



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DINÁMICO DEL CHASIS DE LA CAMIONETA
TOYOTA HILUX MODELO 2006 MEDIANTE SIMULACIÓN EN
UN SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz**

Autores:

**Pablo Andrés Calle Calderón
Jorge Alejandro Cárdenas Moncayo**

Director:

Ing. Hernán Arturo Viteri Cerda

Cuenca, Ecuador

2010

DEDICATORIA

A mi hijo que es la razón de mi superación, a mi esposa por su gran cariño y apoyo en todo momento, a mis padres y hermanas que me apoyan y confían en mi incondicionalmente.

Alex.

Este trabajo de investigación quiero dedicar a mi Madre Dolorosa por iluminarme el camino a seguir, a mis padres y hermanos quienes me han brindado todo el amor y apoyo necesario para alcanzar mis metas y sueños, a mi novia y mis amigos por haber compartido tantos momentos de mi vida, a mi primo que ya no está y que siempre tendrá un espacio en mi corazón.

Pablo.

AGRADECIMIENTO

A todo el personal docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz de manera especial al Ing. Hernán Viteri C por compartir todos sus conocimientos de forma clara. A Pablo por realizar este trabajo conjuntamente con toda la seriedad y paciencia para que el resultado final sea exitoso.

Alex.

Al finalizar este trabajo quiero agradecer primeramente a Dios por darme las fuerzas necesarias en todo momento, también de manera especial a mis padres y hermanos por sus consejos durante todos estos años, a mi compañero de tesis Alex Cárdenas por su dedicación y constancia, al Ing. Hernán Viteri por su contribución durante el desarrollo de esta tesis.

Pablo.

RESUMEN

Se realiza el análisis del chasis de la Camioneta Toyota Hilux modelo 2006, mediante simulación en un Software que aplica el Método de Elementos Finitos -MEF-; se imponen condiciones de contorno como aceleración, desaceleración y carga, permitiendo entender el comportamiento de la estructura en condiciones reales. Se presenta un estudio básico de los conceptos del MEF y su aplicación en análisis estructurales, a continuación se indica los diferentes pesos y dimensiones que posee el chasis, luego se realiza la modelación de forma secuencial y explicativa en el Software, para obtener resultados de esfuerzo, deformación y factor de seguridad bajo dos tipos de análisis estático y dinámico.

ABSTRACT

This study analyzes the chassis of 2006 Toyota Hilux Pickup through, simulation using Finite Elements Method -FEM- Software in which specific conditions such as acceleration, braking and load were set, allowing an understanding of the behavior of the structure under real conditions. The project shows a basic study of the concepts of the FEM and its application in structural analysis, as well as the different weights and dimensions of the chassis. The modeling is done in a sequential and explicative form in order to obtain results for force, deformation and security factor under two types of analysis; static and dynamic.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de gráficos.....	xi
Índice de cuadros.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES TEÓRICAS SOBRE LA MODELACIÓN	
1.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	3
1.2 ORÍGENES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS -MEF-.....	4
1.3 ASPECTOS GENERALES.....	4
1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	5
1.4.1 Ventajas.....	5
1.4.2 Desventajas.....	6
1.5 FASES DE LA MODELACIÓN.....	6
1.5.1 Preproceso.....	6
1.5.2 Proceso.....	7
1.5.3 Postproceso.....	7
1.6 DISCRETIZACIÓN.....	7
1.6.1 Discretización del Continuo Elástico.....	7
1.7 TIPOS DE ELEMENTOS.....	9
1.7.1 Elementos Concentrados.....	9
1.7.2 Elementos Unidimensionales.....	9
1.7.3 Elementos Bidimensionales.....	10
1.7.4 Elementos Tridimensionales.....	10
1.8 CARGAS DINÁMICAS.....	12
1.8.1 Aspectos Generales de las Cargas Dinámicas.....	12
1.8.2 Tipos de Cargas Dinámicas.....	12

1.9 DINÁMICA ESTRUCTURAL.....	12
1.10 MODELOS ESTRUCTURALES.....	13
1.11 MATRIZ DE RIGIDEZ.....	13
1.12 ECUACIONES DEL MOVIMIENTO.....	14
1.12.1 Principio de D'Alembert.....	14
1.12.2 Principio de los Trabajos Virtuales.....	15
1.12.3 Principio de Hamilton.....	15
1.13 GRADOS DE LIBERTAD.....	15
1.13.1 Modelos con un Grado de Libertad.....	16
1.13.2 Modelos simples con varios Grados de Libertad.....	18
1.13.3 Modelo General de Pórticos.....	21
1.14 CONCLUSIONES.....	22
CAPÍTULO II: ESFUERZOS EN EL CHASIS	
2.1 PESOS DEL VEHÍCULO.....	24
2.1.1 Pesos Generales.....	24
2.1.2 Distribución de Pesos en el Chasis.....	24
2.2 DIMENSIONES DEL VEHÍCULO.....	27
2.2.1 Dimensiones Generales.....	27
2.2.2 Dimensiones Principales del Vehículo.....	27
2.3 CENTRO DE GRAVEDAD.....	29
2.3.1 Cálculo del Centro de Gravedad.....	29
2.4 REACCIONES EN LOS APOYOS -EJE DELANTERO Y POSTERIOR-.....	33
2.5 ESFUERZO CORTANTE.....	34
2.6 MOMENTO FLECTOR.....	35
2.7 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD.....	42
2.8 CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO III: MANEJO DEL SOFTWARE	
3.1 PREPROCESO.....	46
3.1.1 Construcción de la Geometría.....	46
3.1.2 Generación de la Malla.....	54

3.1.3 Definición de las Condiciones de Contorno.....	55
3.2 TIPOS DE ANÁLISIS.....	60
3.2.1 Análisis Estático.....	60
3.2.2 Análisis Dinámico.....	61
3.2.2.1 Frenada en Recta.....	61
3.2.2.2 Aceleración en Recta.....	63
3.3 PROCESO.....	64
3.4 POST PROCESO.....	64
3.4.1 Análisis Estático.....	64
3.4.2 Análisis Dinámico.....	66
3.5 CONCLUSIONES.....	67

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL CHASIS

4.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA.....	69
4.1.1 Tipo de Análisis.....	69
4.1.2 Definición del Material.....	69
4.1.3 Importación de la Geometría.....	70
4.1.4 Mallado de la Estructura.....	70
4.1.5 Condiciones de la Gravedad.....	71
4.1.6 Ubicación de Empotramientos.....	72
4.1.7 Ubicación de Cargas.....	72
4.1.8 Selección de la Teoría.....	73
4.1.8.1 Teoría de Von Misses.....	73
4.2 ANÁLISIS ESTÁTICO.....	73
4.2.1 Análisis de la Estructura sin Carga.....	73
4.2.1.1 Esfuerzo Máximo.....	73
4.2.1.2 Deformación Máxima.....	74
4.2.1.3 Factor de Seguridad.....	74
4.2.2 Análisis de la Estructura con Media Carga.....	75
4.2.2.1 Esfuerzo Máximo.....	75
4.2.2.2 Deformación Máxima.....	75
4.2.2.3 Factor de Seguridad.....	76
4.2.3 Análisis de la Estructura con Carga Completa.....	76

4.2.3.1 Esfuerzo Máximo.....	76
4.2.3.2 Deformación Máxima.....	77
4.2.3.3 Factor de Seguridad.....	77
4.2.4 Análisis de la Estructura con Sobrecarga.....	78
4.2.4.1 Esfuerzo Máximo.....	78
4.2.4.2 Deformación Máxima.....	78
4.2.4.3 Factor de Seguridad.....	79
4.3 ANÁLISIS DINÁMICO ACELERACIÓN EN RECTA.....	79
4.3.1 Aceleración en Recta sin Carga.....	80
4.3.1.1 Esfuerzo Máximo.....	80
4.3.1.2 Deformación Máxima.....	80
4.3.1.3 Factor de Seguridad.....	81
4.3.2 Aceleración en Recta con Media Carga.....	81
4.3.2.1 Esfuerzo Máximo.....	81
4.3.2.2 Deformación Máxima.....	82
4.3.2.3 Factor de Seguridad.....	82
4.3.3 Aceleración en Recta con Carga Completa.....	83
4.3.3.1 Esfuerzo Máximo.....	83
4.3.3.2 Deformación Máxima.....	83
4.3.3.3 Factor de Seguridad.....	84
4.3.4 Aceleración en Recta con Sobrecarga.....	84
4.3.4.1 Esfuerzo Máximo.....	84
4.3.4.2 Deformación Máxima.....	85
4.3.4.3 Factor de Seguridad.....	85
4.4 ANÁLISIS DINÁMICO FRENADA EN RECTA.....	86
4.4.1 Frenada en Recta sin Carga.....	86
4.4.1.1 Esfuerzo Máximo.....	86
4.4.1.2 Deformación Máxima.....	87
4.4.1.3 Factor de Seguridad.....	87
4.4.2 Frenada en Recta con Media Carga.....	88
4.4.2.1 Esfuerzo Máximo.....	88
4.4.2.2 Deformación Máxima.....	88
4.4.2.3 Factor de Seguridad.....	89

4.4.3 Frenada en Recta con Carga Completa.....	89
4.4.3.1 Esfuerzo Máximo.....	89
4.4.3.2 Deformación Máxima.....	90
4.4.3.3 Factor de Seguridad.....	90
4.4.4 Frenada en Recta con Sobrecarga.....	91
4.4.4.1 Esfuerzo Máximo.....	91
4.4.4.2 Deformación Máxima.....	91
4.4.4.3 Factor de Seguridad.....	92
4.5 TABLAS DE RESULTADOS.....	92
4.6 CONCLUSIONES.....	94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1. Continuo Discretizado.....	8
Gráfico 1.2. Elementos Lineales, Cuadráticos y Cúbicos.....	9
Gráfico 1.3. Elementos Área.....	10
Gráfico 1.4. Tipos de Elementos Sólidos.....	11
Gráfico 1.5. Clasificación de los Elementos de Acuerdo a su Comportamiento	11
Gráfico 1.6. Modelos con un Grado de Libertad.....	16
Gráfico 1.7. Vibraciones Libres Amortiguadas.....	17
Gráfico 1.8. Vibraciones Libres No Amortiguadas.....	18
Gráfico 1.9. Rotaciones del Chasis.....	18
Gráfico 1.10. Modelos Simples con Varios Grados de Libertad.....	19
Gráfico 1.11. Modelo General de Pórticos.....	21
Gráfico 2.1. Dimensiones Principales.....	28
Gráfico 2.2. Distribución de las Masas.....	31
Gráfico 2.3. Diagrama de Cuerpo Libre.....	33
Gráfico 2.4. Diagrama de Esfuerzo Cortante con Vehículo sin Carga.....	34
Gráfico 2.5. Diagrama de Cuerpo Libre.....	35
Gráfico 2.6. Diagrama de Momento Flector de Vehículo sin Carga.....	36
Gráfico 2.7. Diagrama de Esfuerzo Cortante Segundo Caso.....	37
Gráfico 2.8. Diagrama Momento Flector Segundo Caso.....	38
Gráfico 2.9. Diagrama de Esfuerzo Cortante Tercer Caso.....	39
Gráfico 2.10. Diagrama de Momento Flector Tercer Caso.....	40
Gráfico 2.11. Diagrama de Esfuerzos Cortantes Cuarto Caso.....	41
Gráfico 2.12. Diagrama Momento Flector Cuarto Caso.....	42
Gráfico 2.13 Geometría del Perfil.....	43
Gráfico 3.1. Tipo de Análisis.....	46
Gráfico 3.2. Ventana de Guardar el Proyecto.....	46
Gráfico 3.3. Diseño de la Estructura.....	47
Gráfico 3.4. Ventana para Crear Puntos.....	48
Gráfico 3.5. Ingreso de Coordenadas de los Puntos.....	49
Gráfico 3.6. Visualización de los Puntos Construidos.....	49
Gráfico 3.7. Ventana para Unir los Puntos.....	50

Gráfico 3.8. Vista de los Puntos Unidos con Líneas.....	50
Gráfico 3.9. Visualización del Tipo de Elemento Utilizado.....	51
Gráfico 3.10. Ventana para Asignar el Tipo de Elemento.....	51
Gráfico 3.11. Ventana para Asignar las Características del Material.....	52
Gráfico 3.12. Ventana para Asignar las Características del Material.....	52
Gráfico 3.13. Ingreso de Propiedades del Material.....	53
Gráfico 3.14. Generación de la Sección Transversal.....	53
Gráfico 3.15. Generación de la Malla.....	54
Gráfico 3.16. Selección de Líneas a Mallar.....	54
Gráfico 3.17. Estructura Mallada.....	55
Gráfico 3.18. Definición de Condiciones de Carga y Contorno.....	55
Gráfico 3.19. Definición de Grados de Libertad.....	56
Gráfico 3.20. Definición Grados de Libertad para los Puntos Restantes.....	56
Gráfico 3.21. Ventana para Asignar el Tipo de Elemento.....	57
Gráfico 3.22. Ventana para Asignar el Peso.....	57
Gráfico 3.23. Ingreso de las Condiciones de Masa.....	58
Gráfico 3.24. Ventana de Herramientas para el Mallado.....	58
Gráfico 3.25. Selección de los Puntos de Anclaje.....	59
Gráfico 3.26. Definición de los Grados de Libertad.....	59
Gráfico 3.27. Puntos de Anclaje y Grados de Libertad de las Masas.....	60
Gráfico 3.28. Definición de Grados de Libertad.....	60
Gráfico 3.29. Aplicación de la Aceleración.....	61
Gráfico 3.30. Restricción de los Grados de Libertad.....	62
Gráfico 3.31. Aplicación de la Desaceleración.....	63
Gráfico 3.32. Solución Estática.....	64
Gráfico 3.33. Elección de la Solución.....	65
Gráfico 3.34. Ventana de Resultados.....	65
Gráfico 3.35. Ventana de Resultados.....	66
Gráfico 3.36. Ventana de Resultados.....	66
Gráfico 3.37. Ventana de Resultados.....	67
Gráfico 4.1. Tipo de Análisis.....	69
Gráfico 4.2. Propiedades del Material.....	69
Gráfico 4.3. Esquema del Chasis.....	70

Gráfico 4.4. Características de la Malla.....	70
Gráfico 4.5. Estructura Mallada.....	71
Gráfico 4.6. Introducción de la Gravedad.....	71
Gráfico 4.7. Ubicación de los Empotramientos.....	72
Gráfico 4.8. Ubicación de las Cargas.....	72
Gráfico 4.9. Esfuerzo Máximo sin Carga.....	73
Gráfico 4.10. Deformación Máxima sin Carga.....	74
Gráfico 4.11. Factor de Seguridad sin Carga.....	74
Gráfico 4.12. Esfuerzo Máximo Media Carga.....	75
Gráfico 4.13. Deformación Máxima Media Carga.....	75
Gráfico 4.14. Factor de Seguridad Media Carga.....	76
Gráfico 4.15. Esfuerzo Máximo Carga Completa.....	76
Gráfico 4.16. Deformación Máxima Carga Completa.....	77
Gráfico 4.17. Factor de Seguridad Carga Completa.....	77
Gráfico 4.18. Esfuerzo Máximo Sobrecarga.....	78
Gráfico 4.19. Deformación Máxima Sobrecarga.....	78
Gráfico 4.20. Factor de Seguridad Sobrecarga.....	79
Gráfico 4.21. Magnitud de la Aceleración.....	79
Gráfico 4.22. Esfuerzo Máximo Aceleración sin Carga.....	80
Gráfico 4.23. Deformación Máxima Aceleración sin Carga.....	80
Gráfico 4.24. Factor de Seguridad Aceleración sin Carga.....	81
Gráfico 4.25. Esfuerzo Máximo Aceleración Media Carga.....	81
Gráfico 4.26. Deformación Máxima Aceleración Media Carga.....	82
Gráfico 4.27. Factor de Seguridad Aceleración Media Carga.....	82
Gráfico 4.28. Esfuerzo Máximo Aceleración Carga Completa.....	83
Gráfico 4.29. Deformación Máxima Aceleración Carga Completa.....	83
Gráfico 4.30. Factor de Seguridad Aceleración Carga Completa.....	84
Gráfico 4.31. Esfuerzo Máximo Aceleración Sobrecarga.....	84
Gráfico 4.32. Deformación Máxima Aceleración Sobrecarga.....	85
Gráfico 4.33. Factor de Seguridad Aceleración Sobrecarga.....	85
Gráfico 4.34. Magnitud de la Desaceleración.....	86
Gráfico 4.35. Esfuerzo Máximo Frenada sin Carga.....	86
Gráfico 4.36. Deformación Máxima Frenada sin Carga.....	87

Gráfico 4.37. Factor de Seguridad Frenada sin Carga.....	87
Gráfico 4.38. Esfuerzo Máximo Frenada Media Carga.....	88
Gráfico 4.39. Deformación Máxima Frenada Media Carga.....	88
Gráfico 4.40. Factor de Seguridad Frenada Media Carga.....	89
Gráfico 4.41. Esfuerzo Máximo Frenada Carga Completa.....	89
Gráfico 4.42. Deformación Máxima Frenada Carga Completa.....	90
Gráfico 4.43. Factor de Seguridad Frenada Carga Completa.....	90
Gráfico 4.44. Esfuerzo Máximo Frenada Sobrecarga.....	91
Gráfico 4.45. Deformación Máxima Frenada Sobrecarga.....	91
Gráfico 4.46. Factor de Seguridad Frenada Sobrecarga.....	92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Componentes del Grupo 1 -Compartimiento Delantero-.....	25
Cuadro 2.2. Componentes del Grupo 2 -Habitáculo-.....	26
Cuadro 2.3. Componentes del Grupo 3 -Compartimiento de Carga-.....	26
Cuadro 2.4. Componentes del Grupo 4 -Motor y Caja de Cambios-.....	26
Cuadro 2.5. Componentes del Grupo 5 -Tanque de Combustible-.....	27
Cuadro 2.6. Dimensiones Principales del Vehículo.....	28
Cuadro 2.7. Coordenadas de los Componentes del Vehículo.....	29
Cuadro 2.8. Coordenadas del Centro de Gravedad total del Vehículo.....	32
Cuadro 2.9. Peso Total de cada Grupo.....	35
Cuadro 2.10. Centro de Gravedad con el Vehículo a Media Carga.....	37
Cuadro 2.11. Tabla Distancia-Momento Vehículo a Media Carga.....	38
Cuadro 2.12. Centro de Gravedad con el Vehículo a Carga Máxima.....	39
Cuadro 2.13. Tabla Distancia-Momento Vehículo a Carga Máxima.....	40
Cuadro 2.14. Centro de Gravedad con el Vehículo Sobrecargado.....	41
Cuadro 2.15. Tabla Distancia-Momento Vehículo con Sobrecarga.....	42
Cuadro 2.16. Resultados del Factor de Seguridad.....	44
Cuadro 4.1. Resultados del Análisis Estático.....	92
Cuadro 4.2. Resultados del Análisis Dinámico Frenada.....	93
Cuadro 4.3. Resultados del Análisis Dinámico Aceleración.....	93

Calle Calderón Pablo Andrés, Cárdenas Moncayo Jorge Alejandro

Trabajo de graduación

Ing. Hernán Arturo Viteri Cerda

Julio 2010

ANÁLISIS DINÁMICO DEL CHASIS DE LA CAMIONETA TOYOTA HILUX MODELO 2006 MEDIANTE SIMULACIÓN EN UN SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

INTRODUCCIÓN

Analizar al chasis es importante debido a que permite determinar su comportamiento al someterse a diferentes condiciones, las mismas que repercuten directamente en su vida útil, de esta manera se puede concluir si la estructura posee características de resistencia idóneas para su utilización en un vehículo.

Es importante conocer criterios de diseño para evaluar los resultados obtenidos luego de que el programa realiza la simulación, con el fin de conocer los alcances que posee para realizar este tipo de modelaciones.

En el capítulo uno se presenta las ventajas y desventajas que posee el método de elementos finitos, así como las fases de la modelación que ayudan a realizar de manera correcta el modelo estudiado, también los criterios que se deben considerar para la selección correcta del elemento utilizado en la discretización del continuo, además se describe los fundamentos teóricos básicos para entender los modelos matemáticos que utiliza este método numérico para la solución de problemas estructurales.

En el capítulo dos se indican los pesos y dimensiones que caracterizan al chasis; los mismos que fueron considerados en su mayoría con la finalidad de que su representación sea lo más cercana a la real. Los pesos se consideraron en cinco grupos con el objetivo de facilitar los cálculos para la ubicación del centro de gravedad, esfuerzo cortante, momento flector máximo y factor de seguridad en cada

una de las condiciones de carga transportada, los resultados ayudan a definir el punto que soporta el mayor esfuerzo.

En los capítulos tres y cuatro se define el procedimiento que se debe seguir para realizar la modelación del chasis, se debe cumplir a cabalidad las tres fases para la simulación, las cuales son: preproceso, proceso y postproceso.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES TEÓRICAS SOBRE LA MODELACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Es un método numérico utilizado en la actualidad para la solución de problemas de ingeniería, que involucran un elevado grado de complejidad de matemática aplicada, así como también de la mecánica del medio continuo; posee un alto porcentaje de precisión en su solución con respecto a ensayos realizados en laboratorio, disminuyendo el tiempo de cálculo. Dentro de la ingeniería el uso del método de elementos finitos es aplicado para la solución de problemas en los que destacan: el análisis de estructuras, problemas de transferencia de calor, etc.

