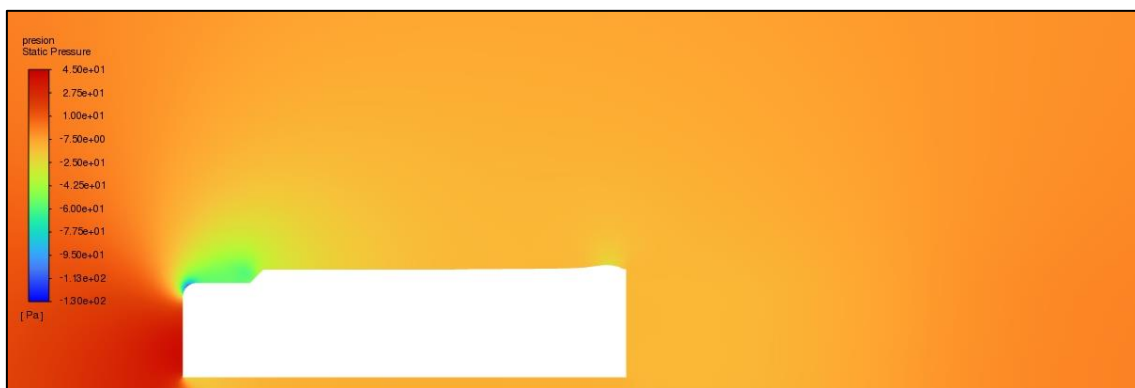


Ilustración 66: Isocontorno de presión estática del modelo 1 a $\text{Re}=200.000$ (final de caja).

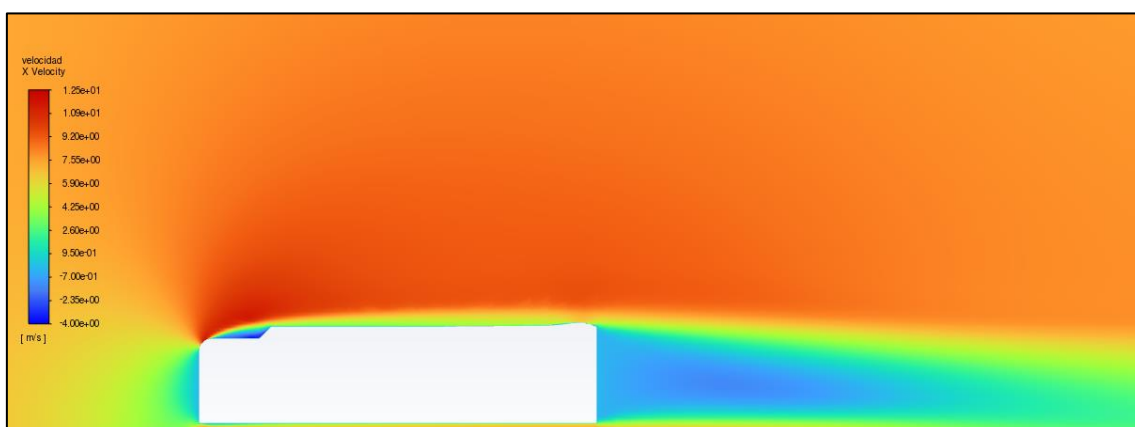


Ilustración 67: Isocontorno de velocidades en x del modelo 1 a $\text{Re}=200.000$ (final de caja).

Observando los isocontornos de presión y velocidad, se puede ver que el flujo se acelera al llegar al montículo, lo que provoca una pequeña caída de presión, mientras que, a la bajada del montículo, el flujo se frena, provocado una

ganancia de presión en esta. Además, se aprecia una reducción de la burbuja de recirculación, ya que la modificación consigue deflactar el flujo hacia abajo.

Caso base ([4.1.1.2](#))

- En la ilustración 68 se muestran la gráfica XY de presión:

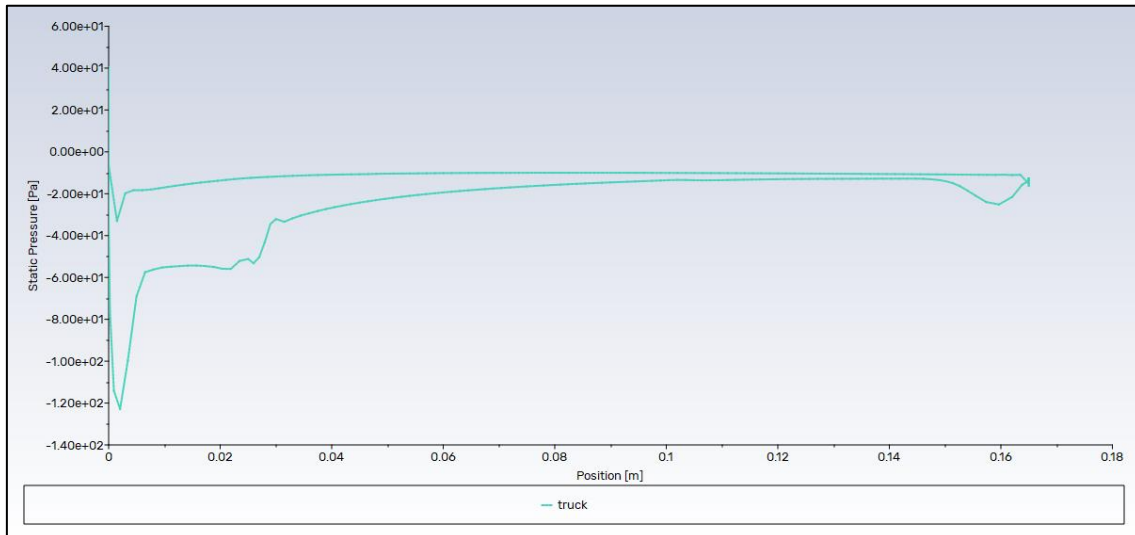


Ilustración 68: Gráfica XY de la presión del modelo 1 a $Re=200.000$ (final de caja).

Respecto al caso base, se puede observar la caída de presión provocada por la aceleración del flujo sobre el montículo, lo cual provoca un leve aumento del lift, e inmediatamente tras este se produce una recuperación de presión, debido a que el flujo se frena en la bajada del montículo. Caso base ([4.1.1.2](#))

4.2.2 Modelo 2

4.2.2.1 Re=20.000

4.2.2.1.1 Borde romo delantero

- En la ilustración 69 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

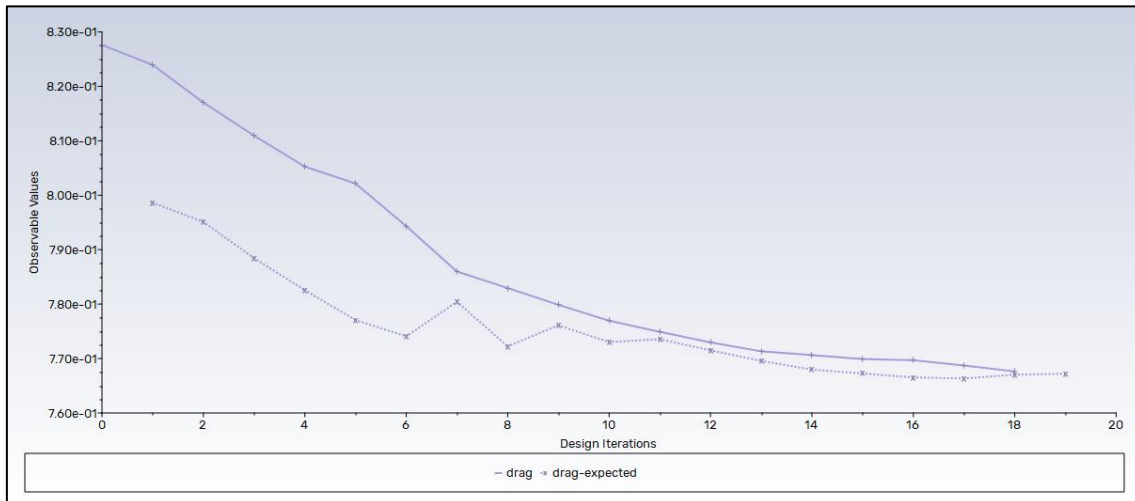


Ilustración 69: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a Re=20.000 (frontal).

Si analizamos la gráfica, podemos observar que en las primeras 7 iteraciones se producen reducciones importantes del drag, y de la iteración 7 en adelante, debido a que la sensibilidad se ve reducida, el drag se reduce más lentamente hasta la iteración 18, ya que, a partir de la iteración 19 se produciría un aumento del drag.

El drag obtenido en esta geometría ha sido $\text{Drag}=0,7676 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 7,25%. El coeficiente de arrastre obtenido para esta geometría es de $C_D=1.252$

- En la ilustración 70 se muestra la malla de la geometría modificada:

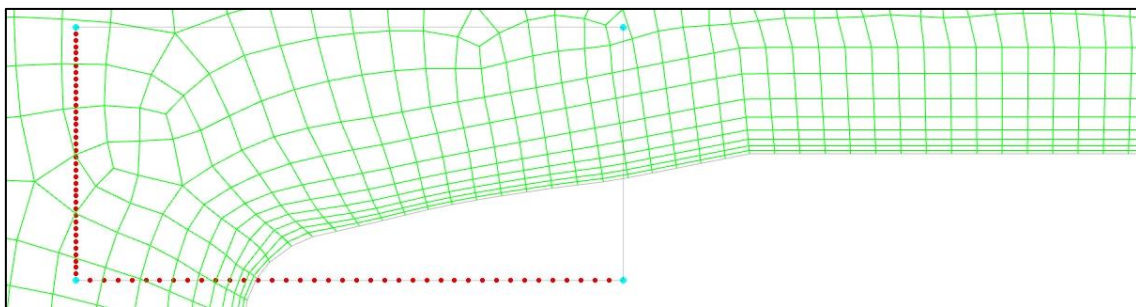


Ilustración 70: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a Re=20.000 (frontal).

Si analizamos la geometría en la zona de modificación, podemos observar una pequeña hendidura tras el borde delantero y, tras esta, se puede ver un pequeño montículo. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En los isocontornos de velocidad en x y presión no se pueden apreciar cambios significativos respecto al caso base.
- En la ilustración 71 se muestra la gráfica XY de presión:

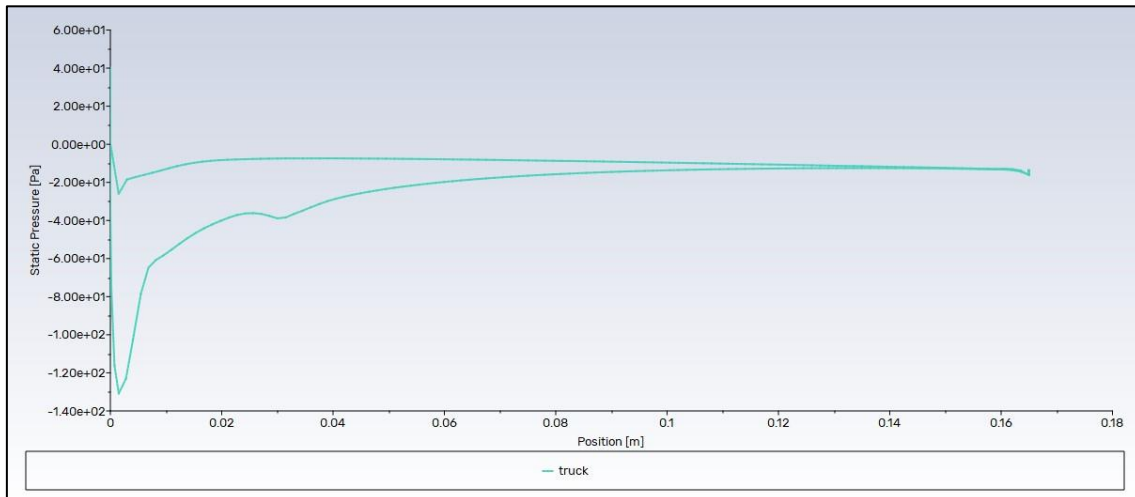


Ilustración 71: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (frontal).

