

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS CFD Y PROPUESTA
DE DISEÑO CASCO MOTOCICLETA**

BRAYAN AGUDELO ROJAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
MEDELLÍN
2013**

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS CFD Y PROPUESTA
DE DISEÑO CASCO DE MOTOCICLETA**

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS CFD Y PROPUESTA
DE DISEÑO CASCO MOTOCICLETA**

BRAYAN AGUDELO ROJAS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director

JORGE I. GARCÍA SEPULVEDA
MSc. Thermal Power (Gas Turbine Technology)

Asesor

JUAN GUILLERMO GARCÍA
Ingeniero Aeronáutico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
MEDELLÍN
2013

Nota de aceptación

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Medellín, Septiembre 14 de 2013

AGRADECIMIENTOS

A mi director MSc. Jorge García por su aporte a lo largo de este trabajo. A mi asesor Ing. Aeronáutico Juan Guillermo García por todo su apoyo académico.

A mi familia por su apoyo y a mi esposa Marcela Tokika.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVO ESPECÍFICO	16
1. GENERALIDADES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS	17
1.1 MECÁNICA DE FLUIDOS	17
1.1.1 Propiedades de un fluido	17
1.1.2 Tipos de flujo	18
2. APLICACIÓN DE ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	21
3. RESISTENCIA AERODINÁMICA EN UN CASCO DE MOTOCICLETA	23
3.1 FUERZA DE RESISTENCIA	23
3.2 ARRASTRE	23
3.2.1 Coeficiente de arrastre	23
3.2.2 Comportamiento de la capa limite	25
3.2.3 Números de Reynolds	27
4. ESTADO DEL ARTE	29
5. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA EL ESTUDIO DE CASCO DE MOTOCICLETA	36
5.1 PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO	37
5.1.1 Características generales del casco objeto de estudio	37
5.1.2 Condiciones de la prueba	37
5.1.3 Parámetros a analizar y resultados	38
5.1.4 Análisis de resultados	40
6. MODELACIÓN EN CFD DE LA PRUEBA DE TÚNEL DE VIENTO (VALIDACIÓN)	42
6.1 GEOMETRÍA	42
6.2 DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA	43
6.3 MALLA	44
6.4 MODELO DE TURBULENCIA	48
6.5 PARÁMETROS Y RESULTADOS	49

7. MODELACIÓN EN CFD DE LA PRUEBA FLUJO LIBRE EN 2D	52
7.1 GEOMETRÍA	52
7.2 MALLADO	52
7.3 CONDICIONES DE FRONTERA	53
7.4 MODELO DE TURBULENCIA	54
7.5 VARIABLES EVALUADAS Y RESULTADOS	54
7.6 CAMBIOS SOBRE LA GEOMETRÍA	56
7.7 CAMBIOS GEOMÉTRICOS INICIALES	58
7.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
7.10 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA	61
7.11 PARÁMETROS A MEDIR Y RESULTADOS	63
8. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DEL CASCO ESTÁNDAR Y LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS 3D	65
8.1 ANÁLISIS 3D	65
8.2 MODELACIÓN EN CFD	65
8.2.1 Geometría	65
8.2.2 Mallado	66
8.2.3 Condiciones de frontera	67
8.2.4 Modelo de turbulencia	68
8.2.5 Parámetros a medir y resultados	68
8.3 CAMBIOS SOBRE LA GEOMETRÍA	70
8.3.1 Análisis de los resultados	72
9. CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 clasificación del flujo de un fluido	20
Figura 2. Coeficientes de resistencia para diversos cuerpos bidimensionales a Determinados Re Fuente	25
Figura 3. Comportamiento de la capa límite en un flujo	26
Figura 4 comportamiento capa limite turbulenta en una circunferencia	27
Figura 5. Casco Gyro Atmos	30
Figura 6. Casco Rudy Project Syton-solapa señalada con el circulo	30
Figura 7. Casco L. gar rocket tail down	30
Figura 8. Fotografía Jorge Lorenzo en su motocicleta de carreras	32
Figura 9. Dibujo CAD vista lateral Jorge Lorenzo en su moto de carreras	33
Figura 10: Representación del flujo en 2D con vectores de velocidad	33
Figura 11 Mapa de presiones 2D para Jorge Lorenzo en su motocicleta de carreras	34
Figura 12 Perfil de casco modificado en 2D	35
Figura 13 Representación de casco con apéndice de Jorge Lorenzo	35
Figura 14. Marco conceptual de la metodología de estudio	36
Figura 15. Casco de motocicleta estándar anclado en la sección de pruebas del túnel de viento	37
Figura 16. Anemómetro usado para medición de velocidad	38
Figura 17. Visualización de flujo por medio de humo y luz roja	38
Figura 18. Localización de puntos destinados a la medición de velocidad alrededor del casco	39
Figura 19. Flujo de aire alrededor del casco-énfasis en zona posterior	40
Figura 20. Vista isométrica del casco modelado en Solid Edge V 14	42
Figura 21. Dominio emulando sección de pruebas del túnel de viento	43
Figura 22. Condiciones de frontera del dominio	44
Figura 23. Malla del dominio para la esfera usada como referencia	45
Figura 24. Mallado, sin refinamiento alrededor del casco	47
Figura 25. Mallado, con refinamiento alrededor del casco	48
Figura 26. Tipos de aproximaciones para modelo de K épsilon ANSYS 12.1	49
Figura 27. Circunferencia de análisis en Rhino 4.0	52
Figura 28. Malla para una circunferencia en un volumen de control 2D ANSYS 12.1	53
Figura 29. Condiciones de frontera para análisis e circunferencia 2D	54

Figura 30. Coeficientes de arrastre para esfera y cilindro en función de número de Reynolds	55
Figura 31. Magnitudes de velocidad a lo largo de un casco de motocicleta a 10 m/s	57
Figura 32. Magnitudes de presión a lo largo de un casco de motocicleta a 10m/s.	57
Figura 33. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 20 mm	58
Figura 34. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 40 mm	58
Figura 35. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 60 mm	59
Figura 36. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 80 mm	59
Figura 37. Contorno 1B –oc80 2D	61
Figura 38. Contorno 3B –oc80 2D	62
Figura 39. Contorno 1D-oc-80	62
Figura 40. Contorno 2D-oc 80	63
Figura 41. Contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1	64
Figura 42. Contorno de presión estática para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1	64
Figura 43. Volumen de control con esfera de validación ANSYS 12.1	66
Figura 44. Malla para una esfera en un volumen de control 3D ANSYS 12.1	66
Figura 45. Tamaño de elementos sobre la superficie 0.003266 m ANSYS	67
Figura 46. Condiciones de frontera para análisis e esfera 3D	68
Figura 47. Coeficiente de arrastre a diferentes números de Reynolds para una esfera a nivel del mar	69
Figura 48. Comportamiento de la solución para análisis esfera 3D A 5 m/s ANSYS 12.1	70
Figura 49. Contornos de velocidades alrededor casco de motocicleta a 10 m/s	71
Figura 50. Contornos de presiones alrededor casco de motocicleta a 10 m/s	71
Figura 51. Casco final 3D en Rhino 4.0	72
Figura 52. Contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1	73
Figura 53. Contorno de presión estática para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1	74
Figura 54. Zoom contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s en la parte superior ANSYS 12.1	75
Figura 55. Zoom contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s parte baja delantera ANSYS 12.1	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fuerza en libras en función del ángulo de incidencia del viento para cada tipo de casco	31
Tabla 2. Velocidad (m/s) en cada punto de referencia en función de la velocidad de entrada (SEC 1).0	39
Tabla 3. Análisis de independencia de malla para una esfera a nivel del mar a condiciones estándar. Realizadas en ANSYS 12.1	45
Tabla 4. Resultados de drag para el casco de motocicleta en el túnel de viento	50
Tabla 5. Coordenadas de toma de velocidades túnel de viento	50
Tabla 6. Velocidades de casco de motocicleta en el túnel de viento sin índice turbulencia	50
Tabla 7. Velocidades de casco de motocicleta en el túnel de viento con índice turbulencia	51
Tabla 8. Datos de condiciones atmosféricas estándar, geométricas y velocidad	55
Tabla 9. Análisis de C_d teórico vs C_d experimental para diferentes números de Re	56
Tabla 10. Análisis de fuerza de arrastre para diferentes tipos de geometrías a 10m/s.	60
Tabla 11. Fuerza de arrastre para diferentes alturas de cola en un casco de motocicleta a 10 m/s	60
Tabla 12. Número de elementos y nodos para cada una de las geometrías en ANSYS 12.1	61
Tabla 13. Fuerza de arrastre en N para geometrías seleccionadas a 10 m/s	63
Tabla 14. Validación CD teórico vs CD experimental ANSYS 12.1	69
Tabla 15. Fuerza de arrastre para cascos motocicleta Vs casco modificado ANSYS 12.1	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DIMENSIONES DEL CASCO ESTÁNDAR	81
ANEXO B. CALCULO DE DENSIDAD Y VISCOSIDAD EQUIVALENTES A LA ALTURA DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN	82
ANEXO C. ÍNDICES DE TURBULENCIA	84
ANEXO D. DIMENSIONES DE CONTORNOS DE CASCOS 2D	87
ANEXO E. DIMENSIONES DEL CASCO MODIFICADO	91
ANEXO F. ARTÍCULO PUBLICABLE	92

GLOSARIO

ARRASTRE: Es la fuerza que actúa sobre un cuerpo, paralelamente y en sentido contrario a su desplazamiento por medio de un fluido. Si dicho fluido es aire entonces se le conoce como resistencia aerodinámica o simplemente resistencia.

CAD: Siglas en ingles de *Computer Aided Design* (Diseño asistido por computador).

CFD: Siglas en ingles de *Computational Fluid Dynamics* (Dinámica Computacional de Fluidos).

COEFICIENTE DE ARRASTRE: Parámetro adimensional que cuantifica la cantidad de resistencia al avance que puede producir un cuerpo que se mueve en un fluido.

CONDICIÓN DE FRONTERA: Restricción externa (carga o desplazamiento) que le es impuesta a un sistema.

FLUIDO: sustancia que adopta la forma del recipiente que lo contiene, debido a la débil cohesión que existe entre sus moléculas.

MALLA: red de elementos dispuestos en áreas triangulares o cuadrilaterales cuyo objetivo es modelar cuerpos. Las áreas en la malla son luego nombradas elementos, una vez el proceso de conversión termina. El numero relativo de áreas presentes en una región se conoce como "Densidad de la malla".

NODO: Punto que define las esquinas, lados o final de un elemento finito.

NÚMERO DE REYNOLDS: Parámetro adimensional que permite establecer la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido.

PERFÍL AERODINÁMICO: Cuerpo o estructura que puede producir mayor sustentación que arrastre.

PRESIÓN DINÁMICA: Presión ejercida por una unidad de volumen de un fluido, que se mueve a una velocidad determinada.

SOLID EDGE: Programa de modelación CAD para crear prototipos en dos o tres dimensiones

RESISTENCIA AERODINÁMICA: Véase "ARRASTRE"

RHINO: Programa de modelación CAD para crear prototipos en dos o tres dimensiones.

RESUMEN

En este trabajo se pretende analizar un casco de motocicleta que es utilizado como protección al momento de pilotear un vehículo de dos ruedas. Se inició este estudio con una validación experimental en el túnel de viento, a unas velocidades de 5, 10, 15, 20, 32 m/s; y visualización de flujo con la ayuda de humo y luz roja determinado el punto de desprendimiento de flujo además del comportamiento de las velocidades a lo largo del casco. Posteriormente se realizó un análisis en CFD usando un modelo CAD del casco a las mismas condiciones del túnel de viento, determinado cuantitativamente el comportamiento de las velocidades a la largo del mismo. Por otra parte se procede en realizar cambios geométricos en 2D que consisten en la disminución de cambios bruscos de sección y redondeos en la parte frontal del casco. Además la adición de colas de 200, 180, 150 y 100 mm de alturas respectivamente las cuales ayudan a disminuir la zona de baja presión presente en la parte trasera del casco, esto se realiza con el fin de hallar el contorno con mejores características aerodinámicas para un posterior modelado en 3D de un caso de motocicleta con menor arrastre. Estas pruebas de CFD se realizaron a diferentes números de Reynolds y a condiciones atmosféricas estándar.

INTRODUCCIÓN

Los cascos de protección han existido desde la época de los egipcios en el año 3150 a.C¹, pasando por los romanos siglo VIII y IX a.C² y utilizado como elemento de guerra en todos los tiempos; además se han incorporado de acuerdo a la necesidad para cada época.

Cuando se inventó la motocicleta en el siglo XIX, los cascos de protección solo aparecen de forma incipiente y no muy técnica hasta comienzos del siglo XX gracias al neurocirujano doctor Hugh Cairns³ donde ve la necesidad de esta prenda en el accidente de T.E Lawrence quien murió por no haber usado este elemento en su cabeza.

Hoy en día los cascos se han incorporado de acuerdo a la necesidad de protección a los seres humanos por los riesgos que causan las diferentes actividades como son: minería, construcción, deportes extremos, los medios de transporte, entre otros.

Los cambios continuos en la normatividad de los diferentes países han obligado a investigar nuevas formas de protección generando la evolución de diferentes modelos que van desde insipientes corazas de hierro forjado hasta elementos elaborados en materiales compuestos de fibras de vidrio o carbono con normas internacionales: la DOT, ANSI en América Latina y en Europa CEPE.

Dichas exigencias de diseño han requerido mayor exactitud y mejor desempeño a la hora de plantear y manufacturar un casco. En la actualidad herramientas de diseño asistido por computador o CAD como sus siglas en inglés (computer-aided design) y manufactura asistida por computador o CAM (Computer-aided manufacturing) facilitan el diseño y creación de nuevos modelos con gran

¹ WIKIPEDIA.COM s.p.i Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Antiguo_Egipto> [consulta agosto 2013].

² WIKIPEDIA.COM s.p.i Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Roma> [consulta agosto 2013]

³ MOTORPASIONMOTO.COM s.p.i Disponible en internet: <<http://www.motorpasionmoto.com/seguridad/breve-historia-del-casco>> [consulta agosto 2013].

precisión y exactitud. Con programas enfocados solo a diseño físico de los productos. Y que en Colombia todavía los desconocen.

Este trabajo pretende encontrar a través de una metodología de estudio CFD analizar diferentes cascos de motocicleta y determinar la eficiencia aerodinámica; con la ayuda de validaciones de geometrías conocidas como esferas y cilindros a condiciones atmosféricas estándar. Además encontrará estudios de independencias de malla que garanticen resultados viables acertados en la praxis; partiendo de modelos de turbulencia adecuados como el K-epsilon que permite el análisis dinámico de objetos a través del aire tanto en 2D como en 3D. Con flujo totalmente desarrollado.

Conjuntamente se realizó un estudio aerodinámico en CFD de un casco real de motocicleta modelado en CAD, y algunas modificaciones en dos dimensiones, dichas alteraciones permitirían mejorar los resultados; garantizando una disminución considerable en el arrastre que influyen negativamente por acción del viento alrededor del casco y que afecta así el desempeño del piloto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología que permita analizar la resistencia aerodinámica sobre un casco de motocicleta por medio de la confrontación de resultados cualitativos y cuantitativos entre pruebas de túnel de viento y simulación computacional de fluidos.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Evaluar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento del flujo de aire alrededor de un casco comercial de motocicleta por medio de pruebas en un túnel de viento.
- Modelar el casco de motocicleta evaluado en el túnel de viento por medio de métodos CAD.
- Validar una metodología de simulación virtual de fluidos a partir de la prueba realizada en el túnel de viento y modelos CAD.
- Evaluar a partir de simulaciones CFD los factores que afectan la resistencia aerodinámica del casco modelado en CAD.
- Crear un nuevo diseño aerodinámico a partir de los resultados obtenidos con esta metodología en pro de reducir la resistencia aerodinámica

1. GENERALIDADES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

1.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

En este trabajo es necesario definir algunos términos de mecánica de fluidos el cual son necesarios para tener más claridad en el desarrollo de proyecto; la mecánica de fluidos hace referencia al estudio del comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo (Estática de Fluidos) o en movimiento (Dinámica de Fluidos). Además existen dos tipos de fluidos que se pueden considerar (líquidos y gases)⁴ en este caso en particular se estudia los gases en movimiento y totalmente desarrollados, que es nuestro punto de interés en el estudio del casco de motocicleta.

En esta metodología se estudiarán la dinámica de fluidos en gases incompresibles, además debemos tener en cuenta las siguientes características importantes del fluido que nos ayudaran a determinar sus características tanto en el estudio del túnel de viento como en las simulaciones en CFD que se tratarán a partir del capítulo 5.

1.1.1 Propiedades de un fluido

Sus propiedades físicas más importantes, desde el punto de vista aerodinámico y puntos de partida de CFD son:

- *Viscosidad dinámica*: es la resistencia interna al flujo de un fluido, originado por el roce de las moléculas que se deslizan unas sobre otras.⁵ se nombra con el símbolo μ .
- *Densidad*: es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa, se puede apreciar en la Ecuación 1. En el caso de la densidad del aire, está determinado por la temperatura atmosférica y la altitud a la cual se encuentra al momento del estudio y sus unidades son $\frac{Kg}{m^3}$.

⁴ DURA DOMENECH, Antonio y otros. Capítulo I. Estática de Fluidos. En: Fundamentos físicos de las construcciones arquitectónicas. Alicante: Universidad Alicante, 2004. p. 11.

⁵ ESPAÑOL.ANSWERS.YAHOO.ES. s.p.i Disponible en internet:

<<http://espanol.answers.yahoo.com/question/index?qid=20090618184620AArRCK3> [consulta agosto 2013].

Ecuación 1

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde

m: corresponde a la masa.

V: es el volumen.⁶

- *Velocidad de flujo*: es la velocidad con la que se mueven las partículas del flujo, es decir, la distancia que recorren en un determinado tiempo⁷. Para el caso de un túnel de viento es la velocidad del aire en la sección de prueba y para las pruebas en CFD es la velocidad de entrada (velocity inlet) en el volumen de control determinado en m/s.
- *Temperatura atmosférica*: se refiere al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinados⁸. Estas condiciones están tabuladas en condiciones atmosféricas estándar y están establecidas por una corrección de altitud y temperatura que se explica en el anexo B.

1.1.2 Tipos de flujo

Para tener más claridad en el desarrollo de esta propuesta metodología debemos recordar los siguientes conceptos: El tipo y clasificación de flujo se puede establecer según el tipo de fenómeno o propiedad física que varíe en el tiempo. Se pueden catalogar con respecto al cambio de densidad y al comportamiento de la reacción a la presión de esfuerzos normales; en dos clases principalmente compresibles e incompresibles. El primero hace referencia a la alta compresibilidad que tiene los gases en comparación con los líquidos que son solo ligeramente compresibles a la acción de una fuerza. Este fenómeno de compresibilidad en un gas se observa por ejemplo cuando este está sometido a altas velocidades; y donde el flujo alcanza la barrera del sonido, dando como

⁶ WIKIPEWDIA.COM s.p.i Disponible en internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad> > [consulta agosto 2013].

⁷ ESPANOL.ANSWERS.YAHOO.COM s.p.i Disponible en internet: <<http://espanol.answers.yahoo.com/question/index?qid=20080921161607AA1Y3y> > [consulta agosto 2013].

⁸ WIKIPEDIA.COM [En línea]s.p.i Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_atmosf%C3%A9rica > [consulta agosto 2013].

resultado ondas de choque, además de cambios bruscos de temperatura, presión y densidad.⁹

El concepto de incompresibilidad de un gas, solo es posible si el cambio de presiones es despreciables a través del sistema de flujo. Para este caso de estudio en particular se tomara como incompresible ya que las velocidades de prueba son subsónicas o bajos número de mach (inferior a 0.7)¹⁰.

Por otra parte en términos de la dinámica de fluidos, existen dos tipos de flujos. Esto son el turbulento y el laminar. El primero se caracteriza por ser un flujo de baja difusión de momento, alta convección y cambios temporales rápidos de presión y velocidad. En cambio los laminares, se describen por tener un orden en las líneas del flujo, además de poca difusión de las partículas. Por otra parte puede caracterizarse como laminar o turbulento observando el orden de magnitud del número de Reynolds¹¹ y el comportamiento de la capa límite. Explicados en la sección 3.3.3 y 3.2.2 respectivamente.

En este estudio tanto en el de túnel de viento como en las simulaciones de CFD se determina que el flujo es turbulento con grandes gradientes tanto de presión como velocidad después de la zona de desprendimiento del flujo.

También podemos caracterizar un flujo por las condiciones de este en un punto determinado si es estacionario o no estacionario; el primero hace referencia a un flujo estable donde las condiciones en un punto determinado del fluido no varían con el tiempo. En cambio para el no estacionario, el parámetro velocidad en un punto no es constante. El flujo tanto en la sección de pruebas como con en las simulaciones CFD; el comportamiento del flujo es no estacionario debido a la alta turbulencia presentes en la zona de baja presión y baja velocidad.

