UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA AUTOMOTRIZ

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERIA DE UN VEHICULO DE COMPETENCIA TIPO FORMULA SAE"

TESIS DE GRADO PREVIA
A LA OBTENCIÓN DE
TÍTULO DE INGENIERO
MECANICO AUTOMOTRIZ

AUTORES:

JUAN FERNANDO PAUTA SOLANO

MIGUEL LEONARDO SANCHEZ RAMIREZ

DIRECTOR:

ING. OLENA NAIDIUK

Cuenca, Noviembre de 2014

INDICE

DECLARATORIA……...II

CERTIFICACIÓN……...III

AGRADECIMIENTO…….IV

DEDICATORIA…….....V

INDICE GENERAL……VI

INDICE DE IMAGENES……...VII

RESUMEN…….....…….....VIII

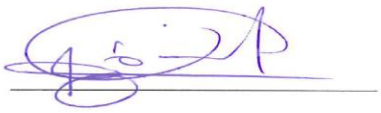
BIBLIOGRAFIA…….....IV

ANEXOS…….....X

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Juan Fernando Pauta Solano y Miguel Leonardo Sánchez Ramírez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad politécnica Salesiana según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Juan Fernando Pauta Solano Miguel Leonardo Sánchez Ramírez

CERTIFICACION

Que el siguiente trabajo de tesis ; “ Diseño y Construcción de la Carrocería de un vehículo de Competencia tipo Formula SAE”, para la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad politécnica Salesiana, sede Cuenca, realizada por los estudiantes Juan Fernando Pauta Solano y Miguel Leonardo Sánchez Ramírez, fue dirigido por mi persona.

Cuenca, 10 de noviembre de 2014

Olena Leonidivna Naidiuk

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme esta gran oportunidad en mi vida; a mis papas por su paciencia y comprensión en cada momento, a mi familia presente en los momentos más importantes, a mis profesores principalmente Ing: Olena, por su gran y desmerecido aporte en este proyecto y a mis amigos por su amistad en cada momento.

Juan Fernando Pauta S.

AGRADECIMIENTO

A la Virgen del Cisne por sus bendiciones.

A mi familia por brindarme su cariño y apoyo durante toda mi vida

A mi directora de tesis por compartir el conocimiento adquirido y a su voluntad por guiarnos en el desarrollo de la tesis.

Miguel Leonardo Sánchez.

DEDICATORIA

A mis papas por su gran entrega, esfuerzo y sacrificio, a mi abuelito Arsenio por sus enseñanzas y vivencias, a mis hermanos por su apoyo y a mis tías por sus oportunos consejos.

Juan Fernando Pauta S.

DEDICATORIA

A mi padre Miguel y a mi madre Blanca por su cariño, apoyo incondicional y compresión durante toda mi vida.

A mis hermanos Alejandrina y David por estar junto a mí en cada etapa de mi vida y recibir su apoyo y cariño

A mi sobrinos Samuel y Samanta por ser la alegría de mi vida y la fuerza de superación.

Miguel Leonardo Sánchez.

.

INDICE GENERAL

Capitulo 1: Fundamento Teórico De Los Parámetros De Diseño Y Construcción De La Carrocería De Un Vehículo De Competencia Tipo Formula Sae **1**

1 .1 Fundamento Teórico Para El Diseño **1**

1.1.1 Concepcion Del Diseño 1

1.1.1.1 Concepcion Del Diseño Exterior E Interior 2

1.1.1.2 Condiciones Para Fase De Diseño De Formas Interiores Y Exteriores 3

1.1.1.2.1 Condicines De Visibilidad 3

1.1.1.2.2 Funciones Mecanicas 3

1.1.1.2.3 Factibilidad De Fabricacion Y Facilidad De Reparacion 3

1.1.1.2.4 Condiciones De Seguridad 3

1.1.2 Fase De Diseño 3

1.1.3 Caracteristicas Generales Para El Diseño 4

1.1.4 Fase De Creacion De Maquetas 4

1.1.5 Fase De Construccion Del Prototipo 5

1.1.5.1 Aerodinamica 5

1.1.5.2 El Entorno Del Diseño Aerodinamico 6

1.1.5.3 Condiciones De Diseño 7

1.1.6 Diseño De Los Flujos De Aire 9

1.1.6.1 Flujo De Aire Interior 9

1.1.6.2 Flujo De Aire Exterior 9

1.1.6.2.1 Flujo Uniforme 10

1.1.6.2.2 Flujo Turbulento 10

1.1.7 Coeficientes Aerodinamicos 10

1.1.7.1 Cx (Coeficiente De Penetracion Aerodinamica) 10

1.1.7.2 Observaciones Para El Diseño 11
1.1.7.2.1 Zona Frontal 11
1.1.7.2.2 Zona Posterior 12
1.1.7.2.3 Línea Genérica De La Carrocería 13
1.2 Fundamento Teorico Para La Construccion 13
1.2.1 Concepcion Para La Construccion 13
1.2.1.1 Modulo Frontal 14
1.2.1.2 Modulo Central 14
1.2.2 Solicitaciones Constructivas 14
1.2.2.1 Vibraciones 15
1.2.2.2 Rigidez 15
1.2.2.3 Durabilidad 15
1.2.2.4 Facilidad De Reparacion 15
1.2.2.5 Comportamiento En Impacto 16
1.3 Conceptos Preliminares 16
1.3.1 Fluidos Compresibles 16
1.3.2 Fluidos Incompresibles 16
1.3.3 Viscosidad (μ). 17
1.3.4 Presión (P) 17
1.3.5 Densidad (P) 18
1.3.6 Ley De Los Gases Ideales 18
1.3.7 Capa Límite 18
1.3.8. Punto De Desprendimiento 19
1.3.9 Principio De Bernoulli 19
1.3.10 Línea De Corriente 20
1.3.11 Fuerzas Aerodinámicas 20

1.3.12 Coeficiente De Arrastre (Cx) 21
1.3.13 Aerodinámica De Los Vehículos 22
1.3.14 Acciones Aerodinámicas Sobre Los Cuerpos Solidos 22
1.3.14.1 Presión De Arrastre (Px) 22
1.3.14.2 Fuerza De Arrastre (Fx) 23
1.3.14.3 Fuerza De Sustentación (Fz). 25
1.3.14.4 Flujo Exterior 25
1.3.14.5 Resistencia Por Rozamiento (Rr) 26
1.3.14.6 Resistencia Por Presión (Rp) 27
1.3.14.7 Numero De Reynolds Re 29
1.3.14.8 Flujos Incompresibles 30
1.4 Ecuaciones Que Describen El Movimiento De Un Fluido 30
1.4.1 Descripcion Ecuaciones De Navier – Stokes 30
1.4.1.1 Ecuacion De Continuidad O Conservacion De Masa 31
1.4.1.2 Ecuacion De Conservacion Del Momentum 32
1.4.1.3 Ecuacion De Conservacion De La Energia 33
1.4.1.4 Ecuaciones Temporales Promediadas De Navier-Stockes (RANS) 33
1.5 Turbulencia Y Su Modelado 39
1.5.1 Turbulencia 39
1.5.2 Características De Los Flujos Turbulentos 39
1.5.2.1 Irregularidad 40
1.5.2.2 Difusividad (‘Mezcla’) 40
1.5.2.3 Disipación 41
1.5.3 Algunos Modelos Para Analisis De Turbulencia 42
1.5.3.1 Modelo K-Epsilon 42
1.5.3.2 Modelo K-Omega 42

1.5.3.3 Modelo Rng 43

1.6 Elección Del Modelo De Turbulencia 43

1.6.1 Modelo De Turbulencia K-Épsilon 43

1.6.2 Ecuacion Para La Energia Cinetica Promedio K Del Flujo 45

1.6.3 Ecuacion Para La Energia Cinetica Turbulenta *K* 46

1.6.4 Descripcion Final Del Modelo 48

Capitulo 2: Diseño Del Modelo De Carrocería Y Simulación De Su Comportamiento Aerodinámico 49

2.1 Concepcion Y Parametros Para El Diseño De La Carroceria De Un Vehiculo Formula Sae 49

2.1.1 Fundamentacion Reglamento Tecnico Formula Sae 2014 49

2.1.2 Concepcion Del Modelo 49

2.1.3 Descripcion De Los Espacios Para Carroceria 51

2.2 Diseño De Bosquejos De La Carroceria 53

2.2.1 Bosquejos Iniciales 53

2.2.2 Bosquejo Fondo Plano Y Carroceria 54

2.3 Diseño De La Carroceria En Software 55

2.3.1 Consideraciones Aerodinamicas Del Diseño De Carroceria 56

2.3.2 Influencia Zona Delantera 56

2.3.3 Influencia Zonas Laterales 57

2.3.4 Influencia Zona Posterior 58

2.3.4.1 Tipo Cuadrados 58

2.3.4.2 Tipo Inclinados 58

2.3.4.3 Tipo Escalon 59

2.3.4.4 Tabla Comparativa 59

2.3.4 Influencia Zona Inferior 60

2.3.5 Diseño Fondo Plano 60

2.4 Introduccion Dinamica De Fluidos Computacional (CFD) 61

2.4.1 Preproceso 61

2.4.1.1 Dominio 62

2.4.1.2 Mallado 62

2.4.1.3 Capa Límite 63

2.4.1.4 Discretizacion Del Problema 63

2.4.1.4.1 Funciones De Discretizacion Existentes 64

2.4.1.4.1.1 Discretizacion Espacial 64

2.4.1.5 Elementos 64

2.4.1.5.1 Tipos De Elementos 65

2.4.1.5.1.1 Elementos Unidimensionales 65

2.4.1.5.1.1.1 Formas Lineales 66

2.4.1.5.1.2 Elementos Bidimensionales 66

2.4.1.5.1.2.1 Formas Triangulares 66

2.4.1.5.1.2.2 Formas Rectangulares 66

2.4.1.5.1.3 Elementos Tridimensionales 67

2.4.1.5.1.3.1 Prismas Rectangulares 67

2.4.1.5.1.3.2 Prismas Triangulares 68

2.4.1.5.1.3.3 Forma Tipo Tetraedro 69

2.4.1.5.2 Eleccion Del Tipo De Elemento Final Descripcion 69

2.4.2 Resolucion 69

2.4.2.1 Condiciones De Contorno 70

2.4.2.2 Descripcion Del Metodo De Volumenes Finitos (FVM) 70

2.4.2.3 Error Deseado 71

2.4.3 Postproceso 72

2.4.3.1 Analisis Convergencia 72

2.5 Analisis De Las Geometrias De Carroceria ____ 72

2.5.1 Carroceria Con Pontones Laterales Tipo Trapecio ____ 73

2.5.1.1 Dominio: ____ 73

2.5.1.2 Mallado: ____ 74

2.5.1.3 Resolucion: ____ 74

2.5.1.4 Resultados: ____ 75

2.5.2 Carroceria Con Pontones Laterales Semi-Oblicuo ____ 76

2.5.2.1 Dominio: ____ 76

2.5.2.2 Mallado: ____ 76

2.5.2.3 Resolucion: ____ 77

2.5.2.4 Resultados: ____ 77

2.5.3 Carrocería Con Pontones Laterales Rectangular ____ 78

2.5.3.1 Dominio: ____ 78

2.5.3.2 Mallado: ____ 79

2.5.3.3 Resolucion: ____ 79

2.5.3.4 Resultados: ____ 80

2.5.4 Carrocería Con Pontones Laterales Triangulares ____ 81

2.5.4.1 Dominio: ____ 81

2.5.4.2 Mallado: ____ 81

2.5.4.3 Resolucion: ____ 82

2.5.4.4 Resultados: ____ 83

2.5.5 Comparación De Presion En Carrocerias ____ 83

2.5.6 Comparación De Velocidad De Flujo En Carrocerias ____ 86

2.5.7 Descripcion Final ____ 88

2.5.8 Comparación De Coeficiente (Cx) ____ 89

2.5.9 Validación De Datos De La Carroceria ____ 90

2.5.9.1 Procedimiento: 90
2.5.9.2 Suposisiones: 90
2.5.9.3 Solucion: 91
2.5.9.4 Planteamineto: 91
2.5.9.5 Desarrollo: 92
2.5.9.6 Descripcion Final: 93
2.6 Analisis De Geometrias De Fondo Plano 93
2.6.1 Fondo Plano Con Difusores Tipo Semi-Circulo 94
2.6.1.1 Dominio: 94
2.6.1.2 Mallado: 95
2.6.1.3 Resolucion: 96
2.6.1.4 Resultados: 96
2.6.2 Fondo Plano Con Difusores Rectos 97
2.6.2.1 Dominio: 97
2.6.2.2 Mallado: 97
2.6.2.3 Resolucion: 98
2.6.2.4 Resultados: 98
2.6.3 Fondo Plano Con Entradas Expandidas 99
2.6.3.1 Dominio: 99
2.6.3.2 Mallado: 99
2.6.3.3 Resolucion: 100
2.6.3.4 Resultados: 100
2.6.4 Comparación De Presiones Fondo Plano 101
2.6.5 Comparación Velocidades Fondo Plano 103
2.6.6 Descripcion Final: 105
2.6.7 Validacion De Resultados De Geometria De Fondo Plano 105

2.6.7.1 Procedimiento: 105
2.6.7.2 Suposisiones: 107
2.6.7.3 Desarrollo: 107
2.6.7.4 Descripcion Final: 109
Capíulo 3. Construcción De La Carrocería Y Fondo Plano Del Vehículo 110
3.1 Elección Del Material 110
3.2 Materiales Más Utilizados En Carrocerías Para Prototipos Formula Sae 110
3.2.1 Aluminio 110
3.2.2 Polímeros 111
3.2.3 Fibra De Carbono 112
3.2.4 Fibra De Vidrio 113
3.2.5 Matriz De Decisión De Materiales 114
3.3 Proceso De Fabricación 117
3.4 Construcción De Moldes 117
3.4.1 Construcción Molde Nariz Frontal 118
3.4.2 Construcción Molde Pontones Laterales 123
3.4.3 Construcción Molde Para El Fondo Plano 127
3.5 Construcción De Las Matrices 130
3.5.1 Construccion Matriz Frontal 130
3.5.2 Construcción Matriz Pontones 135
3.6 Construccion Piezas Finales 138
3.6.1 Construccion Nariz Frontal 138
3.6.2 Construccion Pontones Laterales 143
3.6.3 Construcción Fondo Plano 146
3.7 Ubicación De Los Soportes De La Carroceria (Anclajes) 150
3.8 Ensamblaje Carroceria 152

Capitulo 4. Análisis Del Costo - Beneficio Final Del Modelo Alcanzado **156**

4.1 Costo De Produccion **156**

4.2 Gastos Directos E Indirectos De Fabricación **156**

4.2.1 Gastos Directos De Fabricacion 157

4.2.1.1 Gastos Directos Materia Prima 160

4.2.1.2 Gastos Directos Materia Prima Para Acabado 163

4.2.1.3 Costo De La Mano De Obra Directa 164

4.2.2 Gastos Indirectos De Fabricación 164

4.2.2.1 Costos De Maquinaria 165

4.2.2.2 Costos Herramienta 165

4.3 Costo Total De Producción **165**

Conclusiones **167**

Recomendaciones **169**

Bibliografia **170**

INDICE DE IMÁGENES Y TABLAS

CAPITULO1

- 1 Figura 1.1: Bosquejo Formula SAE. _____ 1
- 2 Figura 1.2: Formula SAE. _____ 6
- 3 Figura 1.3: Comparación visual de la resistencia al avance en tres formas aerodinámicas diferentes. _____ 8
- 4 Figura 1.4: Turbulencias que generan los componentes exteriores vehículo de F1._ 8
- 5 Figura 1.5: Turbulencias que generan los componentes exteriores vehículo._____ 12
- 6 Figura 1.6: Comportamiento aerodinámico posterior de un vehículo. _____ 12
- 7 Figura 1.7: Fuerza Aerodinámica._____ 21
- 8 Figura 1. 8: Flujo alrededor del cilindro. _____ 24
- 9 Figura 1.9: Rozamiento generado por un fluido sobre un cuerpo. _____ 27
- 10 Figura 1.10: Rozamiento generado por un fluido sobre un cuerpo. _____ 28
- 11 Figura 1.11: Ecuaciones promediadas de Navier - Stockes. _____ 37
- 12 Figura 1.12: Irregularidad de un flujo. _____ 40
- 13 Figura 1.13: Difusividad de la mezcla en la frontera. _____ 41
- 14 Figura 1.14: Disipación de un flujo. _____ 41

CAPITULO 2

- 15 Figura 2.1: Vista lateral chasis. _____ 50
- 16 Figura 2.2: Vista superior chasis. _____ 50
- 17 Figura 2.3: Concepción de la carrocería (vista lateral). _____ 52
- 18 Figura 2.4: Concepción de la carrocería (vista superior). _____ 52
- 19 Figura 2.5: Boceto a mano dela carrocería del vehículo. _____ 53
- 20 Figura 2.6: Boceto a mano del carrocería del vehículo. _____ 54
- 21 Figura 2.7: Boceto final de la carrocería del vehículo. _____ 54
- 22 Figura 2.8: Diseño de carrocería sobre el chasis. _____ 55
- 23 Figura 2.9: Diseño lateral sobre chasis._____ 57
- 24 Figura 2.10: Diseño pontones laterales con superficie curva._____ 57
- 25 Figura 2.11: Perfil Cuadrado. _____ 58
- 26 Figura 2.12: Perfil Inclinado. _____ 58

- 27 Figura 2.13: Pontones laterales con superficie curva. 59
- 28 Figura 2.14: Influencia de la parte posterior en los coeficientes. 59
- 29 Figura 2.15: Pontones laterales con perfil cuadrado e inclinado. 60
- 30 Figura 2.16: Diseño Fondo plano y difusores posteriores. 61
- 31 Figura 2.17: Condiciones de Frontera. 62
- 32 Figura 2.18: Refinado de la malla. 63
- 33 Figura 2.19: Distribución de los nodos en un dominio unidimensional. 66
- 34 Figura 2.20: Elementos tipo triangulo (a) lineal, (b) cuadrático y (c) cubico. 66
- 35 Figura 2.21: Elemento rectangular. 67
- 36 Figura 2.22: Prismas rectos de nodos en el contorno con elementos de cara y línea. 68
- 37 Figura 2.23: Elementos prisma triangulares (a) lineal (b) cuadrático y (c) cubico. 68
- 38 Figura 2.24: Figura tetraédrica. 69
- 39 Figura 2.25: Medidas dominio general. 73
- 40 Figura 2.26: Dominio carrocería con laterales tipo trapecio. 73
- 41 Figura 2.27: Mallado carrocería con laterales tipo trapecio. 74
- 42 Figura 2.28: Condiciones de frontera. 74
- 43 Figura 2.29: Vista lateral carrocería con laterales tipo trapecio. 75
- 44 Figura 2.30: Dominio carrocería con laterales tipo semi-oblicuo. 76
- 45 Figura 2.31: Mallado carrocería con laterales tipo semi-oblicuo. 76
- 46 Figura 2.32: Vista lateral carrocería con laterales tipo semi-oblicuo. 77
- 47 Figura 2.33: Dominio carrocería con laterales tipo rectangular. 78
- 48 Figura 2.34: Mallado carrocería con laterales tipo rectangular. 79
- 49 Figura 2.35: Vista lateral carrocería con laterales tipo rectangular. 80
- 50 Figura 2.36: Dominio carrocería con laterales tipo triangular. 81
- 51 Figura 2.37: Mallado carrocería con laterales tipo triangular. 81
- 52 Figura 2.38: Vista lateral carrocería con laterales tipo triangular. 83
- 53 Figura 2.39: Vista frontal de las carrocerías. 84
- 54 Figura 2.40: Curvas de comportamiento de presión de carrocerías. 85
- 55 Figura 2.41: Perspectiva general de las carrocerías. 86
- 56 Figura 2.42: Curvas de comportamiento de velocidad de carrocerías. 87
- 57 Tabla 2.43: Cuadro comparativo. 89
- 58 Tabla 2.44: Cuadro de pruebas de desplazamiento. 90

- 59 Figura 2.45: Fondo Plano Formula 1. 93
- 60 Figura 2.46: Medidas dominio general. 94
- 61 Figura 2.47: Dominio fondo plano con difusores tipo semi-circulo. 95
- 62 Figura 2.48: Mallado fondo plano con difusores tipo semi-círculo. 95
- 63 Figura 2.49: Vista frontal fondo plano con difusores tipo semi-circulo. 96
- 64 Figura 2.50: Dominio fondo plano con difusores tipo recto. 97
- 65 Figura 2.51: Mallado fondo plano con difusores tipo recto. 97
- 66 Figura 2.52: Vista frontal fondo plano con difusores tipo recto. 98
- 67 Figura 2.53: Dominio fondo plano con entradas expandidas. 99
- 68 Figura 2.54: Mallado fondo plano con entradas expandidas. 99
- 69 Figura 2.55: Vista frontal fondo plano con entradas expandidas. 100
- 70 Figura 2.56: Vista inferior de los Fondos Planos. 101
- 71 Figura 2.57: Curvas de comportamiento de presión de los fondos planos. 102
- 72 Figura 2.58: Perspectiva de los fondos planos. 103
- 73 Figura 2.59: Curvas de comportamiento de velocidades de los fondos planos. 104
- 74 Figura 2.60: Efecto Venturi. 105
- 75 Figura 2.61: Efecto Venturi fondo plano. 106
- 76 Figura 2.62: Área frontal (A1). 108
- 77 Figura 2.63: Área Posterior (A2). 108
- 78 Figura 2.64: Carrocería y fondo plano final. 109

CAPITULO3

- 79 Figura 3.1: Tabla de propiedades físicas y mecánicas del aluminio 111
- 80 Figura 3.2: Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de carbono. 113
- 81 Figura 3.3: Tabla de las propiedades de la fibra de vidrio. 114
- 82 Tabla 3.4: Matriz de decisión. 116
- 83 Figura 3.5: Bloque de espuma de poliuretano. 118
- 84 Figura 3.6: División de paneles en el molde. 119
- 85 Figura 3.7: Unión de paneles superior y paneles internos. 119
- 86 Figura 3.8: Panel superior y panel inferior. 120
- 87 Figura 3.9: Unión de paneles superior e inferior. 120
- 88 Figura 3.10: Colocación de resina de poliuretano. 121
- 89 Figura 3.11: Tipos de lijas para el desbastado y pulido. 121

- 90 Figura 3.12: Masillado del molde y corrección de fallas. 122
- 91 Figura 3.13: Corrección de fallas. 122
- 92 Figura 3.14: Aspersión de la pintura base. 123
- 93 Figura 3.15: Construcción del armazón interno de los pontones izquierdo y derecho. 124
- 94 Figura 3.16: Colocado de los paneles superior y lateral. 125
- 95 Figura 3.17: Colocado de las caras frontales. 125
- 96 Figura 3.18: Acabado de las aristas de los moldes laterales. 126
- 97 Figura 3.19: Aplicación de la pintura de fondo o base para el acabado de los moldes. 127
- 98 Figura 3.20: Trazado de piezas sobre cartón prensado. 127
- 99 Figura 3.21: Ensamble de los paneles del fondo plano. 128
- 100 Figura 3.22: Ensamble difusores. 128
- 101 Figura 3.23: Unión molde fondo plano. 128
- 102 Figura 3.24: Corrección de fallas. 129
- 103 Figura 3.25: Aplicación de la pintura de fondo. 129
- 104 Figura 3.26: Recorte de las fibras de vidrio. 130
- 105 Figura 3.27: Aplicado de desmoldante. 131
- 106 Figura 3.28: Aplicación del gelcoat. 131
- 107 Figura 3.29: Colocación de la fibra de vidrio. 132
- 108 Figura 3.30: Desmolde de la pieza. 133
- 109 Figura 3.31: Limpieza de la pieza. 133
- 110 Figura 3.32: Colocado de los soportes transversales en la pieza matriz. 134
- 111 Figura 3.33: Aplicado de la cera desmoldante. 135
- 112 Figura 3.34: Aplicación de la cera desmoldante. 136
- 113 Figura 3.35: Aplicación del gelcoat. 136
- 114 Figura 3.36: Laminación de la fibra de vidrio. 137
- 115 Figura 3.37: Laminación de la fibra de vidrio. 137
- 116 Figura 3.38: Aplicado de gelcoat a lo largo de la superficie interior de la matriz. 138
- 117 Figura 3.39: Aplicado de la fibra de vidrio a lo largo de la superficie interior de la matriz. 139

- 118 Figura 3.40: Aplicado de la fibra de vidrio a lo largo de la superficie interior de la matriz. 139
- 119 Figura 3.41: Pieza nariz frontal. 140
- 120 Figura 3.42: Aplicado de la pintura de fondo previo al proceso de pintura. 141
- 121 Figura 3.43: Ubicación de los putos de corte 141
- 122 Figura 3.44: Recorte de las piezas 142
- 123 Figura 3.45: Pintado de las piezas. 142
- 124 Figura 3.46: Aplicado de gelcoat en la superficie interior de los pontones. 143
- 125 Figura 3.47: Escarmenado de la fibra de vidrio. 144
- 126 Figura 3.48: Laminación de la fibra de vidrio. 144
- 127 Figura 3.49: Pieza final pontón derecho y pontón izquierdo. 145
- 128 Figura 3.50: Pieza aplicada pintura tipo fondo. 145
- 129 Figura 3.51: Pieza terminada. 146
- 130 Figura 3.52: Aplicación de fondo. 147
- 131 Figura 3.53: Aplicación de la pasta de resina y carbonato de calcio. 147
- 132 Figura 3.54: Laminado del fondo plano en fibra de vidrio. 148
- 133 Figura 3.55: Desmolde del fondo plano. 149
- 134 Figura 3.56: Fondo plano final. 149
- 135 Figura 3.57: Anclajes de la carrocería frontal. 150
- 136 Figura 3.58: Anclajes pontones laterales. 151
- 137 Figura 3.59: Anclajes del fondo plano. 151
- 138 Figura 3.60: Platina y tuerca soldada. 152
- 139 Figura 3.61: Platinas soldadas al chasis. 152
- 140 Figura 3.62: Platinas soldadas al chasis. 153
- 141 Figura 3.63: Sujeciones superiores pontones laterales. 153
- 142 Figura 3.64: Disposición superiores laterales. 154
- 143 Figura 3.65: Sujetadores de los pontones y fondo plano. 154
- 144 Figura 3.66: Tapas laterales. 155
- 145 Figura 3.67: Ensamblaje completo. 156

CAPITULO 4

- 146 Tabla 4.1: Tabla de cantidad de materia prima empleada. _____ 159
- 147 Tabla 4.2: Tabla de la cantidad y costo de los materiales utilizados por pieza. 161
- 148 Tabla 4.2: Tabla de cantidad y costo final. _____ 162
- 149 Tabla 4.3: Tabla de materia prima para acabado. _____ 163
- 150 Tabla 4.4: Tabla de insumos. _____ 163
- 151 Tabla 4.5: Tabla de costo de materia prima total. _____ 164
- 152 Tabla 4.6: Costo de mano de obra. _____ 164
- 153 Tabla 4.7: Tabla costos maquinaria. _____ 165
- 154 Tabla 4.8: Tabla costos herramientas. _____ 165
- 155 Tabla 4.9: Costo total de producción. _____ 166

CAPITULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA TIPO FORMULA SAE

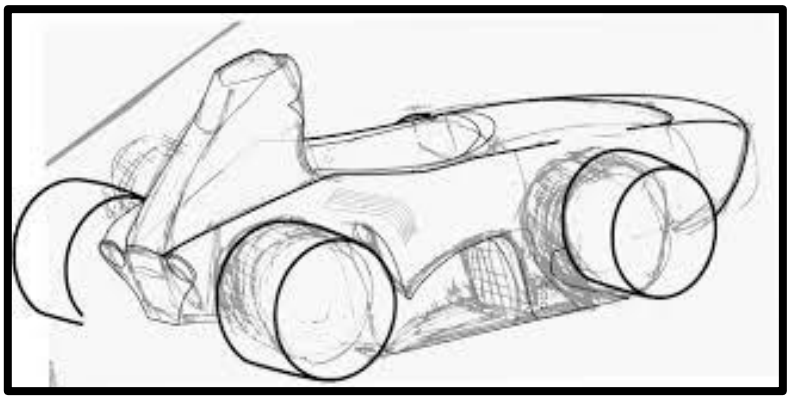
1 .1 FUNDAMENTO TEÓRICO PARA EL DISEÑO

Para realizar el estudio del diseño, construcción y análisis aerodinámico para la carrocería de un vehículo FORMULA SAE se requiere de conceptos técnicos básicos para su fundamentación que permiten una mejor concepción y compresión del problema a desarrollar.

1.1.1 CONCEPCION DEL DISEÑO

El concepción fundamental para la creación de la carrocería de un vehículo de competencia tipo formula SAE es su funcionalidad y estética ya sea en su aspecto externo como interno, ya que de su acierto depende el éxito en pista así como la aceptación visual en el concurso de participación.

Es en esta parte donde se realiza los primeros bosquejos a partir de trazos a mano con la utilización de elementos clásicos como el lápiz, plantillas de reglas curvas, la propia hoja para el dibujo, etc. como se muestra en la figura 1.1. La labor concluye con la mejor propuesta de diseño en dicho modelo, que en este caso es la funcionalidad para superar las críticas de jueces, técnicos y más aun la viabilidad y facilidad para la construcción.



- 1 Figura 1.1: Bosquejo Formula SAE.

Fuente: http://www.thanosdrivas.ca/project/fsae-concept-drawing/FSAE Concept Drawing/2014

En el diseño de la carrocería se especifican las dimensiones del vehículo con mayor atención en el interior del mismo, para ello se divide al vehículo en tres zonas que se diferencian: la zona del motor, zona del *cockpit* o habitáculo del piloto y la zona de los pontones laterales de refrigeración.

A continuación de ello se modela las dimensiones necesarias para la disposición del habitáculo del piloto de manera ergonómica y establecida en el reglamento de competencia de Formula SAE, así como también las medidas de referencia del chasis del vehículo para el modelado del diseño de la carrocería.

Por lo tanto la propuesta del diseño exterior de la carrocería se realiza mediante la ayuda del software de diseño ANSYS tomando en cuenta los siguientes criterios de diseño:

- Dimensiones totales del vehículo.
- Dimensiones del habitáculo del piloto.
- Dimensiones del cofre motor.
- Importancia del coeficiente Aerodinámico.

1.1.1.1 CONCEPCION DEL DISEÑO EXTERIOR E INTERIOR

Para las consideraciones de las medidas exteriores e interiores de la carrocería para un vehículo de competencia entre otros componentes se toma en cuenta los siguientes factores[1]:

- Las exigencias aerodinámicas.
- Concepción del *cockpit* (habitáculo del piloto) y espacio del puesto de conducción.
- La altura libre de la carrocería sobre el suelo.
- La posición y el tamaño del depósito de combustible.
- Las necesidades de espacio entre el chasis y las ruedas.
- La ubicación de los elementos mecánicos: suspensión, motor, radiador, transmisión, etc.

[1] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

1.1.1.2 CONDICIONES PARA FASE DE DISEÑO DE FORMAS INTERIORES Y EXTERIORES

1.1.1.2.1 CONDICINES DE VISIBILIDAD

El diseño y disposición de los soportes de fijación de la carrocería en el contorno del *cockpit* del piloto disponen del campo de visión necesario y claramente especificado en el reglamento de formula SAE.

1.1.1.2.2 FUNCIONES MECANICAS

Las diferentes partes de la carrocería en torno al *cockpit* del piloto son desmontables ya que debe permitir un fácil acceso hacia los diferentes elementos de accionamiento mecánico y de control del vehículo.

1.1.1.2.3 FACTIBILIDAD DE FABRICACION Y FACILIDAD DE REPARACION

Los materiales disponibles en el mercado para la fabricación de la carrocería deben ser de fácil acceso y complementarse a los métodos necesarios de construcción considerando también un futuro daño en cualquier parte de la misma y que a futuro deben ser hábiles a ser reparados de una manera fácil, económica y sencilla, ya que son elementos que se encuentran fácilmente expuestos en muchos de los casos a contactos y golpes en la pista.

1.1.1.2.4 CONDICIONES DE SEGURIDAD

El método de deformación de los tres elementos (Frontal y dos costados) de la carrocería por separado, la forma y disposición de los refuerzos garantiza el correcto comportamiento para la seguridad del piloto en caso de colisión para salvaguardar su estado físico de la mejor forma.

1.1.2 FASE DE DISEÑO

Una vez que se ha definido o se ha conceptualizado el vehículo se procede con la fase de diseño en la cual se emplean recursos de bosquejo y software de diseño. Para este caso se aplica el Diseño Asistido por Ordenador (DAO) usando el programa para diseño y simulación ANSYS 14.5. Con el uso de este programa informático se puede sustituir la elaboración de maquetas físicas por maquetas “numéricas” partiendo del valor de los parámetros geométricos que se obtienen en la etapa de concepción.

Con la aplicación de este software para diseñar y simular se evita la perdida de varias horas importantes de trabajo en caso de que no se tuviera, para que analice la diferente cantidad de cálculos matemáticos y costosas pruebas de varios diseños preliminares al diseño final.

1.1.3 CARACTERISTICAS GENERALES PARA EL DISEÑO

A partir de las primeras fases para el estudio, la simulación digital permite optimizar la construcción de la carrocería mediante un buen concepto y un correcto reparto de la distribución del espacio para el diseño y que posee las siguientes características[2]:

- Resultar lo más estético posible
- La transición a la etapa de fabricación debe ser lo más fácil posible
- Debe garantizar una alta funcionalidad
- Debe poseer un bajo número de piezas constitutivas y resultar en un desglose sencillo
- Tener un alto número de piezas y partes aprovechables para otros modelos futuros
- Poseer un alto número de piezas reciclables en caso de ya no ser útiles.
- Tener una buena relación de calidad/precio

1.1.4 FASE DE CREACION DE MAQUETAS

Para percibir una mejor proporción del vehículo, esta fase consiste en "generar un volumen" al trazo de diseño. Como resultado se construyen maquetas de cartón a tamaño real.

En esta fase se determina la agresividad de las formas curvas y proporción de las líneas de trazo. La fabricación de las maquetas permite seleccionar las ideas de manera final como también para analizar visualmente el comportamiento aerodinámico de la carrocería y que en este proyecto es el factor fundamental para el diseño, sabiendo que es un vehículo de competencia Formula SAE[3].

[2] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010
[3] AGUEDA, Eduardo. Op. Cit. p. 13.

Más adelante se observa la construcción de dichas maquetas construidas en cartón prensado a las cuales debe "sacarse" un molde exterior o matriz para la elaboración de la pieza final.

1.1.5 FASE DE CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

En esta fase se requiere de la máxima precisión para la construcción ya que el traslado de datos del plano en 2D a las matrices para el modelo real es imprescindible y que solo se consigue aplicando la máxima precisión y que en el caso del proyecto se realiza de manera manual o artesanal apegándose a las medidas previamente diseñadas en el software[4].

1.1.5.1 AERODINAMICA

Es el área de la mecánica de fluidos que se preocupa del movimiento del aire y otros fluidos gaseosos, que se entiende como el estudio de las acciones ejercidas por el aire sobre cuerpos solidos inmersos en él. El estudio de la aerodinámica resulta vital para adquirir un vehículo altamente competitivo para una competencia de Formula SAE.

Se conoce que el aire condiciona el rendimiento, consumo y causa otros problemas como[5]:

- Dependencia de autonomía / consumo.
- Involucra el comportamiento dinámico con un limitado empuje de elevación a altas velocidades.
- Condiciona el habitáculo del piloto acorde al tamaño

- Por ellos el trabajo consiste en conseguir el valor más bajo de resistencia aerodinámica evitando cualquier efecto negativo creado por la aerodinámica.

[4] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

[5] AGUEDA, Eduardo. Op. Cit. p.34.

1.1.5.2 EL ENTORNO DEL DISEÑO AERODINAMICO

Al emprender el diseño de un nuevo concepto de vehículo tipo Formula SAE como se muestra en la figura 1.2, hay que referirse a la habitabilidad, desempeño, ergonomía, aerodinámica y seguridad. La importancia que cada uno de ellos se logra genera una buena concepción del prototipo.

En la búsqueda del diseño óptimo que contenga los principios descritos, existe la aparición de nuevos materiales en la construcción de carrocerías con los que se consigue cada vez conjuntos más armoniosos al diseñar un nuevo concepto de vehículo.

Se tiene que tomar en cuenta una serie de condicionantes como:

- Las necesidades en la resistencia del material
- Disponer de flujos de aire para la refrigeración del motor
- Espacio del escape
- El grado de ergonomía y disponibilidad interior en función del diseño de la carrocería
- Uso de neumáticos más anchos
- Costos de producción
- Estética

- 2 Figura 1.2: Formula SAE.

Fuente: Motor sport, (2014), http://motorsport.unibo.it/en/formula-sae-en.

Cabe mencionar que las creaciones como los concept car realizado por los departamentos de diseño de grandes marcas de autos solo como ejercicios y propuestas de diseño que pretenden crear atracción y estilo adelantándose a los gustos de los clientes no resultan al momento de su construcción, lo que para el caso de este proyecto no es una prioridad pero si representa una innovación en el área estética del diseño[6].

Para este proyecto el principal apartado es conseguir una carrocería aerodinámicamente, ligera, resistente y segura. Su diseño debe permitir que la resistencia del aire a la penetración del vehículo sea mínima y tenga una buena estabilidad a elevada velocidad.

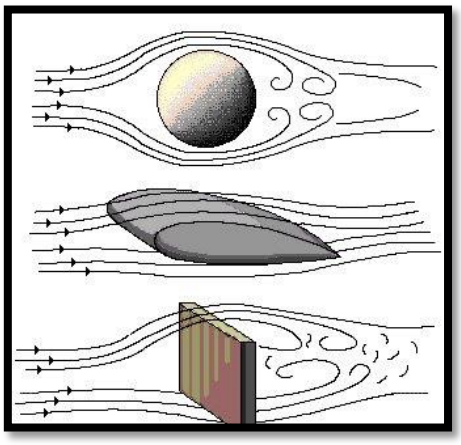
"Se ha de tomar en cuenta que la aerodinámica propiamente dicha representa el 40 % de la eficiencia total del automóvil y que solamente el motor puede igualar este valor, ya que el restante representa el 20%."[7]

1.1.5.3 CONDICIONES DE DISEÑO

La forma que un cuerpo debe tomar para conseguir una aerodinámica óptima, es semejarse a una gota de agua ya que describe perfectamente la simetría y el flujo ideal del aire a su alrededor obteniendo la menor resistencia posible; pero teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto aplicado a un vehículo se tendría una escasa habitabilidad interior por lo que la búsqueda del diseño ideal debe conjugar la forma y el espacio necesario como se muestra en la figura 1.3.

Otra de las consideraciones para el diseño es que también es importante las proporciones del vehiculo respecto a la ancho y longitud que deben estar alrededor del 1/3 para conseguir una resistencia minima, por lo que en definitiva se pretende es crear una forma estilizada que limite las turbulencias que se forman en la parte posterior, que dicho sea de paso esta zona es mas importante que la zona delantera en lo que a aerodinámica se refiere[8].

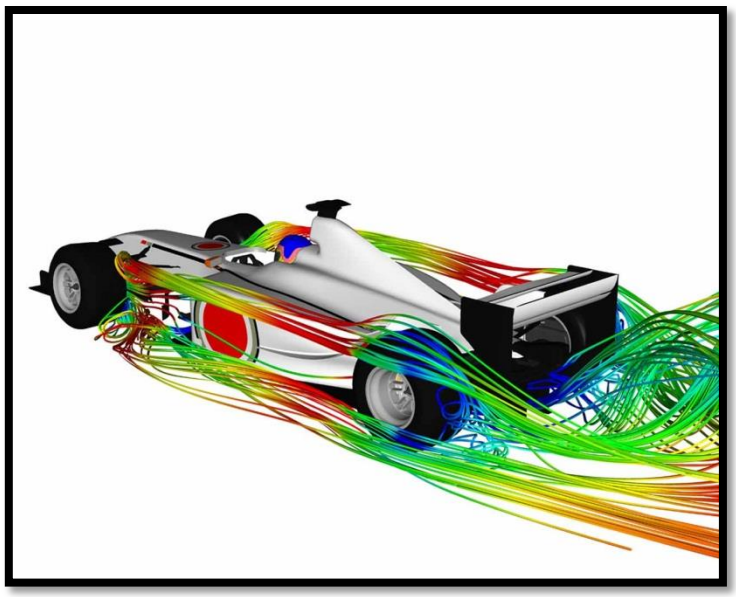
[6] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010
[7] SCALABRONI, Enrique H. Aerodinámica del automóvil de competición, 2005, *p. introducción*
[8] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010



- 3 Figura 1.3: Comparación visual de la resistencia al avance en tres formas aerodinámicas diferentes.

Fuente: Grupo24, Bicicleta aerodinámica (2014), http://ich1102g24.blogspot.com/.

Por lo tanto la superficie optima de la carrocería es aquella que pueda mantener un flujo laminar de aire en toda su superficie, evitando la aparición de turbulencias como se muestra en la figura 1.4 y que por lo tanto, en la fase de diseño se procura que los elementos que puedan provocar alteraciones en el flujo de aire se encuentren al mismo nivel de la carroceria.



- 4 Figura 1.4: Turbulencias que generan los componentes exteriores vehículo de F1.

Fuente: Tomas Gómez Morales, Estructuras del vehículo. 2010

1.1.6 DISEÑO DE LOS FLUJOS DE AIRE

En el contacto entre el vehiculo y el aire se presentan dos flujos de aire diferentes[9]:

- Flujo de aire interior
- Flujo de aire exterior

1.1.6.1 FLUJO DE AIRE INTERIOR

Se refiere al aire de ventilación que tiene el habitáculo del piloto y el aire utilizado para la admisión y ventilación del motor. Presume de un 20% de la resistencia aerodinámica, condicionando el confort climático del piloto como el rendimiento térmico del motor.

- Desde el punto de ventilación, la aerodinámica interior debe estar creada para:
- Mantener la temperatura constante en el interior del habitaculo del piloto independientemente de la temperatura exterior y de la velocidad del vehiculo.
- Intercambiar el aire sin empobrecer su corriente interna.
- No alterar la humedad interior.

1.1.6.2 FLUJO DE AIRE EXTERIOR

Se refiere al aire que circula sobre la carroceria, como también el que comprende entre la misma y el suelo; enfatizándose como el principal elemento de resistencia aerodinámica.

Los factores que mas influyen decisivamente son:

- El tamaño y forma de la carroceria.
- Velocidad relativa del vehiculo respecto al avance.
- La densidad misma del aire.
- Tipo de superficie de la carroceria que determina la friccion con la capa de aire en contacto a ella.

[9] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

1.1.6.2.1 FLUJO UNIFORME

Cada particula debe desplazarse con respecto a la carroceria en la misma dirección y velocidad que las que le rodean, este desplazamiento es muy fluido que se lo conoce como flujo laminar[10].

1.1.6.2.2 FLUJO TURBULENTO

Despues que el fluido deja el flujo laminar, el aire se transforma en flujo turbulento, debido a que existen partículas de aire que pierden velocidad respecto a las demás y que incluso cambian de dirección.

1.1.7 COEFICIENTES AERODINAMICOS

EL comportamiento dinamico de una carroceria esta influenciado por la resistencia y fuerzas aerodinámicas originadas por el desplazamiento del vehiculo.

Para comprender el comportamiento del mismo se han definido una serie de coeficientes aerodinámicos que son parámetros que analizan las cualidades y comportamiento de cada vehiculo usándose dichos coeficientes como valores de referencia para el estudio[11].

1.1.7.1 CX (COEFICIENTE DE PENETRACION AERODINAMICA)

Hace referencia a un cuerpo que se desplaza en sentido de atravesar la masa de aire que lo rodea invirtiendo una cierta cantidad de potencia para atravesarlo.

La potencia invertida o potencia aerodinámica, esta en relacion del volumen del cuerpo, de tal forma que cuanto mas aerodinámica sea su perfil o forma mejor será su capacidad de penetración aerodinámica y por tanto menor será la potencia invertida para vencer la resistencia del aire para su trayecto.

De esta aparece la sigla Cx que da una mejor comprensión de la mayor o menor resistencia ofrecida para el avance de determinada forma, lo que se entiende que ha menor valor de la cifra mayor capacidad de penetración aerodinámica tendrá dicha forma.

[10] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010
[11] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

Tambien tiene una mayor importancia fundamental ya que la presión dinámica originada en el frontal del vehiculo crece mucho mas que la velocidad, lo que se traduce en triplicar la potencia de presión dinamica en comparación con la velocidad a la que se encuentra.

En concreto para obtener un buen coeficiente de penetración aerodinámica, el flujo de aire que rodea el contorno del vehiculo debe ser homogéneo y con un bajo grado de rozamiento.

1.1.7.2 OBSERVACIONES PARA EL DISEÑO

Para conseguir un valor de aceptable de este coeficiente Cx, se empieza por definir la zona delantera del vehículo, justamente porque allí es donde se produce el reparto del flujo de aire en lo que se denomina punto dinámico.

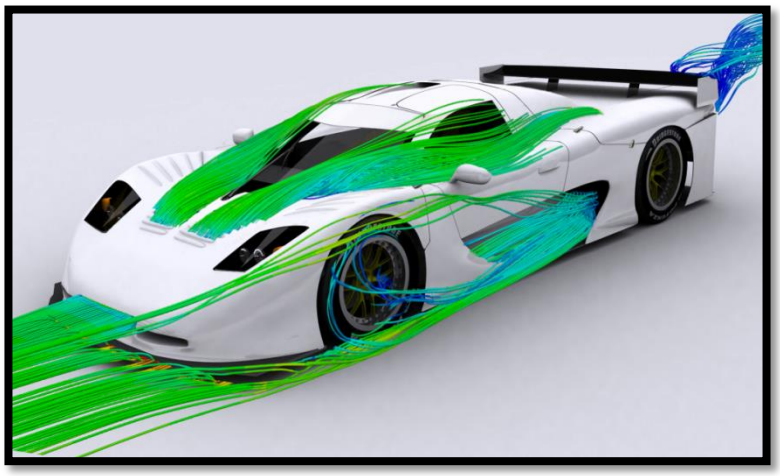
Para mejorar y obtener una buena repartición del flujo también se evita que no pase mucho aire por los costados del vehículo. En definitiva para la fase de diseño se presta atención a tres zonas específicas del vehículo que son[12]:

- Zona Frontal.
- Zona Posterior.
- Linea genérica de la carroceria.

1.1.7.2.1 ZONA FRONTAL

En esta zona se evitan las formas con ángulos muy pronunciados para que la corriente de aire pueda rozar gradualmente el vehículo sin provocar turbulencias por lo tanto la inclinación de la nariz frontal con un ángulo de inclinación elevado genera un notable aumento del (Cx) como se muestra en la figura 1.5.

[12] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da Edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

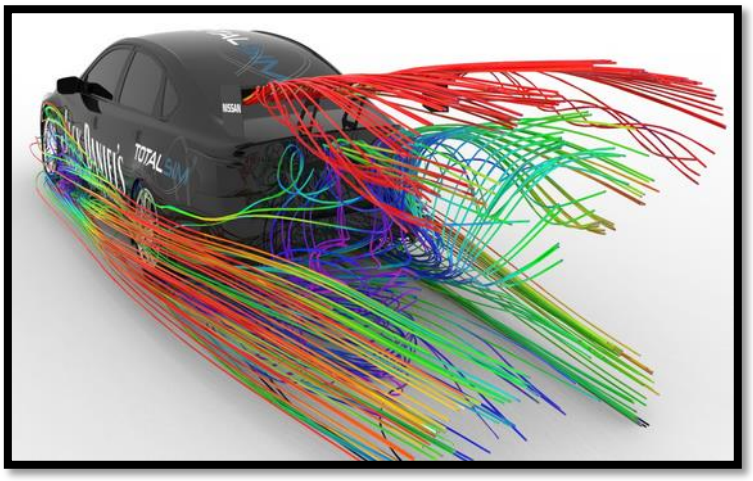


- 5 Figura 1.5: Turbulencias que generan los componentes exteriores vehículo.

Fuente: Total simulation, (2014), www.totalsimulation.co.uk,

1.1.7.2.2 ZONA POSTERIOR

Esta zona se diseña con un marcado borde recto en todos los perfiles traseros donde la corriente de aire obtiene un efecto positivo sobre las propiedades aerodinámicas del vehículo caso contrario de no ser así cualquier perfil curvo acelerara el fluido y creara turbulencia reduciendo la eficiencia aerodinámica en esta zona como se muestra en la figura 1.6.



- 6 Figura 1.6: Comportamiento aerodinámico posterior de un vehículo.

Fuente: Total simulation (2014), www.totalsimulation.co.uk.

1.1.7.2.3 LÍNEA GENÉRICA DE LA CARROCERÍA

Se caracteriza por una forma sencilla redondeada lateralmente desde el frontal, que mejora el paso del flujo de aire hacia los costados del vehiculo. Con esto se procura conseguir un conjunto de la línea aerodinámica del vehiculo sin penalizar el espacio interior.

1.2 FUNDAMENTO TEORICO PARA LA CONSTRUCCION

1.2.1 CONCEPCION PARA LA CONSTRUCCION

La concepción para la construccion de una carrocería para vehículos en serie refiere a que es la encargada de soportar las fuerzas producto de un impacto evitando que la desaceleración alcance al ocupante, pero como se conoce la carrocería de un vehículo formula SAE se encuentra acoplada a la estructura del chasis tubular que cumple dicha función en un impacto, por lo que en este caso la carrocería como tal se limita a proteger al piloto en pista de agentes externos al chasis y gestionar la parte aerodinámica del vehículo[13].