Si analizamos la gráfica XY de presión y la comparamos con el caso base, se puede apreciar cómo, la caída de presión en el borde superior delantero, es algo mayor que en el caso base. Tras el borde y debido a la hendidura, se produce una rápida recuperación de presión, ya que el flujo se frena en esta. Se puede apreciar tras la recuperación de presión, un pequeño pico hacia abajo que corresponde con el montículo, ya que se acelera el flujo, sufriendo una muy pequeña pérdida de presión en consecuencia. Caso base ([4.1.2.1](#)).

4.2.2.1.2 Capitoné

- En la ilustración 72 se muestra la gráfica Drag-iteraciones de diseño:

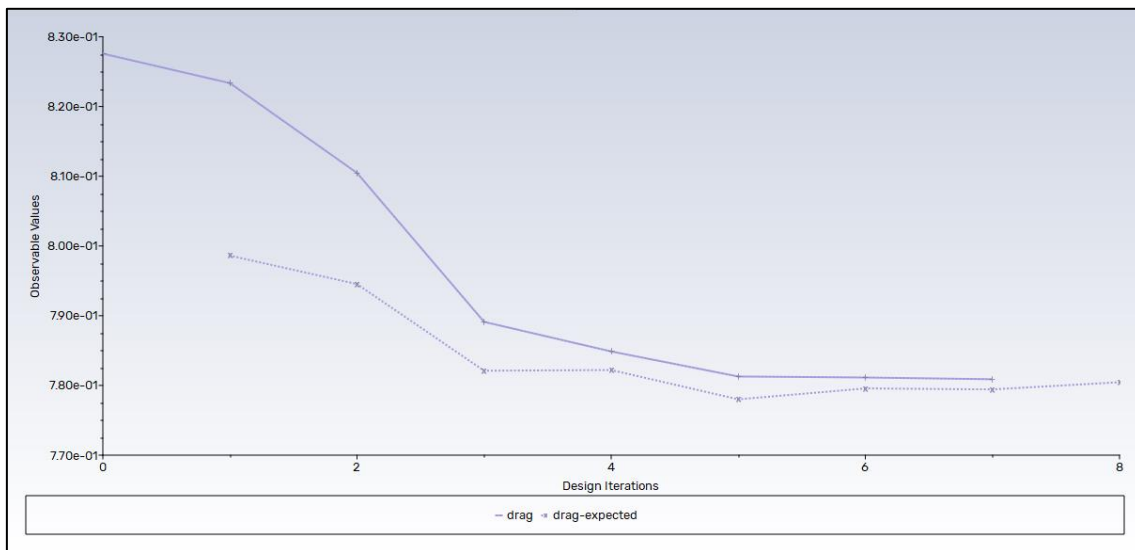


Ilustración 72: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).

Observando la gráfica, se puede ver que, en las 3 primeras iteraciones se consigue reducir significativamente el drag, mientras que, en las 4 iteraciones restantes, apenas se producen cambios en este.

El drag obtenido en esta geometría ha sido $Drag=0,7809$ N, lo que supone una mejora del 5,64%. El coeficiente de arrastre obtenido para esta geometría es de $C_D=1.2749$

- En la ilustración 73 se muestra la malla de la geometría modificada:

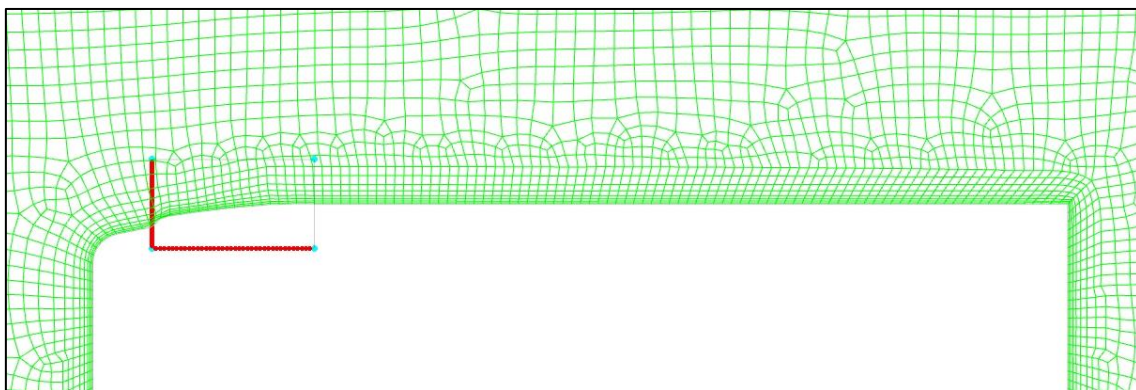


Ilustración 73: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).

Observando la ilustración, se puede ver que el capitoné se trata de sacar hacia afuera, creando un visible montículo tras el borde superior delantero. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En las ilustraciones 74 y 75 se puede ver los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

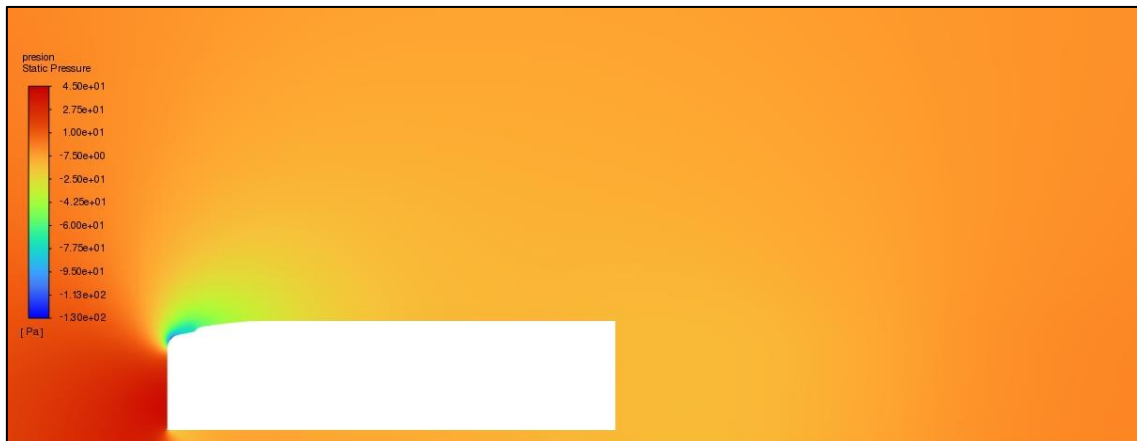


Ilustración 74: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).



Ilustración 75: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).

Observando los isocontornos de presión y velocidad, se pueden apreciar cambios significativos. Se puede ver como la zona de baja presión, en el borde superior delantero, se alarga hasta el comienzo del montículo, consiguiendo así redirigir el flujo y adherirlo completamente al montículo. Con ello se consigue reducir visiblemente la pequeña burbuja de recirculación existente en el caso base. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En la ilustración 76 se muestra la gráfica XY de presiones:

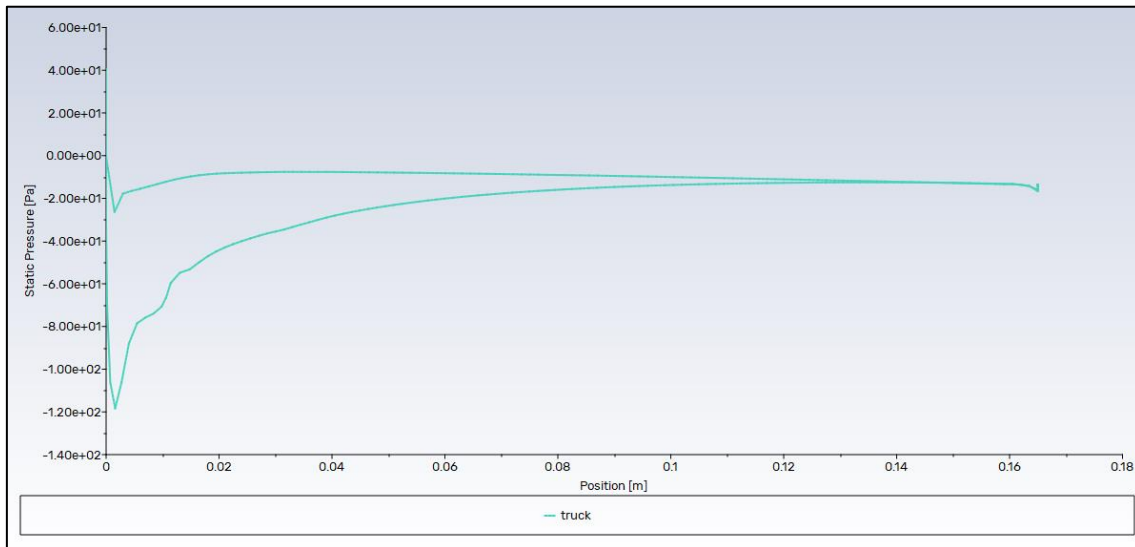


Ilustración 76: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (capitoné).

Frente al caso base, se puede observar que la caída de presión es un poco mayor en el borde superior delantero. Tras este se aprecia una ganancia de presión repentina, mientras que en el caso base, esta ganancia es más gradual. En el modelo 2 se puede ver que el desprendimiento del flujo en la parte frontal tiene mucha importancia, ya que está al límite de desprenderse, por ello se reduce tanto el drag con pocas modificaciones, a diferencia del modelo 1, donde el flujo se desprende totalmente en el borde delantero. Caso base ([4.1.2.1](#))

4.2.2.1.3 Parte trasera horizontal

- En la ilustración 77 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

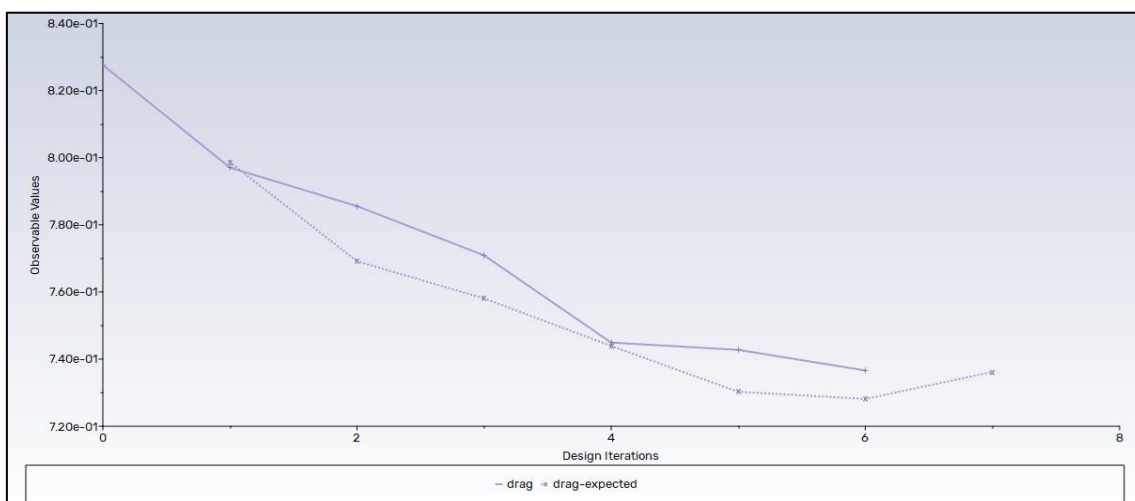


Ilustración 77: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).

Analizando la gráfica, se puede observar que, salvo en las 2 últimas iteraciones, se producen reducciones significativas del drag. En la iteración 7 se produciría un aumento del drag, por lo que, la última iteración de diseño es la sexta.