Los inconvenientes más comunes en la solución de los problemas de ingeniería son: geometrías complejas, cargas no distribuidas, determinación de propiedades de materiales, sumado a que los modelados se realizan mediante ecuaciones diferenciales parciales, las mismas que por lo general no tienen una solución analítica.

Se entiende por solución analítica a aquellas expresiones matemáticas que determinan los valores de una incógnita que es similar en toda la estructura estudiada. Estas soluciones analíticas, generalmente se resuelven mediante ecuaciones diferenciales ya sean parciales u ordinarias. Sin embargo el uso del método de elementos finitos, permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de la resolución de ecuaciones diferenciales.

Tomando en cuenta que el problema tiene que ser “discretizado”, este método numérico, proporciona valores aproximados de las incógnitas en un número finito de

localizaciones dentro del cuerpo, las cuales dependen directamente, del número de elementos usados para la discretización de la estructura.

1.2 ORÍGENES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A comienzos del siglo XX investigadores como Castigliano, Rayleigh y Ritz desarrollaron una metodología para predecir el desplazamiento de una estructura basándose en ecuaciones de funciones de forma con sistemas sencillos de carga, que se resuelven por un método de minimización de energía.

Las primeras herramientas para la simulación por el Método de Elementos Finitos - MEF en castellano o FEM en inglés-, aparecieron en el año 1950, debido a la complejidad para la solución de problemas por un método analítico. Este trabajo fue desarrollado por el matemático Richard Courant que permitió sentar las bases de la resolución de sistemas estructurales mediante la implementación de la notación matricial y su resolución algebraica.

Con el desarrollo que han experimentado las computadoras en el aumento de su capacidad de cálculo, gestión de memoria, capacidad de almacenamiento en disco, unido al uso y desarrollo del Método de Elementos Finitos aplicado al cálculo estructural lineal, no lineal, dinámico, térmico, ha hecho que esta metodología se vaya extendiendo en todos los campos de investigación, pasando por las multinacionales y llegando a las pequeñas y medianas empresas.

1.3 ASPECTOS GENERALES

El Método de Elementos Finitos fundamenta su solución en ecuaciones diferenciales de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes llamados “elementos”, unidos por una serie de puntos denominados “nodos”, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes, estos nodos son influenciados por las condiciones de frontera -cargas, aceleraciones, desaceleraciones- que afectan al cuerpo estudiado.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento de cada elemento se encuentra directamente relacionado con los nodos mediante funciones de interpolación o funciones de forma.
- La exactitud de la solución del problema depende del número de elementos empleados en la discretización del continuo, así como del tipo de funciones de interpolación utilizadas.

1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En comparación con los métodos tradicionales de desarrollo de diseños se puede resaltar algunas ventajas y desventajas, entre las más destacadas tenemos.

1.4.1 Ventajas

- Entender mejor el comportamiento del continuo a nivel estructural, térmico, fatiga etc.
- Permite realizar optimizaciones del continuo en un período de tiempo corto y a un costo económico razonable.
- Reducir el número de prototipos y el número de ensayos experimentales requeridos, debido a que se diseñan prototipos optimizados.
- Disminuir los riesgos de fallo en nuevos diseños y en los existentes eliminarlos.

1.4.2 Desventajas

- La necesidad de crear metodologías de simulación MEF aplicables a cada caso o problema de diseño.
- Es necesario alimentar los modelos con datos precisos -material, cargas, condiciones de contorno, etc.- con el fin de obtener resultados precisos.
- Definir el grado de precisión de la simulación, teniendo en cuenta el tiempo necesario para su ejecución, los datos de partida que se dispone y los resultados a obtener.
- Requiere estar actualizados en lo que se refiere a las nuevas versiones de software y las nuevas metodologías y desarrollos.

1.5 FASES DE LA MODELACIÓN

Todas las herramientas informáticas actuales que emplean el método de Elementos Finitos poseen tres fases:

1.5.1 Preproceso Consiste en la generación del modelo real -continuo, pieza física o conjunto- en elementos y nodos -mallado- en los cuales se va a calcular los desplazamientos, deformaciones y tensiones. Todo esto se lo realiza en los siguientes pasos:

- Dibujo del modelo o importación del mismo si se ha generado por medio de un sistema CAD.
- Selección del tipo de elemento o elementos a emplear. En función del tipo de cálculo a realizar.
- Mallado del componente -creación de nodos y elementos-.

- Introducción de las propiedades mecánicas es decir el material que se va a emplear en la estructura.

- Aplicación de las cargas exteriores.

1.5.2 Proceso Consiste en la creación y resolución del sistema de ecuaciones matriciales. Se realiza en los siguientes pasos:

-Se define y selecciona el tipo de fenómeno físico que se quiere estudiar, por ejemplo: cálculo estático-lineal, dinámico-lineal, cálculo no lineal-elastoplástico, etc.

- Configuración de los parámetros de cálculo. Selección de los intervalos de tiempo, número de iteraciones, etc.

- Inicio y fin del cálculo: el programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

1.5.3 Postproceso Una vez resueltas las matrices y generados los resultados, analiza éstos de forma gráfica y tabulada. Se realiza en los siguientes pasos:

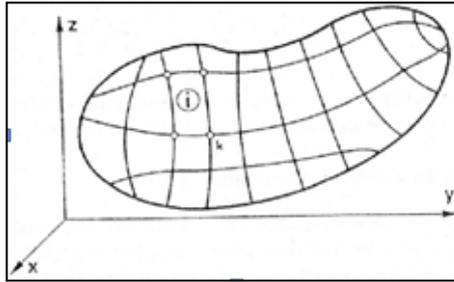
- Tomar las decisiones oportunas sobre las prestaciones del diseño en cuestión.

- Analizar la viabilidad respecto a los objetivos marcados al inicio del cálculo -cargas transportadas, tensiones, aceleraciones, desaceleraciones, etc.-.

1.6 DISCRETIZACIÓN

1.6.1 Discretización del Continuo Elástico Para el desarrollo de cualquier análisis, se debe realizar la discretización del continuo; en el gráfico 1.1 se dibuja un continuo discretizado; en el cual se puede distinguir el elemento -i- y el nodo -k-.

Gráfico 1.1. Continuo Discretizado.



Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 50.

El campo de desplazamientos denominado $-u_i-$ que pertenece al elemento $-i-$ se puede expresar en función del vector de desplazamientos nodales $-d_i-$, usando la matriz de funciones de interpolación $-r_i(x, y, z)-$.

$$u_i(x, y, z, t) = r_i(x, y, z) d_i(t) \quad [1.1]$$

Siendo entonces las incógnitas los desplazamientos nodales $-d_i-$, de cada elemento $-i-$. Por lo tanto se denomina un vector $-U-$ que representa todos los desplazamientos del continuo discretizado:

$$U^T = \left[u_1^T \quad u_2^T \quad \cdots \quad u_i^T \quad \cdots \quad u_N^T \right] \quad [1.2]$$

Donde $-N-$ es el número de elementos en el que se subdividió el continuo.

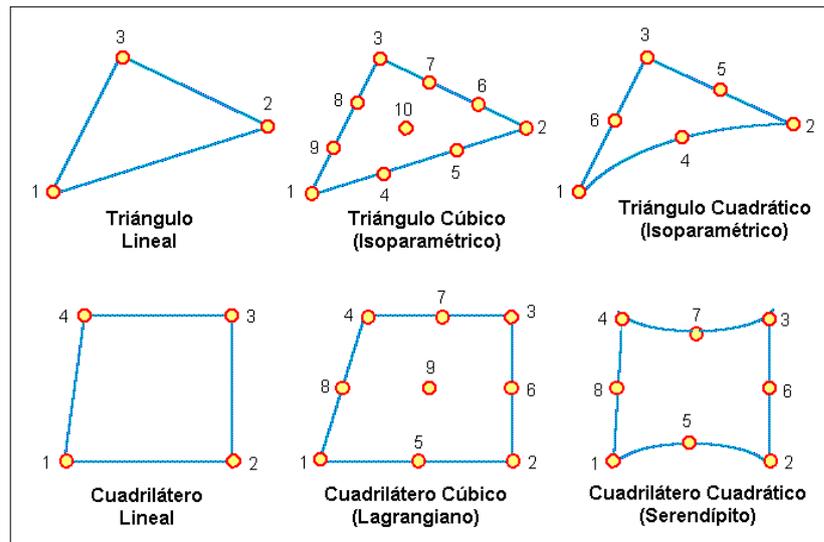
El vector $-D_a-$ representa los desplazamientos nodales del continuo:

$$D_a^T = \left[d_1^T \quad d_2^T \quad \cdots \quad d_i^T \quad \cdots \quad d_N^T \right] \quad [1.3]$$

También la matriz total de funciones de interpolación $-R-$ será igual a:

1.7.3 Elementos Bidimensionales Utilizado para mallar estructuras continuas ya sean planas o curvas, dichos elementos área se consideran de un bajo espesor. Los tipos de elementos área más comunes son las láminas y cáscaras con geometría triangular de 3-6 y 10 nodos y cuadriláteros de 4-8 y 9 nodos, además pueden ser lineales, cuadráticos y cúbicos gráfico 1.3.

Gráfico 1.3. Elementos Área.



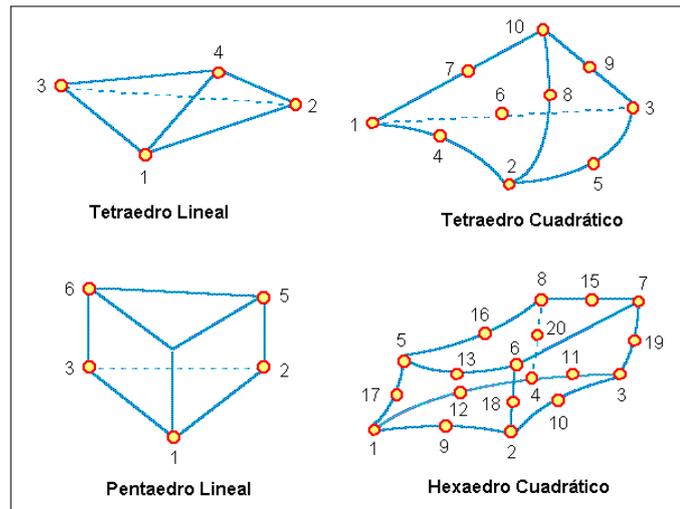
Fuente: LIBRERÍA DE ELEMENTOS [En Línea]

<<http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/fealib.htm>.> [Consulta: 20 de Octubre del 2009.]

1.7.4 Elementos Tridimensionales Son usados para mallar dominios continuos, en la práctica muchas estructuras requieren el uso de este tipo de elementos debido a que consideran los efectos tridimensionales de la geometría. Están disponibles en algunas formas las consideradas más comunes son las siguientes gráfico 1.4.

- Tetraedros: de 4 a 10 nodos y cuatro caras triangulares.
- Pentaedros, de 6 nodos con dos caras triangulares y cuatro caras tipo cuadrilátero.
- Hexaedros: de 8 a 20 nodos y seis caras tipo cuadrilátero.

Gráfico 1.4. Tipos de Elementos Sólidos.



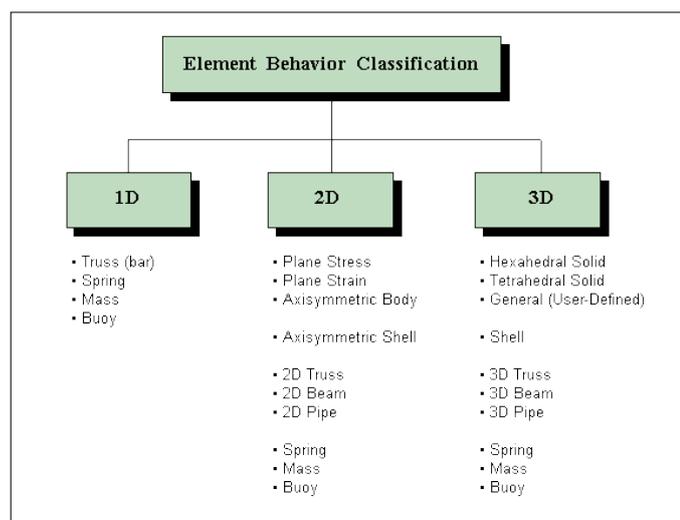
Fuente: LIBRERÍA DE ELEMENTOS [En Línea]

<<http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/fealib.htm>.> [Consulta: 20 de Octubre del 2009.]

La ventaja del análisis 3-D frente al 2-D, es que el primero da una mayor precisión del comportamiento real del modelo, pero se necesita mayor tiempo y la dificultad del mallado aumenta.

Los tipos de elementos disponibles se pueden clasificar en función de la geometría del dominio a modelizar gráfico 1.5.

Gráfico 1.5. Clasificación de los Elementos de Acuerdo a su Comportamiento.



Fuente: LIBRERÍA DE ELEMENTOS [En Línea]

<<http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/fealib.htm>.> [Consulta: 20 de Octubre del 2009.]

1.8 CARGAS DINÁMICAS

1.8.1 Aspectos Generales de las Cargas Dinámicas Una carga se la considera estática cuando posee un tiempo considerable en la aplicación de la misma es decir que su magnitud aumenta de cero a valores finales lentamente y las aceleraciones que soportan la estructura son despreciables. De diferente forma son consideradas las cargas dinámicas, que se aplica en un período relativamente corto.

También las cargas dinámicas se distinguen de las estáticas por el hecho de originar modificaciones tanto en la magnitud de las tensiones como en las deformaciones, afectando también la forma y límite de rotura de los materiales.

Se puede considerar, que un sistema dinámico se caracteriza por variables que experimentan cambios en función del tiempo; estos cambios pueden ser predecibles si se conocen las condiciones externas que actúan sobre el sistema.

1.8.2 Tipos de Cargas Dinámicas Las cargas dinámicas se clasifican como; deterministas, las cuales son funciones del tiempo cuya magnitud en cada instante es conocida. Esta representación es apropiada en el análisis para comprobar su comportamiento, luego de la acción de las diferentes variables en la estructura, los resultados del cálculo estructural son únicamente cualitativos. Las cargas dinámicas no deterministas son aquellas en las cuales la acción dinámica no puede representarse mediante funciones temporales cuyos valores sean conocidos en cada instante de tiempo, estas cargas se simulan mediante características probabilísticas.

1.9 DINÁMICA ESTRUCTURAL

El comportamiento dinámico de una estructura se describe mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que en forma general se puede escribir:

$$Rv(t) = f(t) \quad [1.6]$$

Donde -R- es un operador diferencial, -v(t)- es el vector que contiene las incógnitas del problema y -f(t)- el vector que contiene las acciones.

Cuando se conoce el operador diferencial $-R-$ y las acciones definidas por el vector $-f-$, la solución del problema en este caso es calcular la respuesta dinámica descrita por el vector $-v-$, correspondiendo a un problema de análisis dinámico.

1.10 MODELOS ESTRUCTURALES

En el análisis dinámico, la estructura es representada como un modelo dinámico, este no solo pretende proporcionar una descripción realista del comportamiento estructural, sino relacionar de manera simple las acciones y las respuestas. En este análisis partimos de un diseño predefinido en el que las respuestas obtenidas cumplan con las condiciones previamente establecidas.

La relación entre las acciones y respuestas se expresa cuantitativamente por medio de un modelo matemático. Las características físicas consideradas en la definición de un modelo matemático son la masa, el amortiguamiento y la rigidez de la estructura. Un cálculo completo supone determinar la respuesta en un número infinito de puntos de la estructura, con un infinito número de instantes de tiempo, lo cual complicará el análisis.

En un análisis dinámico de estructuras es necesaria una discretización espacial del continuo para establecer el modelo dinámico de la estructura y una discretización temporal para determinar la respuesta dinámica en cada instante de tiempo.

1.11 MATRIZ DE RIGIDEZ

Una matriz, se define como un arreglo rectangular de cantidades, las cuales se disponen en columnas y filas, dichos arreglos de cantidades, son comúnmente usados para auxiliar la expresión y solucionar sistemas algebraicos de ecuaciones.

Se entiende por rigidez a la resistencia que opone un elemento frente a una deformación dada por la acción de fuerzas. Una estructura rígida es aquella que presenta mayor oposición a la deformación.

Los métodos matriciales, son una herramienta necesaria para la aplicación del método de elementos finitos, debido a la magnitud de ecuaciones que comúnmente se emplean, es necesaria la simplificación de las ecuaciones de los elementos de rigidez.

Este método numérico involucra la creación de una matriz que exprese la relación entre las fuerzas y los desplazamientos. A esta matriz se le conoce como matriz de rigidez.

$$F = KD \quad [1.7]$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1i} & k_{j1} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2i} & k_{j2} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \cdots & k_{ii} & k_{ij} & \cdots & k_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{ni} & k_{nj} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad [1.8]$$

$$D_a = [d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_i \quad \cdots \quad d_N] \quad [1.9]$$

Donde -K- es la matriz de rigidez, -D- representa los desplazamientos nodales y -F- las fuerzas aplicadas al sistema.

1.12 ECUACIONES DEL MOVIMIENTO

1.12.1 Principio de D' Alembert Este método es el más directo para describir la ecuación de movimiento. Un sistema dinámico se encuentra en equilibrio cuando todas las fuerzas que actúan incluidas las de inercia cumplen la ecuación de equilibrio en cada instante. La cinemática tradicional de cuerpo rígido, está basada en la segunda ley de Newton, que establece que la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración.

$$F = ma \quad [1.10]$$

1.12.2 Principio de los Trabajos Virtuales Este principio establece que un sistema se encuentra en equilibrio bajo la acción de las fuerzas externas que actúan sobre él, incluidas las de inercia. Para cualquier campo de desplazamientos virtuales que se imponga al sistema, el trabajo realizado por las fuerzas externas es igual al realizado por las fuerzas internas. “Las ecuaciones de movimiento se obtienen expresando, para cada grado de libertad, el trabajo que debido a dichos desplazamientos realizan las fuerzas”¹.

1.12.3 Principio de Hamilton Se denomina funcional de Hamilton a la ecuación:

$$\Pi_H = \int_{t_1}^{t_2} (E_c - E_p) dt + \int_{t_1}^{t_2} E_d dt \quad [1.11]$$

En donde -Ep- y -Ec- son respectivamente la energía potencial y cinética, mientras que -Ed- es el trabajo correspondiente a las fuerzas de amortiguamiento y a otras fuerzas externas.

El principio variacional de Hamilton establece que un sistema está en equilibrio dinámico si cumple la siguiente condición:

$$\delta \Pi_H = 0 \quad [1.12]$$

En donde -δ- representa la variación del funcional en el intervalo de tiempo (t1, t2).

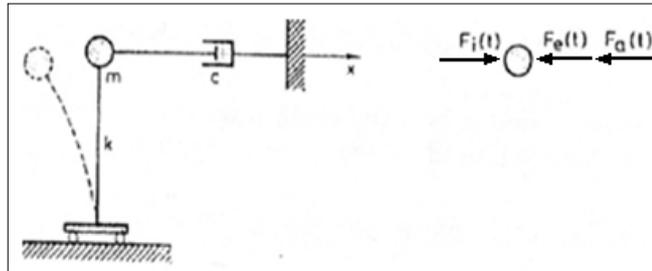
1.13 GRADOS DE LIBERTAD

Se conoce como grados de libertad al número total de desplazamiento a los que está sometido la estructura. La identificación de los grados de libertad en una estructura es muy importante ya que tiene influencia directa en los resultados del análisis dinámico.

¹ BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 58.

1.13.1 Modelos con un Grado de Libertad Si la estructura deformada durante la acción dinámica se la puede definir mediante un desplazamiento, entonces la estructura puede ser modelizada mediante un sistema de un solo grado de libertad. La ecuación de movimiento del gráfico 1.6 se obtiene por el principio de D' Alembert.

Gráfico 1.6. Modelos con un Grado de Libertad.



Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 59.

La ecuación de equilibrio es la siguiente.

$$F_i(t) - F_e(t) - F_a(t) = 0 \quad [1.13]$$

Donde: $-F_i(t)$, $-F_e(t)$, $-F_a(t)$ son las fuerzas de inercia, elásticas y de amortiguamiento respectivamente como se indica en el gráfico 1.6

La fuerza de inercia que actúa sobre la masa $-m-$ está originada por la aceleración total de la masa.

$$F_i(t) = -m[d(t)] \quad [1.14]$$

La fuerza elástica, está basada en la ley de Hooke, donde la fuerza $-F_e-$ es igual a la rigidez $-K-$, multiplicada por el desplazamiento $-d-$ en una sola dirección.

$$F_e(t) = Kd(t) \quad [1.15]$$

La fuerza de amortiguamiento es proporcional al coeficiente de amortiguamiento $-c-$ por el desplazamiento $-d-$.

$$F_a(t) = cd(t) \quad [1.16]$$

Reemplazando las ecuaciones de las fuerzas de inercia [1.14], elástica [1.15] y amortiguamiento [1.16], en la ecuación de equilibrio según D' Alembert [1.13] obtenemos:

$$m[d(t)] + cd(t) + kd(t) = 0 \quad [1.17]$$

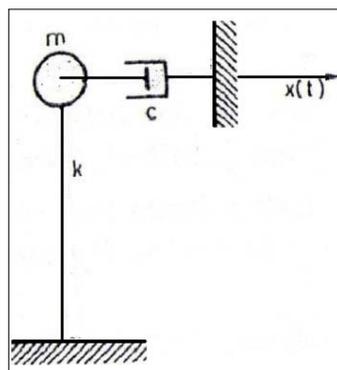
Realizando algunas operaciones básicas en la ecuación [1.17] tenemos:

$$md(t) + cd(t) + kd(t) = F(t) \quad [1.18]$$

La ecuación [1.18] se puede particularizar en dos casos. En el primero se tiene vibraciones libres amortiguadas gráfico 1.7, al cual corresponde la siguiente ecuación:

$$md(t) + cd(t) + kd(t) = 0 \quad [1.19]$$

Gráfico 1.7. Vibraciones Libres Amortiguadas.