Para la construcción de la carrocería de un vehículo Formula SAE se considera que debe ser ligera y resistente a la vez que soporta las deformaciones producidas por los siguientes esfuerzos:

- De tracción provocados por la marcha del vehículo sobre todo en las aceleraciones y frenadas.
- De flexión provocados por la transferencia de fuerzas del chasis hacia la carrocería.
- De torsión provocados por el desplazamiento de fuerzas transversales del chasis hacia la carrocería.

Partiendo del concepto de principio físico que dice: “La energía ni se crea ni se destruye, sino que solo se transforma”[14], la carrocería se construye por zonas de deformación programada para que se comporte como un espiral, es decir; a una mayor capacidad de deformación existe una mayor capacidad de absorción de energía.

[13] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da Edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010
[14] LAVOISIER, Antoine, *1785.*

1.2.1.1 MODULO FRONTAL

Como la zona frontal de la carrocería es la primera en entrar en contacto en caso de impacto frontal, esta transforma la energía que se genera por el impacto en energía de desintegración minimizando de este modo la transmisión de energía hacia el chasis tubular y posteriormente hacia el interior del habitáculo del piloto. La deformación en estas zonas se realiza de forma programada y progresiva reduciendo los daños.

1.2.1.2 MODULO CENTRAL

De la misma manera la zona central está compuesta por los pontones de la carrocería que en caso de colisión lateral serán los primeros en recibir la energía de impacto para transformar en energía de desintegración que posteriormente se traslada al chasis tubular y de manera final al habitáculo del piloto.

1.2.1.3 MODULO POSTERIOR

Esta zona desempeña la misma función que el modulo frontal aplicado para la parte posterior del vehículo pero que en este caso no se aplica ya que el encargado de cumplir con este objetivo es el chasis directamente.

1.2.2 SOLICITACIONES CONSTRUCTIVAS

Conociendo que cada uno de los tres módulos previamente descritos cumple una función en la carrocería de manera diferente, se considera su comportamiento como un solo conjunto integral al momento de lograr un diseño óptimo.

Para entender lo previamente descrito se tiene en cuenta además de la aerodinámica y la estética varios criterios como[15]:

- Vibraciones
- Rigidez Durabilidad
- Facilidad de reparación
- Comportamiento en impacto

[15] AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2da Edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010

1.2.2.1 VIBRACIONES

Las vibraciones propias de la carrocería disminuyen el grado de comodidad y más aún si se produce el efecto de resonancia, por lo que para reducir estos efectos se "incomunica" a la carrocería del chasis mediante aislantes de caucho y topes de goma para mejorar la sensación en el habitáculo.

1.2.2.2 RIGIDEZ

La carrocería con estructura muy blanda es peligrosa para cualquier el piloto, porque supone que el habitáculo o *cockpit* no se mantiene intacto en caso de impacto, por lo contrario una carrocería excesivamente rígida también es peligrosa; ya que si bien el habitáculo mantiene su forma, el piloto se encuentra sometido a fuerzas de impacto muy elevadas, es decir; que el piloto soporta una desaceleración muy grande sin pausa para detenerse previamente e impactar dentro del habitáculo por lo que la construcción de la carrocería contiene estas dos ideas de manera clara para conseguir un conjunto final óptimo.

1.2.2.3 DURABILIDAD

Para que la carrocería mantenga inalterables sus características constructivas en el tiempo prudente de un año que es el tiempo en el que se realiza la competencia se utilizan las siguientes técnicas.

Una construcción sólida y estable, con especial atención en los puntos de soporte y refuerzo de la carrocería ya que se pueden presentar grietas debidos a los esfuerzos en la carrocería por flexión y torsión.

1.2.2.4 FACILIDAD DE REPARACION

Los componentes exteriores de la carrocería que se encuentran expuestos a sufrir pequeños o leves daños son posibles de reparar o sustituir fácilmente, sin ocasionar ninguna perdida en la rigidez de todo el conjunto, para ello es importante que estos elementos posean una buena accesibilidad hacia el interior como también a cada punto de fijación.

1.2.2.5 COMPORTAMIENTO EN IMPACTO

En el impacto la deformación de la carrocería es predefinida, transformando la máxima energía de choque en trabajo o energía de desintegración.

La celda de supervivencia del piloto siempre debe permanece lo mas intacta posible consiguiendo esto con la deformación programada para evitar la transmisión de fuerzas hacia el piloto.

El diseño de la buena geometría de la carrocería dispuesta previamente, en caso de impacto reduce considerablemente la transmisión de fuerzas hacia el chasis y habitáculo del piloto respectivamente. Para ello el conjunto entre chasis y carrocería de los pilares frontales del *fronthoop* (mamparo frontal) o traseros del *mainhoop* (mamparo posterior del piloto) con los pontones laterales forman una jaula reforzada de protección.

1.3 CONCEPTOS PRELIMINARES

1.3.1 FLUIDOS COMPRESIBLES

Todos los fluidos son compresibles, incluyendo los líquidos. Cuando estos cambios de volumen son demasiado grandes se opta por considerar el flujo como compresible, que muestran una variación significativa de la densidad como resultado de fluir, esto sucede cuando la velocidad del flujo es cercana a la velocidad del sonido[16].

1.3.2 FLUIDOS INCOMPRESIBLES

Un fluido incompresible es cualquier fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición. Esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido pueden cambiar. El agua es un fluido casi incompresible, es decir, la cantidad de volumen y la cantidad de masa permanecerán prácticamente iguales, aún bajo presión[17].

[16] Mecánica de los Fluidos. 02-02-2014. http://www.buenastareas.com/ensayos/Mecanica-De-Los-Fluidos/25467113.html

[17] CHORIN Alexandre , MARSDEN Jerrold, Mathematical Introduction To Fluid Mechanics, 3ra Edición 2000 California, Estados Unidos, P25

1.3.3 VISCOSIDAD (μ).

Propiedad del fluido, que sucede en la resistencia de sí mismo a un esfuerzo cortante (τ). La ley de Newton sobre la viscosidad establece que para un porcentaje dado de deformación angular de un fluido (dv/dy) donde dv representa la velocidad y dy la distancia, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad[18].

La viscosidad de cualquier gas aumenta con la temperatura, provocado por el incremento de momento molecular. Para presiones habituales la viscosidad es independiente de la presión generada, estando única y directamente afectada por la temperatura.

La viscosidad matemáticamente está definida por:

$$\mu = \left(\frac{\tau}{\frac{dv}{dy}}\right)\left[\frac{Ns}{m^2}\right] \qquad (1.1)$$

La viscosidad cinemática (υ) es un valor utilizado en la práctica, donde se conoce a la relación entre la viscosidad absoluta (μ) y la densidad (ρ).

$$\upsilon = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)\left[\frac{m^2}{s}\right] \qquad (1.2)$$

1.3.4 PRESIÓN (P)

Se llama así a la relación que existe entre la fuerza normal (F) a una superficie y el área (A) de acción aplicada. En un fluido, la fuerza se encuentra normal al plano definido por el fluido o con relación a la superficie que se encuentra en contacto con el fluido.

$$p = \left(\frac{F}{A}\right)\ \left[\frac{N}{m^2}\right] = Pa \qquad (1.3)$$

[18] Vásconez Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.

1.3.5 DENSIDAD (ρ)

Se llama así a la relación que existe entre la masa (m) del propio fluido y el volumen (V) que esta ocupa.

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \qquad (1.4)$$

1.3.6 LEY DE LOS GASES IDEALES

Es la relación que existe entre el producto de la presión (p) y el volumen específico (v_e) con el producto de la constante de los gases (R) y la temperatura (T) de la siguiente forma[19]:

$$pv_e = RT \qquad (1.5)$$

Por lo tanto para el caso de un gas ideal en reposo a temperatura constante, la presión se encuentra establecida por la variación de la densidad denominado calor específico.

1.3.7 CAPA LÍMITE

Es la porción de fluido que se encuentra cerca de la superficie del cuerpo en la cual su velocidad se encuentra afectada por los esfuerzos cortantes presentes. La velocidad en la capa limite es próxima a la velocidad el flujo principal y va decreciendo de manera asintótica (acercamiento sin choque de curvas).

Conforme se incremente la velocidad recorrido del fluido sobre la superficie del cuerpo, el espesor de la capa limite aumenta y que también se encuentra sujeto a un gradiente de presión que se encuentra impuesto por un mayor flujo, que aumenta el momentum en la capa si la presión decrece cuando aumenta la presión o viceversa[20].

La capa límite inicialmente se encuentra de manera laminar, donde las partículas del fluido se mueven en las capas lisas, pero conforme va aumentando la distancia, el espesor se convierte en un flujo inestable, hasta convertirse en turbulencia con una

[19] STREETER Victor, Mecánica de Fluidos, Mc Graw Hill, 9na Edición 2000.
[20] Vásconez Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.

menor velocidad y con trayectoria aleatoria de las partículas fuera de la línea de frontera.

Para obtener el comportamiento en la proximidad de la pared del flujo, se recurre a los métodos de capa límite. Para la descripción del flujo viscoso se puede obtener soluciones aproximadas de los perfiles de velocidad en una delgada capa límite próximo a la pared, teniendo en cuenta la viscosidad. Después se introduce esta solución en la del flujo ideal que describe el flujo exterior a la capa límite.

1.3.8. PUNTO DE DESPRENDIMIENTO

EL flujo sobre una superficie puede ser continuo lo que se entiende que la capa limite crece hasta convertirse en turbulento, pero existe un punto que de acuerdo a la geometría del cuerpo de manera principal las zonas curvilíneas donde el flujo se separa de la superficie debida por un cambio de acción de una presión adversa al sentido del flujo.

1.3.9 PRINCIPIO DE BERNOULLI

El principio de expuesto por Daniel Bernoulli en (1738), describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Expresa que un fluido ideal (sin viscosidad, ni rozamiento) en circulación por un conducto cerrado, la energía que posee dicho fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.[21] La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

- Cinética: Energía debida a la velocidad que posee fluido.
- Potencial gravitacional: Energía debido a la altitud que un fluido posee.
- Energía de flujo: Energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como “Ecuación de Bernoulli” consta de estos términos.

$$\frac{V^2\rho}{2} + P + \rho g h = constante \quad (1.6)$$

[21]Jakob Bernoulli,principio de Bernoulli, 5-7-2014/ 12H00
http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli

Donde:

V= velocidad del fluido en la sección considerada

g = aceleración gravitatoria

h = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

P = presión a lo largo de la línea

ρ = densidad del fluido

Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

- Viscosidad (fricción interna) = 0. Es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
- Caudal constante.
- Flujo incompresible, donde la densidad ρ es constante.
- La ecuación se aplica a lo largo de un flujo laminar[22].

1.3.10 LÍNEA DE CORRIENTE

Es la línea continua que se traza en un fluido que tiene la dirección del vector de velocidad en cada punto de su desplazamiento, donde la partícula se mueve de manera tangencial a esta línea.

1.3.11 FUERZAS AERODINÁMICAS

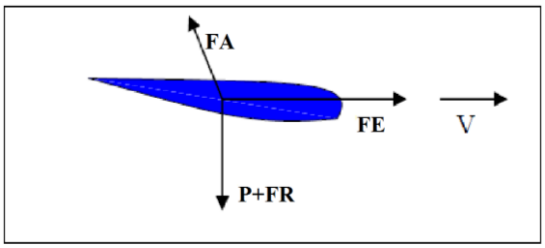
La Fuerza aerodinámica (A), se define como la fuerza sobre el cuerpo, que es generada por la acción de la presión distribuida sobre su superficie (contorno) generado por la velocidad.

En la figura 1.7, se representa el movimiento de un cuerpo en desplazamiento por el aire, indicado por el vector (FE) de la fuerza de empuje correspondiente al propio cuerpo, el vector (P+FR) correspondiente a la suma del peso del cuerpo más la fuerza de resultante o de empuje generado por el fluido y de la fuerza aerodinámica (FA).

[22] Jakob Bernoulli, principio de Bernoulli, 5-7-2014/ 12H00 http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli

Donde justificándose por la primera ley de movimiento de Newton, la suma de los vectores debe ser igual a cero para generar un movimiento desacelerado:

$$FE + (P + FR) + \text{FA} = 0 \quad (1.7)$$



- 7 Figura 1.7: Fuerza Aerodinámica.

Como la fuerza aerodinámica es perpendicular a la superficie del cuerpo, genera dos componentes de fuerza conocidos como sustentación y arrastre. En los vehículos la fuerza de sustentación es la inversa a la generada por los aeroplanos, conocida como sustentación negativa o *downforce*.

La presión total (P) del cuerpo es igual a la suma de la presión hidrostática (Ph) y presión aerodinámica (Pa) generada por la componente de fuerza aerodinámica.

$$P = Pa + Ph \quad (1.8)$$

Del teorema establecido, se establece que para una presión aerodinámica elevada, la velocidad del fluido debe ser "nula" (punto de estancamiento).

1.3.12 COEFICIENTE DE ARRASTRE (Cx)

Este coeficiente de arrastre evalúa la eficacia del perfil de la carrocería con la resistencia que opone el aire a su avance. Este coeficiente depende de los parámetros como el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie; en los vehículos actuales este valor oscila entre valores de 0.20 y 0.40[23].

[23] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

1.3.13 AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS

La aerodinámica hoy en día es una de las ramas fundamentales de estudio de los vehículos tanto de turismo como de competencia, perteneciente a la mecánica de fluidos, que se dedica al estudio del aire, fluidos y fuerzas que actuantes en ellos.

Las fuerzas aerodinámicas que interactúan en el vehículo, generan sobre él una fuerza de arrastre (*Drag*), una fuerza de sustentación "negativa" (*Downforce*), momentos y fuerzas laterales, vibraciones, ruidos, etc. Los mismos que generan consecuencia en el rendimiento, consumo, manejo, estabilidad.

El teorema de Bernoulli, es el principio que rige la eficiencia aerodinámica de los vehículos, el cual se fundamenta en la disminución de la presión de un fluido en movimiento conforme el vehículo aumenta su velocidad[24].

La corriente de aire, se determina por el coeficiente de arrastre (Cx) y el coeficiente de sustentación (Cz), los mismos que dependen de la forma y perfiles de la carrocería.

El coeficiente de arrastre (Cx), representa la eficacia de la carrocería del vehículo, ante la resistencia que opone el aire durante su avance, la fuerza de arrastre es igual a la suma de las fuerzas de la viscosidad, la fuerza de estancamiento generada en las zonas delantera y posterior del vehículo. También está determinada por la separación de la capa laminar y la presencia directa del efecto de succión.

Por lo cual la optimización aerodinámica del rendimiento de las zonas de la carrocería mejora la sustentación negativa (*downforce*) en función de las condiciones del entorno.

1.3.14 ACCIONES AERODINÁMICAS SOBRE LOS CUERPOS SOLIDOS

1.3.14.1 PRESIÓN DE ARRASTRE (Px)

Cuando la corriente de flujo fluye a través del cuerpo, el fluido tiende a adherirse hacia la superficie uniforme del cuerpo, posterior a ello la capa del fluido se separa de la superficie generando una distorsión turbulenta.

[24] Vásconez Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.

En este punto se tiene que la fuerza de la presión de arrastre, la misma que actúa en dirección opuesta al movimiento, donde esta presión de excitación es menor que la presión de estancamiento en la parte frontal del cuerpo.

1.3.14.2 FUERZA DE ARRASTRE (Fx)

Un cuerpo en desplazamiento que se encuentra en un fluido experimenta las fuerzas de arrastre y sustentación causadas por la acción del mismo[25].

El arrastre es la fuerza que se presenta a un cuerpo que se resiste al movimiento en la dirección que recorre el cuerpo, en los vehículos esta fuerza se produce con la resistencia al viento.

La ecuación de la fuerza de arrastre se representa[26]:

$$\mathrm{Fx} = \mathrm{Cx}\left(\frac{\rho \mathrm{v}^2}{2}\right) A \quad (1.9)$$

Dónde:

Fx: Fuerza de arrastre (N).

Cx: Coeficiente arrastre aerodinámico adimensional.

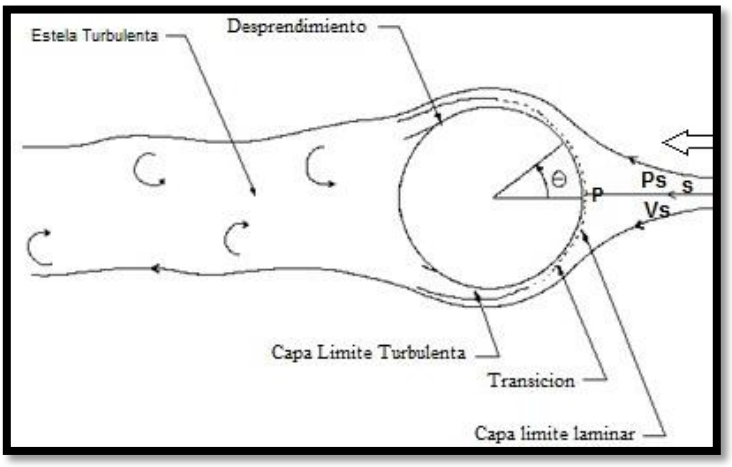
V: Velocidad del vehículo (m/s).

ρ: Valor de la densidad del aire $\left(\frac{Kg}{\mathrm{m}^3}\right)$.

A: Área frontal de vehículo (m^2).

Se conoce al término $\left(\frac{\rho v^2}{2}\right)$ como la presión dinámica que genera una influencia sobre la fuerza arrastre de un cilindro circular sometido a una corriente del fluido.

[25] Vásconez Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.
[26] MOTT, Robert Mecánica de Fluidos Aplicada, Pretince Hall hispanoamerica, 4ta Edición, 1996.



- 8 Figura 1. 8: Flujo alrededor del cilindro.

Fuente: Laboratorio de aerodinámica, (2014), Universidad Tecnológica Nacional, http://dc126.4shared.com/doc/Iz70Bz7d/preview.html.

Las líneas de corriente, indican la trayectoria que toma el fluido a seguir alrededor del cilindro. En el inicio de choque de la capa limite, existe un punto llamado punto de estancamiento (P), lugar donde el fluido se encuentra en reposo como se muestra en la figura 1.8.

La relación que se establece entre este punto y la corriente en el punto (s) se describe mediante la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{\mathrm{Ps}}{\eta} + \frac{(vs)^2}{2g} = \frac{P}{\eta} \qquad (1.10)$$

Dónde:

P: Presión (Pa).

η: Peso específico (N/m^3).

νs: Velocidad (m/s).

g : gravedad (m/s^2)..

Tenemos que: $\rho s = \frac{\eta}{g}$

Por lo tanto: $p = \mathrm{Ps} + \frac{\rho V^2 s}{2}$ (1.11)

La presión de estancamiento es mayor que la presión estática en la zona de corriente libre, donde el incremento de presión en este punto produce una fuerza de arrastre sobre el cuerpo y que finalmente se opone al movimiento.

Este arrastre total es provocado por la presión de arrastre generada, ocasionada por los disturbios en la corriente de flujo conforme avanza, creando una excitación turbulenta[27].

1.3.14.3 FUERZA DE SUSTENTACIÓN (Fz).

La sustentación es la fuerza creada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección de recorrido del cuerpo. En un vehículo la fuerza de sustentación se origina acorde circula aire sobre y debajo del vehículo[28].

Esta fuerza se establece por:

$$Fz = \mathrm{Cz} + \left(\frac{\rho \mathrm{V}^2}{2}\right) A \qquad (1.12)$$

Dónde:

Fz: Fuerza de sustentación. [N]

Cz: Coeficiente de sustentación adimensional vertical.

ρ: Valor de la densidad del aire. [Kg/m^3]

V: Velocidad del vehículo. [m/s]

A: Área frontal del vehículo. [m^2]

1.3.14.4 FLUJO EXTERIOR

Considerando que la velocidad del aire es despreciable comparando con la velocidad del vehículo, se puede asumir que este se encuentra inmóvil y que al desplazarse este flujo alrededor del vehículo se genera una aceleración de la capa límite de aire que por lo tanto origina un campo de flujo.

[27] Vásconez Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.
[28] MOTT, Robert Mecanica de Fluidos Aplicada, Pretince Hall Hispanoamérica, 4ta Edición, 1996.

El aire es el medio por el cual el vehículo se desplaza es fluido denso el mismo que opone resistencia al desplazamiento del vehículo y que además genera sobre si fuerzas que inciden de manera directa sobre su comportamiento dinámico.

En el vehículo existen zonas de separación entre el fluido y la superficie de contacto que se conocen como capa limite, fuera de esta el fluido no es viscoso[29]. Al separarse el flujo de estas zonas la capa limite se destruye y el flujo queda gobernado por los efectos de la viscosidad y velocidad presentes en ese instante de la trayectoria del vehículo dando origen a las diferentes turbulencias que se pueden presentar en él.

Aplicando la ecuación de Bernoulli para una línea de corriente despreciando la energía potencial obtenemos:

$$PT = \mathrm{P} + \left(\frac{\rho}{2}\ \mathrm{V}^2\right) = \text{Constante} \qquad (1.13)$$

Donde tenemos que:

PT: Presión total.

P: Presión de un flujo libre

$\left(\frac{\rho}{2}\ \mathrm{V}^2\right)$: Presión estática,

Donde se demuestra que la viscosidad produce la resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento de los cuerpos y su rozamiento.

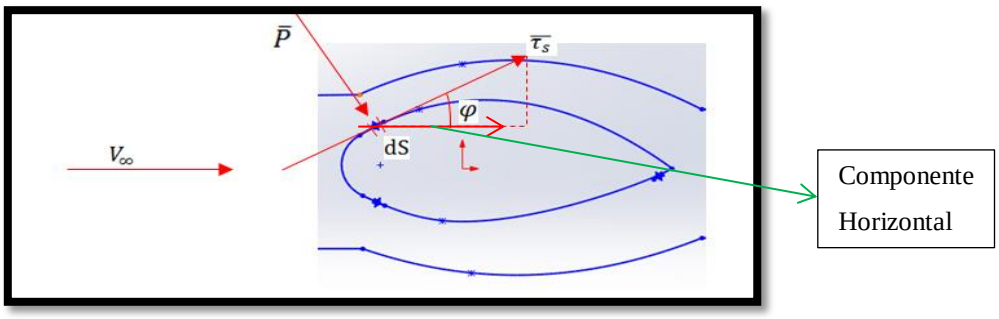
1.3.14.5 RESISTENCIA POR ROZAMIENTO (Rr)

La existencia de la viscosidad en el aire produce el rozamiento entre el cuerpo y el fluido, los cuales generan una fuerza tangencial (τ_s). Figura 1.8 que son los esfuerzos que realiza el fluido sobre la superficie en dirección del movimiento relativo del cuerpo y de fluido[30].

$$R_r = \int_s \ \tau_s \, Cos\varphi \, ds \quad (1.14)$$

[29] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
[30] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

Para analizar el efecto de acción sobre el cuerpo mediante el coeficiente aerodinámico adimensional horizontal Cx para la resistencia en la dirección de movimiento de x, donde la fuerza tangencial (τ_s) se encuentra determinado por el coseno de φ y multiplicado por el diferencial de direccion dS como se muestra en la figura 1.9.



- 9 Figura 1.9: Rozamiento generado por un fluido sobre un cuerpo.

Fuente: IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

$$Cx = \frac{Rr}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (1.15)$$

Donde se tiene:

Rr: Resistencia por rozamiento.

V: Velocidad del aire [m/s].

ρ: Densidad del aire [Kg/m^3].

A: Área de la superficie del cuerpo [m^2].

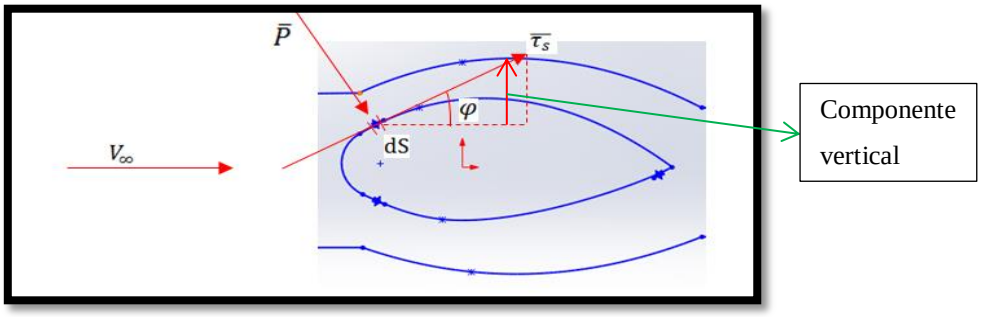
1.3.14.6 RESISTENCIA POR PRESIÓN (Rp)

La existencia de flujo laminar y turbulento en la capa limite sobre la superficie del cuerpo genera una distribución de presiones a lo largo del cuerpo; cuando hay un crecimiento de presiones en sentido del flujo la fuerza de rozamiento entre el fluido y el cuerpo aumenta reduciéndose el flujo.[31]

[31] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

$$Rp = \int_s \mathrm{P}\, Sen\varphi\, ds \quad (1.16)$$

Para analizar el efecto de acción sobre el cuerpo mediante el coeficiente aerodinámico adimensional horizontal Cx para la resistencia en la dirección de movimiento de x, donde la fuerza tangencial (τ_s) se encuentra determinado por el seno de φ de las componentes verticales y multiplicado por el diferencial de dirección dS como se muestra en la figura 1.10.



- 10 Figura 1.10: Rozamiento generado por un fluido sobre un cuerpo.

Fuente: IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

En los puntos de mayor contacto con la superficie entre la zona de separación y el flujo normal, la separación de fluido es mayor debido al incremento de presión en sentido del flujo[32] y por lo tanto en los vehículos existe aumento de presión en la parte posterior ya que el flujo exterior proviene de un medio no viscoso.

Por lo tanto el coeficiente de presión será dado por:

$$\mathrm{Rp} = \frac{\mathrm{P(Pfl)}}{\frac{\rho}{2}\mathrm{V^2A}} \quad (1.17)$$

Donde se tiene:

P: Presión en el contorno de la superficie del cuerpo [Pa].

Pfl: Presión de un flujo libre [Pa].

V: Velocidad de flujo libre [m/s].

[32] Vascones Salinas, Riny Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.

ρ: Densidad del aire [Kg/m^3].

A: Área de la superficie del cuerpo [m^2].

1.3.14.7 NUMERO DE REYNOLDS (R_e)

En la mecánica de fluidos existe el numero adimensional de Reynolds el permite caracterizar el movimiento de los fluidos[33].

El número de Reynolds es la relación o el cociente entre los términos inerciales y términos viscosos de las ecuaciones de Navier - Stokes o que también se define como la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido de la fuerza viscosa.

Los fluidos que tienen número de Reynolds Re ≥ 3000, se producen por una velocidad elevada y una viscosidad baja, caracterizan al régimen de flujo turbulento[34].

Los fluidos con viscosidad alta que se muevan a velocidades bajas poseen un número de Reynolds Re ≤ 2100, se comportan como un flujo estacionario o tenderán a comportarse en forma laminar.

Por lo tanto se puede deducir que el número de Reynolds comprendido entre valores de 2100 ≤ Re ≤ 3000 se encuentra en estado de transición.

Tomando en cuenta que para números de Reynolds bajos los flujos son laminares mientras que ha número de Reynolds altos los flujos se vuelven turbulentos, se supone que un estado caótico y aleatorio del movimiento se desarrolla por la velocidad y el cambio de presión de forma continua con el tiempo en las regiones importantes del flujo.

Se deduce entonces que la fuerza de inercia se basa a partir de la segunda ley del movimiento de Newton, donde la fuerza viscosa se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área. El número de Reynolds nos ayuda a predecir el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de este número adimensional.

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta} \qquad (1.18)$$

[33]CARMONA AníbaL, Aerodinámica y actuaciones del avión.
http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Reynolds
[34] MOTT, Robert Mecánica de Fluidos Aplicada, Pretince Hall Hispanoamérica, 4ta Edición, 1996.

Dónde:

$\rho =$ Densidad del flujo

$D =$Viscosidad cinemática del fluido

$v =$Diámetro del tubo

$\eta =$Velocidad promedio del flujo

1.3.14.8 FLUJOS INCOMPRESIBLES

Para entender con mayor claridad el análisis aerodinámico de un vehículo, es necesario conocer que un flujo incomprensible sucede cuando la densidad del fluido en cada instante permanece independiente a las variables de la presión por lo tanto su importancia es fundamental ya que los problemas que se involucran o relacionan con este tipo de flujos componen la aplicación más importante y compleja para su análisis en la Mecánica de Fluidos.

Cuando un flujo es isotermo el análisis del problema se simplifica de tal manera que en el análisis del problema las diferentes variables son indistintas de a temperatura por lo que matemáticamente se refiere el estudio se somete a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.

1.4 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL MOVIMIENTO DE UN FLUIDO

1.4.1 DESCRIPCION ECUACIONES DE NAVIER – STOKES

Las ecuaciones básicas escritas por el ingeniero Francés Claude Navier y el matemático ingles George Stokes describen el movimiento de un fluido en un medio, conocidas como las ecuaciones de Navier - Stokes.

Dichas ecuaciones son una representación matemática de la segunda ley de newton, de la conservación de masa y de incompresibilidad de los fluidos. La resolución de estas

ecuaciones, los campos de presión y velocidad pueden ser aplicados para el análisis en un fluido[35].

Estas ecuaciones definen la expresión en un medio continuo mediante tres leyes de la conservación básica de la física que son:

- La ecuación de continuidad o conservación de la masa.
- Ecuación de conservación del momentum.
- Ecuación de conservación de la energía.

La ecuación de continuidad, se rige en la ley de conservación de la masa donde empleando al concepto de movimiento de un fluido, la tasa de variación de la masa en un volumen de control es semejante a la diferencia de la masa que entra y sale a lo largo de sus fronteras.

La ecuación de conservación de momentum, proviene de la aplicación del concepto de la segunda ley de Newton para un fluido en movimiento. Esta ecuación se expresa en función de la presión y los esfuerzos presentes en la viscosidad que actúan sobre una partícula fluida.

La tasa de variación del momentum aplicada en una partícula fluida es la diferencia de las fuerzas totales producidas por los esfuerzos en la superficie y las fuerzas volumétricas presentes en ella.

La ecuación de conservación de la energía, se rige por la primera ley de la termodinámica, donde el cambio de energía de una partícula fluida es la diferencia entre el trabajo realizado sobre la partícula y el calor entregado, por lo tanto la ecuación de energía describe el traslado de la energía a través de un fluido y sus efectos.

1.4.1.1 ECUACION DE CONTINUIDAD O CONSERVACION DE MASA

En función de lo que enuncia la ley de conservación de la masa pero aplicado al movimiento de un fluido expresa que la tasa de variación de la masa en un volumen de control equivale a la diferencia de la masa que ingresa y sale a través de sus fronteras[36].

35 VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \mathbf{u}) = 0 \qquad (1.19)$$

Tasa de variación de masa en un elemento fluido	=	Tasa neta del flujo másico en el elemento fluido

Se toma en cuenta que para un fluido incompresible la densidad es constante $\rho = 0$ por lo que la ecuación se convierte en: $div\,\mathbf{u} = 0$

1.4.1.2 ECUACION DE CONSERVACION DEL MOMENTUM

Se basa en la segunda ley de Newton aplicada a un fluido en movimiento, esta ecuación se expresa en términos de la presión y esfuerzos producidos por la viscosidad que actúan sobre una partícula fluida. Por lo tanto la tasa de variación del momentum sobre una partícula fluida es igual a la diferencia de las fuerzas totales ocasionados por los esfuerzos en la superficie y las fuerzas volumétricas que influyen sobre ella.

$$\rho\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} = -\nabla p + \rho\vec{f}_e \qquad (1.20)$$

Tasa de variación del momentum de partícula fluida	=	Suma de las fuerzas sobre una partícula fluida

- ECUACION DE MOMENTO PARA X

$$\rho\frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + div(\mu\ grad\ u) + S_{Mx} \qquad (1.21)$$

- ECUACION DE MOMENTO PARA Y

$$\rho\frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + div(\mu\ grad\ v) + S_{My} \qquad (1.22)$$

[36] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

- ECUACION DE MOMENTO PARA Z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + div(\mu\ grad\ w) + S_{Mz} \quad (1.23)$$

1.4.1.3 ECUACION DE CONSERVACION DE LA ENERGIA

La ecuación de energía proviene de la primera ley de la termodinámica aplicada para una partícula fluida, define que la tasa de variación de la energía es igual a la tasa de adición de calor en dicho volumen más el valor de la tasa de trabajo. La ecuación de energía refiere al transporte de energía y sus efectos[37].

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -div(p\mathbf{u}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z}\right] + div(k\ grad\ T) + S_E \quad (1.24)$$

Tasa de variación de la energía en una particula fluida	=	Tasa neta del adicionado a una partícula fluida	+	Tasa neta de trabajo realizado sobre una partícula fluida

1.4.1.4 ECUACIONES TEMPORALES PROMEDIADAS DE NAVIER-STOCKES (RANS)

Para aplicaciones de ingeniería el análisis se enfoca en los efectos del flujo medio donde se adopta una aproximación estadística, promediando las ecuaciones de conservación durante un periodo de tiempo más grande que el periodo de las fluctuaciones de turbulencia.

Para el caso se promedian las ecuaciones de conservación de masa; en el flujo medio se considera la continuidad instantánea y las ecuaciones de Navier - Stocks para un flujo

[37] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

incomprensible con viscosidad constante, todo esto con el fin de simplificar la parte algebraica.

La resolución directa de las ecuaciones de Navier - Stokes, o DNS (‘*Direct Numerical Simulation*’) es la manera más evidente y precisa de predecir un flujo turbulento. Se resuelven todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin promediados o aproximaciones; los únicos errores provienen de las discretizaciones (aproximaciones) numéricas.

El tipo de aproximaciones que con más frecuencia se utiliza en aplicaciones de ingeniería para predecir flujos turbulentos son los basados en métodos estadísticos. Surgen así los modelos basados en el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier - Stokes (RANS).

El proceso de promediar las leyes que denotan el movimiento de una partícula, se inserta en las ecuaciones con la finalidad de obtener los comportamientos promedio y turbulento (aleatorio) de las diferentes variables.

Se inicia por obtener la descomposición de las variables en sus valores medio $\bar{\bar{u}}$ y su valor fluctuante $\bar{u}'$[38]:

Para la velocidad la descomposición se denota por:

$$\bar{u} = \bar{\bar{u}} + \bar{u}' \quad (1.25)$$

Donde la componente media de la velocidad se obtiene realizando la integral de la velocidad instantánea en función del tiempo:

$$\bar{\bar{u}}\,(t) = \frac{1}{T}\int_0^T \bar{u}(t)\,dt \quad (1.26)$$

Donde el tiempo del periodo de integración es (T) y lo suficientemente grande en comparación con la escala de tiempo temporal de turbulencia y lo suficientemente pequeño para captar cualquier fenómeno no estacionario distinto a la turbulencia.

Si sustituimos la ecuación (1.25) en la ecuación de momento obtenemos las ecuaciones promediadas de Navier - Stokes.

[38] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_i}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}\right) \quad (1.27)$$

Dónde:

ρ = Densidad

p = Presión

υ = Viscosidad cinemática de fluido

Dentro de las ecuaciones promediadas de Navier - Stokes aparece el término $-\overline{u_i u_j}$, el cual se obtiene del promediado temporal de las ecuaciones diferenciales y es la correspondencia entre las componentes de fluctuación de la velocidad conocida como los esfuerzos de Reynolds. La existencia de estos esfuerzos de Reynolds involucra el hacer suposiciones sobre su estructura para poder solventar el problema de turbulencia.

Los modelos promediados RANS se desarrollan en base al concepto de que la escala de velocidad y la escala de longitud son suficientes para describir el efecto de la turbulencia de flujo.

Inicialmente el modelo de turbulencia que se aplicaba era el modelo de viscosidad turbulenta, el cual desarrolla una estimación de las escalas de velocidad y longitud del flujo por medio de los valores locales.

Esto se puede realizar mediante la relación de la viscosidad turbulenta con el gradiente de velocidad de flujo pero este modelo isentrópico es muy simple y no simula bien los flujos de alta complejidad, por lo tanto los modelos tradicionales de dos ecuaciones como k-épsilon son los que en la actualidad más se usan.

Estos modelos se fundamentan en presumir que existe una analogía entre la acción de los esfuerzos viscosos y los esfuerzos de Reynolds en el flujo. Los dos esfuerzos aparecen en el lado derecho de la ecuación de momentum.

La ley de la viscosidad de Newton expresa que el esfuerzo viscoso es proporcional a la tasa de deformación de los elementos fluidos; lo que para un fluido incompresible se comprueba[39].

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (1.28)$$

Donde los subíndices i y j:

i o j = 1 => Corresponde a la dirección en x.

i o j = 2 => Corresponde a la dirección en y.

i o j = 3 => Corresponde a la dirección en z.

Por ejemplo:

$$\tau_{12} = \tau_{xy} = \mu\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right) = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad (1.29)$$

De manera experimental se puede observar que la turbulencia decae a lo menos que exista un esfuerzo cortante en el flujo incompresible isotérmico, por otro lado se observa que el esfuerzo turbulento incrementa conforme aumenta la tasa de deformación. Joseph V. Boussinesq en 1877 formula que el esfuerzo de Reynolds se puede asociar a las tasas de deformación. Usando dicha nomenclatura de los subíndices se escribe[40]:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \quad (1.30)$$

El transporte turbulento de calor, masa y otras propiedades escalares se evalúan de igual forma. En la ecuación anterior se observa que el momentum de transporte turbulento es proporcional a los gradientes de velocidad (gradientes del momentum por unidad de masa). Análogamente el transporte turbulento del escalar es proporcional a los

[39] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.
[40] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

gradientes de la cantidad transportada por lo que en notación de subíndices se obtiene como:

$$-\overline{\rho u_i' \varphi'} = \Gamma_t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad (1.31)$$

Dónde:

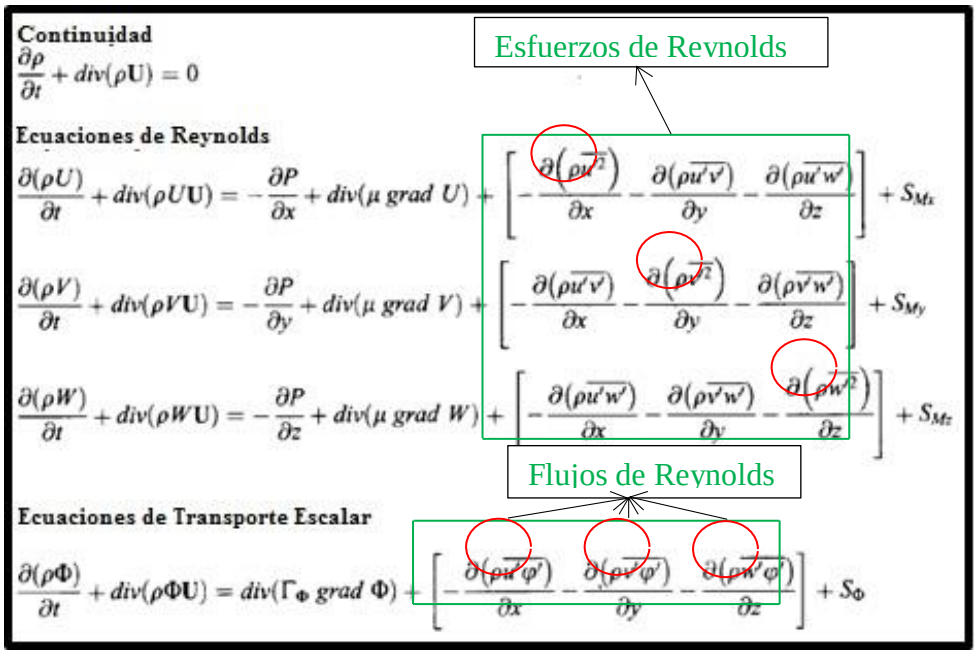
Γt = Difusividad turbulenta.

En el momento que se mezclan los remolinos, se espera de alguna forma que los valores de la difusividad turbulenta Γt , sean próximos al valor de la viscosidad turbulenta μt, por esta razón se adhiere el número de Prandtl/Schmidt como:

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (1.32)$$

Dónde: μt = Viscosidad turbulenta

Obteniendo:



- 11 Figura 1.11: Ecuaciones promediadas de Navier - Stockes.

Fuente: VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 1995.

En el promediado en el tiempo se ingresan 6 nuevas incógnitas (los esfuerzos de Reynolds: 3 normales y 3 de cizalladura). De igual manera en las ecuaciones de transporte escalar surgen nuevos términos extra que se conocen como los flujos turbulentos de Reynolds en círculo rojo como se muestra en la figura 1.11.

De esta manera se obtienen en total siete ecuaciones (una de continuidad, tres de momento, una de energía y dos de estado) y trece incógnitas (tres para la velocidad media, una para la presión media, una para densidad media, una para la energía media, una para la temperatura media y seis para el tensor de los esfuerzos de Reynolds (3.53 y que por ser este último un término simétrico, seis de las nueve componentes son distintas.

Tensor de los esfuerzos de Reynolds:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx}\tau_{xy}\tau_{xz} \\ \tau_{yx}\tau_{yy}\tau_{yz} \\ \tau_{zx}\tau_{zy}\tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.38)$$

Donde se obtiene los esfuezos y flujos de Reynolds:

$$\tau_{xx} = -\rho\overline{u'^2} \qquad \tau_{yy} = -\rho\overline{v'^2} \qquad \tau_{zz} = -\rho\overline{w'^2}$$
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho\overline{u'v'} \qquad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho\overline{u'w'} \qquad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho\overline{v'w'}$$

Por lo tanto para el desarrollo del modelo matemático se debe encontrar un modelo de turbulencia que permita hallar con suficiente precisión y funcionalidad los esfuerzos de Reynolds y los Flujos de Reynolds.

En el análisis del proyecto no se necesita resolver los detalles de las fluctuaciones de turbulencia pero si los efectos de la turbulencia sobre el flujo promedio, por esta razón y por conocimientos del software el modelos de turbulencia K-épsilon es idóneo para el análisis[41].

Por lo tanto las ecuaciones que gobiernan el sistema y que se obtienen de manera promediada son:

[41] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

- Ecuación promediada de continuidad:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla\cdot\vec{u} = 0 \quad (1.39)$$

- Ecuación promediada de conservación de masa:

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt} = \rho\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} = -\nabla p + \mu\left[\nabla^2\vec{u} + \frac{1}{3}\nabla(\nabla\cdot\vec{u})\right] + \rho\vec{f}_e \quad (1.40)$$

- Ecuación promediada conservación de energía:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{u}E) = \nabla\cdot(k\nabla T) + \nabla\cdot\left(\bar{\bar{\sigma}}\cdot\vec{u}\right) + W_f + q_H \quad (1.41)$$

1.5 TURBULENCIA Y SU MODELADO

1.5.1 TURBULENCIA

La presciencia de movimientos de flujos turbulentos son muy comunes, tanto en la naturaleza como en diferentes aplicaciones de ingeniería ya sea como flujos en conductos, turbomaquinaria, cámaras de combustión, aerodinámica de vehículos, etc; donde la turbulencia modifica significativamente parámetros tales como la resistencia a la fricción, la transmisión de calor o la capacidad de mezcla en una superficie[42].

1.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUJOS TURBULENTOS

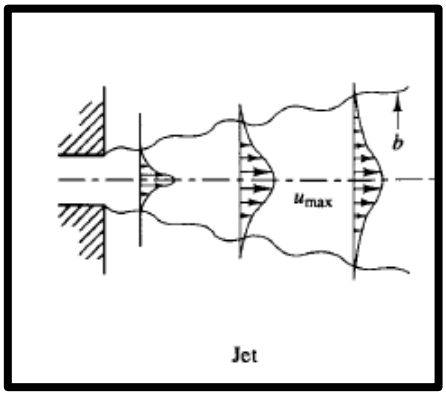
La turbulencia se describe como un movimiento fluctuante y desordenado que se puede distinguir de mejor manera respecto al movimiento de un flujo laminar.

Ante la complejidad para una definición precisa de la turbulencia se enuncia algunas de las propiedades más destacables de los movimientos turbulentos. Se tiene en consideración que la turbulencia no es una propiedad del fluido, sino del flujo.

[42] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

1.5.2.1 IRREGULARIDAD

Es la característica más fácilmente apreciable para cualquier observador. La irregularidad se manifiesta en la aparición de fluctuaciones de las variables fluido-dinámicas (velocidad, presión, temperatura, concentración) con tamaños y tiempos muy dispares (diferentes escalas). Se producen fluctuaciones no estacionarias en flujos inicialmente estacionarios. A pesar de ser un fenómeno determinista, los flujos turbulentos son caóticos e impredecibles como se muestra e la figura 1.12. [43]



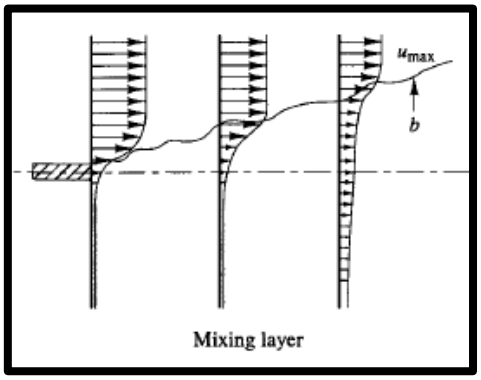
- 12 Figura 1.12: Irregularidad de un flujo.

Fuente: VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 1995.

1.5.2.2 DIFUSIVIDAD (‘mezcla’)

Los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía se ven notablemente amplificados por efecto de la turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento. Si bien estas fluctuaciones tienen lugar a escalas mucho mayores que la escala molecular, producen, efectos difusivos semejantes a los de carácter molecular (al menos cualitativamente) como se muestra e la figura 1.13.[44]

[43] Alvarez Sánchez ,Milton Carlos “ Simulación numérica del efecto de la turbulencia en el arrastre de aire de un mezclador” pag 17, 27-8-2014
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/1238/1/tesis.pdf
[44] Idem., p. 17.

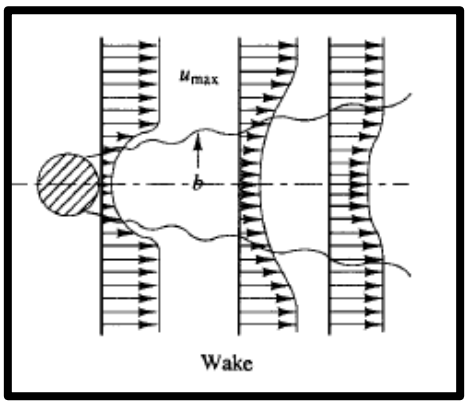


- **13 Figura 1.13:** Difusividad de la mezcla en la frontera.

Fuente: VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method,1995.

1.5.2.3 DISIPACIÓN

Los flujos turbulentos son siempre disipativos. Una vez que se ha desarrollado el flujo turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse, aunque para ello necesite de un aporte continuo de energía. Esta energía se extrae del flujo principal y la invierte en aumentar la energía interna mediante procesos de deformación a los que se ven sometidas las partículas fluidas. La turbulencia necesita de una transferencia continua de energía para reponer esas pérdidas viscosas. Si no existe suministro de energía, la turbulencia decae rápidamente como se muestra e la figura 1.14.[45]



- 14 Figura 1.14: Disipación de un flujo.

Fuente: VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 1995.

[45] Alvarez Sánchez ,Milton Carlos. op. cit. p. 18.

1.5.3 ALGUNOS MODELOS PARA ANALISIS DE TURBULENCIA

Dentro de loa diferentes modelos matemáticos existentes se analizarán rápidamente los diferentes modelos presentes en el software ANSYS llegando así a la selección del modelo más conveniente que cumpla con los parámetros y condiciones para nuestra aplicación[46].

- Modelo K-Épsilon
- Modelo K-Omega
- Modelo RNG

1.5.3.1 MODELO K-EPSILON

Permite calcular flujos con recirculación o separación. Donde k es la energía cinética de turbulencia y se define como la varianza de las fluctuaciones en la velocidad. Puede tener dimensiones como m^2/s^2 que hace referencia a la disipación de los remolinos de turbulencia (la velocidad a la que las fluctuaciones de velocidad se disipan), con dimensiones por unidad de tiempo de m^2/s^3.

Es el modelo más simple que solo necesita condiciones iniciales o de contorno; presenta buenos resultados para muchos flujos industriales como: capas de cortadura, recirculaciones, etc.; en cambio presenta un mal comportamiento en algunos flujos no confinados (estelas lejanas), flujos con capas límites muy curvados, flujos con rotación, flujos desarrollados en conductos no circulares, etc.

1.5.3.2 MODELO K-OMEGA

El modelo K-omega es uno de los modelos de turbulencia más utilizados. Se trata de un modelo de dos ecuaciones lo que significa que incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades de turbulencia del flujo. Esto permite aplicar el modelo de dos ecuaciones para dar cuenta de los efectos como la convección y la difusión de la energía turbulenta.

[46]VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

La primera variable es la de energía cinética turbulenta k y la segunda variable en este caso es la disipación específicaω, variable que determina la escala de la turbulencia mientras que la primera variable k determina la energía en la turbulencia.