Otras características importantes de la clasificación de un fluido se encuentran en la Figura 1 donde los efectos viscosos son explicados. Para las simulaciones de CFD es necesario tener en cuenta los fenómenos viscosos a lo largo de la

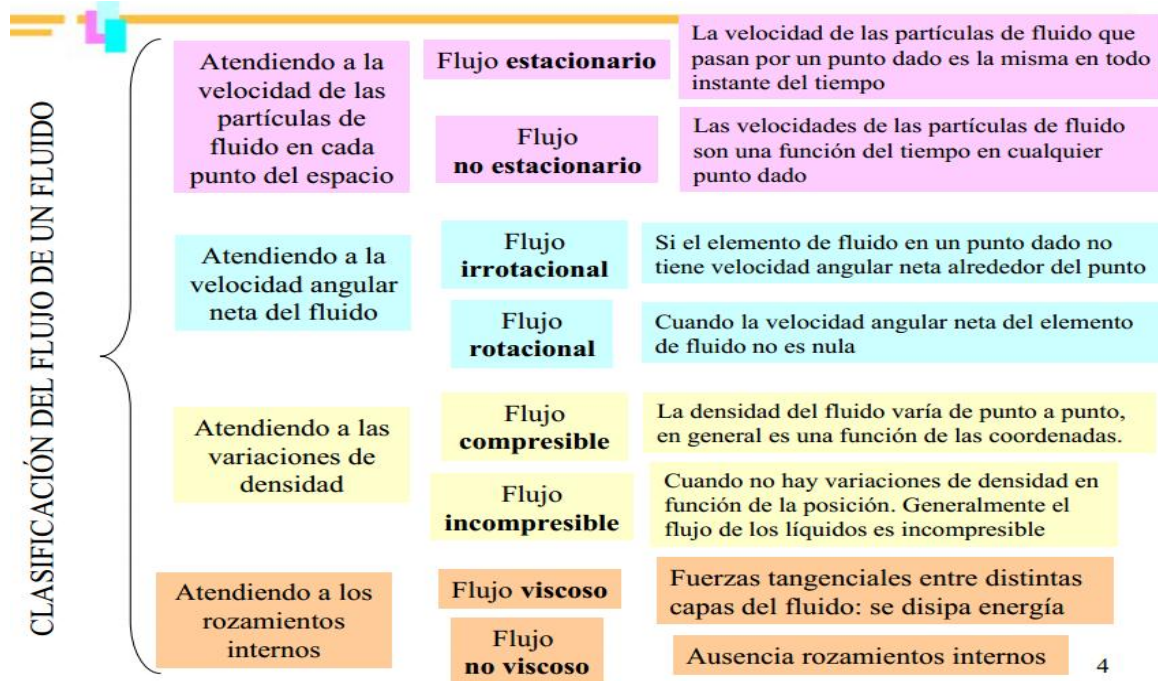
⁹ ES.SCRIBP.COM [En línea]s.p.i Disponible en internet: < <http://es.scribd.com/doc/24865666/AERODINAMICA-CONCEPTUALtxt> > [consulta agosto 2013].

¹⁰ WIKIPEDIA.COM[En línea] s.p.i Disponible en internet: < http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_Mach> [consulta agosto 2013].

¹¹ WIKIPEDIA.COM [En línea]s.p.i Disponible en internet: < <http://es.wikipedia.org/wiki/Turbulencia> > [consulta agosto 2013].

geometría. En el capítulo 2 se estudiará como integrar este fenómeno de viscosidad a los modelos de comportamiento de flujo y como CFD los integra para generar soluciones que simulan el aire a lo largo del casco de motocicleta.

Figura 1 clasificación del flujo de un fluido



Fuente: UCLM.ES [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/Teoria/0506%20FFT%20FluidosD.pdf>> [consulta: agosto. 2013].

Para este caso en particular (casco de motocicleta) se presentan los fenómenos viscosos, cambios de velocidad y presión; además la incompresibilidad, flujo turbulento no estacionario.

2. APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

Para el análisis aerodinámico de un casco debemos hacer retrospectiva del origen de las ecuaciones de Navier Stokes las cuales surgen a partir del siglo XVII con el trabajo de Isaac Newton y Leonhard Euler en (1755) donde implemento las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de un fluido ideal. Finalmente en 1822 C. Navier e, independientemente, G. Stokes (1845) ¹²introdujeron en el modelo el término de viscosidad y que todavía hoy en día tienen valides y se aplican en el comportamiento de la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.¹³

Las ecuaciones de Navier-Stokes pretenden modelar la evolución de estas cantidades a partir de la segunda ley de Newton, que asocia la aceleración de las partículas con las fuerzas que actúan sobre ellas, asociándolo a estas con ecuaciones de momento y continuidad dando origen a las ecuaciones de Navier Stokes donde relaciona variaciones espaciales de la presión, las fuerzas de rozamiento entre las moléculas, viscosidad, y las posibles Fuerzas externas como la gravitatoria. Dichos fenómenos son aplicables a el estudio del casco de motocicleta ya que en el los efectos de arrastre contempla dichos elementos y bases teóricas. Para explicar el origen de estas ecuaciones tenemos que:

Con la ley de conservación de masa y utilizando la segunda ley de Newton se tiene que:

$$D_t(\rho u) = \text{Fuerza},$$

Por otro lado la conservación de masa junto con la incompresibilidad implica:

$$D_t(\rho) = 0.$$

Las dos leyes dan lugar a las ecuaciones de Navier-Stokes:

¹² CORDOBA GAZOLAZ, Diego. Las ecuaciones de Navier Stoke. Barcelona: s.n., 2011. p. 11

¹³ WIKIPEDIA.COM [En línea] s.p.i Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Navier-Stokes > [consulta agosto 2013].

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \cdot \nabla u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \Delta u_i + f_\varepsilon^i, \\ \nabla \cdot u = 0, \\ \rho_t + u \cdot \nabla \rho = 0. \end{array} \right.$$

Donde

Ecuación 2

$u = (u_1, u_2, u_3)$, $u_i = u_i(x_1, x_2, x_3, t)$ velocidad del fluido;

$p = p(x_1, x_2, x_3, t)$ presión;

$\rho = \rho(x_1, x_2, x_3, t)$ densidad;

$\nu = cte \geq 0$ viscosidad;

$f_\varepsilon = (f_\varepsilon^1, f_\varepsilon^2, f_\varepsilon^3)$ fuerza externa.

Las ecuaciones de Navier Stokes son la base fundamental del CFD, ya que integra las ecuaciones de momento, continuidad y modelos de turbulencia, en un interface que facilita el estudio de soluciones complejas de fluidos en 2D y 3D. Este análisis se realiza para cada elemento del volumen de control dando como resultado el comportamiento del flujo a lo largo de casco de motocicleta, además facilita el refinamiento y precisión de los resultados, gracias a la habilidad de aumentar el número de elementos a analizar dando como resultados soluciones más acertadas a la realidad.

3. RESISTENCIA AERODINÁMICA EN UN CASCO DE MOTOCICLETA

3.1 FUERZA DE RESISTENCIA

La fuerza de resistencia es la fuerza que retarda el movimiento hacia adelante de un objeto. Hay cuatro tipos de resistencia principalmente que son: fuerza de fricción, resistencia de presión, resistencia inducida, y la resistencia causada por las ondas de choque. Estas cuatro se suman para obtener la fuerza de resistencia total en un objeto.¹⁴ La clasificación y tipo de resistencia, depende directamente de su forma y condición a la cual este el objeto. En el casco de motocicleta, solo existen dos fuerzas principalmente; resistencia de presión y resistencia de fricción. La primera es causada por La diferencia entre la zona de alta presión (zona frontal de estancamiento), y la zona de baja presión (parte posterior de separación del flujo); causando una contribución a la resistencia al avance¹⁵. La segunda depende exclusivamente de la interacción de los esfuerzos cortantes sobre la superficie del casco; debido a la viscosidad del aire. Para el estudio en CFD la fuerza de resistencia depende directamente de la calidad de malla que hay en la superficie ya que de esto depende la interacción del fluido con la superficie del casco. La disminución de este factor en el casco de motocicleta permite aumentar la velocidad, aumentando el rendimiento de combustible y disminuir la fatiga en el conductor.

3.2 ARRASTRE

3.2.1 Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre es una medida adimensional que describe la cantidad de arrastre aerodinámico causado por un objeto en un fluido, este valor cambia según la forma, causando cambios de distribución de presiones distintos para cada objeto; teniendo como base la Ecuación de arrastre (3). Dos objetos de la misma área frontal pueden tener diferentes valores de arrastre debido al coeficiente de arrastre C_D y distribución de presiones que cada uno posee. Como se observa en la Figura 2. La definición del coeficiente de arrastre C_D está determinada por la siguiente ecuación:

¹⁴ AKVIDS.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://wings.avkids.com/Libro/Flight/advanced/forces-01.html>> [consulta: Feb. 2012].

¹⁵ UVA.ES [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf> [consulta agosto 2013].

Ecuación 3

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho S V^2}$$

Dónde:

F_D : Fuerza de arrastre.

ρ : Densidad del medio

S: Superficie.

V: Velocidad.

C_D : Coeficiente de arrastre (a dimensional).

El C_D cambia dependiendo de la forma, número de Reynolds y la rugosidad de las superficies¹⁶.

La disminución de este coeficiente en un casco de motocicleta, se logra con la adición de superficies aerodinámicas que ayuden a disminuir el cambio brusco de presión y puntos de estancamiento en el frente del casco, originado a sí más confort y mejor rendimiento para el piloto. Este cambio geométrico se logra con la ayuda de herramientas CAD y simulaciones CFD las cuales permiten realizar cambios y obtener resultados sin la necesidad de crear objetos reales, con este método se logra optimizar tiempo y costos a la hora de diseñar un casco.

¹⁶ RAMÍREZ MARTIN, José Juvenal y TOVAR PADILLA, Marco Vinicio. Resistencia Aerodinámica. Bogotá: s.n., 1999.

Figura 2. Coeficientes de resistencia para diversos cuerpos bidimensionales a Determinados Re

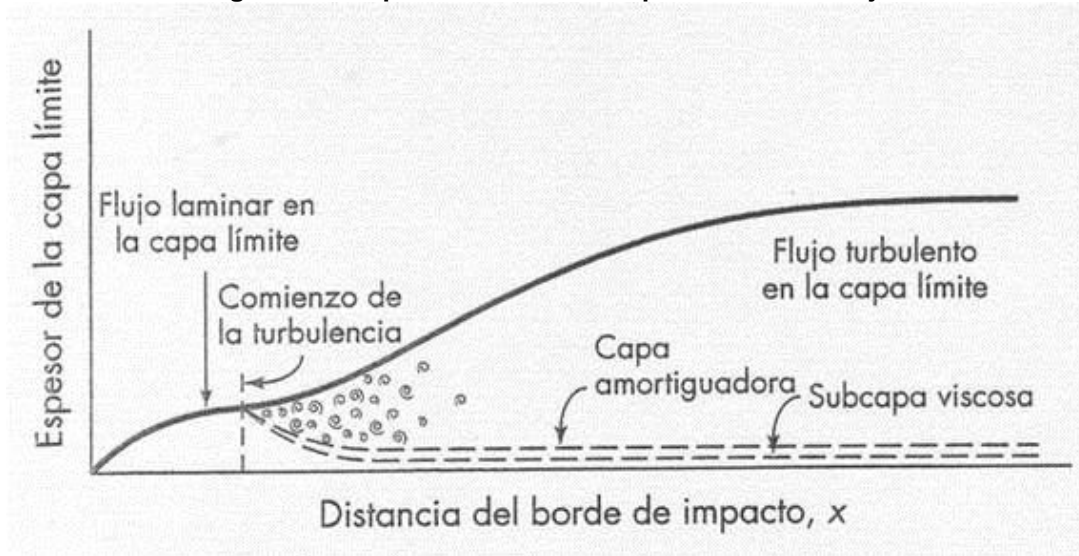
Forma		Número de Reynolds	C_D
Placa plana paralela		$> 10^5$	Véase Fig. 8.8(b)
Placa plana normal		$> 10^3$	2.0
Cilindro circular		Todos	Véase Fig. 8.10
Barra cuadrada		$> 10^4$	2.0
Barra cuadrada		$> 10^4$	1.50
Barra de triángulo equilátero		$> 10^4$	Extremo afilado hacia delante: 1.40 Cara plana hacia delante: 2.0
Sección C		$> 10^4$	2.30
Sección C		$> 10^4$	1.20
Perfil aerodinámico		Varios	(Véase la referencia [5])

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. México: Pearson, 2006.

3.2.2 Comportamiento de la capa limite

La capa limite se genera en las zonas más cercanas a la superficie, donde la velocidad en cercanías al objeto varía desde cero (condición de no deslizamiento) hasta un 99% de la velocidad del flujo exterior, generando una zona que se denomina borde de capa límite. Dicho fenómeno se observa en Figura 3

Figura 3. Comportamiento de la capa límite en un flujo



Fuente: OCWUS.US.ES. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema3/pagina_11.htm> [consulta: agosto. 2013].

El comportamiento de la capa límite está caracterizado por las fuerzas viscosas y rozamiento de las partículas de un fluido alrededor de objeto que se encuentre en movimiento; principalmente se dividen en dos tipos: capa límite laminar y la capa límite turbulento. La primera se describe por ser ordenada en la corriente de flujo. La segunda es ligeramente más gruesa que la primera, con movimientos aleatorios del flujo dentro del límite de esta capa, disipado más energía, por lo que la fuerza de fricción es mayor.¹⁷

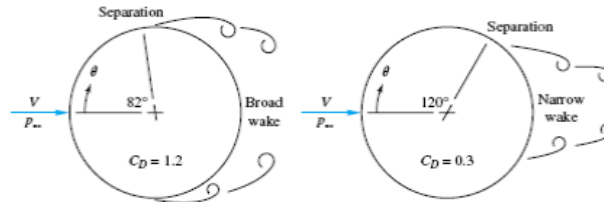
Sin embargo, una capa límite turbulenta tiene una ventaja importante frente a una capa límite laminar, la cual radica en la capacidad de estar más tiempo adherida a la superficie del objeto. Reduciendo la resistencia de presión, el arrastre total y el coeficiente de arrastre C_D .¹⁸ Este fenómeno se puede observar en la Figura 4

¹⁷ MONOGRAFIAS.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre2.shtml>> [consulta: agosto. 2013].

¹⁸ YOUTUBE.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.youtube.com/watch?v=X70r5WhqIt4>> [consulta: agosto. 2013].

donde la variación de desprendimiento de la capa limite afecta el C_D por el desprendimiento de flujo más retardado.

Figura 4 comportamiento capa limite turbulenta en una circunferencia



Fuente: UVA.ES. [En línea] s.p.i. Disponible en internet
<https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf> [consulta: agosto. 2013].

En este trabajo se pretende determinar la zona de desprendimiento del flujo para un casco de motocicleta con la ayuda del túnel de viento subsónico ubicado en la Universidad Pontificia Bolivariana y el cual posee las herramientas para observar este fenómeno de forma experimental el cual se describe en el capítulo 5 donde con la ayuda de luz roja y humo dentro del flujo de aire se determina el punto donde ocurre este fenómeno.

3.2.3 Números de Reynolds

Es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales como: densidad, velocidad con las fuerzas viscosas de un fluido en interacción con un objeto. Por otra parte las características que condicionan el flujo laminar dependen de las propiedades del aire y de las condiciones del flujo. Conforme aumenta el flujo másico aumenta las fuerzas del momento o inercia, las cuales son contrarrestadas por la fricción o fuerzas viscosas dentro del aire que fluye. Cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un cierto equilibrio se producen cambios en las características del flujo. Las fuerzas del momento son función de la densidad, de la longitud característica y de la velocidad media. Además, la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del aire. Según dicho análisis, el

Número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.¹⁹ Como se observa en la Ecuación 4

Ecuación 4

$$Re = \frac{\rho * V * l_c}{\mu}$$

Donde

ρ : Densidad

V : Velocidad

L_c : Longitud característica

μ : viscosidad dinámica

Por otra parte el número de Reynolds nos ayuda a catalogar el comportamiento de la capa límite ya sea laminar o turbulenta por ser directamente proporcional, ya que a bajo número de Reynolds se obtiene flujos laminares donde las fuerzas viscosas predominan y a altos números de Reynolds las fuerzas inerciales son las que imperan. Generalmente se considera flujo laminar a valores de Reynolds por debajo de 2000 y flujo turbulento por encima de 3000. Por ejemplo, un valor típico del Número de Reynolds para una aeronave pequeña es de 100.000 y significa que las fuerzas viscosas son 100.000 veces menores que las fuerzas convectivas, por lo que pueden ser ignoradas.²⁰

En el estudio del casco de motocicleta el valor de número de Reynolds se encuentra entre 70000 y 590000 como se explica en la tabla 4 del capítulo 6.5 lo que nos ubica en un flujo completamente turbulento. Estos valores se deben considerar ya que es el punto de partida para utilizar modelos de turbulencia en CFD como es el caso K-epsilon el cual es utilizado como modelo solución en estos casos en particular. Además de que este método de solución contempla dos ecuaciones de solución como se explica en el capítulo 7.4

¹⁹ TARWI.LAMOLINA.EDU.CO [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~dsa/Reynold.htm> > [consulta: agosto. 2013].

²⁰ ATOMOSYBITS [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.atomosybits.com/2009/05/18/estelas-turbulentas-y-el-numero-de-reynolds/> [consulta: agosto. 2013].

4. ESTADO DEL ARTE

La aparición del casco de motocicleta no se dio sino hasta 1935 cuando el doctor neurocirujano Hugh Cairns. Que quedó impactado al tener que asistir a la muerte de **T.E. Lawrence** que había padecido un accidente y probablemente se habría salvado de haber llevado esa prenda. En 1953 un investigador de la Universidad del Sur de California, Charles F. Lombard, de la Fuerza Aérea Norteamericana patentó el diseño que actualmente conocemos de los cascos. Una cáscara exterior ligera pero muy resistente y una parte interior acolchada, más blanda, que disipe el golpe antes de llegar al cráneo. No fue sino hasta 1972 en Francia y Reino Unido que los casco fueron obligatorio para cualquier piloto de motocicleta.

Hoy en día existen diferentes diseños como son los cascos integrales, modulares y abiertos. Que proporcionan un sinnúmero de alternativas a la hora de seleccionar un casco. En el caso de este estudio se basa principalmente en un casco integral el cual provee una protección total en la cabeza y en la cara.²¹

Gracias a los constantes avances de las nuevas tecnologías como métodos de diseño asistido por computador o CAD y simulaciones de fluidos CFD, además de los nuevos material; más resistentes, ligeros y con una gran capacidad de absorción. Facilitan la creación de productos más seguros y de gran calidad.

Los cascos en la actualidad son utilizados en un sinnúmero de actividades que van desde deportes extremos hasta carreras de alta velocidad. Como son las carreras de Fórmula 1, ciclismo y motociclismo. Además existen estudios que ayudan a los pilotos y atletas a seleccionar un casco adecuado para cada necesidad. Este es el caso del estudio realizado por el señor John Cobb, donde la creación de sus productos se basa en investigaciones científicas dentro de las cuales se encuentran las pruebas de túnel de viento.

En el túnel de viento de la Universidad de Texas realizó un análisis comparativo a seis distintas marcas de casco, estas fueron: Giro Atmos (con y sin ventilaciones tapadas), Louis Garneau Rocket (con la cola dirigida hacia arriba y hacia abajo) y el Rudy Project Syton Open y el Rudy Project Syton Super Comp. Algunos de estos cascos se muestran a continuación entre las Figuras 5 y 7.

²¹ TARINGA.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet:

<<http://www.taringa.net/posts/info/1574421/Cascos-motos-y-un-poco-de-historia-info-interesante.html> >
[consulta: agosto, 2013].

Figura 5. Casco Gyro Atmos



Fuente: TRI-1st. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://www.tri-1st.co.uk/product_GIROATMOS.htm> [consulta: Jul. 2012].

Figura 6. Casco Rudy Project Syton-solapa señalada con el círculo



Fuente: TRIATHLON.DE Aerohelme. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.triathlon.de/aerohelme-schnittige-hauben-1230.html/4>> [consulta: Jul. 2012].

Figura 7. Casco L. gar rocket tail down



Fuente: INSIDE SPORTS. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.insideoutsports.com/index.aspx?urlname=reviews&item=19>> [consulta: Jul. 2012].

Este estudio realizado por John Cobb estuvo basada en mediciones de la resistencia expresada en libras en función del ángulo de incidencia del viento (de cero grados-frente, hasta 20 grados) a una velocidad de 48 Km/h. En la Tabla 1, se puede apreciar el registro para cada uno de los cascos estudiados.

Tabla 1. Fuerza en libras en función del ángulo de incidencia del viento para cada tipo de casco

<i>Yaw (degrees)</i>	<i>0</i>	<i>2.5</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>
<i>untaped Atmos @ race angle</i>	7.64	7.75	7.41	7.47	7.56	8.33
<i>taped vents Atmos @ same angle</i>	7.47	7.12	7.31	7.10	7.73	8.16
<i>L. Gar. rocket, tail up</i>	6.97	7.24	7.21	7.26	7.00	7.16
<i>L. Gar. Rocket tail dn</i>	7.24	6.95	7.03	7.03	7.28	7.73
<i>Rudy Syton w /flaps</i>	7.31	7.50	7.29	7.07	7.31	7.74
<i>Rudy Syton No flaps</i>	7.24	7.34	7.33	7.18	7.28	7.81

Fuente: AM TRIATHLON. Cascos aerodinámicos. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.amtriathlon.com/2006/11/cascos-aerodinmicos-john-cobb-es-uno.html>> [consulta: Feb. 2012].