El drag obtenido en esta geometría ha sido $\text{Drag}=0,7366 \text{ N}$, lo que supone una mejora del 10,99%. El coeficiente de arrastre obtenido para esta geometría es de $C_D = 1.2026$

- La geometría obtenida es muy similar a la obtenida en el modelo 1 a $\text{Re}=200.000$ ([4.2.1.2.3](#)).
- En las ilustraciones 78 y 79 se observan los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

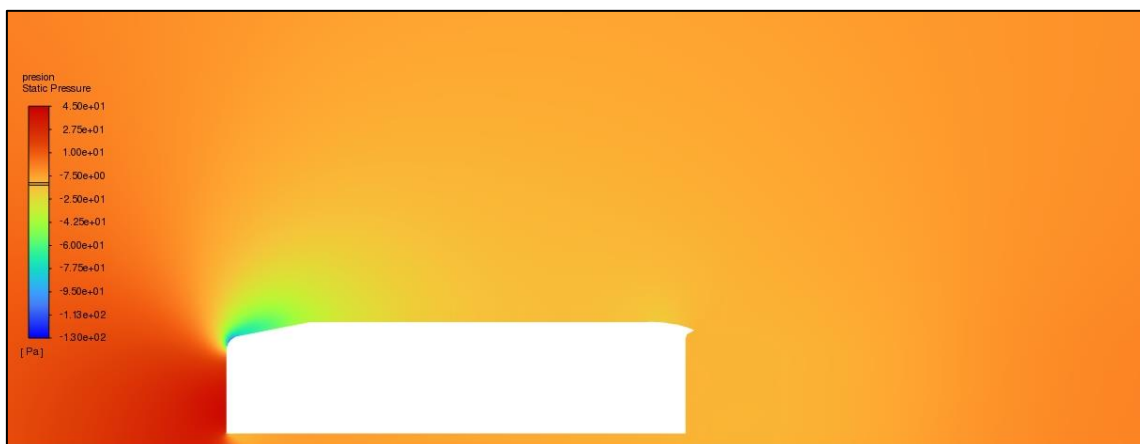


Ilustración 78: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $\text{Re}=20.000$ (trasera horizontal).

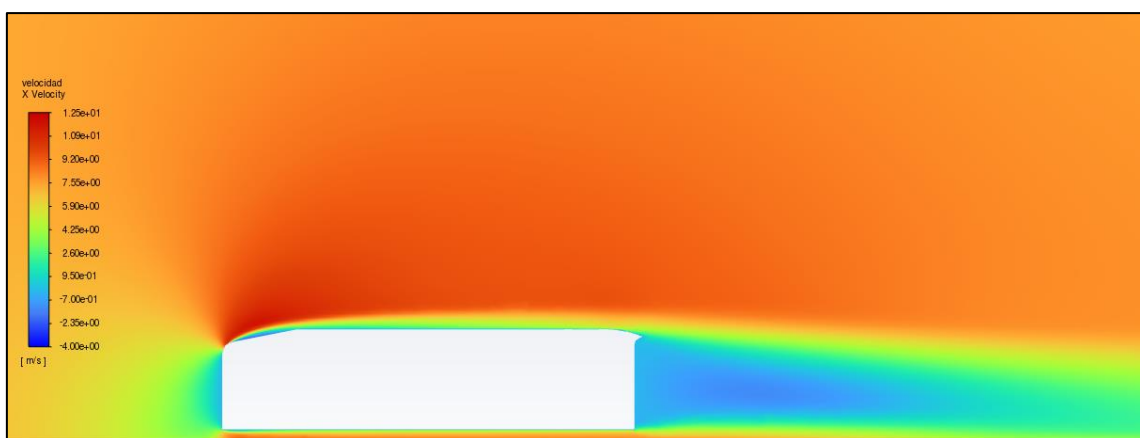


Ilustración 79: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $\text{Re}=20.000$ (trasera horizontal).

Frente al caso base, se puede observar que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que nos indica una pequeña aceleración del flujo. A la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando así una pequeña ganancia de presión y, debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo se desprende con un ángulo de inclinación hacia abajo, provocando así una reducción significativa del tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo. Con ello se consigue una estela más esbelta y aerodinámica. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En la gráfica 80 se muestra la gráfica XY de presión:

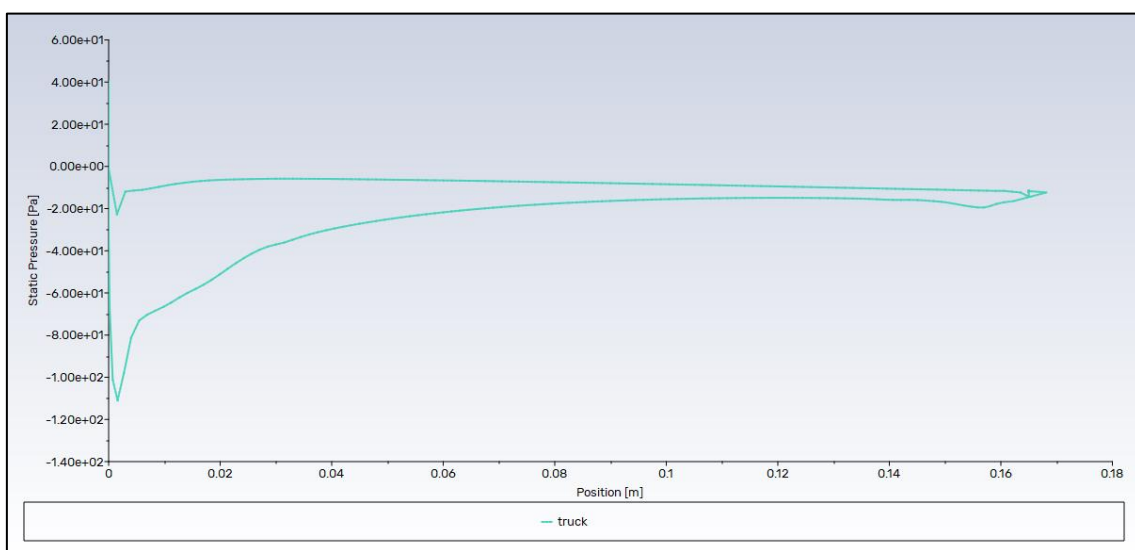


Ilustración 80: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera horizontal).

Frente al caso base, se pueden apreciar cambios notables a lo largo de la caja del camión. Se produce un aumento en la diferencia de presión entre la base y la parte superior de la caja, provocando un aumento del lift. Además, se puede apreciar la caída de presión en el montículo y la ganancia de presión tras este. También se puede apreciar un pequeño pico que representa el saliente de la nueva geometría. Caso base ([4.1.2.1](#)).

4.2.2.1.4 Parte trasera vertical

- En la ilustración 81 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

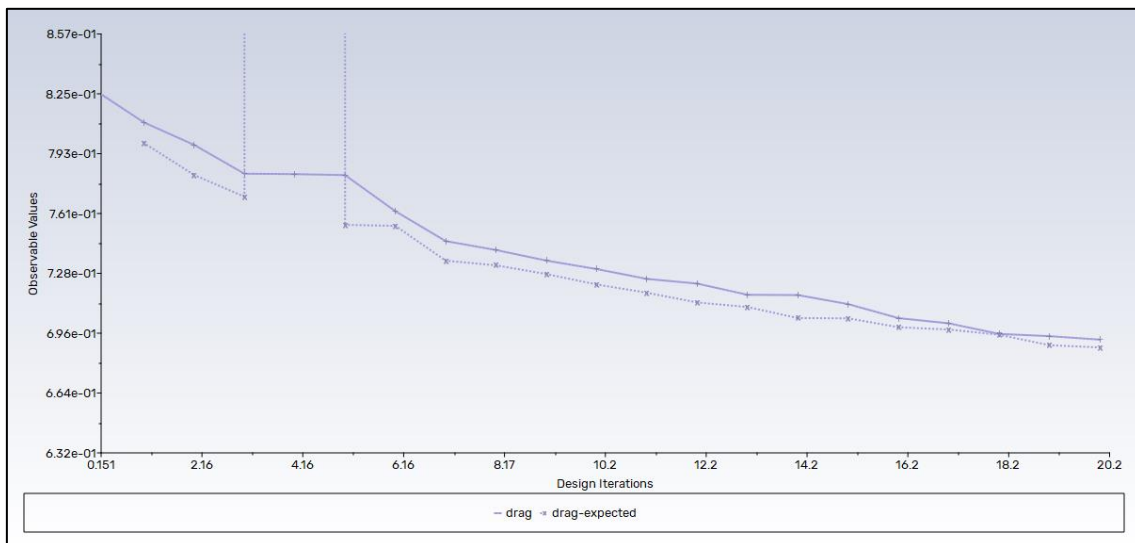


Ilustración 81: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).

Analizando la gráfica podemos observar que en este caso se han realizado las 20 iteraciones de diseño, reduciendo además significativamente el drag.

Para este caso se ha obtenido un valor de $Drag=0,6926$ N, lo que supone una mejora del 16,31%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.1308$.

- En la ilustración 82 se muestra la malla de la geometría modificada:

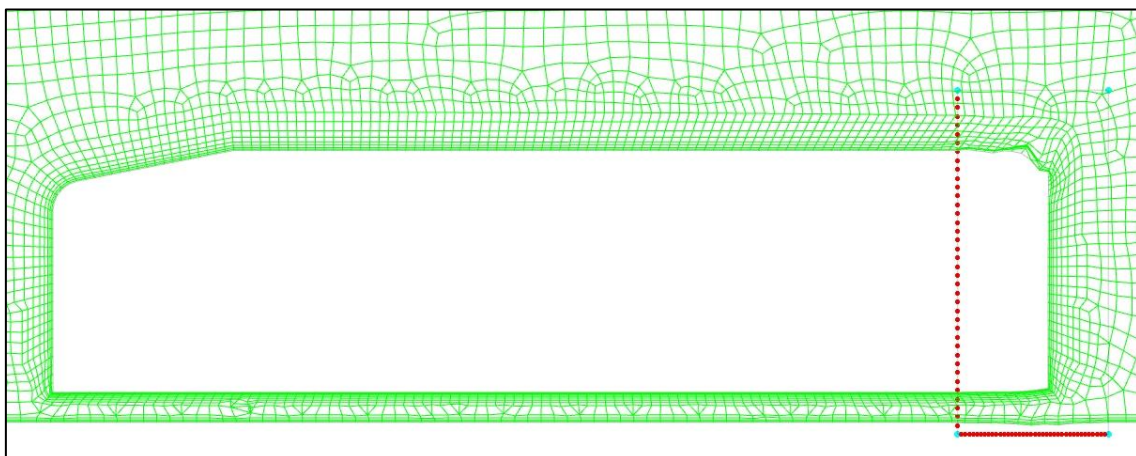


Ilustración 82: Malla de la modificación de la geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).

Analizando la zona de modificación, se puede observar en la parte superior trasera, una pequeña hendidura, acompañada de un montículo. Este montículo finalmente se mete hacia adentro, generando un *boat tail*, al igual que en modelo 1 a $Re=20.000$. Observando el borde trasero inferior, se observa que se ha hecho lo contrario que en el modelo 1. Se mete el borde hacia adentro, generando una modificación tipo difusor, generando un *boat tail* completo, tanto en la parte superior, como en la inferior. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En la ilustración 83 y 84 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

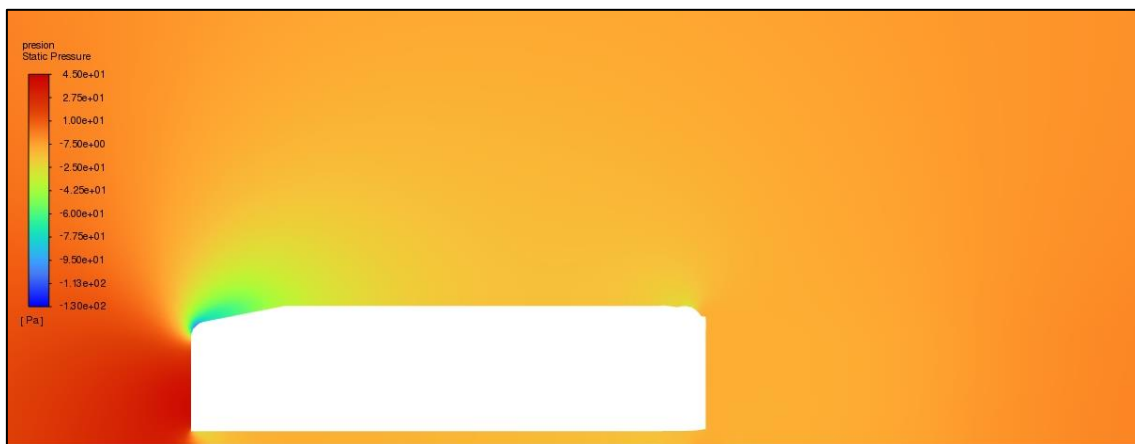


Ilustración 83: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).