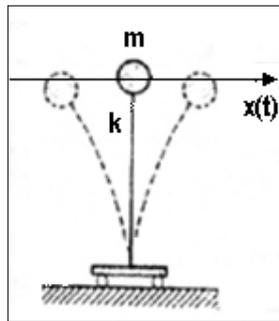


Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 52.

Mientras que en el otro caso se tiene vibraciones libres no amortiguadas como indica el gráfico 1.8, la ecuación correspondiente es:

$$m\ddot{d}(t) + kd(t) = 0 \quad [1.20]$$

Gráfico 1.8. Vibraciones Libres No Amortiguadas.



Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 52.

1.13.2 Modelos simples con varios Grados de Libertad En el chasis se sitúan seis grados de libertad; las traslaciones en cada una de las tres direcciones espaciales y las tres rotaciones respecto a ellas. A las rotaciones en el chasis se las puede identificar con los siguientes nombres: ángulo de balanceo, ángulo de cabeceo y ángulo de guiñada, respectivamente con los ejes coordenados x, y, z como lo indica el gráfico 1.9.

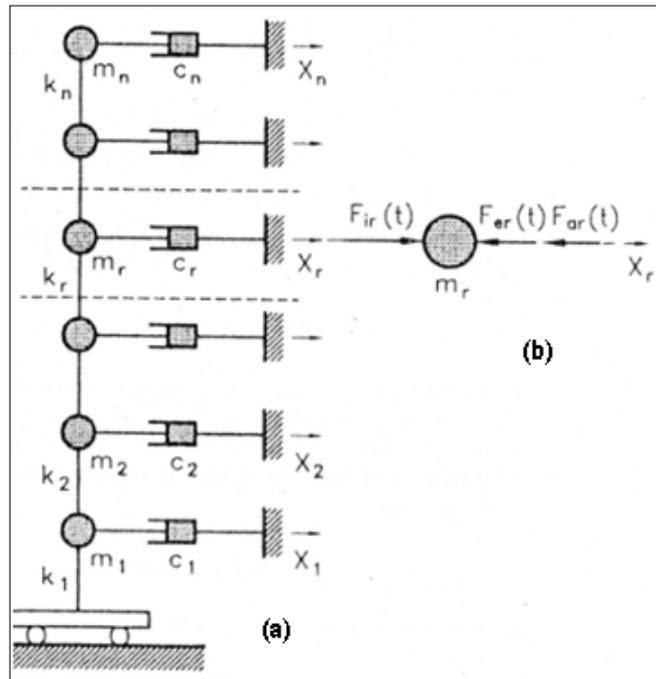
Gráfico 1.9. Rotaciones del Chasis.



Fuente: TOYOTA HILUX [En Línea] <<http://www.motorspain.com/17-09-2008/marcas/toyota>> [Consulta: 11 de Noviembre del 2009.]

El modelo de varios grados de libertad más sencillo se puede utilizar para describir al comportamiento dinámico de estructuras, este se basa en la hipótesis de que su estructura es rígida y que los movimientos posibles de los nudos son en una sola dirección gráfico 1.10.

Gráfico 1.10. Modelos Simples con Varios Grados de Libertad.



Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.1994. 821p. Página 52.

Las ecuaciones del movimiento pueden deducirse estableciendo el equilibrio dinámico de cada masa de acuerdo con el principio de D'Alembert. Aislado las masas e introduciendo todas las fuerzas correspondientes en una masa $-m_r$ se obtiene:

$$F_{ir}(t) - F_{er}(t) - F_{ar}(t) = 0 \quad [1.21]$$

Las fuerzas de inercia, elásticas y de amortiguamiento para modelos con varios grados de libertad, se convierten en este caso en las siguientes expresiones matriciales:

$$F_i(t) = -M[X(t)] \quad [1.22]$$

$$F_e(t) = KX(t) \quad [1.23]$$

$$F_a(t) = CX(t) \quad [1.24]$$

En donde, -K- es la matriz de rigidez que tiene la forma:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1i} & k_{j1} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2i} & k_{j2} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \cdots & k_{ii} & k_{ij} & \cdots & k_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{ni} & k_{nj} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad [1.25]$$

Donde el elemento -kij- representa la fuerza correspondiente al grado de libertad -i-, debido a un desplazamiento unitario en el grado de libertad -j-.

La matriz de masa -M- es diagonal:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & & \\ & m_2 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & m_i & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & 0 & & & & & \\ & & & & & & m_n \end{bmatrix} \quad [1.26]$$

La matriz de amortiguamiento -C- puede considerarse del mismo tipo:

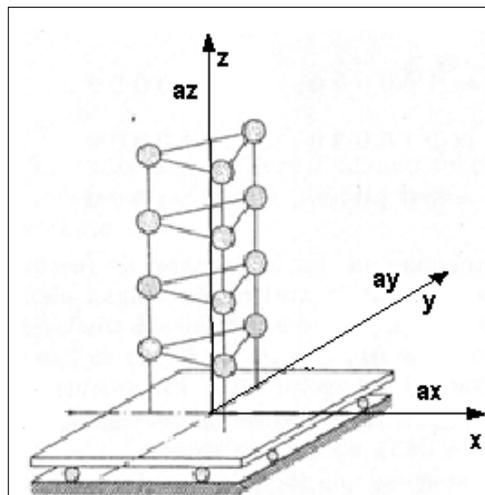
$$C = \begin{bmatrix} c_1 & & & & & & \\ & c_2 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & c_i & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & 0 & & & & & \\ & & & & & & c_n \end{bmatrix} \quad [1.27]$$

Sustituyendo las ecuaciones [1.22], [1.23] y [1.24] en la ecuación [1.13], se obtiene la ecuación de movimiento del modelo.

$$MX(t) + CX(t) + KX(t) = 0 \quad [1.28]$$

1.13.3 Modelo General de Pórticos En el caso de una estructura tridimensional formada por barras, se considera al modelo con seis grados de libertad por nudo. Al mismo tiempo se puede incluir en las ecuaciones del movimiento aceleraciones en una dirección arbitraria con respecto a la estructura. Para ello la aceleración $-a(t)$ de la estructura se descompone en $-a_x(t)$, $-a_y(t)$ y $-a_z(t)$ gráfico 1.11.

Gráfico 1.11. Modelo General de Pórticos.



Fuente: BARBAT, Alex; CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a acciones sísmicas. 2a edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994. 821p. Página 65.

La ecuación del movimiento se modifica para tomar en cuenta en primer lugar que cada masa tiene seis movimientos -tres desplazamientos y tres rotaciones-, además de incluir una nueva definición de las aceleraciones, obteniendo:

$$MD(t) + CD(t) + KD(t) = -M \left[J_x a_x(t) + J_y a_y(t) + J_z a_z(t) \right] \quad [1.29]$$

El vector de incógnitas $-D(t)-$ tiene por cada elemento seis grados de libertad $-r-$: tres traslaciones $-(x_r, y_r, z_r)-$ y tres rotaciones $-(\varphi_{xr}, \varphi_{yr}, \varphi_{zr})-$ como se indica a continuación:

$$[D(t)]^T = \begin{bmatrix} x_1 y_1 z_1 \varphi_{x1} \varphi_{y1} \varphi_{z1} & \cdots & x_r y_r z_r \varphi_{xr} \varphi_{yr} \varphi_{zr} & \cdots & x_n y_n z_n \varphi_{xn} \varphi_{yn} \varphi_{zn} \end{bmatrix} \quad [1.30]$$

Los modelos dinámicos usados en el análisis incluirán solamente algunos de estos grados de libertad dependiendo de las características de la estructura estudiada. Debe considerarse que las matrices $-K-$, $-M-$ y $-C-$ [1.25], [1.26] y [1.27], se han ampliado de acuerdo con la definición del vector $-D(t)-$.

Siendo la ecuación general de movimiento:

$$MD + CD + KD = -MJa(t) \quad [1.31]$$

En este caso $-J-$ es el vector que realiza la descomposición de $-a(t)-$ en las tres direcciones $-(x, y, z)-$.

Las vibraciones libres amortiguadas en el modelo dinámico se expresan como:

$$MD + CD + KD = 0 \quad [1.32]$$

Y cuando el sistema carece de amortiguamiento resulta la siguiente ecuación donde describe las vibraciones libres no amortiguadas del modelo.

$$MD + KD = 0 \quad [1.33]$$

1.14 CONCLUSIONES

El desarrollo de este capítulo está enfocado a comprender los conceptos básicos y las principales características que posee el MEF; además saber en términos generales como se forma el proceso de resolución matemática en el software que desarrolla el

análisis estructural del chasis, ya que para un entendimiento completo del mismo se necesita un amplio conocimiento sobre métodos numéricos y matemática aplicada.

Las condiciones de contorno que se imponen para analizar el chasis son de gran importancia en factores de estabilidad y maniobrabilidad del vehículo, es por eso que el estudio dinámico es fundamental para garantizar la seguridad del automóvil en marcha.

CAPÍTULO II

ESFUERZOS EN EL CHASIS

2.1 PESOS DEL VEHÍCULO

2.1.1 Pesos Generales

Tara Peso del vehículo, con su equipo fijo autorizado, sin personal de servicio, pasajeros ni carga, y con su dotación completa de agua, combustible, lubricante, repuestos, herramientas y accesorios necesarios.

Peso en orden de marcha Se considera como masa en orden de marcha el resultado de sumar a la tara la masa estándar del conductor de 75 kg.

Peso en carga La masa efectiva del vehículo y de su carga, incluido el peso del personal de servicio y de los pasajeros.

Peso por eje Es la masa que gravita sobre el suelo, transmitido por la totalidad de las ruedas acopladas a ese eje.

Peso máximo autorizado –PMA- La masa máxima de un vehículo con carga en circulación por la vía pública.

Peso máximo técnicamente admisible El peso máximo para la utilización del vehículo, basado en su construcción y especificado por el fabricante. Puede ser igual o superior al peso máximo autorizado.

2.1.2 Distribución de Pesos en el Chasis Se debe considerar que existen dos tipos de masas; las suspendidas -pesos que se encuentran sobre el chasis- y las no suspendidas -pesos que no se encuentran sobre el chasis-. Entre las masas no

suspendidas tenemos: llantas, puntas de eje y las 2/3 partes del sistema de suspensión, el resto serán masas suspendidas.

Para el cálculo del centro de gravedad del vehículo, se debe determinar las cargas estáticas que soportan los largueros del chasis, para ello se debe considerar las masas suspendidas más significativas y su posición en el vehículo, de tal forma que el centro de gravedad se encuentre lo más centrado posible.

Las masas suspendidas y no suspendidas que se encuentran en el vehículo son datos reales que posee cada uno de sus componentes, los mismos que se investigaron por los autores en catálogos de la marca Toyota. A continuación se describe cada magnitud de masa las cuales son indispensables para los diferentes cálculos del chasis de la camioneta Toyota Hilux. Para facilitar el análisis se divide los componentes del vehículo en cinco grupos estructurados de la siguiente manera:

Grupo 1 Compartimiento Delantero.

Cuadro 2.1. Componentes del Grupo 1 -Compartimiento Delantero-.

DESCRIPCIÓN	PESO -Kg-
Paragolpe Delantero	10
Faro Delantero Derecho	2,5
Faro Delantero Izquierdo	2,5
Radiador	20
Batería	12
Compartimiento Motor	80
Sistema de Dirección	15
Suspensión Delantera Derecha	10
Suspensión Delantera Izquierda	10
Peso Total	162

Fuente: Autores.

Grupo 2 Habitáculo.

Cuadro 2.2. Componentes del Grupo 2 –Habitáculo-.

DESCRIPCIÓN	PESO -Kg-
Parabrisas	17
Tablero	35
Puerta del Conductor y Vidrio	30
Puerta del Pasajero y Vidrio	30
Piso	20
Conductor y Asiento	90
Pasajero y Asiento	95
Techo	12
Parabrisas Posterior	8
Peso Total del Habitáculo	337

Fuente: Autores.

Grupo 3 Compartimiento de Carga.

Cuadro 2.3. Componentes del Grupo 3 -Compartimiento de Carga-.

DESCRIPCIÓN	PESO-Kg-
Rueda de Auxilio	18
Faro Trasero Derecho	1
Faro Trasero Izquierdo	1
Paragolpes Posterior	8
Compartimiento de Carga	80
Peso Total	108

Fuente: Autores.

Grupo 4 Motor y Caja de Cambios.

Cuadro 2.4. Componentes del Grupo 4 -Motor y Caja de Cambios-.

DESCRIPCIÓN	PESO-Kg-
Motor y Caja de Cambios	210

Fuente: Autores.

Grupo 5 Tanque de Combustible.

Cuadro 2.5. Componentes del Grupo 5 -Tanque de Combustible-.

DESCRIPCIÓN	PESO-Kg-
Tanque Combustible	80 (lleno)

Fuente: Autores.

2.2 DIMENSIONES DEL VEHÍCULO**2.2.1 Dimensiones Generales**

Longitud del vehículo Es la distancia entre los planos verticales perpendiculares al plano medio del vehículo, que tocan al vehículo por delante y por detrás.

Anchura del vehículo Es la distancia comprendida entre dos planos paralelos al plano longitudinal medio del vehículo que tocan al mismo en los dos costados.

Altura del vehículo Es la distancia entre el plano de apoyo (suelo) y un plano horizontal que toca a la parte superior del automóvil.

Distancia entre ejes Esta comprendida entre las perpendiculares que inciden sobre el plano longitudinal medio del vehículo a partir de los puntos contenidos en los ejes de las ruedas y el plano medio de las ruedas (centros de ruedas).

Longitud del voladizo anterior Distancia entre el plano vertical que pasa por los centros de las ruedas delanteras y el punto del vehículo situado en la parte más avanzada del mismo.

Longitud del voladizo posterior Distancia entre el plano vertical que pasa por los centros de las ruedas posteriores y el punto del vehículo situado en la parte posterior del mismo.

2.2.2 Dimensiones Principales del Vehículo Para el análisis del diseño de este chasis, se deben considerar en primer lugar las dimensiones más importantes del

automotor, las cuales fueron obtenidas mediante fichas técnicas -Véase Página 100-, entre estas se tiene:

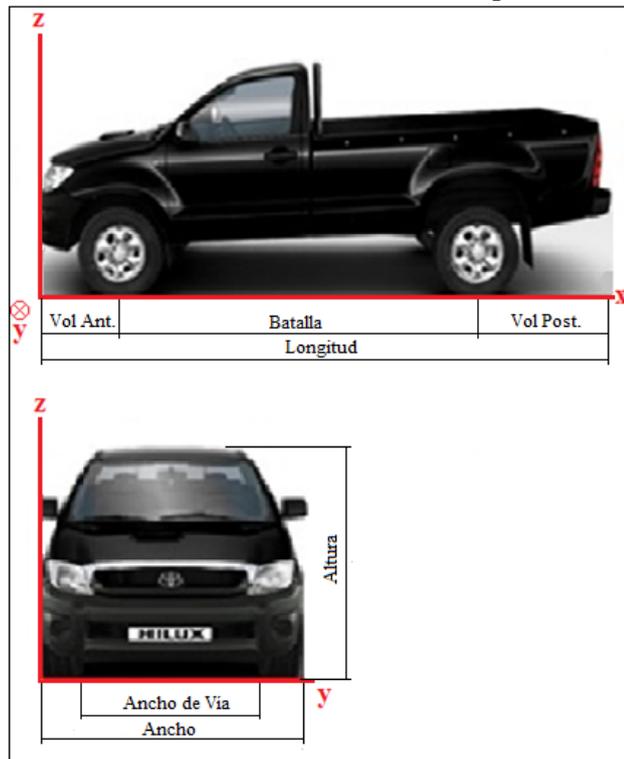
Cuadro 2.6. Dimensiones Principales del Vehículo.

DESCRIPCIÓN	DISTANCIA -mm-
Distancia entre Ejes	3085
Longitud	5255
Altura	1795
Ancho	1835
Voladizo Anterior	885
Voladizo Posterior	1285
Ancho de Vía	1510

Fuente: TOYOTA HILUX CS [En Línea]
http://toyota.com.ec/CAMIONETAS/Hilux_cs:06Cabina_Simple/home_388.html [Consulta: 29 de Julio del 2009].

En el gráfico 2.1. Se muestran las dimensiones antes citadas, y se establecen planos de referencia (x,y,z) con los cuales se tomarán medidas a los demás componentes suspendidos sobre el vehículo.

Gráfico 2.1. Dimensiones Principales.



Fuente: Autores

Plano de Referencia en el Eje X: Parte frontal del vehículo.

Plano de Referencia en el Eje Y: Lado del conductor.

Plano de Referencia en el Eje Z: Suelo.

2.3 CENTRO DE GRAVEDAD

2.3.1 Cálculo del Centro de Gravedad Se debe determinar las cargas estáticas que soportarán los largueros del chasis, para ello se considera las masas suspendidas más significantes, estimando el peso de cada una de ellas y su posición en el vehículo.

Las coordenadas de los centroides de cada elemento con respecto a los planos de referencia previamente determinados, fueron obtenidas por los autores mediante mediciones realizadas en la camioneta, a continuación se indica la masa con sus coordenadas:

Cuadro 2.7. Coordenadas de los Componentes del Vehículo.

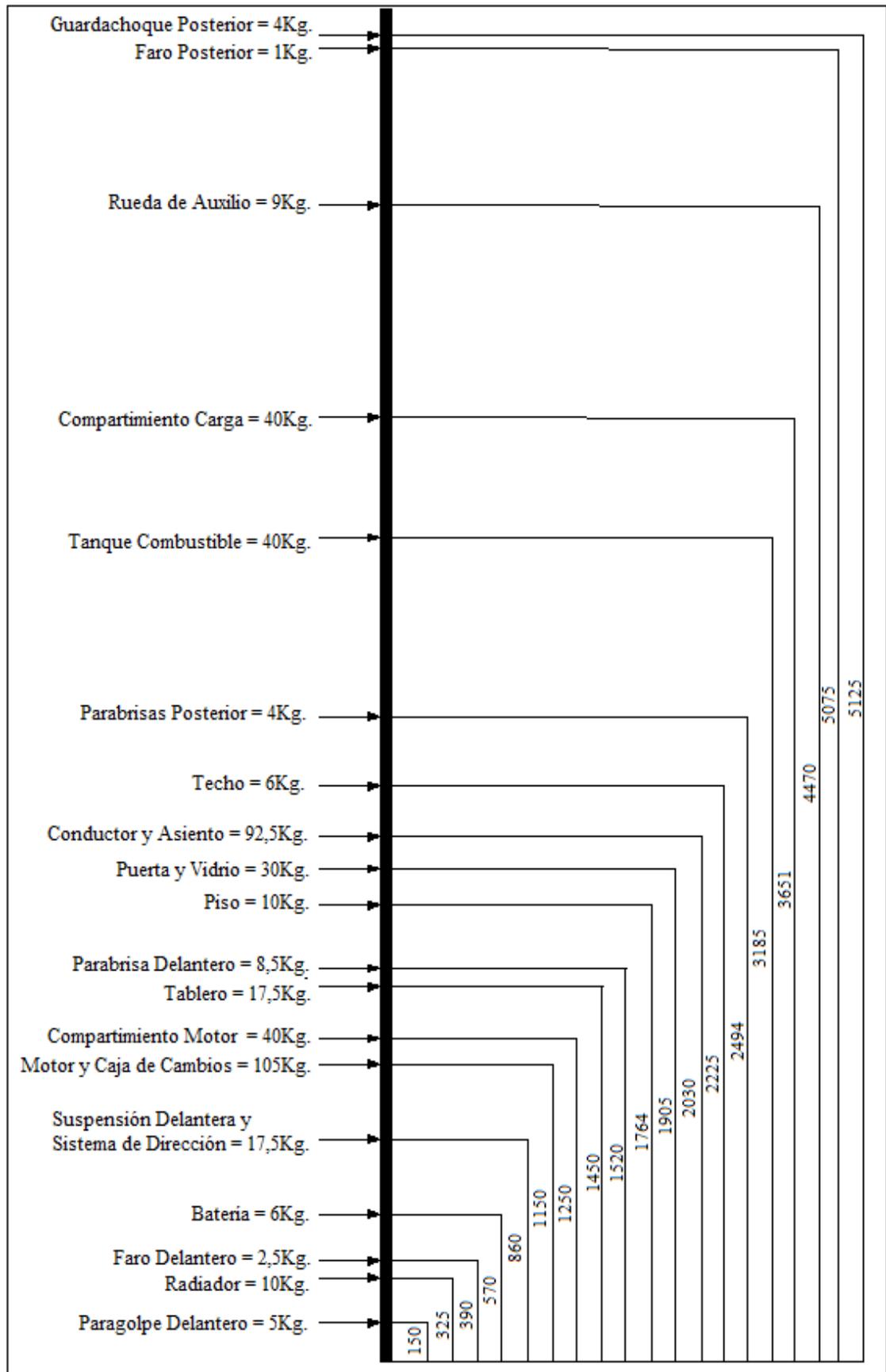
ELEMENTOS	PESO-Kg-	X-mm-	Y-mm-	Z-mm-
Paragolpe Delantero	10	150	917	560
Faro Delantero Derecho	2,5	390	180	900
Faro Delantero Izquierdo	2,5	390	1655	900
Suspensión Delantera Derecha	10	860	530	340
Suspensión Delantera Izquierda	10	860	1305	340
Radiador	20	325	917	650
Batería	12	570	310	880
Compartimiento Motor	80	1250	917	650
Motor y Caja de Cambios	210	1150	917	650
Sistema de Dirección	15	860	917	310
Parabrisas	17	1520	917	1430
Tablero	35	1450	917	1080
Puerta del Conductor y Vidrio	30	1905	1745	820
Puerta del Pasajero y Vidrio	30	1905	90	820
Piso	20	1764	917	440
Conductor y Asiento	90	2030	1285	660

Pasajero y Asiento	95	2030	550	660
Techo	12	2225	917	1785
Parabrisas Posterior	8	2494	917	1430
Tanque de Combustible -lleno-	80	3185	1268	420
Rueda de Auxilio	18	4470	917	450
Faro Posterior Derecho	1	5075	60	900
Faro Posterior Izquierdo	1	5075	1775	900
Paragolpe Posterior	8	5115	917	500
Compartimiento Carga	80	3651	917	850

Fuente: Autores.