El estudio concluye en el mejor casco es el Louis Garneau Rocket (Figura 7) independientemente de la posición de la cola, los resultados de arrastre son muy parejos, esta conclusión se basa no solo en las mediciones de la resistencia sino también en los tiempo de carrera promediados a partir procedimientos matemáticos que emulan las condiciones de carrera.²²

Otro estudio importante fue el realizado al piloto de carreras Jorge Lorenzo cuando corría su última temporada en su motocicleta de 250 centímetros cúbicos. Utilizando el casco Spyder de NZI Helmets que se puede apreciar en la Figura 8.

²² AMTRIATHLON.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.amtriathlon.com/2006/11/cascos-aerodinmicos-john-cobb-es-uno.html>> [consulta: Feb. 2012].

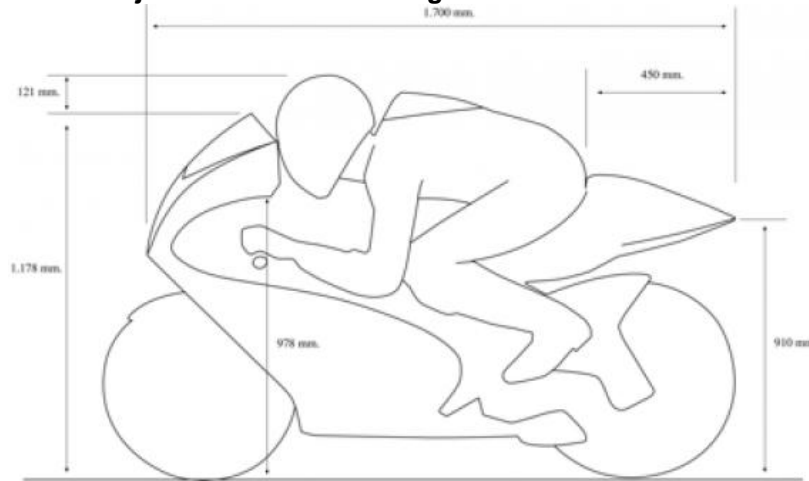
Figura 8. Fotografía Jorge Lorenzo en su motocicleta de carreras



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta:agosto. 2013].

Este casco creaba ciertas vibraciones muy molestas mientras conducía su la motocicleta. Esta necesidad obligo a que el equipo de diseño realizara un estudio en CFD en dos dimensiones para hallar la raíz del problema. Para esto se utilizó unas fotos laterales de Jorge encima de la moto como se aprecia en la Figura 8 y fue posteriormente digitalizada en CAD como se observa en la Figura 9

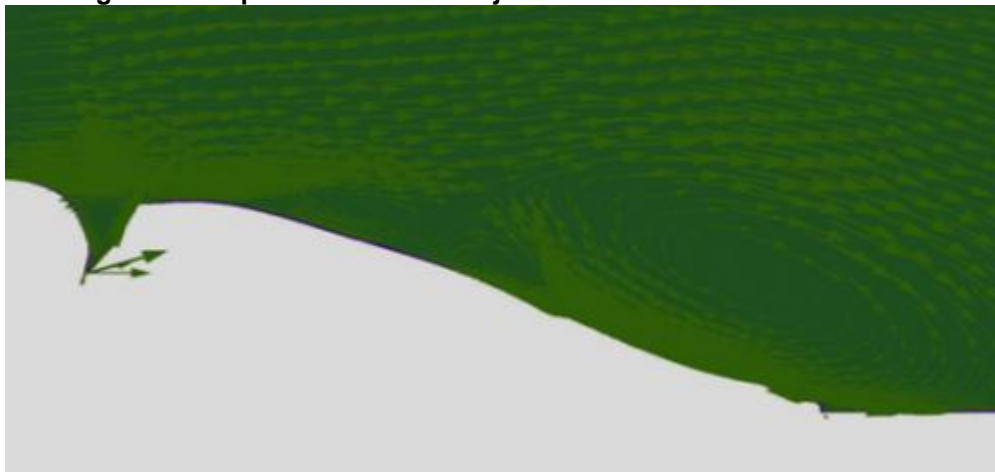
Figura 9. Dibujo CAD vista lateral Jorge Lorenzo en su moto de carreras



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta:agosto. 2013].

Este estudio de CFD arrojó como resultado que en la espalda del piloto, existían recirculaciones y turbulencias. Debido a un desprendimiento de flujo anticipado en la parte superior del casco. Dando como resultado las vibraciones de las que Jorge se quejaba. Este resultado se puede observar en Figura 10

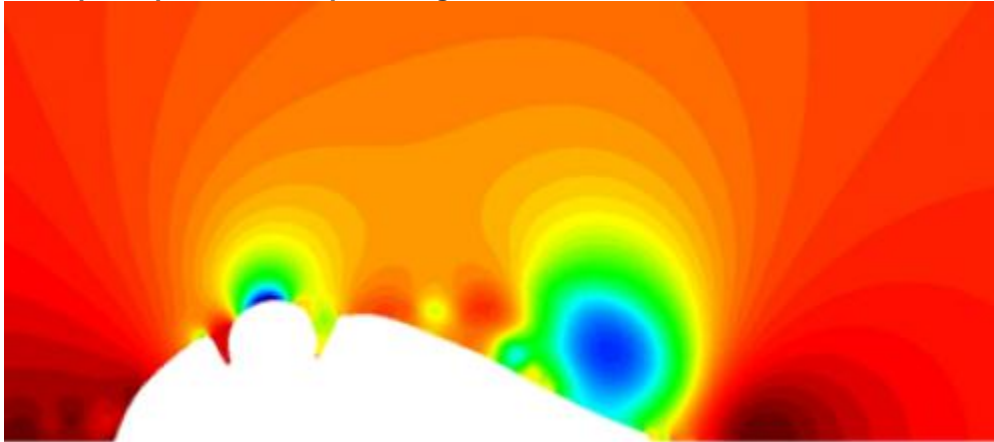
Figura 10: Representación del flujo en 2D con vectores de velocidad



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta:agosto. 2013].

Dicha recirculación está causada por un excesivo gradiente de presión originada en la zona de la espalda. Estos resultados se obtuvieron a partir de un mapa de presiones Figura 11 y de vectores de velocidad Figura 10

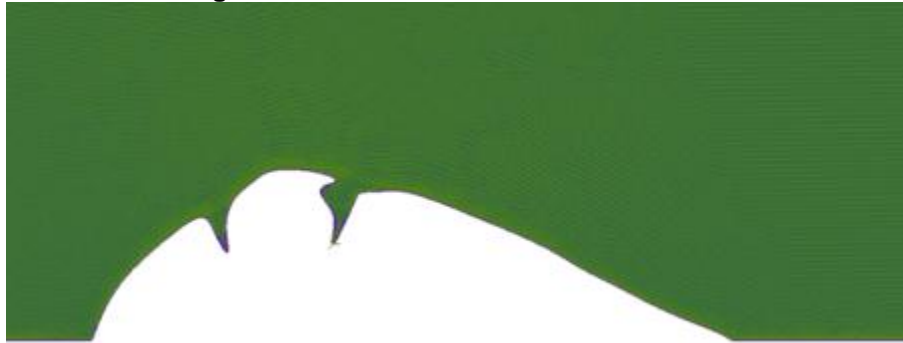
Figura 11 Mapa de presiones 2D para Jorge Lorenzo en su motocicleta de carreras



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta:agosto. 2013].

Como solución a estos problemas. El equipo de diseño modifico la parte trasera del casco: para ello, colocaron una especie de apéndice Figura 12, cuya incorporación supuso de inmediato una reducción, de las vibraciones sobre el piloto.

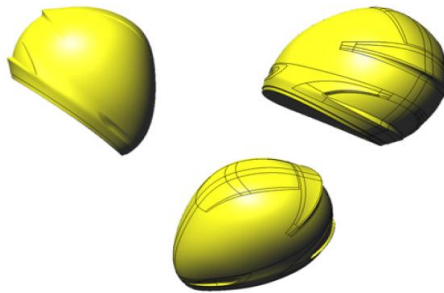
Figura 12 Perfil de casco modificado en 2D



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta: agosto. 2013].

Por otro lado, la eliminación de estas turbulencias supuso también la reducción de la resistencia aerodinámica, por lo que se supo que, además, la moto lograba una velocidad punta 5 kilómetros/hora mayor.²³

Figura 13 Representación de casco con apéndice de Jorge Lorenzo



Fuente: CAR AND DRIVER THE F1. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta: agosto. 2013].

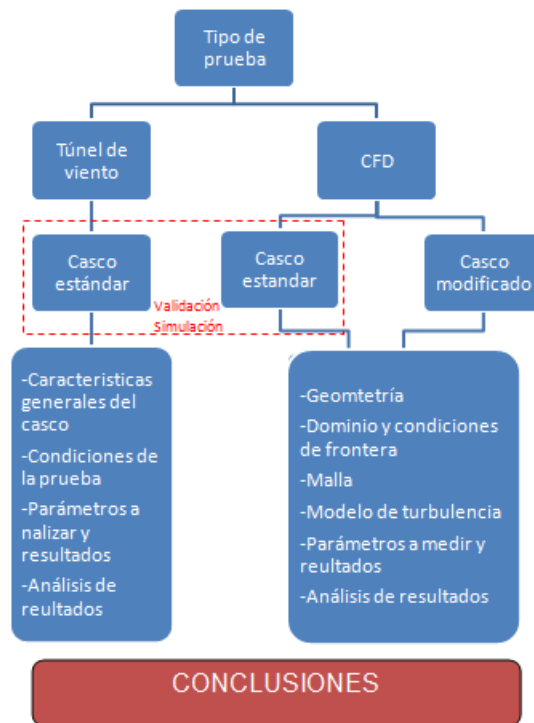
El resultado final de dicho estudio se puede observar en la Figura 13 donde el apéndice es integrado al casco de competición de Jorge Lorenzo.

²³ CAR AND DRIVES THE F1 [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico> > [consulta: agosto. 2013].

5. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA PARA EL ESTUDIO DE CASCO DE MOTOCICLETA

Para realizar el análisis del casco estándar se ejecutaron dos líneas de estudio, una física por medio del túnel de viento subsónico M01-15-150M y otra virtual por medio de CFD usando como plataforma Ansys-Fluent workbench 12.1, tal como se puede apreciar en la Figura 14 donde se muestran los dos tipos de estudios realizados a el casco de motocicleta.

Figura 14. Marco conceptual de la metodología de estudio



La primera línea corresponde a las pruebas de túnel de viento, donde se evalúa un casco de motocicleta que nombraremos estándar y que se especifica en el anexo A. Este objeto es analizado en la zona de prueba del túnel de viento a una velocidad, densidad y temperatura determinada por las condiciones atmosféricas del día del ensayo. Estas condiciones son simuladas en la segunda línea de estudios, que corresponde a CFD con el fin de poder comparar sus resultados y concluir acerca de ellos tanto en el estudio 2D como 3D.

5.1 PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO

5.1.1 Características generales del casco objeto de estudio

Para elaborar las pruebas en el túnel de viento se usó un casco de motocicleta comercial el cual fue montado sobre un maniquí que le proporcione estabilidad y agarre a la hora de hacer el ensayo dentro del túnel. Este a su vez estaba provisto de dos puntos de anclaje a las barras sobresalientes en el plano inferior de la sección de pruebas del túnel de viento subsónico M01-15-150M de la Universidad Pontificia Bolivariana, como se puede observar en la Figura 15 y anexo A correspondiente a las características físicas del casco

Figura 15. Casco de motocicleta estándar anclado en la sección de pruebas del túnel de viento



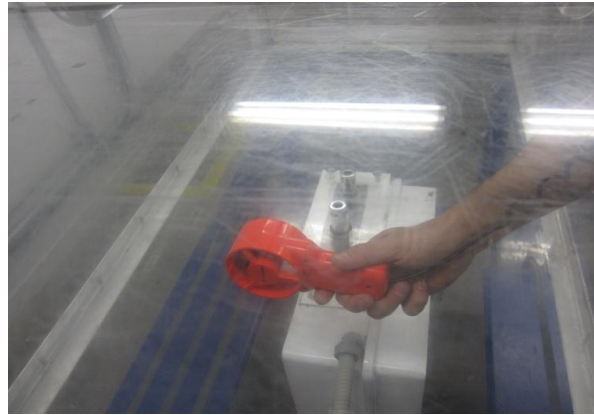
5.1.2 Condiciones de la prueba

Las condiciones de las pruebas fueron determinadas por las condiciones atmosféricas y la ubicación a la cual se encontraba el túnel de viento ya que esto nos daría las características de densidad y viscosidad a la cual se realizó el ensayo. En este caso la temperatura promedio fue de 25°C y una altura de 1505 m a nivel del mar.

Las velocidades de prueba fueron cinco: 5, 10, 15, 20 y 32 m/s. para garantizar estas velocidades se usó un anemómetro que se puede apreciar en la Figura 16. En esta imagen aparece la mano expuesta, sin embargo al momento de la prueba se utilizó una pinza con la cual se sostenía el anemómetro desde la abertura de la

parte superior de la sesión de pruebas, procurando no tener zonas abiertas por donde pudiese haber cambios de presión que afectaran la prueba.

Figura 16. Anemómetro usado para medición de velocidad



Para el análisis cualitativo se hizo uso de humo y luz roja con el objetivo de lograr un mayor grado de visualización de las líneas de flujo inherentes a la interacción del aire con el casco, tal como se puede apreciar en la Figura 17.

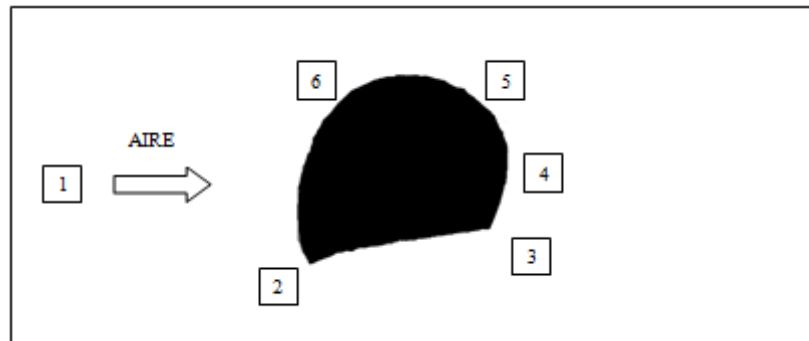
Figura 17. Visualización de flujo por medio de humo y luz roja



5.1.3 Parámetros a analizar y resultados

Teniendo en cuenta que el objetivo de la prueba en el túnel de viento, es analizar el comportamiento del aire a lo largo del casco, se optó hacer mediciones de velocidad en seis puntos o áreas, (teniendo en cuenta el tamaño del anemómetro) alrededor del casco tal como se puede apreciar en el esquema de la Figura 18, donde el punto 1 se encuentra al inicio de la sección de pruebas, indicando este la velocidad de entrada o velocidad del flujo libre, cuya velocidad todavía no ha sido afectada por la interacción con el casco.

Figura 18. Localización de puntos destinados a la medición de velocidad alrededor del casco



Cada área de medición está aproximadamente a 5 cm de distancia respecto a la superficie del casco como se describe en la Figura 18. Los puntos son aproximados debido a la complicación del manejo de las herramientas disponibles en el laboratorio, en este caso un anemómetro con un área de medición muy grande con relación al objeto de pruebas. De esta manera se registraron las velocidades en cada punto de referencia en función de la velocidad de entrada, ver Tabla 2 – donde SEC se ha utilizado para abreviar la palabra <sección> y los valores registrados son las velocidades en metros sobre segundo m/s para cada punto de análisis.

Tabla 2. Velocidad (m/s) en cada punto de referencia en función de la velocidad de entrada (SEC 1).0

SEC 1 m/s	SEC 2 m/s	SEC 3 m/s	SEC 4 m/s	SEC 5 m/s	SEC 6 m/s
5.02	6.00	7.03	3.59	6.65	6.22
10.02	11.5	8	6.00	13.40	11.8
15.22	21	14.22	11.07	21.07	19.55
20.12	28.06	16.04	13.09	26.68	24.5
32.2	44	25	31.6	42.1	42.6

Los datos registrados para las secciones 3, 4 y 5 de la tabla 4, se tomaron como promedios de las variaciones de velocidad en dichas zonas, es importante recordar que el fluido en estas áreas no es estable debido a que el fluido se vuelve turbulento y varía su velocidad en el tiempo.

Las otras características a evaluar son la de tipo cualitativo, las cuales están directamente relacionadas con el comportamiento del flujo alrededor del casco y se pueden observar en la Figura 17 y 19 donde los flujos están en estado laminar en las zona 1, 6 y turbulenta en las zonas 3, 4 y 5 donde se aprecia el desprendimiento de la capa limite.

Figura 19. Flujo de aire alrededor del casco-énfasis en zona posterior



5.1.4 Análisis de resultados

- En las zonas comprendidas como 3, 4 y 5 de la Figura 18 se presentan cambios de velocidad aleatorios, propios del comportamiento de flujos turbulentos. Además debido al desprendimiento de la capa límite en la parte superior e inferior del casco como se observa en la Figura 19. Estas zonas se considera de alta turbulencia y baja presión la cual ocasiona arrastre por fuerza de presión debido a que la geometría a estas velocidades no compensa las presiones ejercidas en el frente casco, con presiones de la parte trasera ocasionado arrastre.
- En la parte superior hay desprendimiento, dependiendo de la velocidad, justo en la parte central del casco o más atrás. De esta forma, si la velocidad es mayor el desprendimiento del flujo es más adelante. Sin embargo, a pesar de la velocidad máxima alcanzada de 32.2 m/s no deja de desprenderse con relativa rapidez.
- Se puede apreciar en la tabla 4 una aceleración del flujo en la sección 2 (esto es, la parte inferior frontal del casco) a medida que se aumenta la velocidad. Dicha aceleración aumenta hasta en un 26.8% para la velocidad máxima de 32.2 m/s. Esto implica que en esta zona posiblemente se estén generando sobre esfuerzos para el conductor.
- Se debe considerar los efectos de interferencia respecto a las paredes de la sección de pruebas, en términos que se puede estar generando una zona que actúe como un ducto y como consecuencia se presenten aceleraciones del flujo no reales. La herramienta de CFD permite realizar cambios con mayor facilidad, como por ejemplo simular el casco en ambiente sin esta interferencia.

- Otra consideración es el tamaño del anemómetro, ya que posiblemente interfiera por su área en la medición de las pruebas.

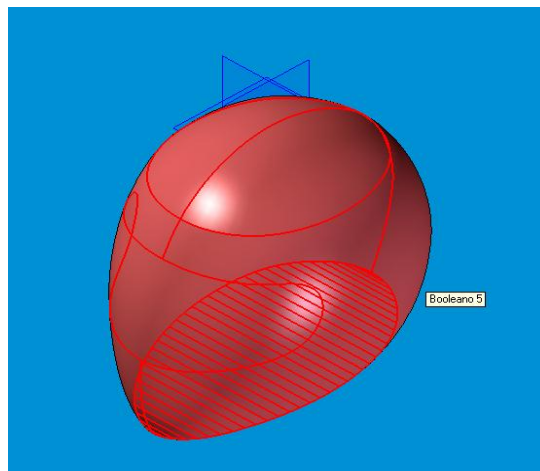
6. MODELACIÓN EN CFD DE LA PRUEBA DE TÚNEL DE VIENTO (VALIDACIÓN)

Teniendo en cuenta la forma secuencial de ANSYS 12.1 para desarrollar los problemas relacionados a la dinámica de fluidos computacionales, se precisa en este mismo orden de ideas la forma como se desarrolló toda la modelación, esto es: geometría, dominio y condiciones de frontera, malla, modelos de turbulencia usados y finalmente los resultados obtenidos.

6.1 GEOMETRÍA

La creación de la geometría del casco de motocicleta parte de la utilización de modelos CAD, como son Solid Edge V14 y Rhino 4.0. Para la concepción de dicho casco se recurrió a una nube de puntos medidos a partir de la superficie real, con los cuales se crearon unas superficies virtuales y uniéndose para crear una geometría cerrada. Dicha geometrías se pueden observar en la Figura 20 como vista isométrica.

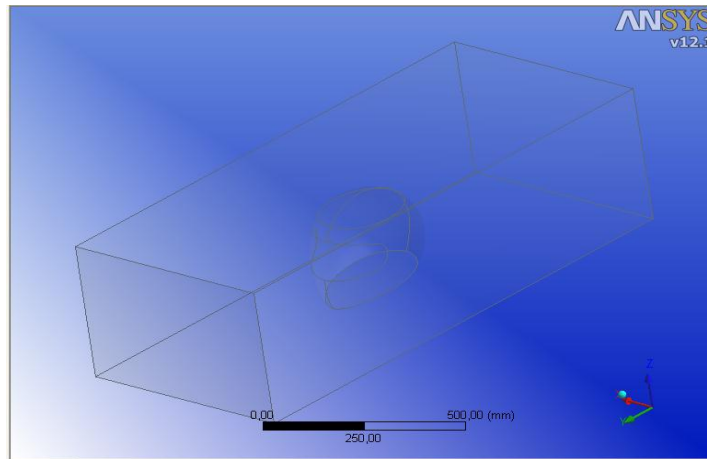
Figura 20. Vista isométrica del casco modelado en Solid Edge V 14



6.2 DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA

Para el dominio y condición de frontera se utilizó un área que corresponde a las características exactas del túnel de viento de la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Medellín. El dominio corresponde a la sección de pruebas del túnel del viento, la cual posee unas dimensiones de 0.6m x 0.4 m x 1.4 m en la Figura 21 se puede apreciar una vista isométrica del dominio con el casco en su interior.