Ilustración 84: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).

Si analizamos los isocontornos de velocidad y presión frente al caso base, podemos ver que en el montículo se acelera el flujo, provocando una caída de la presión en este. Tras este, el *boat tail* provoca un efecto difusor en el que el flujo se frena, provocando un aumento en la presión. En la parte inferior, la

modificación tipo difusor, consigue frenar el flujo y aumentar la presión en la zona. Además, debido al ángulo de salida del *boat tail* en la parte superior, se consigue deflactar el flujo hacia abajo, consiguiendo una reducción visible de la burbuja de recirculación tras el vehículo. Se puede ver que la estela tras el vehículo es bastante más aerodinámica que en el caso base. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En la ilustración 85 se muestra la gráfica XY de presión:

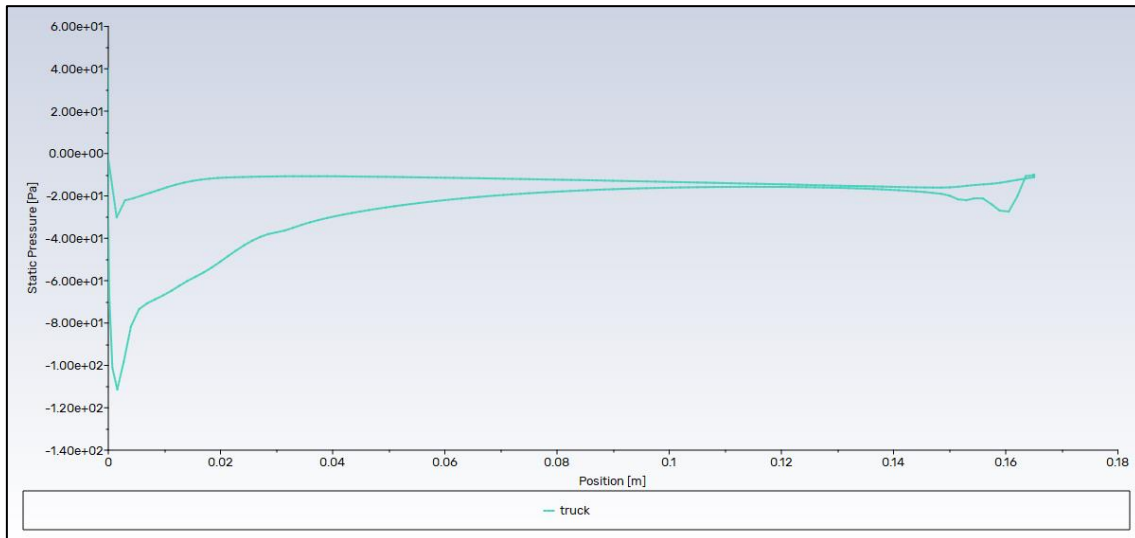


Ilustración 85: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (trasera vertical).

Como ya se ha visto en los isocontornos de velocidad y presión, se puede observar cómo se produce la caída de presión en el montículo, y la ganancia de presión en el difusor generado en la base del camión. Se puede apreciar que, debido a la diferencia de presiones entre la base del camión y la parte superior, se producirá un aumento del lift. Además, se puede observar que la presión en la espalda del vehículo aumenta respecto al caso base, tanto que incluso llegan a cruzarse, por lo que se puede ver gráficamente, que se va a producir una disminución del drag. Caso base ([4.1.2.1](#)).

4.2.2.1.5 Final de caja

- En la ilustración 86 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

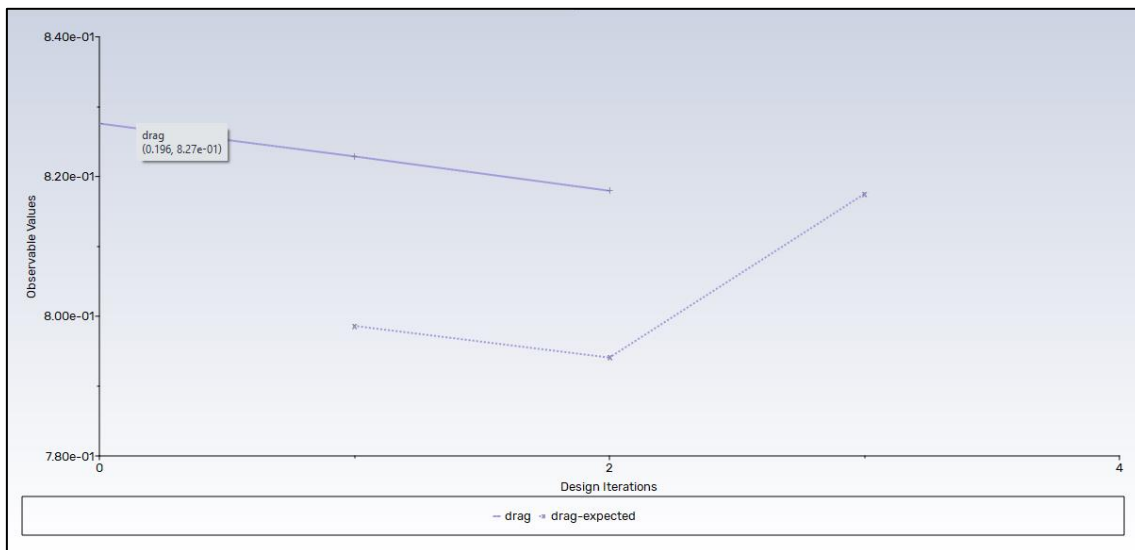


Ilustración 86: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).

Se han realizado únicamente dos iteraciones de diseño, en las que, además, se ha reducido mínimamente el drag, al igual que ha ocurrido en el modelo 1 a $Re=20.000$.

Para este caso se ha obtenido un valor de $Drag=0,8179$ N, lo que supone una mejora del 1,16%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.3354$.

- La geometría modificada es similar a la obtenida en el modelo 1 en ambos regímenes de flujo.
- En las ilustraciones 87 y 88 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

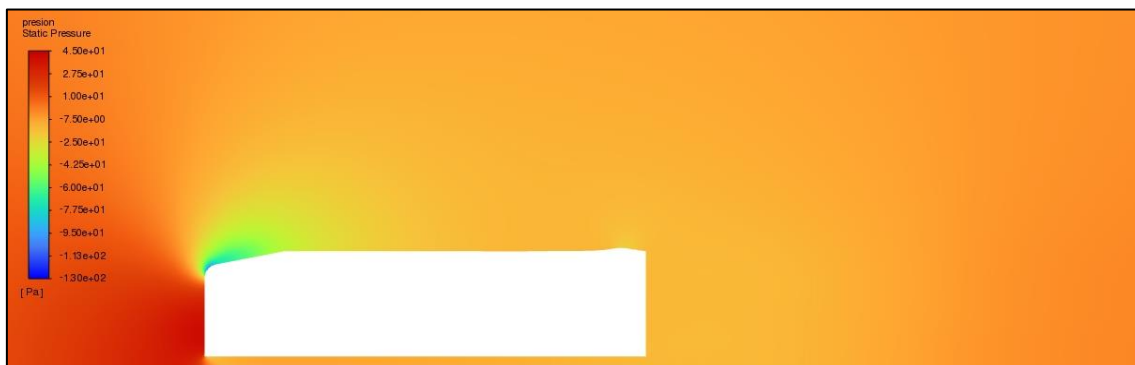


Ilustración 87: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).

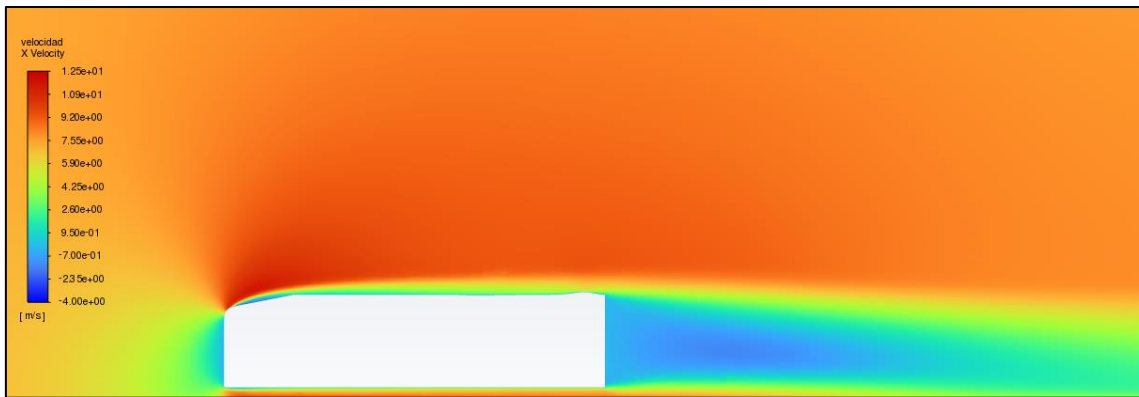


Ilustración 88: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).

Observando los isocontornos de presión y velocidad, se puede ver que el flujo se acelera al llegar al montículo, lo que provoca una pequeña caída de presión, mientras que, a la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando una ganancia de presión en esta. Caso base ([4.1.2.1](#))

- En la ilustración 89 se muestra la gráfica XY de presiones:

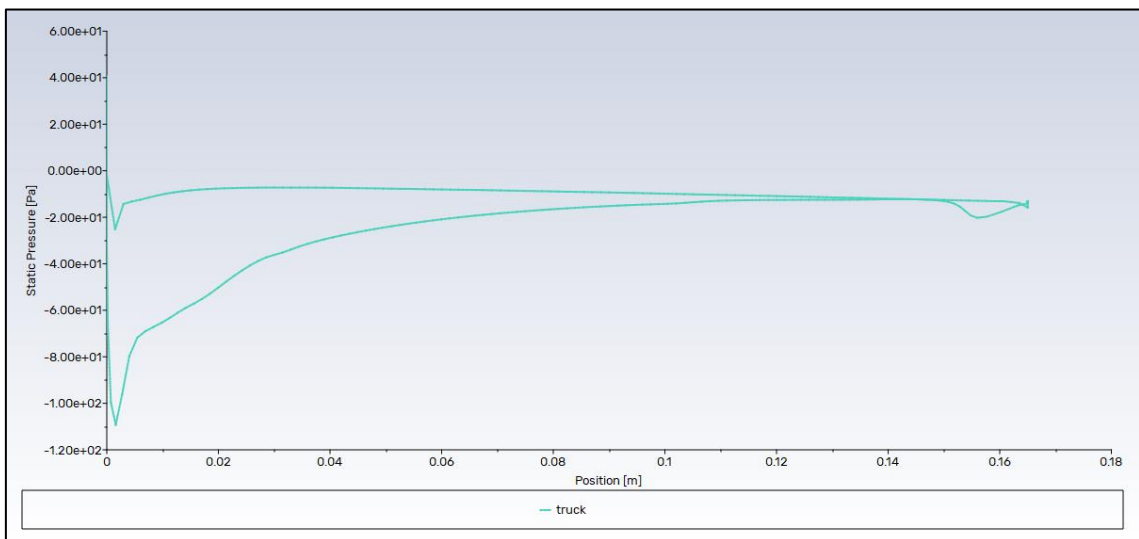


Ilustración 89: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=20.000$ (final de caja).