En el gráfico 2.2. se observa el dimensionamiento de cada una de estas masas, representadas en un diagrama de cuerpo libre a lo largo de uno de los largueros; para realizar el cálculo se considera la mitad de cada masa debido a la existencia de dos largueros y suponiendo la distribución equitativa de estas a cada uno.

Gráfico 2.2. Distribución de las Masas.



Fuente: Autores

Para la localización del centro de gravedad del vehículo se aplica la siguiente fórmula.

$$x_g = \frac{\sum m_i(x_i)}{\sum m} \quad [2.1]$$

Donde:

X_g = centro de gravedad en la coordenada X.

$\sum m_i(x_i)$ = la sumatoria de la multiplicación de la masa del elemento por su centroide en el eje X.

$\sum m$ = la sumatoria de las masas.

$$x_g = \frac{1735078kgmm}{897kg}$$

$$x_g = 1934,31mm$$

La formula antes citada se aplica para obtener la ubicación de cada una de las coordenadas.

$$y_g = \frac{\sum m_i(y_i)}{\sum m} \qquad z_g = \frac{\sum m_i(z_i)}{\sum m}$$

$$y_g = \frac{850629kgmm}{897kg} \qquad z_g = \frac{670500kgmm}{897kg}$$

$$y_g = 948,30mm \qquad z_g = 747,49mm$$

De esta manera el centro de gravedad total del vehículo se ubica en las siguientes coordenadas:

Cuadro 2.8. Coordenadas del Centro de Gravedad total del Vehículo.

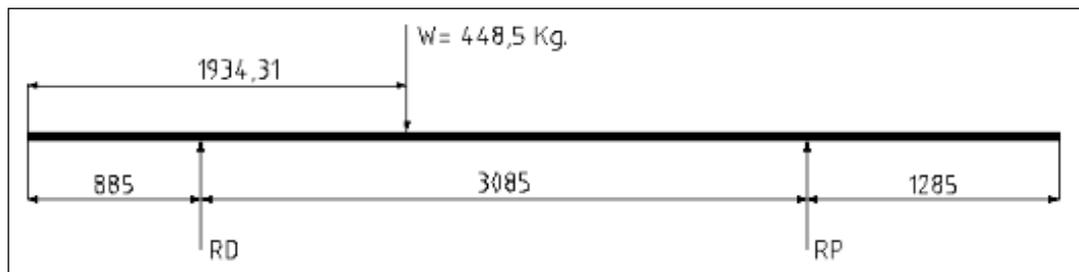
Centro de Gravedad en X	1934,31 mm
Centro de Gravedad en Y	948,30 mm
Centro de Gravedad en Z	747,49 mm

Fuente: Autores.

2.4 REACCIONES EN LOS APOYOS -EJE DELANTERO Y POSTERIOR-

Los apoyos del bastidor corresponden a los ejes de rueda delantera y posterior, para calcularlo se suman todos los pesos que soporta el chasis y se divide para dos; luego se reemplaza por una carga puntual que actúa en el centro de gravedad del plano X gráfico 2.3.

Gráfico 2.3. Diagrama de Cuerpo Libre.



Fuente: Autores.

Donde:

RD= Reacción rueda delantera.

RP= Reacción rueda posterior.

W= Valor de la carga.

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre mostrado en el gráfico 2.3, se calculan las reacciones en los apoyos, realizando una sumatoria de momentos con respecto al punto "RD".

$$\sum M_D = 0 \quad [2.2]$$

$$448,5\text{kg} (1049,31 \text{ mm}) - \text{RP}(3085) = 0$$

$$\text{RP} = 152,54 \text{ Kg}$$

Y una sumatoria de fuerzas con respecto al eje Y.

$$\sum F_y = 0 \quad [2.3]$$

$$\text{RD} + \text{RP} - 448,5 = 0$$

$$RD = 448,5\text{kg} - 152,54\text{kg}$$

$$RD = 295,96\text{ Kg}$$

2.5 ESFUERZO CORTANTE

Para encontrar los esfuerzos cortantes, bajo la condición en la que el vehículo se encuentre sin carga se procede a realizar el siguiente cálculo gráfico 2.4.

$$V_A = 0\text{Kg}$$

$$V_B = -81\text{Kg}$$

$$V_C = -81 + 295,96 = 214,96\text{Kg}$$

$$V_D = 295,96 - 105 - 81 = 109,96\text{Kg}$$

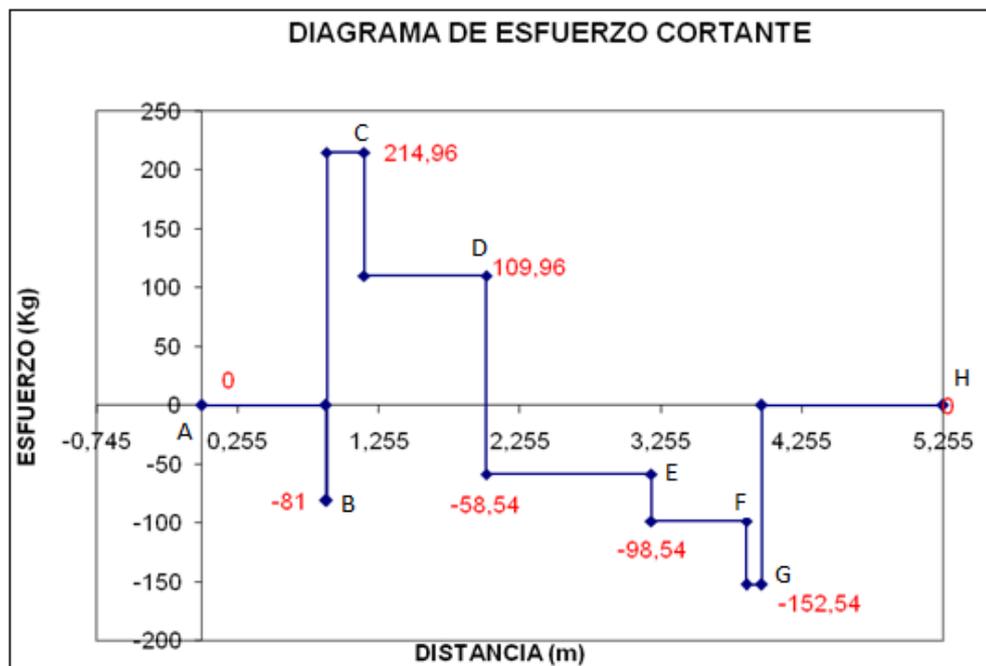
$$V_E = 295,96 - 81 - 105 - 168,5 = -58,54\text{Kg}$$

$$V_F = 295,96 - 105 - 81 - 168,5 - 40 = -98,54\text{Kg}$$

$$V_G = 295,96 - 105 - 81 - 168,5 - 40 - 54 = -152,54\text{Kg}$$

$$V_H = 295,96 - 105 - 81 - 168,5 - 40 - 54 + 152,54 = 0\text{Kg}$$

Gráfico 2.4. Diagrama de Esfuerzo Cortante con Vehículo sin Carga.



Fuente: Autores.

2.6 MOMENTO FLECTOR

Una vez determinadas las reacciones en los apoyos D y P, se puede calcular los momentos flectores que actúan en la viga, para esto se agrupan las cargas como se indicó anteriormente.

A continuación se indica el grupo y la carga total del mismo.

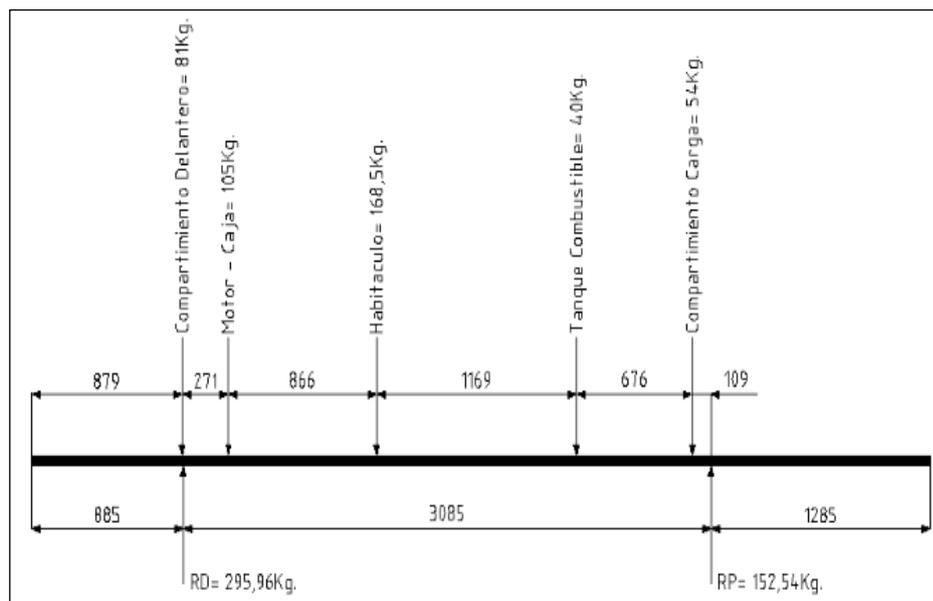
Cuadro 2.9. Peso Total de cada Grupo.

DENOMINACION DEL GRUPO	CARGA TOTAL -Kg-
Compartimiento Delantero	162
Habitáculo	337
Compartimiento de Carga	108
Motor y Caja de Cambios	210
Tanque de combustible	80

Fuente: Autores.

Para guiarse en el desarrollo de los cálculos es necesario realizar un diagrama de cuerpo libre en el que se indique los grupos con su respectiva carga y distancia gráfico 2.5.

Gráfico 2.5. Diagrama de Cuerpo Libre.



Fuente: Autores.

A continuación se detalla el cálculo de momentos flectores respectivo al primer caso en el que como condición se tiene que el vehículo se encuentra sin carga gráfico 2.6.

$$M_A = 0Kgm$$

$$M_B = 0Kgm$$

$$M_C = -81(0,006) = -0,486Kgm$$

$$M_D = 295,96(0,265) - 81(0,271) = 56,47Kgm$$

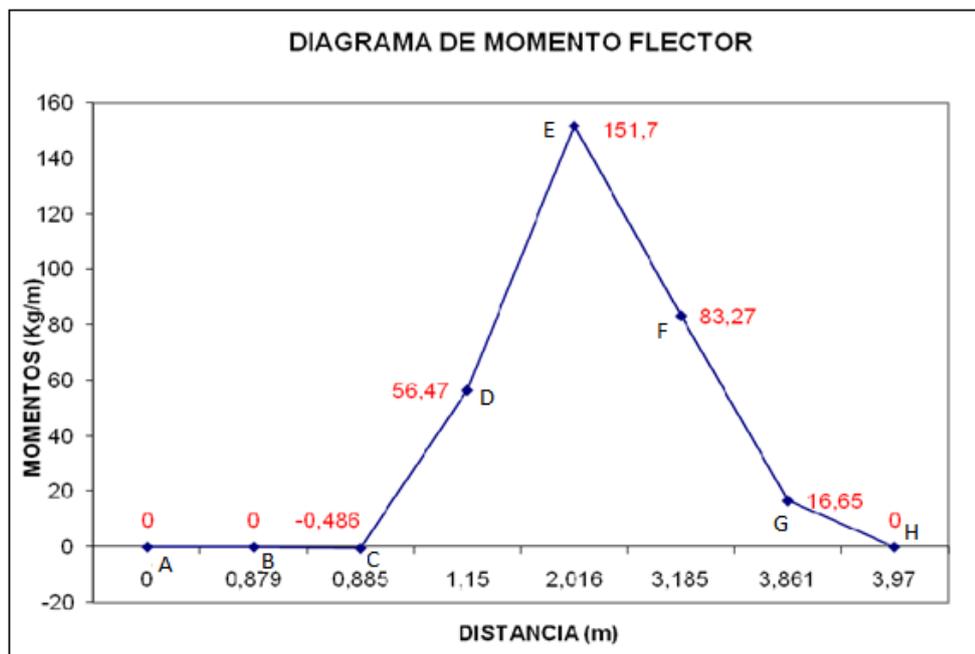
$$M_E = -105(0,866) + 295,96(1,131) - 81(1,137) = 151,70Kgm$$

$$M_F = -168,5(1,169) - 105(2,035) + 295,96(2,3) - 81(2,306) = 83,27Kgm$$

$$M_G = -40(0,676) - 168,5(1,845) - 105(2,711) + 295,96(2,976) - 81(2,982) = 16,65Kgm$$

$$M_H = -54(0,109) - 40(0,785) - 168,5(1,954) - 105(2,82) + 295,96(3,085) - 81(3,091) = 0Kgm$$

Gráfico 2.6. Diagrama de Momento Flector de Vehículo sin Carga.



Fuente: Autores.

Todos estos datos que han sido calculados tienden a variar al momento que se aumenta la carga en el vehículo, es por eso que se analizará cuatro condiciones de carga incluida la ya resuelta para poder observar las modificaciones de comportamiento del chasis:

Segundo Caso: Vehículo con Media Carga de 700 Kg.

- Centro de Gravedad.

Cuadro 2.10. Centro de Gravedad con el Vehículo a Media Carga.

Centro de Gravedad en X	2778,82 mm
Centro de Gravedad en Y	934,58 mm
Centro de Gravedad en Z	792,42 mm

Fuente: Autores.

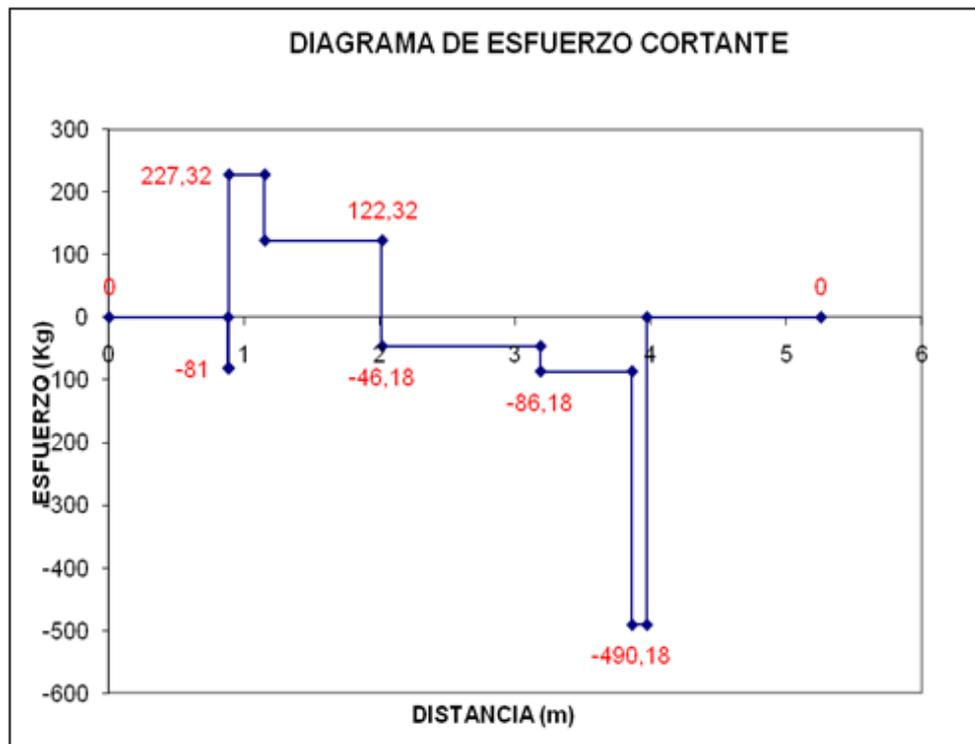
- Reacciones en los Apoyos.

Rueda Delantera RD= 308,32 Kg

Rueda Posterior RP= 490,18Kg

- Diagrama de Esfuerzo Cortante gráfico 2.7.

Gráfico 2.7. Diagrama de Esfuerzo Cortante Segundo Caso.



Fuente: Autores.

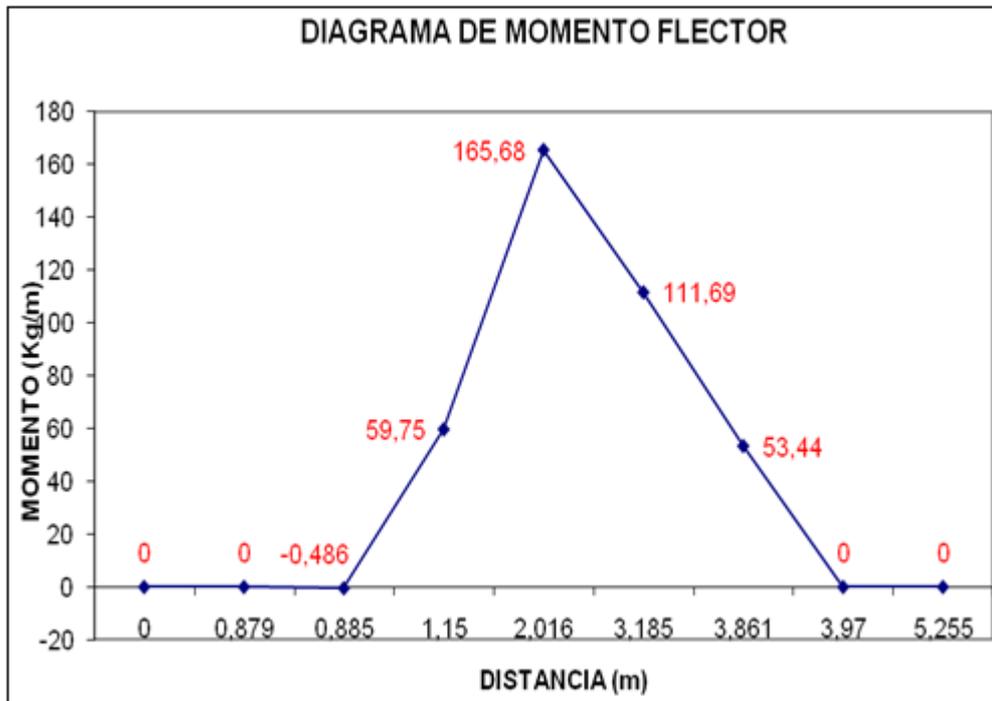
- Diagrama de Momentos Flectores gráfico 2.8.

Cuadro 2.11. Tabla Distancia-Momento Vehículo a Media Carga.

DISTANCIA (m)	MOMENTO -Kgm-
0	0
0,879	0
0,885	-0,48
1,15	59,75
2,016	165,68
3,185	111,69
3,861	53,44
3,97	0
5,255	0

Fuente: Autores.

Gráfico 2.8. Diagrama Momento Flector Segundo Caso.



Fuente: Autores.

Tercer Caso: Vehículo con Carga Máxima de 1340 Kg.

- Centro de Gravedad.

Cuadro 2.12. Centro de Gravedad con el Vehículo a Carga Máxima.

Centro de Gravedad en X	3088,43 mm
Centro de Gravedad en Y	929,55 mm
Centro de Gravedad en Z	808,89 mm

Fuente: Autores.