Figura 21. Dominio emulando sección de pruebas del túnel de viento

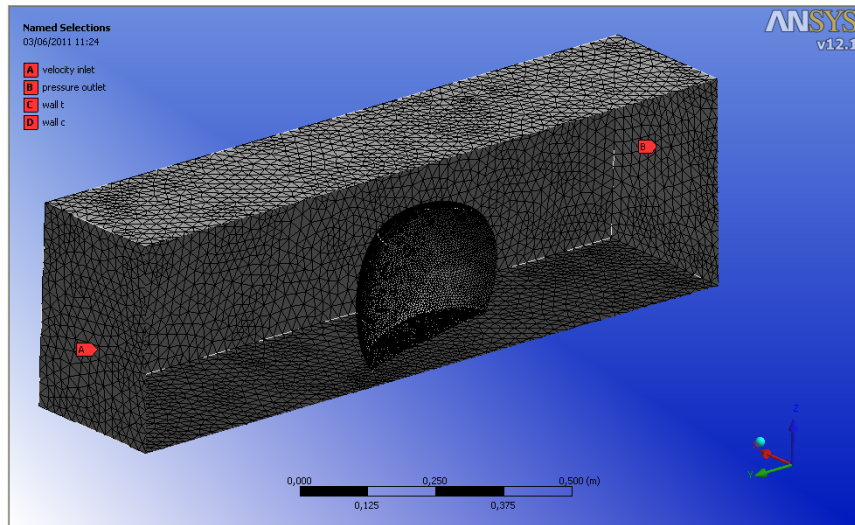


Para las condiciones de frontera se aplicó tres principalmente: velocity inlet, pressure outlet, y wall. A continuación se describe la función que cumple cada una y en qué parte del dominio se aplicaron.

- El *velocity-inlet* es una condición que permite mantener una magnitud y dirección de viento constante a lo largo de la superficie aplicada, es decir que por defecto se mantiene un perfil de velocidades uniforme. En él se puede apreciar la condición de frontera *velocity-inlet* en el lado izquierdo del dominio y denotada con la letra A.
- *Pressure-outlet*: es una condición que permite medir los diferentes tipos de presión a lo largo del dominio deseado (estática, total, etc.). En la Figura 22 se puede apreciar la condición de frontera *pressure-outlet* en el lado derecho del dominio y denotada con la letra B.
- *Wall* es una condición de frontera que permite mantener una condición conocida como *no-slip condition* o condición de no-deslizamiento en cercanías de la superficie. Dicha condición logra hacer que la velocidad en cercanías de la pared sea cero, evitando que se generen componentes de velocidad normales. En el dominio se encuentran dos

clases de wall una de ellas corresponde a las paredes del túnel de viento y la otra pertenece a el casco de motocicleta; denotándose con las letras C y D respectivamente.

Figura 22. Condiciones de frontera del dominio



6.3 MALLA

Para garantizar que los resultados fueran confiables se realizó un estudio de independencia de malla, debido a que no se encontró en la literatura un estudio sobre cascos con el cual se pudiera comparar este modelo.

De manera general, la independencia de malla consiste en realizar una comparación continua entre un resultado obtenido para un número determinado de elementos de malla y el obtenido para el mismo modelo con mayor número de elementos, esto con el objetivo de lograr obtener una diferencia igual o menor al 5% entre el resultado actual y el anterior.

La geométrica a la cual se le realizó este estudio fue una esfera (Figura 23). La cual es una geométrica conocida donde se puede obtener un valor de arrastre teórico a determinadas condiciones de frontera. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 3 correspondiente al estudio de independencia de malla y resultados obtenidos con el incremento de número de elementos para una esfera a nivel del mar. Llegando a la conclusión que la malla M4 es la solución seleccionada debido al error presentado 1,82 % y bajo tiempo de cómputo 454 interacciones. Las soluciones anteriores a esta, además de generar errores

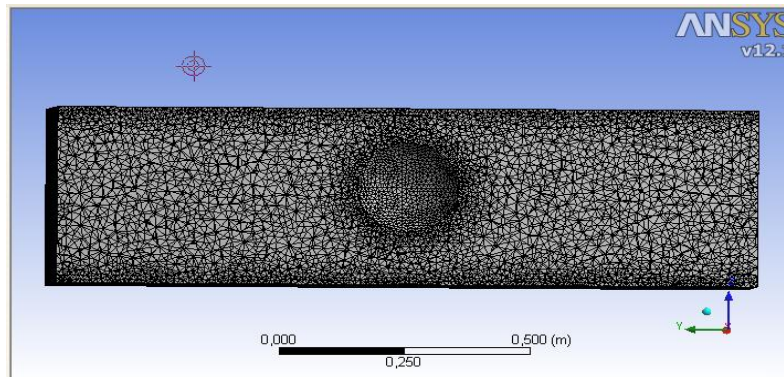
superiores al 5%; no presentan una calidad de la malla y tamaño de los elementos dentro del volumen de control definido afectando directamente la exactitud de los resultados. Por este motivo los efectos de un flujo turbulento en un volumen de control poco específico genera errores tanto en los gradientes de presión como velocidad; afectando directamente el arrastre.

Tabla 3. Análisis de independencia de malla para una esfera a nivel del mar a condiciones estándar. Realizadas en ANSYS 12.1

Análisis independencia malla esfera nivel del mar a 10m/s				
Malla	fuerza N	numero elementos	% Error	INTERACIONES
TEORICO	1,60			
M1	1,91	68952	19,47	125
M2	1,91	165099	19,52	153
M3	1,93	672310	20,62	180
M4	1,63	4407232	1,82	454
M5	1,62	8694870	1,49	1235

Después de haber validado la geometría de la esfera, reemplazamos esta por el casco de motocicleta garantizando las mismas condiciones de malla como son tamaño de elementos sobre la superficie, relación de expansión de malla y número aproximado de elementos en el volumen de control.

Figura 23. Malla del dominio para la esfera usada como referencia



Se definió una malla tetraédrica, se realizaron refinamientos alrededor de la esfera, casco y las paredes del dominio. El refinamiento alrededor del casco se hace con el fin de medir velocidades locales con más exactitud alrededor del mismo, de acuerdo a las zonas que se definieron en la prueba del túnel de viento. Mientras que el refinamiento en cercanías a las paredes del túnel se debe a que la distancia entre la superficie del casco o esfera y las paredes de la sección de

pruebas es lo suficientemente pequeña tal que dicha cercanía puede afectar las soluciones en los nodos de esa zona por los efectos de pared.

Para asegurarse de que la solución de arrastre en las diferentes geometrías contempladas en este trabajo; sean lo más aproximado a la realidad. Es necesario determinar la calidad de malla en cercanías de la pared de las diferentes geometrías. Para esto es necesario calcular el valor de y_p el cual corresponde a la distancia del primer elemento de la malla hasta la superficie. Este valor es importante determinarlo para garantizar que las soluciones relacionadas con los efectos cinéticos de turbulencia y los efectos viscosos del aire no sean despreciados en la zona anteriormente mencionada. Para calcular dicho valor se utiliza la Ecuación 5 correspondiente al valor de Y^* (Y asterisco). Otra forma de determinar la calidad de malla es con el valor de Y^+ (Y más) pero su análisis de forma analítica es más compleja y no está estipulada en este trabajo ya que el valor de Y^+ y Y^* son muy similares entre sí, para capas límites turbulentas en equilibrio. Para este caso en particular las aproximaciones estándar y non equilibrium Wall function necesitan este valor de y_p para la aproximación empírica que realiza este tipo de aproximación en las subcapas como se explica en el capítulo 6.4.

Ecuación 5

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}$$

Donde

k_p =Energía cinética de turbulencia en el punto p.

y_p = Distancia desde el punto p a la pared.

μ = Viscosidad dinámica del fluido.

C_μ =Constante (0.09).²⁴

Las celdas adyacentes a la pared deben tener valores de Y^* entre 30 y 300 para este caso asumiremos el valor máximo de 300. Viscosidad dinámica del fluido tanto a condiciones atmosféricas del mar como valores atmosféricos a nivel UPB

²⁴ AEROJET [En línea] s.p.i. Disponible en internet:

<<http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node512.htm> > [consulta: septiembre. 2013].

como se explica en el anexo B. Determinado estos valores y las constantes para la Ecuación 5 obtenemos resultados de y_p de la siguiente manera

Se debe garantizar además que la relación de expansión de malla debe ser pequeña no mayor a 1.2 en cercanías de la pared.

Para condición a nivel del mar, tenemos:

$$300 = \frac{1.225 \frac{kg}{m^3} * (0.09)^4 * \left(6 \frac{m^2}{s^2}\right)^{\frac{1}{2}} * Y_p}{1.789 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$y_p = 0.003266m$$

Para condición UPB

$$y_p = 0.004035m$$

Una vez se encontró que la solución para el modelo de la esfera era confiable respecto a la independencia de malla (teniendo en cuenta el modelo de turbulencia usado y descrito en el ítem siguiente), se generó la malla para el casco de la misma forma, esto es, refinando en los sitios estratégicos y buscando la convergencia a un resultado. En la Figura 24 se muestra la malla antes de hacer el proceso de refinamiento mientras que en la Figura 25 se muestra el refinamiento efectuado a la malla en cercanías de la superficie del casco, aunque para el estudio se refino también las paredes de la sección de pruebas correspondientes al túnel de viento.

Figura 24. Mallado, sin refinamiento alrededor del casco

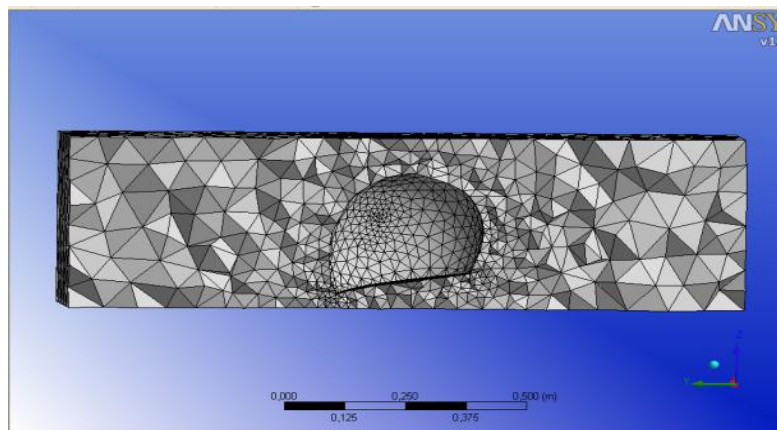
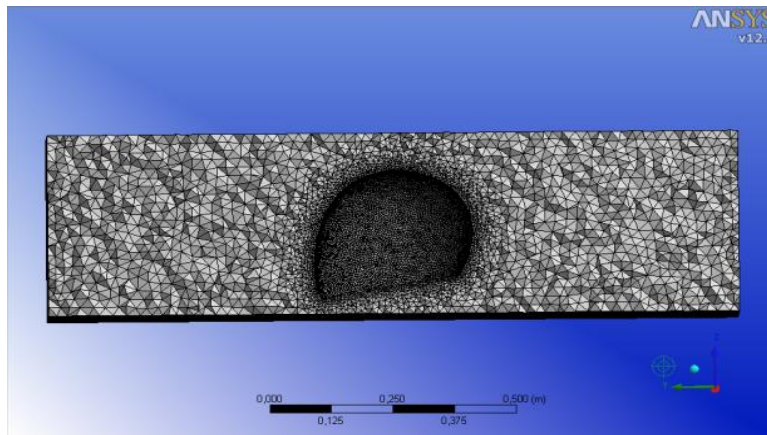


Figura 25. Mallado, con refinamiento alrededor del casco



6.4 MODELO DE TURBULENCIA

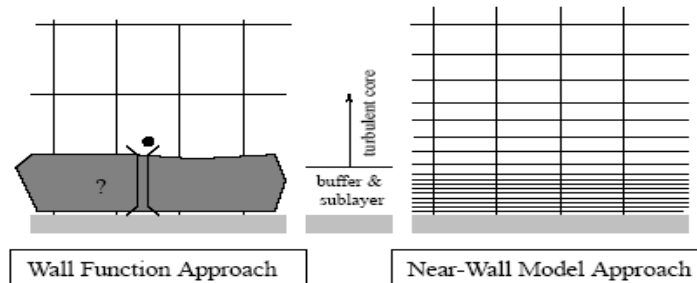
Debido a la restricción de no tener un túnel de viento con una sección de pruebas más grande, el casco estaba muy cerca a las superficies de dicha sección, lo que podría tener como consecuencia, cambios de presión muy bruscos y hasta esos momentos desconocidos. Por tal razón se decidió usar el modelo de turbulencia K-épsilon ya que este permite trabajar en casos donde los gradientes de presión son muy grandes, de esta forma el modelo no estaría limitado si ese fuese el caso que sucediera (K-epsilon models).

Además del tipo de modelo solución se debe tener en cuenta el tipo de aproximación en cercanías de la pared, para el caso de modelo de turbulencia K-épsilon existen tres tipos de aproximaciones, que son: *Standard Wall Functions*, *Non-equilibrium Wall Functions* y la *Enhanced Wall Treatment*. Para este trabajo se hizo uso de la *Non-equilibrium Wall Functions* ya que la *Standard Wall Functions* es la aproximación que viene por defecto con ANSYS y soluciona, de forma confiable, nodos que están relativamente lejos de la pared, pero a medida que se acerca a la misma estas soluciones pierden confiabilidad. Mientras que la *Non-equilibrium Wall Functions* es una aproximación mejorada de la versión estándar que incluye mejores ventajas cuando se tienen flujos con cambios muy rápidos de gradientes de presión en las cercanías a la pared ayudando al cálculo de arrastre. Este tipo de aproximación se puede observar en la Figura 26 parte izquierda donde se observa el tipo de aproximación sobre las subcapas.

Para este estudio no se utilizó el *Enhanced Wall Treatment* ya que a pesar de que entrega la mejor aproximación de las tres para la solución de los valores de arrastre, esta última requiere una densidad de malla muy elevada en la cercanía

de la pared y aproximaciones en las subcapas como indica la Figura 26 lado derecho, lo que implica que para aplicarla se debe tener una capacidad de cómputo muy alta, la cual, se sale de la disposición de recursos de cómputo para este estudio.

Figura 26. Tipos de aproximaciones para modelo de K épsilon ANSYS 12.1



Fuente: ANSYS. 4.12 Near-Wall Treatments for Wall-Bounded Turbulent Flows. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node97.htm#sec-near-wall>> [consulta: Jul. 2012].

6.5 PARÁMETROS Y RESULTADOS

El análisis del casco y la esfera en el túnel de viento no llegan a ser unas soluciones estables debido a la restricción que tiene la sección de prueba y los efectos de pared que allí se generan. Además el flujo no alcanza a desarrollarse completamente en la sección de pruebas ocasionado inestabilidad en los resultados.

El estudio para este caso solo se limita a validar sus resultados con la independencia de malla visto en la tabla 3, donde 4407232 elementos proporciona errores del 1.82% con respecto valor teórico de 1,59949 N. Se demuestra que a partir de la malla 4 los valores de convergencia del modelo son aceptables. Además de ser seleccionada ya que el tiempo de cómputo es menor que la malla 5 alrededor de 3 veces menos con resultados muy similares.

Para emular las condiciones del túnel de viento se recurrió a elaborar una serie de cálculos el primero es correspondiente a la corrección de densidad por altitud y temperatura expuesto en el anexo B y un cálculo de índices de turbulencia ya que el flujo en la sección de prueba no es 100% laminar dicho cálculo se expone en el anexo C.

Los resultados del arrastre para el casco de motocicleta con relación a las condiciones del túnel de viento con y sin índice de turbulencia se pueden observar en la tabla 4. Donde se observa que mayor índice de turbulencia mayor es la disminución en el arrastre.

Tabla 4. Resultados de drag para el casco de motocicleta en el túnel de viento

Velocidades m/s	Reynolds túnel	Reynolds casco	% turbulencia	F Drag	F Drag turb
5	266027	70519	0,033	0,65	0,43
10	532053	141038	0,031	2,14	1,66
15	798080	211558	0,029	4,41	3,68
20	1064106	282077	0,028	7,44	6,47
32	1702570	451323	0,026	17,77	16,33
42	2234623	592361	0,025	29,62	27,46

La mediciones de los resultados obtenido a partir de ANSYS son tabulados según unas coordenadas x, y, z como se muestran en la tabla 5 donde el flujo está en la dirección y.

Tabla 5. Coordenadas de toma de velocidades túnel de viento en metros

	X (m)	Y (m)	Z (m)
zona 1	0	0,5	-0,15
zona 2	0	0,18	-0,33
zona 3	0	-0,25	-0,3
zona 4	0	-0,3	-0,2
zona 5	0	-0,1	0
zona 6	0	-0,1	0

Los resultados obtenidos son tabulados para cada sección alrededor del caso donde sec 1 corresponde al flujo libre que no está afectado por el casco, las otras secciones tiene la misma connotación de la Figura 18. Además se observa en las tablas 6 y 7 el comportamiento de la velocidad para un casco de motocicleta con y sin índice de turbulencia.

Tabla 6. Velocidades de casco de motocicleta en el túnel de viento sin índice turbulencia

Velocidades puntos a lo largo zona de prueba estándar casco						
Vel Ensayo m/s	sec 1 m/s	sec 2 m/s	sec 3 m/s	sec 4 m/s	sec 5 m/s	sec 6 m/s
5	4,99467	5,41965	4,55147	2,33762	5,77969	5,85237
10	9,97398	10,8219	9,38225	5,22504	11,7515	11,7674
15	14,9527	16,2334	14,2804	9,15891	17,7761	17,6895
20	19,931	21,6533	19,2047	11,1152	23,8263	23,6116
32	31,8777	34,6734	31,0594	18,2878	38,4093	37,8249

Tabla 7. Velocidades de casco de motocicleta en el túnel de viento con índice turbulencia

Velocidades puntos a lo largo zona de prueba índice turbulencia casco						
Vel Ensayo m/s	sec1 m/s	sec 2 m/s	sec 3 m/s	sec 4 m/s	sec 5 m/s	sec 6 m/s
5	4,98684	5,39916	4,90809	2,82806	6,05527	5,94733
10	9,96806	10,8087	9,7942	5,76304	12,1136	11,8798
15	14,9482	16,2203	14,6761	8,72127	18,1748	17,8094
20	19,9277	21,6332	19,5565	11,6922	24,2381	23,7376
32	31,977	34,6267	31,2647	18,8572	38,7957	37,9618

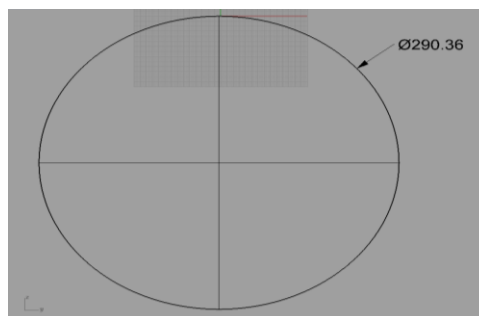
7. MODELACIÓN EN CFD DE LA PRUEBA FLUJO LIBRE EN 2D

Siguiendo con el orden de la metodología propuesta en el capítulo anterior, las condiciones del túnel de viento solo se aplican como caso particular y no para un caso general donde es necesario hacer un estudio más profundo de como disminuir el arrastre en un casco de motocicleta. Por este motivo, y con el fin de simplificar el estudio, se realiza un análisis en 2 dimensiones para ahorrar tiempo tanto en la modelación como en el tiempo de cómputo. Para el estudio de este capítulo.

7.1 GEOMETRÍA

Para comenzar el estudio. Se toma una geometría a analizar, en este caso, una circunferencia (Figura 27) de una diámetro de 290.36 mm. Esta medida es tomada a partir del centro hasta la parte superior del casco. Este cuerpo es integrado a ANSYS 12.1; posteriormente es colocado en un volumen de control que garantice que el flujo de aire se desarrolle totalmente (Figura 28).

Figura 27. Circunferencia de análisis en Rhino 4.0

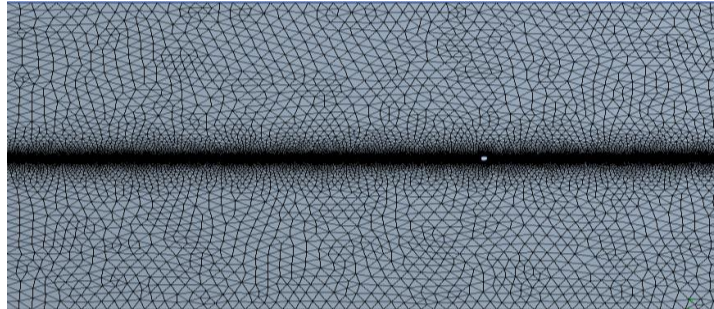


7.2 MALLADO

La malla determina la exactitud en las soluciones y el tiempo de cómputo; este proceso es de gran importancia para definir y refinar la malla. Garantizando precisión en los resultados. La densidad está determinada por el número de elementos dentro del volumen de control.