Respecto al caso base, se puede observar la caída de presión provocada por la aceleración del flujo sobre el montículo, lo cual provoca un leve aumento del lift, e inmediatamente tras este se produce una recuperación de presión, debido a que el flujo se frena en la bajada del montículo. Caso base ([4.1.2.1](#)).

4.2.2.2 **Re=200.000**

4.2.2.2.1 Borde romo delantero

- En la ilustración 90 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

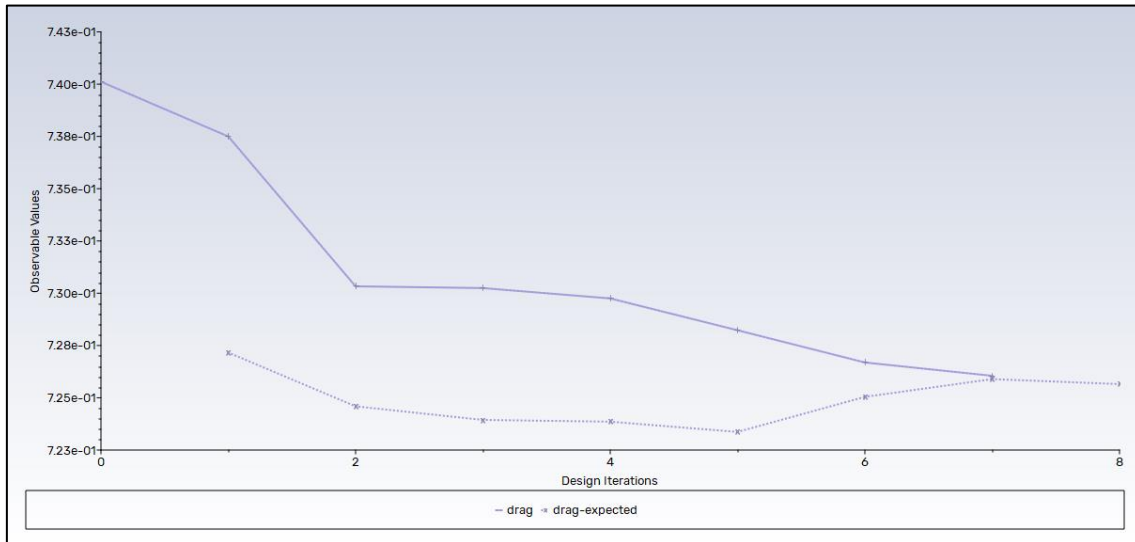


Ilustración 90: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a Re=200.000 (frontal).

Observando la gráfica, se puede ver que en las dos primeras iteraciones se consigue reducir significativamente el drag, mientras que, en las 5 siguientes, la reducción es menor

. Para este caso se ha obtenido un valor de Drag=0,7260 N, lo que supone una mejora del 1,9%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.1853$.

- La geometría modificada es similar en la obtenida en el caso a Re=20.000 ([4.2.2.1.1](#)).
- En los isocontornos de presión y velocidad y en la gráfica XY de presión, no se ven cambios apreciables respecto al caso base ([4.1.2.2](#)).

4.2.2.2.2 Capitoné

- En la ilustración 91 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

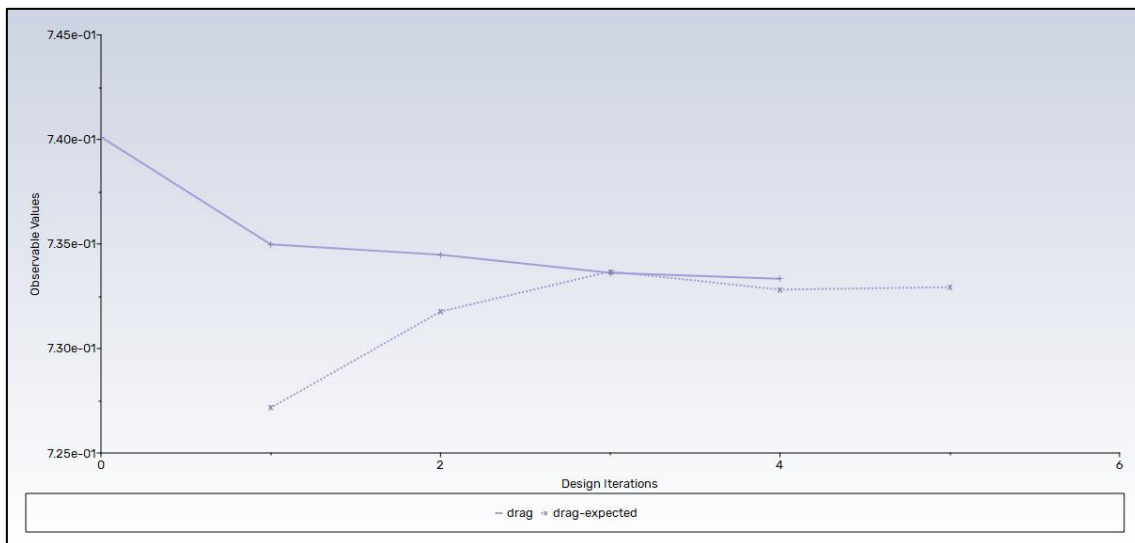


Ilustración 91: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (capitoné).

Si se observa la gráfica, se puede ver que se realizan 4 iteraciones, en las que se consigue reducir el drag mínimamente. En la quinta iteración se espera una subida del drag, que, tras calcularla, se confirma la subida del drag, por lo que no se realizan más iteraciones.

Para este caso se ha obtenido un valor de Drag=0,7333 N, lo que supone una mejora del 0,91%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.1973$.

- La geometría generada es similar a la obtenida en el caso a $Re=20.000$ ([4.2.2.1.2](#)).
- En los isocontornos de presión y velocidad no se aprecian diferencias significativas respecto al caso base ([4.1.2.2](#)).

- En la ilustración 92 se muestra la gráfica XY de presión:

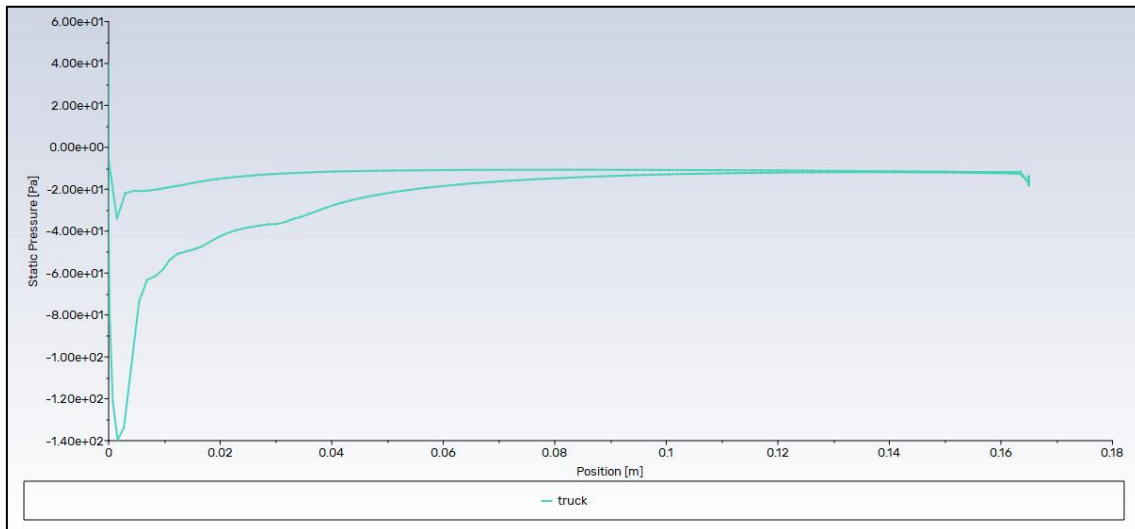


Ilustración 92: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (capitone).

Si se analiza la gráfica respecto al caso base, se puede observar que, en la zona del capitone, la recuperación de presión es más gradual que en el caso base, provocando así un aumento del lift y una disminución del drag. Caso base [\(4.1.2.2\)](#)

4.2.2.2.3 Parte trasera horizontal

- En la ilustración 93 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño:

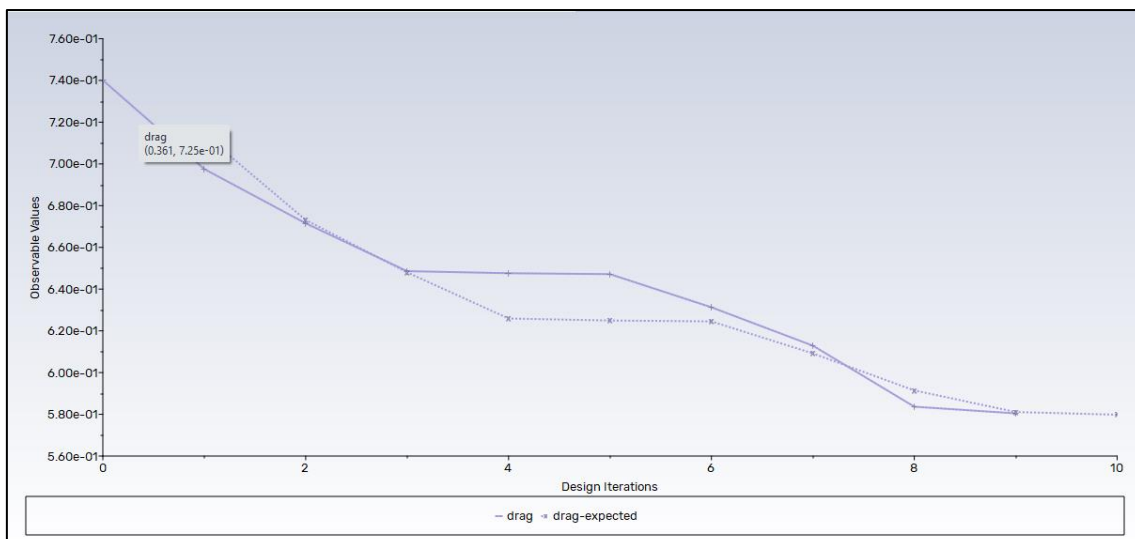


Ilustración 93: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ trasera horizontal).

En este cambio de geometría se han realizado 9 iteraciones en las que, en la mayoría, se puede observar que se ha reducido significativamente el drag.

Para este caso se ha obtenido un valor de $\text{Drag}=0,5804 \text{ N}$, lo que supone una muy buena mejora del 21,57%. El coeficiente de arrastre $C_D=0.9477$. Se puede ver que estos cambios en la geometría son más eficaces a Reynolds altos.

- La geometría obtenida es similar a las obtenidas en el modelo 1 a $\text{Re}=200.000$ y en el modelo 2 a $\text{Re}=20.000$ ([4.2.2.2.3](#)).
- En las ilustraciones 94 y 95 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:



Ilustración 94: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $\text{Re}=200.000$ (trasea horizontal).

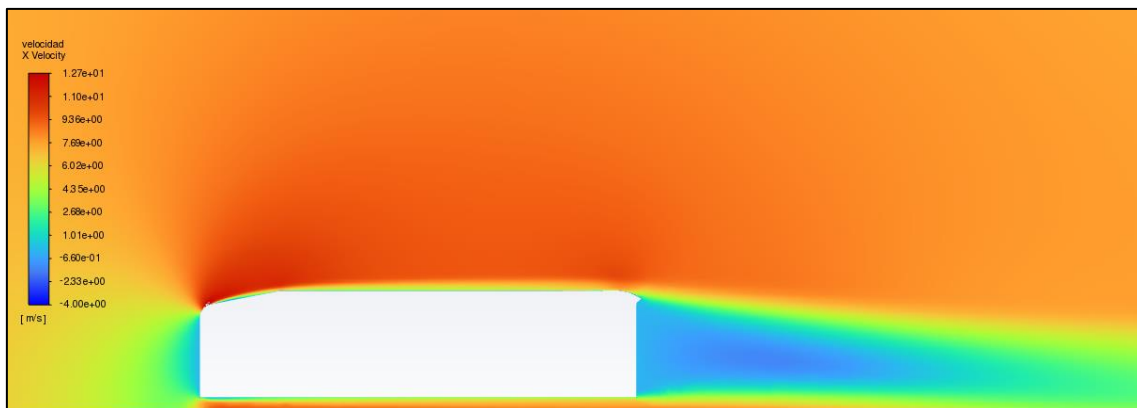


Ilustración 95: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $\text{Re}=200.000$ (trasea horizontal).