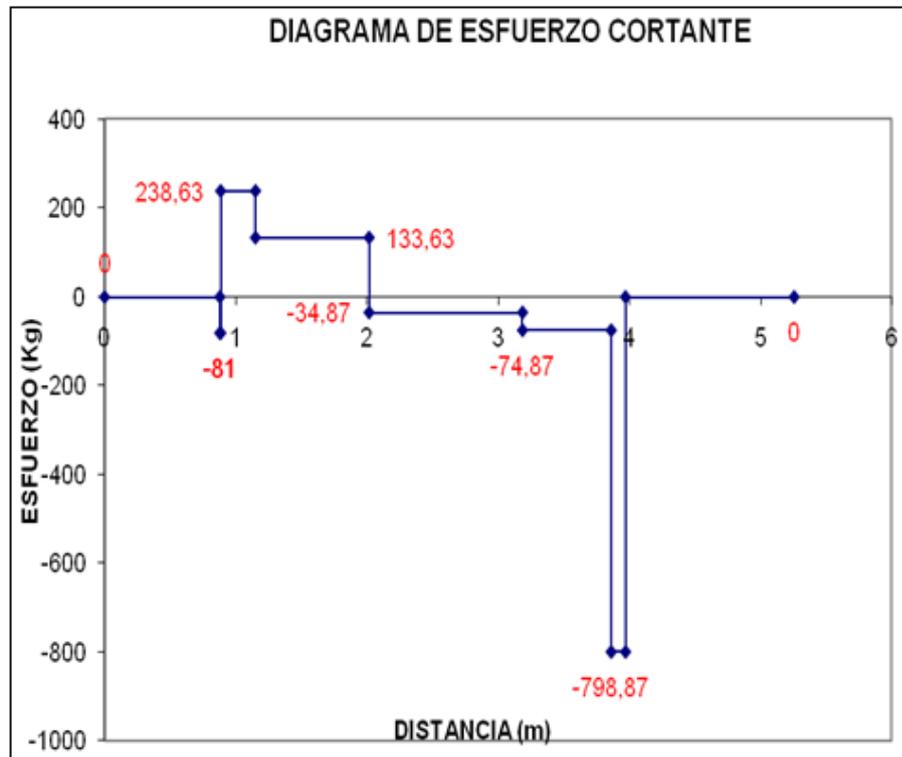
- Reacciones en los Apoyos.

Rueda Delantera RD= 319,63 Kg

Rueda Posterior RP= 798,87 Kg

-Diagrama de Esfuerzos Cortantes gráfico 2.9.

Gráfico 2.9. Diagrama de Esfuerzo Cortante Tercer Caso.



Fuente: Autores.

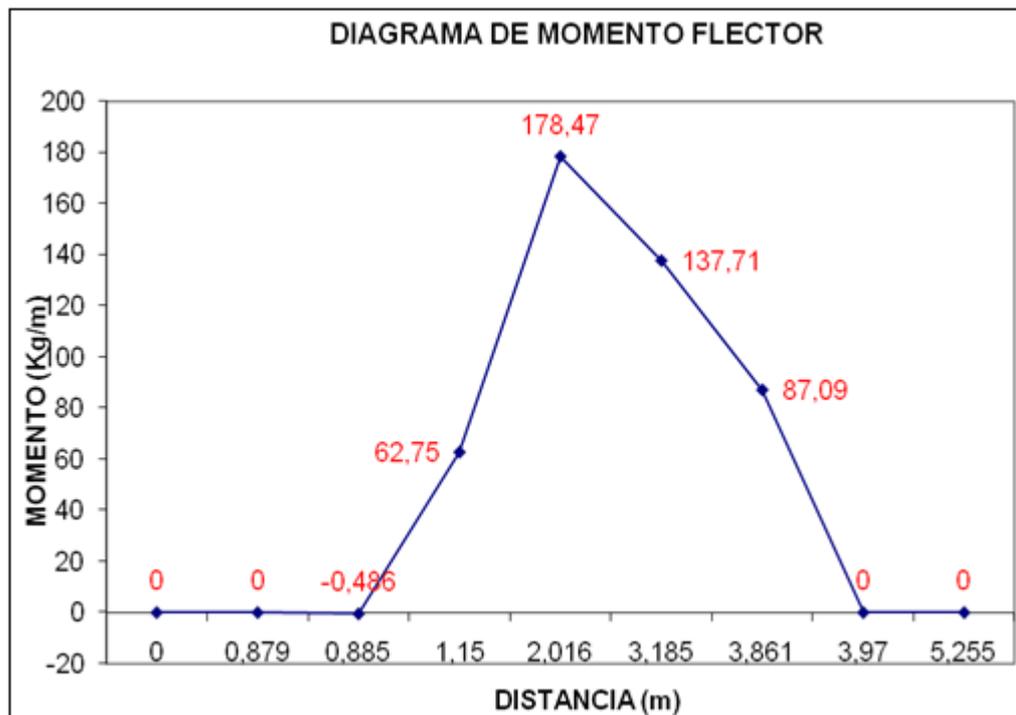
- Diagrama de Momentos Flectores gráfico 2.10.

Cuadro 2.13. Tabla Distancia-Momento Vehículo a Carga Máxima.

DISTANCIA -m-	MOMENTO -Kgm-
0	0
0,879	0
0,885	-0,48
1,15	62,75
2,016	178,47
3,185	137,71
3,861	87,09
3,97	0
5,255	0

Fuente: Autores.

Gráfico 2.10. Diagrama de Momento Flector Tercer Caso.



Fuente: Autores.

Cuarto Caso: Vehículo con Sobrecarga de 1600 Kg.

-Centro de Gravedad.

Cuadro 2.14. Centro de Gravedad con el Vehículo Sobrecargado.

Centro de Gravedad en X	3168,87 mm
Centro de Gravedad en Y	928,24 mm
Centro de Gravedad en Z	813,17 mm

Fuente: Autores.

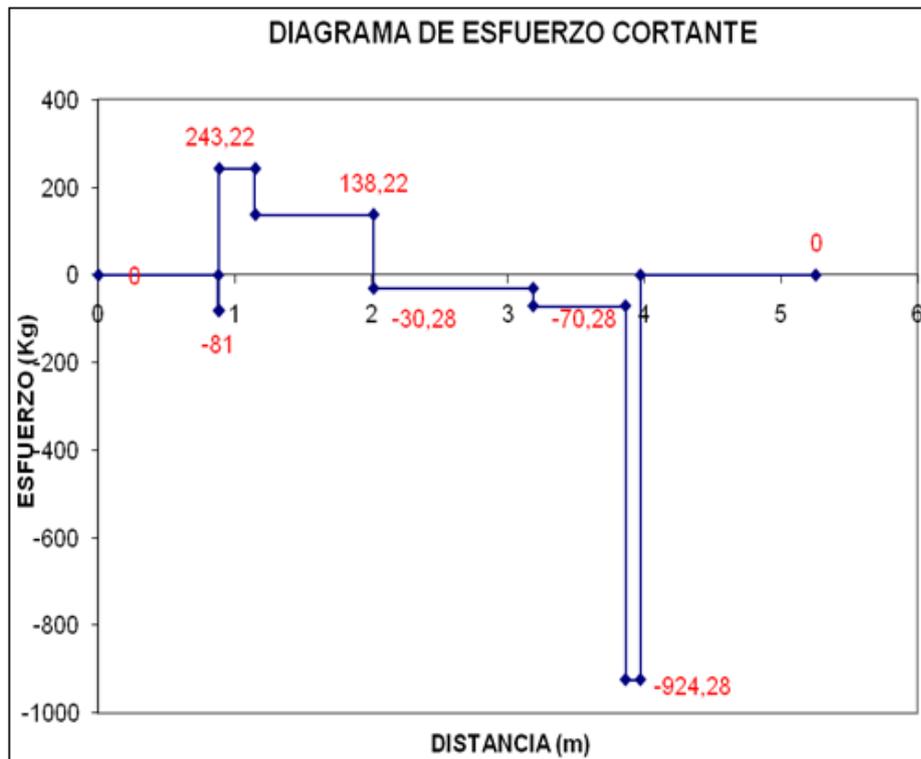
- Reacciones en los Apoyos.

Rueda Delantera RD= 324,22 Kg

Rueda Posterior RP= 924,28 Kg

-Diagrama de Esfuerzos Cortantes gráfico 2.11.

Gráfico 2.11. Diagrama de Esfuerzos Cortantes Cuarto Caso.



Fuente: Autores.

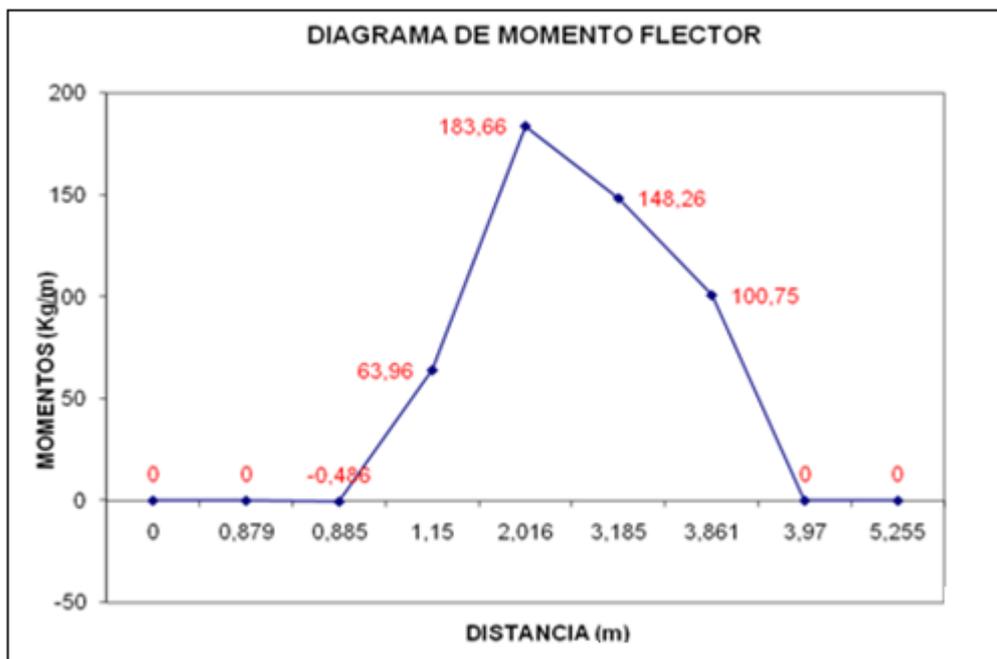
- Diagrama de Momentos Flectores gráfico 2.12.

Cuadro 2.15. Tabla Distancia-Momento Vehículo con Sobrecarga.

DISTANCIA -m-	MOMENTO -Kgm-
0	0
0,879	0
0,885	-0,48
1,15	63,96
2,016	183,66
3,185	148,26
3,861	100,75
3,97	0
5,255	0

Fuente: Autores.

Gráfico 2.12. Diagrama Momento Flector Cuarto Caso.



Fuente: Autores.

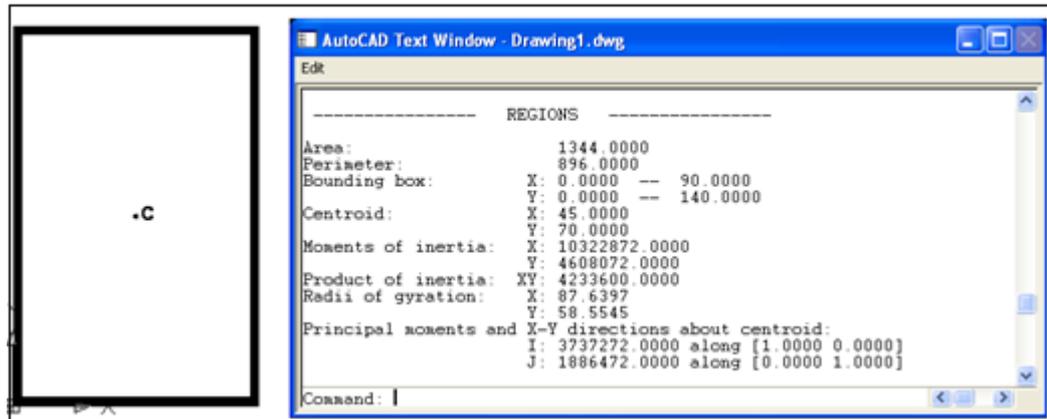
2.7 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Es necesario primeramente para el cálculo del coeficiente de seguridad conocer el momento flector máximo en cada uno de los casos, así como también la ubicación

del mismo sobre la estructura, para de esta manera graficar la geometría del perfil en este punto.

Las dimensiones y momento de inercia del perfil utilizado en la estructura se indica en el gráfico 2.13.

Gráfico 2.13 Geometría del Perfil.



Fuente: Autores.

La fórmula utilizada para este cálculo es la siguiente:

$$\eta = \frac{(I \times \sigma_{adm})}{(M \max \times y)} \quad [2.4]$$

Donde:

η = Factor de Seguridad.

I = Momento de Inercia (mm^4).

σ_{adm} = Esfuerzo Admisible (Kg/mm^2).

$M \max$ = Momento Flector Máximo (Kg mm).

y = Distancia del Centroide a la Fibra más lejana (mm).

El esfuerzo admisible del chasis debe ser considerado en el rango de 16 a 20 Kg/mm^2 , para este caso se utiliza el valor más bajo logrando de esta manera obtener el factor de seguridad mínimo.

En el siguiente cuadro se indica los resultados obtenidos para cada caso.

Cuadro 2.16 Resultados del Factor de Seguridad.

Caso	Momento de Inercia -mm ⁴ -	Esfuerzo Admisible -Kg/mm ² -	Momento Flector Máximo -Kg mm-	Distancia -mm-	Factor de Seguridad
Sin Carga	3737272,00	16,00	151700,00	70,00	5,63
Media Carga	3737272,00	16,00	165680,00	70,00	5,16
Carga Completa	3737272,00	16,00	178470,00	70,00	4,79
Sobrecarga	3737272,00	16,00	183660,00	70,00	4,65

Fuente: Autores.

Como se observa los valores del factor de seguridad en todos sus casos cumplen con criterios de diseño que son tomados en cuenta para el análisis de estructuras es decir “Para η se suele tomar el valor de 3 o 3,6 (Inglaterra).”²

2.8 CONCLUSIONES

Debido a la gran cantidad de componentes suspendidos en la estructura del vehículo se consideraron cinco grupos, los cuales fueron descritos uno por uno con su respectiva designación, representados cada uno de estos como una fuerza puntual sobre el chasis, esto se realizó con el único fin de facilitar los cálculos realizados en el desarrollo del capítulo.

Para conocer la estabilidad del vehículo en sus diferentes condiciones de carga planteadas, se calculó las coordenadas del centro de gravedad en las que se pudo observar el desplazamiento que va a tener el mismo si modificamos la magnitud de la carga transportada; al realizar un análisis de los resultados y considerando parámetros de estabilidad se concluye que su ubicación es razonable para cada caso.

² CASCAJOSA Manuel. Ingeniería de Vehículos. 2^{da} Edición. España. Editorial Tebar 2000. 546p. Página 201.

Los diagramas de momento flector y esfuerzo cortante ayudan a conocer la magnitud de los esfuerzos a los que está sometido el chasis en distintas ubicaciones a lo largo del mismo, esto permite ubicar el punto donde actúa el momento flector máximo considerado como crítico en el análisis y que es fundamental para el cálculo del coeficiente de seguridad.

Los resultados obtenidos en los factores de seguridad en las diferentes condiciones indican que su valor está en un rango aceptable, debido a que se encuentran sobre el límite requerido como factor de seguridad que para el caso de estructura de vehículos es -3-.

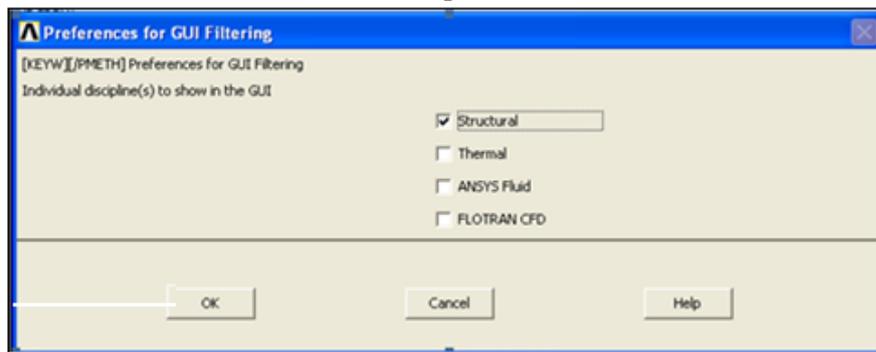
CAPÍTULO III

MANEJO DEL SOFTWARE

3.1 PREPROCESO

3.1.1 Construcción de la Geometría Primeramente se define el tipo de análisis que se va a realizar, en el menú principal se selecciona la opción Preferences, a continuación en el cuadro de diálogo que se indica en el gráfico 3.1 se escoge la opción Structural y se presiona OK.

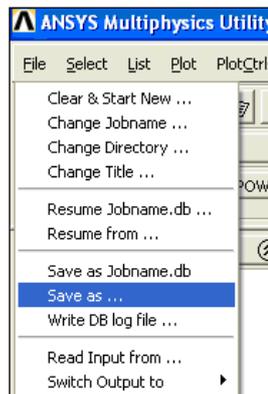
Gráfico 3.1. Tipo de Análisis.



Fuente: Autores.

A continuación es importante guardar el proyecto con el nombre de estructura.db ya que por defecto el programa lo guarda con el nombre de jobname.db gráfico 3.2.

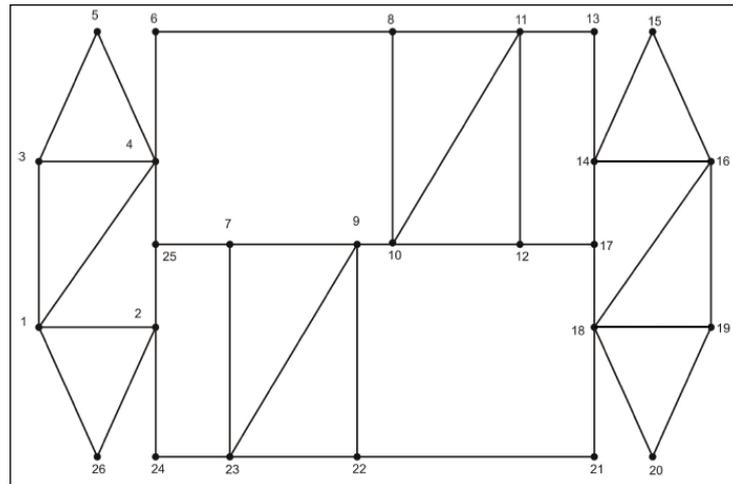
Gráfico 3.2. Ventana de Guardar el Proyecto.



Fuente: Autores.

Para analizar los esfuerzos de Von Mises del chasis al aplicar cargas, se debe primero, realizar un modelo de líneas en 3D gráfico 3.3 que representan el eje neutro de la estructura. Es recomendable para optimizar el mallado omitir detalles innecesarios al momento de su construcción como por ejemplo geometrías complejas, las mismas que pueden ocasionar errores al momento generar la malla.

Gráfico 3.3. Diseño de la Estructura.



Fuente: Autores.

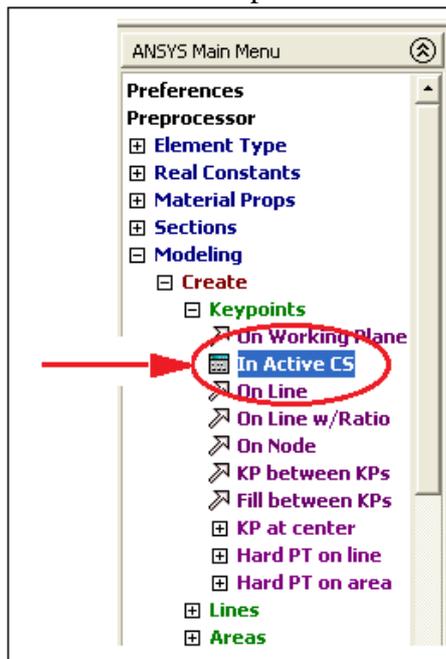
Este modelo de chasis construido esquemáticamente, consta de 26 nodos -puntos donde se unen los perfiles-, como se puede observar en el gráfico 3.3 la unión de estos genera una estructura sencilla, la cual podrá ser utilizada para realizar un análisis estructural. Cada uno de estos nodos posee las siguientes coordenadas (x,y,z) .

- 1** (0, 0, -234)
- 2** (330, 0, -234)
- 3** (0, 0, 234)
- 4** (330, 0, 234)
- 5** (165, 0, 600)
- 6** (330, 0, 600)
- 7** (540, 0, 0)
- 8** (1000, 0, -600)
- 9** (900, 0, 0)
- 10** (1000, 0, 0)

- 11 (1360, 0, -600)
- 12 (1360, 0, 0)
- 13 (1570, 0, -600)
- 14 (1570, 0, 234)
- 15 (1735, 0, 600)
- 16 (1900, 0, 234)
- 17 (1570, 0, 0)
- 18 (1570, 0, -234)
- 19 (1900, 0, -234)
- 20 (1735, 0, -600)
- 21 (1570, 0, 600)
- 22 (900, 0, 600)
- 23 (540, 0, 600)
- 24 (330, 0, -600)
- 25 (330, 0, 0)
- 26 (165, 0, -600)

Se establecen los puntos en el espacio, que representan los nodos para luego unirlos mediante líneas, en el menú principal se selecciona, preprocessor/ modeling/ create/ keypoints/ in active cs gráfico 3.4.

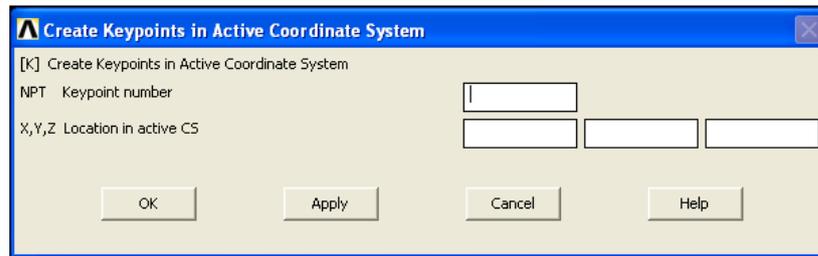
Gráfico 3.4. Ventana para Crear Puntos.