El tamaño mínimo de la malla están ubicado en cercanías de la pared en la circunferencia y a lo largo de la dirección de flujo, con un valor de $y_p = 0.003266\text{m}$ garantizando la mejor solución a cambios presión, velocidad y arrastre, como se observa en la Figura 28.

Figura 28. Malla para una circunferencia en un volumen de control 2D ANSYS 12.1



- Características de la malla Nodos 111560
- Elementos 222673
- Tamaño de los nodos sobre la superficie 0.002m
- Expansión de malla 1.2

7.3 CONDICIONES DE FRONTERA

El volumen de control posee 3 condiciones de frontera. Estas condiciones son: la velocidad de entrada (*velocity inlet*), las paredes (Wall), presión de salida (*pressure outlet*). La explicación de cada una de estas condiciones se encuentra en la sección 6.2.

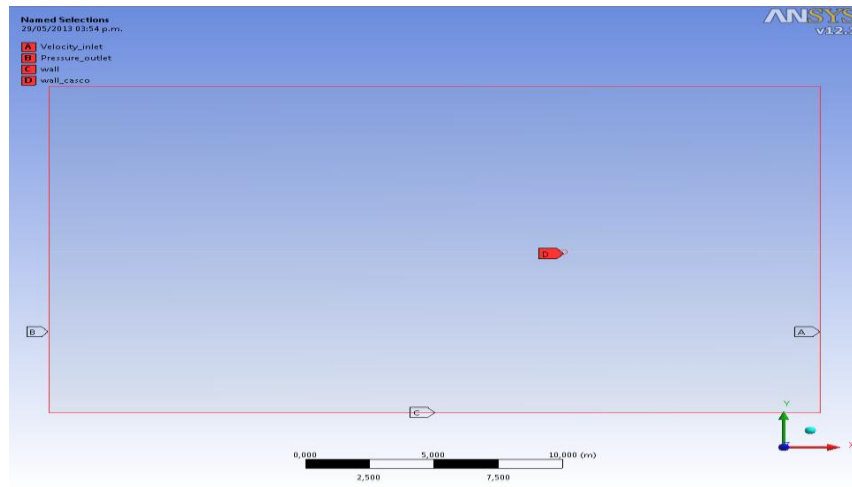
Fueron establecidas de la siguiente manera

Velocity inlet: corresponde a la entrada del flujo libre dentro del volumen de control denominada con la letra A de la Figura 29.

Pressure outlet: es la sección de salida del flujo y esta denotada con la letra B de la Figura 29.

Wall: tenemos de dos tipos: la primera correspondiente a las paredes de la sección de prueba denotada con la letra C, la segunda hace referencia a la circunferencia a la cual se va a medir el arrastre, denotado con la letra D de la Figura 29.

Figura 29. Condiciones de frontera para análisis e circunferencia 2D



7.4 MODELO DE TURBULENCIA

El modelo K-épsilon es utilizado en aeronáutica y simulaciones de flujo principalmente en ductos ya que dentro de su solución aplica aproximaciones a los fenómenos de turbulencia mediante dos ecuaciones. La primera variable corresponde a la energía cinética turbulenta, k . La segunda variable es la escala de la disipación turbulenta, ϵ . Esto permite explicar los efectos de convección y la difusión de la energía turbulenta.

Este modelo ha demostrado ser útil para los flujos de la capa libre de cizallamiento con gradientes de presión relativamente pequeños; pero no es útil en los casos de grandes gradientes de presión adversos.²⁵

Los efectos viscosos en la interacción entre la superficie y el flujo bajo la aproximación de non equilibrium Wall Function y condición de no slip condition en las paredes, no permite que se generen componentes de velocidad normales a la superficie.

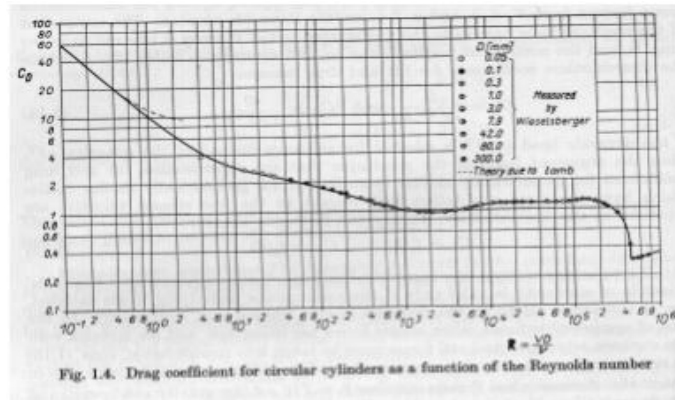
7.5 VARIABLES EVALUADAS Y RESULTADOS

Para validar la metodología se toma las fuerzas de arrastre resultante a diferentes velocidades en dirección del flujo (x), son comparados con datos experimentales a condiciones estándar de un cilindro en 2D (Figura 30). La Tabla 9 muestra el rango de Re a los cuales se realizaron las pruebas; dando como resultado los

²⁵ CFD ONLINE. Documentación anisysi fluent 12.1 k -epsilon models [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://www.cfd-online.com/wiki/k-epsilon_models> [consulta: Jul. 2012].

rangos confiable para el modelo de solución de ANSYS 12.1 , donde errores menores al 10% son admisibles dando como conclusión que velocidades entre 8 m/s y 12 m/s son fiables para este modelo. En dicha tabla se observa que el resultado con menos error entre teórico y experimental es de 10 m / s. lo que nos da la partida para el análisis de las nuevas geometrías a analizar en 2D. (Contornos de casco de motocicleta).

Figura 30. Coeficientes de arrastre para esfera y cilindro en función de número de Reynolds



Fuente: EL ROZAMIENTO Y LA VELOCIDAD. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www14.brinkster.com/aleatoriedad/1roz.htm>> [consulta: May. 2013]

Tabla 8. Datos de condiciones atmosféricas estándar, geométricas y velocidad

velocidad	10
densidad	1,225
viscosidad Dinámica	1,7894E-05
Diámetro	0,29036

En la Tabla 9 se observa el comportamiento de C_D en función de Re para una circunferencia en 2D en condiciones atmosféricas estándar. También observar el C_D teórico vs C_D experimental o arrojado por ANSYS 12.1 hallado a partir de la fuerza de arrastre.

Tabla 9. Análisis de Cd teórico vs Cd experimental para diferentes números de Re

Velocidad	Re	Fd ANSYS	cd teórico	Cd ANSYS	% error
3	59633	1,22	1	0,7623	23,768
8	159021	8,86	0,85	0,7780	8,469
10	198777	12,88	0,75	0,7242	3,436
12	238532	14,28	0,61	0,5574	7,863
15	298165	22,39	0,65	0,5596	13,908
18	357798	34,38	0,51	0,5966	18,139
20	397553	41,37	0,35	0,5816	66,160

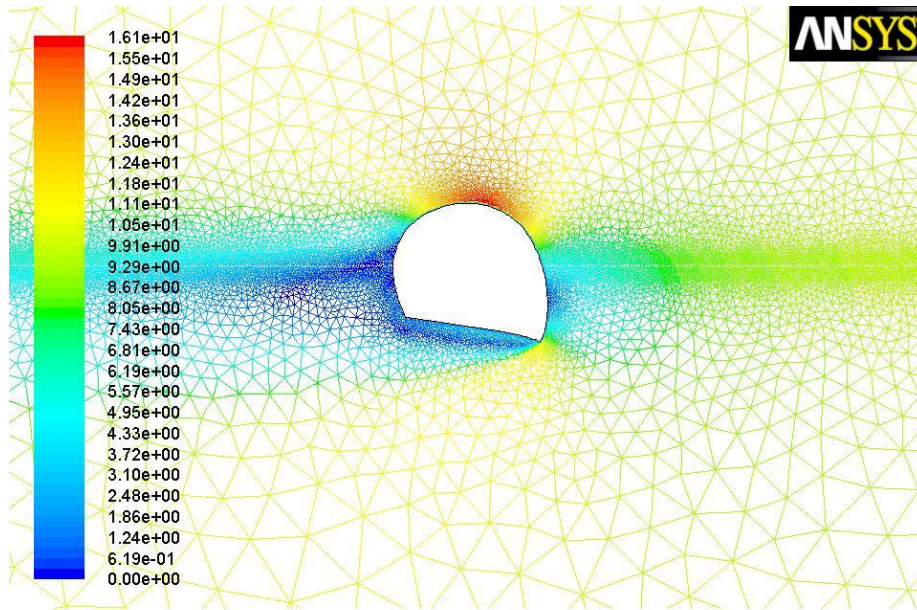
7.6 CAMBIOS SOBRE LA GEOMETRÍA

Los cambios generados en dos dimensiones en la geometría serán determinados por un análisis preliminar del contorno de casco de motocicleta que se nombrara como original. Este análisis da como resultado dos áreas importantes donde posiblemente se deben efectuar cambios geométricos para mejorar ese comportamiento desfavorable para el piloto o en este caso el casco que lo reprenda en términos aerodinámicos.

Estos valores se observan en la Figura 31 los cuales muestran la distribución de velocidades para el casco de motocicleta a 10 m/s. Se observa un aumento de velocidad en la parte superior de alrededor de 16m/s y en la parte inferior delantera donde se observa un aumento de velocidad y un cambio de presión repentino debido a un desprendimiento del flujo en ese punto. Esta será el primer punto a analizar seguido de la parte trasera donde se observa un área de baja velocidad causante de fuerzas de arrastre por el desprendimiento del flujo en la parte superior (zona de color verde).

De acuerdo a la Figura 32 correspondiente a la distribución de presiones se observa un punto de estancamiento en la parte frontal. En la parte delantera inferior se observa una zona de baja presión debido al desprendimiento del flujo. En la parte superior se observa una zona de baja presión correspondiente al aumento de velocidad de este punto de valor de 0.0123 pascal

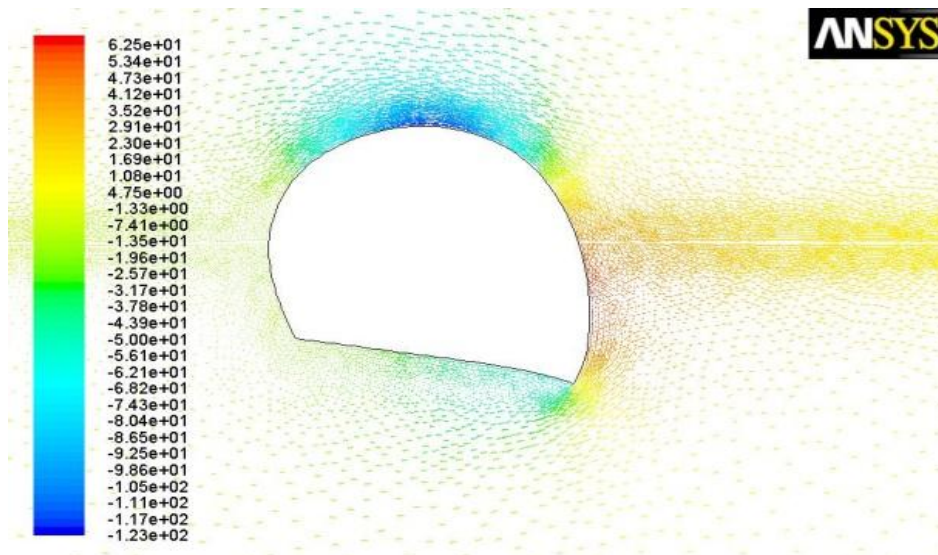
Figura 31. Magnitudes de velocidad a lo largo de un casco de motocicleta a 10 m/s



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

May 20, 2013
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)

Figura 32. Magnitudes de presión a lo largo de un casco de motocicleta a 10m/s.



Velocity Vectors Colored By Static Pressure (pascal)

May 20, 2013
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)

En la Figura 32 se observa un punto de estancamiento en la parte frontal de color rojo indicando presiones en ese punto de alrededor de 6.25 pascal. Con respecto a este análisis, se basa un estudio en CFD de cuatro geometrías correspondiente

diferentes radios, efectuados a la parte inferior de le casco de motocicleta original; con el fin de mejorar tanto fuerza de arrastre como aerodinámica debido al retardo del desprendimiento del flujo en ese punto.

7.7 CAMBIOS GEOMÉTRICOS INICIALES

Del resultado anterior correspondiente al casco de motocicleta original, se modela 4 geometrías o perfiles para estudiar el comportamiento del arrastre total y parciales en direcciones x, y donde x corresponde a la dirección de flujo. Estas geometrías fueron modificadas solo en el frente con un redondeo a diferentes radios y se pueden apreciar entre la Figura 33 hasta la Figura 36.

Figura 33. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 20 mm

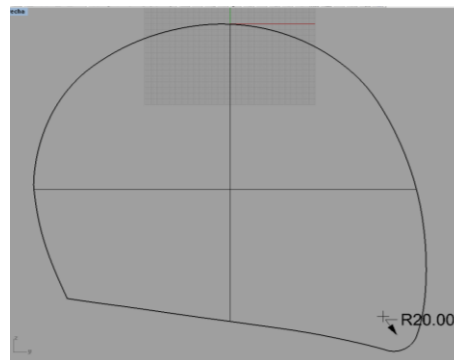


Figura 34. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 40 mm

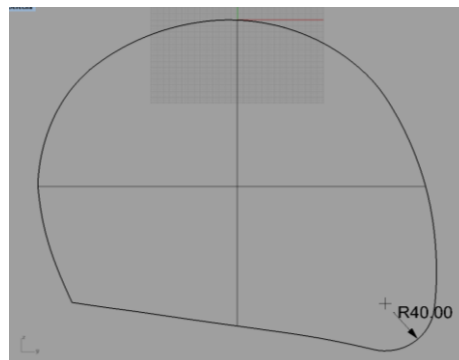


Figura 35. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 60 mm

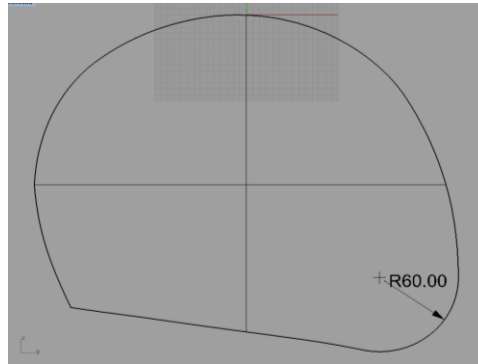
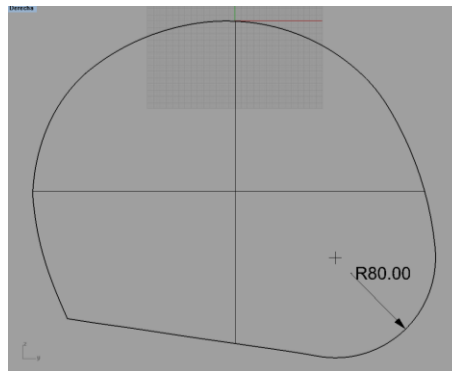


Figura 36. Perfil de casco de motocicleta modificado a un radio de 80 mm



Los resultados obtenidos en estas geometrías están tabulados en la Tabla 10 donde se observa que para un radio de curvatura de 80 mm la fuerza de arrastre es de 9.413N y un total de 0.481 N.

7.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El arrastre total fue disminuido notablemente a medida del aumento del radio esto debido a la liberación del punto de estancamiento y retardo de desprendimiento del flujo en este punto. Hasta obtener disminuciones máximas de 0.481 N con respecto a el casco original de 1,362 N esta geometría será seleccionada para un posterior análisis donde se mezclaran las geometrías más representativas en una matriz de selección que se puede apreciar en las Tabla 11 y 12.

Tabla 10. Análisis de fuerza de arrastre para diferentes tipos de geometrías a 10m/s.

ANALISIS REDONDEO FRENTE CASCO						
OC	Dirección N	original	OC-20	OC-40	OC-60	OC-80
	X	13,624163	11,880	10,650	9,901	9,413
	Y	11,69798	8,582	7,607	8,275	8,733
	T	1,3620169	2,331	2,152	1,150	0,481
	INT		1050	904	794	819
	NODOS		111547	111666	111534	111627
	ELEMENTOS		222630	222870	222609	222798

Además del análisis frontal se realizó una matriz de selección al casco original, para ello se realizó 4 tipos de modificaciones con respecto a la altura de la cola, y 3 con relación a los redondeos en las cambios de sección. Para las filas de la matriz se dispusieron las siguientes alturas: 200mm, 180mm, 150mm y 100 mm y nombradas desde las letras A a la D respectivamente. Por otras parte los redondeos generados en los cambios de sección se ubicaron en las columnas de la matriz y numerados 1, 2 y 3.

En la tabla 11 se puede apreciar la matriz para diferentes geometrías vistas en el anexo D y arrastres tabulados en sentido x, y y total donde x es el arrastre en sentido del flujo.

Tabla 11. Fuerza de arrastre para diferentes alturas de cola en un casco de motocicleta a 10 m/s

FUERZA DE ARRASTRE GEOMETRIAS 2D EN (N)				
	Dirección	1	2	3
	A-200	X	13,812	13,881
Y		9,713	10,473	10,608
T		2,898	2,410	2,285
B-180	X	13,478	13,611	13,587
	Y	13,877	13,580	13,607
	T	0,282	0,022	0,014
C-150	X	13,627	13,674	13,785
	Y	14,780	15,461	15,509
	T	0,816	1,263	1,219
D-100	X	13,572	13,708	13,636
	Y	14,967	14,578	15,224
	T	0,987	0,615	1,228

Tabla 12. Número de elementos y nodos para cada una de las geometrías en ANSYS 12.1

		1	2	3
A-200	NODOS	111508	111949	111894
	ELEMENTOS	223528	223387	223279
B-180	NODOS	111772	111767	111668
	ELEMENTOS	223030	223021	222808
C-150	NODOS	120411	120341	120236
	ELEMENTOS	240304	240165	239956
D-100	NODOS	111723	111635	111840
	ELEMENTOS	222937	222761	223172

Los mejores resultados de resultados de la Tabla 11Tabla 11. Fuerza de arrastre para diferentes alturas de cola en un casco de motocicleta a 10 m/s serán combinados para proponer una geometría ideal. Los cambios geométricos se aprecian entre la Figura 37 y Figura 40 del siguiente capítulo.

7.10 SELECCIÓN DE LA GEOMETRIA

Esta selección es tomada respecto al capítulo anterior donde se tomaron los 2 mejores resultados de fuerza de arrastre respecto al sentido del flujo y dos con respecto al arrastre total de la geometria.

Estos resultados se observan en la Tabla 13 y las geometrías entre la Figura 37 y la Figura 40 respectivamente.