Frente al caso base, se puede observar que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que nos indica una pequeña aceleración del flujo. A la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando así una pequeña ganancia de presión y, debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo se desprende con un ángulo de inclinación hacia abajo, provocando así una

reducción significativa del tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo.

Caso base ([4.1.2.2](#))

- En la ilustración 96 se muestra la gráfica XY de presiones:

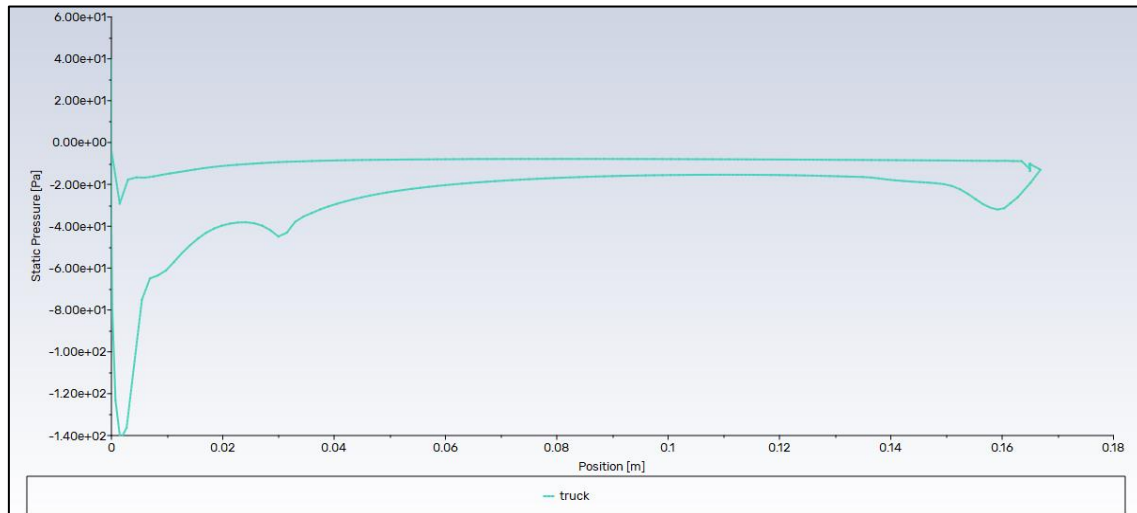


Ilustración 96: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera horizontal).

Frente al caso base, se pueden apreciar cambios notables a lo largo de la caja del camión. Se produce un aumento en la diferencia de presión entre la base y la parte superior de la caja, provocando un aumento del lift. Además, se puede apreciar la caída de presión en el montículo y la ganancia de presión tras este. También se puede apreciar un pequeño pico que representa el saliente de la nueva geometría. Caso base ([4.1.2.2](#))

4.2.2.2.4 Parte trasera vertical

- En la ilustración 97 se observa la gráfica drag-iteraciones de diseño:

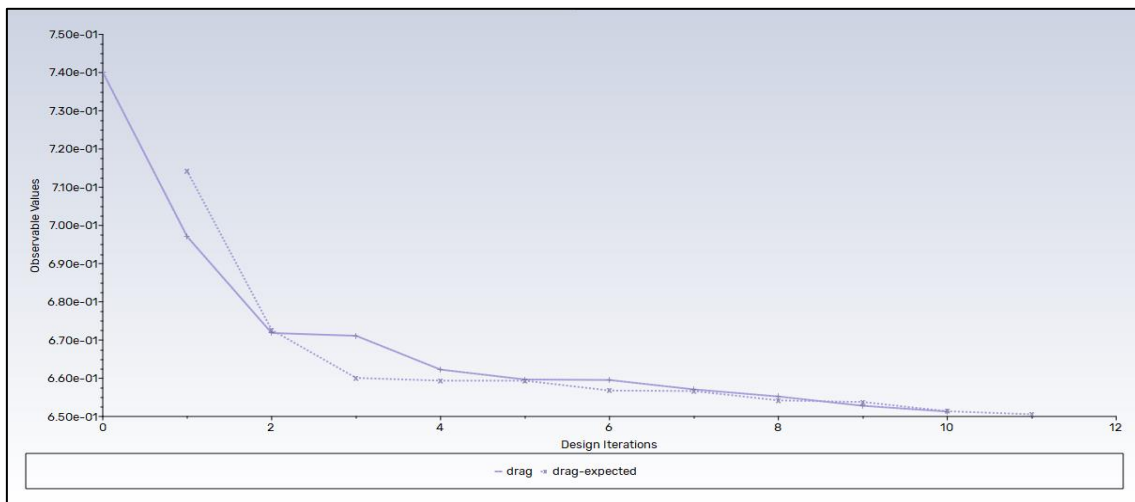


Ilustración 97: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Analizando la gráfica, se puede observar una gran reducción del drag en las dos primeras modificaciones, mientras que, en el resto de las 10 iteraciones realizadas, las reducciones son menores.

Para este caso se ha obtenido un valor de Drag=0,6513 N, lo que supone una mejora del 12%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.0633$.

- La geometría obtenida es similar a la que se ha obtenido en el modelo 1 a $Re=200.000$ ([4.2.1.2.4](#)).
- En las ilustraciones 98 y 99 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

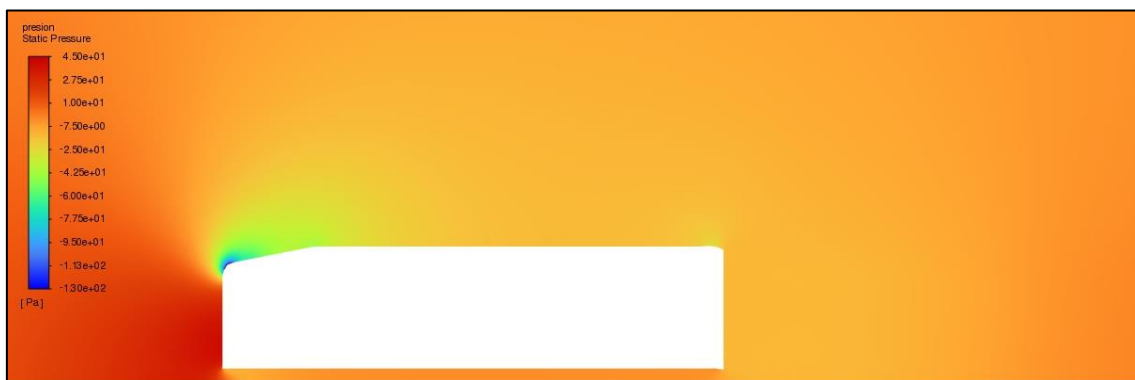


Ilustración 98: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

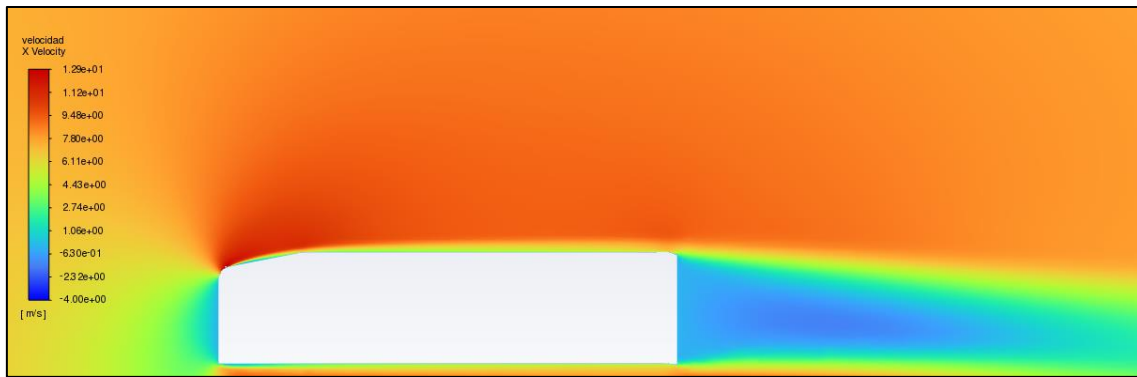


Ilustración 99: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical).

Analizando los isocontornos de presión y velocidad, podemos ver que, en el montículo, se produce una pequeña pérdida de presión, lo que indica una aceleración del flujo. Tras este se vuelve a recuperar presión provocando así una desaceleración del flujo. Debido al ángulo de salida del borde superior trasero, el flujo sale con un ángulo de inclinación hacia abajo, que reduce significativamente el tamaño de la burbuja de recirculación tras el vehículo. Respecto a la parte inferior, se puede observar cómo, el saliente, acelera el flujo y disminuye la presión, simulando una tobera. Caso base ([4.1.2.2](#))

- En la ilustración 100 se muestra la gráfica XY de presión:

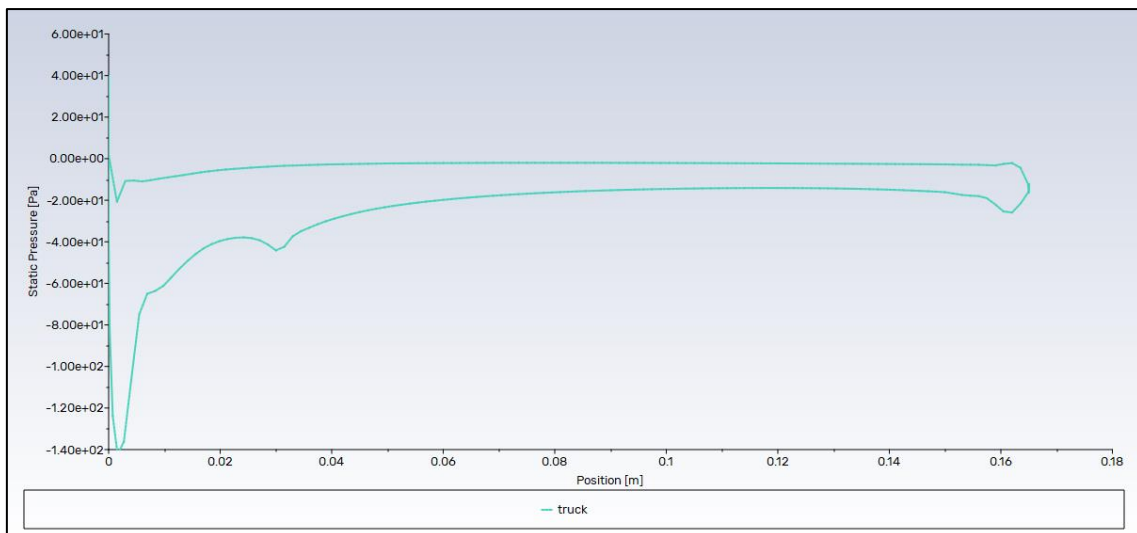


Ilustración 100: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (trasera vertical)

Respecto al caso base, se puede observar que aumenta la diferencia de presiones entre la base y parte superior del vehículo a lo largo de la caja, lo que produce un gran aumento en el lift. Además, quedan reflejadas en la gráfica, las

pérdidas y ganancias de presión mencionadas en los isocontornos de presión y velocidad. Caso base ([4.1.2.2](#))

4.2.2.2.5 Final de caja

- En la ilustración 101 se muestra la gráfica drag-iteraciones de diseño.