Fuente: Autores.

Obteniendo el siguiente cuadro de diálogo gráfico 3.5.

Gráfico 3.5. Ingreso de Coordenadas de los Puntos.

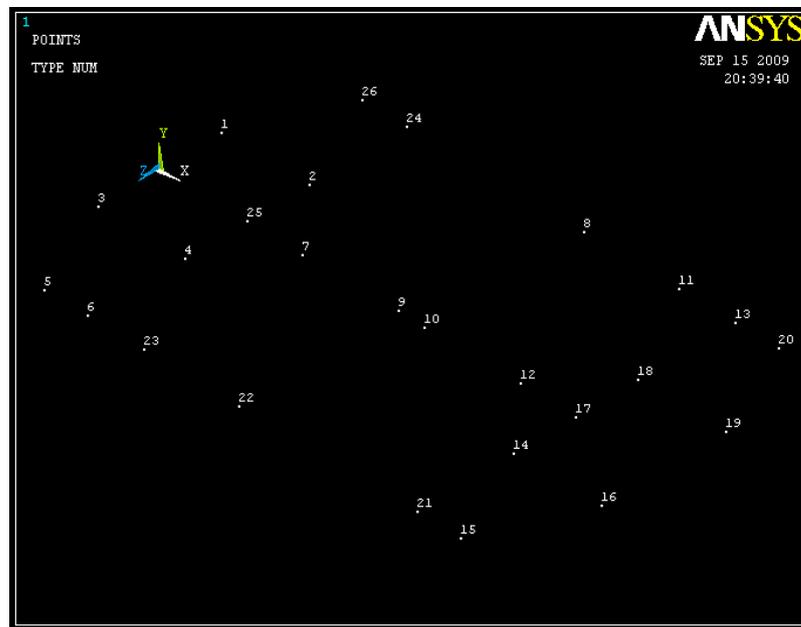


Fuente: Autores.

En la primera casilla se introduce el número del punto y en las tres casillas inferiores las coordenadas x, y, z. Para introducir el siguiente punto se presiona Apply.

Luego de introducir los nombres y coordenadas de cada punto se obtiene el gráfico 3.6.

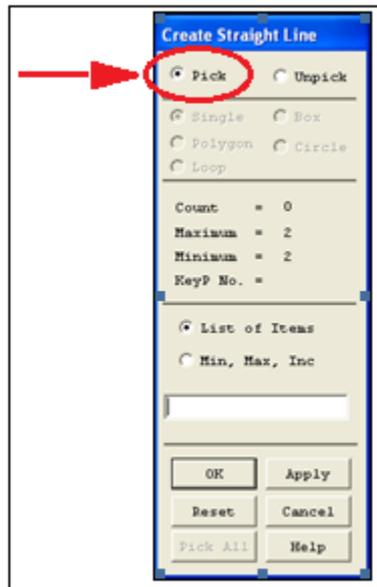
Gráfico 3.6. Visualización de los Puntos Construidos.



Fuente: Autores.

El siguiente paso en la modelación del chasis será unir los puntos, esto se realiza siguiendo la secuencia preprocessor/ modeling/ create/ lines/ lines/ straight line obteniendo el siguiente recuadro gráfico 3.7.

Gráfico 3.7. Ventana para Unir los Puntos.

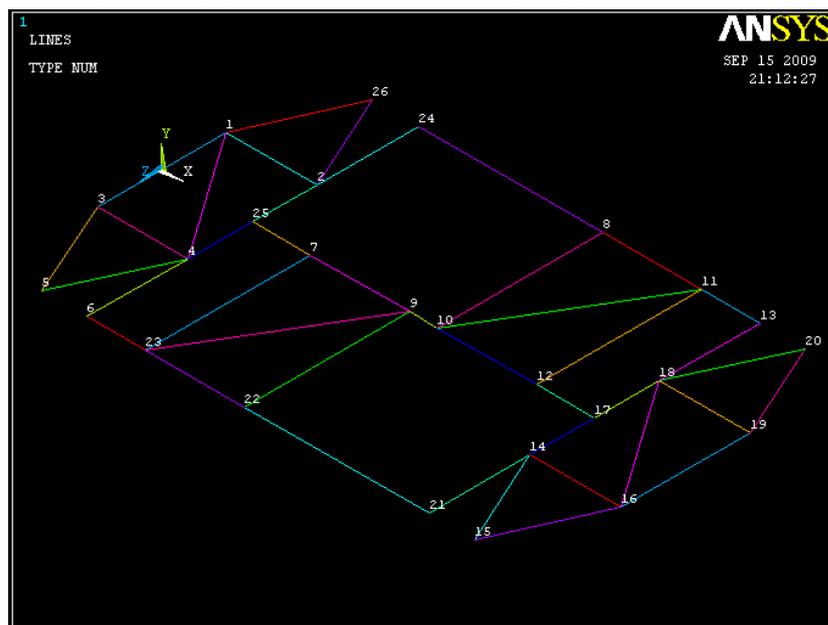


Fuente: Autores.

Se selecciona los puntos que se quiere unir de dos en dos, en este caso serán: 1-2; 2-26; 26-1; 1-3; 3-4; 4-5;5-3; 4-1; 6-4; 4-25; 25-2; 2-24; 24-8; 8-11; 11-13; 8-10; 10-11; 11-12; 13-18; 14-17; 17-18; 14-21; 21-22; 22-23; 23-6; 7-23; 23-9; 9-22; 25-7; 7-9; 9-10; 10-12; 12-17; 14-15; 15-16; 14-16; 16-19; 19-20; 20-18; 18-19; 18-16.

Obteniendo lo siguiente gráfico 3.8.

Gráfico 3.8. Vista de los Puntos Unidos con Líneas.

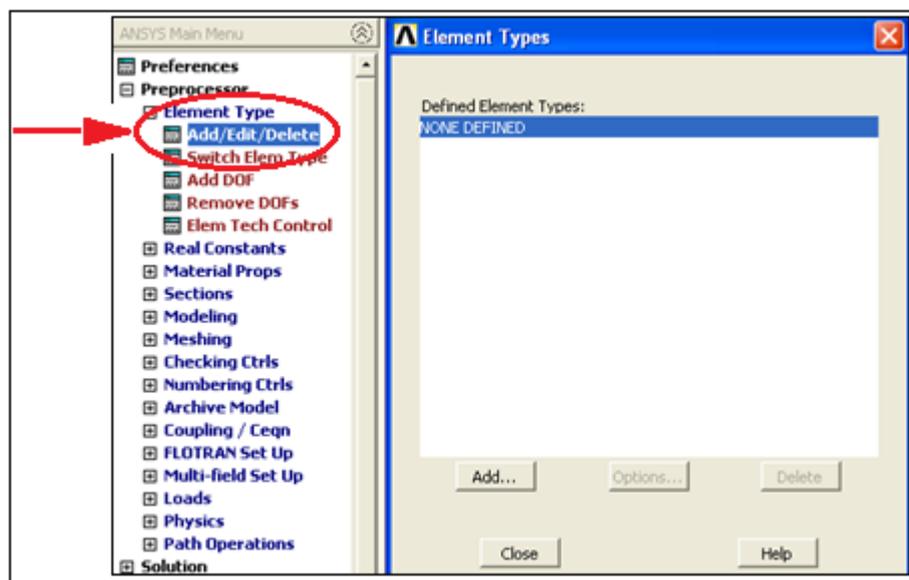


Fuente: Autores.

En el modelo indicado en el gráfico 3.8 cada línea corresponde a un componente del chasis, y se debe asignar el tipo de elemento, las características de la sección transversal y el material.

A continuación se define el tipo de elemento con el que se analiza el chasis, para esto se accede en preprocessor/ element type/ add/edit/delete, en el cuadro de diálogo abierto se muestra los tipos de elementos agregados. Para agregar un elemento se presiona el botón Add gráfico 3.9.

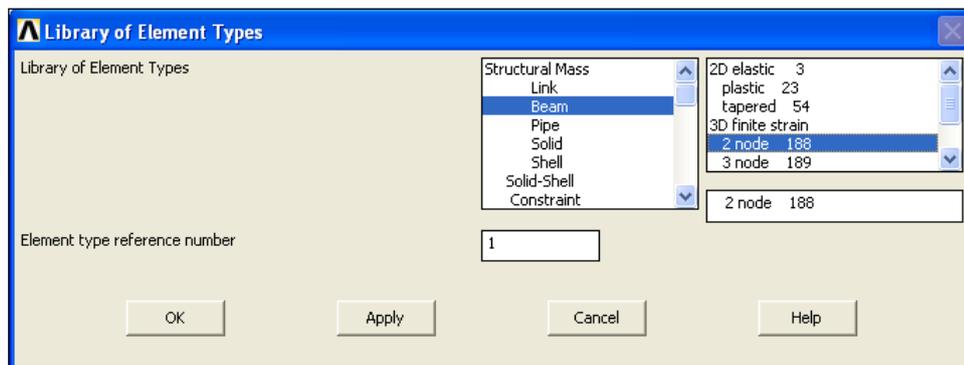
Gráfico 3.9. Visualización del Tipo de Elemento Utilizado.



Fuente: Autores.

Se abre la ventana en la cual se puede seleccionar el tipo de elemento gráfico 3.10, en este caso se escoge la opción beam/ 2 node 188/ OK.

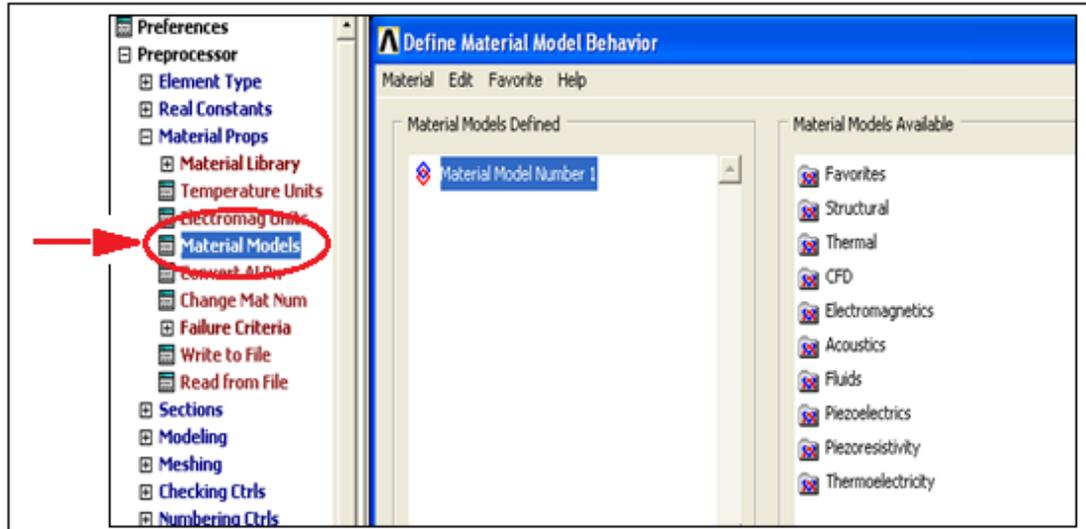
Gráfico 3.10. Ventana para Asignar el Tipo de Elemento.



Fuente: Autores.

Para asignar las propiedades del material se selecciona preprocessor/ material props/ materialmodels, se obtiene la ventana para definir las propiedades del material gráfico 3.11.

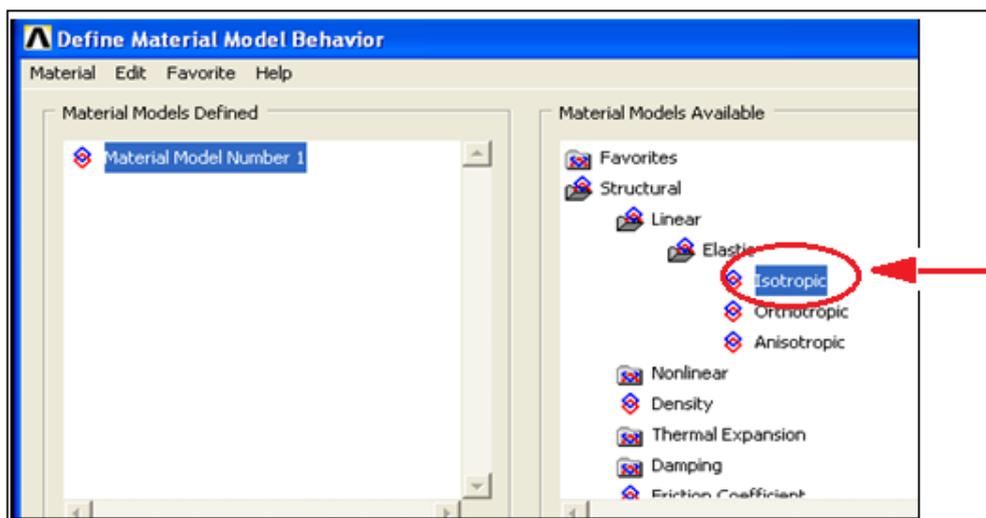
Gráfico 3.11. Ventana para Asignar las Características del Material.



Fuente: Autores.

En la casilla izquierda se selecciona Material Model Number 1; en la derecha structural/ linear/ elastic/ Isotropic gráfico 3.12.

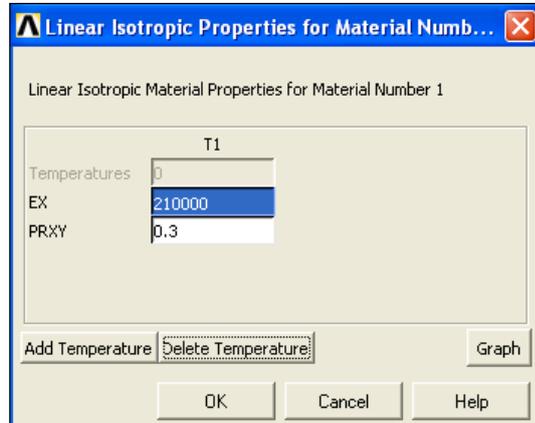
Gráfico 3.12. Ventana para Asignar las Características del Material.



Fuente: Autores.

Al momento de escoger Isotropic con doble clic se despliega la ventana donde se ingresa los datos del material, $E = 210000$ MPa y $\nu = 0.3$ gráfico 3.13.

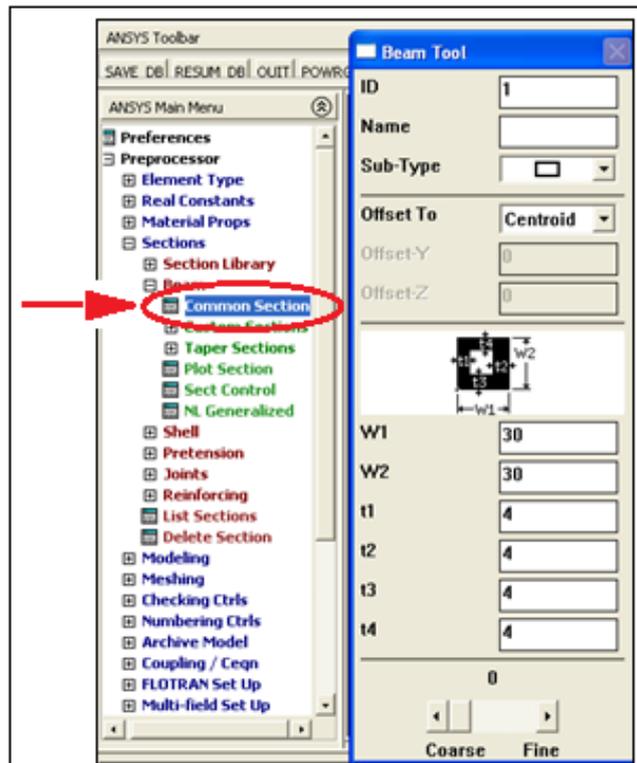
Gráfico 3.13. Ingreso de Propiedades del Material.



Fuente: Autores.

El siguiente paso es generar la sección transversal para esto se ingresa preprocessor/ sections/ beam/ common sections, en la ventana desplegada denominada Beam Tool se puede seleccionar la forma y dimensiones de la sección transversal gráfico 3.14, ingresados todos los datos se presiona OK.

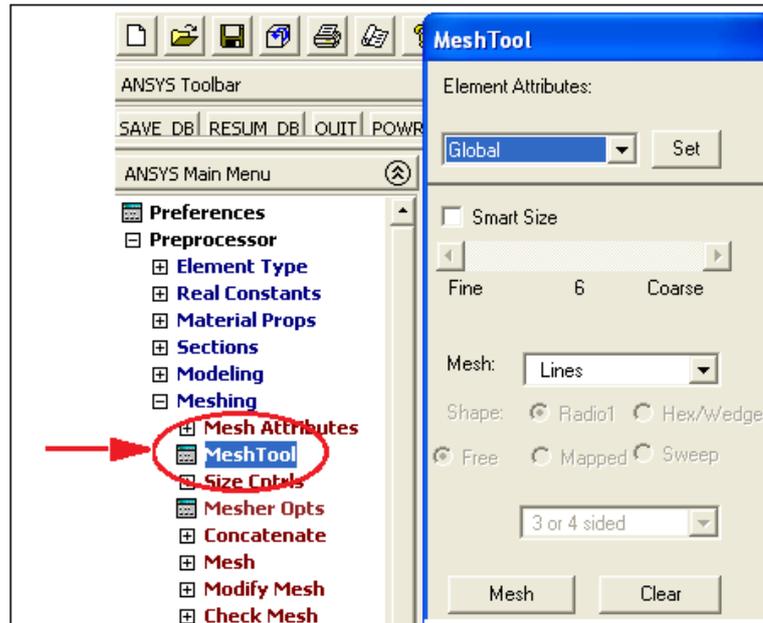
Gráfico 3.14. Generación de la Sección Transversal.



Fuente: Autores.

3.1.2 Generación de la Malla A continuación se procede al mallado de la estructura se selecciona preprocessor/ meshing/ meshtool, obteniendo la ventana Meshtool en la cual se presiona la opción mesh, gráfico 3.15.

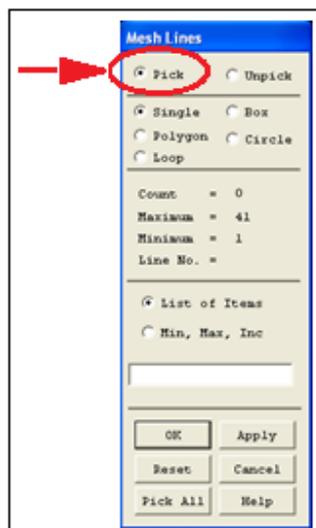
Gráfico 3.15. Generación de la Malla.



Fuente: Autores.

En la ventana de diálogo que se abre luego de escoger la opción mesh, se selecciona pick all, de esta forma se genera el mallado de todos los elementos del chasis, gráfico 3.16.

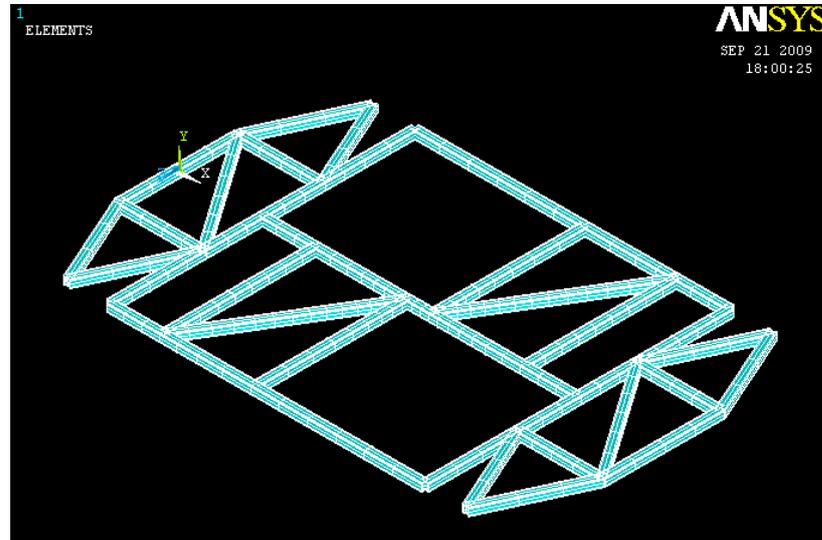
Gráfico 3.16. Selección de Líneas a Mallar.



Fuente: Autores.

En el gráfico 3.17 se ilustra la estructura mallada.