1.5.3.3 MODELO RNG

El modelo RNG se basa en análisis del grupo de re normalización de las ecuaciones de Navier - Stokes. Las ecuaciones de transporte para la generación de turbulencia y la disipación son los mismos que para el modelo estándar, El enfoque RNG, es una técnica matemática que se puede utilizar para derivar un modelo de turbulencia similar a la de k-épsilon pero resulta en una forma modificada de la ecuación de épsilon que intenta tener en cuenta las diferentes escalas de movimiento a través de cambios en el plazo de producción.

1.6 ELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA

1.6.1 MODELO DE TURBULENCIA K-Épsilon

El tipo de modelo de turbulencia del fluido que se usa para el estudio es "k-épsilon" tomando de la bibliografía de H.K. Versteeg y W. Malalasekera[47], por su robustez y facilidad en el tiempo de iteración en respecto de los otros modelos existentes y que se adapta a las necesidades para el análisis de la geometría de este proyecto que utiliza simulaciones de presión y de flujo de aire con capa límite dado que la introducción del sólido (geometría) turba el movimiento del aire. Por lo tanto el modelo de turbulencia se enfoca de manera básica en el módulo que afecta directamente a la energía turbulenta.

Este modelo se aplica como una estrategia numérica para cierre del análisis del modelo matemático y resolver de forma aproximada las ecuaciones de Navier - Stokes orienta en resolver el mecanismo que afecta directamente la energía turbulenta.

Se toma en cuenta dos conceptos preliminares adicionales que realizan dos ecuaciones transporte; una ecuación para la energía cinética turbulenta K(t) y otra para la disipación de la energía cinética turbulenta (ε).

[47] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

La energía cinética instantánea K(t) para un flujo turbulento se define como la suma de la energía cinética promedio y la energía cinética turbulenta.

$$k_{(t)} = K + k \quad (1.42)$$

Dónde:

Energía Cinética Promedio => $K = \frac{1}{2}\left(U^2 + V^2 + W^2\right)$ (1.43)

Energía Cinética Turbulenta => $k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right)$ (1.44)

Para definir la disipación de la energía cinética turbulenta se requiere de utilizar la tasa de deformación y los esfuerzos turbulentos comúnmente se escriben por la tasa de deformación (e_{ii}) y los esfuerzos (τ_{ii}) en forma de tensores:

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{xx} e_{xy} e_{xz} \\ e_{yx} e_{yy} e_{yz} \\ e_{zx} e_{zy} e_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.45) \qquad \tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} \tau_{xy} \tau_{xz} \\ \tau_{yx} \tau_{yy} \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \tau_{zy} \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.46)$$

Si se descompone la tasa de deformación de un elemento fluido en una componente promedio y fluctuante $e_{ij}(t) = E_{ij} + e'_{ij}$, se tiene la siguiente matriz.

$$e_{xx}(t) = E_{xx} + e'_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (1.47)$$

$$e_{yy}(t) = E_{yy} + e'_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (1.48)$$

$$e_{zz}(t) = E_{zz} + e'_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \quad (1.49)$$

$$e_{xy}(t) = E_{xy} + e'_{xy} = e_{yx}(t) = E_{yx} + e'_{yx} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x}\right] \quad (1.50)$$

$$e_{xz}(t) = E_{xz} + e'_{xz} = e_{zx}(t) = E_{zx} + e'_{zx} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v'}{\partial x}\right] \quad (1.51)$$

$$e_{yz}(t) = E_{yz} + e'_{yz} = e_{zy}(t) = E_{zy} + e'_{zy} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y}\right] \quad (1.52)$$

1.6.2 ECUACION PARA LA ENERGIA CINETICA PROMEDIO K DEL FLUJO

La ecuación que se obtiene para la energía cinética promedio se obtiene multiplicando las componentes X,Y,Z de las ecuaciones del momentum promediadas de manera temporal por U,V,y W respectivamente.

Sumado los diferentes resultados, agrupados y una vez aplicada el álgebra para su simplificación se puede conseguir que la ecuación promediada de la energía cinética de flujo adquiere la siguiente forma.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho K)}{\partial t}}_{\text{I}} + \underbrace{div(\rho K U)}_{\text{II}} = \underbrace{div\left(-PU + 2\mu U E_{ij} - \rho U\overline{u'_i u'_j}\right)}_{\text{III}} \underbrace{- 2\mu E_{ij}.E_{ij}}_{\text{IV}} + \underbrace{\rho\overline{u'_i u'_j}.E_{ij}}_{\text{V}} \quad (1.53)$$

I **II** **III** **IV** **V** **VI** **VII**

Para entender de mejor manera el significado de cada uno de los términos se escribe:

Tasa de cambio de K	+	Transporte de K por la presión	+	Transporte de K por los esfuerzos cortantes	+	Transporte de K por los esfuerzos de Reynolds
+	=					
Transporte de K por convección		- Tasa de disipación de K	+	Producción de turbulencia		

Los términos de transporte (III), (IV),(V) se caracterizan porque están contenidos por la aparición del operador "*div*" así como también el efecto de los esfuerzos viscosos sobre *K* se han dividido en dos términos: el término (IV) que es el transporte de K por los esfuerzos viscosos y el termino (VI) que representa la disipación viscosa de la energía cinética *K*.

A continuación los dos términos que dominan los esfuerzos de Reynolds $-\rho\overline{u_i'u_j'}$ corresponden a que los esfuerzos turbulentos del termino (V), es el transporte turbulento de *K* debido a los esfuerzos de Reynolds y el termino (VII) es la producción turbulenta de *K* debido al trabajo de deformación producido por los esfuerzos de Reynolds.

Para números altos de Reynolds los términos de turbulencia (V) y (VII) son mucho mayores que las contribuciones viscosas (IV) y (VI).

1.6.3 ECUACION PARA LA ENERGIA CINETICA TURBULENTA *K*

Al multiplicar cada una de las ecuaciones de Navier - Stokes sin los esfuerzos de Reynolds por el respectivo componente de fluctuación de la velocidad (i.e. componente X se multiplica por U' , etc) y si se suman los respectivos resultados seguido de una correspondiente repetición de este proceso para las componentes en Y y Z con la ecuación de Reynolds V y W respectivamente, se restan las dos ecuaciones resultantes y ordenando se obtiene la siguiente ecuación para la energía cinética turbulenta *K*:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{\text{I}} + \underbrace{div(\rho k u)}_{\text{II}} = \underbrace{div\left(-\overline{\rho' u'} + \underbrace{2\mu\overline{u' e_{ij}}}_{\text{III}} - \rho\frac{1}{2}\overline{u_i' u_i' u_j'}\right)}_{\text{IV}} - \underbrace{2\mu\overline{e_{ij}' e_{ij}'}}_{\text{V}} - \underbrace{\rho\overline{u_i' u_j'}}_{\text{VI}} . E_{ij} \quad (1.54)$$

I **II** **III** **IV** **V** **VI** **VII**

A continuación en otros términos el significado de cada uno de los términos se especifica:

Tasa de cambio de K	Transporte de K por la presión	+	Transporte de K por los esfuerzos cortantes	+ Transporte de K por los esfuerzos de Reynolds
+	=			
Transporte de K por convección	- Tasa de disipación de K	+	Producción de turbulencia	

Las ecuaciones (1.53) y (1.54) se muestran muy parecidas en muchos de sus términos, si se toma en cuenta que los términos cuantitativos de la derecha de la ecuación, expresan que el cambio de energía cinética turbulenta se determina por las interacciones turbulentas.

El valor del término (VII) para las dos ecuaciones es de igual magnitud, pero que tiene diferente signo. El término (VII) realiza una contribución positiva en la ecuación de *K* y constituye un término de producción. En toda la ecuación *K* representa la destrucción de la energía cinética y que matemáticamente se expresa como la transferencia de energía cinética promedio en energía cinética turbulenta.

El término (VI) es la disipación del fluido debido a la viscosidad:

$$-2\mu\overline{e'_{ij}.e'_{ij}} = -2\mu\left(\overline{e'^2_{11}} + \overline{e'^2_{22}} + \overline{e'^2_{33}} + \overline{e'^2_{12}} + \overline{e'^2_{13}} + \overline{e'^2_{23}}\right) \quad (1.55)$$

Este término realiza una contribución negativa de la ecuación (1.54) debido a la suma de cuadrados de la tasa de deformación fluctuante e'_{ij}. La disipación de la energía cinética turbulenta se debe al trabajo realizado por los vórtices en pequeñas escalas sobre los esfuerzos de viscosidad. El valor de disipación por unidad de masa es de fundamental importancia en el estudio de la dinámica turbulenta y se define como:

$$\varepsilon = 2v\overline{e'_{ij}.e'_{ij}} \quad (1.56)$$

Por lo tanto este término (ε) representa la destrucción en la ecuación de energía cinética turbulenta el cual tiene el mismo orden y valor similar al termino de producción.

Cuando se obtiene un número de Reynolds alto, en contraste el término (IV) de transporte viscoso en la ecuación (1.54) siempre es mucho más pequeño comparando con el término de disipación turbulenta (VI).

Se puede desarrollar una ecuación de transporte para las demás variables turbulentas incluyendo el porcentaje de la disipación viscosa (ε), el mismo que posee término que no se conocen y que son difícilmente medibles.

La ecuación estándar para el modelo *K*-épsilon posee dos ecuaciones modelo; una para *(K)* y otra para (ε).

Se usa (*K*) para definir el valor de la escala de la velocidad (υ) y (ε) para el valor de la escala de longitud (ℓ) respectivamente constituyendo la mayor escala de turbulencia de la siguiente forma:

$$\vartheta = k^{1/2} \quad (1.57) \qquad \ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (1.58)$$

La viscosidad turbulenta se representa de la siguiente forma:

$$\mu_t = C\rho\vartheta\ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.59)$$

Donde; C_μ es la constante adimensional.

Por lo tanto el modelo estándar K-épsilon, utiliza las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} grad(k)\right] + 2\mu_t E_{ij}.E_{ij} - \rho\varepsilon \quad (1.60)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + div(\rho \varepsilon U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} grad(\varepsilon)\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij}.E_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1.61)$$

Dicho de otra manera el significado de las dos ecuaciones dice lo siguiente:

Tasa de cambio de K o ε + Transporte de K o ε por convección	=	Transporte de K o ε por difusión	+	Tasa de producción de K o ε	-	Tasa de destrucción de K o ε

El modelo de turbulencia K-épsilon posee cinco constantes ajustables que son $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ los mismos que toman los siguientes valores establecidos:

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92$$

1.6.4 DESCRIPCION FINAL DEL MODELO

Es indispensable conocer los parámetros y necesidades del estudio y aplicación del modelo matemático K-épsilon para la simulación del modelo de turbulencia en la búsqueda de la geometría más idónea ya que la proximidad y facilidad de manejo e

interpretación de resultados son confiables y próximos a la realidad lo que permite realizar la construcción de una carrocería muy fiable aplicada a la aerodinámica.

CAPITULO 2: DISEÑO DEL MODELO DE CARROCERÍA Y SIMULACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO

2.1 CONCEPCION Y PARAMETROS PARA EL DISEÑO DE LA CARROCERIA DE UN VEHICULO FORMULA SAE

Para el diseñar la carrocería de un vehículo de competencia tipo FORMULA SAE se toma en cuenta tres aspectos muy importantes, los cuales forman la base para la concepción y diseño de manera que se cumpla con los objetivos de la competencia así como también los aspectos técnicos y estéticos que tiene posee una carrocería los mismos que son:

- Cumplimiento del reglamento para la carrocería de un Formula SAE 2014.
- Consideraciones de espacio en función del chasis.
- Consideraciones de espacio para accesorios y elementos.

2.1.1 FUNDAMENTACION REGLAMENTO TECNICO FORMULA SAE 2014

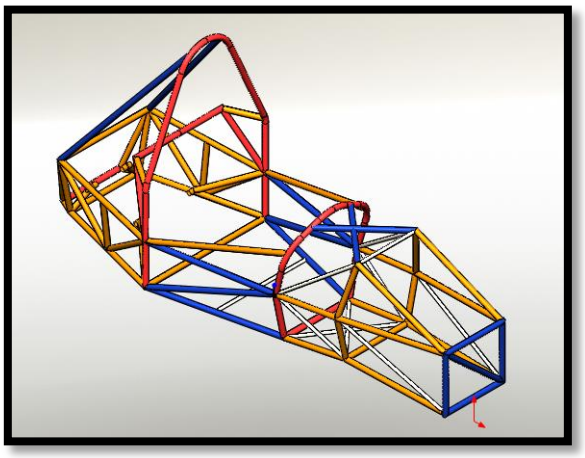
Es muy importante el cumplimiento del reglamento técnico de Formula SAE 2014 ya que es la base del diseño para que el vehículo y la carrocería específicamente puedan ser homologados como un vehículo Formula SAE por lo tanto la concepción del diseño de la carrocería para la participación del vehículo en la competencia debe cumplir con cada uno de los artículos del reglamento a cabalidad lo que asegura no penalizar al vehículo desde la carrocería.

Para la aclaración de cada uno de los artículos que especifican el diseño de la carrocería se especifica el extracto puntual de cada uno de ellos tomado del reglamento de Formula SAE 2014 (ver en anexos).

2.1.2 CONCEPCION DEL MODELO

Para conceptualizar el diseño de la carrocería para un vehículo de competencia tipo FORMULA SAE en funcion del diseño se toma como referencia base las formas de la estructura que posee el chasis como se muestra en la figura 2.1 el cual ya se ha realizado

previamente y que permite tener una idea general de las dimensiones y proporciones para el trazo de las lineas de diseño de la caroceria.



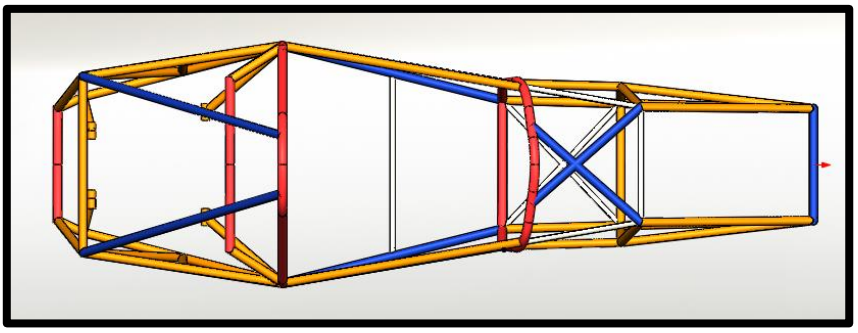
- 15 Figura 2.1: Vista lateral chasis.

Fuente: CARRION Rubén, HUMBERTO Bermeo, Diseño y construcción de un chasis para un vehículo de competencia tipo formula SAE, 2014.

Se observa que el diseño del chasis puede constituirse como una "canastilla" alargada que consta de tres partes:

- Habitaculo del piloto.
- Habitaculo motor.
- Habitaculo frontal.

De esta manera se comprende de mejor manera que los espacios interiores se destinan para el uso del piloto, motor y accersorios como se muestra en la figura 2.2 para el funcionamiento del vehiculo mientras que los espacios exteriores sirven para el alojamiento del sistema de suspension, del tren de propulsion y sistema de direccion.



- 16 Figura 2.2: Vista superior chasis.

Fuente: CARRION Rubén, HUMBERTO Bermeo, Diseño y construcción de un chasis para un vehículo de competencia tipo formula SAE, 2014.

A continuación una vez que se entiende sobre los espacios de uso interno y externo del chasis para el funcionamiento de todos los elementos que constituyen el vehículo de competencia FORMULA SAE se toma en consideración ciertos aspectos de espacios que son fundamentales para el diseño de la carrocería.

- Espacios desinados para el montaje de la nariz frontal.
- Espacios destinados para el montaje de los pontones laterales.
- Espacios destinados para la ubicación del fondo plano.

2.1.3 DESCRIPCION DE LOS ESPACIOS PARA CARROCERIA

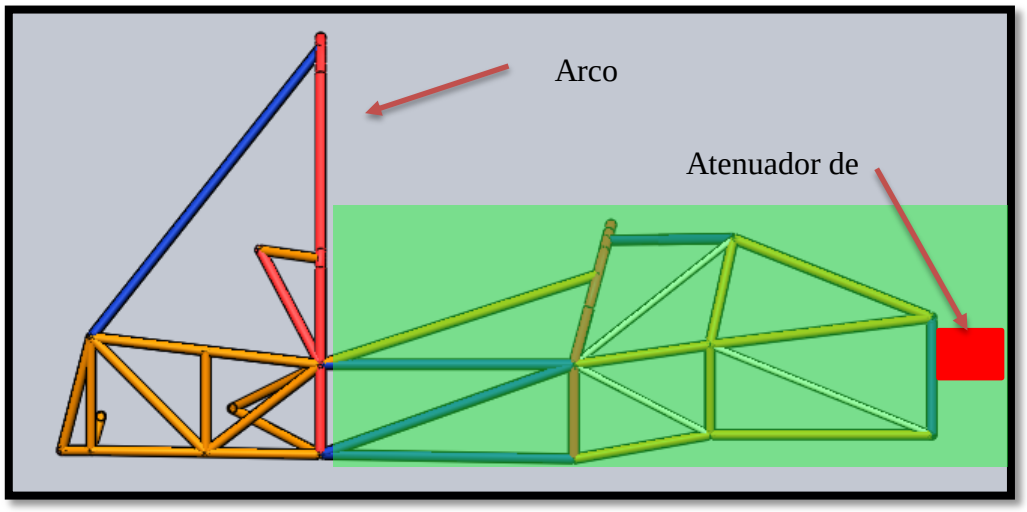
Se requiere ubicar los espacios que condicionan el diseño general de la carrocería los mismos que deben adaptarse a las dimensiones del chasis y los elementos de funcionamiento del motor, electrónica y mecánica sin descuidar un diseño óptimo aerodinámicamente eficaz conjugado con una buena estética y alto rendimiento.

Para ello se enfoca en las zonas las cuales se requiere ubicar la carrocería y se analiza las dimensiones del total del chasis con una distancia longitudinal de 2.24 m de extremo a extremo del cuerpo tubular mas el valor del atenuador de impactos que va situado en frontal de la estructura con una dimensión de 20cm x 20cm, y ancho total de 72 cm como se observa en la figura 2.3.

Lateralmente se define que los espacios de diseño de la carrocería inician por el frontal del chasis que parte desde el atenuador de impactos hacia el arco principal (Barra antivuelco situada detrás del torso del conductor) en toda el área sombreada en verde de la figura 2.3 y se divide en dos secciones de carrocería:

- Nariz Frontal.
- Pontones Laterales.

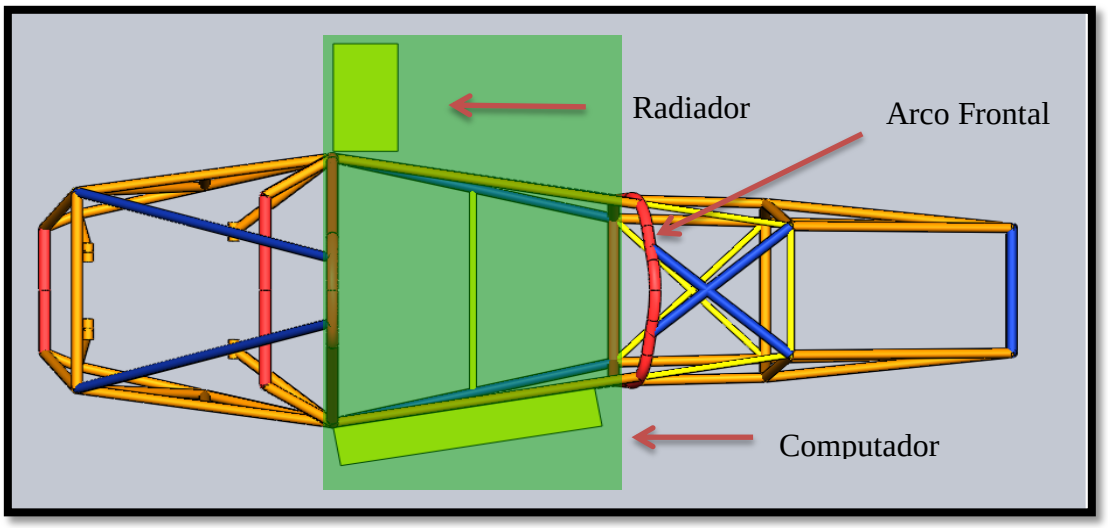
En la nariz frontal de la carrocería se alojan las piernas del conductor y que como requisito de seguridad principal esta zona y otros elementos como el sistema de frenos, sistema de dirección, etc., deben estar recubiertos para su protección con el exterior.



- 17 Figura 2.3: Concepción de la carrocería (vista lateral).

Fuente: CARRION Rubén, HUMBERTO Bermeo, Diseño y construcción de un chasis para un vehículo de competencia tipo formula SAE, 2014.

De manera seguida se define los el espacio comprendido entre el arco frontal y el arco principal para los costados o pontones laterales de la carrocería en donde se encuentran alojados por el lado izquierdo la computadora (ECU) del vehículo y por el lado derecho el radiador del motor, como se muestra en la figura 2.4 en el área sombreada de verde lo que resulta de ser la sección más ancha del vehículo, donde se sitúan los pontones con la finalidad de canalizar el flujo de aire para la correcta refrigeración del motor.



- 18 Figura 2.4: Concepción de la carrocería (vista superior).

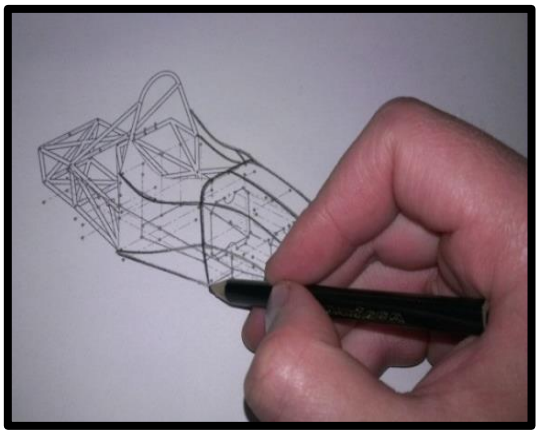
Fuente: CARRION Rubén, HUMBERTO Bermeo, Diseño y construcción de un chasis para un vehículo de competencia tipo formula SAE, 2014.

2.2 DISEÑO DE BOSQUEJOS DE LA CARROCERIA

Para poder definir las primeras formas y trazos de la carrocería del vehículo se recurre al bosquejo para crear los perfiles y líneas pertinentes en función de las formas del chasis donde se toma en cuenta las zonas previamente descritas en la etapa de concepción como son el espacio del habitáculo del piloto, el diseño del frontal de la carrocería con líneas no muy pronunciadas y sencillas que no afecten principalmente a la aerodinámica por ser la primera parte del vehículo en entrar en contacto con el aire durante el desplazamiento, también el diseño de los pontones laterales en función de la computadora (ECU) y del radiador en función del ángulo de abertura para el flujo de refrigeración.

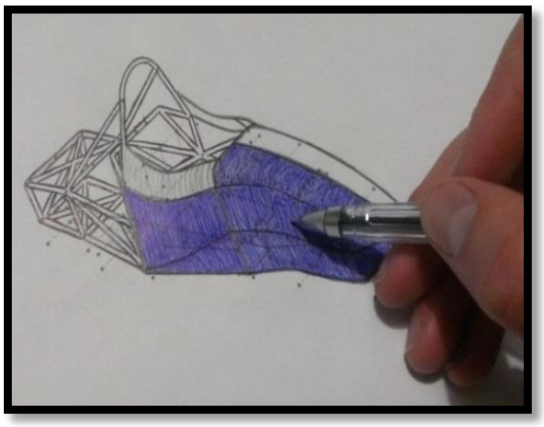
2.2.1 BOSQUEJOS INICIALES

Las primeras ideas del diseño a mano mediante bosquejos se elaboran las primeras líneas y curvas con principal énfasis en loas líneas exteriores principales del chasis que son las que nos dan las pautas principales del diseño como se muestra en la figura 2.5 y 2.6.



- 19 Figura 2.5: Boceto a mano dela carrocería del vehículo.

A continuación se da un poco de proporción del conjunto mediante el uso de los colores para resaltar las formas que pueden tomar las líneas al ir generando planos por la unión de cada uno de los trazos.

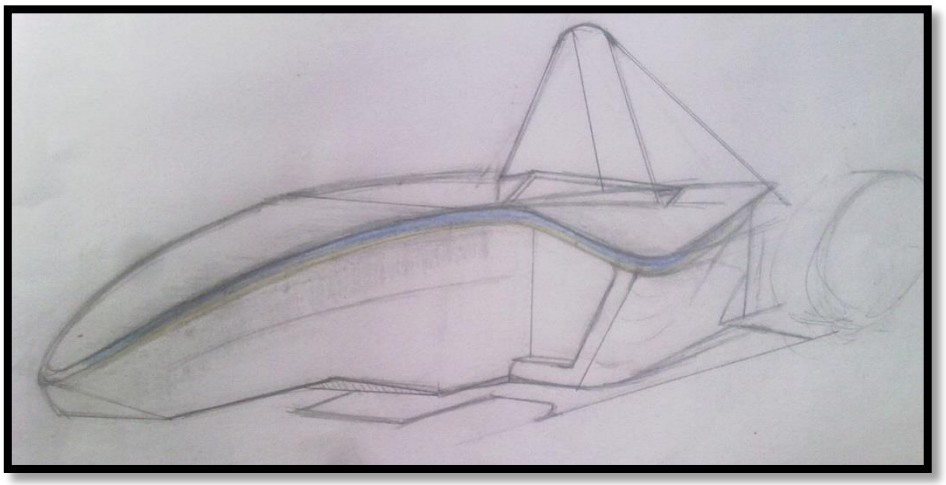


- 20 Figura 2.6: Boceto a mano del carrocería del vehículo.

2.2.2 BOSQUEJO FONDO PLANO Y CARROCERIA

A continuación se bosqueja las líneas de la carrocería en un medio de fondo blanco y sin la ayuda de la base del chasis para dar una proporción más general de la carrocería y obtener una geometría estilizada que conjugue la integración total del frontal de la nariz con los pontones laterales de refrigeración.

De la misma manera se bosqueja las líneas y formas de ubicación del fondo plano integrado de manera total a la carrocería como se muestra en la figura 2.7, para una proporción conjunta de todos esos elementos constitutivos distribuyéndose desde la nariz frontal de la carrocería hasta el paso de los neumáticos posteriores y debajo del motor donde se ubicaran los difusores.



- 21 Figura 2.7: Boceto final de la carrocería del vehículo.

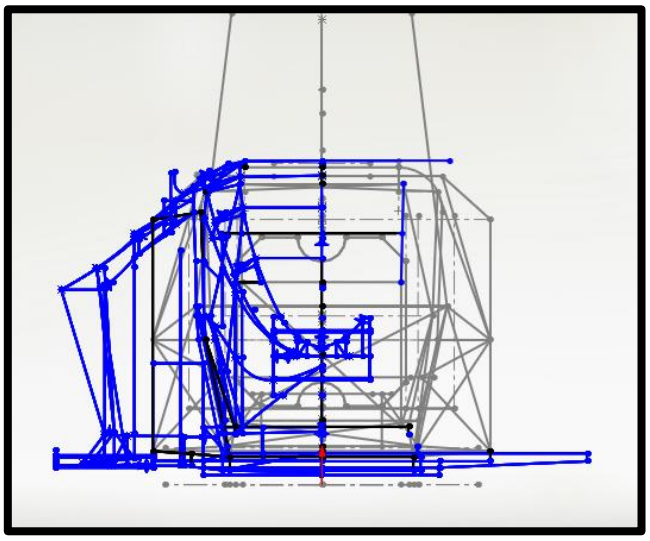
Por lo tanto mediante el bosquejo se puede obtener una forma más comprensiva de la forma de la geometría que se pretende elaborar para la carrocería del vehículo Formula SAE, es lógico suponer que las formas finales de la carrocería deben variar posterior al análisis de los flujos y zonas de presión para la optimización del mejor perfil aerodinámico de la carrocería.

2.3 DISEÑO DE LA CARROCERIA EN SOFTWARE

Una vez que se ha realizado el bosquejo de diseño de la carrocería a la vez que se ha definido un tipo de geometría temporal del conjunto de la carrocería se comienza a diseñar las mismas líneas, curvas y formas pero en el software de diseño de ANSYS.

Es importante conocer que si el diseño de la carrocería en software no está acorde con la realidad definida en la etapa de concepción el resultado final no será satisfactorio.

Por lo tanto de la misma manera que se realiza en el proceso de bosquejo se toma la estructura del chasis como referencia para generar las primeras formas de trazo de la carrocería y definir la proporción de los espacios de los elementos así como de los componentes que existen en torno a su diseño. A continuación se muestran las líneas de diseño en función de la estructura del chasis figura 2.8.



- 22 Figura 2.8: Diseño de carrocería sobre el chasis.

2.3.1 CONSIDERACIONES AERODINAMICAS DEL DISEÑO DE CARROCERIA

Finalmente se consideran los parámetros aerodinámicos para el diseño de la carrocería considerando que esta a su vez se divide en diferentes zonas que actúan de manera diferente con el paso del viento. Estas zonas son:

- Influencia zona delantera.
- Influencia zonas laterales.
- Influencia zona posterior.
- Influencia zona inferior.

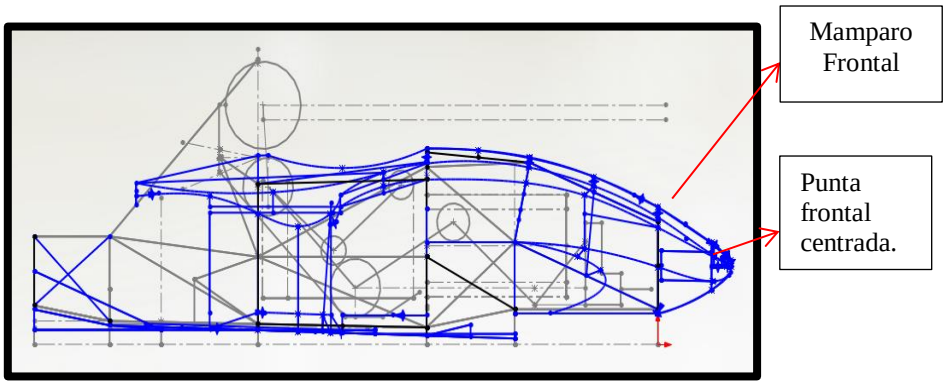
2.3.2 INFLUENCIA ZONA DELANTERA

La influencia de la resistencia aerodinámica en la parte delantera es considerable a partir de una velocidad de 60 km/h, por lo que el diseño de esta zona es fundamental ya que tiene mucha influencia sobre el coeficiente de resistencia frontal (Cx). Por lo tanto el diseño frontal con curvas suaves es beneficioso para el diseño.

El ángulo de inclinación de la nariz frontal también tiene influencia sobre el coeficiente de resistencia (Cx) así como también la inclinación del parabrisas tiene una moderada influencia si existiere en la carrocería[48].

Por lo tanto la tendencia es reducir este coeficiente (Cx) aumentando el ángulo de inclinación en la nariz frontal en donde el diseño de la punta de la nariz frontal obedece a una geometría que parte desde el centro frontal del atenuador de impactos como se muestra en la figura 2.9 con la finalidad de separar las presiones superiores - inferiores y presiones lateral izquierdo - derecho en igualdad de condiciones para distribuir de manera correcta el flujo hacia la parte posterior del vehículo.

[48]IZQUIERDO, Francisco, Teoria de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.



- **23 Figura 2.9:** Diseño lateral sobre chasis.

De esta manera se puede deducir que en el frontal muy difícilmente se puede variar diferentes tipos de geometría para el análisis aerodinámico ya que las limitaciones de diseño en base a la forma del chasis además de conseguir una punta que distribuya equitativamente las presiones y el flujo frontal hacia el resto de la carrocería son dos condicionantes que difícilmente se pueden variar para modificar la geometría de la nariz.

2.3.3 INFLUENCIA ZONAS LATERALES

Desde el plano horizontal, realizar un curvado de las superficies laterales como se muestra en la figura 2.10 reduce de manera normal el coeficiente de resistencia aerodinámico al avance (Cx) pero se incrementa su área frontal (Af)[49] lo que puede beneficiar o penalizar el diseño de los pontones laterales.

- **24 Figura 2.10:** Diseño pontones laterales con superficie curva.

[49] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

2.3.4 INFLUENCIA ZONA POSTERIOR

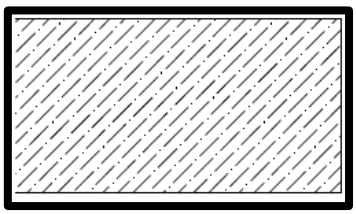
El diseño de la parte posterior es de mucha importancia en la influencia de la resistencia aerodinámica al avance ya que dependiendo del tipo de diseño de esta zona pueden existir variaciones o pérdidas de flujos de aire y presiones[50].

Existen tres tipos conocidos de perfiles posteriores:

- Tipo cuadrados.
- Tipo Inclinados.
- Tipo Escalón.

2.3.4.1 TIPO CUADRADOS

El perfil posterior de tipo cuadrado origina separaciones que forman vórtices en direcciones perpendiculares al flujo como se muestra en la figura 2.11.

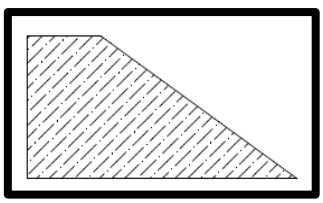


- 25 Figura 2.11: Perfil Cuadrado.

Fuente: IZQUIERDO Aparicio, Teoría de los vehículos automóviles, 2001.

2.3.4.2 TIPO INCLINADOS

Los perfiles de tipo inclinado generan flujos con dos vórtices en la dirección longitudinal como se muestra en la figura 2.12.



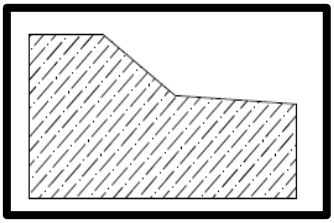
- 26 Figura 2.12: Perfil Inclinado.

Fuente: IZQUIERDO Aparicio, Teoría de los vehículos automóviles, 2001.

[50] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

2.3.4.3 TIPO ESCALON

El perfil tipo escalón genera tanto un flujo mixto longitudinal como perpendicular como se muestra en la figura 2.13[51].



- 27 Figura 2.13: Pontones laterales con superficie curva.

Fuente: IZQUIERDO Aparicio, Teoría de los vehículos automóviles, 2001.

2.3.4.4 TABLA COMPARATIVA

Como se puede observar a continuación en la figura 2.14 el tipo de perfil más beneficioso para obtener un coeficiente de resistencia al avance lo más bajo posible es el perfil tipo inclinado seguido del perfil cuadrado y finalmente el perfil tipo escalón.

TIPO	Cx	Cy	Cz
Cuadrada	Moderada	Alta	Baja
Inclinada	Baja	Alta	Baja
Escalón	Alta	Moderada	Alta

- 28 Figura 2.14: Influencia de la parte posterior en los coeficientes.

Fuente: IZQUIERDO Aparicio, Teoría de los vehículos automóviles, 2001.

Por lo tanto tomando en cuenta estos perfiles y los parámetros de diseño mencionados anteriormente, la parte posterior de los pontones laterales de la carrocería poseen una combinación de perfiles tipo cuadrado e inclinado como se muestra en la figura 2.15 garantizando así mediante su aplicación en la zona posterior un bajo coeficiente de resistencia al avance de la carrocería.

[51]IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

- 29 Figura 2.15: Pontones laterales con perfil cuadrado e inclinado.

2.3.4 INFLUENCIA ZONA INFERIOR

Como se conoce la parte inferior de un vehículo posee zonas muy rugosas así como también zonas discontinuas lo que genera un bajo o pobre rendimiento aerodinámico en el vehículo.

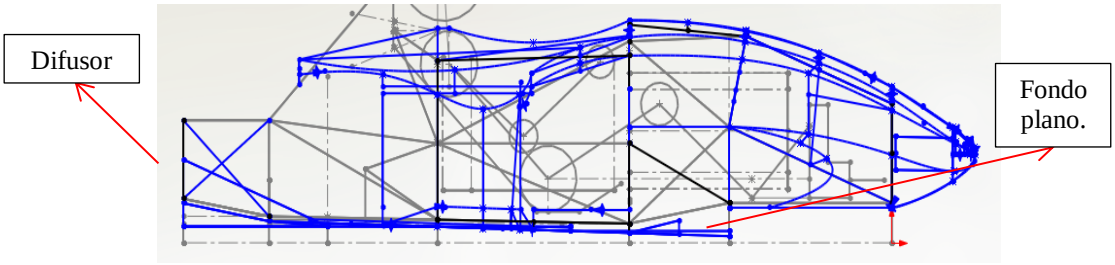
Por lo tanto para mejorar el efecto aerodinámico en esta zona se conoce que superficies lisas pueden reducir el valor del coeficiente de arrastre (Cx) en valores de 0.045; Pero si la parte trasera se diseña en forma de difusor el valor del coeficiente puede reducirse a 0.07.[52]

2.3.5 DISEÑO FONDO PLANO

Conociendo que en un vehículo tipo Formula SAE se debe aislar el fondo del vehículo, se puede aplicar superficies lisas continuas o en su defecto crear zonas lisas con difusores posteriores conocidos como fondo plano con difusor.

Por lo tanto en la búsqueda de reducir el coeficiente de arrastre aerodinámico (Cx) del vehículo en su máximo valor se realiza el diseño de fondo plano como se muestra en la figura 2.16 para su posterior análisis.

[52] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.



- 30 Figura 2.16: Diseño Fondo plano y difusores posteriores.

2.4 INTRODUCCION DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Una vez que se cumplen todos los parámetros para el diseño de la geometría de la carrocería y fondo plano del vehículo en el software se procede con el análisis del flujo de aire sobre cada geometría para identificar el perfil más idóneo que ofrezca la menor resistencia al viento.

El CFD permite solucionar numéricamente las ecuaciones de Navier - Stokes para fluidos en movimiento con la colaboración del software ANSYS y el módulo de análisis CFX para fluidos en movimiento en un medio, el mismo que comprende tres partes fundamentales para el análisis numérico.

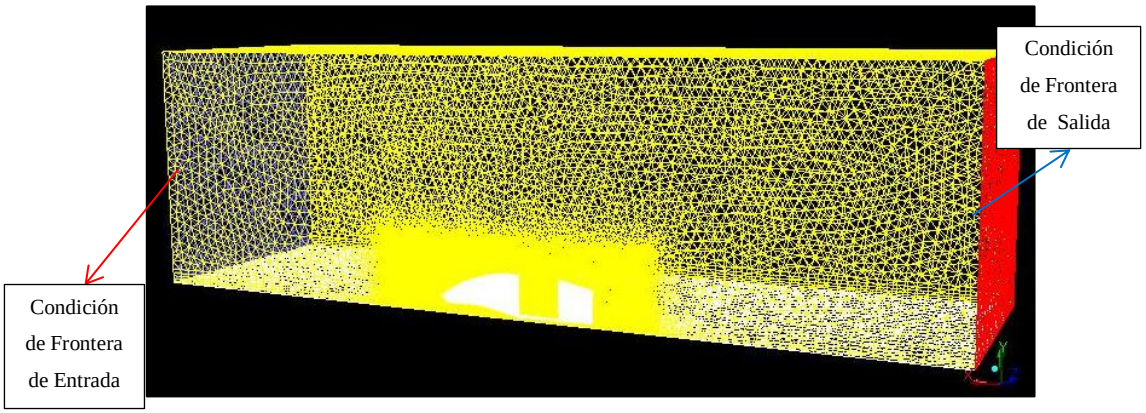
- Pre proceso.
- Resolución
- Post proceso.

2.4.1 PREPROCESO

En este apartado se define el planteamiento del problema, el cual comprende la construcción de la región del dominio computacional donde se discretiza en un numero finito de elementos llamado malla que permite definir las propiedades del fluido previo al análisis del modelo matemático así como también la descripción de las condiciones iniciales y de frontera además de la selección de las presiones.

2.4.1.1 DOMINIO

El dominio computacional consiste en representar un "túnel de viento" el cual encierra al vehículo que está asentado en la superficie inferior del dominio como se muestra en la figura 2.17 por donde pasa el fluido en su interior teniendo en cuenta del espacio necesario para que el flujo alrededor del vehículo se desarrolle lo suficiente dentro del dominio.



- 31 Figura 2.17: Condiciones de Frontera.

2.4.1.2 MALLADO

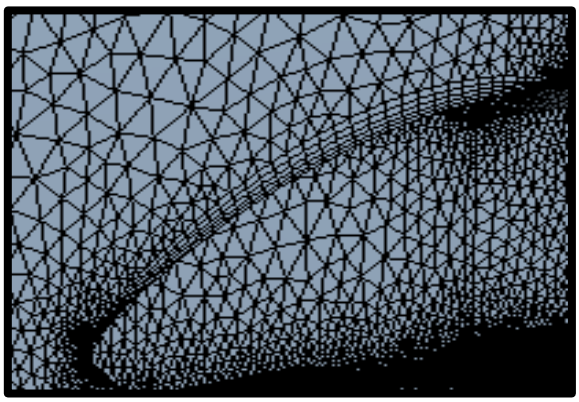
Es el proceso que se realiza para definir el tamaño y forma de dominio el cual una vez que se malla se divide en elementos conociendo que el mallado en ciertas zonas es de tipo más fino para garantizar una mayor proximidad en los resultados del análisis.

Se tiene en cuenta que la selección de la malla no necesariamente si es de tipo fino garantiza que los resultados sean los óptimos por lo que más adelante en el mallado de la geometría se especifica el tipo de malla y su selección para la solución del mallado de dominio.

Es necesario aclarar que para una mejor aproximación de datos en la resolución del problema, un refinamiento con un mallado fino no necesariamente justifica su aplicación por lo tanto se vuelve innecesario al necesitar de un mayor tiempo computacional.

2.4.1.3 CAPA LÍMITE

Para precisar el ajuste de datos en el análisis se aplica un refinado a la malla como se muestra en la figura 2.18 solo sobre las superficies del solido que se encuentran expuestas a la formación de capa limite, por lo tanto su ubicación y delimitación entre el sólido y el flujo es indispensable ya que la proximidad de su aplicación en la realidad existe como se define anteriormente.



- 32 Figura 2.18: Refinado de la malla.

2.4.1.4 DISCRETIZACION DEL PROBLEMA

Cuando problemas de carácter físico necesitan ser resueltos de manera numérica, los diferentes componentes para el análisis del dominio computacional deben ser representadas de una forma para que el software pueda descifrarlos, dicho de otra manera para que el computador los pueda entender.

Esto se puede conseguir ordenando los diferentes espacios nodales ya sean de zonas regulares o irregulares alrededor del dominio computacional en la llamada malla, la cual consiste en dividir en un numero finito de elementos el dominio computacional y así los cálculos pueden realizarse en intervalos temporales definidos donde la solución numérica nos muestra los valores en los puntos discretos en el dominio en un tiempo específico.[53]

Por lo tanto el proceso de trasladar un problema que contiene movimiento de un fluido en un problema numérico discreto preparado para ser resuelto en el software se conoce como discretizacion.

[53] DUEÑAS Efrén, Simulación numérica de un flujo turbulento alrededor de objetos sumergidos, Cali, Colombia, 2008.

2.4.1.4.1 FUNCIONES DE DISCRETIZACION EXISTENTES

El punto central de la discretizacion es el sustituir el problema continuo de infinitos grados de libertad de espacio y tiempo, en un problema discreto con finitos grados de libertad. Según la función de discretizacion, se presentan diferentes métodos[54]:

- Discretizacion Temporal.
- Discretizacion Espacial.

2.4.1.4.1.1 DISCRETIZACION ESPACIAL

Para el análisis del problema se aplica discretizacion espacial que subdivide el dominio del software creando el mallado. El movimiento de un fluido se refiere matemáticamente a especificar su velocidad en todos los puntos espaciales (nodos) y temporales[55]. Todas las mallas en CFD contienen nodos donde los parámetros de flujo se pueden resolver.

Existen tres clases de mallas para su uso:

- Mallas estructuradas.
- Mallas no estructuradas.
- Malla estructurada en multibloques.

Es necesario indicar que el software para resolver este problema análisis de fluidos en el módulo CFX de ANSYS 14.5 utiliza discretizacion espacial, ya que el estudio del problema es de tipo estacionario para los diferentes modelos de geometría que se encuentran fijos respecto al paso del fluido que los rodea, simulando de esta manera la realidad del paso de la carrocería a través del viento.

2.4.1.5 ELEMENTOS

Cuando el dominio ha sido discretizado a continuación se debe seleccionar el tipo de elemento conforme la necesidad del problema que se desea resolver por lo tanto primero

[54]DUEÑAS Efrén, Simulación numérica de un flujo turbulento alrededor de objetos sumergidos, Cali, Colombia, 2008.
[55] DUEÑAS Efrén, Simulación numérica de un flujo turbulento alrededor de objetos sumergidos, Cali, Colombia, 2008.

es necesario conocer los tipos de elementos existentes y las dimensiones en los que estos se desarrollan[56].

2.4.1.5.1 TIPOS DE ELEMENTOS

Como se mencionó anteriormente el método de volúmenes se basa en sentido deductivo inverso obteniendo balances finitos a partir de los asociados a partículas infinitesimales. Por lo tanto integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, es decir, en un pedazo de intervalo (1D UNIDIMENSIONAL), superficie (2D BIDIMENSIONAL) o volumen (3D TRIDIMENSIONAL) cuya forma específica depende de la malla y del sistema coordenado que se emplea[57].

A parte de la dimensionalidad del problema se entiende aun de volúmenes finitos cuando se refiere a los tramos en los que se ha subdividido el dominio, adquiriendo de esta manera un balance en cada una de las zonas discretas en las que se ha subdividido el dominio total.

2.4.1.5.1.1 ELEMENTOS UNIDIMENSIONALES

El análisis de los elementos de tipo unidimensional es relativamente más exacto por su relativa sencillez en comparación del análisis para sistemas de tipo bidimensional y tridimensional los cuales son una combinación con los elementos de tipo unidimensional y bidimensional por lo que se aplica un análisis de unificado de los dos tipos.[58]

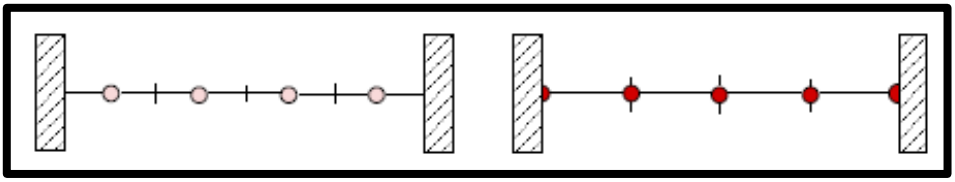
Comúnmente estos elementos pueden representarse para análisis de vigas elásticas de armado o capas finas de materiales de esfuerzo para cuerpos en revolución tridimensional. Para la continuidad de la función lo único que necesita es una variación cuadrática de su incógnita de desplazamiento con la variable relativa.

La mayoría de problemas de este tipo describen dominios unidimensionales por lo que en este apartado se incide particularmente en la disposición de nodos en dominios - línea.

[56] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.
[57] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.
[58] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.

2.4.1.5.1.1.1 FORMAS LINEALES

Existen modos fundamentales de introducción de nodos en dominios-línea que difieren en donde se colocan los nodos después del troceado figura 2.19.



- 33 Figura 2.19: Distribución de los nodos en un dominio unidimensional.

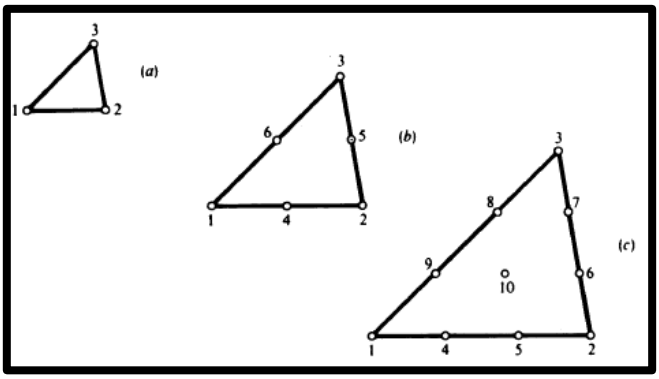
Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

2.4.1.5.1.2 ELEMENTOS BIDIMENSIONALES

Hace referencia a aquellos elementos que encierran una superficie dentro de límites para delimitar cierta zona lo que diferencia de los elementos unidimensionales por no seguir una sucesión infinita sin finalizar el desplazamiento del elemento en su origen.[59]

2.4.1.5.1.2.1 FORMAS TRIANGULARES

La forma triangular para la aproximación de cualquier tipo de contorno es de mayor ventaja en comparación a las formas como las rectangulares como consideración única para destacar su importancia como se muestra en la figura 2.20.



- 34 Figura 2.20: Elementos tipo triangulo (a) lineal, (b) cuadrático y (c) cubico.

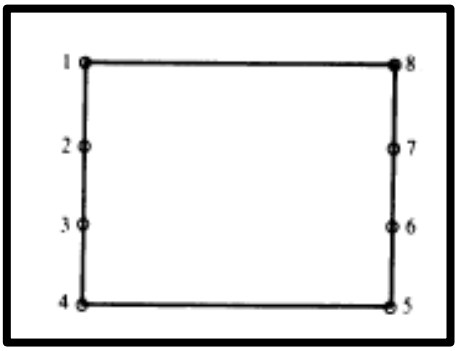
Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

2.4.1.5.1.2.2 FORMAS RECTANGULARES

El uso de elementos rectangulares se dedica a la representación de superficies tipo prismática o cilíndrica como se muestra en la figura 2.21 que para el análisis de un

[59] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.

problema toma un lado de los elementos y las coordenadas correspondientes paralelo al eje del sistema. [60]



- 35 Figura 2.21: Elemento rectangular.

Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

2.4.1.5.1.3 ELEMENTOS TRIDIMENSIONALES

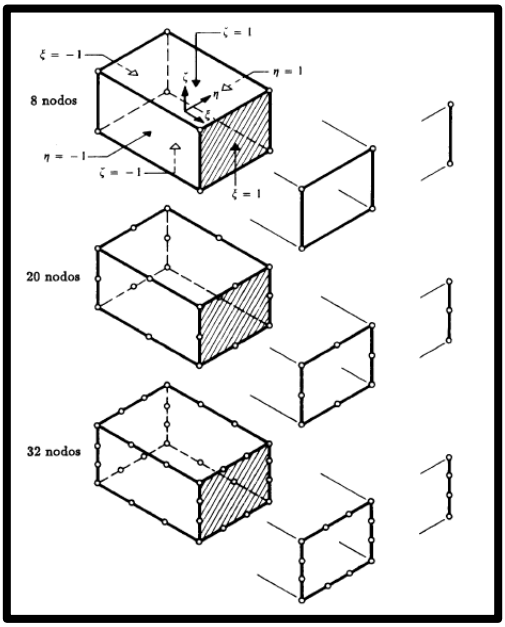
Son aquellos a los cuales se les da una proporción o volumen para definir un problema que tenga profundidad, lo que se consigue es que a lo largo de toda la cara de un elemento los valores nodales definan una variación única de la función a determinar.[61]

Los elementos de este tipo son los que se aplican para el análisis del problema mediante el método de volúmenes finitos ya que el análisis del proyecto consiste en el estudio de una geometría sólida y volumétrica en 3D.

2.4.1.5.1.3.1 PRISMAS RECTANGULARES

Son figuras son del tipo que para adquirir la continuidad entre sus elementos los valores de los nodos definen una variación única de la función que se quiere hallar a lo largo de toda una cara de un elemento como se muestra en la figura 2.22[62].

[60] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.
[61] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.
[62] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.

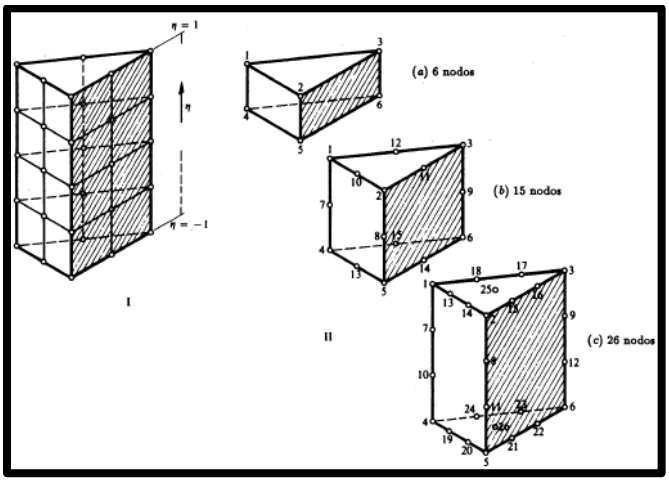


- 36 Figura 2.22: Prismas rectos de nodos en el contorno con elementos de cara y línea.

Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

2.4.1.5.1.3.2 PRISMAS TRIANGULARES

Existen prismas triangulares en tres dimensiones de la misma manera que se encuentra para formas triangulares de dos dimensiones; estos prismas triangulares se son más frecuentes de encontrar para el análisis de dominios en tres dimensiones como se muestra en la figura 2.23[63].



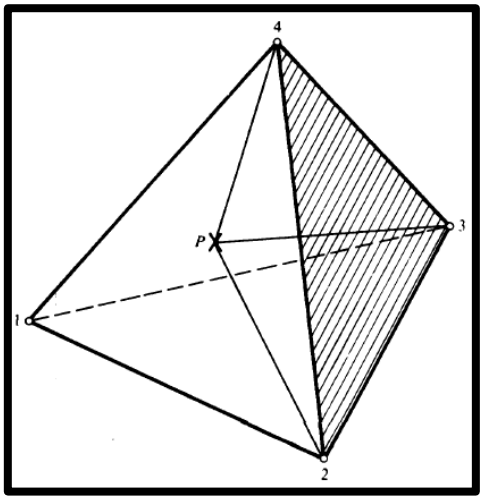
- 37 Figura 2.23: Elementos prisma triangulares (a) lineal (b) cuadrático y (c) cubico.

Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

[63] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.

2.4.1.5.1.3.3 FORMA TIPO TETRAEDRO

Los elementos del tipo tetraedro tienen propiedades similares a las de tipo triangular pero se obtienen en el plano de cada cara polinomios con el mismo grado de dos coordenadas garantizando la compatibilidad entre elementos como se muestra en la figura 2.24[64].



- 38 Figura 2.24: Figura tetraédrica.

Fuente: ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, 1994.

2.4.1.5.2 ELECCION DEL TIPO DE ELEMENTO FINAL DESCRIPCION

La elección del tipo de elemento tetraédrico se debe a que es el elemento que se ajusta de la mejor manera al proceso de mallado por el método de volúmenes finitos ya su forma geométrica permite una mejor agrupación de cada uno de los espacios de mallado así como también una mayor precisión en la resolución de flujos con geometrías de carácter estacionario.

2.4.2 RESOLUCION

Este proceso es el más importante para análisis del comportamiento del fluido sobre la geometría de la carrocería ya que se encarga de resolver el problema mediante la aplicación del modelo matemático por el método de volúmenes finitos.

En este apartado es en donde se resuelve la versión discretizada de las ecuaciones básicas que se plantean anteriormente. Por lo tanto de manera esperada la aproximación

[64] ZIENKIEWICZ Taylor, El método de los elemento finitos, Madrid, España, 1994.

de las soluciones iterativas deben generar las existencias de la convergencia de datos como la referencia más importante para garantizar que la solución posee el mayor grado de exactitud.

2.4.2.1 CONDICIONES DE CONTORNO

La selección de las condiciones iniciales y de frontera resultan muy importantes de la misma manera que las ecuaciones del modelo matemático que gobiernan el sistema ya que son los parámetros que definen la entrada y salida del fluido que actúa sobre la carrocería la cual se encuentra fija en estado estacionario y donde el flujo es el que se desplaza sobre esta en un medio cerrado representando un túnel de viento.

De esta manera y partiendo en orden se resalta que las condiciones iniciales definen el estado del fluido justo desde el instante inicial que se considera como el origen del análisis en función del avance del tiempo (t=0).

Para ello la selección en la superficie de entrada del dominio computacional la condición de entrada de flujo uniforme (*inlet*) es en donde se encuentra el ingreso de flujo libre con un valor de presión P = 1, y la condición de frontera es la superficie del solido del vehículo la cual es una pared sin deslizamiento (estático).

La condición de la superficie del suelo del dominio es una pared fija sin deslizamiento en donde se asienta el vehículo; la condición de frontera del dominio es la superficie posterior al vehículo por donde sale el flujo laminar y/o turbulento (*outlet*) con un valor de presión P = 0. La aplicación de las condiciones iniciales y de frontera para el problema son sencillos, pero el problema radica en que en el proceso de simulación la solución se aleja mucho de la solución real puede dar lugar a problemas en la convergencia de datos.

2.4.2.2 DESCRIPCION DEL METODO DE VOLUMENES FINITOS (FVM)

Se realiza una breve descripción de este método, que permite estudiar el comportamiento de los problemas de diferentes geometrías mediante el análisis de las ecuaciones de constitución previamente descritas en el capitulo1.

Lo que se desea realizar es que aplicando el método de volúmenes finitos se pueda transformar el sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones lineales para resolver de manera iterativa cada uno de los nodos de discretizacion del mallado.

El método de volúmenes finitos es un procedimiento de discretizacion en el que se realiza el proceso inverso que el que se utiliza en la obtención de las ecuaciones diferenciales de transporte. Se parte de las relaciones integrales en un volumen fluido (finito) obteniéndose las relaciones para una partícula fluida al reducir el volumen de integración infinitesimal[65].

En este método el dominio computacional se subdivide en un número finito de volúmenes llamados volúmenes de control. Las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido se acoplan a cada volumen de control y se resuelven de manera iterativa.

En el proceso de discretizacion se obtiene en un conjunto de ecuaciones algebraicas y con incógnitas las variables ubicadas en los centros geométricos de los volúmenes de control. A través de la integración de cada volumen de control el fluido alrededor del dominio se puede modelar completamente el problema.

2.4.2.3 ERROR DESEADO

Es necesario indicar que para la solución del sistema, la aproximación del análisis para el problema debe ser lo más cercana a la realidad, por lo que se puede elegir diferentes valores de aproximación de error, lo que permitirá disminuir en su máxima expresión la proximidad del cálculo, lo que se traduce en eficiencia del análisis de todo el problema para elegir e interpretar de mejor manera los datos finales.

De esta manera para la solución del problema de diferentes geometrías se elige el error igual a 1E-4 , ya que su proximidad para el análisis es la necesaria así como eficiente para el análisis en el procesador.

[65] VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

2.4.3 POSTPROCESO

En esta parte se realiza la visualización de datos tanto de manera cuantitativa como cualitativa del modelo del problema propuesto en el la etapa de resolución. Aquí se pueden representar los vectores de dirección o contornos de velocidad para analizar la tendencia de trayecto del fluido así como también el valor de la presión, temperatura, energía cinética y otras propiedades más presentes sobre la superficie del vehículo.

2.4.3.1 ANALISIS CONVERGENCIA

Es la capacidad que tiene el conjunto de ecuaciones algebraicas en representar la solución analítica del conjunto de ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones convergen cuando la solución numérica se asemeja a la solución analítica y que frecuentemente sucede cuando el mallado es de tipo más fino.

La solución del sistema de ecuaciones algebraicas que aproxima el sistema de ecuaciones en derivadas parciales converge si la solución aproximada es del mismo valor para cada valor de la variable independiente cuando el espacio en el mallado es menor entre cada espacio de elemento de mallado.

2.5 ANALISIS DE LAS GEOMETRIAS DE CARROCERIA

A continuación se realiza la simulación aerodinámica de cada una de las posibles geometrías para determinar el tipo de perfil de carrocería más idóneo que cumpla con la reglamentación de Formula SAE y que principalmente posea un bajo coeficiente aerodinámico de arrastre así como también que las presiones generadas en el área frontal del vehículo sean las de más bajo valor.

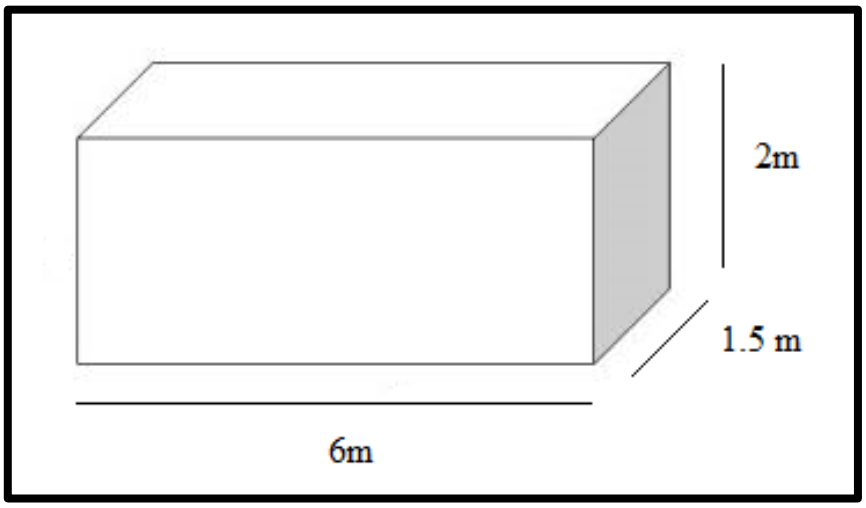
En el análisis de todas las geometrías se emplea el mismo valor de dimensiones para todo el dominio garantizando así el mismo análisis para cada uno de ellos. De la misma manera la temperatura se encuentra en estado isotérmico para el proceso de análisis de todas las geometrías.

La velocidad para el análisis la carrocería del vehículo es de 17 m/s, ya que este valor representa la velocidad media de desplazamiento del vehículo en pista por lo tanto diseño de la carrocería tomara como base esta velocidad pudiendo optimizarse su forma para velocidades mayores.

2.5.1 CARROCERIA CON PONTONES LATERALES TIPO TRAPECIO

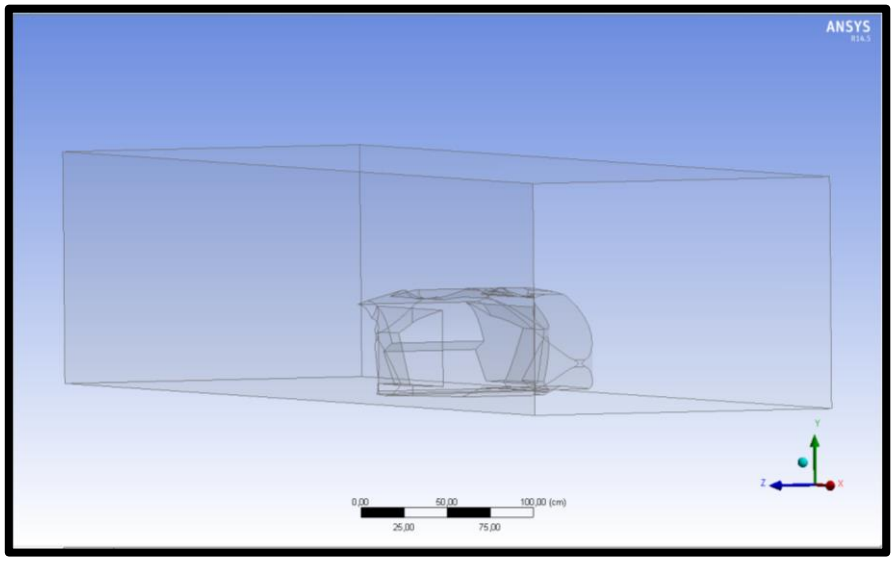
2.5.1.1 DOMINIO:

Las dimensiones del dominio computacional, para el análisis de todas las geometrías poseen los siguientes valores:



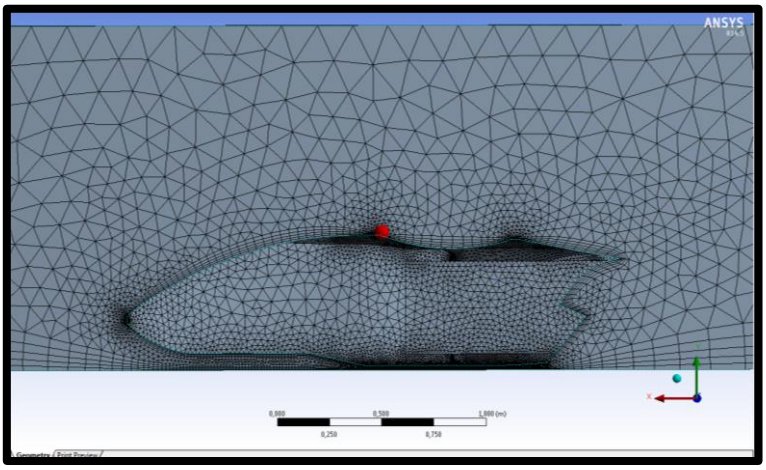
- 39 Figura 2.25: Medidas dominio general.

Dominio computacional para el análisis de la carrocería con laterales tipo trapecio.



- 40 Figura 2.26: Dominio carrocería con laterales tipo trapecio.

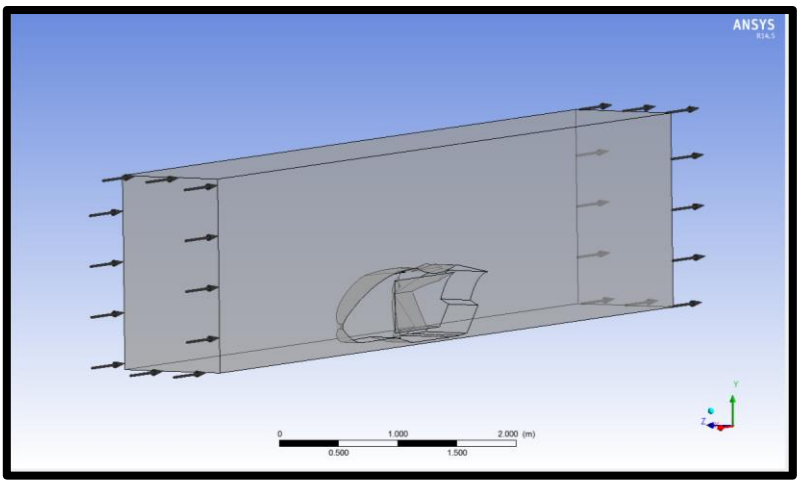
2.5.1.2 MALLADO:



- 41 Figura 2.27: Mallado carrocería con laterales tipo trapecio.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 338215 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 948669 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5
- **Angulo de curvatura normal:** 12°

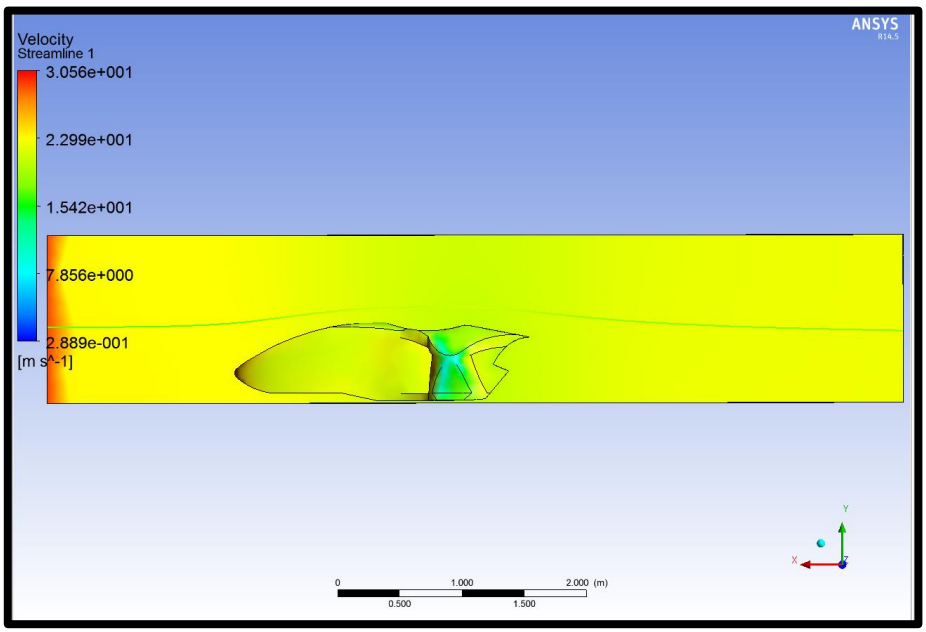
2.5.1.3 RESOLUCION:



- 42 Figura 2.28: Condiciones de frontera.

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad media.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.5.1.4 RESULTADOS:



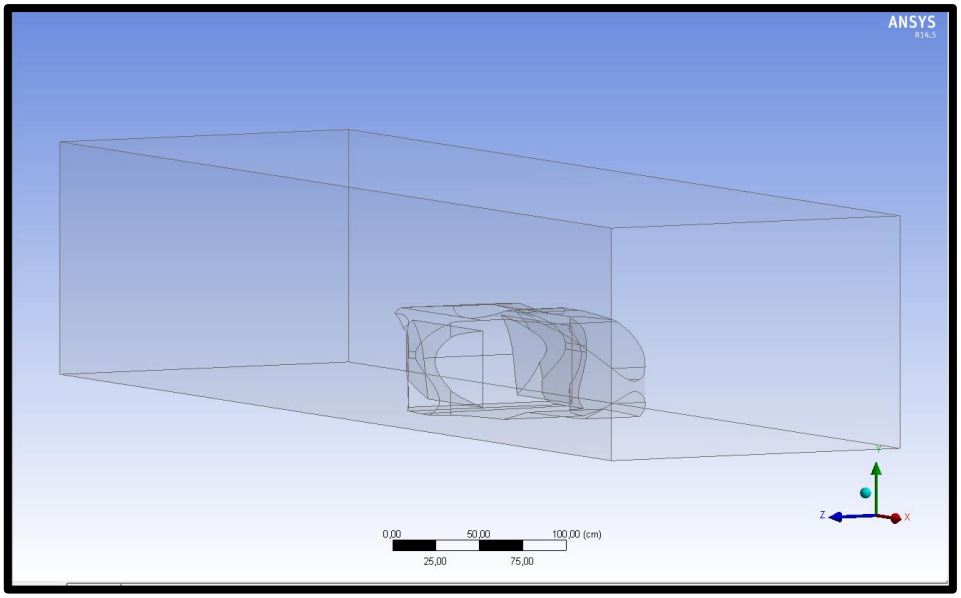
- 43 Figura 2.29: Vista lateral carrocería con laterales tipo trapecio.

- **Tiempo de resolución:** 30 min 13 seg
- **Presión mínima:** 182.5 (Pa)
- **Presión máxima:** 206.7 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.85 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 21.65 (m/s)
- **Coeficiente adimensional (Cx):** 0.4453.

2.5.2 CARROCERIA CON PONTONES LATERALES SEMI-OBLICUO

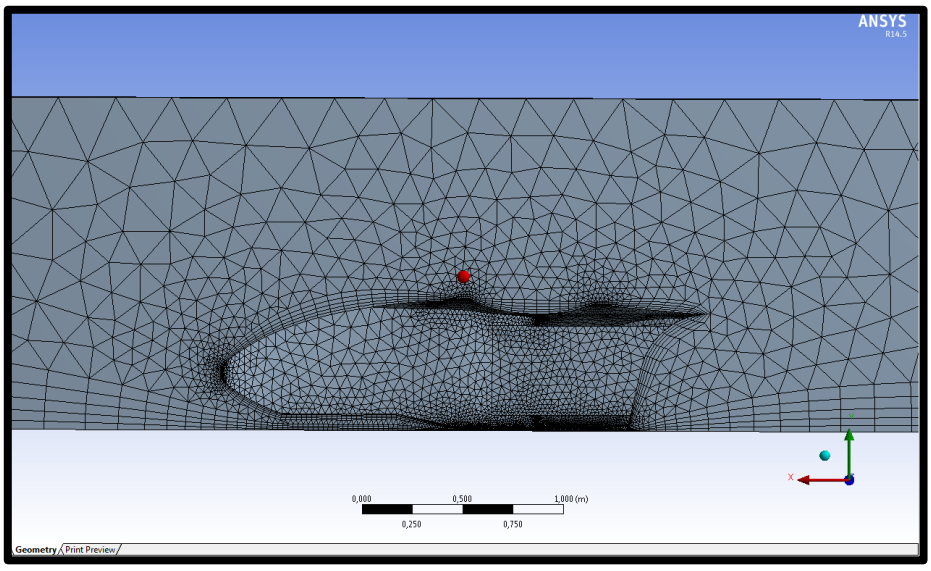
2.5.2.1 DOMINIO:

Dominio computacional para el análisis de la carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.



- 44 Figura 2.30: Dominio carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.

2.5.2.2 MALLADO:



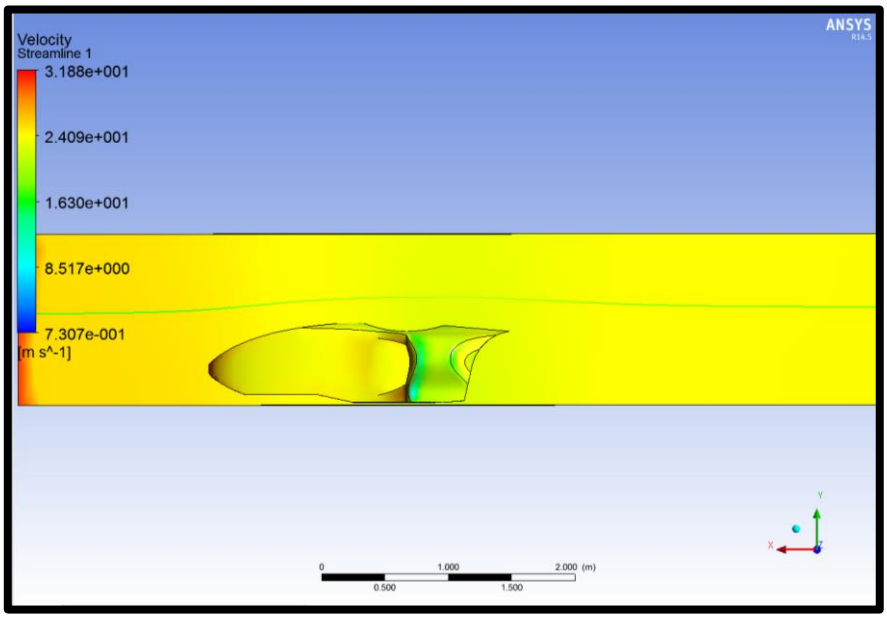
- 45 Figura 2.31: Mallado carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 117554 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 345678 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5
- **Angulo de curvatura normal:** 12°

2.5.2.3 RESOLUCION:

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia:** k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad media.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Número de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.5.2.4 RESULTADOS:



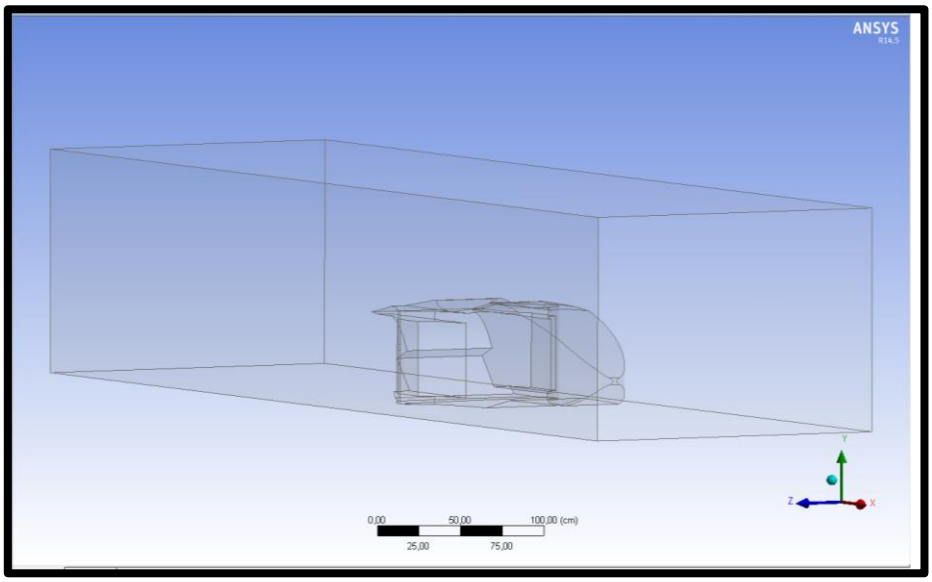
- 46 Figura 2.32: Vista lateral carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.

- **Tiempo de resolución:** 8 min 1 seg
- **Presión mínima:** 192.5 (Pa)
- **Presión máxima:** 211.1 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 17.03 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 21.20 (m/s)
- **Coeficiente adimensional (Cx):** 0.5747.

2.5.3 CARROCERÍA CON PONTONES LATERALES RECTANGULAR

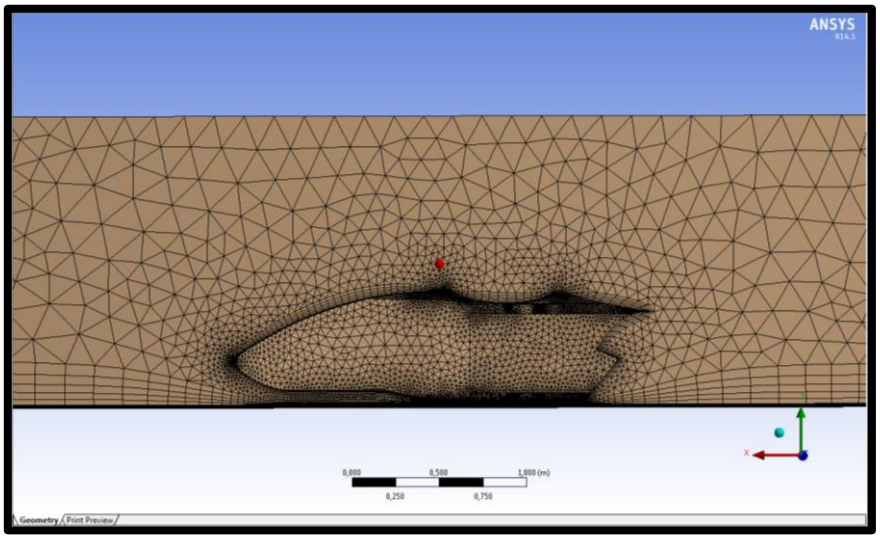
2.5.3.1 DOMINIO:

Dominio computacional para el análisis de la carrocería con laterales tipo rectangular.



- 47 Figura 2.33: Dominio carrocería con laterales tipo rectangular.

2.5.3.2 MALLADO:



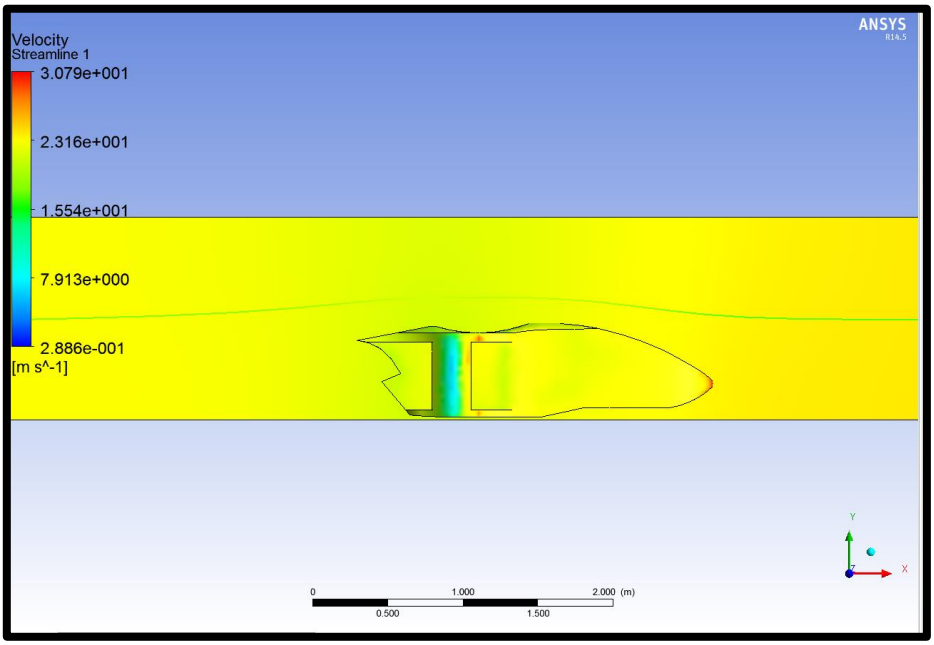
- 48 Figura 2.34: Mallado carrocería con laterales tipo rectangular.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 356770 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 1018946 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5
- **Angulo de curvatura normal:** 12°

2.5.3.3 RESOLUCION:

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad media.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.5.3.4 RESULTADOS:



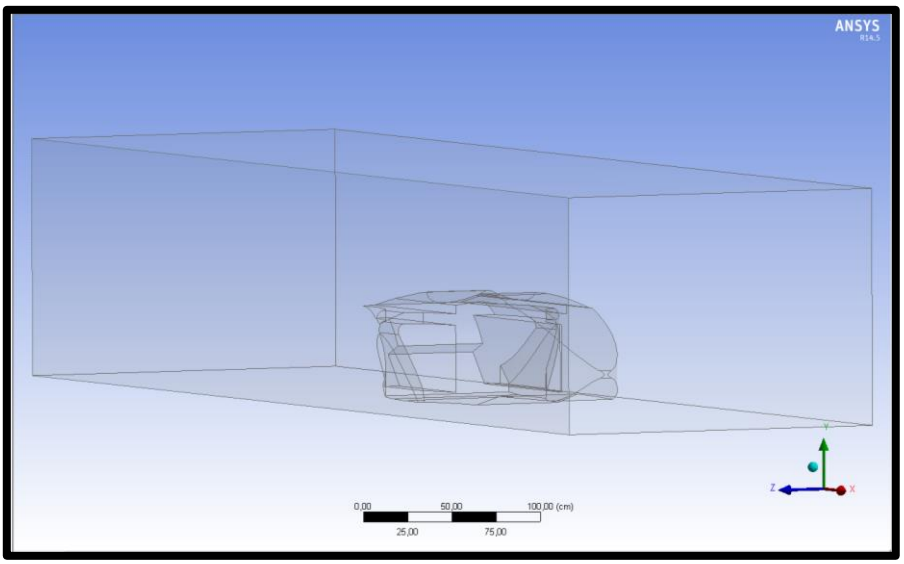
- 49 Figura 2.35: Vista lateral carrocería con laterales tipo rectangular.

- **Tiempo de resolución:** 21 min 24 seg
- **Presión mínima:** 187.2 (Pa)
- **Presión máxima:** 208.9 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.95 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 21.40 (m/s)
- **Coeficiente Adimensional (Cx):** 0.4837

2.5.4 CARROCERÍA CON PONTONES LATERALES TRIANGULARES

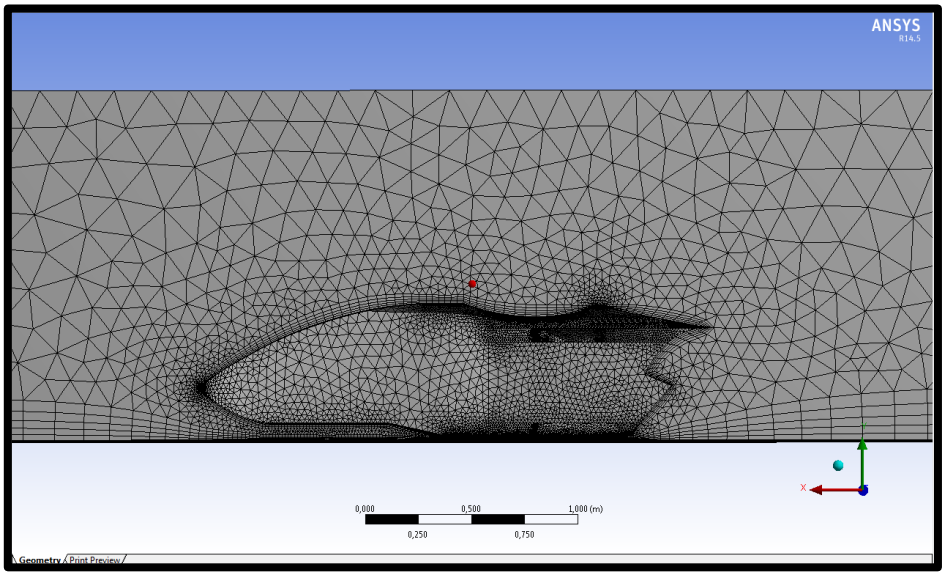
2.5.4.1 DOMINIO:

Dominio computacional para el análisis de la carrocería con laterales tipo triangular.



- 50 Figura 2.36: Dominio carrocería con laterales tipo triangular.

2.5.4.2 MALLADO:



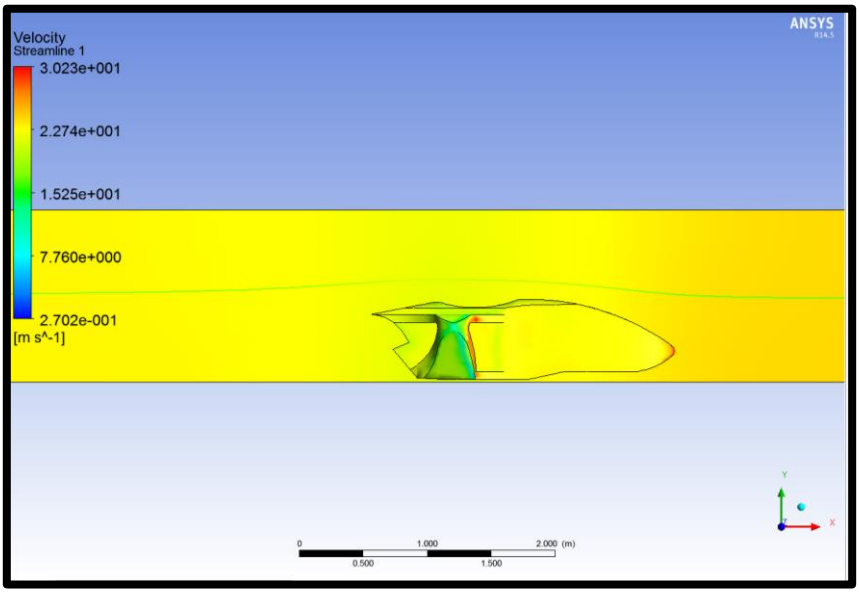
- 51 Figura 2.37: Mallado carrocería con laterales tipo triangular.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 367807 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 1086304 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5
- **Angulo de curvatura normal:** 12°

2.5.4.3 RESOLUCION:

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad media.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.5.4.4 RESULTADOS:

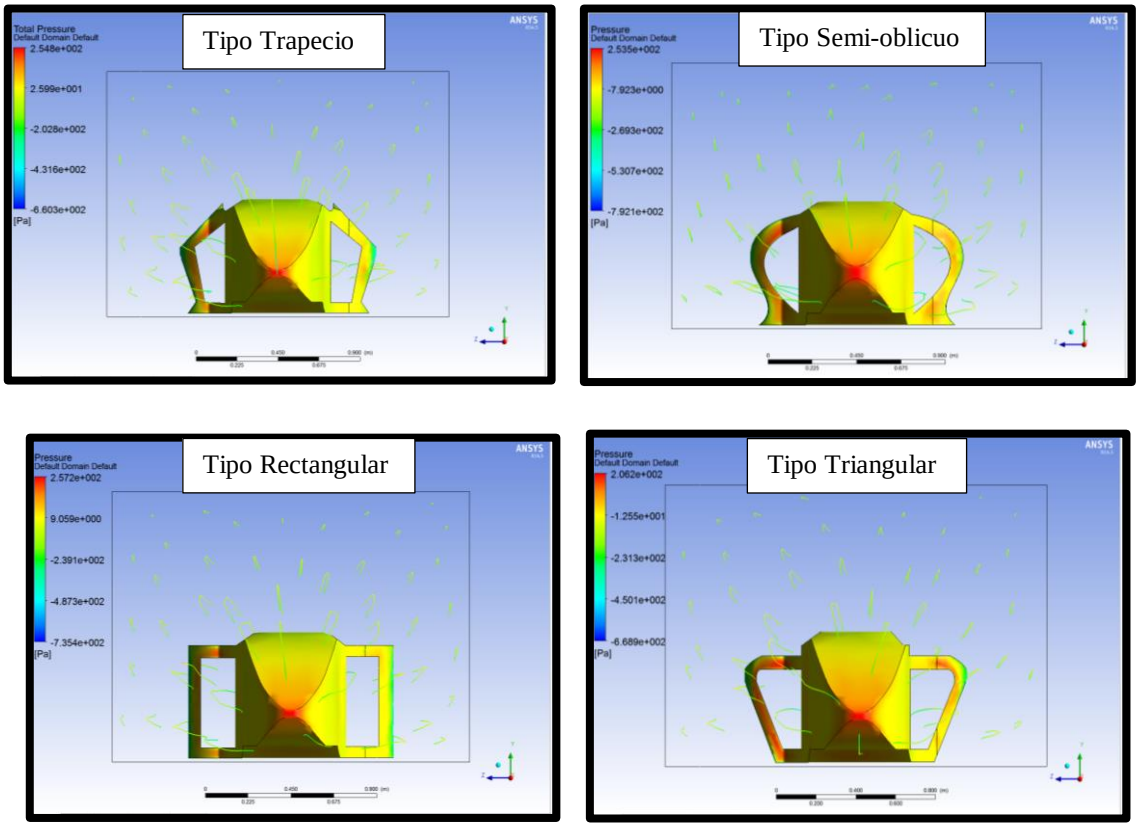


- 52 Figura 2.38: Vista lateral carrocería con laterales tipo triangular.

- **Tiempo de resolución:** 40 min 2 seg
- **Presión mínima:** 187.5 (Pa)
- **Presión máxima:** 202.01 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.80 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 30.23 (m/s)
- **Coeficiente Adimensional (Cx):** 0.4786

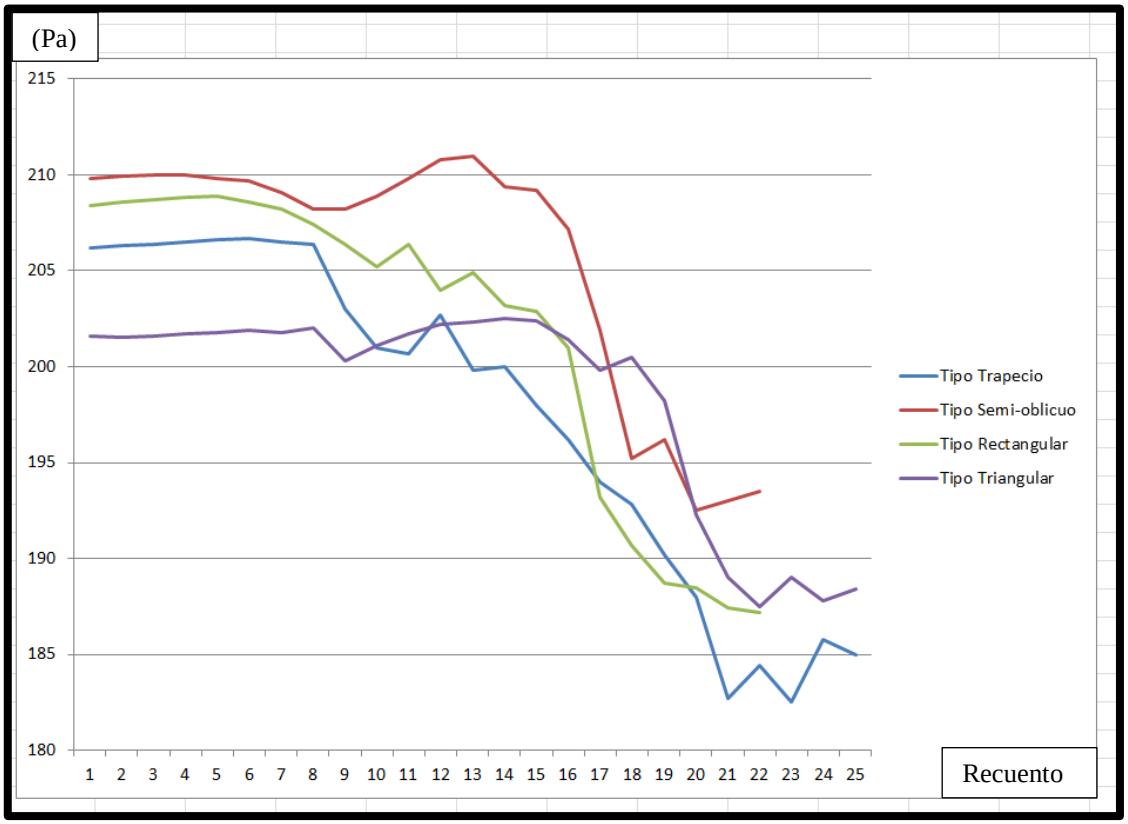
2.5.5 COMPARACIÓN DE PRESION EN CARROCERIAS

Para analizar el tipo de geometría más idóneo en el comportamiento aerodinámico para la construcción de la carrocería se realiza un estudio sobre las presiones frontales como se muestra en la figura 2.39 a las cuales cada forma reacciona de diferente manera en su paso por el fluido, por lo tanto la comparación entre cada geometría nos muestra la forma más eficiente.



- 53 Figura 2.39: Vista frontal de las carrocerías.

Desde la vista frontal se puede observar la distribución de las diferentes presiones en cada una de las carrocerías; a continuación se muestran las curvas de comportamiento de las presiones de cada una de las carrocerías para su comparación.



- 54 Figura 2.40: Curvas de comportamiento de presión de carrocerías.

Como se puede observar en la figura 2.40 la presión en la carrocería con laterales tipo semi- oblicuo posee el valor más alto y el que más tiempo demora en reducir la presión existente a lo largo de su geometría, por lo tanto no es recomendable aplicar tomando en cuenta estos puntos.

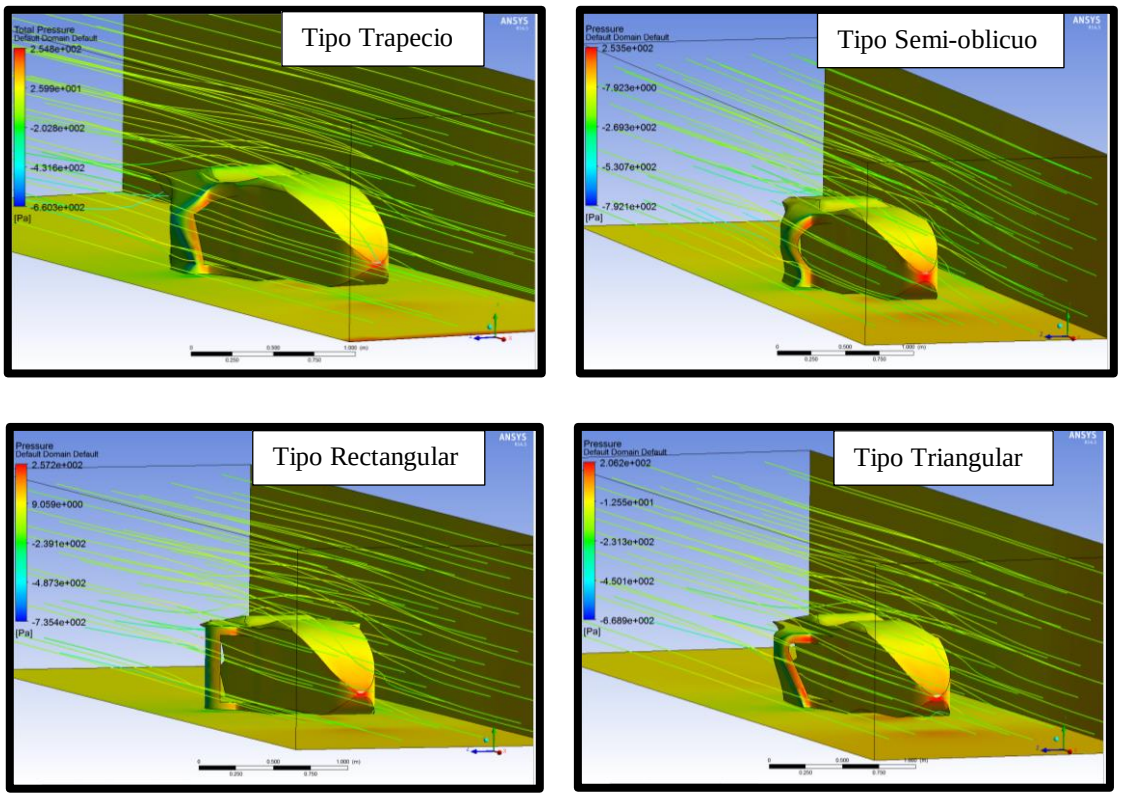
De manera seguida la carrocería con laterales de tipo rectangulares es la que aparece en los valores de la tabla con presiones más altas, pero que desde el recuento numero 11 aún se mantiene en presiones medias, pero a partir del recuento numero 16 desciende la presión de manera rápida, pero su aplicación tampoco es recomendable ya que existen dos geometrías con valores más bajos.

A continuación la tercera carrocería con laterales tipo trapecio es la que posee medias presiones en su parte inicial hasta el recuento número 9, y que estas disminuyen más rápido a partir del recuento numero14 de manera más efectiva que las que las dos carrocerías anteriores.