Figura 37. Contorno 1B –oc80 2D

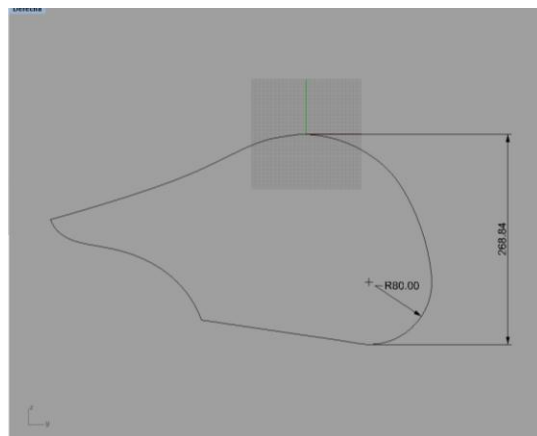


Figura 38. Contorno 3B –oc80 2D

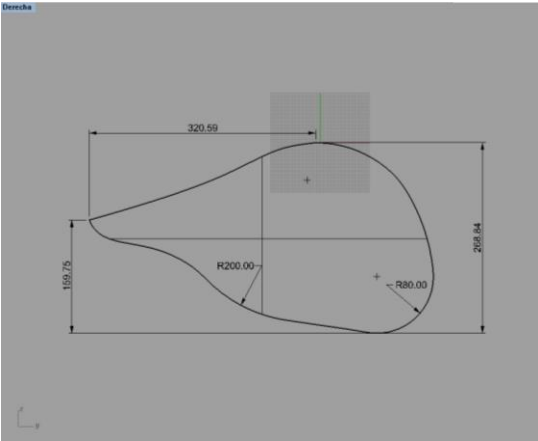


Figura 39. Contorno 1D-oc-80

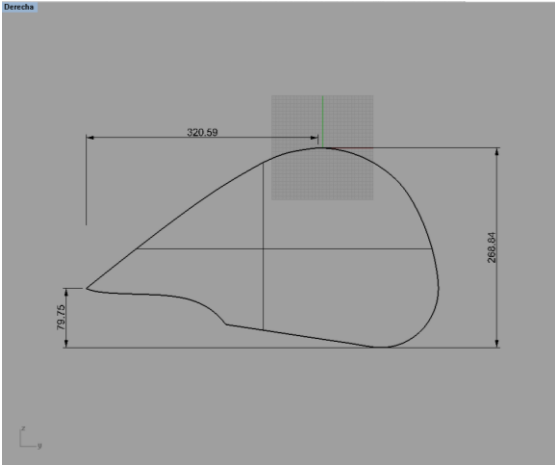


Figura 40. Contorno 2D-oc 80

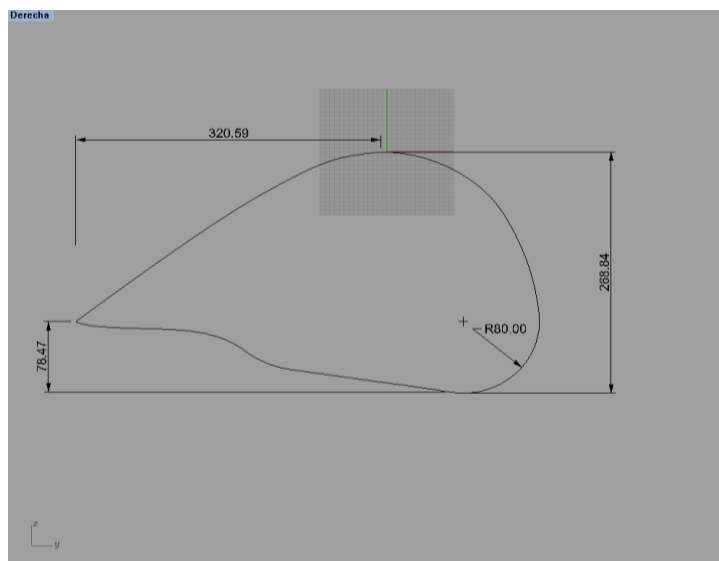


Tabla 13. Fuerza de arrastre en N para geometrías seleccionadas a 10 m/s

Dirección N	original	1B-oc80	3B-oc80	1D-oc80	2D-oc80
X	13,624	9,021	8,579	8,880	8,813
Y	11,698	5,013	7,458	7,080	6,727
T	1,362	2,834	1,969	1,273	1,475
% Disminución x		-33,1	-36,9	-34,6	-35,7
% Disminución y		-63,9	-45,2	-52,7	-53,9
% Disminución T		904,5	13935,8	29,0	139,8
% Disminución x original		-33,8	-37,0	-34,8	-35,3
% Disminución y original		-63,2	-45,3	-48,0	-50,6
% Disminución T original		-79,2	-85,5	-90,7	-89,2

7.11 PARÁMETROS A MEDIR Y RESULTADOS

En la Tabla 13 se observa el comportamiento del arrastre para cada una de las geometrías finales seleccionadas, donde se destaca la geometría 3B-oc-80 con un resultado de arrastre de 8,579 N en dirección x donde x es el la dirección del flujo libre, obteniendo una disminución en el arrastre del 37 % con respecto a la geometría original. Esta geometría tiene una cola de 159.76 mm respecto a la parte baja delantera redondeo en el frente de 80 mm y curvatura de redondeo en el cambio de geometría casco cola de 200 mm. Los cambios repentinos de geometría genera desprendimientos del flujo debido al desprendimiento de la capa límite esto se corrobora con los cambios buscos de geometría en el perfil original y los resultados obtenidos con el perfil 3B-oc-80 obteniendo reducciones de velocidad máxima de 16.1 a 15.7 m/s Figura 31 y Figura 41 respectivamente. Lo

que es favorable para la disminución de zona de baja presión Figura 42 y retardo en el desprendimiento del flujo. Por otra parte la zona de baja presión presente en la parte posterior es disminuida considerablemente debido al retardo en el desprendimiento del flujo.

Figura 41. Contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1

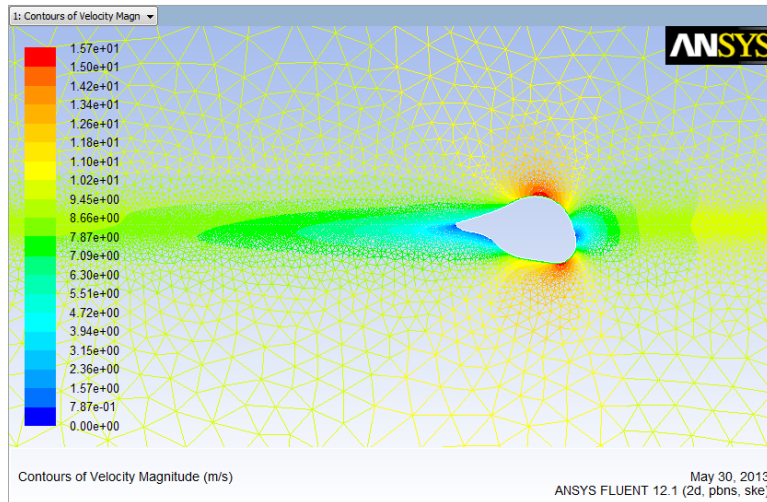
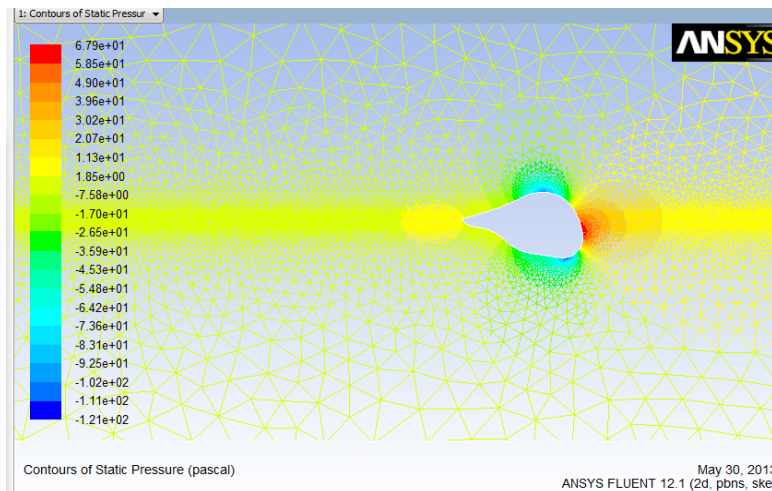


Figura 42. Contorno de presión estática para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1



8. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DEL CASCO ESTÁNDAR Y LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS 3D

8.1 ANÁLISIS 3D

En este capítulo se recopila los resultados de la matriz de selección del capítulo 7 donde el contorno 3B-oc-80 presenta mejor comportamiento al arrastre a 10 m/s. Además de modelar con base a este perfil una geometría en 3D, con la ayuda de Rhino 4.0; Para crear un casco de motocicleta modificado el cual se puede observar en detalle en el anexo E.

Antes de ser exportado el casco modificado al entorno de ANSYS 12.1 se debe validar las condiciones del volumen de control. Para ello se realizó una validación con la ayuda de una esfera en dicho volumen de control a las mismas condiciones de densidad, viscosidad y velocidad; con el fin de garantizar que los resultados son confiables.

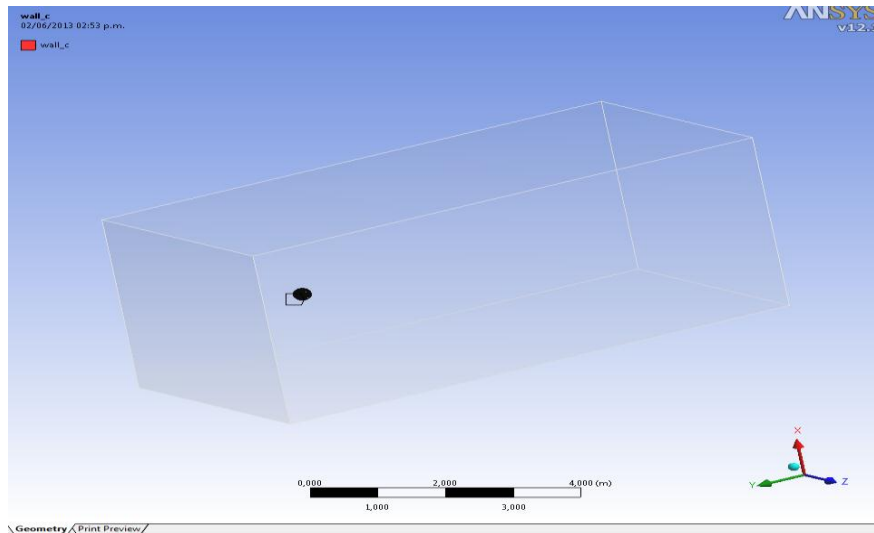
A continuación se explica cada una de las etapas para la validación y metodología propuesta para el análisis de un casco de motocicleta y sus modificaciones.

8.2 MODELACIÓN EN CFD

8.2.1 Geometría

La geometría a analizar es una esfera de un diámetro de 0,290712 m. Esta medida es tomada a partir del centro al punto más alto del casco de motocicleta. Este objeto es exportado a ANSYS 12.1; en un volumen de control lo suficientemente grande que garantice que el flujo se desarrolle totalmente. Las características de la esfera se pueden observar en la Figura 43. Donde el sentido del flujo se encuentra en la dirección y

Figura 43. Volumen de control con esfera de validación ANSYS 12.1



8.2.2 Mallado

Al igual que en los capítulos anterior la calidad de malla determina la exactitud de resultados para ello se realizó un análisis de independencia de malla y posterior validación con una esfera a condiciones atmosféricas a nivel del mar. Además de conservar los valores expuestos en el capítulo 6.3 de y_p : 0.003266m (Figura 45) obtenemos la malla para una esfera como se observa en la Figura 44

Figura 44. Malla para una esfera en un volumen de control 3D ANSYS 12.1

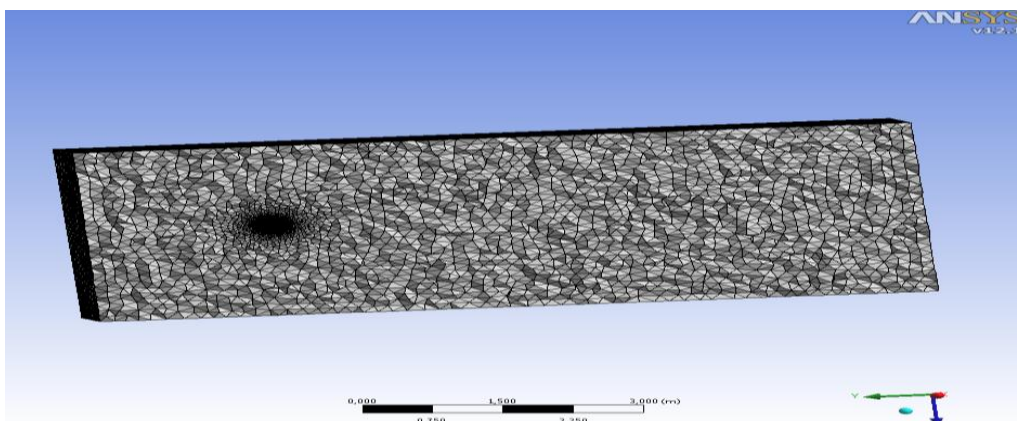
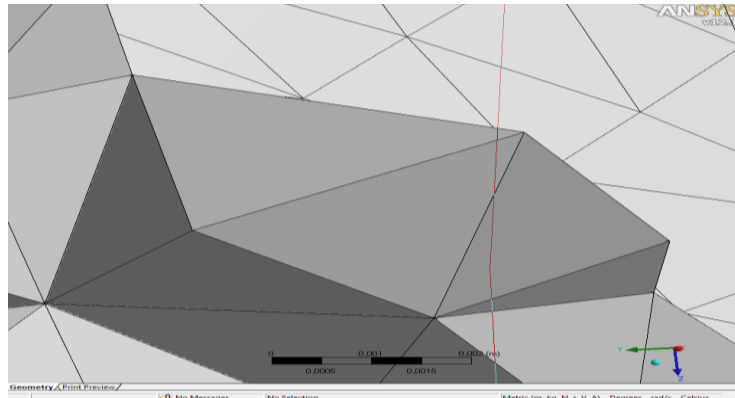


Figura 45. Tamaño de elementos sobre la superficie 0.003266 m ANSYS



- Características de la malla Nodos 247236
- Elementos 1360636
- Tamaño de los nodos sobre la superficie 0.003266m
- Expansión de malla 1.2

8.2.3 Condiciones de frontera

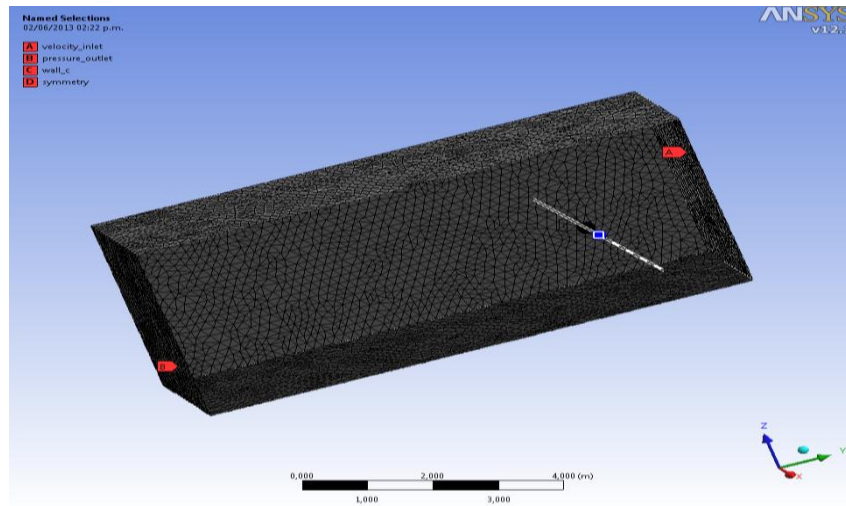
Las condiciones de frontera son tres principalmente. Y se especifica a profundidad en el capítulo 6.2.

Velocity inlet: se determina para caracterizar el flujo a condiciones atmosféricas y velocidad de flujo al inicio del volumen de control. Es denotado con la letra A de la Figura 46.

Pressure outlet: se utiliza para denotar la salida del flujo y se denota con la letra B de la Figura 46

Wall: tenemos de dos tipos de wall la primera correspondiente a las paredes de la sección de prueba denotada con la letra C y la segunda que hace referencia a la esfera a la cual se va a medir el arrastre denotado con la letra D de la Figura 46.

Figura 46. Condiciones de frontera para análisis e esfera 3D



8.2.4 Modelo de turbulencia

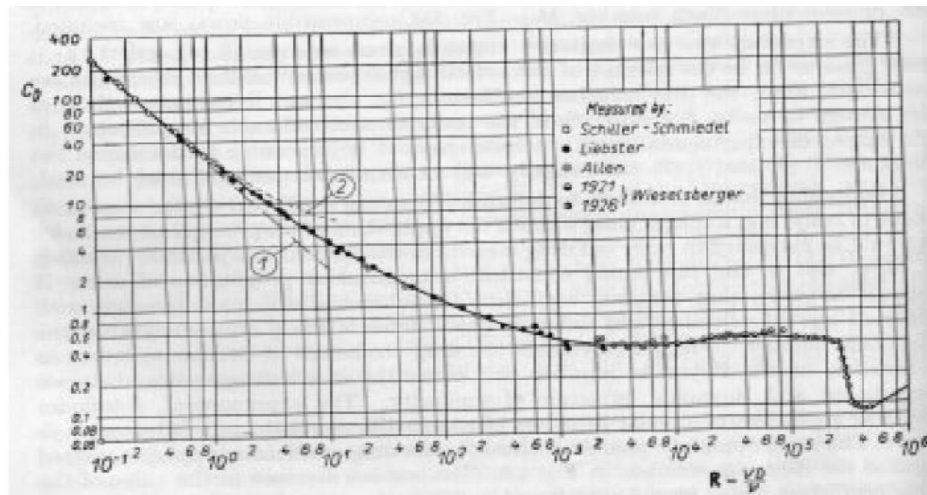
El modelo utilizado para la esfera, casco comercial (estándar) y casco modificado es K-epsilon, ya que es un modelo utilizado en fenómenos turbulentos donde los efectos de cambios de presión son moderados, además de este modelo se utiliza la opción de non equilibrium Wall function que es una aproximación mejorada del standard Wall function para el cálculo de arrastre como se explica en detalle en la sección 6.4 y 7.4

8.2.5 Parámetros y resultados

Para el análisis en 3 dimensiones se realizó una validación de los resultados con respecto a estudios previos realizados a una esfera en un túnel de viento en condiciones atmosféricas a nivel del mar. Donde se grafica C_D vs número de Reynolds como se observa en la Figura 47. Luego a través de una simulación de CFD de un volumen de control que contiene en su interior la esfera, se obtienen resultados experimentales de arrastre que pueden ser comparados para determinar el rango al cual, el modelo de solución de CFD es válido.

En la tabla 14 se observa el comportamiento de C_D en función de Re para una esfera. También el C_D teórico vs C_D experimental (arrojado por ANSYS 12.1) hallado a partir de la fuerza de arrastre F_D y la Ecuación 3 del capítulo 3.2.1. Encontrando así el rango al cual el modelo de solución es confiable y admisible.

Figura 47. Coeficiente de arrastre a diferentes números de Reynolds para una esfera a nivel del mar



Fuente: EL ROZAMIENTO Y LA VELOCIDAD. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://www14.brinkster.com/aleatoriedad/1rozaz.htm> [consulta: May. 2013]

Tabla 14. Validación C_D teórico vs C_D experimental ANSYS 12.1

Velocidad	Re	F_D ANSYS	C_D teórico	C_D ANSYS	% error
5	99509	0,64	0,50	0,6310	25,9
7	139312	1,05	0,48	0,5271	9,8
10	199018	1,81	0,42	0,4459	6,2
12	238821	2,42	0,38	0,4131	8,7
15	298526	3,47	0,27	0,3794	40,5
20	398035	5,60	0,08	0,3444	330,5
23	457741	7,10	0,05	0,3302	560,4
32	636857	12,60	0,1	0,3026	202,6
42	835874	20,42	0,15	0,2847	89,8

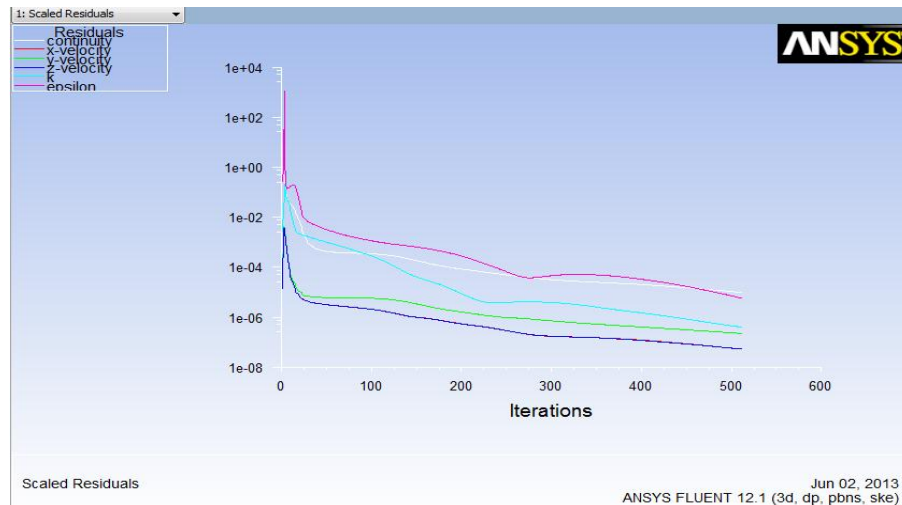
Para validar la metodología se toma las fuerzas de arrastre a 5, 7, 10,12, 15 , 20, 23, 32, 42 m/s respectivamente y se determina el rango al cual es confiable, para posterior análisis. Obteniendo que velocidades entre 7 y 12 m/s son aceptadas por tener errores inferiores al 10% y es posible analizar las geometrías tanto del casco de motocicleta como el modificado.

Los errores mayores al rango admisible del 10% no son aceptados. Dichos resultados pueden estar determinados por la calidad de la malla y tipo de aproximación que el modelo de turbulencia hace sobre las cercanías de superficie de la esfera. Donde cambios repentinos de presión y flujo reversos generados a

partir del incremento de la turbulencia a elevados número de Reynolds pueden ser despreciados, en el modelo de turbulencia; afectando directamente los resultados finales. Debido a la capacidad de cómputo que limita el refinamiento y cálculo.

En la Figura 48 se observa el comportamiento del modelo de solución K épsilon con convergencias de 510 interacciones.

Figura 48. Comportamiento de la solución para análisis esfera 3D A 5 m/s ANSYS 12.1



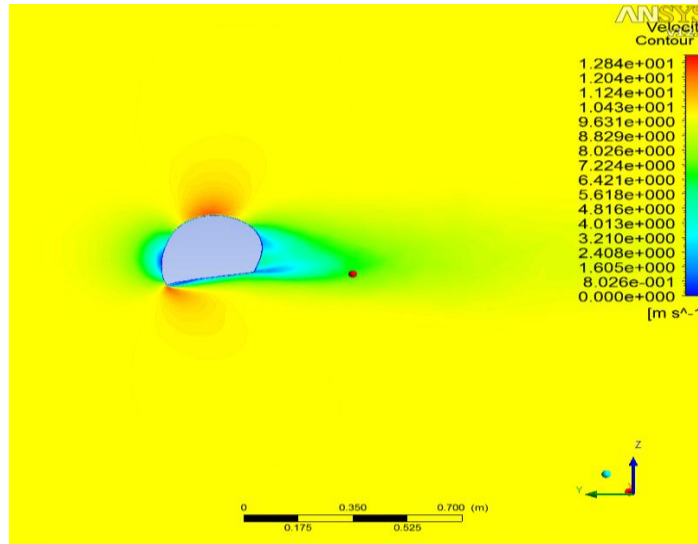
En la tabla 14 se observa que el resultado con menos errores entre teórico y experimental es de 10 m / s. lo que da la partida para el análisis de las nuevas geometrías a analizar en 3D. (Casco motocicleta y modificado).