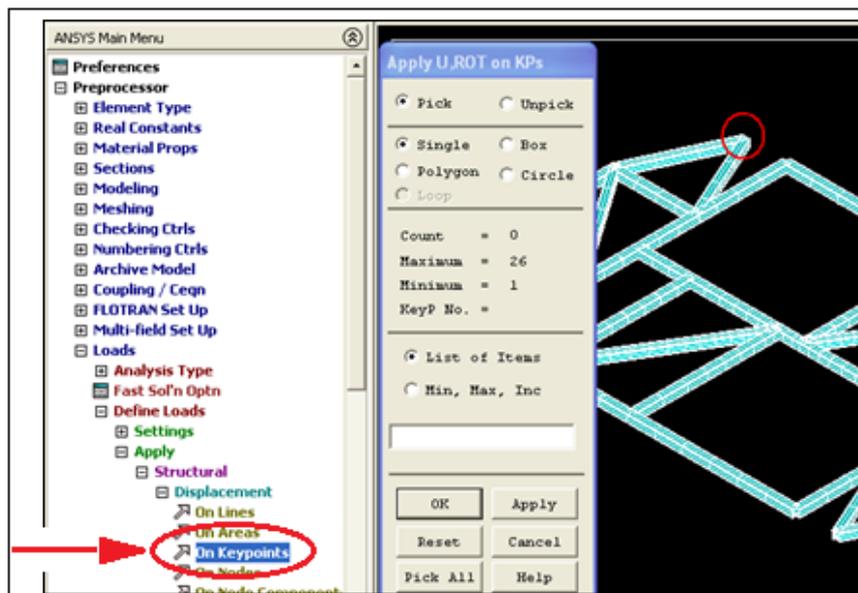
Gráfico 3.17. Estructura Mallada.



Fuente: Autores.

3.1.3 Definición de las Condiciones de Contorno La última etapa del preproceso es imponer las condiciones de carga y de contorno al chasis, donde se aplicarán las fuerzas y empotramientos. Para aplicar las condiciones de frontera se accede a preprocessor/ loads/ defineloads/ apply/ structural/ displacement/ on key points. Se selecciona el punto indicado en el gráfico 3.18 y se presiona OK.

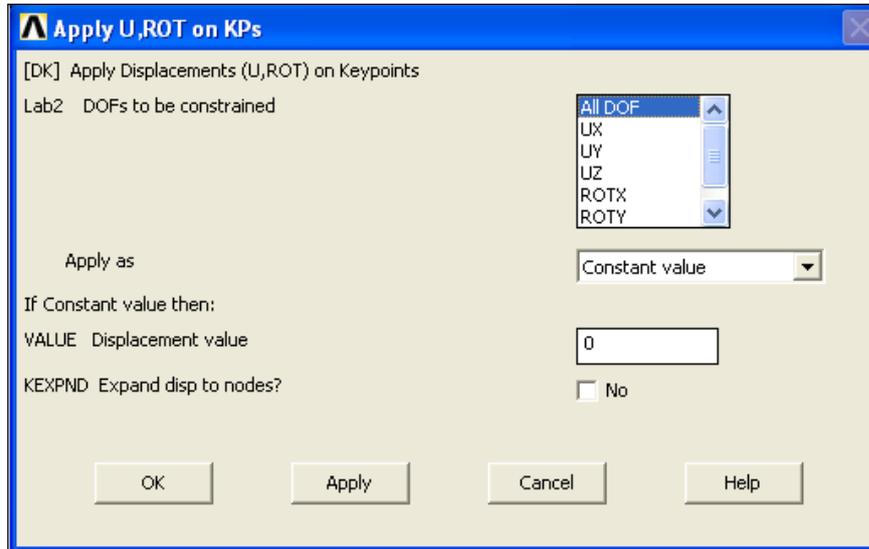
Gráfico 3.18. Definición de Condiciones de Carga y Contorno.



Fuente: Autores.

Ahora se despliega la ventana en la que se escoge los grados de libertad, en la primera opción mostrada en la pantalla se selecciona ALL DOF, en la siguiente casilla CONSTANT VALUE, luego OK, gráfico 3.19.

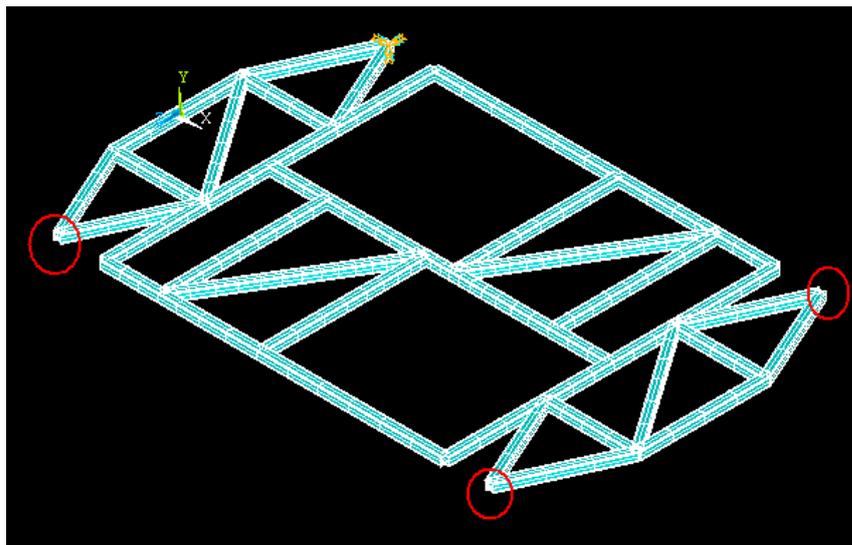
Gráfico 3.19. Definición de Grados de Libertad.



Fuente: Autores.

El proceso mencionado anteriormente se repite para los tres puntos restantes indicados en el gráfico 3.20, con la diferencia que se restringe UY.

Gráfico 3.20. Definición Grados de Libertad para los Puntos Restantes.



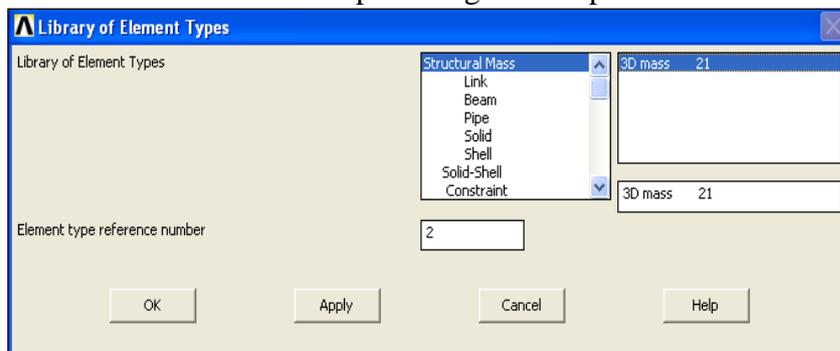
Fuente: Autores.

Ahora se aplican las cargas que soporta el chasis, para esto se las define con los siguientes valores:

- Motor y Caja 210 Kg
- Conductor 90 Kg
- Pasajero 95 Kg
- Maletero 300 Kg

Se necesita crear un nuevo tipo de elemento ingresando a preprocessor/ element type/ add/edit/delete; se abre la ventana en la cual se puede seleccionar el tipo de elemento Structural Mass, y en la siguiente opción 3D mass 21 gráfico 3.21.

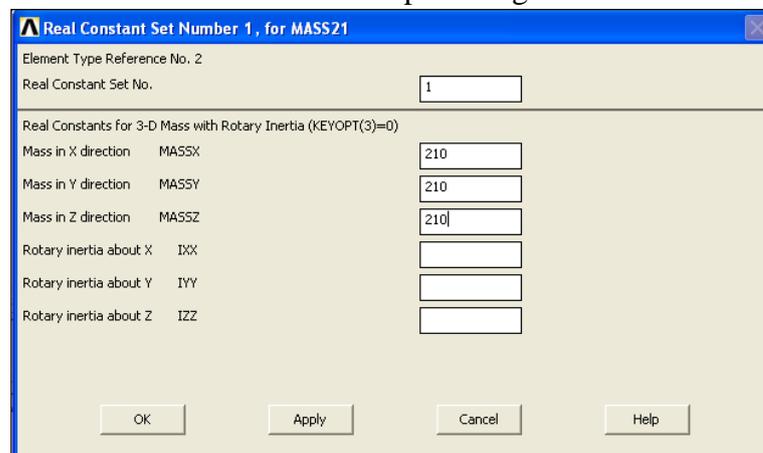
Gráfico 3.21. Ventana para Asignar el Tipo de Elemento.



Fuente: Autores.

Para cargar las constantes se ingresa a preprocessor/ real constants/ add/ edit/ delete, se adjunta el elemento Mass 21. En la ventana desplegada se debe introducir la denominación y el valor de cada masa en sus tres direcciones, gráfico 3.22.

Gráfico 3.22. Ventana para Asignar el Peso.



Fuente: Autores.

Se generan puntos los cuales se relacionan con las masas creadas.

27 (165, 0, 0)

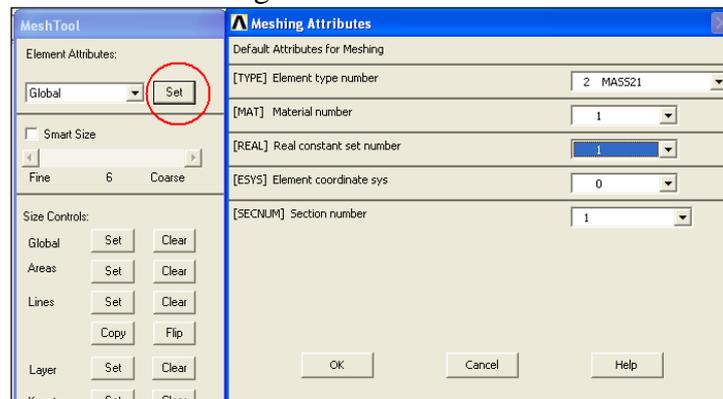
28 (1180, 50, -300)

29 (720, 50, 300)

30 (1735, 50, 0)

Para aplicar las condiciones de masa a estos puntos se despliega la ventana Mesh Tool en la cual se selecciona la opción Set, en el cuadro de diálogo se asigna tipo de elemento y número de la constante, gráfico 3.23.

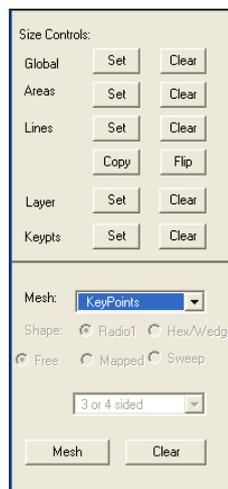
Gráfico 3.23. Ingreso de las Condiciones de Masa.



Fuente: Autores.

Ahora en la ventana Mesh Tool en la opción de mallado se selecciona Keypoints y se presiona mesh para seleccionar el punto asignado a la constante número 1, gráfico 3.24.

Gráfico 3.24. Ventana de Herramientas para el Mallado.

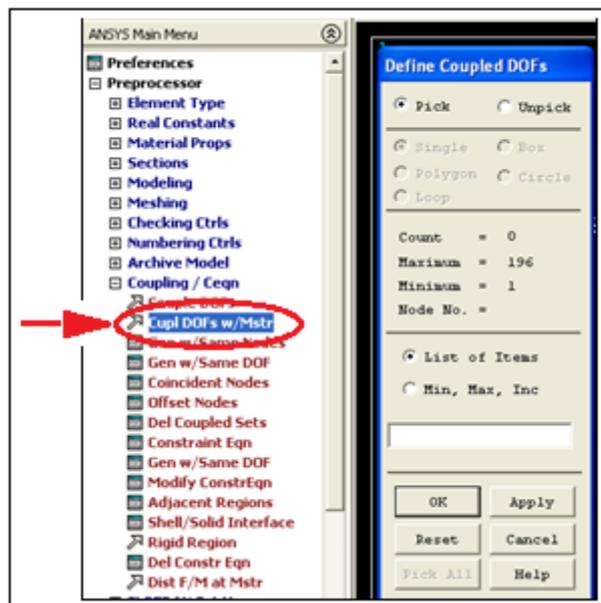


Fuente: Autores.

Este procedimiento se lo repite para todas las constantes, considerando el número de la constante y la posición del punto.

Como siguiente paso se ubican los nodos donde físicamente se unirán los componentes al chasis, es decir asignar los grados de libertad de la masa con los puntos de anclaje mencionados, esto se realiza de la siguiente manera preprocessor/coupling/Ceqn/ cupl DOFs w /Mstr, gráfico 3.25.

Gráfico 3.25. Selección de los Puntos de Anclaje.



Fuente: Autores.

Se selecciona primero el punto donde se encuentra la masa y luego los cuatro nodos donde se empotra. Este procedimiento se repite para las cuatro masas, gráfico 3.26.

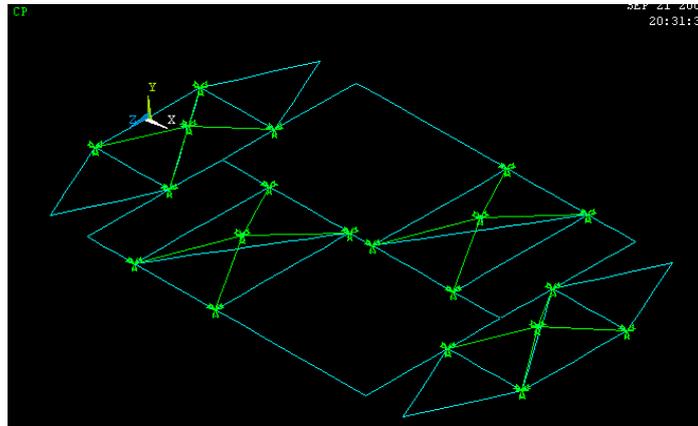
Gráfico 3.26. Definición de los Grados de Libertad.



Fuente: Autores.

Consiguiendo la siguiente figura, gráfico 3.27.

Gráfico 3.27. Puntos de Anclaje y Grados de Libertad de las Masas.



Fuente: Autores.

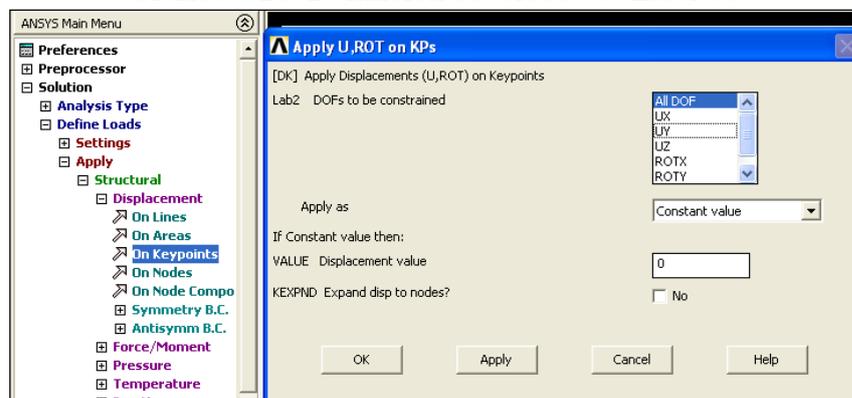
3.2 TIPOS DE ANÁLISIS

3.2.1 Análisis Estático Las condiciones de contorno que se aplicarán en el chasis son las siguientes:

- Se considera un punto de la suspensión empotrado.
- Los restantes se los considera con restricción normal a los desplazamientos.

Para definir dichas condiciones se ingresa en solution/ define loads/ apply/ structural/ displacements/ on keypoints; se obtiene una pantalla en la cual se restringe los grados de libertad. Según las condiciones de contorno al primer punto se le proporciona todos los grados de libertad y a los tres restantes solamente UY, gráfico 3.28.

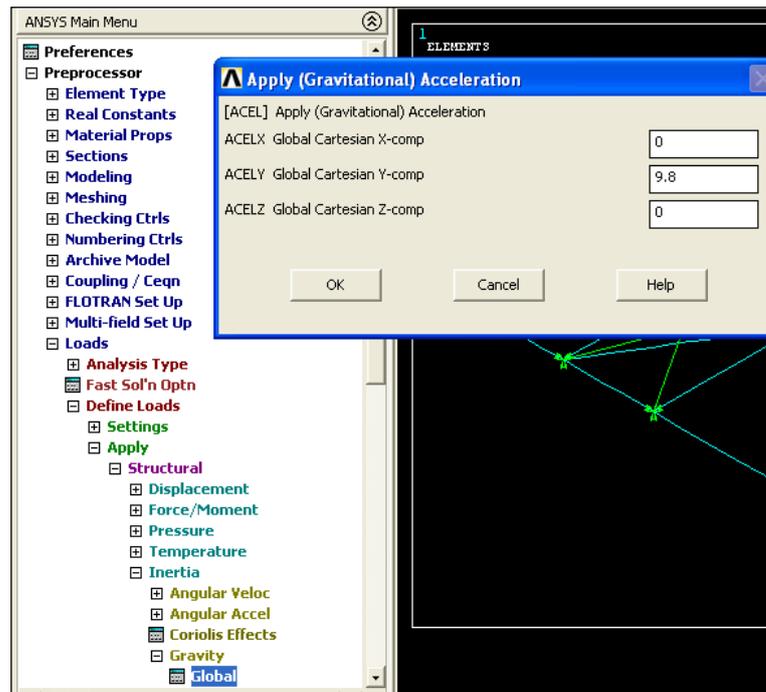
Gráfico 3.28. Definición de Grados de Libertad.



Fuente: Autores.

Para definir el peso propio de las cargas se debe ingresar el valor de la gravedad. Se selecciona preprocessor/ loads/ define loads/ apply/ structural/ inertia/ gravity/ global; en la ventana desplegada se introduce la constante de gravedad en la casilla de la componente en **Y**, gráfico 3.29.

Gráfico 3.29. Aplicación de la Aceleración.



Fuente: Autores.

3.2.2 Análisis Dinámico

3.2.2.1 Frenada en Recta Para poder analizar el comportamiento del chasis en el caso dinámico se realizó pruebas de campo en la camioneta, de estas pruebas se asumieron las siguientes condiciones:

Velocidad de Circulación = 50 Km/h - V_o -

Velocidad final = 0 Km/h - V_f -

Tiempo en el que el vehículo se detiene = 4 s - t -.

Para poder cargar las condiciones a las que se somete el chasis es necesario conocer la desaceleración que experimenta el vehículo, se procede al siguiente cálculo:

$$a = \frac{(V_o - V_f)}{t} \quad [3.1]$$

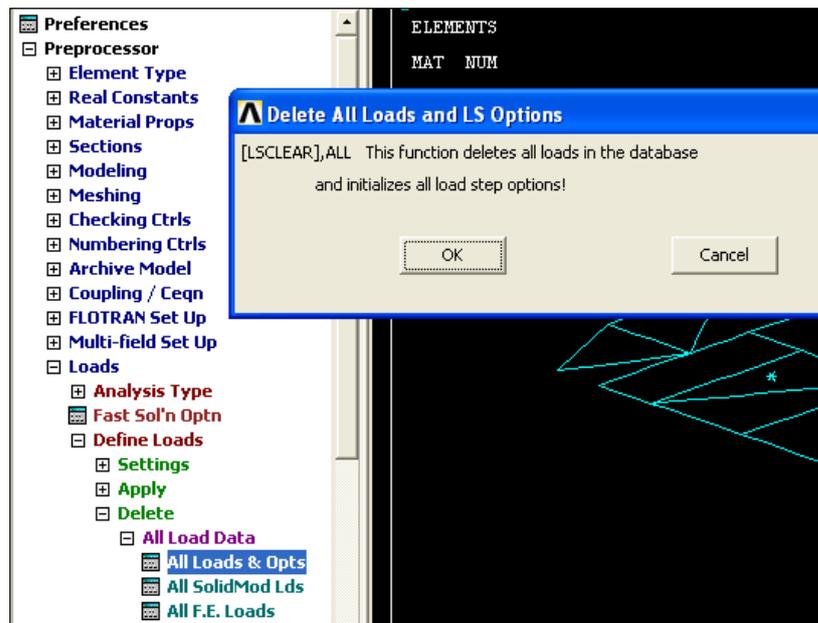
$$a = \frac{(13.88 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s})}{4 \text{ s}}$$

$$a = 3.47 \text{ m/s}^2$$

Esta desaceleración se aplica en el modelo en sentido contrario a la marcha componente X, es decir, en sentido que trate de expulsar a los pasajeros fuera del vehículo. Para que toda la energía de la frenada se transmita al chasis, se plantea como restricción todos los grados de libertad en los apoyos traseros y delanteros de la suspensión, de esta manera se consigue un comportamiento rígido, permitiendo que la estructura experimente todos los esfuerzos y desplazamientos a los que puede estar sometida.

Lo primero que se realiza es borrar la fuerza de gravedad. Para esto se ingresa preprocessor/ loads/ define loads/ delete/ all load data/ all loads & opts OK, gráfico 3.30.

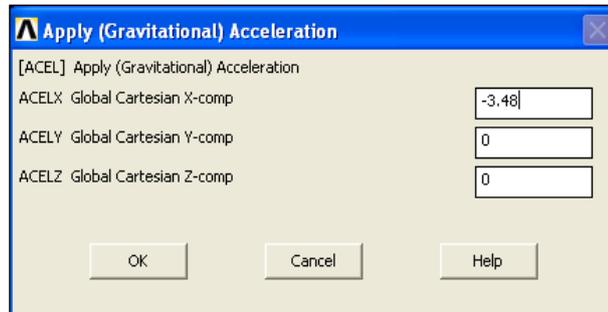
Gráfico 3.30. Restricción de los Grados de Libertad.



Fuente: Autores.

Luego se redefinen las condiciones que se imponen en los apoyos de la suspensión así como también la desaceleración que experimenta la estructura, gráfico 3.31.

Gráfico 3.31. Aplicación de la Desaceleración.



Fuente: Autores.

3.2.2.2 Aceleración en Recta Para analizar el comportamiento de la estructura en este caso, se imponen las siguientes condiciones las mismas que se determinó en una prueba real de manejo:

Velocidad Inicial = 0 Km/h - V_o -

Velocidad Final = 50 Km/h - V_f -

Tiempo de Aceleración = 6 s - t -.