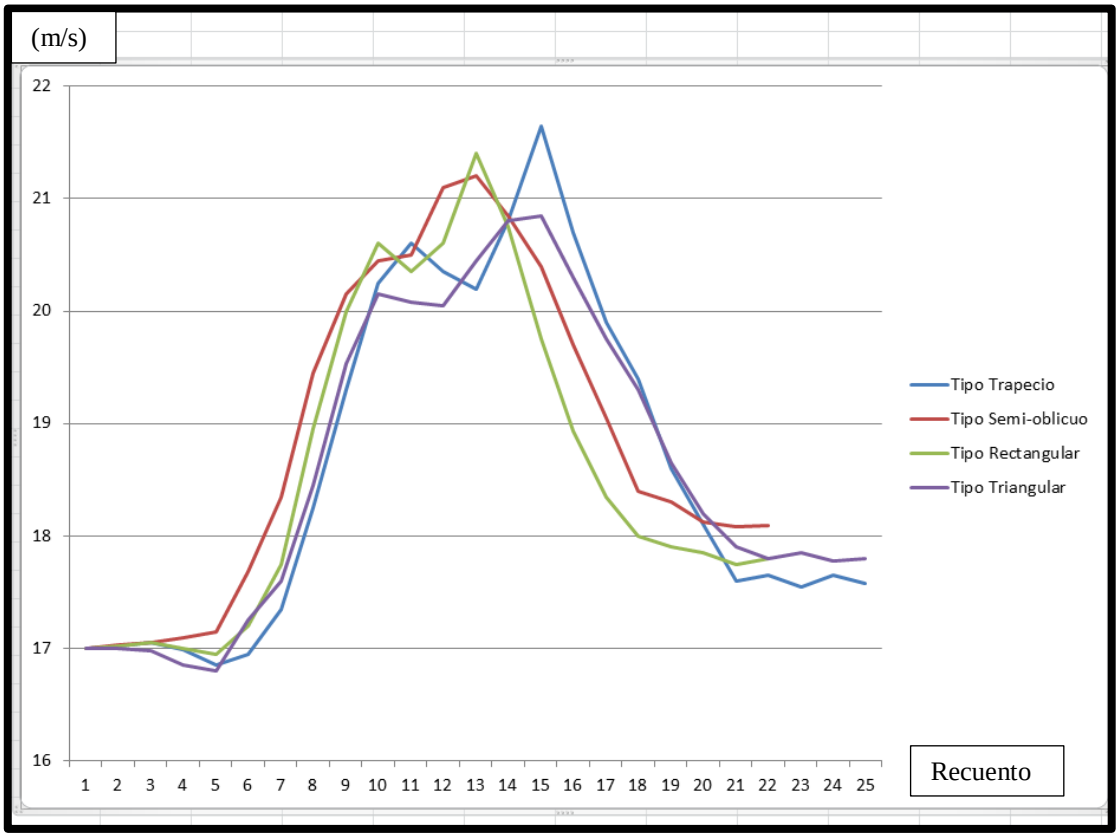
La carrocería con laterales tipo triangular es la más efectiva en lo que a presión inicial se refiere hasta el recuento número 9, pero si se observa a partir de ahí su presión vuelve a aumentar hasta el recuento número 17,5 durante un gran tiempo a lo largo de su geometría; por lo que si en comparación con la carrocería con laterales tipo trapecio es la que más rápido desciende la presión en el menor tiempo posible.

Por lo tanto; desde el estudio de las presiones frontales esta carrocería es la que posee la geometría más idónea para un vehículo de estas características.

2.5.6 COMPARACIÓN DE VELOCIDAD DE FLUJO EN CARROCERIAS



- 55 Figura 2.41: Perspectiva general de las carrocerías.



- 56 Figura 2.42: Curvas de comportamiento de velocidad de carrocerías.

Como se observa la distribución de las curvas de comportamiento de velocidad, todas las curvas de comportamiento poseen gran similitud entre sí, pero lo que se necesita conocer la mayor velocidad desplazamiento del flujo de aire a través del vehículo lo más constante posible.

Se puede observar en la figura 2.42, que la carrocería con pontones laterales tipo triangular ofrece bajos picos de velocidad en el paso del flujo de aire a través de la carrocería y en un tiempo muy prolongado entre los valores de recuento de 7 y 20 lo que se traduce en resistencia al avance y deficiencia por parte de esta geometría.

A continuación se analiza la curva de comportamiento de la carrocería con pontones laterales de tipo semi-oblicuo la misma que posee un pico de velocidad mayor que la curva anterior en el paso de flujo de aire a través de la carrocería pero con valores de recuento entre el 7 y 17, que si se compara con la geometría anterior es mejor pero aún por debajo de los valores de las otras geometrías.

La carrocería con pontones laterales tipo rectangular es mejor en comparación a las dos geometrías previamente mencionadas, posee un pico de velocidad un tanto mayor a la geometría con laterales tipo semi-oblicuo y con valores en el recuento de entre 7 y 15, lo cual destaca su baja distancia para mantener lo más homogéneo posible la velocidad del viento pero aún menor a la carrocería con laterales tipo trapecio.

La carrocería con laterales tipo trapecio es la carrocería que produce los picos más altos de velocidad del paso de flujo de aire alrededor de la geometría del vehículo por lo cual es la más eficiente en este aspecto, pero con valores en el recuento que se encuentran entre 9 y 18, una unidad de separación mayor que los valores que se producen en la carrocería con laterales tipo rectangular pero que sin embargo es la carrocería mas eficiente y que analizando estas curvas es la más idónea para su aplicación

2.5.7 DESCRIPCION FINAL

Mediante la comparación de los diferentes tipos de geometrías para realizar los análisis de presiones y velocidad del flujo sobre cada carrocería, se determina que la mejor forma con el mejor comportamiento aerodinámico es la geometría con laterales tipo trapecio con presiones bajas y velocidades que permiten el mejor funcionamiento de toda la carrocería a través del flujo de aire.

2.5.8 COMPARACIÓN DE COEFICIENTE (Cx)

De la misma manera que se realiza la comparación entre presiones y velocidades de flujo se realiza la comparación de los valores de coeficientes de resistencia (Cx) como se observa en la figura 2.43 se presentan los diferentes valores que se obtienen de los análisis de flujos aplicados sobre las diferentes geometrías de carrocería y así determinar la forma aerodinámica más eficiente y funcional para la construcción.

COMPARACION COEFICIENTE (Cx)				
	PERFIL TRAPECIO	PERFIL SEMI – OBLICUO	PERFIL RECTANGULAR	PERFIL TRIANGULAR
COEFICIENTE (CX)	0.4453	0.5747	0.4837	0.4786

- 57 Tabla 2.43: Cuadro comparativo.

Por lo tanto analizando de manera descendente los valores de los coeficientes de resistencia (Cx) se parte del pontón lateral semi- oblicuo donde su coeficiente (Cx) es de los más altos de la tabla y si se analiza posteriormente su perfil para la construcción resulta compleja por su curvatura en comparación a los demás modelos por lo que se descarta su aplicación.

De manera seguida si se analizan los pontones laterales tipo rectangular y triangular se puede observar que existen bondades y limitaciones para su elección, por lo que comparando los valores del coeficiente de resistencia (Cx) del pontón rectangular es mayor en comparación a los pontones de tipo triangular.

Si se tuviera que definir entre esos dos tipos de pontones laterales tanto rectangulares como triangulares se debe estudiar con mayor detenimiento el comportamiento del valor de presiones así como del valor de (Cx) ya que se pueden arriesgar los beneficios o contras que cada uno de ellos ofrecen a diferentes regímenes de velocidad.

Finalmente se analiza el pontón lateral tipo trapecio, en el cual el valor del coeficiente de resistencia (Cx), es el menor de todos los diseños de geometría por lo que se escoge por su efectividad al poseer un Cx = 0.4453, ya que es el valor de coeficiente más bajo y destacable para el rendimiento aerodinámico de un vehículo de estas características.

2.5.9 VALIDACIÓN DE DATOS DE LA CARROCERIA

2.5.9.1 PROCEDIMIENTO:

Para tener certeza o corroborar los datos que se obtienen del software de simulación ANSYS, se recurre al análisis del coeficiente de resistencia Cx mediante la aplicación de cálculos y de esta manera verificar que el proceso previo de simulación es verídico y así determinar con gran seguridad que esta forma de carrocería posee el valor 0.4453 de este coeficiente.

A continuación se procede con el cálculo, el cual se realiza con el vehículo en desaceleración sin accionamiento de los frenos, la palanca de velocidades en punto neutro y desplazándose sobre la pista lisa (como característica principal de prueba) en el circuito de Silverstone – Inglaterra y con velocidad de viento cruza casi despreciable[66].

Se obtienen los siguientes resultados como se muestra en la figura 2.44:

CUADRO DE PRUEBAS DE DESLIZAMIENTO		
	1RA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO	**2DA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO**
VELOCIDAD INICIAL DEL VEHICULO	100 (km/h)	50 (km/h)
VELOCIDAD FINAL DEL VEHICULO	90 (km/h)	40 (km/h)
TIEMPO TRANSCURRIDO	7.2 (seg)	14.3 (seg)

- 58 Tabla 2.44: Cuadro de pruebas de desplazamiento.

2.5.9.2 SUPOSISIONES:

Se calcula el valor aproximado del coeficiente de resistencia aerodinámica al avance con resistencia a la rodadura de valor constante. En las condiciones de prueba se considera que la fuerza de desaceleración es igual a la resistencia al movimiento.

Que durante el tiempo de cada prueba la aceleración permanece constante.

[66] IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.

2.5.9.3 SOLUCION:

Fuerzas retardadoras = Resistencia a la rodadura + Resistencia aerodinámica al avance.

Por lo tanto:

$$R = (P * Fr) + \frac{P}{2} + Cx * Af * V^2 = \gamma m * m * a \qquad (2,1)$$

Fr = Resistencia a la rodadura.

γm = Factor de mayoración adimensional de masa para tener en cuenta la inercia de las masas en el movimiento de rotación[67].

2.5.9.4 PLANTEAMINETO:

Aceleración:

$$A1 = \frac{Vi1 - Vf1}{t1} \qquad A2 = \frac{Vi2 - Vf2}{t2} \qquad (2,2)$$

Velocidad media:

$$V1 = \frac{Vi1 + Vf1}{2} \qquad V2 = \frac{Vi2 + Vf2}{2} \qquad (2,3)$$

Sustituyendo (2,2) y (2,3) en (2,1) se tiene que:

$$(P * Fr) + \frac{P}{2} + Cx * Af * V^2 = \gamma m * m * a1$$

$$(P * Fr) + \frac{P}{2} + Cx * Af * V^2 = \gamma m * m * a2$$

Despejando se obtiene el coeficiente de resistencia aerodinámica.

$$Cx = \frac{\gamma m * m\,(A1 - A2)}{\frac{\rho}{2} * Af * (V^2 1 - V^2 2)} \qquad (2,4)$$

[67]IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.

2.5.9.5 DESARROLLO:

Datos:

Af = 0.91 m^2

γm = 1.9 Para vehículos de competencia.

m = 297 kg vehicular + 70 kg piloto. = 367 kg.

ρ = 1.225 kg/m^3

Aceleración:

$$A1 = \frac{100 - 90}{7.2} = 1.38 \left(\frac{km}{h}\right) = 0.39 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$A2 = \frac{50 - 40}{14.3} = 0.69 \left(\frac{km}{h}\right) = 0.198 \left(\frac{m}{s}\right)$$

Velocidad media:

$$V1 = \frac{100 + 90}{2} = 95 \left(\frac{km}{h}\right) = 26.38 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$V2 = \frac{50 + 40}{2} = 45 \left(\frac{km}{h}\right) = 12.5 \left(\frac{m}{s}\right)$$

Sustituyendo (2,2) y (2,3) en (2,1) se tiene que:

$$(P * Fr) + \frac{P}{2} + Cx * A * V^2 = \gamma m * m * a1$$

$$(P * Fr) + \frac{P}{2} + Cx * A * V^2 = \gamma m * m * a2$$

Despejando se obtiene el coeficiente de resistencia aerodinámica.

$$Cx = \frac{(1.9) * (367) * (0.39 - 0.198)}{\left(\frac{1.225}{2}\right) * (0.9) * (695.90 - 156.25)} = \frac{133.88}{297.48} = 0.45004$$

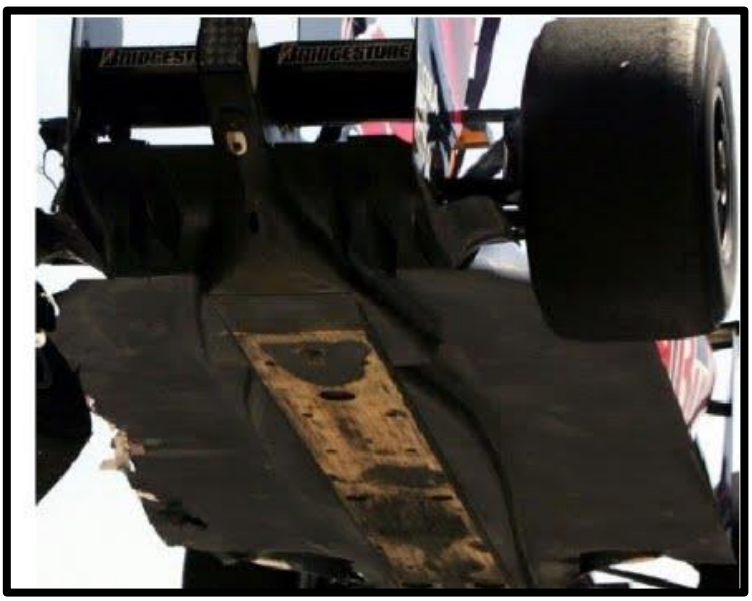
2.5.9.6 DESCRIPCION FINAL:

El valor de coeficiente de resistencia al avance (Cx) que se obtiene en la simulación de ANSYS tiene un valor de 0.4453, que en comparación con el valor de 0.45004 que se obtiene aplicando la fórmula para determinación de este coeficiente, la proximidad de sus datos presta constancia de que tanto al análisis por software así como por la resolución del cálculo matemático el valor del coeficiente de resistencia al avance aerodinámico (Cx) tiene un error del 1,053% concluyendo que el valor de coeficiente (Cx) de este vehículo se encuentra cercano de este rango de funcionamiento.

2.6 ANALISIS DE GEOMETRIAS DE FONDO PLANO

El fondo plano es la parte más baja de un vehículo de competencia, ya que esta es la superficie sobre la que va todo el vehículo en sí. Es decir, el fondo plano son los bajos de un vehículo de competencia tipo formula, y por ello son la parte que más cercana está al asfalto como se muestra en la figura 2.45.[68]

El objetivo de todo fondo plano, es hacer que circule la menor cantidad de flujo de aire posible por debajo del coche, para que el *dowforce* del monoplaza aumente.



- 59 Figura 2.45: Fondo Plano Formula 1.

Fuente: F1 by Riki, (2014), http://formulauno-auto.blogspot.com/2010/10/fondo-plano.html

[68] F1 by Riki, (2014), http://formulauno-auto.blogspot.com/2010/10/fondo-plano.html

De esta manera mediante la simulación aerodinámica, de diferentes geometrías de fondo plano posibles de aplicar sobre la estructura del chasis del vehículo Formula SAE se necesita generar la mayor zona de baja presión a lo largo de todo el fondo plano, cuyas formas cumplen la finalidad de reducir al máximo cualquier presión y flujo de aire que desfavorezca el no "pegar" al vehículo al asfalto para mejorar la estabilidad a la conducción así como al comportamiento dinámico del vehículo.

De la misma manera para las simulaciones de las diferentes geometrías de fondo plano, las dimensiones del dominio poseen el mismo valor para garantizar la igualdad de condiciones en la simulación.

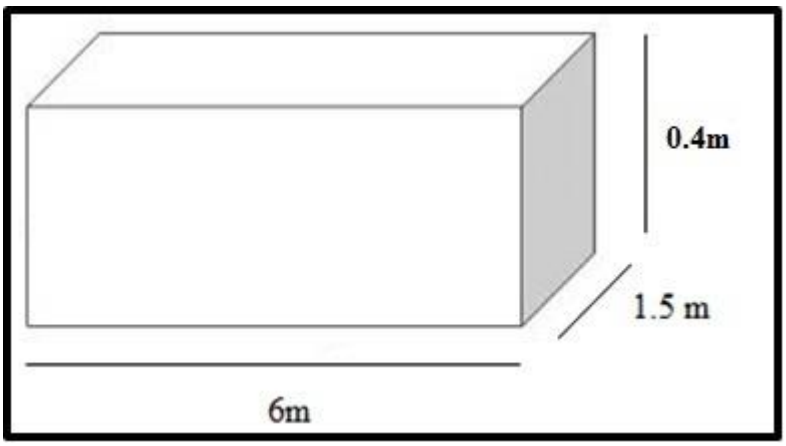
La temperatura para el análisis del comportamiento de las diferentes formas de fondo plano se encuentra en estado isotérmico.

La velocidad elegida para el análisis es de 17 m/s, ya que representa el valor de velocidad media a la que el vehículo se encuentra en pista por lo tanto el diseño de fondo plano obedecerá a esta velocidad para brindar la mayor eficiencia posible.

2.6.1 FONDO PLANO CON DIFUSORES TIPO SEMI-CIRCULO

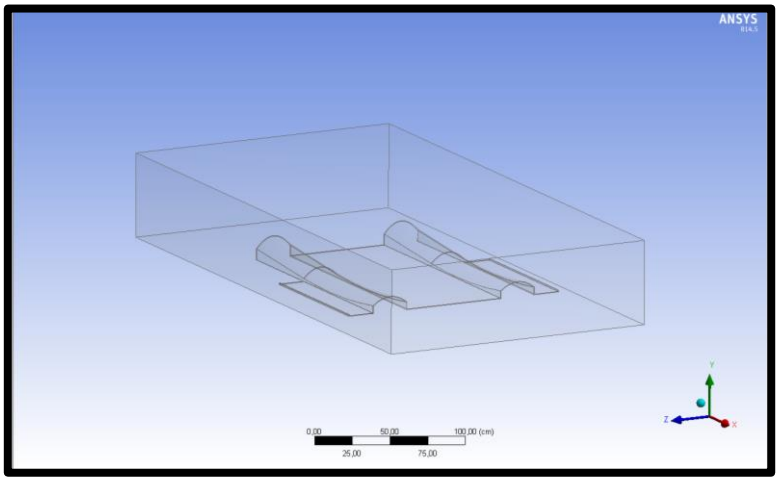
2.6.1.1 DOMINIO:

Las dimensiones del dominio computacional, para el análisis de diferentes fondo plano posee los siguientes valores:



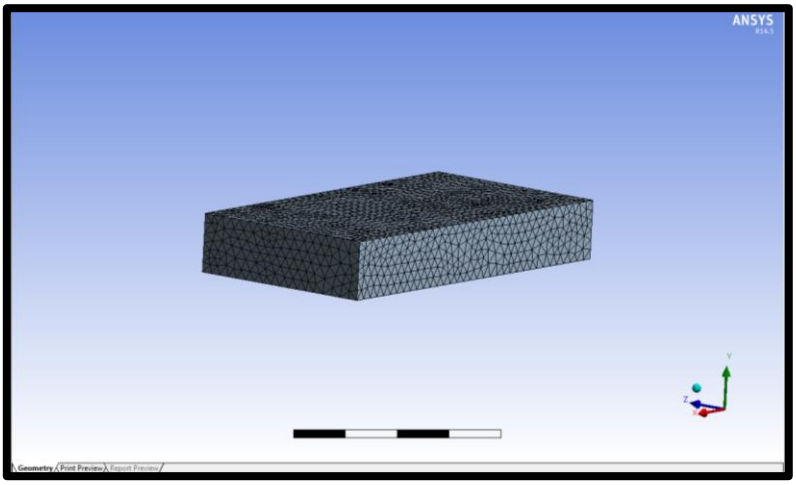
- 60 Figura 2.46: Medidas dominio general.

Dominio computacional para el análisis de fondo plano con difusores tipo semi-circulo.



- 61 Figura 2.47: Dominio fondo plano con difusores tipo semi-circulo.

2.6.1.2 MALLADO:



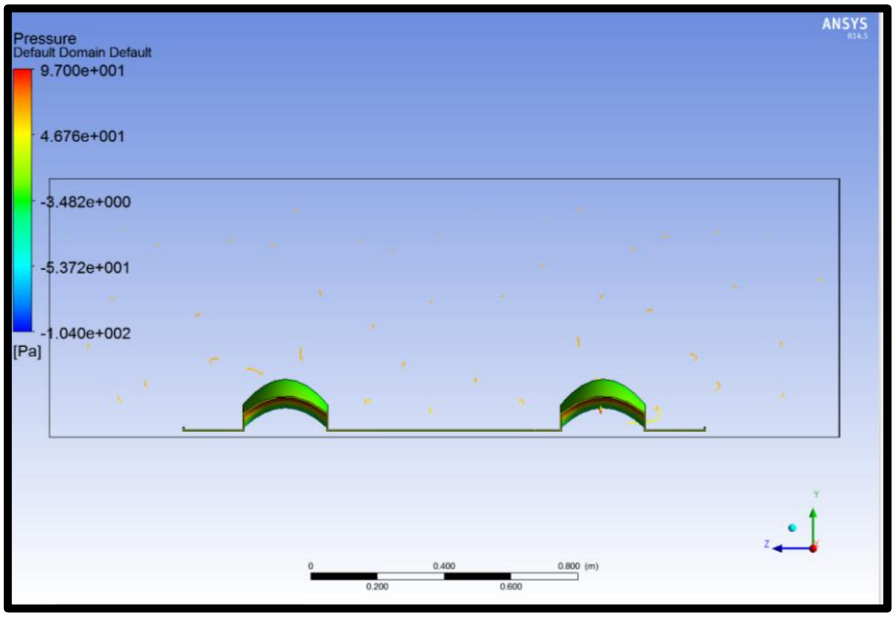
- 62 Figura 2.48: Mallado fondo plano con difusores tipo semi-círculo.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 11719 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 58189 elementos.
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5

2.6.1.3 RESOLUCION:

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad Fina.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.6.1.4 RESULTADOS:



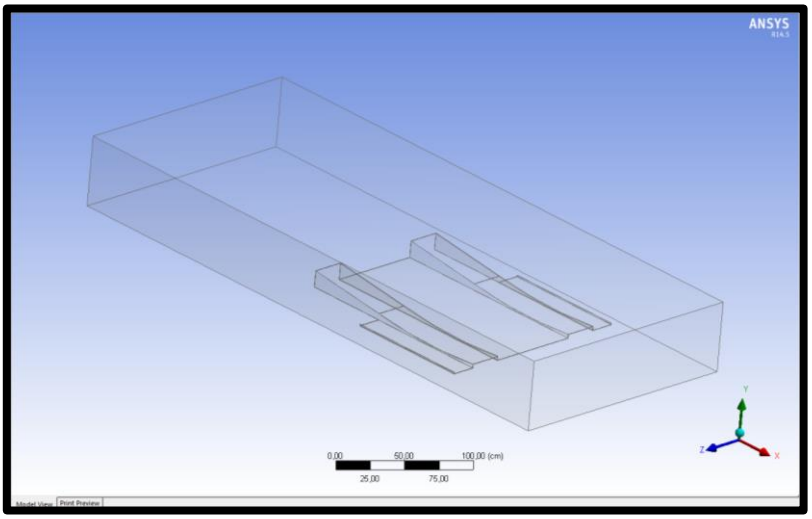
- **63 Figura 2.49:** Vista frontal fondo plano con difusores tipo semi-circulo.

- **Tiempo de resolución:** 59.8 seg
- **Presión mínima:** 170.4 (Pa)
- **Presión máxima:** 222.5 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.84 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 17.97 (m/s)

2.6.2 FONDO PLANO CON DIFUSORES RECTOS

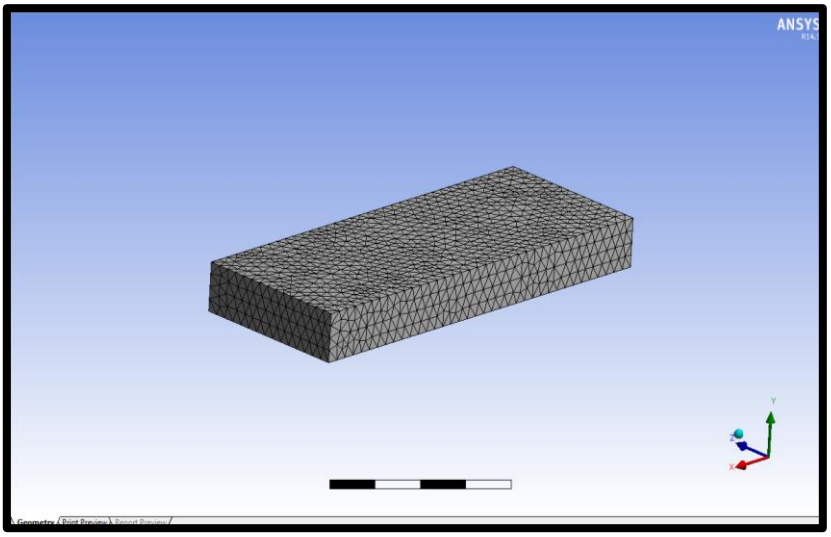
2.6.2.1 DOMINIO:

Dominio computacional para el análisis del fondo plano con difusores rectos.



- 64 Figura 2.50: Dominio fondo plano con difusores tipo recto.

2.6.2.2 MALLADO:



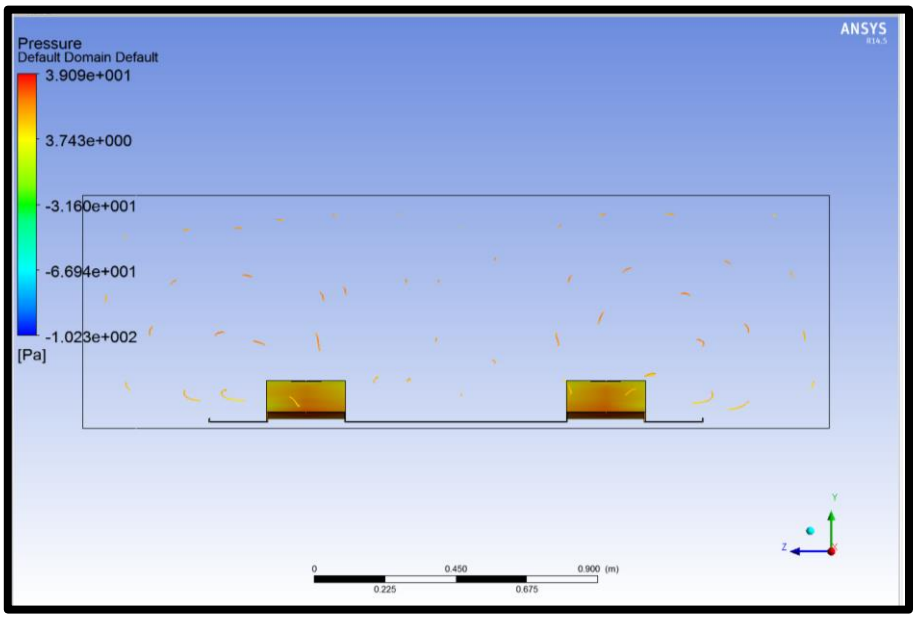
- 65 Figura 2.51: Mallado fondo plano con difusores tipo recto.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 4741 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 21805 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5

2.6.2.3 RESOLUCION:

- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad fina.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

2.6.2.4 RESULTADOS:



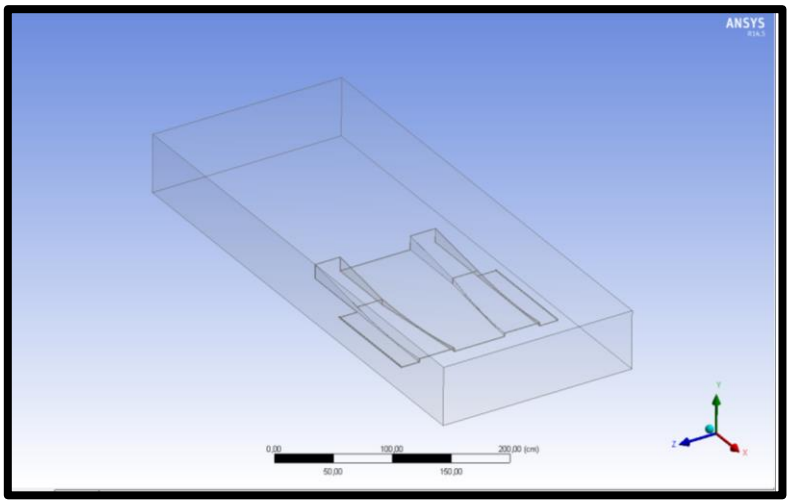
- 66 Figura 2.52: Vista frontal fondo plano con difusores tipo recto.

- **Tiempo de resolución:** 31.3 seg
- **Presión mínima:** 171.3 (Pa)
- **Presión máxima:** 232.3 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.75 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 17.87 (m/s)

2.6.3 FONDO PLANO CON ENTRADAS EXPANDIDAS

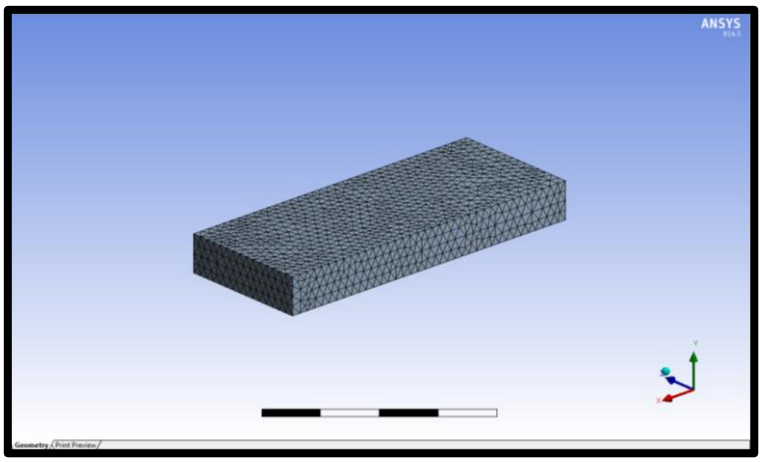
2.6.3.1 DOMINIO:

Dominio computacional para el análisis del fondo plano con entradas expandidas.



- 67 Figura 2.53: Dominio fondo plano con entradas expandidas.

2.6.3.2 MALLADO:



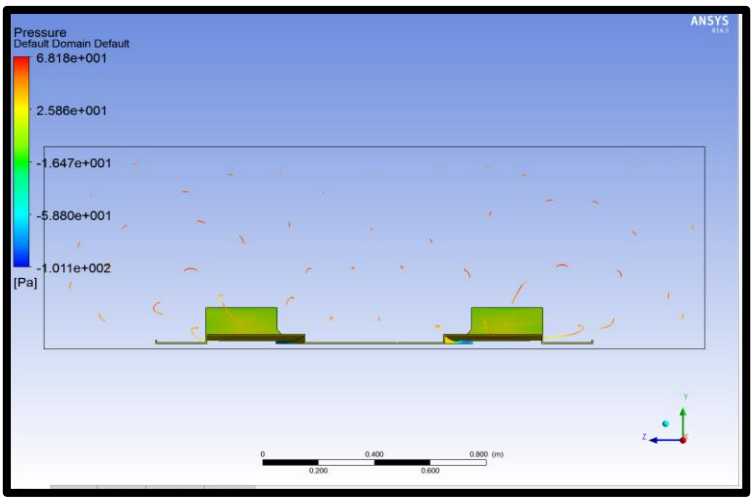
- 68 Figura 2.54: Mallado fondo plano con entradas expandidas.

- **Tipo de malla:** Media.
- **Nodos:** La malla posee 20067 nodos.
- **Elementos:** La malla consta de 112136 elementos
- **Tipo de elemento:** Tetraedro.
- **Tamaño de celda inicial:** 5
- **Exactitud de proximidad:** 0.5
- **Angulo de curvatura normal:** 12°

2.6.3.3 RESOLUCION:

- **Problema sin viscosidad.**
- **Transferencia de calor:** Isotérmico.
- **Presión de referencia:** 1 atm.
- **Temperatura fluido:** 25°C.
- **Modelo turbulencia**: k-épsilon.
- **Condiciones de contorno:** Rugosidad fina.
- **Condición de entrada:** Velocidad del aire 17 m/s
- **Condición de salida:** Presión relativa 0 (Pa)
- **Numero de Iteraciones:** 100
- **Error deseado:** 1E-4
- **Procesador:** PC Core I – 3 (PID: 6100)

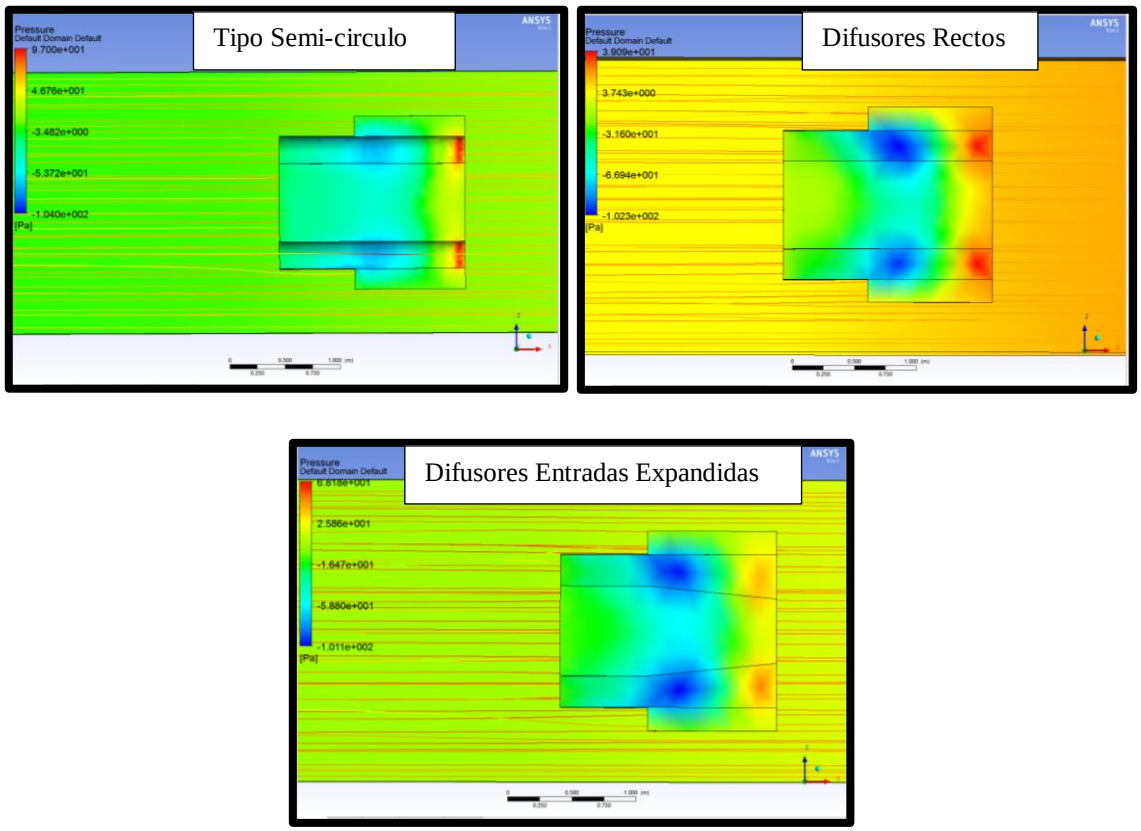
2.6.3.4 RESULTADOS:



- 69 Figura 2.55: Vista frontal fondo plano con entradas expandidas.

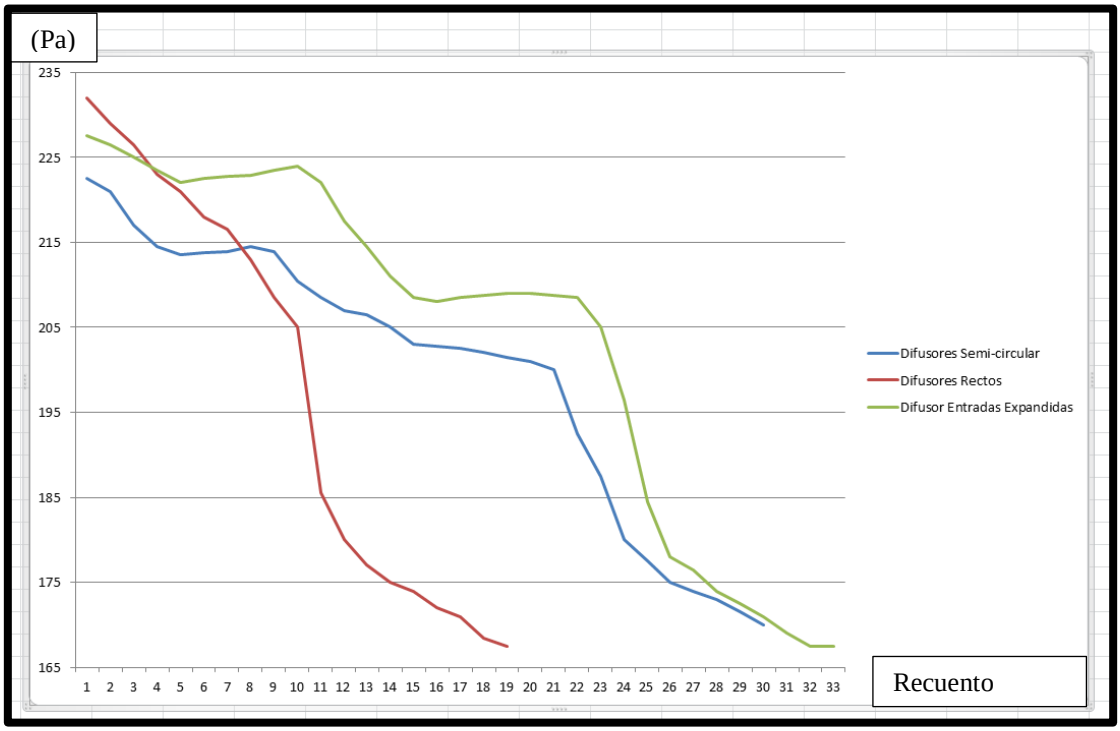
- **Tiempo de resolución:** 1 min 18 seg
- **Presión mínima:** 167.55 (Pa)
- **Presión máxima:** 227.53 (Pa)
- **Velocidad mínima:** 16.70 (m/s)
- **Velocidad máxima:** 18.35 (m/s)

2.6.4 COMPARACIÓN DE PRESIONES FONDO PLANO



- 70 Figura 2.56: Vista inferior de los Fondos Planos.

En la figura 2.56 se pueden observar las diferentes formas de fondo plano que se proponen para determinar la mejor geometría, mediante el análisis de las presiones en su superficie inferior así como también la velocidad del flujo de aire a través del fondo y así optimizar su funcionamiento. A continuación en la figura 2.57 se muestra el cuadro de curvas de comportamiento de presiones de cada geometría para su comparación.



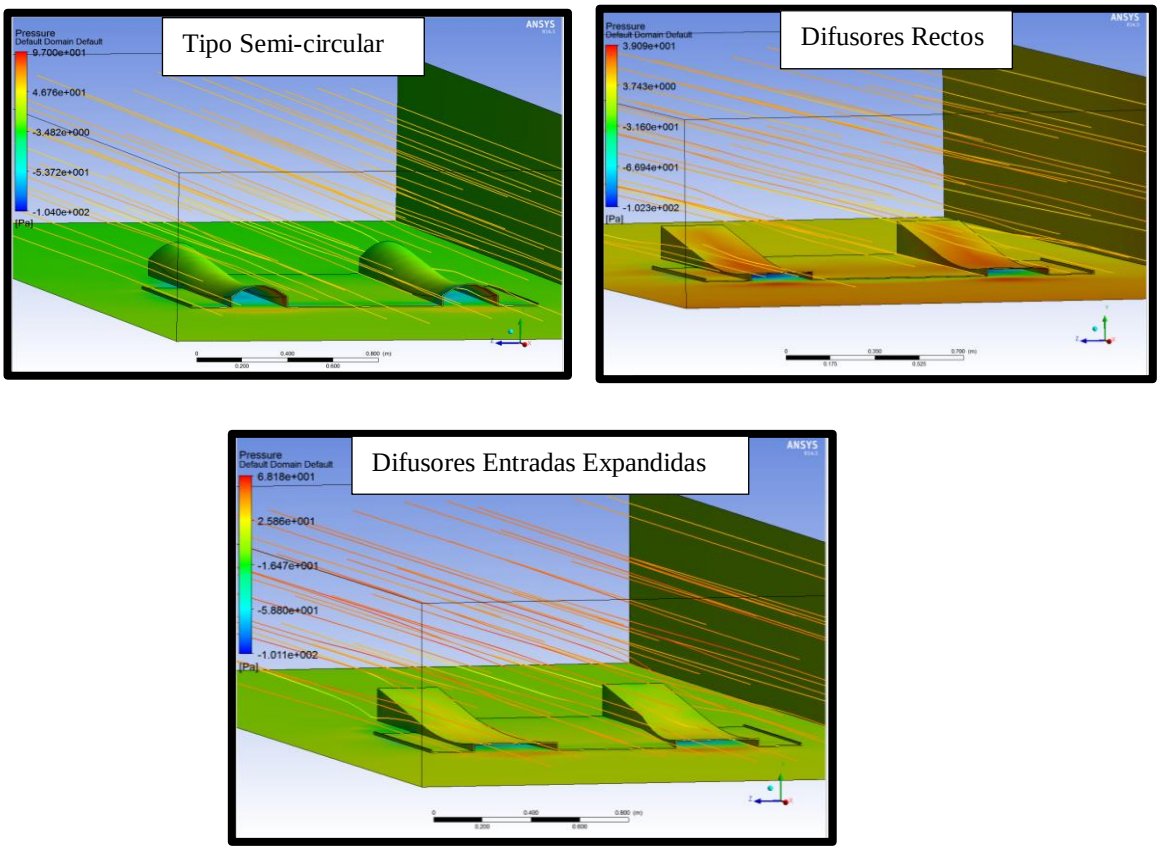
- 71 Figura 2.57: Curvas de comportamiento de presión de los fondos planos.

Se analizan las curvas de comportamiento de cada uno de los diferentes tipos de fondo plano, donde se observa que el difusor con entradas semi-circulares es el que mas baja presion posee en el frontal que disminuye de manera progresiva pero tardia hasta el recuento numero 30 donde se encuentra la presion mas baja y desembocar en la parte posterior, lo cual lo hace un fondo plano demorado para obtener las presiones mas bajas de manera rapida.

A continuacion se analiza el difusor con entradas expandidas, el cual posee la presion frontal intermedia entre los tres tipos de fondo plano y que progresivamente y mucho mas lento que el difusor con entradas semi-circulares, desemboca la presion en la parte posterior hasta el recuento numero 33 pero con una presion mucho mas baja; por lo tanto, es un fondo plano que demora aun en encontrar las presiones mas bajs de forma rapida.

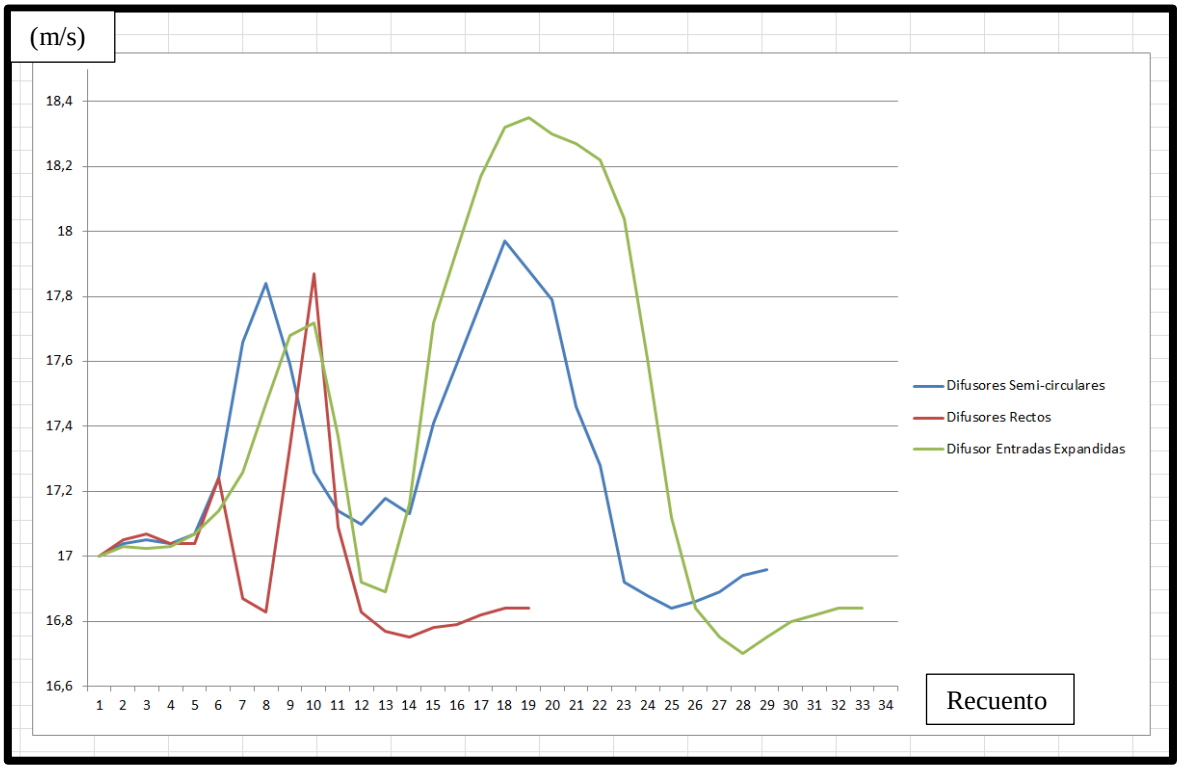
Finalmente el fondo plano con difusores rectos es el que mayor presion posee en el frontal lo cual no es bueno dado a que presenta ua minima resistencia al avance, pero destaca de manera principal porque en el recuento numero 19, logra reducir las presiones mas rapidamente lo que permite ser mas efeciente y por lo tanto se elige como geometria para su costruccion.

2.6.5 COMPARACIÓN VELOCIDADES FONDO PLANO



- 72 Figura 2.58: Perspectiva de los fondos planos.

Se puede en la figura 2.58 observar el paso del flujo a traves de cada tipo de geometria de fondo plano, donde se analiza la velocidad del mismo en su superficie inferior y determinar cl perfil que permita la expulsion del fluido de la manera mas rapida posible.



- 73 Figura 2.59: Curvas de comportamiento de velocidades de los fondos planos.

Se observa en la figura 2.59 que el fondo plano con entradas expandidas es el que permite el paso del fluido con la mayor velocidad (picos altos) a través de su superficie inferior en comparación de los otros dos tipos de fondo plano, pero que sin embargo también es el que más tiempo demora el paso del flujo con un recuento de número 33, lo que reduce su eficiencia y rendimiento de manera especial.

A continuación se observa que el fondo plano con difusor de tipo semi-circular posee picos más bajos de velocidad punta del flujo a través de su superficie inferior, pero que a su vez demora su paso en la superficie interior hasta el recuento numero 29 disminuyendo su efectividad y descartando su aplicación.

Finalmente el fondo plano con difusores rectos es el que posee los picos más bajos de paso del flujo de aire a través de su zona inferior lo cual reduce su efectividad en 1m/s en comparación al difusor con entradas expandidas pero que sin embargo es el difusor que más rápidamente evacua el flujo hasta el recuento número 19, lo que lo hace el más efectivo de todos para su elección.

2.6.6 DESCRIPCION FINAL:

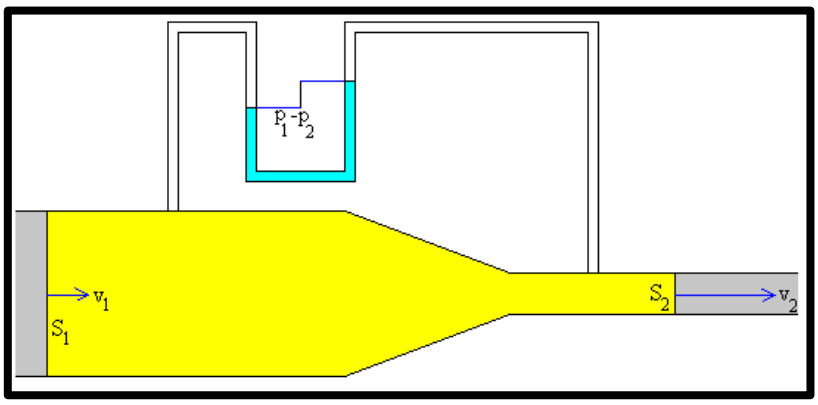
Aplicando la comparación de las diferentes formas de fondo plano para el estudio de presiones y velocidades en la zona inferior, se determina que el mejor perfil con la mayor eficiencia aerodinámica es el fondo plano con difusores rectos el cual genera las más bajas presiones en el menor tiempo así como el paso del flujo de aire de la manera más rápida a lo largo de toda su geometría.

2.6.7 VALIDACION DE RESULTADOS DE GEOMETRIA DE FONDO PLANO

Para la validación de los datos que se obtienen del resultado de la simulación del fondo plano con difusores rectos se aplica el cálculo de presiones por efecto Venturi, el mismo que nos permite analizar y comparar la veracidad de los valores obtenidos y de esta manera conocer el valor definitivo de presiones que trabajan en él.

2.6.7.1 PROCEDIMIENTO:

El efecto Venturi consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor como se muestra en la figura 2.60. [69]

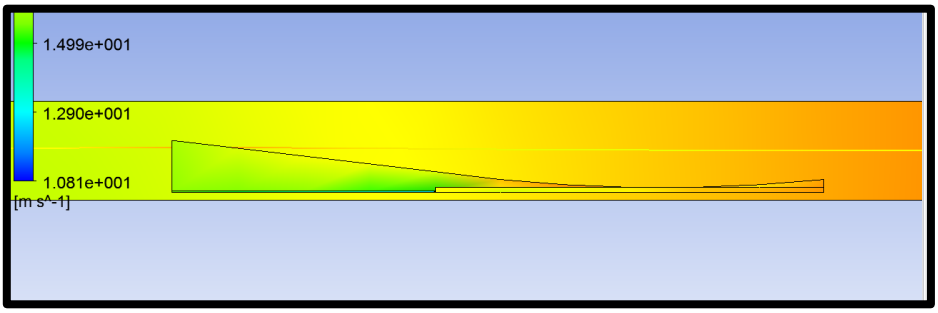


- 74 Figura 2.60: Efecto Venturi.