8.3 CAMBIOS SOBRE LA GEOMETRÍA

Los cambios generados en 3 dimensiones en la geometría son determinados por un análisis preliminar del contorno de casco de motocicleta en 2D, realizado en el capítulo anterior. Este análisis da como resultado dos áreas importantes donde posiblemente se deben efectuar cambios geométricos con el fin de mejorar el comportamiento aerodinámico desfavorable del casco.

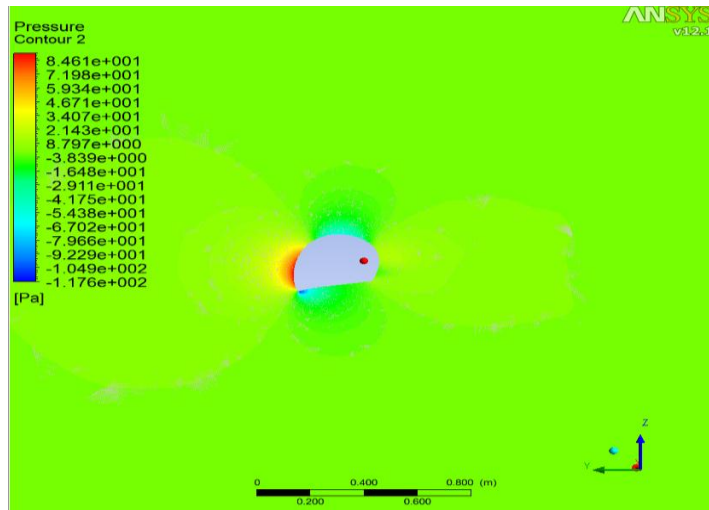
La primera área es la parte inferior delantera donde existe un desprendimiento repentino del flujo debido a un incremento de velocidad y cambio brusco de geometría como se observar en la Figura 49. La segunda área es la parte superior donde ocurre el desprendimiento de la capa límite debido al incremento de velocidad y transición de la capa límite a turbulenta. Originado una zona de baja presión y baja velocidad en la parte trasera, generando arrastre.

Figura 49. Contornos de velocidades alrededor casco de motocicleta a 10 m/s



En ambas zonas se encuentra una baja presión y baja velocidad por el desprendimiento del flujo en la parte superior y parte baja del casco. Esto se corrobora con la distribución de velocidades y presiones para el casco de motocicleta a 10 m/s en 3D vistos en las Figuras 49 y 50 respectivamente.

Figura 50. Contornos de presiones alrededor casco de motocicleta a 10 m/s



Estos puntos son la base de partida para proponer un nuevo diseño de casco esto ayudado del análisis del capítulo anterior donde con una matriz de selección se halló el perfil de casco más recomendable para ser más aerodinámico y obtener menores fuerzas de arrastre. Este modelo fue elaborado a partir del perfil 3B -oc-80.

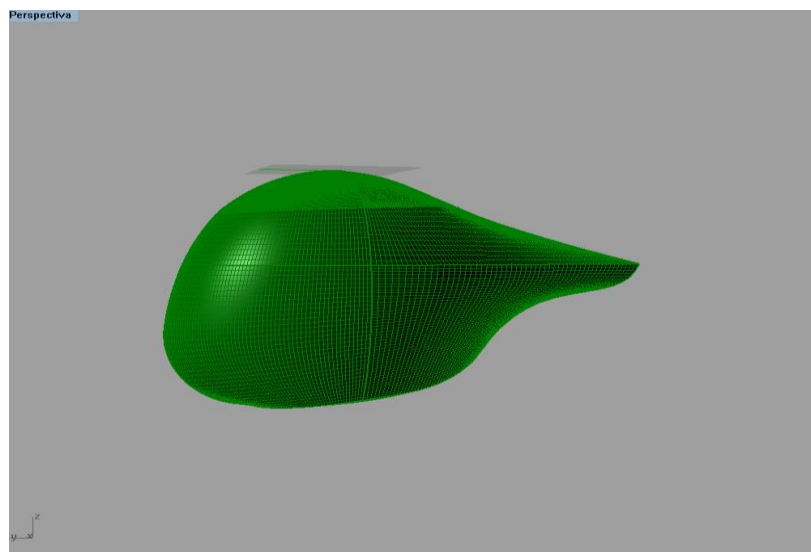
Se observa un aumento de velocidad en la parte superior de alrededor de 12.84 m/s y en la parte inferior delantera donde se observa un aumento de velocidad y un cambio de presión repentino debido a un desprendimiento del flujo en ese punto como arroja el estudio de 2D y 3D.

En relación a la matriz de selección elaborada en 2D se obtiene la geometría o casco seleccionado (3B oc 80 2D). Este modelo es transformado a través de Rhino 4.0 en un casco de 3D que se puede observar en la Figura 51. Dicho casco se puede apreciar en detalle en el anexo E.

8.3.1 Análisis de los resultados

De acuerdo a la Figura 50 correspondiente a la distribución de presiones de un casco de motocicleta se observa un punto de estancamiento en la parte frontal. En la parte delantera inferior se observa una zona de baja presión debido al desprendimiento del flujo en ese punto (color azul). En la parte superior se observa una zona de baja presión correspondiente al aumento de velocidad con un valor de -0.6702 Pa.

Figura 51. Casco final 3D en Rhino 4.0



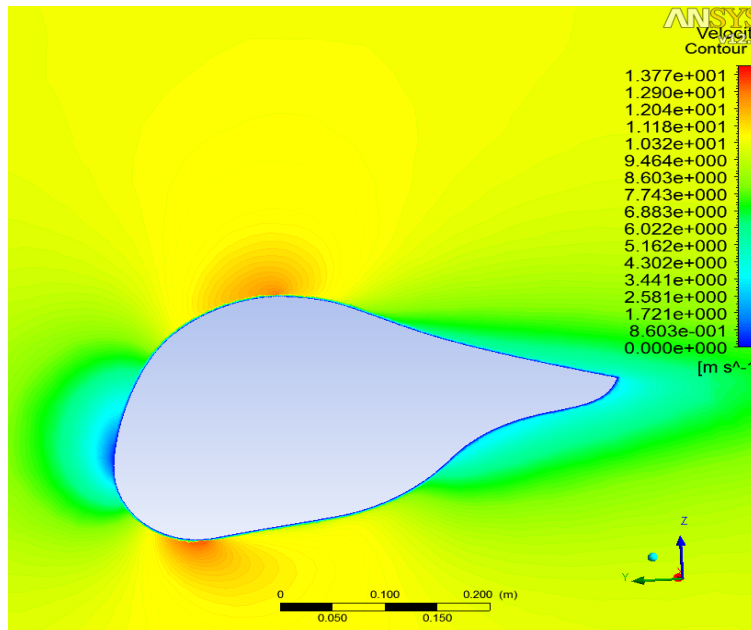
En la Tabla 15 Tabla 15. Fuerza de arrastre para cascos motocicleta Vs casco modificado ANSYS 12.1 se observa el comportamiento del arrastre para el casco original vs el casco modificado 3B-oc-80 con un resultado de 1.637 N en dirección flujo y una disminución del 26.098% con respecto a la geometría original evaluada a 10m/s. Esta geometría tiene una cola de 159.76 mm respecto a la parte baja delantera redondeo en el frente de 80 mm y curvatura de redondeo en el cambio de geometría casco cola de 200 mm.

Tabla 15. Fuerza de arrastre para cascos motocicleta Vs casco modificado ANSYS 12.1

Casco motocicleta Vs casco modificado			
Velocidad	F_D casco motocicleta	F_D casco modificado	Diferencia %
7	1,232	0,952	22,758
9	1,854	1,388	25,123
10	2,208	1,632	26,098
12	3,004	2,170	27,764

El arrastre fue disminuido notablemente con el aumento del radio en la parte frontal. Debido a la liberación o disminución del punto de estancamiento y retardo de desprendimiento del flujo como se observa en la tabla 10 del capítulo 7.8 para el estudio de 2D. Hasta obtener disminuciones de 27.764 % con respecto al casco original evaluado a 12 m/s para la geometría de 3D.

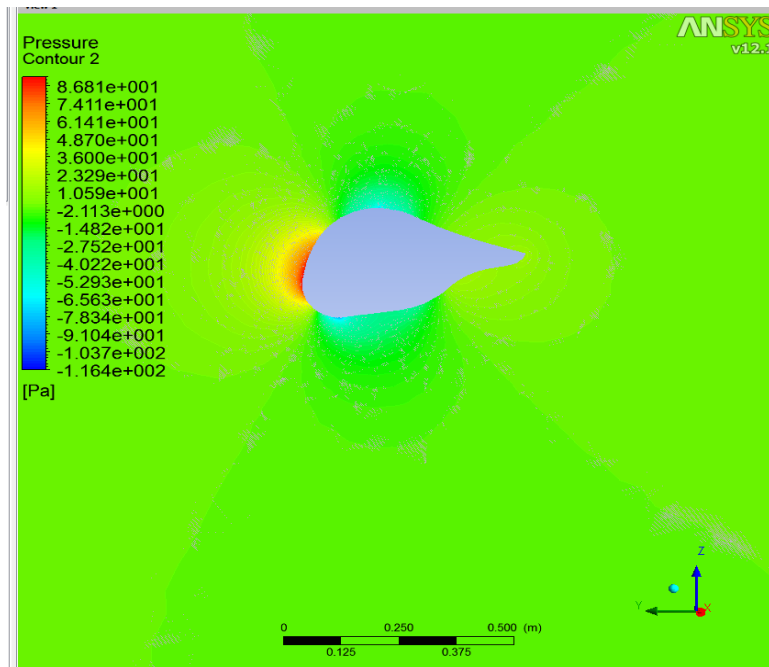
Figura 52. Contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1



Los cambios repentinos de geometría generan desprendimientos del flujo. Debido a los a los cambios de sección. Esto se corrobora con el cambio busco de geometría en el perfil el perfil original parte inferior delantera de la Figura 49 y los resultados obtenidos con el con el perfil 3B-oc-80 logrando reducciones de velocidad máxima en la parte trasera de trasera de 4.013 a 7.743 m/s respectivamente, lo que es favorable para la disminución de disminución de zona de baja presión Figura 53 y retardo en el desprendimiento del flujo

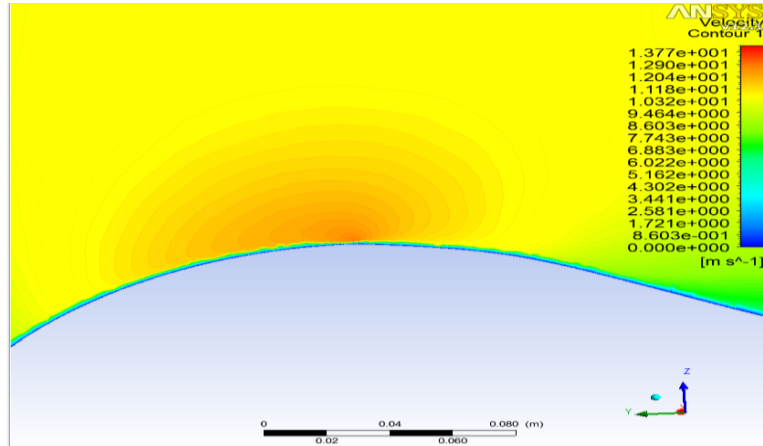
. Figura 52

Figura 53. Contorno de presión estática para la geometría 3B oc 80 a 10m/s ANSYS 12.1;Error! No se encuentra el origen de la referencia.



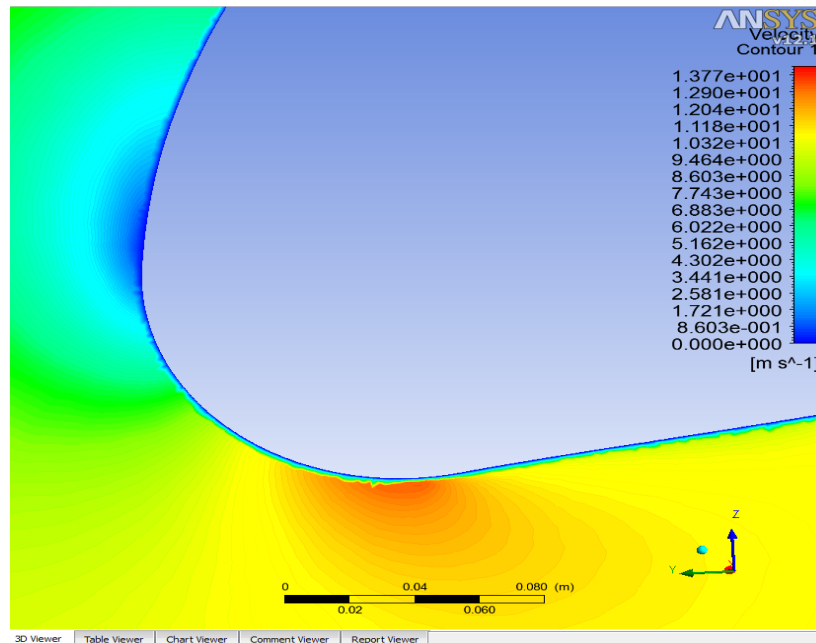
En la Figuras 54 se puede apreciar en detalle la parte superior del casco modificado donde se observa en color rojo y naranja el punto máximo de velocidad, seguido de una región de color verde que representa la zona donde el flujo se desprende de forma más suave ocasionando una disminución de la zona de baja presión de la parte posterior.

Figura 54. Zoom contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s en la parte superior ANSYS 12.1



Para la Figura 55 de observa el color azul equivalente a velocidades de cero. Demarca la zona del punto de estancamiento, la cual es disminuida gracias al redondeo realizado en la parte inferior frontal. Seguido de una zona de alta velocidad de alrededor de 13.7 m/s pero a diferencia de la Figura 49 el flujo no se desprende de forma repentina gracias a el cambio de sección más suave.

Figura 55. Zoom contorno de velocidades para la geometría 3B oc 80 a 10m/s parte baja delantera ANSYS 12.1



9. CONCLUSIONES

En la parte superior del casco hay desprendimiento de flujo, justo en la parte central del casco, gracias a la aceleración del flujo en esta zona. Dicha aceleración aumenta hasta en un 26.8% para la velocidad máxima de 32.2 m/s. para los ensayos en el túnel de viento, además en la zona trasera, se presentan cambios aleatorios de velocidad, propios de flujos turbulentos. Además se identifica una zona de baja presión lo cual ocasiona arrastre por fuerza de presión debido a que la geometría del casco original no compensa las presiones ejercidas en el punto de estancamiento (parte frontal) con las presiones originadas en la parte trasera.

Para los ensayos realizados en el túnel de viento, se aconseja utilizar un modelo a escala ya que los efectos de pared que se obtuvieron en el ensayo no dan resultados comparables con la realidad. Además de los ensayos realizados en CFD para la sección de prueba del túnel de viento no llega a ser una solución estable, debido a las restricciones que tiene la seccion de prueba ya que el flujo no se desarrolla totalmente dentro del volumen de control. Por otra parte los ensayos realizados en CFD con índices de turbulencia generan menos arrastre debido a la capacidad de la capa límite turbulento este más tiempo adherido a la superficie del casco.

Hay dos factores que determinan el desprendimiento de la capa límite en un casco de motocicleta; el primer de ellos son cambios bruscos de sección, que ocasionan desprendimientos anticipados de esta (parte inferior delantera). El segundo son las bajas presiones en zonas de altas velocidades lo que ocasiona que la capa límite se desprenda (parte superior del casco), generando una zona de baja velocidad y baja presión ocasionado como consecuencia arrastre.

Para el análisis en dos dimensiones podemos afirmar que redondeos en la parte frontal de 80 mm disminuyen considerablemente el arrastre debido a la disminución del punto de estancamiento. Hasta obtener un valor de 9.413 N con respecto al original de 13.624 N. Por otra parte en este mismo análisis, la adición de una cola con altura de cola de 180 mm retarda más el desprendimiento de flujo reduciendo el arrastre hasta un valor de 8.579 N. hasta obtener un resultado en el perfil donde mezcla las dos características mencionadas anteriormente en la geometría 3B oc 80 con disminución total de un 37 % .

Los estudios de 2D arrojan zonas con velocidades 16.1 m/s, presiones -12,3 Pa y arrastre de 13.624 N a una velocidad del flujo libre de 10 m/s respectivamente. Mientras que para el mismo análisis en 3D obtenemos 12.84 m/s, -7.9 Pa y un arrastre de 2.21 N para las misma velocidad de prueba en flujo libre.

El perfil 3B-oc-80 en 3D de esta metodología tiene mejor desempeño aerodinámico con respecto a un casco de motocicleta comercial. Arrojando como resultados disminuciones en el arrastre de 26.1 % a una velocidad de 10m/s; y un rango mínimo de 22.7% hasta máximo 27.7% para velocidades de 7 y 12 m/s respectivamente.

Aunque se obtuvieron buenos resultados en el método k Épsilon estándar es aconsejable en trabajos posteriores evaluar la simulación con método K épsilon RNG , Realizable u otros modelos de turbulencia que aseguren que los resultados sean mucho mejores en la zona de desprendimiento de flujo, en la zona de baja presión y cálculo de arrastre.

BIBLIOGRAFÍA

AKVIDS.COM [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://wings.avkids.com/Libro/Flight/advanced/forces-01.html>> [consulta: Feb. 2012].

AM TRIATHLON. Cascos aerodinámicos. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.amtriathlon.com/2006/11/cascos-aerodinmicos-john-cobb-es-uno.html>> [consulta: Feb. 2012].

ANSYS. 4.12 Near-Wall Treatments for Wall-Bounded Turbulent Flows. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node97.htm#sec-near-wall>> [consulta: Jul. 2012].

CFD ONLINE. Documentación anisysi fluent 12.1 k –epsilon models [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://www.cfd-online.com/wiki/k-epsilon_models> [consulta: Jul. 2012].

CAR AND DRIVES THE F1 [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/07/17/75227-analisis-tecnico-el-casco-y-su-importancia-nivel-aerodinamico>> [consulta: Agosto. 2013].

CORDOBA GAZOLAZ, Diego. Las ecuaciones de Navier Stoke. Barcelona: s.n., 2011.

DURA DOMENECH, Antonio y otros. Capitulo I. Estática de Fluidos. En: Fundamentos físicos de las construcciones arquitectónicas. Alicante: Universidad Alicante, 2004.

EL ROZAMIENTO Y LA VELOCIDAD. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www14.brinkster.com/aleatoriedad/1roz.htm>> [consulta: May. 2013]

INSIDE SPORTS. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.insideoutsports.com/index.aspx?urlname=reviews&item=19>> [consulta: Jul. 2012].

LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EQUIPO 4. Numero Reynolds. México: EL autor, 2008.

MARTÍNEZ, Sebastián; BETANCUR, Mauricio y SALAZAR, Andrés Felipe. Determinación, cuantificación y optimización de fuentes de arrastre, del sistema de vagones del metro de Medellín. Medellín: UPB, 2009.

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. México: Pearson, 2006.

POLO, Rubio Miguel. Influencia de variables biomecánicas y fisiológicas sobre el rendimiento deportivo de atletas en silla de ruedas. Optimización del rendimiento de un atleta de elite mundial. Medellín: Universidad de Valencia, 2007.

RAMÍREZ MARTIN, José Juvenal y TOVAR PADILLA, Marco Vinicio. Resistencia Aerodinámica. Bogotá: s.n., 1999.