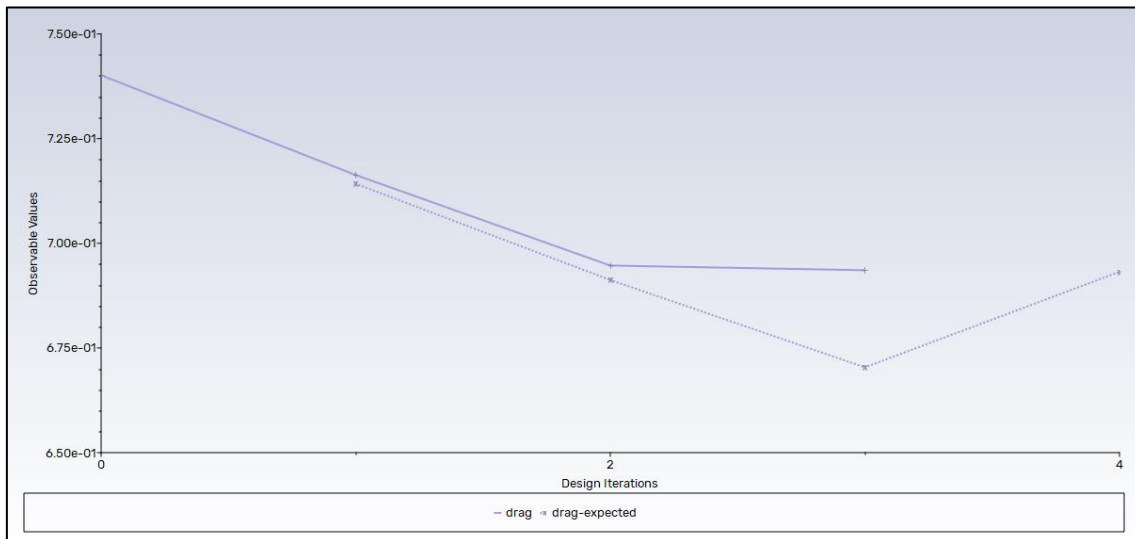


Ilustración 101: Gráfica Drag-Iteraciones de cambio de geometría del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).

Analizando la gráfica se puede observar que en las dos primeras iteraciones se ha conseguido reducir bastante el drag, mientras que, en la última iteración, se ha disminuido mínimamente.

Para este caso se ha obtenido un valor de Drag=0,6936 N, lo que supone una mejora del 6,29%. El coeficiente de arrastre $C_D=1.1323$.

- La geometría modificada es similar a las obtenidas en los demás casos anteriores ([4.2.1.1.5](#)).

- En las ilustraciones 102 y 103 se muestran los isocontornos de presión y velocidad en x, respectivamente:

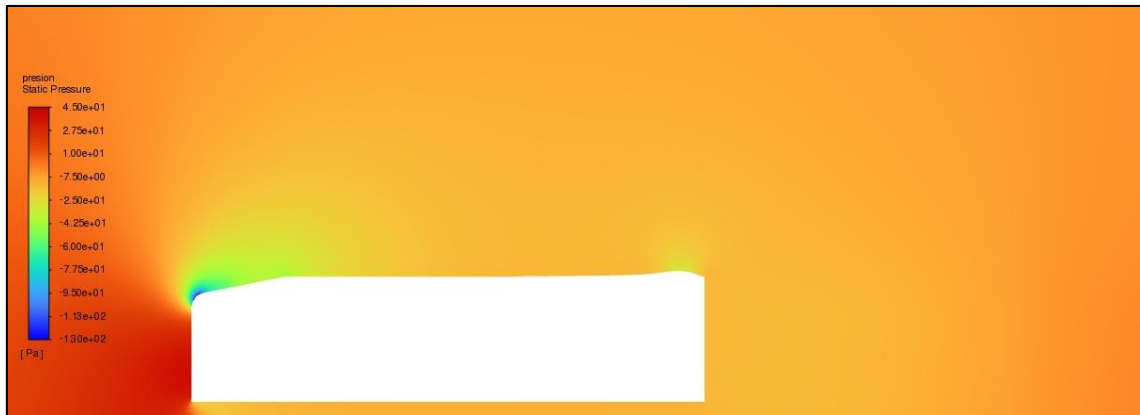


Ilustración 102: Isocontorno de presión estática del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).



Ilustración 103: Isocontorno de velocidades en x del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).

Observando los isocontornos de presión y velocidad, se puede ver que el flujo se acelera al llegar al montículo, lo que provoca una pequeña caída de presión, mientras que, a la bajada del montículo, el flujo se frena, provocando una ganancia de presión en esta. Al igual que en el modelo 1 a $Re=200.000$, se consigue deflectar el flujo hacia abajo, consiguiendo así una reducción del tamaño de la burbuja de recirculación. Caso base ([4.1.2.2](#))

- En la ilustración 104 se muestran la gráfica XY de presión:

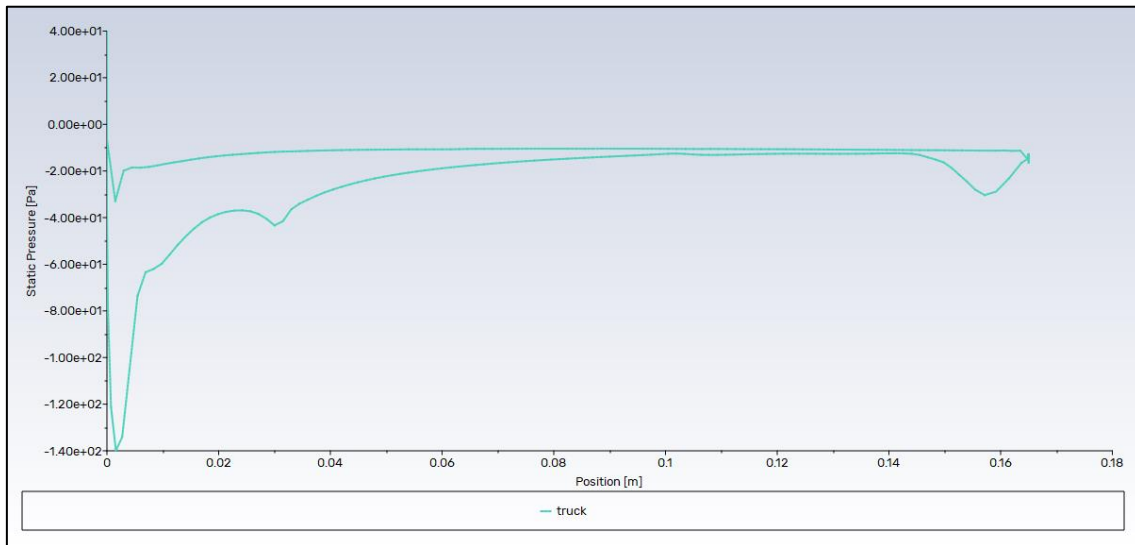


Ilustración 104: Gráfica XY de la presión del modelo 2 a $Re=200.000$ (final de caja).

Respecto al caso base, se puede observar la caída de presión provocada por la aceleración del flujo sobre el montículo, lo cual provoca un leve aumento del lift, e inmediatamente tras este, se produce una recuperación de presión, debido a que el flujo se frena en la bajada del montículo. Caso base ([4.1.2.2](#))

4.3 Comentario de resultados

4.3.1 Modelo 1

Los resultados obtenidos para el modelo 1 a $Re=20.000$ se muestran en las tablas 3 y 4:

$Re=20.000$				
C_p	Longitud de burbuja	Drag	Lift	C_D
-0,447	0,070	0,874	2,610	1,426

Tabla 3: Resultados modelo 1 a $Re=20.000$ (Caso base).

	Parte	$Re=20.000$				
		C_p	Longitud de burbuja	% Drag	% Lift	C_D
Modelo 1	Frontal	-0,433	0,074	1,641	-3,519	1,403
	Capitoné	-0,447	0,073	2,689	-3,071	1,388
	Trasera H	-0,362	0,042	14,315	30,960	1,222
	Trasera V	-0,414	0,058	7,041	57,141	1,326
	Final	-0,401	0,070	0,917	3,220	1,413

Tabla 4: Resultados del modelo 1 a $Re=20.000$.

Lo primero que vamos a analizar son los coeficientes adimensionales de presión en la espalda del vehículo. Se puede apreciar que, salvo en el capitoné, las modificaciones geométricas consiguen reducir el valor del coeficiente de presión respecto del modelo base. Esto nos indica que, salvo las modificaciones del capitoné, los cambios en la geometría han conseguido reducir la caída de presión tras el vehículo.

Analizando el tamaño de burbuja de recirculación, se puede ver que las modificaciones geométricas llevadas a cabo en el capitoné y en la parte frontal aumentan la burbuja de recirculación, cosa que no nos interesa debido a que aumentan la estela tras el vehículo y en consecuencia provoca inestabilidad en este, entre otros problemas. Por otro lado, las modificaciones traseras, vertical y horizontal, reducen significativamente el tamaño de la burbuja de recirculación, lo cual mejora la estabilidad del vehículo. La modificación de la parte final de la caja mantiene el tamaño de esta.

En cuanto al drag, se consigue reducir en todas las modificaciones el valor de este. Podemos ver que las modificaciones de las partes trasera producen una significativa reducción del drag, mientras que, el resto de modificaciones reducen levemente el drag. En las modificaciones de las partes traseras y final de caja, la mayor parte de la reducción del drag es debido a la reducción de la caída de presión tras el vehículo, mientras que, en las modificaciones del capitoné y frontal, las caídas de presión producidas en estas partes, son las que más contribuyen a la reducción de este.

Si analizamos el lift, podemos ver que, con las modificaciones geométricas realizadas en el final de caja, capitoné y borde superior delantero, este se mantiene prácticamente constante. En las modificaciones traseras en cambio, el lift aumenta bastante, pero no supone un problema en este tipo de vehículos, debido a que son vehículos de gran tonelaje con mucha tracción. Además, se ha demostrado que en vehículos pesados, un aumento del lift, provoca una reducción del consumo de combustible (Sita *et al*, 2015).

Respecto al coeficiente de arrastre, se ha reducido en todos los casos, algo que ya se esperaba, puesto que es consecuencia de la reducción del drag.

Los resultados obtenidos son de acuerdo a los obtenidos en otros trabajos similares (Lorite-Diez, 2017).

Para el caso a $Re=200.000$ se obtienen unos resultados parecidos. Se muestran en las tablas 5 y 6:

Re=200.000				
C _p	Longitud de burbuja	Drag	Lift	C _D
-0,472	0,076	0,812	1,958	1,426

Tabla 5: Resultados modelo 1 a $Re=200.000$ (Caso base).

	Parte	Re=200.000				
		C _p	Longitud de burbuja	% Drag	% Lift	C _D
Modelo 1	Frontal	-0,475	0,076	1,076	-0,808	1,311
	Capitoné	-0,484	0,076	1,344	0,168	1,388
	Trasera H	-0,365	0,043	18,796	57,008	1,076
	Trasera V	-0,250	0,055	11,764	148,623	1,169
	Final	-0,414	0,067	4,627	16,680	1,264

Tabla 6: Resultados del modelo 1 a $Re=200.000$.

Las principales diferencias las encontramos en el capitoné, parte frontal y parte final. Se puede ver que, tanto en la modificación de la parte frontal, como en la del capitoné, el coeficiente de presión es mayor que en el modelo base y, aun así, se ha reducido el drag, lo que nos indica que la reducción del drag se debe a la caída de presión que han provocado estos en sus respectivas zonas de modificación, en lugar de reducir la caída de presión tras el vehículo. Si observamos el tamaño de las burbujas, en las modificaciones del frontal y capitoné, estas se mantienen constantes, a diferencia del caso anterior, donde el tamaño de estas aumentaba. En cuanto al drag, podemos observar que la reducción de este, provocada por la modificación del final de caja, es bastante mayor que en el caso a $Re=20.000$. El resto de características son similares.