Fuente: Dinámica de Fluidos,
(2014)http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernouilli.htm

[69] Wikipedia, Efecto venturi, (2014), http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Venturi

Se aplica este concepto para realizar el cálculo de validación del resultado de presiones en el fondo plano escogido; en el cual, en lugar del desnivel cero que existe en una tubería horizontal se aplica para una superficie plana como el suelo que también posee desnivel cero como se muestra en la figura 2.61.



- 75 Figura 2.61: Efecto Venturi fondo plano.

La medida de presión se realiza con aplicar el tubo pitot para presión total o de estancamiento donde se mide la diferencia de presión entre las dos áreas de la tubería.

Primero se aplica el concepto de Ecuación de Continuidad que se describe como:

$$V1 * A1 = V2 * A2 \qquad (2,5)$$

Por lo tanto se obtiene:

$$V2 = \frac{(V1 * A1)}{A2} \qquad (2,6)$$

Que enuncia que la velocidad del fluido en el tramo de la tubería que tiene menor sección es mayor que la velocidad del fluido en el tramo que tiene mayor sección. Si $A_1 > A_2$, por lo tanto $V_1 < V_2$.[70]

Segundo se aplica el concepto de la ecuación de Bernoulli que se describe como:

$$Y_1 = Y_2 \quad (2,7)$$

$$P1 + \frac{1}{2} * \rho * V1^2 = P2 + \frac{1}{2} * \rho * V2^2 \qquad (2,8)$$

[70]Dinámica de Fluidos, (2014), http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernouilli.htm

Como se sabe que, si la velocidad en el tramo de menor sección es mayor, la presión en dicho tramo es menor; entonces $V_1 < V_2$, y por lo tanto $P_1 > P_2$. Donde el cálculo de presiones es igual a:

$$P2a = P1 + \frac{1}{2} * \rho * (V1^2 - V2^2) \quad (2,9)$$

Finalmente para el cálculo de la presión restante se aplica el enunciado de igualdad de fuerzas que dice: Las fuerzas de entrada es igual a las fuerzas de salida; pero se debe tener en cuenta que la longitud del área de salida es el doble por lo tanto se multiplica a la fuerza (F1) por 2.[71]

Dónde:

$$F2 = 2\ F1 \quad (2,10)$$

$$P2 * A2 = 2 * (P1 * A1) \quad (2,11)$$

Por lo tanto:

$$P2b = \frac{2*(P1 * A1)}{A2} \quad (2,12)$$

2.6.7.2 SUPOSISIONES:

El valor de la velocidad para el paso del fluido se realiza a velocidad constante. El valor de rozamiento es nulo para efectos del cálculo a lo largo de todo el tramo. Las presiones generas en la parte posterior del difusor son de sentido negativo, lo que provoca la depresión en la zona pero con magnitud de fuerza positiva

2.6.7.3 DESARROLLO:

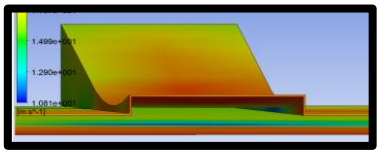
Datos:

$\rho = 1.225\ kg/m^3$

$V1 = 17\ m/s$

[71] Fuerzas en los fluidos, (2014), http://www.darwin-milenium.com/estudiante/fisica/Temario/Tema4.htm

A1 = base * altura = 0.2 * 0.04 = 0.008 m



- **76 Figura 2.62:** Área frontal (A1).

A2 = base * altura = 0.2 * 0.2 = 0.04 m

- 77 Figura 2.63: Área Posterior (A2).

Se tiene que:

$$V2 = \frac{V1 * A1}{A2} = \frac{\left(17\frac{m}{s}\right)(0.008\ m)}{(0.04m)} = 3.4\ m/s$$

Suponiendo que la depresión generada en el área frontal P1= 0 para efectos de resolución del problema; sustituyendo se obtiene que:

$$P2a = 0 + \frac{1}{2} * (1.225\frac{kg}{m^3}) * ((17m/s)^2 - (3.4m/s)^2) = 169.33\ Pa$$

En donde para el siguiente caso se toma a la presión (P2a) como presión (P1) para determinar el valor de la presión restante:

$$P2b = \frac{2 * (169.33\ Pa * 0.008\ m)}{0.04m} = 67.73\ Pa$$

Por lo tanto el valor de suma de las 2 presiones (P2a) y (P2b) es valor de la presión inicial a la cual se encuentra el fondo plano en su parte frontal.

$$P.Frontal = P2a + P2b$$

$$P.Frontal = 169.93\ Pa + 67.73\ Pa = 237.66\ Pa$$

Y el valor de la presión de salida posterior del fondo plano es la presión P2a:

$$P.\ posterior = 169.93\ Pa$$

2.6.7.4 DESCRIPCION FINAL:

El valor de las presiones de entrada del fondo plano, tanto el valor de la simulación de 232.3 (Pa) como el valor obtenido en los cálculos de 237.66 (Pa), son próximos entre si con un desfase de menor 2.25 % que se puede deber a la fricción y otras causas más.

De la misma manera las presiones en la zona posterior del fondo plano para la simulación es de 166.5 (Pa), mientras que el valor que se obtiene en los cálculos es de 169.93 (Pa) lo que genera una diferencia de 2.06 % que existen entre estos dos procesos pero que verifican su funcionamiento y proximidad entre sí.

Es importante que la distribución de las presiones en el centro del fondo plano es lo más homogénea posible, ya que a su vez este se encuentra ubicado en el centro del vehículo lo que permite una interacción directa entre el comportamiento dinámico del vehículo y su centro de gravedad.

A continuación se muestra en la figura 2.79 el diseño del conjunto final del vehículo por software.

- 78 Figura 2.64: Carrocería y fondo plano final.

CAPÍULO 3. CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA Y FONDO PLANO DEL VEHÍCULO

Para la construcción de la carrocería y fondo plano, como característica principal se tiene en cuenta la resistencia mecánica de un material a utilizar que depende directamente de su espesor y forma.

Como se conoce que cada material posee sus propias propiedades físicas, químicas y mecánicas harán del mismo más o menos idóneo para una aplicación concreta dependiendo fundamentalmente del tipo de necesidades a las que se someta.

Al interpretar los resultados de la fase de simulación, se observa la acción de las presiones máximas sobre la carrocería del vehículo, las cuales condicionan la elección del material, el mismo que soportara los esfuerzos de las tensiones máximas admisibles en función del proceso de fabricación y los recursos disponibles.

3.1 ELECCIÓN DEL MATERIAL

Al momento de elegir los materiales más apropiados para fabricar diferentes componentes dependerá de varios factores así como la familiaridad que se tenga con ese material, los métodos de fabricación necesarios, las exigencias estructurales y físicas de los componentes. Los costos del material en relación al presupuesto que se posea y la cantidad de piezas que se requiera realizar.

3.2 MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN CARROCERÍAS PARA PROTOTIPOS FORMULA SAE

3.2.1 ALUMINIO

En la actualidad las necesidades para la construcción en el campo automotriz hacen imprescindible el empleo de materiales más ligeros como el aluminio. Este material es muy accesible y se emplea para la construcción de ciertos elementos en vehículos de competencia.[72]

Este material es ecológico al ser reciclable en un 100% que permite reusarse en otras partes del vehículo además de cumplir con el reglamento de Formula SAE que incentiva a que el vehículo sea reciclable o reusable en un alto porcentaje.

[72] Auto mater GMI,julio 2014, http://automastergmi.com/?p=11

El aluminio en caso de impacto resulta ser más seguro al tener una deformación controlada y su reducido peso favorece a una mejor actuación de los frenos[73].

No obstante el aluminio presenta dificultad para la construcción de las formas de la carrocería de un vehículo. Para vehículos Formula SAE el proceso de conformado de este material resulta muy complejo al necesitar máquinas especializadas para su laminación y doblado por lo que no es viable su aplicación.

A continuación en la figura 3.1 se presenta las características físicas y mecánicas del aluminio.

Propiedad		Aluminio
1	Esfuerzo (N/mm^2)	250
2	Elasticidad E, Módulo de Young (MPa)	70.000
3	Densidad (g/cm^3)	2,7
4	Punto de fusión (°C)	660
5	Rango de temperatura de trabajo (°C)	-250 a 150
6	Conductibilidad eléctrica $(m/Ohm\ mm)^2$	29
7	Conductividad térmica (W/m °C)	200
8	Coeficiente de expansión lineal x 10-6/°C	24
9	No-magnético	Sí
10	Tóxico	No
11	Resistente a la corrosión	Sí
12	Mecanizado	Fácil
13	Maleable	Sí
14	Costo	Barato

- 79 Figura 3.1: Tabla de propiedades físicas y mecánicas del aluminio

Fuente: Scielo, Ingeniería mecánica, (2014), http://scielo.sld.cu/scielo.php.

3.2.2 POLÍMEROS

Los polímeros se pueden utilizar para construir gran cantidad de elementos exteriores e interiores de la carrocería como tableros de instrumentos, consolas, molduras, rejillas, deflectores, etc. El polímero como tal se ve restringido por su capacidad de resistencia al impacto, por lo tanto la absorción de energía al colisionar el vehículo se basa en la elevada flexibilidad que posee este material[74].

En conclusión las cualidades que hacen a los plásticos unos de los materiales utilizados para la fabricación de piezas de la carrocería son:

[73] Auto mater GMI,julio 2014, http://automastergmi.com/?p=11
[74] Auto mater GMI,julio 2014, http://automastergmi.com/?p=11

- Notable reducción de peso.
- Buena resistencia a la corrosión
- Alta inalterabilidad a los cambios de temperatura.
- Resistencia a liquidos como gasolina , aceites, etc.

3.2.3 FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono se encuentra en el grupo de materiales compuestos, es decir, aquellos que están hechos a partir de la unión de dos o más componentes que dan lugar a uno nuevo con propiedades y cualidades superiores que no son alcanzables por cada uno de los componentes conformantes de manera independiente.

En la fibra de carbono se combina básicamente un tejido de hilos de carbono (refuerzo), el cual aporta flexibilidad y resistencia con una resina termoestable (matriz), que se solidifica gracias a un agente endurecedor y actúa uniendo las fibras, protegiéndolas y transfiriendo la carga por todo el material; por su parte el agente de curado ayuda a convertir la resina en un plástico "duro".

Este compuesto por lo tanto es más ligero que cualquier metal pero con igual resistencia e inmune a la corrosión, que puede adoptar diversas formas y adaptarse para cualquier tipo de necesidad pero su proceso de elaboración requiere de equipos especializados y muy avanzados para garantizar su funcionamiento lo que aumenta su costo de producción final. [75]

A continuación se puede observar en la figura 3.2 las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de carbono.

[75]URIBE Carolina, (2014)Fibra de carbono, http://www.metalactual.com/revista/11/materialescarbono

Propiedad	Fibras SM[a]	Fibras IM[a/b]	Fibras HM[b]	Fibras *LM[b]	Fibras *UHM[b]
Contenido en carbono (%)	95	95	>99	>97	>99
Diámetro (µm).	6-8	5-6	5-8	11	10
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,9	1,9	2,2
Resistencia a la tracción (mpa)	3.800	3450 - 6200	3450 - 5520	1380 - 3100	2410
Alargamiento a la rotura	1,6	1,3 – 2,0	0,7 – 1,0	09	0,4 -0,27
Resistencia eléctrica (µ_cm)	1650	1450	900	1300	220 – 130
Conductividad térmica (w/m.k)	20	20	50-80	-	-

- 80 Figura 3.2: Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de carbono.

Fuente: URIBE Carolina, 2014) Fibra de carbono, http://www.metalactual.com/revista/11/materialescarbono.pdf.

3.2.4 FIBRA DE VIDRIO

El uso de la fibra de vidrio se puede aplicar en la construcción de carrocerías de vehículos ya que entre sus características posee un peso menor al aluminio, una buena resistencia mecánica, es fácil de moldear y no necesita de infraestructuras especializadas para el tiempo de curado lo que reduce significativamente su costo final.

En la competición de Formula SAE es bastante común la aplicación de fibra de vidrio principalmente en equipos principiantes ya que su facilidad de manejo y un costo relativamente bajo en comparación de otros materiales y sus procesos son beneficiosos a otros materiales.

Existen 5 tipos de fibras de vidrio cada una con características diferentes dependiendo de su constitución y componentes a según la aplicación que se requiera[76].

- **Tipo E:** Este tipo de fibra es el más utilizado; contiene vidrio de aluminio-borosilicato con menos del 1% de óxidos alcalinos, principalmente usado para plásticos reforzados con vidrio, ofrece resistencia mecánica y dieléctrica.
- **Tipo R:** Se caracteriza porque tiene muy buenas prestaciones mecánicas, contiene vidrio de aluminio silicatos, muy utilizado en sectores de aviación, espacial, Mecánica, fabricación de Piezas y armamento.

[76] DAN Burrill y JEFFREY, Zurschmeide, How to Fabricate Automotive Fiberglass & Carbon Fiber Parts, Cartech Inc, Estados Unidos, 2012.

- **Tipo C:** Se caracteriza por su alta resistencia a agentes químicos; contiene un alto contenido de óxido de boro.
- **Tipo S:** Se caracteriza por tener alta resistencia a la tracción, contiene vidrio de aluminio con alto contenido de óxido de magnesio.

En la figura 3.3 se muestra las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos de fibra de vidrio que existen.

Propiedad	E	C	S	R
Gravedad específica	2,56	2,45	2,49	2,58
Resistencia a la tracción de la fibra GN/m2	3,6	----------	4,5	4,4
Punto ablandamiento °C	850	690	----------	990
Conductividad térmica W/m °C	1,04			
Indice de Refracción	1,545	1,549		
Módulo de Young de elasticidad GN/m2	75,9	----------	86,2	84,8

- 81 Figura 3.3: Tabla de las propiedades de la fibra de vidrio.

Fuente: DAN Burrill y JEFFREY, Zurschmeide, How to Fabricate Automotive Fiberglass & Carbon Fiber Parts, Cartech Inc, Estados Unidos, 2012.

3.2.5 MATRIZ DE DECISIÓN DE MATERIALES

El primer objetivo en la construcción de la carrocería es la elección de los materiales, para ello se toma en consideración una serie de parámetros que rigen el proceso de construcción como la disponibilidad de acceso hacia el material, la familiaridad para el proceso de trabajo con el mismo, los métodos de fabricación que se deben emplear para la construcción, exigencias físicas y de tipo estructural de los componentes y los costes del material en función de la disponibilidad del presupuesto.

Para la elección del material a utilizar en la construcción de la carrocería, se realiza una matriz de decisión que evalúa las características más destacables de cada material que se define anteriormente con la finalidad de facilitar su elección además de considerar la factibilidad de construcción y del medio en el que se desarrolla para una correcta decisión.

Con el fin de tener un análisis cuantitativo, se aplican factores de ponderación a cada cualidad o característica que requieren los diferentes materiales; estos valores dados son en base a lo analizado y de la experiencia adquirida en el medio por personas que tienen contacto con estos materiales.

En la tabla 3.4 se detalla el valor numérico que se asigna para los factores de ponderación para la cualidad de cada material.

Una vez establecidos los factores de ponderación, también se asignan los valores numéricos de cada material según sus características de la manera más objetiva y merecida según corresponda. A continuación se multiplica cada factor de ponderación por cada valor numérico del material, todos estos resultados se suman y el material con mayor calificación resulta ser el más idóneo para la construcción de la carrocería.

MATRIZ DE DESICIÓN									
		MATERIALES							
Características	**Factor de Ponderación**	**Aluminio**		**Polímero (Plástico)**		**Fibra de Carbono**		**Fibra de Vidrio**	
Resistencia a la Corrosión	0.1	5	0.5	5	0.5	5	0.5	4	0.4
Resistencia Mecánica	0.2	5	1	3	0.6	5	1	3	0.6
Facilidad de Manufactura	0.3	2	0.6	2	0.6	1	0.3	5	1.5
Costo	0.3	3	0.9	3	0.9	1	0.3	5	1.5
Rugosidad	0.1	5	0.5	5	0.5	4	0.4	4	0.4
Total	**1**	**Total**	**3.5**	**Total**	**3.1**	**Total**	**2.5**	**Total**	**4.4**

- 82 Tabla 3.4: Matriz de decisión.

El valor más alto corresponde a la fibra de vidrio con 4,4 y por lo tanto es el material más idóneo a ocupar para la construcción de la carrocería del vehículo además de ser un material muy accesible en el medio.

Una vez que se ha seleccionado el material para la construcción de la carrocería del vehículo de competencia Formula SAE, se ubican los diferentes elementos que conforman la carrocería del vehículo los cuales deben tener calidad e integridad estructural acorde a las especificaciones del reglamento de Formula SAE.

Dichas especificaciones del reglamento a tomar en consideración para la construcción, involucran directamente el comportamiento del peso de la carrocería del vehículo así como su consumo en pista.

3.3 PROCESO DE FABRICACIÓN

Se considera que para poder realizar las diferentes partes de la carrocería, se comienza por la elaboración de los moldes para obtener la forma y el perfil que se requiere según el estudio y diseño previo realizado. El material que se utiliza por la facilidad de maniobrabilidad, acabado y bajo costo para la construcción de los moldes es el cartón prensado tipo M3G, el mismo que facilita el manejo de las diferentes curvas y rectas que posee el diseño de la carrocería.

Otra cualidad por la que se elige al cartón prensado es por su alta maniobrabilidad que permite elaborar formas complejas más que cualquier otro material para este tipo de aplicación, lo que simplifica el proceso de construcción de los moldes; pero de existir un material más fácil para trabajar sería conveniente, ya que ciertas formas que se pueden realizar no son posibles con el cartón prensado.

3.4 CONSTRUCCIÓN DE MOLDES

Para el proceso de construcción de los moldes de la carrocería del vehículo, se empieza por la nariz frontal, ya que la forma y dimensión que esta posee es mayor en comparación a los pontones laterales de a carrocería y su construcción es más compleja por el trazado de líneas curva en la parte superior.

3.4.1 CONSTRUCCIÓN MOLDE NARIZ FRONTAL

Se procede con la construcción de una base de poliuretano de 1 metro de largo por 40cm de ancho véase figura 3.5, la cual alojará los diferentes paneles con su medida progresiva para aumentar el área desde el frontal de la nariz hacia la parte del mamparo frontal (*fronthoop*).

- 83 Figura 3.5: Bloque de espuma de poliuretano.

A continuación se observa cómo se realiza la construcción del molde para la nariz de la carrocería véase figura 3.6, esta se divide en diferentes paneles a distancias equidistantes que permiten una correcta distribución y separación de los mismos en función de las medidas del chasis.

Posterior a ello lo que se realiza es el montaje de los paneles superiores los cuales se fijan con goma tipo resina. Se fija con unas prensas hacia los paneles divisorios para que permanezcan completamente fijados véase figura 3.7. En caso de haber zonas que no se fijan de manera correcta lo que se realiza es asegurar con alambre la zona comprendida entre el panel superior y los paneles divisorios.

- 84 Figura 3.6: División de paneles en el molde.

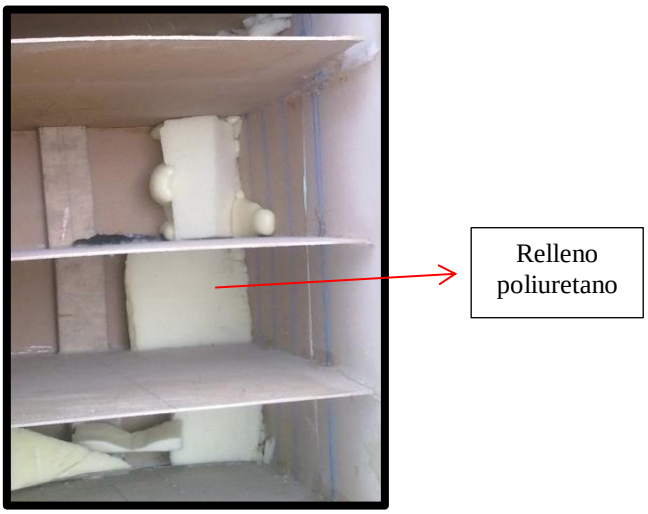
El tiempo de unión del panel superior con los paneles divisores es de aproximadamente 20 minutos, los mismos que dependerán de la buena calidad de la goma tipo resina y de una correcta zona de contacto entre las dos piezas de ensamble.

- 85 Figura 3.7: Unión de paneles superior y paneles internos.

A continuación lo que se procede a realizar es el montaje de los paneles laterales divididos en dos secciones uno ubicado en la parte superior y otro en la inferior ya que estos denotan el perfil realizado en la fase de diseño, los mismos que se fijan de igual manera que los paneles superiores pero que tienen una diferencia constructiva; los ángulos de los laterales de la nariz de la carrocería son más pronunciados lo que complica el proceso de unión entre los paneles laterales de la nariz como se muestra en la figura 3.8.

- 86 Figura 3.8: Panel superior y panel inferior.

Una vez conformado el montaje entre los paneles superiores y laterales se procede a la unión curva entre los dos tipos de panel mediante el relleno con poliuretano como se muestra en la figura 3.9 a lo largo de la sección curva desde la punta hasta la parte del *fronthoop*.

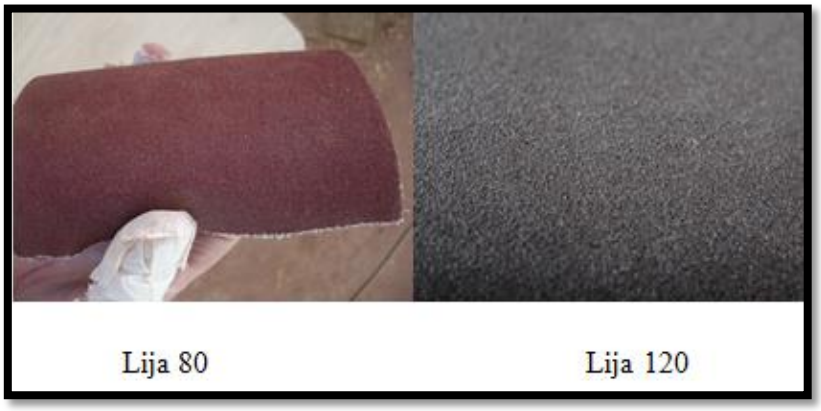


- 87 Figura 3.9: Unión de paneles superior e inferior.

A continuación se retira el material excedente de poliuretano hasta tener una superficie curva exterior. Introduciendo masilla para vehículo véase figura 3.10 sobre la espuma de poliuretano que une el panel superior con los paneles laterales, posterior a ello se retira de igual manera el material excedente mediante tres procesos de lijado.

- 88 Figura 3.10: Colocación de resina de poliuretano.

Proceso de desbaste que se realiza con lija tipo A80, A120 y proceso de pulido que se realiza con lija A200, véase figura 3.11.

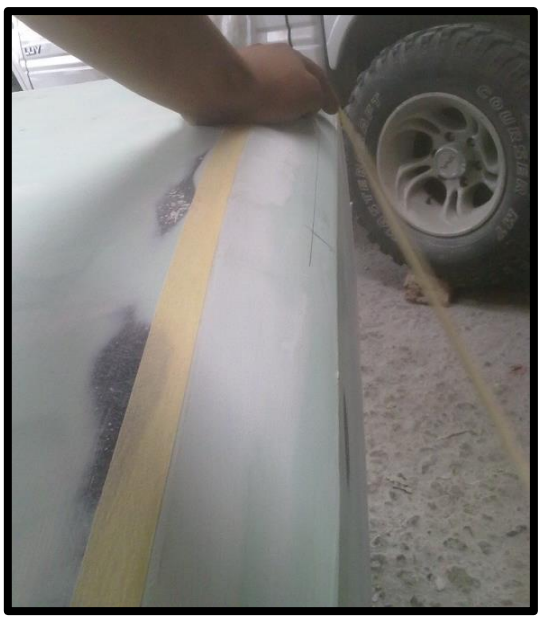


- 89 Figura 3.11: Tipos de lijas para el desbastado y pulido.

Una vez que se han juntado todos los paneles, se procede a hacer un masillado más fino de cada una de las uniones y posteriormente de todo el molde con el fin de conseguir un una estructura compacta y de buen acabado véase figura 3.12

- 90 Figura 3.12: Masillado del molde y corrección de fallas.

Es necesario realizar una corrección de las zonas de fallas donde se han suscitado desperfectos o malos acabados provocados por diferentes razones que hacen que el molde pierda su forma y líneas como se muestra figura 3.13. Tomando en cuenta que el molde es la parte principal para que el proceso de fabricación en fibra de vidrio se pueda realizar.



- 91 Figura 3.13: Corrección de fallas.

Para dar el acabado al molde, se realiza esparciendo dos capas de pintura de fondo tipo automotriz, el mismo que se usa para el arreglo de fallas en los vehículos normales, los cuales mejora el acabado véase figura 3.14.

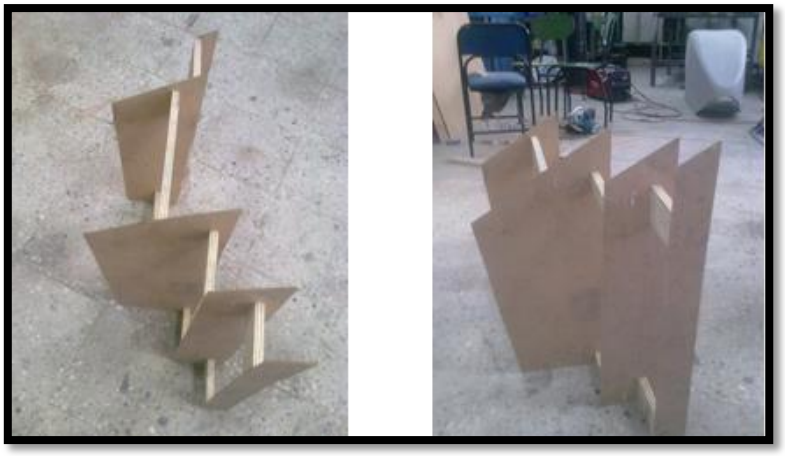
- 92 Figura 3.14: Aspersión de la pintura base.

Como se muestra en la figura 3.14 se adquiere un excelente acabado en lo referente a la superficie ya que el proceso principal es realizar una aspersión homogénea de todo el molde o bien sea de cada uno de los lados del molde. Este método se opta para prestarle más atención y homogeneidad para que el proceso de acabado se lleve con éxito.

La obtención de la simetría en sus dos lados, es lo que se puede destacar en este apartado ya que el proceso no es fácil y requiere de mucho tiempo y cuidado de estos detalles.

3.4.2 CONSTRUCCIÓN MOLDE PONTONES LATERALES

A continuación en la figura 3.15 se muestra la construcción del interior de los moldes laterales, los mismos que tomaron como referencia las medidas especificadas en el proceso de diseño.



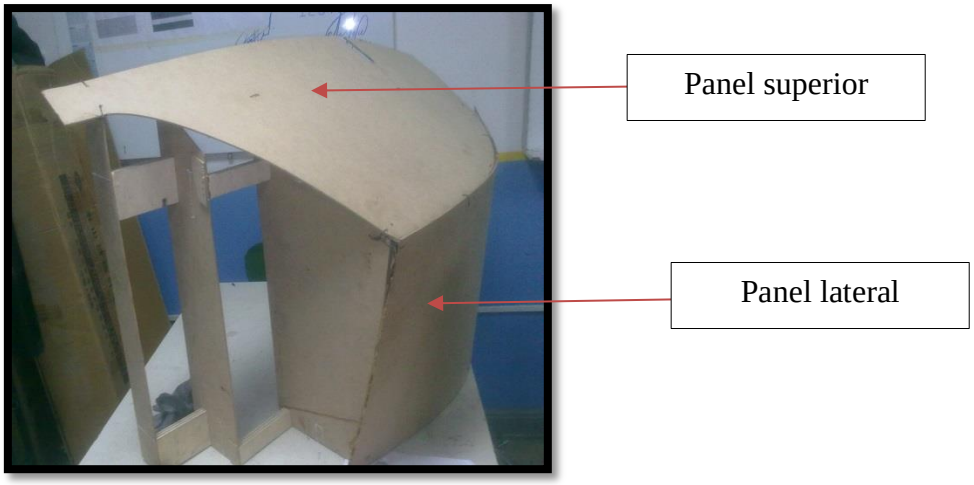
- 93 Figura 3.15: Construcción del armazón interno de los pontones izquierdo y derecho.

Se muestra la forma de como se ha recortado y ensamblado cada uno de los cinco diferentes paneles los cuales contienen una cierta inclinación en su parte superior así como también en el borde exterior del lado izquierdo y derecho según sea el caso, mismos que permitirán la construcción un perfil inclinado en estas zonas tal y como se muestra en el fase de diseño.

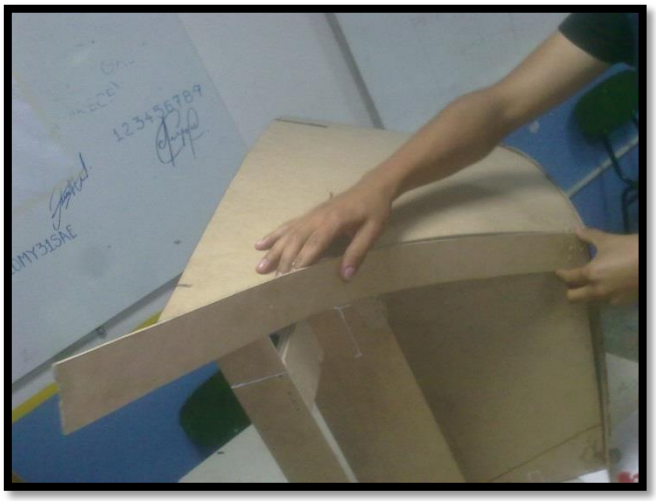
El proceso para unir todos los paneles con las respectivas dimensiones se realiza mediante la unión de uno en función del otro tomando la forma de una columna, estructura que se vuelve rígida por la presencia de una doble unión en la base y en la parte superior a distancias iguales.

Posterior a ello lo que se realiza es el montaje del panel superior del molde con el perfil inferior correcto previamente diseñado para que se acople de manera integra a la nariz del vehículo así sucesivamente hasta la parte posterior. Fijándose hacia los paneles mediante cables y pegamento para permiten una unión fuerte y rígida que servirá para soportar el posterior trabajo.

De igual manera se realiza el mismo trabajo con el panel lateral del molde, acoplándolo de manera exacta a lo largo de los paneles interiores, y que de manera indispensable debe formarse la esquina de unión entre el panel superior con el panel lateral, tomando en cuenta que el panel superior proporciona la curva guía de unión entre estos dos paneles que minimiza cualquier error en el trazado de construcción de la misma figura véase 3.16.



- 94 Figura 3.16: Colocado de los paneles superior y lateral.



- 95 Figura 3.17: Colocado de las caras frontales.

Finalmente se realiza el montaje de una tira frontal de 5cm de ancho que corresponde al diseño de la entrada de aire del pontón y que se une con el panel superior y lateral del molde como se muestra figura 3.17 sujetándose con alambre y pegamento como se han sujetado los otros elementos del molde.

Posterior a ello como se realiza en el primer proceso de construcción del frontal de la carrocería (nariz) se tratan con masilla para fallas de vehículo los imperfecciones que han quedado entre las uniones de los diferentes paneles que conforman la superficie exterior, véase figura 3.18, así como también de los cables de fijación entre cada uno de estos, que posteriormente se recortan conforme se seca el pegamento en el interior.

- 96 Figura 3.18: Acabado de las aristas de los moldes laterales.

A continuacion se limpia el molde de los excedentes de polvo que se quedan por la masilla lijada y se prepara al molde para repasar dos capas de pintura de fondo.

La aplicación de la pintura de fondo se comienza mediante el esparcimiento de la primera capa a lo largo de la superficie del panel superior de la misma manera para el panel lateral y los bordes frontales de las entradas de las tomas de refrigeración, aplicando de una manera homogénea para mantener el mismo espesor a lo largo de la aplicación teniendo cuidado en las esquinas del molde ya que son zonas donde el material se concentra con facilidad por la existencia de unión de las diferentes paneles.

Posterior a ello se aplica el esparcimiento de la segunda capa de pintura de fondo, pero en esta ocasión se tiene especial énfasis en las zonas que en la primera capa no han quedado correctamente aplicados. El tiempo aplicado entre capa y capa es de 10 a 15 minutos según las condiciones del clima para conseguir así una buena fusión del fondo entre cada capa.

Después del acabado final de la pintura de fondo, se mejora el acabado al lijar toda la superficie con una lija de pulido que nos permitirá disminuir las fallas dejadas por el fondo como se muestra figura 3.19.

- 97 Figura 3.19: Aplicación de la pintura de fondo o base para el acabado de los moldes.

3.4.3 CONSTRUCCIÓN MOLDE PARA EL FONDO PLANO

La construcción del molde de cartón prensado para el fondo plano del vehículo, comienza con el trazado como se muestra en la figura 3.20 de las dimensiones necesarias sobre la superficie para dar las formas correspondientes y realizar el proceso de corte de dichas zonas.

- 98 Figura 3.20: Trazado de piezas sobre cartón prensado.

Una vez que se ha recortado cada una de las partes se procede a ensamblar los perfiles curvos y planos para dar las formas correspondientes a los difusores.

De esta manera como es una sección curva mediante el ensamble con tiras de madera se garantiza que los paneles del molde generen rigidez para su uso, ya que es una pieza de largas dimensiones y puede quebrarse Véase Figura 3.21.

- 99 Figura 3.21: Ensamble de los paneles del fondo plano.

Se parte de la construcción de los difusores para analizar la ubicación y medida real que tomara el molde como se realiza en el proceso de diseño y dimensiones del vehículo figura 3.22.

- 100 Figura 3.22: Ensamble difusores.

Una vez que se conforman los moldes de los difusores se procede a juntar los demás paneles que se ubican en la parte central del molde (lugar donde se ubica el chasis), como se muestra figura 3.23, los paneles interiores divididos en dos tramos junto a los dos difusores más el borde exterior.

- 101 Figura 3.23: Unión molde fondo plano.

Una vez que todos los paneles de cartón prensado se han fijado y unido para conformar el molde del fondo plano de manera integral se procede a corregir fallas que se presentan como pequeños espacios en las uniones entre cada panel y orificios los cuales son cubiertos con masilla automotriz véase Figura 3.24.

- 102 Figura 3.24: Corrección de fallas.

Se aplica la pintura de fondo mediante aspersión a lo largo de todo el molde, aplicando dos capas de aspersión. El tiempo de secado entre capa y capa debe ser de 10 – 15 minutos para crear una buena fusión de la pintura de fondo. Véase Figura 3.25.

- 103 Figura 3.25: Aplicación de la pintura de fondo.

3.5 CONSTRUCCIÓN DE LAS MATRICES

Para este apartado de la construcción de la carrocería se debe conocer que el proceso es obtener dos partes el “positivo” y “negativo” de la pieza de fibra de vidrio la misma que toma las formas y líneas del molde al momento de su laminación.

El material necesario para la conformación de la pieza, tanto la cantidad de fibra como de resina es elegido en necesidad del número de capas y espesor que tendrá la pieza según los esfuerzos a soportar

En toda matriz de la carrocería lo que se necesita es construir una pieza que no necesariamente debe tener características constructivas de resistencia sino únicamente en elaborar un buen acabado superficial reduciendo ahorrar costes y simplificando el trabajo.

3.5.1 **CONSTRUCCION MATRIZ FRONTAL**

Para la conformación de la matriz frontal se realiza el recorte de cada una de las formas de fibra de vidrio como se muestra figura 3.26, según sea la necesidad a aplicar para posteriormente aplicar el gelcoat en la superficie del molde y en conjunto con la resina obtener la matriz frontal de la carrocería.

- 104 Figura 3.26: Recorte de las fibras de vidrio.

Para obtener la matriz primero se aplica dos capas de desmoldante sobre el molde con un tiempo de secado de 10 minutos entre cada capa, de ser posible se puede incrementar el número de capas para garantizar un aislamiento completo véase figura 3.27.

- 105 Figura 3.27: Aplicado de desmoldante.

A continuación se aplica una capa de gelcoat partiendo desde el plano superior hacia los laterales del molde con un tiempo de espera de aproximadamente 20 min entre capa y capa, Como se conoce la primera capa de gelcoat es la que realiza el acabado en la superficie de la pieza final, por lo que su aplicación debe ser muy minuciosa véase figura 3.28.

- 106 Figura 3.28: Aplicación del gelcoat.

Una vez que el gelcoat casi se ha curado se procede a aplicar la primera capa de fibra de vidrio más resina a lo largo de todo el molde. La aplicación se la realiza de forma

constante y uniforme. De manera seguida se coloca la segunda capa de fibra de vidrio evitando en lo posible la generación de burbujas entre capas, véase figuras 3.29.

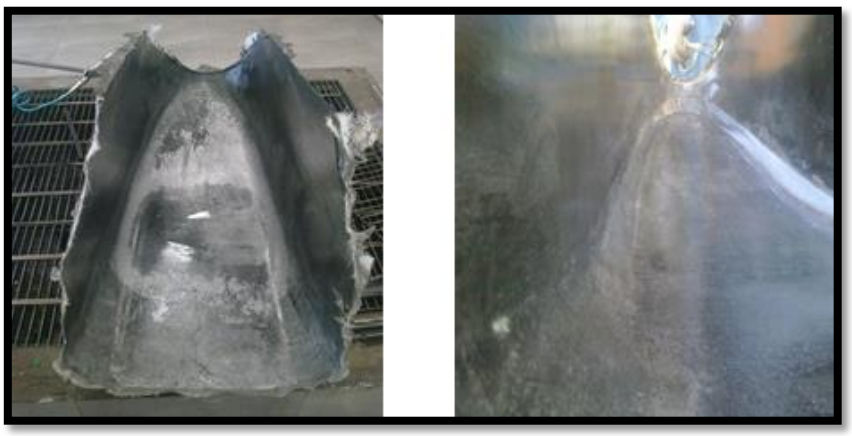
- 107 Figura 3.29: Colocación de la fibra de vidrio.

Luego de todo este proceso se deja curar el compuesto aproximadamente por un tiempo de 24 horas dependiendo de la humedad del clima y el tamaño del molde a trabajar. Una vez que se ha conformado la matriz de la nariz frontal de la carrocería se procede a su extracción.

A continuación se muestra el conjunto del molde y la matriz una vez culminado el tiempo de curado, para obtener la pieza matriz se extrae el molde empezando por la base de poliuretano que contiene los paneles divisores y posterior a ello se despega los paneles laterales de la matriz de fibra de vidrio para ir "debilitando" la estructura del molde y facilitar el proceso de separación como se muestra en la figura. Véase figura 3.30.

- 108 Figura 3.30: Desmolde de la pieza.

Una vez que se obtiene la matriz, se realiza su limpieza mediante lavado y lija de pulido ya que es de gran importancia por su acabado retirar cualquier impureza de materiales previamente utilizados como fondo, masilla, desmoldante, etc. Estos desechos se presentan al momento del desmolde de la pieza mismos que se impregnan en ella y que deben ser retirados mediante el uso de una lija que remueva las impurezas véase Figura 3.31.



- 109 Figura 3.31: Limpieza de la pieza.

Una vez realizado la limpieza de la pieza, se procede a reforzar la misma con travesaños de madera para posteriormente aplicar dos capas de desmoldante y finalmente la aplicación de gelcoat, fibra de vidrio y la resina que darán origen a la pieza final.

Se puede observar el montaje de los dos soportes de refuerzo de la matriz en el lado posterior ya que es esta zona donde los laterales son sensibles al doblado por ser laterales simples sin apoyo como se muestra en la figura 3.32, lo que simplifica y ayuda al manejo y posterior trabajo de esta pieza.

- 110 Figura 3.32: Colocado de los soportes transversales en la pieza matriz.

En esta parte es necesario la limpieza de impurezas del ambiente ya que a continuacion se aplica de la cera desmoldante; esta cera debe aplicarse de manera uniforme a lo largo de todas las tres superficies (una frontal y dos laterales) para que el tiempo de secado sea el mismo para toda la pieza y asi garantizar una igualdad de espesor en su aplicación.

Es importante la aplicación en el número mayor numero de capas, ya que un número menor no proporciona la seguridad necesaria para el desmolde y posiblemente genere grietas u orificios en la pieza; de ser un numero mayor de plicaiciones garantizara un secado total del desmoldante y la pieza estara lista para la fase de construciconvéase figura 3.33.

- 111 Figura 3.33: Aplicado de la cera desmoldante.

3.5.2 CONSTRUCCIÓN MATRIZ PONTONES

La aplicación de desmoldante se realiza de igual manera que en el frontal de la carrocería aplicándose de manera homogénea por de toda la superficie del molde considerando las formas y curvas de cada pieza.

El tiempo de secado debe ser de 30 minutos para conseguir una primera capa que preserve las primeras características físicas de impregnación del molde y posterior la segunda capa de la misma forma por toda la superficie del molde como se muestra figura 3.34.

Es importante tener en cuenta que un mayor número de aplicación de capas de desmoldante es mejor para así garantizar una correcta separación entre el molde y la matriz que se ha de realizar.

- 112 Figura 3.34: Aplicación de la cera desmoldante.

Una vez que se seca la capa final de desmoldante como se muestra en la figura 3.34 se procede a aplicar el gelcoat por toda la superficie del molde de igual manera como se ha aplicado antes en el frontal de la carrocería, se deja que el tiempo de secado sea de 30 minutos para que el gelcoat se homogenice y se prepare para recibir la fibra de vidrio con la resina, véase Figura 3.35.

- 113 Figura 3.35: Aplicación del gelcoat.

A continuación se cortan los pedazos de fibra de vidrio en la disposición de las formas del panel superior, lateral y de los bordes de las entradas de refrigeración. Es importante igualmente que de haber un excedente de fibra de vidrio sobre el molde, puede ser útil para utilizar en el proceso de construcción de la pieza, véase Figura 3.36.

En los bordes de fibra de vidrio que sobran como excedentes se realizan cortes angulares como se muestra figura 3.36, según la disposición de la zona que se trabaja generando así una mejor sujeción en la unión con las otras formas de fibra de vidrio.

- 114 Figura 3.36: Laminación de la fibra de vidrio.

Posterior a ello después de un tiempo de curado de la resina de la primera capa de 10 – 15 minutos, se coloca de la misma manera los recortes de fibra de vidrio para el montaje de la segunda capa primeramente sobre el panel superior de manera seguida el panel lateral y de los bordes de las entradas de refrigeración.

Seguidamente se unta la segunda mano de la resina de fibra de vidrio de igual manera que la primera, de esta manera se da por finalizado el proceso de fabricación de la matriz de los pontones laterales. A continuación, en figura 3.37 se puede observar cómo queda finalmente aplicada la fibra de vidrio sobre el molde.

- 115 Figura 3.37: Laminación de la fibra de vidrio.

Cuando el curado de la matriz a finalizado por completo en lo que refiere a un tiempo 12-16 horas se realiza la extracción de la matriz. Se tiene en cuenta que existen zonas que son débiles para la extracción como los bordes de las entradas de refrigeración, lugares en donde no es recomendable comenzar para este proceso, es por ello que se utiliza los bordes traseros del panel superior y del panel lateral, ya que son superficies más extensas y planas que permiten seguridad en la extracción así como también son espacios donde se deja un saliente que no se utiliza en la matriz ni en la pieza final para usarse como extracción.

3.6 CONSTRUCCION PIEZAS FINALES

3.6.1 CONSTRUCCION NARIZ FRONTAL

Para la construcción de la pieza frontal de la carrocería se realiza el untado de gelcoat a lo largo de la superficie de manera homogénea y de espesor proporcional a lo largo de toda la matriz. Véase Figura 3.38. Es necesario tener cuidado en que es una pieza de dimensiones considerables y la correcta aplicación de gelcoat sobre sobre todas las caras del molde matriz genera un excelente acabado.

- 116 Figura 3.38: Aplicado de gelcoat a lo largo de la superficie interior de la matriz.

Posterior a ello se deja que el gelcoat tenga un tiempo de curado de 30 minutos, ya que este tiempo es necesario para garantizar que no se produzcan fisuras en el acabado de la pieza además de un gran acabado superficial. Es por ello que este paso es muy importante para para crear una pieza que tenga un buen acabado en lo referente a estética y endurecimiento superficial.

Posterior a la aplicación de gelcoat se realiza el montaje de la fibra por secciones, refiriéndose así a los retazos de fibra de vidrio que se van colocando en función de la longitud del tramo de superficie en el que se trabaja.

Como se muestra en la figura 3.39 existen zonas donde la fibra de vidrio es de color blanco y color negro; lo que se debe a que en esas zonas el gelcoat se concentra y por eso es más visible en las zonas curvas propias de la forma de la matriz.

- 117 Figura 3.39: Aplicado de la fibra de vidrio a lo largo de la superficie interior de la matriz.

A partir de allí de igual manera se van juntando los demás pedazos de fibra de vidrio cortados específicamente para cada una de estas partes a lo largo de toda la matriz hasta terminar el montaje de la primera capa de fibra de vidrio. Véase Figura 3.40.

- 118 Figura 3.40: Aplicado de la fibra de vidrio a lo largo de la superficie interior de la matriz.

Se debe indicar que para el proceso de construcción de la pieza frontal (nariz) así como de la carrocería de todo el vehículo, se colocan dos capas de fibra de vidrio para dar una mayor rigidez y soporte de toda la pieza a lo largo de toda la estructura del chasis.

Una vez que la pieza del frontal de la carrocería ha concluido su tiempo de curado 10 – 12 horas es posible realizar la separación entre la matriz y la pieza frontal que se desea obtener, en este caso los lugares en donde se puede realizar el "despegue" entre ambas partes son las superficies laterales y la superficie superior del frontal, ya que por su forma permiten facilidad de separación, no así las zonas curvas que son más propensas a trizaduras, finalmente consiguiéndose el desprendimiento total de la pieza como se observa en la figura 3.41.

- 119 Figura 3.41: Pieza nariz frontal.

A continuación es necesario limpiar la pieza con una lija de pulido y agua para obtener una superficie completamente lisa para el proceso de fondeado, ya que en el proceso de separación se encuentran impurezas de desmoldante y suciedades producto de la construcción.

Se procede a aplicar la primera capa de pintura de fondo sobre la superficie de la pieza de manera homogénea a lo largo de la superficie para garantizar el mismo espesor en toda su trayectoria. Para aplicar la segunda capa de pintura de fondo se realiza el mismo

procedimiento teniendo en cuenta que las aristas curvas son zonas que requieren especial cuidado para su aplicación. Véase Figura 3.42.

- 120 Figura 3.42: Aplicado de la pintura de fondo previo al proceso de pintura.

Cuando se ha finalizado el proceso de aplicación de la pintura de fondo se tiene en cuenta que existen piezas fijas y móviles en las cuales se divide el frontal de la carrocería para retirar la parte superior cuando se necesite; es por esta razón que en el interior se trazan los lugares de corte con las dimensiones exactas. Figura 3.43.

- 121 Figura 3.43: Ubicación de los putos de corte

A continuacion se recorta con amoladora estos espacios donde se ubican los amortigadores de la zona frontal del vehiculo, y los paneles fijos que van situados entre los brazos de la amortiguación.Véase figura 3.44.

- 122 Figura 3.44: Recorte de las piezas

Para realizar el proceso de acabado, se aplican dos capas de pintura sobre la superficie con la diferencia que la segunda capa debe cubrir cualquier irregularidad de la primera capa con énfasis en los bordes curvos de unión de los planos laterales y el plano central.

Como el diseño del vehículo tiene un color más obscuro en el borde inferior, también se aplican dos capas de este color para adquirir un acabado continuo en la unión de los dos colores. Véase Figura 3.45.

- 123 Figura 3.45: Pintado de las piezas.

3.6.2 CONSTRUCCION PONTONES LATERALES

Para la construcción de la pieza del pontón definitivo, se realiza la inspección sobre el acabado de toda la superficie de la matriz en la cual se puede encontrar suciedades en ciertas zonas como el desprendimiento del desmoldante y en el peor de los casos pintura de fondo, pero no representan inconveniente ya que se pueden eliminar con una lija de pulido y agua.

A continuación se aplica dos capas de gelcoat sobre toda la superficie interna de la matriz (zona en la que se obtendrá el pontón definitivo) donde el excedente de gelcoat se debe extender hasta cubrir el área por completo. De igual manera deben recubrirse con gelcoat los bordes de las entradas de refrigeración, véase Figura 3.46.

- **124 Figura 3.46:** Aplicado de gelcoat en la superficie interior de los pontones.

Se recortan las formas de fibra de vidrio de los diferentes paneles del pontón para la construcción y se debe tener en cuenta que como son superficies de aristas vivas acorde al diseño, la unión en esta zona de los diferentes paneles superior, lateral y de los bordes presenta dificultad en unirse si no se realiza un escarmenado en la figura 3.47, para que se fusione con mayor facilidad al momento de aplicar la resina de fibra de vidrio.

- 125 Figura 3.47: Escarmenado de la fibra de vidrio.

A continuación se realiza el mismo procedimiento utilizado para la construcción de la fibra de vidrio, se aplica los recortes comenzando por la superficie del panel superior y seguidamente se coloca en el panel lateral entrelazando con la fibra del panel superior.

Se fijan también los recortes de fibra de vidrio sobre la superficie de los bordes del pontón molde y sus esquinas de manera escarmenada fijándose con los paneles anteriores.

A continuación se procede con el montaje de la segunda capa de fibra de vidrio después de haber transcurrido 30 minutos de la primera y del mismo modo se deja curar la pieza final de fibra de vidrio de los pontones con un tiempo de curado de 10 – 12 horas para que adquiera endurecimiento y rigidez como se muestra en la figura 3.48.

- 126 Figura 3.48: Laminación de la fibra de vidrio.