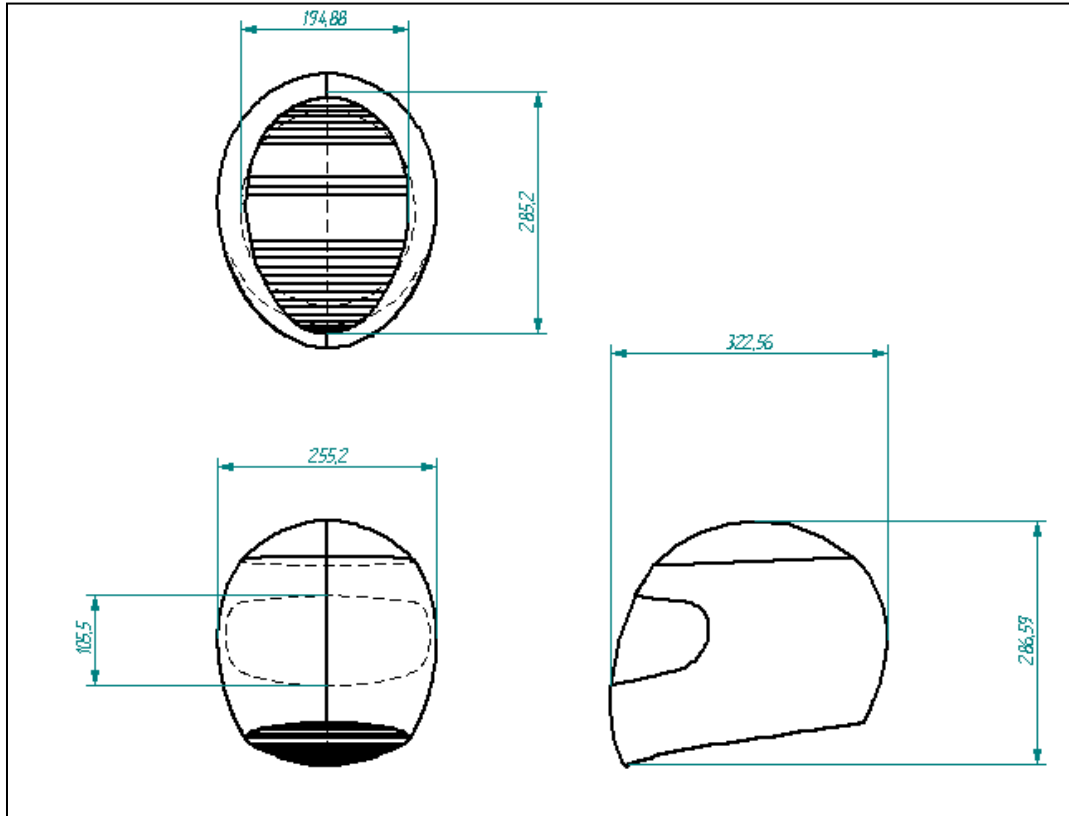
TRI-1st. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <http://www.tri-1st.co.uk/product_GIROATMOS.htm> [consulta: Jul. 2012].

TRIATHLON.DE Aerohelme. [En línea] s.p.i. Disponible en internet: <<http://www.triathlon.de/aerohelme-schnittige-hauben-1230.html/4>> [consulta: Jul. 2012].

ANEXOS

ANEXO A. DIMENSIONES DEL CASCO ESTÁNDAR

Plano de casco motocicleta Solid Edge V 14



ANEXO B. CALCULO DE DENSIDAD Y VISCOSIDAD EQUIVALENTES A LA ALTURA DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN

a) Calculo de la densidad

Condiciones de operación. Para garantizar que la modelación en CFD se hace acorde a las condiciones locales donde se encuentra ubicado el túnel de viento es necesario realizar una corrección por altitud y temperatura para determinar bajo qué características se hicieron las pruebas en el mismo. Específicamente interesa saber cuál es la densidad del aire a 1505 m (altura del Aeropuerto Olaya Herrera sobre el nivel del mar) y a 25^{0C} (temperatura registrada el día de la prueba). De acuerdo a los valores de la Tabla ISA e interpolando los valores para la altura especificada, la densidad local ρ es de 0.945392 Kg/m³

De acuerdo a la tabla atmosférica estándar la densidad a 5000 ft es igual $\rho = 1.05555 \frac{kg}{m^3}$ a una temperatura de 5.3⁰ C .La densidad real es hallada por medio de la siguiente ecuación de corrección por altitud:

$$DA = PA + 120 \times Vt^{26}$$

Dónde,

Vt = Diferencia entre temperatura de operación y temperatura de altitud,

DA = Es la altura equivalente.

PA = Presión de Altitud para el nivel deseado

120 = Contante temperatura (120ft por 1°C)

$$\frac{5000 - 4940}{5000 - 4500} = \frac{5.3 - x}{5.3 - 6.3} \Rightarrow x = 5.42$$

$$DA = 4940 + 120 \times (25 + 5.42)$$

$$DA = 8590.4 Ft$$

²⁶METEOROLOGY TRAINING [En línea] s.p.i Disponible en internet:
http://meteorologytraining.tpub.com/14269/css/14269_74.htm [Feb 2010]

Se interpola para obtener los valores de la densidad a esta altitud según la tabla ISA a esta altitud equivalente y multiplicando por el respectivo factor de conversión.

$$\frac{9000 - 8590.4}{9000 - 8500} = \frac{0.7620 - x}{0.7620 - 0.7739} \Rightarrow x = 0.77174848$$

$$\text{Factores de conversión} = 1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = 0.945392 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

b) Cálculo de viscosidad

De manera similar se hace la interpolación para el cálculo de la viscosidad

$$\frac{9000 - 78590.4}{9000 - 8500} = \frac{0.9512 - x}{0.9512 - 0.9540} \Rightarrow x = 0.953494$$

Multiplicando por el factor de conversión se obtiene que:

$$\mu = 1.789 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} * 0.953494$$

$$\mu = 1.7058003 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

ANEXO C. ÍNDICES DE TURBULENCIA

Para realizar la prueba en CFD y hacer que se cumplan los comportamientos en el túnel de viento es necesario ingresar un parámetro conocido como índice de turbulencia, este índice relaciona las fluctuaciones de la velocidad para flujos desarrollados. Para facilitar el cálculo de dicho índice se puede relacionar el número de Reynolds con el diámetro hidráulico, de la siguiente manera:

$$I = 0.16(Re * D_H)^{-1/8}^{27}$$

De esta forma, se calculó el número de Reynolds para las pruebas que se realizaron y para ello se tuvo en cuenta una longitud característica la cual se allá calculado el diámetro hidráulico para una sección rectangular ya que se está asumiendo efectos viscosos y turbulentos dentro de las simulaciones.

Basados en la ecuación para el cálculo de Reynolds se procede a calcular para cada una de las velocidades de prueba tanto del casco como el del túnel de viento de la siguiente forma

Primero se calcula el diámetro hidráulico para la sección transversal de túnel de viento que es 0.4 m x 0.6 m, dicho diámetro nos ayudara a determinar el número de Reynolds, como él % de turbulencia para cada una de las velocidades de prueba, para ellos se procede de la siguiente forma

$$L_c = Dh = \frac{4(\text{cross} * \text{sec cionarea de flujo})}{\text{perimetro mojado}}$$

$$L_c = Dh = \frac{4(0.4 * 0.6)}{(0.4 + 0.6)} = 0.96$$

$$Re = \frac{\delta * V * l_c}{\mu}$$

²⁷ AEROJET [En línea] s.p.i. Disponible en internet:

<<http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node217.htm#31645> > [consulta: septiembre. 2011].

$$Re = \frac{0.94539188 \frac{Kg}{m^3} * 5 \frac{m}{s} * 0.96m}{1.7058003 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m \cdot s}} = 266025$$

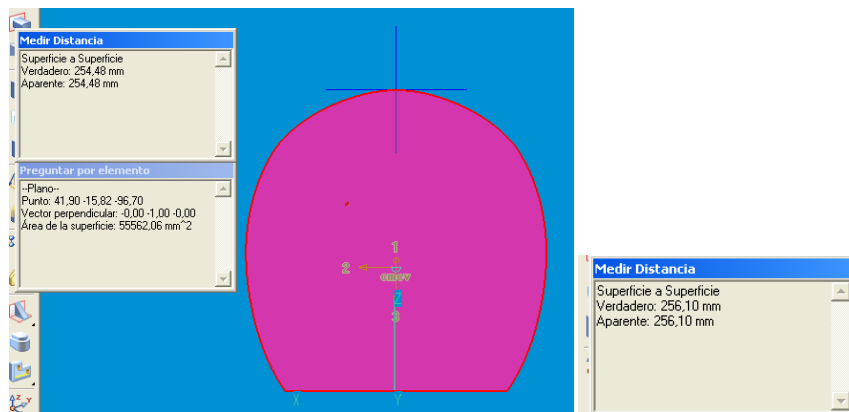
Para el cálculo del % turbulencia de un túnel de viento se obtiene una relación experimental la cual:

$$\% \text{turbulencia} = (0.96 * Re)^{-1/8} * 0.16 *$$

$$\% \text{turbulencia} = (0.96 * 266025)^{-1/8} * 0.16$$

$$\% \text{turbulencia} = 3.357\%$$

Para saber en qué condiciones se encuentra el flujo (laminar o turbulento), se halla el Número de Reynolds con las características del casco teniendo en cuenta su diámetro característico o distancia transversal vertical pues es donde hay más variación de la velocidad y cambios de las propiedades físicas en el casco (nos dimos cuenta de esto basados en las pruebas del túnel de viento) : dicha distancia se observa en la Figura donde se observa aérea mojada y distancias correspondiente a dicha área transversal



$$Re = \frac{0.94539188 \frac{Kg}{m^3} * 5 \frac{m}{s} * 0.254m}{1.7058003 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m \cdot s}} = 70519$$

De la misma forma anterior se efectúan los cálculos para las demás velocidades de prueba dichos datos se observan en la siguiente tabla.

Valores de Reynolds para determinada velocidades para un casco de motocicleta e índice de turbulencia del túnel de viento.

Velocidades m/s	Reynolds túnel	Reynolds casco	% turbulencia
5	266027	70519	0,033
10	532053	141038	0,031
15	798080	211558	0,029
20	1064106	282077	0,028
32	1702570	451323	0,026
40	2128212	564154	0,025
50	2660265	705192	0,033

Tabla cálculos de numero de Reynolds y % de turbulencia para las velocidades de prueba para modelos de solución K épsilon estándar.

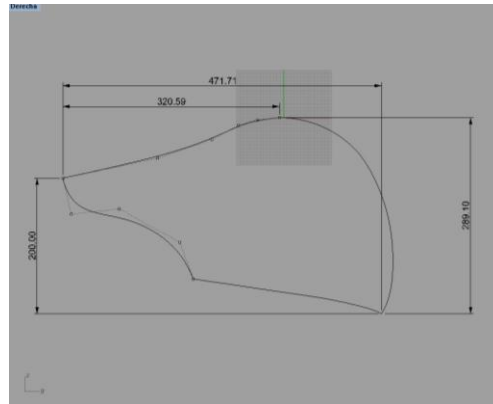
Es por este motivo que se toman los efectos turbulentos y ecuaciones y modelos de solución que conllevan para ellos uno modelos utilizado en el sector aeronáutico es K épsilon estándar para este modelo se importan el mismo tipo de mallas utilizados anteriormente en el la solución lamiar pero con unas correcciones de densidad viscosidad y % de turbulencia para cada una de las soluciones planteadas. Dichas soluciones se observan en la siguiente tabla.

Propiedades físicas para el modelos de solución K épsilon estándar

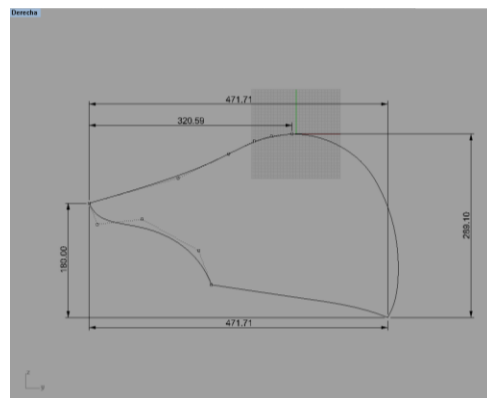
área mojada casco	0,055562
área transversa túnel	0,24
densidad	0,945392
diámetro hidráulico	0,96
viscosidad	1,7058E-05
Lc casco	0,25448

ANEXO D. DIMENSIONES DE CONTORNOS DE CASCOS 2D

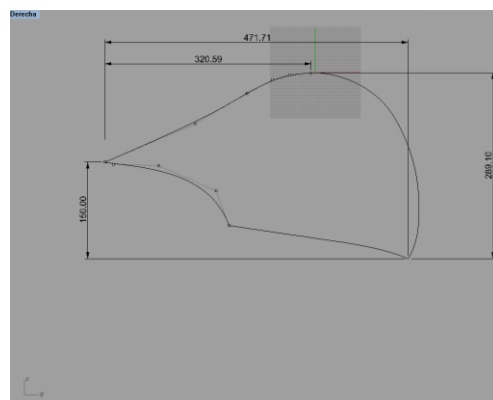
Contorno 1 a vista lateral derecha cola 200 mm altura Rhino 4.0



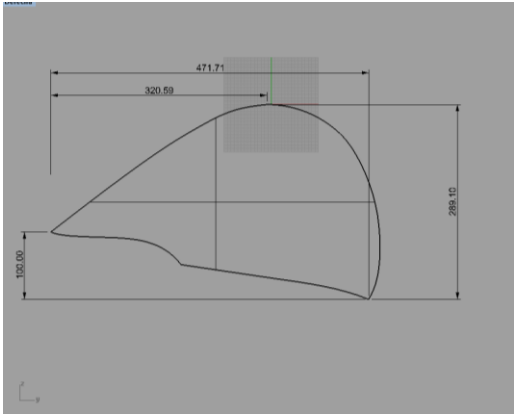
Contorno 1 b vista lateral derecha cola 180 mm altura Rhino 4.0



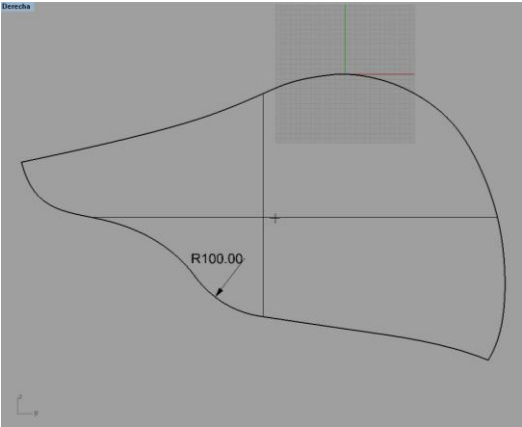
Contorno 1 c vista lateral derecha cola 150 mm altura Rhino 4.0



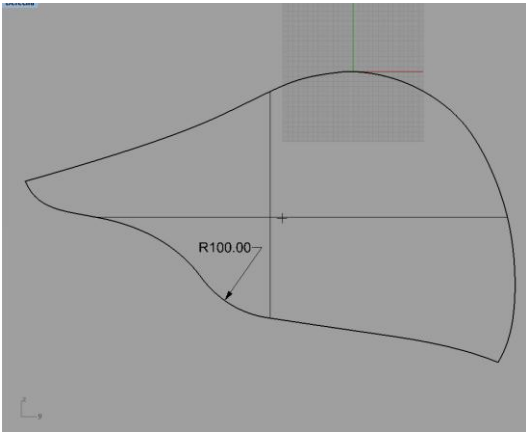
Contorno 1d vista lateral derecha cola 100 mm altura Rhino 4.0



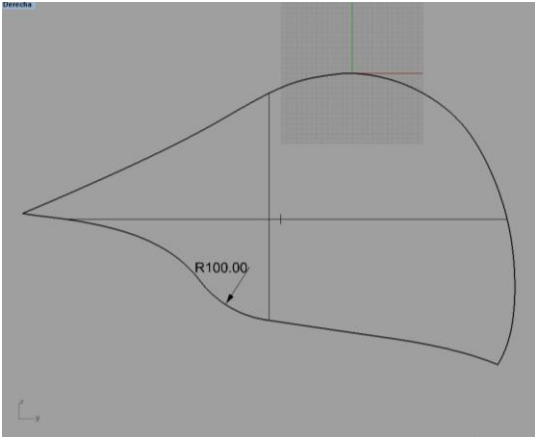
Contorno 2a vista lateral derecha cola 200 mm altura Rhino 4.0



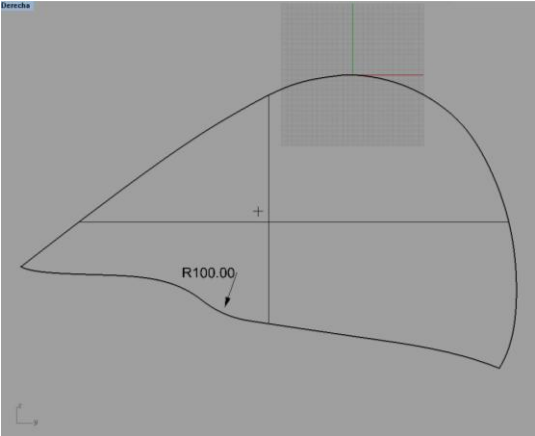
Contorno 2b vista lateral derecha cola 180 mm altura Rhino 4.0



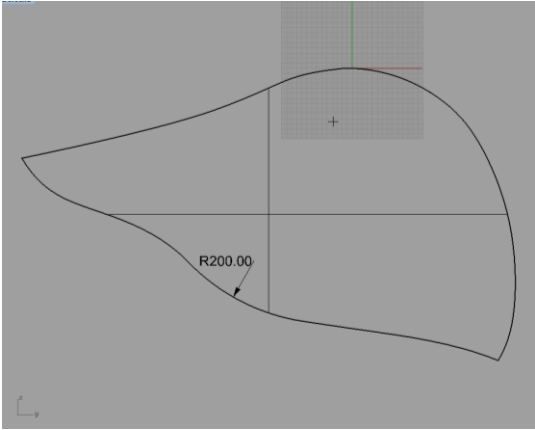
Contorno 2c vista lateral derecha cola 150 mm altura Rhino 4.0



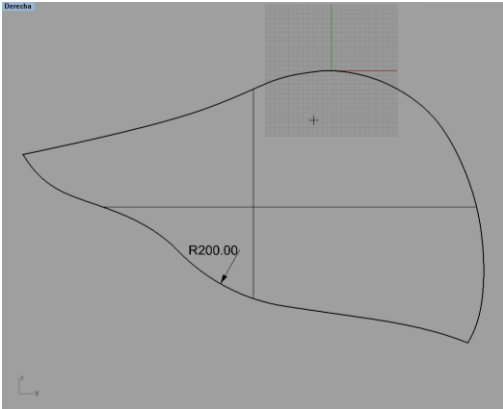
Contorno 2d vista lateral derecha cola 100 mm altura Rhino 4.0



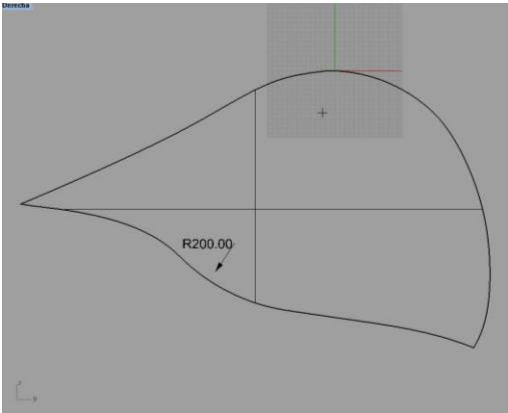
Contorno 3a vista lateral derecha cola 200 mm altura Rhino 4.0



Contorno 3b vista lateral derecha cola 180 mm altura Rhino 4.0



Contorno 3c vista lateral derecha cola 150 mm altura Rhino 4.0

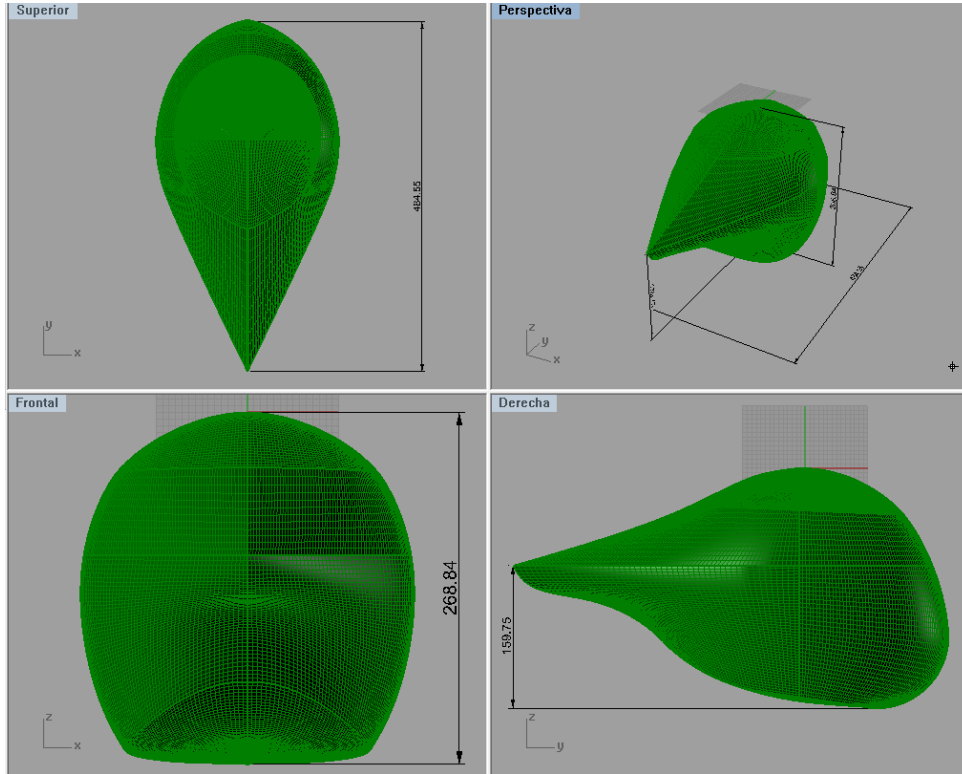


Contorno 3d vista lateral derecha cola 100 mm altura Rhino 4.0



ANEXO E. DIMENSIONES DEL CASCO MODIFICADO

Casco modificado Rhino 4.0



ANEXO F. ARTÍCULO PUBLICABLE