4.3.2 Modelo 2

En las tablas 7 y 8 se muestran los resultados para el modelo 2 a $Re=20.000$:

Re=20.000				
C _p	Longitud de burbuja	Drag	Lift	C _D
-0,463	0,072	0,828	2,475	1,351

Tabla 7: Resultados del modelo 2 a $Re=20.000$ (Caso base).

	Parte	Re=20.000				
		C _p	Longitud de burbuja	% Drag	% Lift	C _D
Modelo 2	Frontal	-0,460	0,075	7,247	-4,244	1,252
	Capitoné	-0,469	0,075	5,643	-4,206	1,275
	Trasera H	-0,398	0,051	10,993	21,867	1,203
	Trasera V	-0,349	0,042	16,311	-6,067	1,131
	Final	-0,450	0,072	1,163	2,445	1,335

Tabla 8: Resultados del modelo 2 a Re=20.000.

Lo primero que vamos a analizar son los coeficientes adimensionales de presión en la espalda del vehículo. Se puede apreciar que, salvo en el capitoné, las modificaciones geométricas consiguen reducir el valor del coeficiente respecto del modelo base, al igual que ocurría en el modelo 1 en el mismo régimen de flujo. Esto nos indica que, salvo las modificaciones del capitoné, los cambios en la geometría han conseguido reducir la caída de presión tras el vehículo.

Analizando el tamaño de burbuja de recirculación, se puede ver que las modificaciones geométricas llevadas a cabo en el capitoné y en la parte frontal aumentan la burbuja de recirculación, cosa que no nos interesa, debido a que aumentan la estela tras el vehículo. Por otro lado, las modificaciones traseras, vertical y horizontal, reducen significativamente el tamaño de la burbuja de recirculación. La modificación de la parte final de la caja, mantiene el tamaño de esta. Respecto a la burbuja recirculación tras el vehículo, las modificaciones muestran exactamente los mismos resultados que en el modelo 1.

En cuanto al drag, se consigue reducir en todas las modificaciones el valor de este. Excepto la modificación del final de la caja, el resto provoca una reducción considerable del drag. En las modificaciones de las partes traseras y final de caja, la mayor parte de la reducción del drag es debido a la reducción de la caída de presión tras el vehículo, mientras que, en las modificaciones del capitoné y frontal, las caídas de presión producidas en estos, son las que más contribuyen a la reducción de este. En el capitoné y el borde delantero, se consigue una mayor mejora respecto al modelo 1.

Si analizamos el lift, se puede ver que, con las modificaciones geométricas realizadas en el final de caja, parte trasera vertical, capitoné y borde superior

delantero, este se mantiene prácticamente constante. Con la modificación trasera horizontal, el lift aumenta bastante, pero como ya hemos dicho antes, no supone un problema.

Respecto al coeficiente de arrastre, se ha reducido en todos los casos, algo que ya se esperaba, puesto que es consecuencia de la reducción del drag.

En las tablas 9 y 10 se muestran los resultados obtenidos para el $Re=200.000$.

Re=200.000				
C_p	Longitud de burbuja	Drag	Lift	C_D
-0,481	0,075	0,740	1,924	1,351

Tabla 9: Resultados modelo 2 a $Re=200.000$ (Caso base).

	Parte	Re=200.000				
		C_p	Longitud de burbuja	% Drag	% Lift	C_D
Modelo 2	Frontal	-0,527	0,075	1,903	23,186	1,185
	Capitoné	-0,506	0,075	0,919	23,235	1,197
	Trasera H	-0,358	0,042	21,575	56,777	0,948
	Trasera V	-0,426	0,054	12,005	20,841	1,063
	Final	-0,453	0,066	6,292	31,791	1,132

Tabla 10: Resultados modelo 2 a $Re=200.000$.

En este régimen de flujo, existen notorias diferencias respecto al caso de $Re=20.000$. Primero de todo, podemos apreciar que, en las modificaciones del capitoné y frontal, el coeficiente de presión aumenta respecto al caso base, lo que nos indica que las causas de reducción del drag son debido a la caída de presión en estas partes, ya que si no se produciría un aumento del drag. En este caso, las burbujas de recirculación en las modificaciones geométricas del capitoné y parte frontal, mantienen su tamaño en lugar de aumentarlo como en el caso a $Re=20.000$. En cuanto al drag, se puede apreciar que las modificaciones del capitoné y parte frontal no producen una reducción tan significativa como en el caso a $Re=20.000$, mientras que la modificación del final de caja, genera una reducción significativamente mayor. Analizando el lift, podemos observar que, en todos los casos, es bastante grande, a diferencia del caso a $Re=20.000$.

5 Conclusiones

En el presente trabajo de fin de grado, se ha abordado el estudio del flujo turbulento alrededor de vehículos de gran tonelaje de base roma y la mejora aerodinámica de los mismos, sin perjuicio de pérdida de sus capacidades de carga. Para ello se han realizado simulaciones numéricas, turbulentas y bidimensionales del flujo alrededor de dos geometrías basadas en el modelo de vehículo GTS, que presentan diferencias de forma en la parte frontal del capitoné entre ellas. Asimismo, se ha estudiado el problema a dos números de Reynolds distintos, a saber, $Re=20.000$ y $Re=200.000$. Las simulaciones han permitido caracterizar los campos de velocidad y presión del fluido, así como las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el vehículo. Posteriormente, se ha utilizado el módulo de optimización geométrica de Ansys Fluent para obtener geometrías aerodinámicamente más eficientes, que proporcionan fuerzas de arrastre menores a las de los vehículos modelo. Para ello, los esfuerzos computacionales se han centrado en cinco regiones; el borde superior delantero, el capitoné, la parte trasera superior de la caja y la parte trasera inferior de esta. Las conclusiones a las que se han llegado tras analizar los resultados son las siguientes:

- La mayoría de las modificaciones obtenidas, son similares independientemente del Reynolds.
- Las modificaciones que provocan una mayor reducción del drag son las de las partes traseras, tanto vertical, como horizontal. Se trata de geometrías tipo *boat tail* y tipo alerón, ambas ya desarrolladas.
- Aunque la modificación del final de la caja produce una reducción del drag en todos los casos, esta es mucho más notoria con valores altos de Reynolds, por lo que es recomendable para vehículos pesados con menor carga, cuya velocidad en carretera es mayor.
- Las modificaciones realizadas en la parte delantera y en el capitoné, aunque reducen el drag, aumentan el tamaño de la estela, provocando así, una mayor inestabilidad en el vehículo. Además, la reducción del drag, provocada por estas modificaciones, es muy pequeña respecto al resto de las modificaciones, por lo que es

conveniente tener en cuenta el resto de modificaciones antes que esta.

- Ninguna de las geometrías obtenidas genera un cambio drástico en la geometría, por lo que son viables de implementar y mantienen la total funcionalidad del vehículo, lo que es una de las condiciones objetivo perseguida en este trabajo.

6 Trabajo posterior

Este trabajo de fin de grado se ha realizado para modelos 2D de camión, pero la realidad es que, aunque los resultados pueden ser en parte aplicables a modelos reales, están muy lejos de los resultados óptimos. Los problemas reales de estudio son problemas 3D en los que entran en juegos otros parámetros y estructuras de flujo que no aparecen en los problemas 2D, como pueden ser el ángulo de guiñada o las estructuras de flujo tridimensionales asimétricas.

Una forma de continuar este proyecto de investigación sería realizar los mismos pasos, pero generando una malla tridimensional con la que poder simular flujos 3D sobre el vehículo deseado, y así poder analizar estas estructuras de flujo tridimensionales asimétricas, que tienen una gran influencia sobre el consumo de combustible, estabilidad del vehículo o generación de gases de efecto invernadero entre otros. Posteriormente, se podría introducir modelos 3D de vehículos en túneles de viento para poner a prueba las modificaciones realizadas mediante las simulaciones y, en caso de que sean eficaces, diseñar finalmente los alerones para instalarlos en los vehículos reales que se deseen.

7 Bibliografía

- Ahmed SR., Gawthorpe RG. y Mackrodt PA. (1985). "Aerodynamics of road and rail vehicles". *Veh. Syst. Dyn.* 14:319–92. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Blevins, R. D. (1990). *Flow-induced vibrations, Van Nostrand Reinhold International*.
- Choi H.; Lee J.; y Park H. (2014). "Aerodynamics of Heavy vehicles"
- Croll RH.; Gutierrez WT.; Hassan B.; Suazo JE. y Riggins AJ. (1996). "Experimental investigation of the ground transportation systems (GTS) project for heavy vehicle drag reduction". SAE Pap. 960907, SAE Int., Warrendale, PA. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Fernández Fera, R. y Ortega Casanova J. (2014). *Mecánica de Fluidos, Notas de clase: Teoría, problemas y prácticas*, Universidad de Málaga.
- Fernández Osma, M. (2019). "Las fuerzas sobre el monoplaza, drag y lift (o downforce)", visto en <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaza-drag-y-lift-o-downforce/>
- Fernández Osma, M. (2020). "Los coeficientes aerodinámicos ¿Cómo se calculan?", visto en: <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/08/los-coeficientes-aerodinamicos-como-se-calculan/>
- Grupo de mecánica de fluidos de Jaén. "Modificación geométrica de conductos mediante optimización topológica y herramientas adjuntas, y validación experimental".
- Gutierrez WT.; Hassan B.; Croll RH.; Rutledge WH; (1996). "Aerodynamics overview of the ground transportation systems (GTS) project for heavy vehicle drag reduction". SAE Pap. 960906, SAE Int., Warrendale, PA. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Lorite-Diaz, M. (2017). "Wake control of D-shaped bodies through optimized rear cavities".
- Maddox S.; Squires KD.; Wurtzler KE.; Forsythe JR. (2004). "Detached-eddy simulation of the ground transportation system". Visto en: McCallen et al. 2004, pp. 89–104. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- McCallen RC.; Salari K.; Ortega J.; DeChant LJ.; Hassan B, et al. (2004). "Does effort to reduce truck aerodynamic drag: Joint experiments and computations lead to smart design". Presentado en AIAA Fluid Dyn. Conf.

- Exhib., 34th, Portland, OR, AIAA Pap. 2004-2249. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Ortega JM. y Salari K. (2004). "An experimental study of drag reduction devices for a trailer underbody and base". Presented at AIAA Fluid Dyn. Conf. Exhib., 34th, Portland, OR, AIAA Pap. 2004-2252. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Roy CJ.; Payne J, y McWherter-Payne M. (2006). "RANS simulations of a simplified tractor/trailer geometry". J. Fluid Eng. 128:1083–89. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Salari K.; Ortega JM. y Castellucci PJ. (2004). "Computational prediction of aerodynamic forces for a simplified integrated tractor-trailer geometry". Presentado en AIAA FluidDyn.Conf. Exhib., 34th, Portland, OR., AIAA Pap. 2004-2253. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Siewny M.; Bellman M.; Agarwal R.; (2010). "Numerical drag reduction studies of generic truck models in ground effect using active flow control". Presentado en AIAA FluidDyn. Conf. Exhib., 40th, Chicago, AIAA Pap. 2010-4593. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Sita Priyadarshini. J, A.V.S.Abhinav, Sharath Chandra. B y Swathi. R.S (2015). "Use of Aerodynamic Lift in Increasing the Fuel Efficiency of Heavy Vehicles"
- Storms BL.; Ross JC.; Heineck JT.; Walker SM.; Driver DM. y Zilliac GG. (2001). "An experimental study of the ground transportation system (GTS) model in the NASA Ames 7- by 10-ft wind tunnel". NASA Tech. Rep. 2001-209621, NASA Ames Res. Cent., Moffett Field, CA. Visto en: (Choi, Lee y Park, 2013).
- Tzanakis A. (2014). "Duct optimization using CFD software 'ANSYS Fluent Adjoint Solver'".
- Jorge D'Elía (2003). Visto en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-lzq-esqueleto-del-cuerpo-de-Ahmed-Der-vista-de-la-piel-del-cuerpo_fig1_231168180