Una vez finalizado el proceso de curado de los pontones, se realiza el proceso de extracción (separación) de la pieza final hasta despegar del molde matriz; a continuación se realiza el recorte de los excedentes de fibra de vidrio de todos bordes acorde a las dimensiones del proceso de diseño como se muestra figura 3.49.

- 127 Figura 3.49: Pieza final pontón derecho y pontón izquierdo.

Una vez que se ha lijado la masilla y se ha retirado cualquier excedente de esta, se limpia la pieza del polvo generado por el proceso de lijado y se prepara a continuación para la pintura de fondo. De igual manera procede a aplicar dos capas de fondo sobre toda la superficie. Véase figura 3.50.

- 128 Figura 3.50: Pieza aplicada pintura tipo fondo.

A continuación se realiza el proceso de pintado de los pontones el cual requiere de dos capas de pintura mediante aspersión a la largo de toda la superficie en el sentido de hasta concluir la primera capa en todas las superficies.

Pasado un tiempo de 45 minutos después de la aplicación de la primera capa, se realiza la aspersión de pintura de la segunda capa enfatizando de igual manera aquellas zonas que en la primera capa no son posibles de concluir, a la vez que se asegura un correcto espesor a lo largo de toda la superficie como se muestra figura 3.51.

- 129 Figura 3.51: Pieza terminada.

3.6.3 CONSTRUCCIÓN FONDO PLANO

Para la construcción del fondo plano del vehículo, se deben considerar dos parámetros muy importantes que son:

- La superficie donde se encuentra el acabado liso debe encontrarse en la parte inferior del fondo plano. En esta parte es necesario que no exista rugosidad alguna que afecte el paso del flujo de aire en los difusores y el fondo en general.
- Por tal motivo no se necesita de la construcción de una matriz para obtener el fondo plano definitivo ya que su construcción es de manera directa una vez que se obtiene al tomar la forma del molde.

Para la construcción del fondo plano, de igual manera se aplica dos capas de gelcoat a lo largo de toda la superficie procurando que su aplicación sea lo más homogénea posible a lo largo de toda la superficie.

De la misma manera el tiempo que debe transcurrir entre la primera y segunda capa debe ser de 20 - 30 minutos, ya que es necesario que la primera capa se complemente en las zonas de aristas vivas mediante un curado de tiempo prolongado para mejorar su rigidez estructural. A continuación se aplica la segunda capa de gelcoat una vez que la primera capa ha tomado la consistencia necesaria para garantizar una gran dureza superficial como se muestra en la figura 3.52.

- 130 Figura 3.52: Aplicación de fondo.

En las zonas de aristas vivas entre las uniones de las esquinas se coloca una pasta de resina y carbonato de calcio como se muestra en la figura 3.53, para reforzar estas zonas, al mismo tiempo que genera perfiles curvos para una mejor unión con la fibra de vidrio escarmenada, ya que es un área muy pequeña para trabajar la fibra de vidrio con aristas vivas.

- 131 Figura 3.53: Aplicación de la pasta de resina y carbonato de calcio.

Solamente es necesario aplicar una capa de fibra de vidrio tipo Mat a lo largo de todos los paneles y una capa de fibra de vidrio tipo *Woven Roving* para la unión entre las secciones de los difusores y los paneles interiores y exteriores, ya que es muy

importante el valor de la resistencia y el peso del fondo plano por sus grandes dimensiones.

Se debe considerar una correcta distribución en la disposición de los tejidos de la fibra de vidrio tipo *Woven Roving*, ya que dependiendo de su ubicación generará una buena rigidez y la suficiente flexión para su funcionamiento.

A continuación se aplica la resina y la fibra de vidrio siguiendo el mismo proceso anteriormente mostrado y como se puede observar en la figura 3.54, la disposición de la fibra se extiende con orden a lo largo de toda la superficie central y de la misma manera se realiza el proceso para todos los otros cuatro paneles (difusores y laterales) en el conformado del fondo plano.

- 132 Figura 3.54: Laminado del fondo plano en fibra de vidrio.

Una vez concluido el proceso de curado de la fibra de vidrio co la resina, se procede al desmolde de la pieza teniendo especial cuidado en las aristas con ángulos muy pronunciados para evitar trizar la fibra ya que se requiere de una fuerza considerable para su extracción, véase figura 3.55.

- 133 Figura 3.55: Desmolde del fondo plano.

En el desmolde de la pieza para verificar que las capas de fibra se hayan conformado y unido de forma correcta; no deben existir grietas, espacios vacíos ni aberturas que podrían comprometer o trizar el fondo plano al momento de anclar en el chasis ver figura 3.56.

Se debe mencionar que posteriormente se realiza perforaciones y cortes en el fondo plano para los pernos de fijado al chasis, así como también para la boca de drenado de aceite del motor además de los soportes de los templones en los extremos de los difusores.

- 134 Figura 3.56: Fondo plano final.

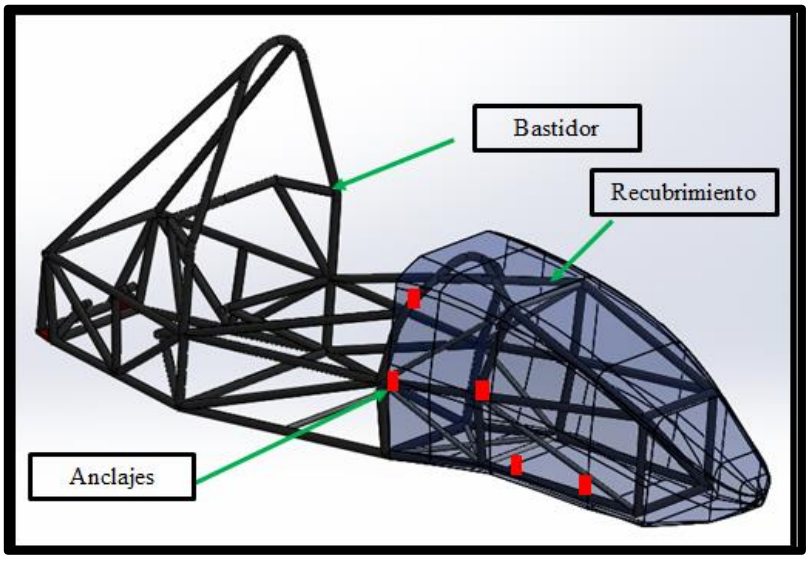
3.7 UBICACIÓN DE LOS SOPORTES DE LA CARROCERIA (Anclajes)

Para la ubicación de los puntos de soporte de la carrocería al chasis, se debe cumplir con el reglamento de Formula SAE además de una correcta distribución de su posición a lo largo de cada sección mediante las siguientes consideraciones:

- Debe existir fácil acceso para su montaje.
- Los puntos de anclaje no deben sobresalir del chasis.
- Para simplificar el montaje de la carrocería, se pueden soldar las tuercas de fijación a las platinas de soporte.

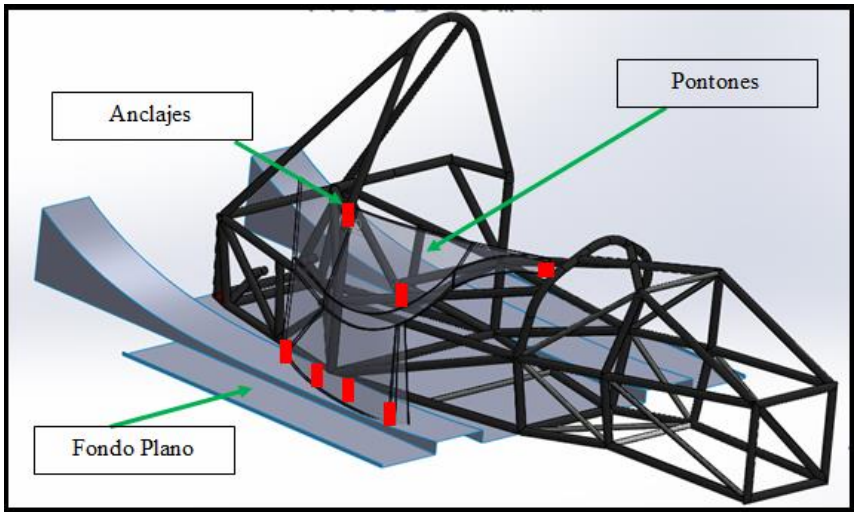
Tomando en cuenta estas consideraciones se analiza la ubicación de los posibles puntos de anclaje, para que la carrocería se conserve de forma fija al chasis.

Por lo tanto se procede a identificar los puntos de anclaje de cada una de las partes de la carrocería en el chasis; en este caso se muestra para la ubicación de la nariz frontal como se muestra en la figura 3.57. Los 5 anclajes de color rojo, son los puntos designados por su equidistancia y limitación con otros componentes como la suspensión del vehículo además de la existencia simétrica con el otro lado del chasis.



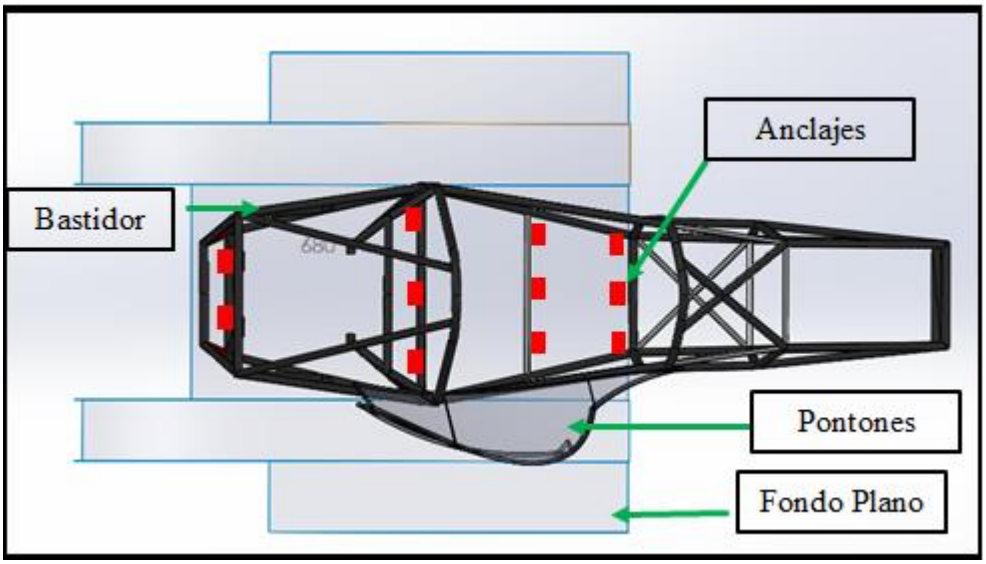
- 135 Figura 3.57: Anclajes de la carrocería frontal.

Para la ubicación de los anclajes laterales (puntos rojos), los pontones se fijan en la parte lateral del chasis mediante la zona del *cockpit* y en su parte inferior con el fondo plano en un número de 7 anclajes como se muestra en la figura 3.58.



- 136 Figura 3.58: Anclajes pontones laterales.

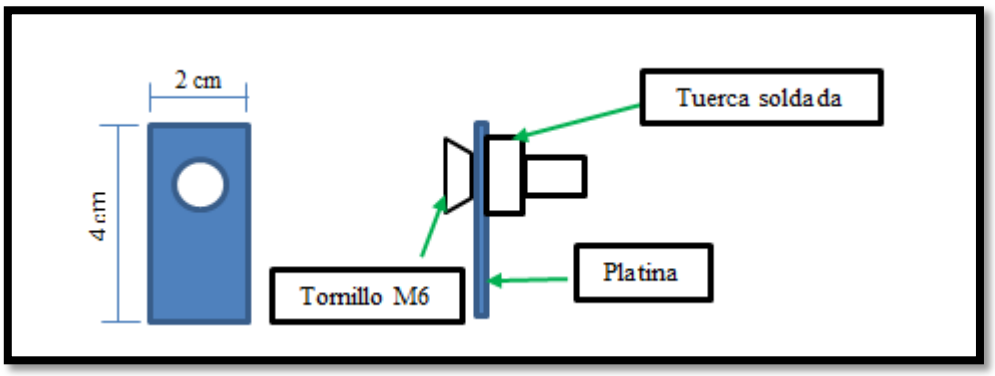
Los anclajes del fondo plano se ubican en la parte baja del chasis como se muestra en la figura 3.59 son 11 anclajes en la parte baja más los 4 existentes por cada pontón, Se debe mencionar que los anclajes entre los pontones y el fondo plano se comparten entre sí, logrando un trabajo conjunto de rigidez en ambas piezas.



- 137 Figura 3.59: Anclajes del fondo plano.

Para los soportes de fijado al chasis se utilizan platinas de 2mm de espesor soldadas con tuercas tipo M6 y pernos Allen con cabeza avellanada tipo M6 también.

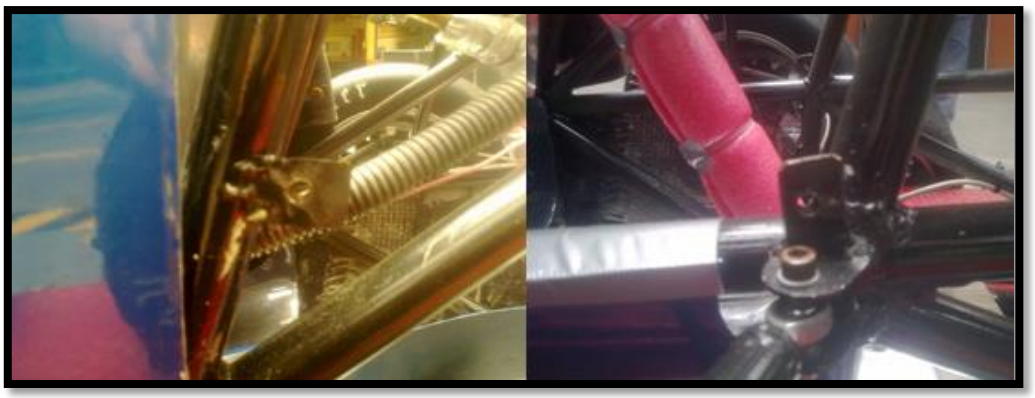
Para las platinas de 2mm de espesor se comienza por recortar en dimensiones de 4cm de largo y 2cm de ancho y a continuación se suelda la tuerca por la parte interior de la platina, facilitando así el montaje y extracción de la carrocería de la manera más rápida posible con un bajo uso de herramientas para su fijación. Véase figura 3.60.



- 138 Figura 3.60: Platina y tuerca soldada.

3.8 ENSAMBLAJE CARROCERIA

Se procede a soldar las platinas en el chasis de acuerdo al estudio de ubicación previo; como se observa en la figura 3.61 y 3.62, donde se hace referencia a las platinas de anclaje soldadas en la zona frontal del chasis para la ubicación de la nariz frontal de la carrocería.



- 139 Figura 3.61: Platinas soldadas al chasis.

- **140 Figura 3.62:** Platinas soldadas al chasis.

Las sujeciones para los pontones laterales de la carrocería son platinas salientes que van soldadas al chasis como se observa en la figura 3.63, que se ubican en función de la forma del pontón.

La platina frontal posee una inclinación de 13 grados para establecer la primera inclinación del pontón seguida de la platina central que tiene una inclinación 30 grados que posiciona el pontón de una manera más inclinada, y finalmente la platina posterior mantiene los mismos 30 grados de inclinación de la platina central.

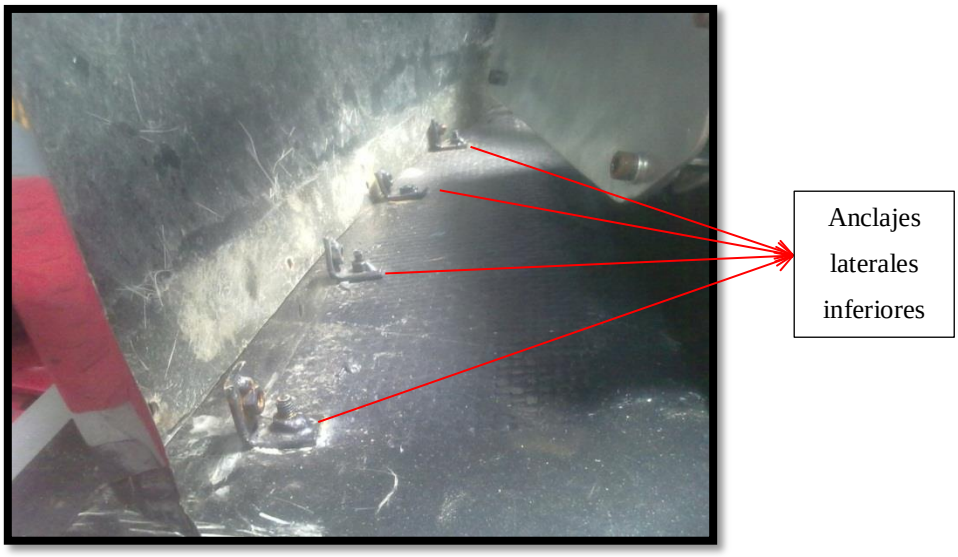
Con estos ángulos de inclinación se forma la geometría de inclinación de los pontones laterales a la vez que se proporciona una mejor ergonomía para el apoyo necesario del piloto para salir del *cockpit*.

- **141 Figura 3.63:** Sujeciones superiores pontones laterales.

En la figura 3.64 se observa la disposición completa de los 3 anclajes superiores de los pontones los mismos que se conjugan en una sola línea de integración con el *cockpit* del piloto y con la nariz frontal.

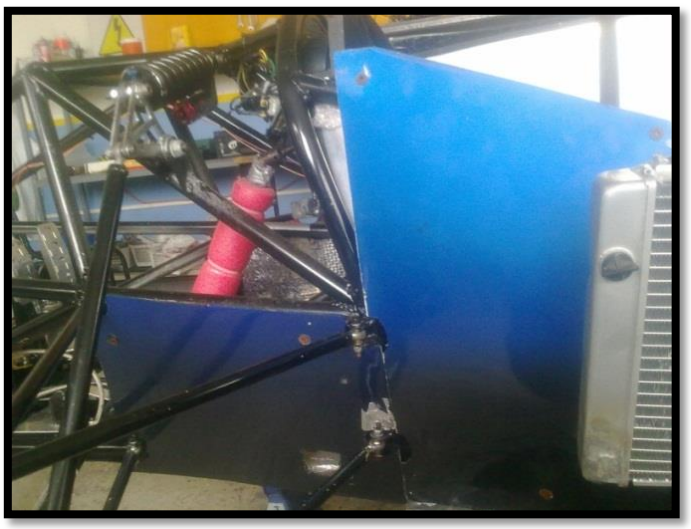
- 142 Figura 3.64: Disposición superiores laterales.

A continuación en la figura 3.65 se muestran las platinas de sujeción entre el fondo plano y el pontón, estos sujetadores poseen forma de L para la sujeción de las dos piezas; de la misma manera se debe indicar que estas platinas poseen tuercas soldadas a ellas así se evita dificultan en el montaje o desmontaje de esta zona de la carrocería.



- 143 Figura 3.65: Sujetadores de los pontones y fondo plano.

Para complementar la forma de la carrocería se colocan tapas laterales como se muestra en la fase de diseño entre los amortiguadores delanteros así como también en las entradas de refrigeración, las mismas que sirven para canalizar los flujos de aire hacia el radiador y el motor del vehículo. Estas tapas laterales se fijan de manera permanente ya que su posición no afecta al desmontar ninguna pieza. Véase figura 3.66.



- 144 Figura 3.66: Tapas laterales.

En la figura 3.67 se puede observar el ensamble completo de todo el conjunto acoplado al chasis con todas sus piezas (nariz frontal, pontones, tapas laterales y fondo plano) que interactúan entre sí para optimizar el rendimiento de los flujos aerodinámicos así como el comportamiento dinámico del vehículo en general.

El acabado del conjunto integral de la carrocería y su ensamble al chasis demuestra la el acople armonioso entre todo el conjunto evocando robustez así como la fluidez de sus líneas estéticamente atractivas.

- 145 Figura 3.67: Ensamblaje completo.

CAPITULO 4. ANÁLISIS DEL COSTO - BENEFICIO FINAL DEL MODELO ALCANZADO

El estudio para determinar el costo de la fabricación de cada una de las piezas que conforman la carrocería del vehículo es el costo de producción, el mismo que identifica los diferentes materiales que se utilizan y define el costo total acorde a los diferentes tipos de gastos que se realizan.

Este análisis define la cantidad y el costo de los diferentes materiales que se emplean para la fabricación de la carrocería, que sumados en un solo conjunto permiten conocer el costo final.

4.1 COSTO DE PRODUCCION

El costo de producción como método seleccionado para la evaluación de los costos de la carrocería, permite identificar y considerar los diferentes factores que afectan el resultado del costo final de la trasformación de la materia prima en un producto terminado[77].

4.2 GASTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE FABRICACIÓN

Los gastos de fabricación se dividen en dos grandes grupos, los gastos en elementos que inciden de manera directa en la fabricación y los gastos indirectos que contribuyen a la elaboración del producto.

[77] GUANO A, TIERRA J, (2012) Diseño y construcción de una máquina para el reciclaje de fibra de vidrio. Tesis de mecánica no publicada, ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

4.2.1 GASTOS DIRECTOS DE FABRICACION

Constituyen todos aquellos valores cuantificables y medibles que determinan el costo de materia prima y la mano de obra directa.

Para conocer el valor de los gastos, primero se realiza la medición de la superficie total en (m^2) que posee cada parte que conforma la carrocería y así determinar la cantidad de los materiales a utilizar tanto para la construcción de moldes, matrices y piezas finales.

En la tabla 4.1 se muestra el detalle el numero de piezas, superficie, peso, el tipo y cantidad de material utlizados.

TABLA DE MOLDES, MATRICES Y PIEZAS FINALES						
N° UNIDADES	Área (m^2)	Peso (kg)	PARTES	MATERIA PRIMA		
				Cantidad	Unidad	Materiales
1	6.37	7.00	Nariz Frontal (Molde)	6.37	m^2	Planchas de cartón prensado
				9.37	kg	Masilla
				5.00	kg	Poliuretano
1	6.37	6.50	Nariz Frontal (Matriz)	6.50	kg	Estireno
				0.65	kg	Meck Peróxido
				0.11	kg	Cobalto
				2.28	kg	Carbonato de Calcio
				0.35	kg	Pigmento
				5.20	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
1	6.37	6.50	Nariz Frontal (Pieza Final)	6.50	kg	Estireno
				0.65	kg	Meck Peróxido
				0.11	kg	Cobalto
				2.28	kg	Carbonato de Calcio
				0.35	kg	Pigmento
				5.20	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
				1.62	kg	Fibra de Vidrio WOVEN ROVING 800
2	1.80	5.50	Pontones Laterales (Molde)	3.60	m^2	Planchas de cartón prensado
				3.24	kg	Masilla
				2.82	kg	Poliuretano
2	1.74	5.00	Pontones Laterales (Matriz)	3.54	kg	Estireno
				0.34	kg	Meck Peróxido
				0.06	kg	Cobalto
				1.24	kg	Carbonato de Calcio
				0.18	kg	Pigmento
				2.84	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT

TABLA DE MOLDES, MATRICES Y PIEZAS FINALES						
N° UNIDADES	Área (m^2)	Peso (kg)	PARTES	MATERIA PRIMA		
				Cantidad	Unidad	Materiales
2	1.74	5.00	Pontones Laterales (Pieza Final)	3.54	kg	Estireno
				0.34	kg	Meck Peróxido
				0.06	kg	Cobalto
				1.24	kg	Carbonato de Calcio
				0.18	kg	Pigmento
				2.84	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
2	0.30	0.80	Tapas laterales (Pieza Final)	0.61	kg	Estireno
				0.06	kg	Meck Peróxido
				0.01	kg	Cobalto
				0.22	kg	Carbonato de Calcio
				0.03	kg	Pigmento
				0.49	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
3	0.35	0.90	Tapas Posteriores (Pieza Final)	1.07	kg	Estireno
				0.11	kg	Meck Peróxido
				0.02	kg	Cobalto
				0.38	kg	Carbonato de Calcio
				0.06	kg	Pigmento
				0.86	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
1	2.73	8.50	Fondo Plano	2.79	kg	Estireno
				0.28	kg	Meck Peróxido
				0.05	kg	Cobalto
				0.98	kg	Carbonato de Calcio
				0.15	kg	Pigmento
				2.23	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT
				0.70	kg	Fibra de Vidrio WOVEN ROVING 800

- 146 Tabla 4.1: Tabla de cantidad de materia prima empleada.

4.2.1.1 GASTOS DIRECTOS MATERIA PRIMA

Para determinar el costo de la materia prima se calcula la distribución de la cantidad y costo por unidad del material empleado en la fabricación de cada parte que conforma la carrocería[78].

Como se muestra en la tabla 4.2 el detalle del costo unitario de cada material representa un costo total directo del valor de la materia prima igual a $337,10 dólares.

[78] GUANO A, TIERRA J, (2012) Diseño y construcción de una máquina para el reciclaje de fibra de vidrio. Tesis de mecánica no publicada, ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

TABLA DE MOLDES, MATRICES Y PIEZAS FINALES										
N° UNIDADES	Área (m^2)	Peso (kg)	PARTES	MATERIA PRIMA						
				Cantidad	Unidad	Materiales	Costo Unitario			Costo Total
1	6.37	7.00	Nariz Frontal (Molde)	6.37	m^2	Planchas de cartón prensado	$	1.00	x metro cuadrado	$ 6.37
				9.37	kg	Masilla	$	1.24		$ 11.62
				5.00	kg	Poliuretano	$	7.56		$ 37.80
1	6.37	6.50	Nariz Frontal (Matriz)	6.50	kg	Estireno	$	3.64		$ 23.66
				0.65	kg	Meck Peróxido	$	6.83		$ 4.44
				0.11	kg	Cobalto	$	33.60		$ 3.70
				2.28	kg	Carbonato de Calcio	$	0.78		$ 1.78
				0.35	kg	Pigmento	$	35.84		$ 12.54
				5.20	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$	3.64		$ 18.93
1	6.37	6.50	Nariz Frontal (Pieza Final)	6.50	kg	Estireno	$	3.64		$ 23.66
				0.65	kg	Meck Peróxido	$	6.83		$ 4.44
				0.11	kg	Cobalto	$	33.60		$ 3.70
				2.28	kg	Carbonato de Calcio	$	0.78		$ 1.78
				0.35	kg	Pigmento	$	35.84		$ 12.54
				5.20	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$	3.64		$ 18.93
				1.62	kg	Fibra de Vidrio WOVEN ROVING 800	$	3.13		$ 5.07
2	1.80	5.50	Pontones Laterales (Molde)	3.60	m^2	Planchas de cartón prensado	$	1.00	x metro cuadrado	$ 3.60
				3.24	kg	Masilla	$	1.24		$ 4.02
				2.82	kg	Poliuretano	$	7.56		$ 21.32
2	1.74	5.00	Pontones Laterales (Matriz)	3.54	kg	Estireno	$	3.64		$ 12.89
				0.34	kg	Meck Peróxido	$	6.83		$ 2.32
				0.06	kg	Cobalto	$	33.60		$ 2.02
				1.24	kg	Carbonato de Calcio	$	0.78		$ 0.97
				0.18	kg	Pigmento	$	35.84		$ 6.45
				2.84	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$	3.64		$ 10.34

- 147 Tabla 4.2: Tabla de la cantidad y costo de los materiales utilizados por pieza.

TABLA DE MOLDES, MATRICES Y PIEZAS FINALES								
N° UNIDADES	Área (m^2)	Peso (kg)	PARTES	MATERIA PRIMA				
				Cantidad	Unidad	Materiales	Costo Unitario	Costo Total
2	1.74	5.00	Pontones Laterales (Pieza Final)	3.54	kg	Estireno	$ 3.64	$ 12.89
				0.34	kg	Meck Peróxido	$ 6.83	$ 2.32
				0.06	kg	Cobalto	$ 33.60	$ 2.02
				1.24	kg	Carbonato de Calcio	$ 0.78	$ 0.97
				0.18	kg	Pigmento	$ 35.84	$ 6.45
				2.84	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$ 3.64	$ 10.34
2	0.30	0.80	Tapas laterales (Pieza Final)	0.61	kg	Estireno	$ 3.64	$ 2.23
				0.06	kg	Meck Peróxido	$ 6.83	$ 0.42
				0.01	kg	Cobalto	$ 33.60	$ 0.37
				0.22	kg	Carbonato de Calcio	$ 0.78	$ 0.17
				0.03	kg	Pigmento	$ 35.84	$ 1.21
				0.49	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$ 3.64	$ 1.78
3	0.35	0.90	Tapas Posteriores (Pieza Final)	1.07	kg	Estireno	$ 3.64	$ 3.90
				0.11	kg	Meck Peróxido	$ 6.83	$ 0.73
				0.02	kg	Cobalto	$ 33.60	$ 0.65
				0.38	kg	Carbonato de Calcio	$ 0.78	$ 0.29
				0.06	kg	Pigmento	$ 35.84	$ 2.11
				0.86	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$ 3.64	$ 3.12
1	2.73	8.50	Fondo Plano	2.79	kg	Estireno	$ 3.64	$ 10.14
				0.28	kg	Meck Peróxido	$ 6.83	$ 1.90
				0.05	kg	Cobalto	$ 33.60	$ 1.68
				0.98	kg	Carbonato de Calcio	$ 0.78	$ 0.76
				0.15	kg	Pigmento	$ 35.84	$ 5.49
				2.23	kg	Fibra de Vidrio 375 Tipo MAT	$ 3.64	$ 8.11
				0.70	kg	Fibra de Vidrio WOVEN ROVING 800	$ 3.13	$ 2.18
							TOTAL	$ 30.28
							TOTAL MATERIA PRIMA DIRECTA EMPLEADA	$ 337.10

- 148 Tabla 4.2: Tabla de cantidad y costo final.

4.2.1.2 GASTOS DIRECTOS MATERIA PRIMA PARA ACABADO

Como se observa en la tabla 4.3 se detalla la materia prima que se aplica para el acabado final de la carrocería, cuyos materiales se emplean en el proceso de pintado y pulido que representan el acabado estético de la carrocería con un costo final de $ 200.00 dólares

TABLA DE MATERIA PRIMA PARA EL ACABADO				
Cantidad	**Unidad**	**Material**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
1/2	gl	Pintura	$ 115.00	$ 115.00
4	lt	Disolvente	$ 3.00	$ 12.00
1	gl	Desmoldante	$ 30.00	$ 30.00
25	unid	Lijas	$ 0.40	$ 10.00
2	gl	Pintura de fondo	$ 18.00	$ 36.00
			TOTAL	$ 203.00

- 149 Tabla 4.3: Tabla de materia prima para acabado.

A continuación como se observa en la tabla 4.4 se describe los insumos utilizados para la construcción de las piezas de fibra de vidrio que conforman la carrocería, además de del equipo de protección para componentes químicos para la preparación de resina y masilla. Como se conoce para la sujeción de la carrocería en el chasis las platinas y pernos son materiales que representa un costo complementario en el gasto directo con un valor de $132,80 dólares.

TABLA DE INSUMOS			
Cantidad	**Material**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
10	Brochas	$ 0.80	$ 8.00
10	Guantes de látex	$ 0.60	$ 6.00
4	Guantes de caucho	$ 1.20	$ 4.80
4	Mascarilla	$ 6.00	$ 24.00
2	Overol	$ 40.00	$ 80.00
40	Pernos M6	$ 0.15	$ 6.00
1	Platina 6x3x6	$ 4.00	$ 4.00
		TOTAL	**$ 132.80**

- 150 Tabla 4.4: Tabla de insumos.

En la tabla 4.5 se observa el costo total de la materia prima directa que se utiliza en la para la construcción y acabado de la carrocería así como el costo de los insumos para la protección personal y materiales para fijado de la carrocería al chasis.

TABLA DE MATERIA PRIMA DIRECTA	
Materia prima para moldes, matrices y piezas finales	$ 337.10
Materia prima para el acabado final	$ 203.00
Insumos	$ 132.80
Total	$ 672.90

- 151 Tabla 4.5: Tabla de costo de materia prima total.

4.2.1.3 COSTO DE LA MANO DE OBRA DIRECTA

El valor del costo de la mano de obra se calcula en función del trabajo realizado por la persona con relación directa en la construcción de la carrocería[79].

En la fabricación de la carrocería intervienen dos personas quienes emplean un total de 400 horas, lo que representa a 5 horas de trabajo diarias por cinco días laborales durante cuatro meses, teniendo en cuenta que el costo por hora de trabajo diario es de $2,12 como se muestra en la tabla 4.6.

Mano de Obra Directa Empleada			
Trabajadores	**4 Horas/Día**	**Costo/Hora**	**Total**
2	400	$2,12	$1696

- 152 Tabla 4.6: Costo de mano de obra.

4.2.2 GASTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN

Consiste de la suma de los gastos indirectos por uso de maquinaria y herramienta para el conformado de la carrocería, los cuáles no se pueden cuantificar ni medir de manera directa para la fabricación por lo cual se realiza una aproximación de los valores para determinar el costo indirecto de fabricación[80].

[79] GUANO A, TIERRA J, (2012) Diseño y construcción de una máquina para el reciclaje de fibra de vidrio. Tesis de mecánica no publicada, ESPOCH, Riobamba, Ecuador.
[80] GUANO A, TIERRA J, (2012) Diseño y construcción de una máquina

4.2.2.1 COSTOS DE MAQUINARIA

Para determinar el costo de la maquinaria utilizada para la construcción de la carrocería, se establece el consumo eléctrico para cada equipo con el valor comercial del medio del vatio/hora de $ 0.80 de dólar por el número de horas de uso de cada equipo que adquiere un valor total de $20,80 dólares como se muestra tabla 4.7.

TABLA DE COSTOS INDIRECTOS MAQUINARIA			
Maquinaria	**Horas Equipo**	**Costo/Horas**	**Total**
Amoladora	9	$ 0.80	$ 7.20
Taladro	6	$ 0.80	$ 4.80
Compresor	7	$ 0.80	$ 5.60
Soldadora	4	$ 0.80	$ 3.20
		TOTAL	**$ 20.80**

- 153 Tabla 4.7: Tabla costos maquinaria.

4.2.2.2 COSTOS HERRAMIENTA

Para el cálculo del costo de herramientas se define un valor supuesto de $ 0.30 de dólar por el uso de cada herramienta por hora de trabajo, obteniendo un valor aproximado de uso de $1.20 dólares como se muestra en la tabla 4.8.

TABLA DE COSTOS INDIRECTOS HERRAMIENTAS			
Herramientas	**Tiempo**	**Costo**	**Total**
Desarmador 10cm	2 horas	$ 0.30	$ 0.60
Racha 10cm	2 horas	$ 0.30	$ 0.60
		TOTAL	**$ 1.20**

- 154 Tabla 4.8: Tabla costos herramientas.

4.3 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

El costo total de fabricación del producto que se ha obtenido es el resultado de la suma total de los gastos directos de fabricación más el valor total de los gastos indirectos de fabricación y que por lo tanto representa el valor total de la construcción de la carrocería para el vehículo de competencia UPS RACING TEAM.

---

para el reciclaje de fibra de vidrio. Tesis de mecánica no publicada, ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

COSTO DE PRODUCCIÓN		
Gastos Directos de Fabricación		$ 2,368.90
Materia Prima Directa	$ 672.90	
Mano de Obra Directa	$ 1,696.00	
Gastos Indirectos de Fabricación		$ 22.05
Costos Indirectos de Fabricación	$ 22.05	
	TOTAL	$ 2,390.95

- 155 Tabla 4.9: Costo total de producción.

Como se observa en la tabla 4.9, el costo total de la producción es de $ 2390,95 dólares, en el cual el valor de la mano de obra representa el costo más alto para la construcción de la carrocería.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado nuestro trabajo de tesis se concluye lo siguiente:

- Que las ecuaciones de gobierno que rigen el comportamiento de un flujo alrededor de un sólido para la simulación y análisis de las diferentes geometrías, se basan en el modelo matemático de turbulencia K-épsilon, el mismo que se resuelve mediante el método de volúmenes finitos en un dominio definido, constituyendo un medio para el análisis de la geometría. También es un medio para aplicar las condiciones de frontera que definen la dirección del sentido de flujo, visualizar las presiones y velocidades que actúan sobre la carrocería, y determinar así el coeficiente de resistencia al viento (Cx) más bajo, por lo que la carrocería de pontones tipo trapecio con un valor de 0.4453 es la más eficiente.

- Para determinar la geometría más adecuada de carrocería con el mayor rendimiento aerodinámico, los valores iniciales de las curvas de comportamiento de las presiones frontales deben poseer el más bajo valor y disminuir rápidamente hasta la presión final en la parte posterior de la manera más rápida posible, así como también permitir la mayor velocidad del paso de flujo de aire a través de su geometría en el menor tiempo posible; por lo tanto, la carrocería con pontones laterales tipo trapecio es la más efectiva con valores de presión y máxima de 206 (Pa) y aceleración 21,7 (m/s) respectivamente y presión mínima de 185 (Pa).

- Las formas del chasis y los elementos que posee el vehículo de competencia Formula SAE, condicionan la efectividad de funcionamiento del fondo plano; para el que, considerando estas limitaciones en el análisis realizado para diferentes geometrías con velocidad promedio de competencia de 17 (m/s), se determina que la geometría más apropiada para reducir la presión en la zona inferior en el menor tiempo, es el fondo plano con difusores rectos con 167 (Pa) de presión con un pico de velocidad de 17,84 (m/s).

- Que el material más idóneo para la construcción de la carrocería y fondo plano del vehículo de competencia tipo Formula SAE, es la fibra de vidrio, pues posee una alta maniobrabilidad para su modelado, así como también la resistencia mecánica necesaria además del bajo peso total del conjunto considerando sus grandes dimensiones y la comparación con otros materiales existentes para el mismo fin, destacando su bajo costo y fácil accesibilidad en el mercado local.

- Aplicar el método de análisis de costo de producción para determinar el valor de construcción de la carrocería fondo plano, permite cuantificar y ordenar el procesamiento de elaboración de la materia prima en un producto final elaborado, en el cual se estima que el costo total de construcción es de $ 2390,95 dólares.

RECOMENDACIONES

- Para una validación de datos más exacta de diferentes geometrías de vehículos, se puede realizar el estudio mediante el uso de túneles de viento estáticos y de tipo dinamométrico a escala, de esta manera se pueden obtener una mayor cantidad de datos y realizar una comparación de resultados que se obtienen con el software y así establecer conclusiones con datos más claros y concisos para mejorar la interpretación de la eficiencia geométrica y aerodinámica de la carrocería.

- Se puede mejorar el análisis y el rendimiento aerodinámico realizando un estudio más extenso y puntual de los coeficientes de resistencia lateral (Cy) y de resistencia vertical (Cz), datos que pueden ayudar a precisar y aprovechar el comportamiento y eficiencia de los flujos aerodinámicos, así como de las presiones generadas en las superficies de cada geometría.

- Para optimizar el diseño de una carrocería de competencia tipo Formula SAE se puede realizar el estudio de cálculos estructurales, de resistencia y de comportamiento de carrocerías en fibra de vidrio, lo que permitirá mejorar la seguridad de todo el vehículo y también optimizar el desempeño de los recursos para su construcción.

- Para futuros proyectos de Formula SAE se deber tomar muy en cuenta el objetivo de los materiales a utilizar en la construcción de la carrocería, ya que de esta manera se puede reducir el costo de materia prima; se sugiere continuar con el uso de fibra de vidrio debido a la facilidad del proceso de fabricación y bajo costo de los materiales en comparación de otros materiales como la fibra de carbono, además de que se puede optimizar mucho más su aplicación para la construcción de carrocerías de vehículos.

BIBLIOGRAFIA

1).- SAE INTERNATIONAL, Formula SAE 2014 rules, 2013.

2).- AGUEDA, Eduardo, Estructuras del Vehículo, 2a edición, Editorial Paraninfo S.A., España, 2010.

3).- MOTT, Robert Mecánica de Fluidos Aplicada, Pretince Hall Hispanoamérica, 4ta Edición, 1996.

4).- CARMONA, Aníbal Isidoro. Aerodinámica y Actuaciones del Avión. Thomson Paraninfo, 2004

5).- IZQUIERDO, Francisco, Teoría de los vehículos Automóviles, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.

6).- ANDERSON John, Computational Fluid Dynamics, Mc Graw hill,2da Edition New York , Estados Unidos, 1995.

7). - VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA. W, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, Longman Group Ltd. 1ra edición, 1995.

8).- STREETER Victor, Mecánica de Fluidos, Mc Graw Hill, 9na Edición 2000.

9).- CHORIN Alexandre , MARSDEN Jerrold, Mathematical Introduction To Fluid Mechanics, 3ra Edición 2000 California, Estados Unidos, P25.

10).-VÁSCONEZ Rebeca, Diseño aerodinámico de una alerón posterior por simulación para un vehículo Chevrolet Gemini modelo 1987, 2006.

11).- BIRDS Royd, F1 in Schools Car Manufacturing guide R-Type, Denford, Reino Unido.

12).- DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORPORATION, Proyecto de diseño F1 in SchoolsTM con el software SolidWorks® 2010, DC Micro Development, Estados Unidos, 2009.

13). - DAN Burrill y JEFFREY, Zurschmeide, How to Fabricate Automotive Fiberglass & Carbon Fiber Parts, Cartech Inc, Estados Unidos, 2012.

14).- GUANO A, TIERRA J, (2012) Diseño y construcción de una máquina para el reciclaje de fibra de vidrio. Tesis de mecánica no publicada, ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

ANEXOS

REGLAMENTO FORMULA SAE 2014

ARTICULO 2: REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO VEHICULO FORMULA SAE

T2.1 CONFIGURACION DEL VEHICULO

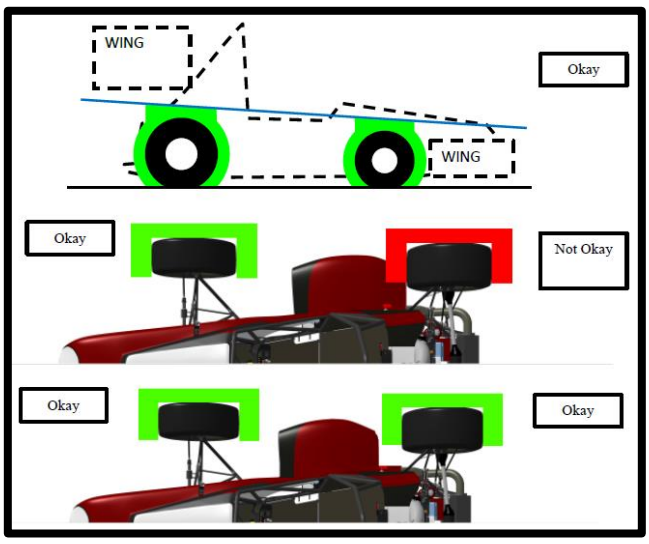
El vehículo debe ser de cabina abierta y ruedas descubiertas (un cuerpo estilo fórmula) con cuatro (4) ruedas que no están en una línea recta.

Definición de "Ruedas Descubiertas" (*open wheel*) - los vehículos de ruedas abiertas deben cumplir con todos los siguientes criterios:

1).-Los primeros 180 grados de las ruedas / neumáticos deben estar sin obstrucciones cuando se observa 68.6mm (2,7 pulgadas) por encima del plano formado por las copas de los neumáticos delanteros y traseros.

2).-Las ruedas / neumáticos deben estar sin obstrucciones cuando se ve desde el lado.

3).- Ninguna parte del vehículo puede entrar en la zona "*keep-out*" definida por un círculo 68.6mm (2,7 pulgadas) más grandes radialmente que el diámetro exterior del neumático con los neumáticos dirigidos en línea recta con 77kg (170 libras) del peso del conductor sentado en la posición de conducción normal. La pared lateral interna del neumático (lado del vehículo) no está incluido en esta evaluación.



Configuración del vehículo.

T2.2 CARROCERÍA

No debe existir aberturas a través de la carrocería en el compartimiento del conductor desde la parte delantera del vehículo a la barra antivuelco principal o pared anti fuego distinta de la necesaria para la apertura del habitáculo. Se permiten aberturas mínimas alrededor de los componentes de la suspensión delantera.

T3.24 CARROCERIA FRONTAL

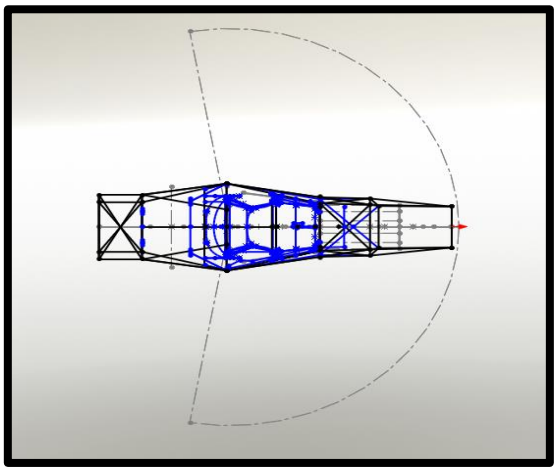
T3.24.1 Los bordes afilados hacia el frontal de la carrocería u otros componentes que sobresalen están prohibidos.

T3.24.2 Todos los bordes delanteros de la carrocería que podrían impactar a la gente, por ejemplo: la nariz, debe tener orientado hacia delante radios de al menos 38 mm (1,5 pulgadas). Este radio mínimo debe extenderse a por lo menos cuarenta y cinco grados (45 °) con respecto a la dirección de avance, a lo largo de la parte superior, los lados y la parte inferior de todos los bordes afectados.

T4.7 VISIBILIDAD CONDUCTOR

T4.7.1 REQUISITO GENERAL

El conductor debe tener una visibilidad adecuada hacia la parte delantera y los laterales del vehículo. Con el conductor sentado en posición normal de conducción, el piloto debe tener un campo mínimo de visión de doscientos grados (200 °) y un mínimo de cien grados (100 ° a cada lado del conductor). La visibilidad requerida se puede obtener por el conductor girando su cabeza y / o con el uso de espejos.



Configuración del vehículo.

ARTICLULO 9: DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS

T9.1 AERODINAMICA Y EFECTOS SUELO - GENERAL

Todos los dispositivos aerodinámicos deben satisfacer los siguientes requisitos:

T9.2 UBICACION

T9.2.1 A la vista, ninguna parte de cualquier dispositivo aerodinámico, alerón, fondo o divisor puede estar:

1).- Más hacia delante que 762 mm (30 pulgadas) hacia adelante de los frentes de los neumáticos delanteros.

2).- No estar más hacia atrás que 305 mm (12 pulgadas) hacia atrás de la parte trasera de los neumáticos traseros.

3).-No más ancha que la parte exterior de las ruedas delanteras o neumáticos traseros medidos a la altura de los ejes, lo que sea más amplio.

T9.3 RADIOS MÍNIMOS DE LOS BORDES DE DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS

T9.3.1 Todos los bordes de las alas incluyendo los alerones, placas finales, alerones Gurney, placas de mimbre y *undertrays* que puedan hacer contacto con un peatón debe tener un radio mínimo de 1,5 mm (0,060 pulgadas).

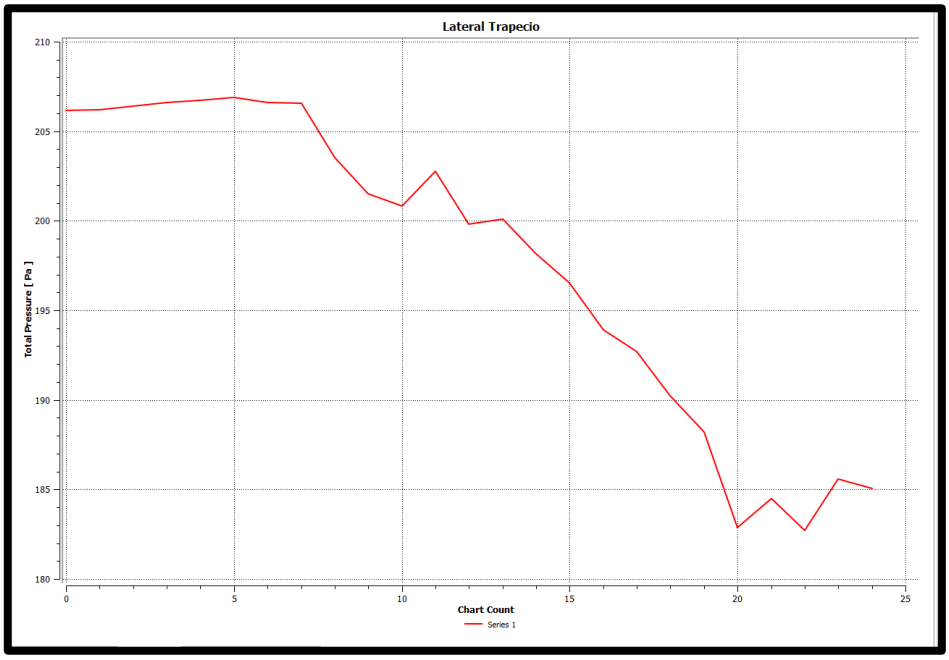
T9.4 DISPOSITIVOS DE EEFECTO SUELO

No debe existir ningún dispositivo de alimentación que pueda ser utilizado para remover o eliminar el aire de debajo excepto los ventiladores diseñados exclusivamente para la refrigeración. La alimentación de efectos suelo están prohibidos.

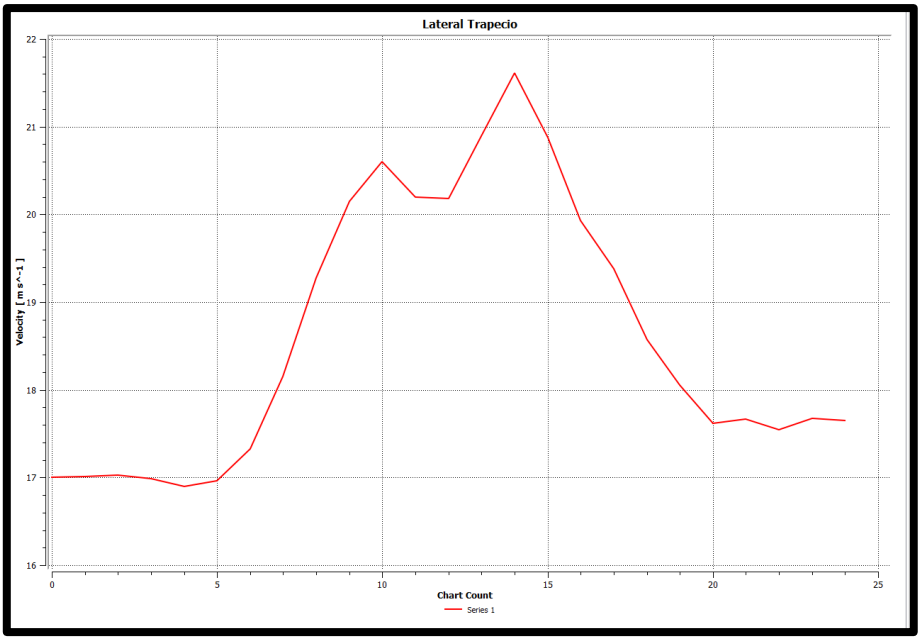
24 © 2013 SAE International. All Rights Reserved 2014 Formula SAE® Rules

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE PRESIONES Y VELOCIDADES DE LA CARROCERIA

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PONTONES LATERALES TIPO TRAPECIO

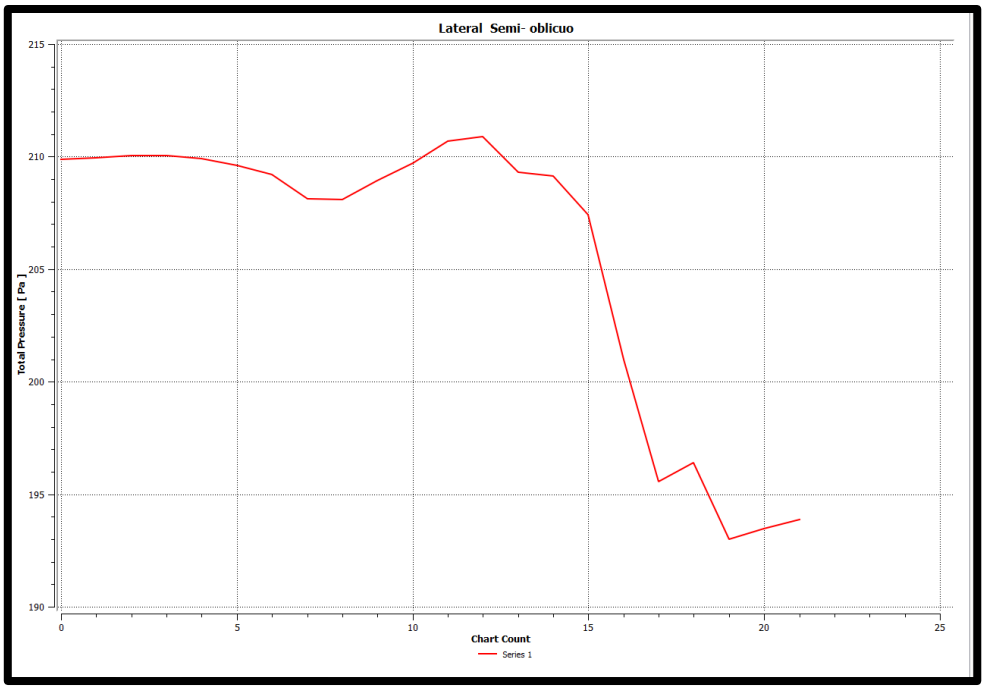


Grafica de presión de carrocería con laterales tipo trapecio.

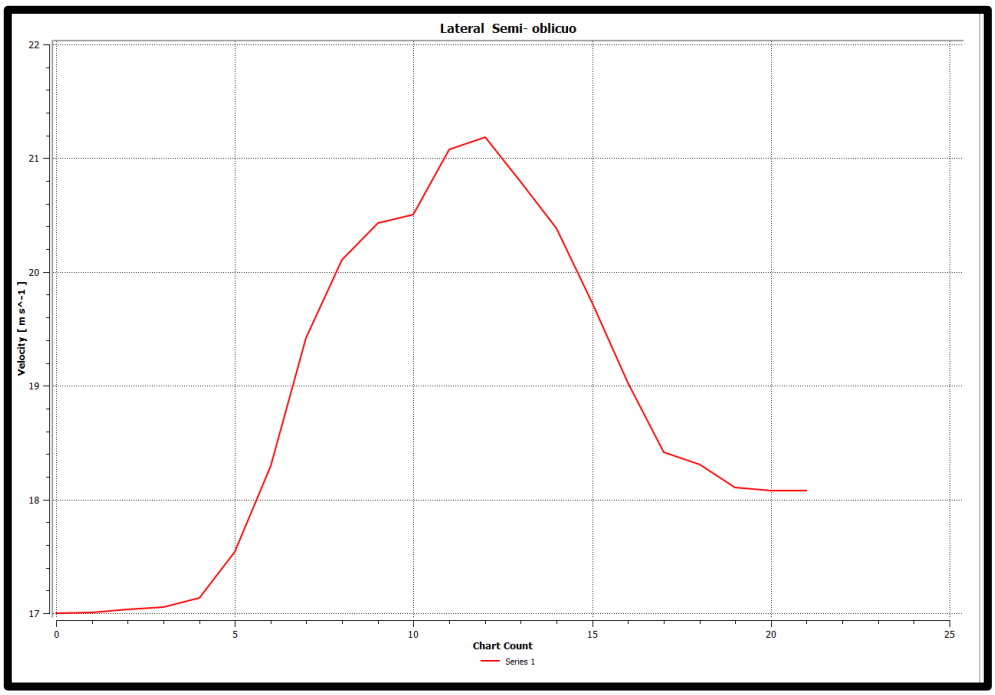


Grafica de velocidad de carrocería con laterales tipo trapecio

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PONTONES LATERALES SEMI OBLICUOS

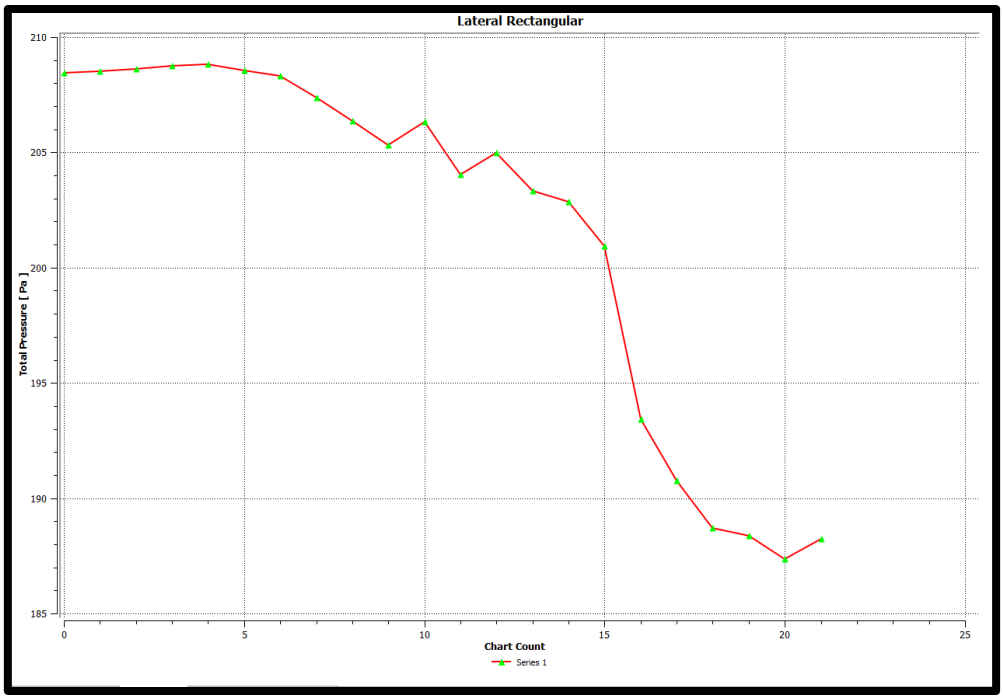


Grafica de presión de carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.

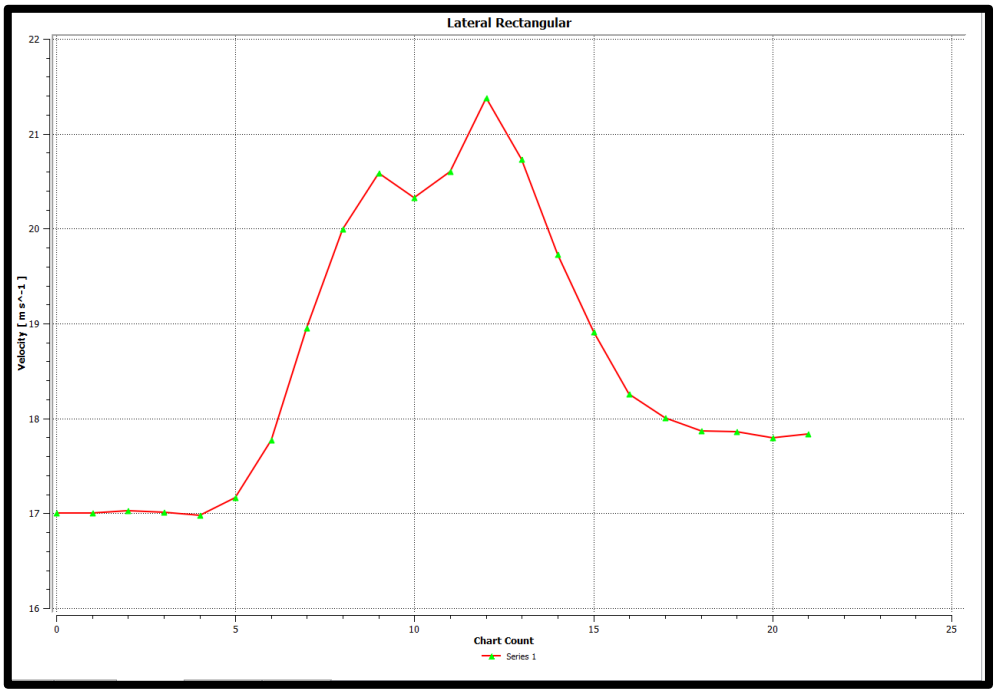


Grafica de velocidad de carrocería con laterales tipo semi-oblicuo.

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PONTONES LATERALES TIPO RECTANGULAR

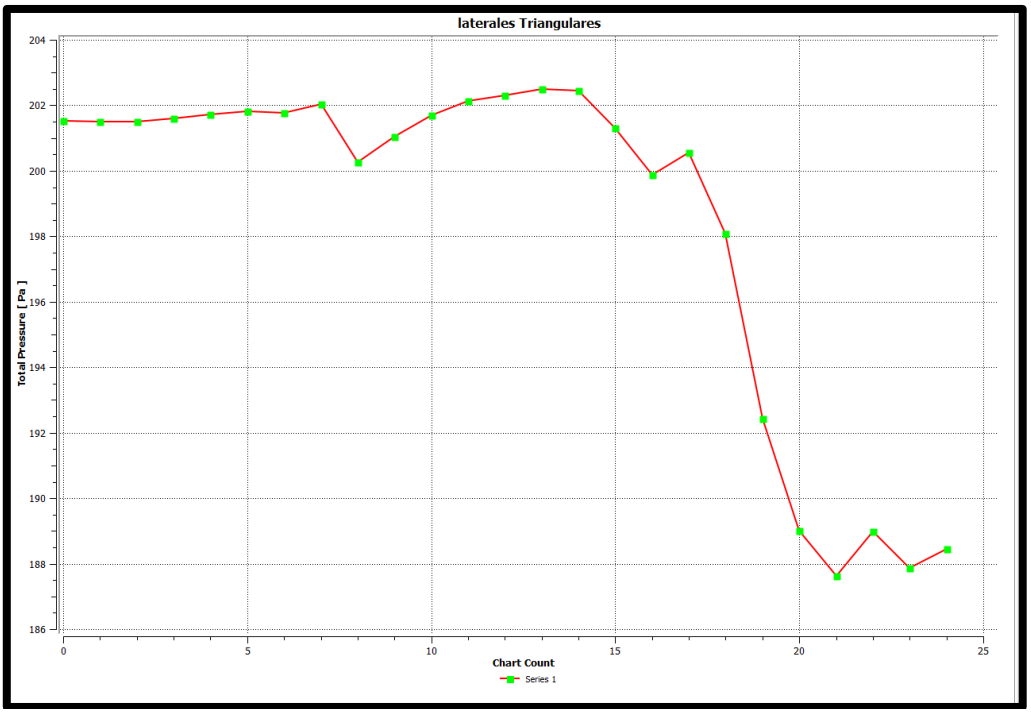


Grafica de presión de carrocería con laterales tipo rectangular.

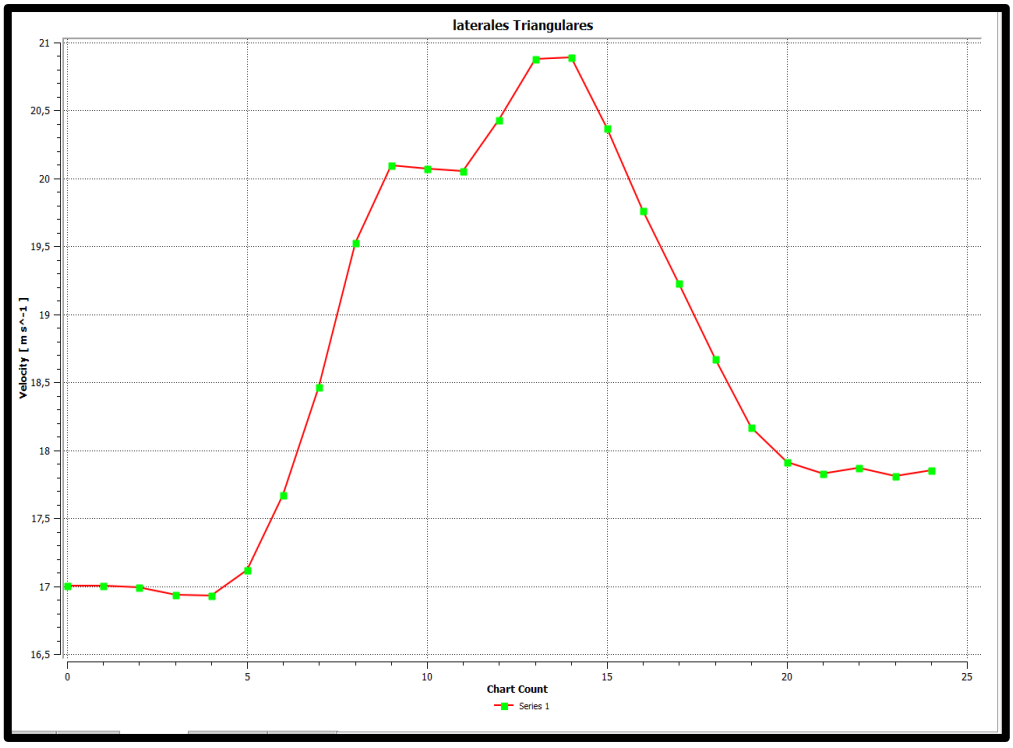


Grafica de velocidades de carrocería con laterales tipo rectangular.

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PONTONES LATERALES TIPO TRIANGULAR

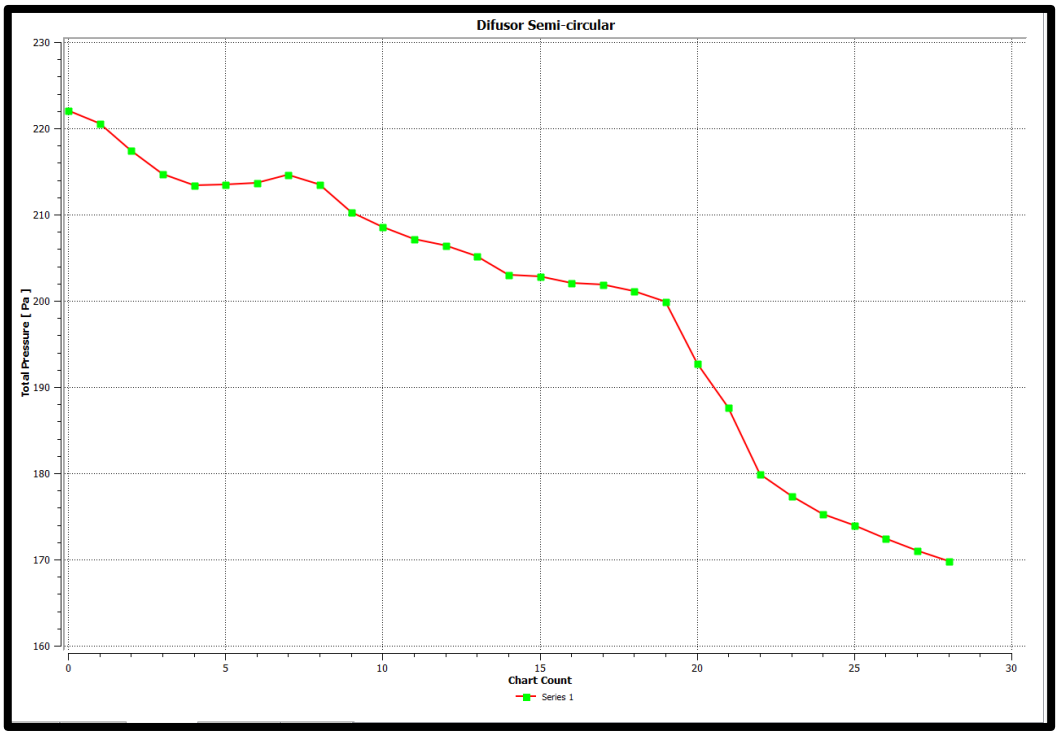


Grafica de presión de carrocería con laterales tipo triangular.

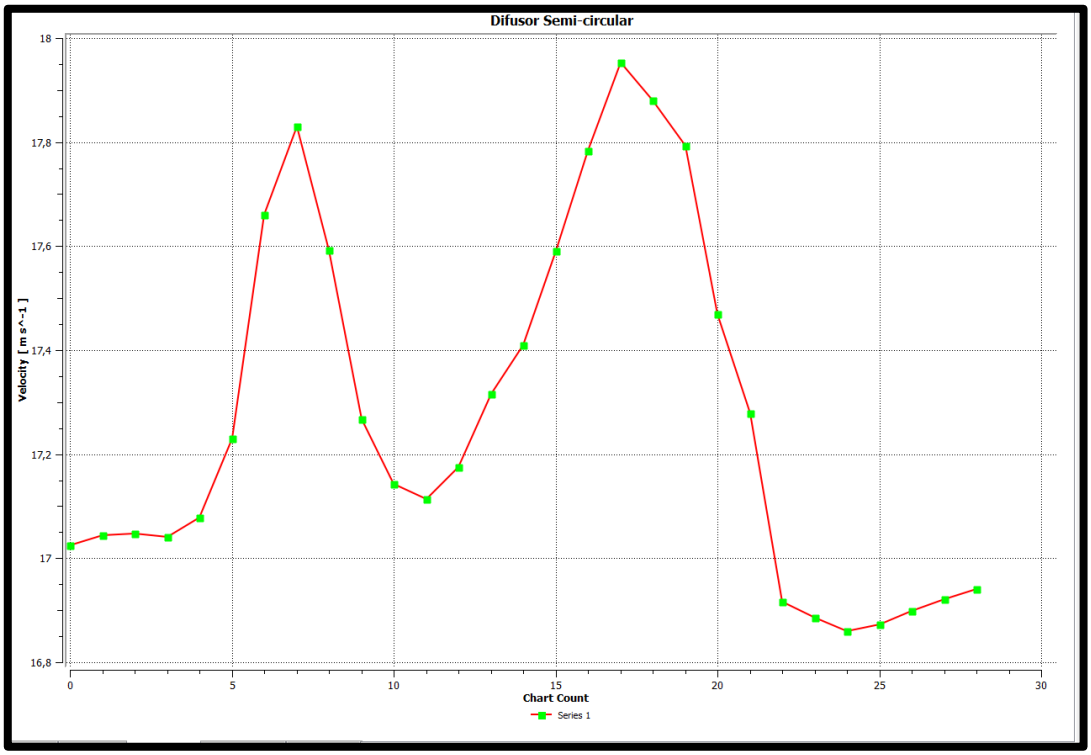


Grafica de velocidad de carrocería con laterales tipo triangular.

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DIFUSORES TIPO SEMI—CIRCULAR

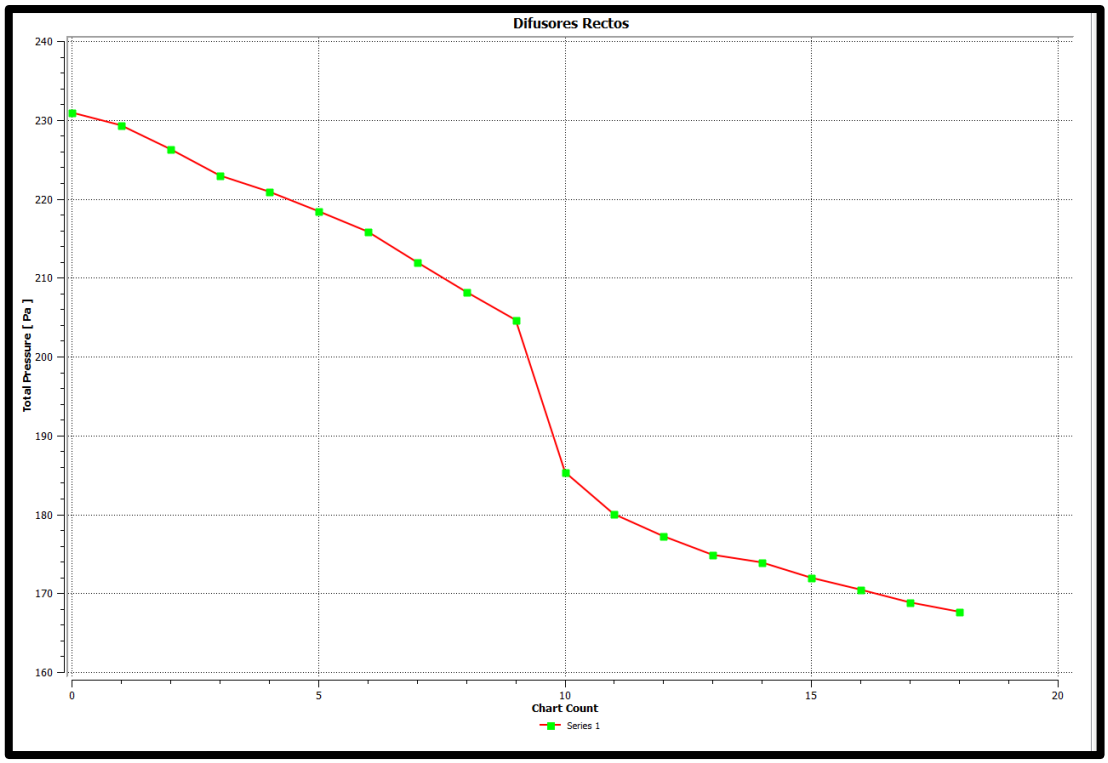


Grafica de presión de fondo plano con difusores tipo semi-circulo.

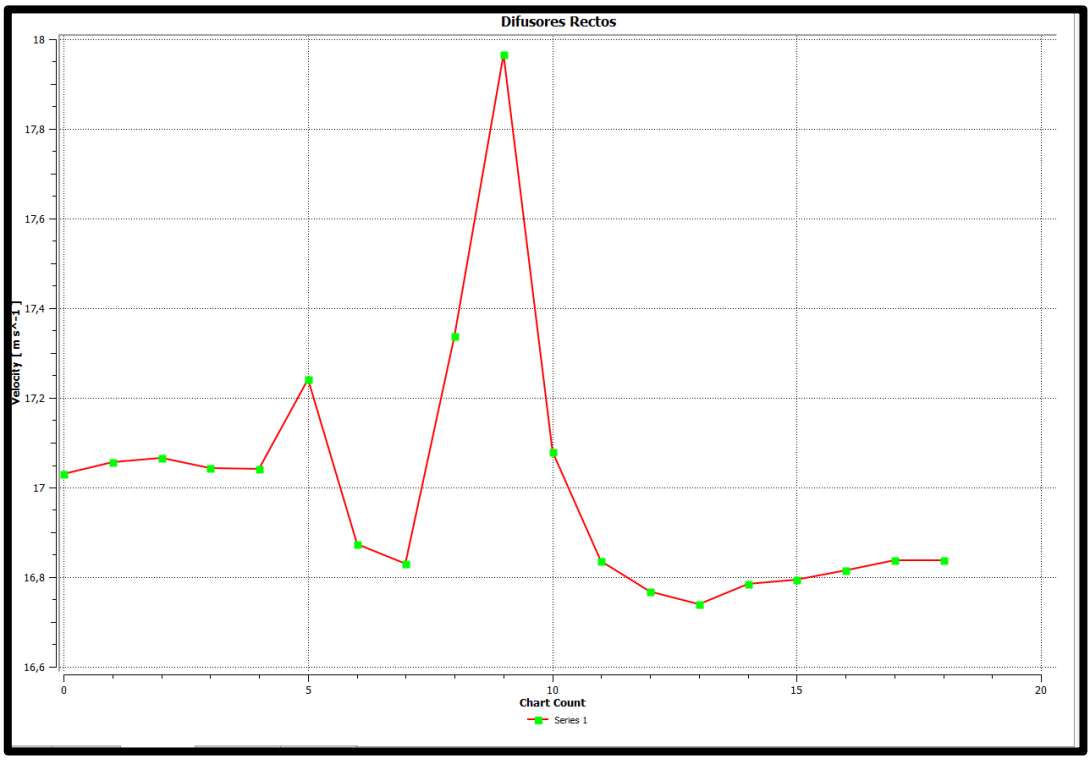


Grafica de velocidad de fondo plano con difusores tipo semi-circulo.

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO FONDO PLANO CON DIFUSORES RECTOS

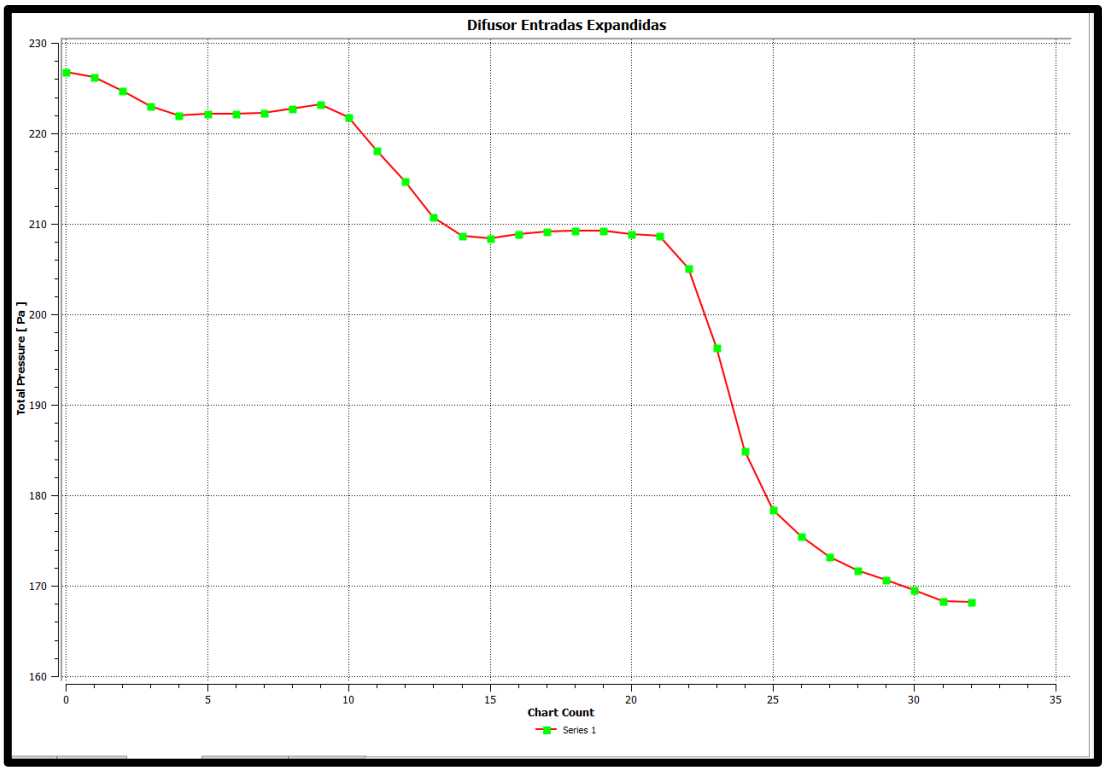


Grafica de presión de fondo plano con difusores tipo recto.

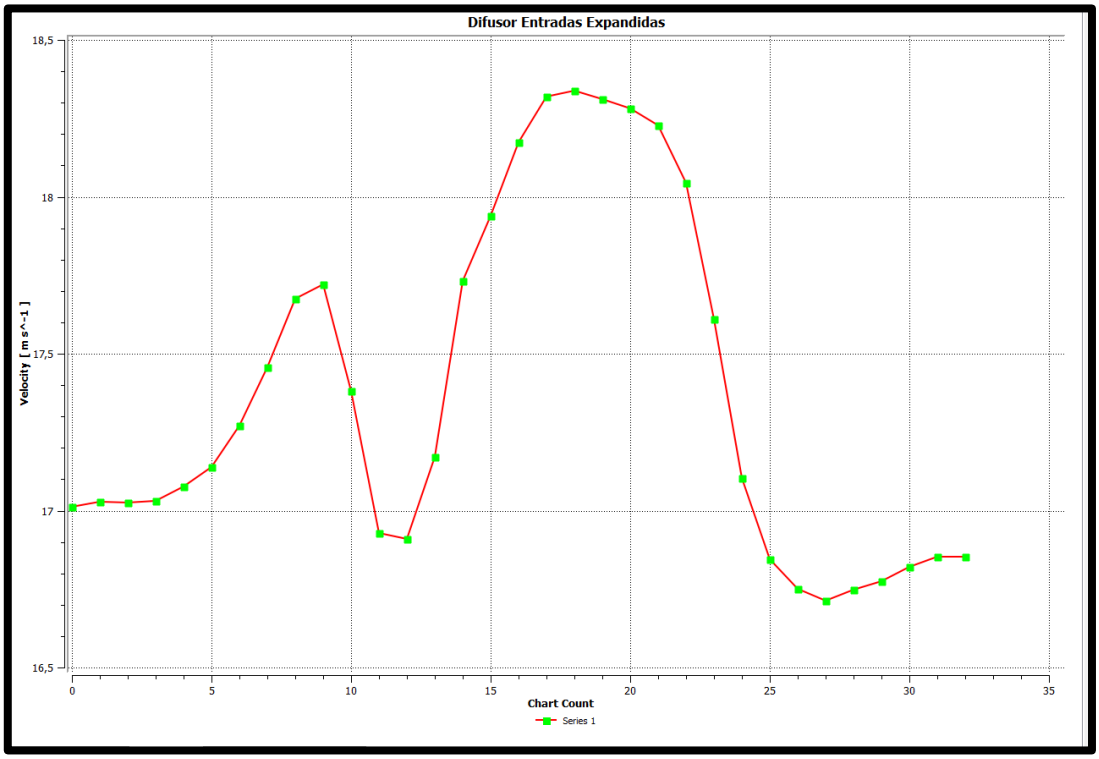


Grafica de velocidad de fondo plano con difusores tipo recto.

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO FONDO PLANO CON ENTRADAS EXPANDIDAS

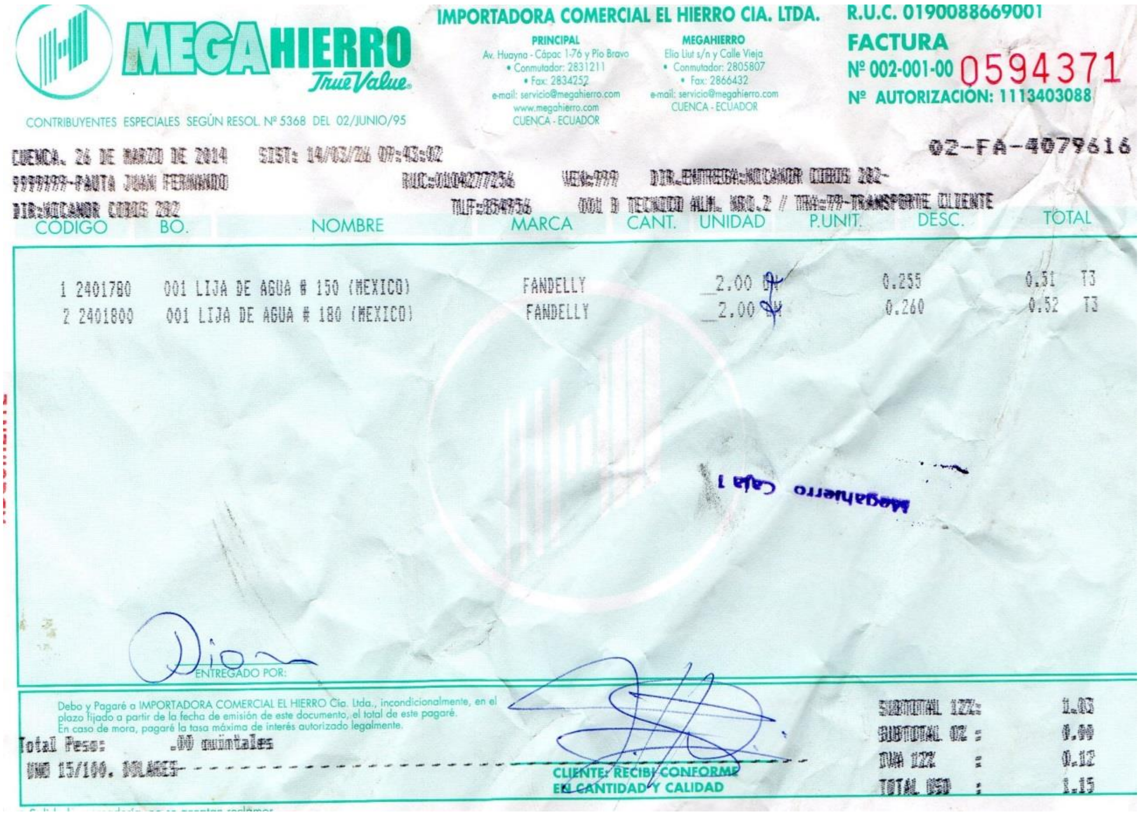


Grafica de presión de fondo plano con entradas expandidas.



Grafica de velocidad de fondo plano con entradas expandidas.

FACTURAS


MEGAHIERRO True Value

IMPORTADORA COMERCIAL EL HIERRO CIA. LTDA.

PRINCIPAL
Av. Huayna - Cápac 1-76 y Pío Bravo
• Conmutador: 2831211
• Fax: 2834252
e-mail: servicio@megahierro.com
www.megahierro.com
CUENCA - ECUADOR

MEGAHIERRO
Elia Liut s/n y Calle Vieja
• Conmutador: 2805807
• Fax: 2866432
e-mail: servicio@megahierro.com
CUENCA - ECUADOR

R.U.C. 0190088669001
FACTURA
Nº 002-001-00 0594371
Nº AUTORIZACIÓN: 1113403088

CONTRIBUYENTES ESPECIALES SEGÚN RESOL. Nº 5368 DEL 02/JUNIO/95

02-FA-4079616

CUENCA, 26 DE MARZO DE 2014 SIST: 14/03/26 09:43:02
9999999-PAUTA JUAN FERNANDO RUC:0104277256 VEN:999 DIR.ENTREGA:NICANOR COBOS 282-
DIR:NICANOR COBOS 282 TLF:2854956 001 B TECNICO ALM. NRO.2 // TRA:99-TRANSPORTE CLIENTE

CODIGO	BO.	NOMBRE	MARCA	CANT.	UNIDAD	P.UNIT.	DESC.	TOTAL
1 2401780	001	LIJA DE AGUA # 150 (MEXICO)	FANDELLY	2.00		0.255		0.51 T3
2 2401800	001	LIJA DE AGUA # 180 (MEXICO)	FANDELLY	2.00		0.260		0.52 T3

Megahierro Caja 1

ENTREGADO POR:

Debo y Pagaré a IMPORTADORA COMERCIAL EL HIERRO Cia. Ltda., incondicionalmente, en el plazo fijado a partir de la fecha de emisión de este documento, el total de este pagaré. En caso de mora, pagaré la tasa máxima de interés autorizado legalmente.

Total Peso: .00 quintales
UNO 15/100. DOLARES

CLIENTE: RECIBI CONFORME EN CANTIDAD Y CALIDAD

SUBTOTAL 12%	:	1.03
SUBTOTAL 0%	:	0.00
IVA 12%	:	0.12
TOTAL USD	:	1.15

0408863

CUENCA, 24 DE SEPTIEMBRE DE 2013 SIST: 13/09/24 10:00:01 02-FC-2703028
0009065-UNIV. POLITECNICA SALESIANA RUC:0190151530001 VEN:112 DIR.ENTREGA:CALLE VIEJA 12-30 Y ELIA LIUT-CUENCA
DIR:CALLE VIEJA 12-30 Y ELIA LIUT TLF:2862213 001 B TECNICO ALM. NRO.2 / TRA:99-TRANSPORTE CLIENTE

ADQUIRENTE

CÓDIGO		DESCRIPCIÓN	MARCA	CANTIDAD UNIDAD	P.UNIT.	DESC.	TOTAL
1	9900016	001 ENVASE PLASTICO POMO 1GLN	ADHEPLAST	1.00 UN	0.800		0.80 2 T3
2	8900457	001 DISOL. LACA 103SM-2 (SIN TANQUE)	CONDOR	4.00 LT	1.490		5.96 2 T3
3	2103665	001 ESPATULA AC.2" #28-081	STANLEY	2.00 UN	1.635		3.27 2 T3
4	9000017	001 BROCHA "X" C.BLAN.MULT.5"	WILSON	6.00 UN	5.672		34.03 2 T3
5	2301892	001 GUANTES/CAUCHO MULT/BIC #7-1/2 C-22	MASTER	2.00 PR	1.490		2.98 2 T3
6	2401780	001 LIJA DE AGUA # 150 (MEXICO)	FANDELLY	6.00 UN	0.263		1.58 2 T3
7	2401835	001 LIJA DE AGUA # 240 (MEXICO)	FANDELLY	6.00 UN	0.243		1.46 2 T3
8	9912101	001 FUNDA DESPACHO EXTRAGRANDE (TIPO BASU)	PLASTIDEAL	3.00 UN	0.000		0.00 2 T3

--VENCE EL (AA/MM/DD):13/10/24 VALOR: 56.09

Total Peso: .00 quintales
CINCUENTA Y SEIS 09/100. DOLARES-----------------

CLIENTE: RECIBÍ CONFORME EN CANTIDAD Y CALIDAD
0105629461-2

SUBTOTAL 12%:	50.08
SUBTOTAL 0% :	0.00
IVA 12% :	6.01
TOTAL USD :	56.09

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

Calle Vieja 12-30 • Telf. 2862-213
Fax: 2869-112 • Apartado 46 - Suc.-2
Cuenca - Ecuador

ORDEN DE COMPRA N° 6223

PARA SR. (S) ALMACEN DE PINTURAS EL MONO
DIRECCIÓN: PROFORMA N. 0000227
FECHA: Cuenca, 24 Septiembre de 2013

CANT.	Unidad	DESCRIPCIÓN	VALOR Unitario	VALOR Total
3		GALON MASILLA EVER VERDE	20,25	60,75
4		PLAST MASILLAR	0,5	2,00

DESTINO: Formula SAE
CONTADO Subtotal: 62,75
CRÉDITO IVA: 7,53
TOTAL Total: 70,28

6051 - 6550 • 05-Abril-2013

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Entregado Conforme

PINTURAS "EL MONO"
RUC 0702942806001
Telf.: 2800041 Cel. 085823171

Firma Autorizada | Proveedor (Firma y Sello del Vendedor) | Recibí Conforme

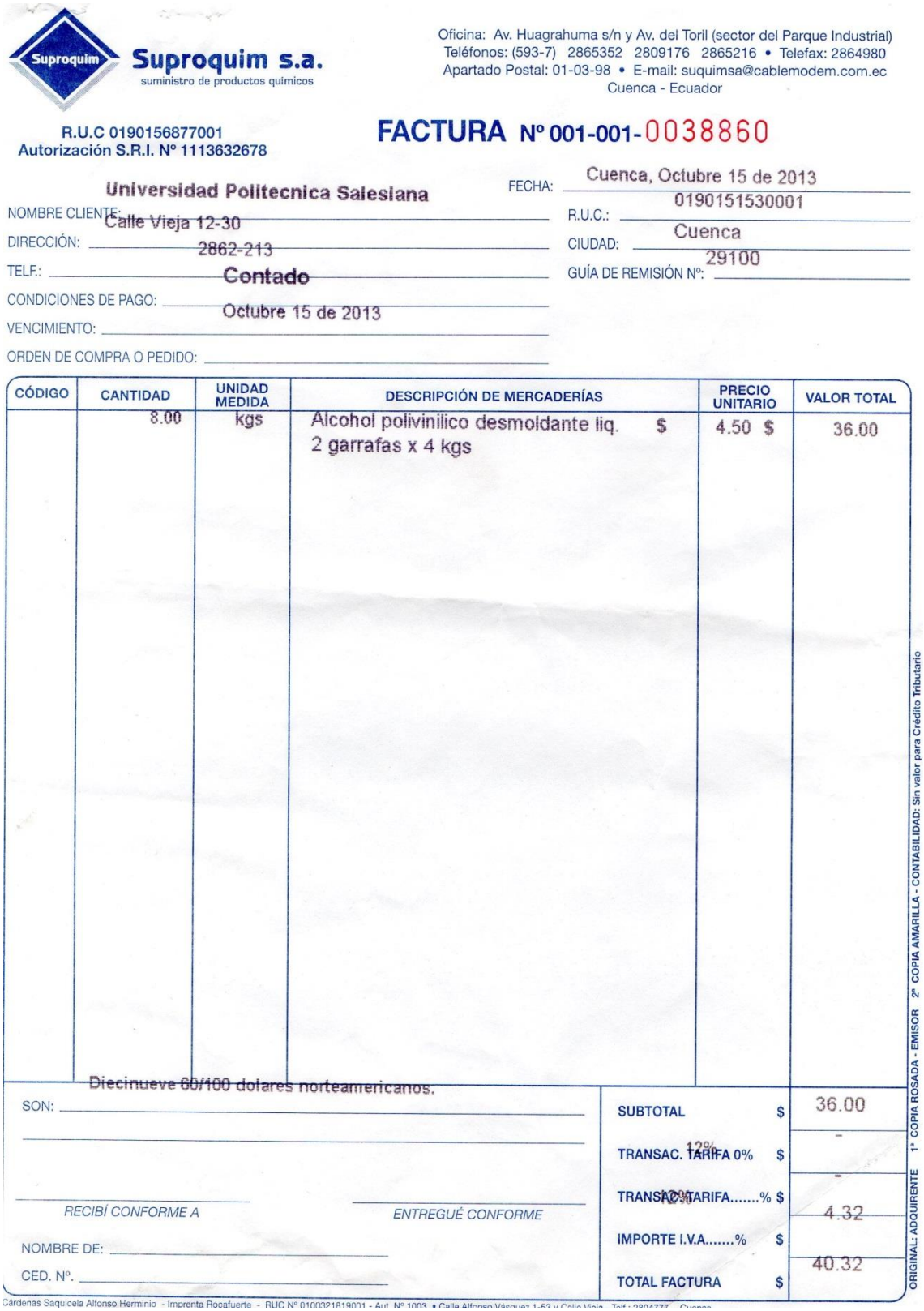
UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
0190151530001 2862213
CALLE VIEJA 12-30
Cuenca, 9 de Septiembre del 2013
008199
CONTADO MARIA JOSE ARPI

M3G	2.00	MDF 214X260X3mm MASISA	16.07	32.14 *

Por Milagros

Madercenter Cia. Ltda.
CANCELADO
Efectivo: .....
Banco: .....
Nro. Cheque: .....
Fecha: 10/09/2013

Subtotal:	32.14
Descuento:	0.00
I.V.A12	3.86
TOTAL:	36.00



Suproquim s.a.
suministro de productos químicos

Oficina: Av. Huagrahuma s/n y Av. del Toril (sector del Parque Industrial)
Teléfonos: (593-7) 2865352 2809176 2865216 • Telefax: 2864980
Apartado Postal: 01-03-98 • E-mail: suquimsa@cablemodem.com.ec
Cuenca - Ecuador

R.U.C 0190156877001
Autorización S.R.I. Nº 1113632678

FACTURA Nº 001-001-0038860

NOMBRE CLIENTE: Universidad Politecnica Salesiana
DIRECCIÓN: Calle Vieja 12-30
TELF.: 2862-213
CONDICIONES DE PAGO: Contado
VENCIMIENTO: Octubre 15 de 2013
ORDEN DE COMPRA O PEDIDO:

FECHA: Cuenca, Octubre 15 de 2013
R.U.C.: 0190151530001
CIUDAD: Cuenca
GUÍA DE REMISIÓN Nº: 29100

CÓDIGO	CANTIDAD	UNIDAD MEDIDA	DESCRIPCIÓN DE MERCADERÍAS	PRECIO UNITARIO	VALOR TOTAL
	8.00	kgs	Alcohol polivinilico desmoldante liq. $ 2 garrafas x 4 kgs	4.50 $	36.00

SON: Diecinueve 68/100 dolares norteamericanos.

RECIBÍ CONFORME A

ENTREGUÉ CONFORME

NOMBRE DE:

CED. Nº.

SUBTOTAL	$	36.00
TRANSAC. TARIFA 0%	$	-
TRANSAC. TARIFA 12% .....%	$	-
IMPORTE I.V.A. 12% .....%	$	4.32
TOTAL FACTURA	$	40.32

ORIGINAL: ADQUIRENTE 1ª COPIA ROSADA - EMISOR 2ª COPIA AMARILLA - CONTABILIDAD: Sin valor para Crédito Tributario

Cárdenas Saquicela Alfonso Herminio - Imprenta Rocafuerte - RUC Nº 0100321819001 - Aut. Nº 1003 • Calle Alfonso Vásquez 1-53 y Calle Vieja - Telf.: 2804777 - Cuenca

Suproquim s.a.
suministro de productos químicos

Oficina: Av. Huagrahuma s/n y Av. del Toril (sector del Parque Industrial)
Teléfonos: (593-7) 2865352 2809176 2865216 • Telefax: 2864980
Apartado Postal: 01-03-98 • E-mail: suquimsa@cablemodem.com.ec
Cuenca - Ecuador

R.U.C 0190156877001
Autorización S.R.I. Nº 1113258500

FACTURA Nº 001-001- 0038618

FECHA: Cuenca, Septiembre 12 de 2013

NOMBRE CLIENTE: Universidad Politecnica Salesiana
R.U.C.: 0190151530001
DIRECCIÓN: Calle Vieja 12-30
CIUDAD: Cuenca
TELF.: 2862-213
GUÍA DE REMISIÓN Nº: 28861
CONDICIONES DE PAGO: Contado
VENCIMIENTO: Septiembre 12 de 2013
ORDEN DE COMPRA O PEDIDO: 6205

CÓDIGO	CANTIDAD	UNIDAD MEDIDA	DESCRIPCIÓN DE MERCADERÍAS		PRECIO UNITARIO		VALOR TOTAL
	47.00	kgs	Fibra de vidrio 375 1 rollo x 47 kgs	$	3.25	$	152.75
	100.00	kgs	Resina poliester palatal 1 tambor x 100 kgs	$	3.60	$	360.00
	80.00	kgs	Estireno monomero 1 tambor x 80 kgs	$	3.50	$	280.00
	1.00	kgs	Secante cobalto 1 envase x 1 kgs	$	30.00	$	30.00
	100.00	kgs	Talco chino 4 sacos x 25 kgs	$	0.70	$	70.00
	4.00	kgs	Mek peroxido 1 garrafa x 4 kgs	$	6.10	$	24.40
	3.00	kgs	Tinte cristalan 20439 negro 3 envases	$	32.00	$	96.00
	55.00	kgs	Fibra de vidrio woven roving 800 1 rollo x 55 kgs	$	2.80	$	154.00

SON: Un mil trescientos siete 21/100 dolares norteamericanos.

SUBTOTAL	$	1,167.15
TRANSAC. TARIFA 0%	$	-
TRANSAC. TARIFA.....%	$	
IMPORTE I.V.A. 12%	$	140.06
TOTAL FACTURA	$	1,307.21

RECIBÍ CONFORME A

ENTREGUÉ CONFORME

NOMBRE DE:

CED. Nº.