Para cargar la condición de aceleración a la que está sometido el chasis, se procede al siguiente cálculo:

$$a = \frac{(V_f - V_o)}{t} \quad [3.2]$$

$$a = \frac{(13.88 \frac{m}{s} - 0 \frac{m}{s})}{6s}$$

$$a = 2,31 \frac{m}{s^2}$$

De esta manera se concluye el preproceso, obteniendo el modelo listo para su análisis.

3.3 PROCESO

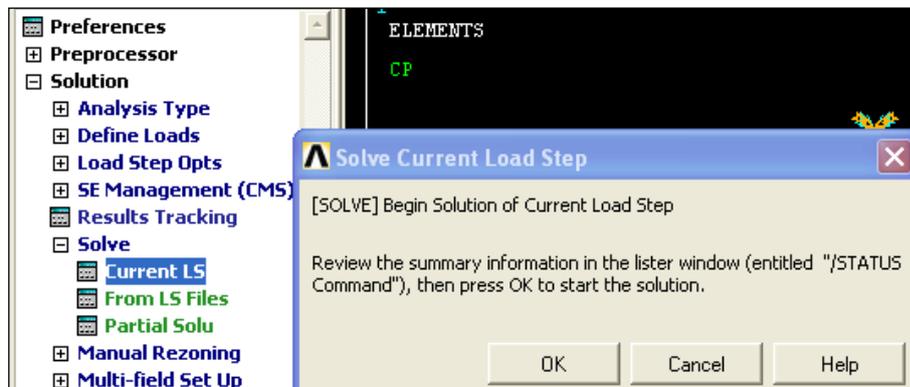
El proceso de análisis estructural utiliza diferentes modelos matemáticos para su solución en función de las condiciones de contorno a las que se somete la estructura, para obtener resultados cercanos a la realidad la selección de este modelo es muy importante. Además se debe conocer los procesos elementales con los que trabajan estos tipos de programas para poder resolver el problema de manera adecuada.

3.4 POST PROCESO

Este incluye el análisis de los resultados obtenidos al observar el comportamiento de la estructura una vez que se han cargado todas las condiciones de contorno.

3.4.1 Análisis Estático Para realizar el análisis estático se ingresa a solution/ solve/ current LS, en la ventana que se observa en la pantalla se presiona OK, gráfico 3.32.

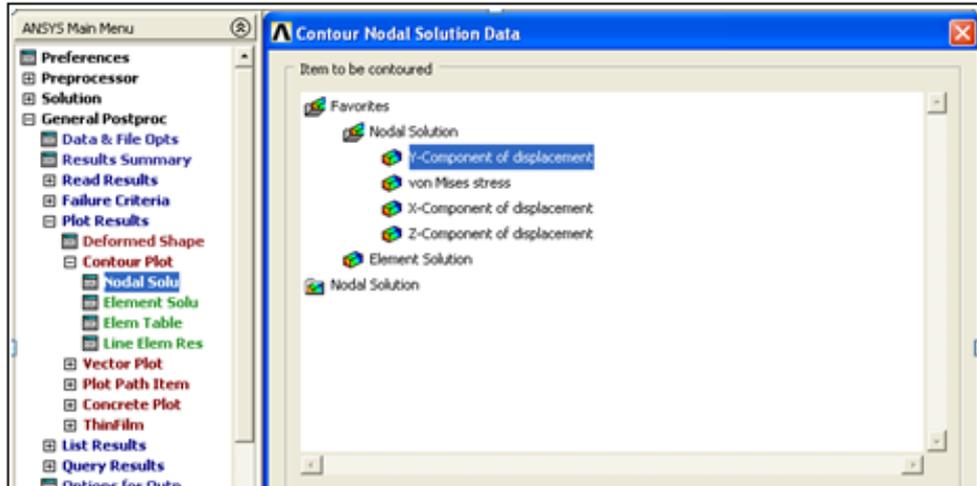
Gráfico 3.32.Solución Estática.



Fuente: Autores.

Para observar las deformaciones se abre el siguiente menú General Postproc/ Plot Results/ Contour Plot/ Nodal Solu, en la ventana desplegada se selecciona la opción Y-Component of displacement, gráfico 3.33.

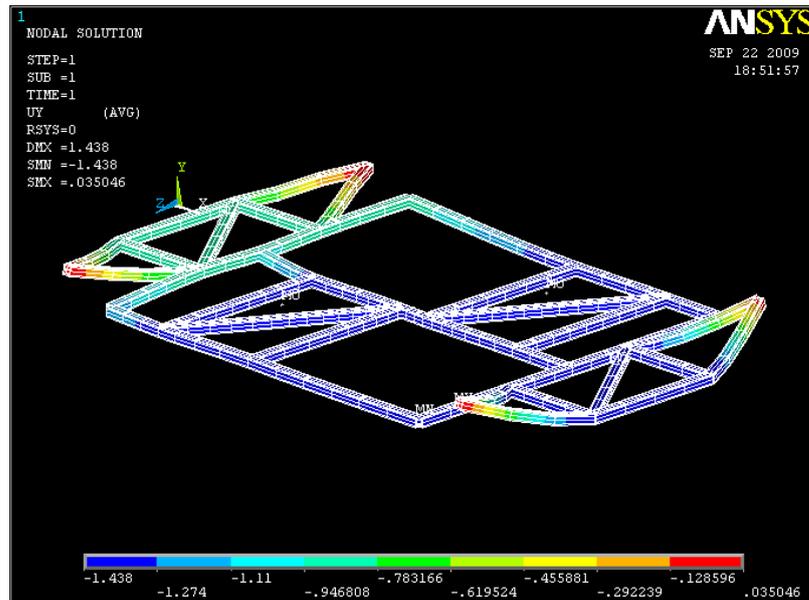
Gráfico 3.33. Elección de la Solución.



Fuente: Autores.

En el gráfico 3.34 se puede observar las deformaciones en el eje Y a las que está sometida la estructura.

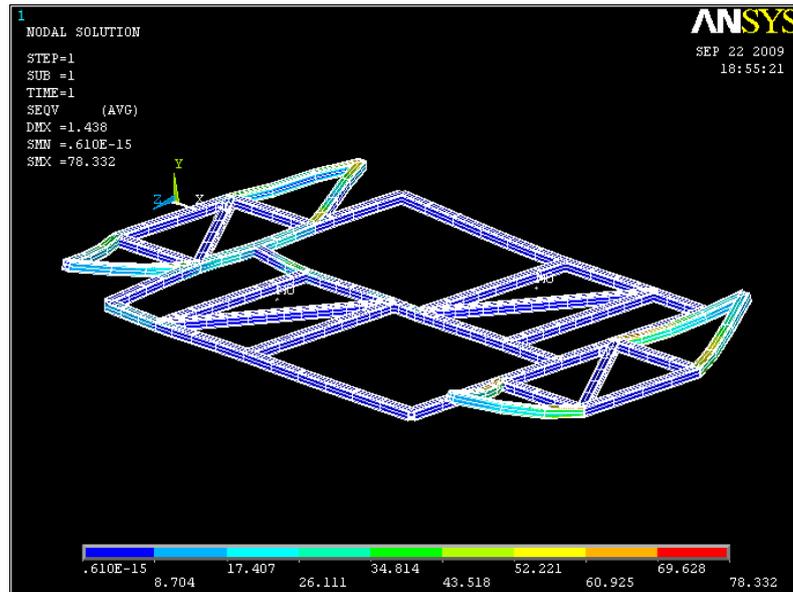
Gráfico 3.34. Ventana de Resultados.



Fuente: Autores.

Si en la opción Nodal Solution se modifica el tipo de análisis por Von Mises Stress se observa el gráfico 3.35, que involucra los esfuerzos a los que está sometido el chasis.

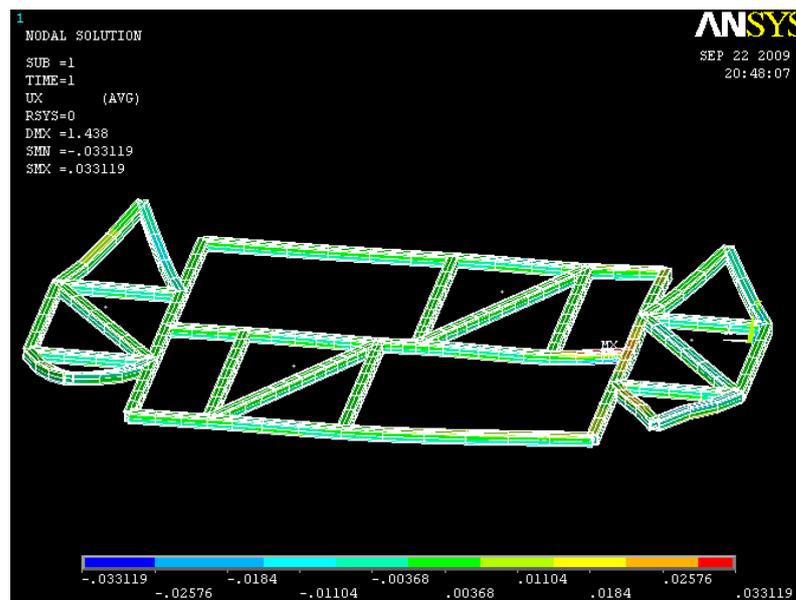
Gráfico 3.35. Ventana de Resultados.



Fuente: Autores.

3.4.2 Análisis Dinámico Una vez que se modificó las condiciones antes citadas se procede a observar los resultados obtenidos gráfico 3.36, para esto se dirige a General Postproc/ Plot Results/ Contour Plot/ Nodal Solu, en la ventana desplegada se selecciona la opción Y-Component of displacement.

Gráfico 3.36. Ventana de Resultados.



Fuente: Autores.

Si en la opción Nodal Solution se modifica el tipo de análisis por Von Mises Stress se observa el gráfico 3.37, en la que se muestra los esfuerzos sometidos al chasis.

Gráfico 3.37. Ventana de Resultados.



Fuente: Autores.

3.5 CONCLUSIONES

El análisis dinámico de una estructura se resuelve mediante diferentes modelos numéricos, los cuales con la ayuda del procesador que posee el software discretizan el continuo y este a su vez pueda ser interpretado de forma numérica, también se puede ingresar las diferentes condiciones de contorno a las que se somete el modelo para entender su comportamiento.

Para obtener buenos resultados con la aplicación del programa es necesario que no se considere en la geometría detalles que compliquen el análisis; por otro lado se debe tener en cuenta las condiciones de contorno más importantes es decir las que tengan influencia directa con los resultados.

Para la simulación es necesario definir los puntos en los cuales se apoya el chasis, restringiendo todos los grados de libertad que pueden tener; los puntos considerados

fijos son todos aquellos en los que se sujeta el sistema de suspensión ya sea delantera como posterior.

Entre las condiciones de contorno impuestas, para el análisis estático de la estructura no se debe considerar el valor de la aceleración; por otro lado en el análisis dinámico se consideran dos magnitudes una de aceleración y otra de desaceleración las mismas que tienen sentido de desplazamiento sobre el eje X. Esto permite simular la inercia de las masas que se encuentran suspendidas en el chasis, las cuales según su magnitud pueden modificar el resultado del análisis.

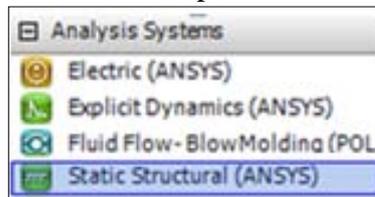
CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DINÁMICO Y ESTÁTICO DEL CHASIS

4.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

4.1.1 Tipo de Análisis Se define el tipo de análisis que se va a realizar que en este caso es un análisis estructural.

Gráfico 4.1. Tipo de Análisis.



Fuente: Autores.

4.1.2 Definición del Material El material utilizado para el análisis del chasis se encuentra en la librería de materiales estructurales que posee el programa bajo la denominación de Structural Steel, el mismo que posee las siguientes características.

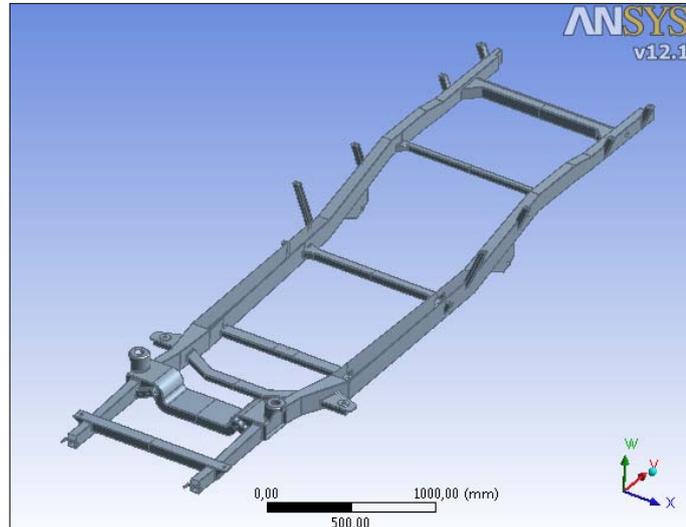
Gráfico 4.2. Propiedades del Material.

Properties of Outline Row 12: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Fuente: Autores.

4.1.3 Importación de la Geometría El esquema del chasis utilizado para el análisis se lo realizó en un Software que ayuda a la generación de Gráficos en 3D.

Gráfico 4.3. Esquema del Chasis.



Fuente: Autores.

4.1.4 Mallado de la Estructura Esta se realizó con la opción de mallado por defecto, este tipo de mallado ajusta el tamaño del elemento en las zonas que se consideran de mayor riesgo para sufrir algún tipo de falla mecánica de la estructura; a continuación se detalla las características que posee la malla por defecto.

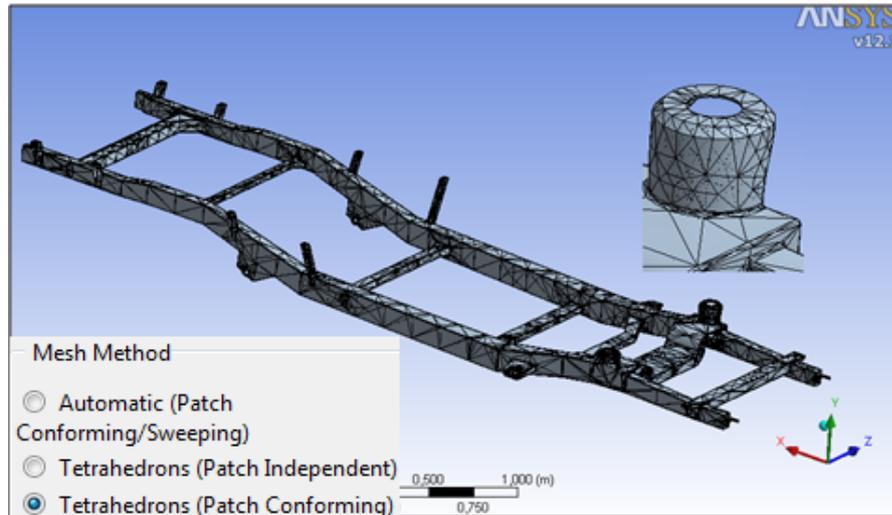
Gráfico 4.4. Características de la Malla.

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	1
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	4,8839e-007 m
Inflation	
Advanced	
Pinch	
Statistics	
Nodes	54059
Elements	29045
Mesh Metric	None

Fuente: Autores

En el siguiente gráfico 4.5 se puede observar la malla con elementos tetraédricos - Véase 1.7.4-, que se generó en la estructura.

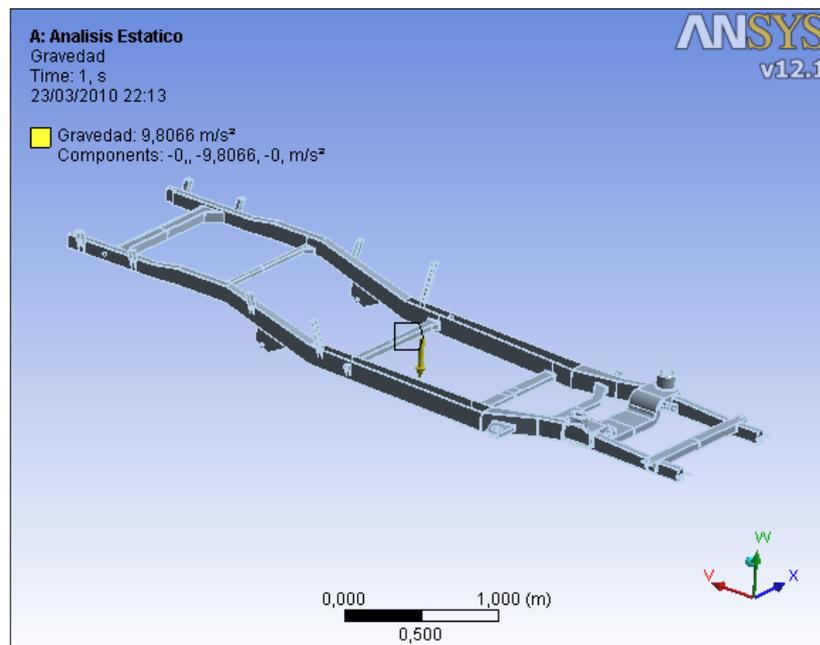
Gráfico 4.5. Estructura Mallado.



Fuente: Autores.

4.1.5 Condiciones de la Gravedad Al introducir la gravedad en la coordenada Y, el Software considera el peso propio de la estructura como otra condición de contorno, de esta manera el análisis se da en un contexto más real.

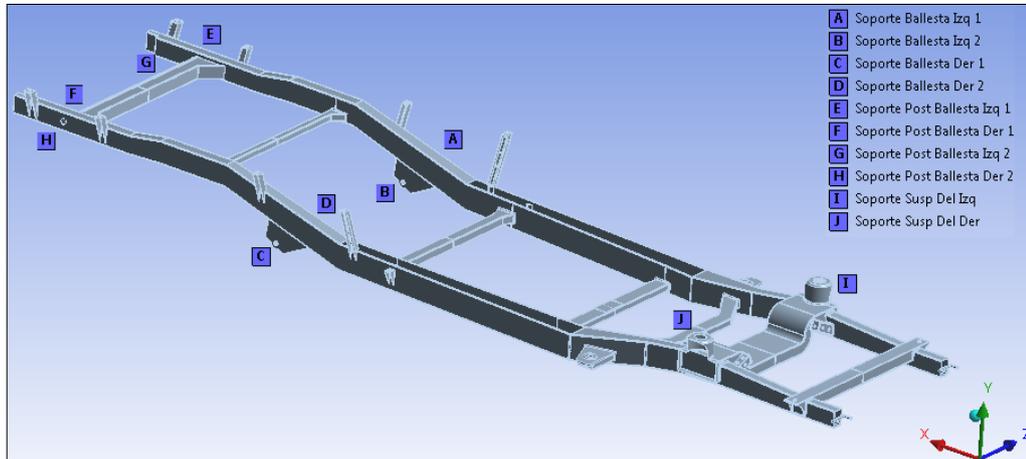
Gráfico 4.6. Introducción de la Gravedad.



Fuente: Autores.

4.1.6 Ubicación de Empotramientos Estos puntos de anclaje del chasis poseen restricción de movimiento en todas las direcciones en el gráfico 4.7 se puede observar todos los puntos que fueron considerados.

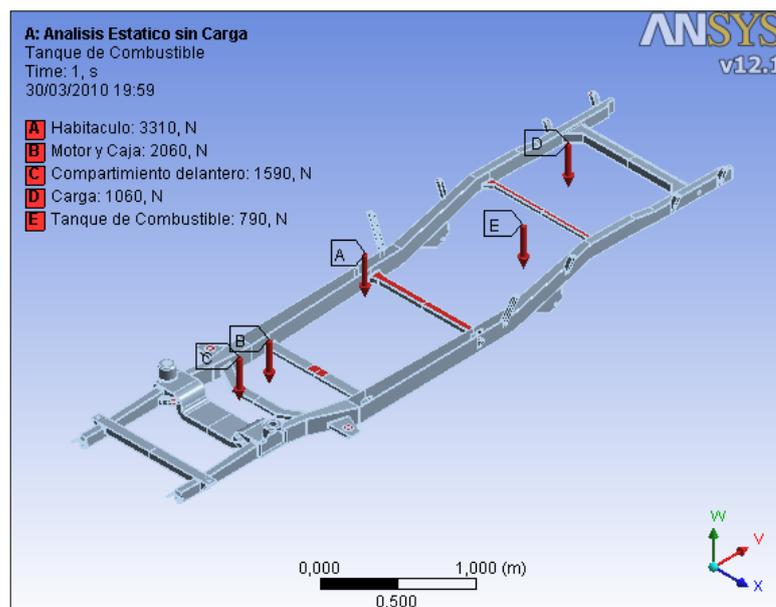
Gráfico 4.7. Ubicación de los Empotramientos.



Fuente: Autores.

4.1.7 Ubicación de Cargas Estas se ubicarán sobre el chasis en el centro de gravedad de cada grupo correspondiente, antes de esto se asignan los puntos en los cuales se va a apoyar cada carga; su denominación fue definida anteriormente gráfico 4.8.

Gráfico 4.8. Ubicación de las Cargas.



Fuente: Autores.

4.1.8 Selección de la Teoría

4.1.8.1 Teoría de Von Mises “Esta teoría es escogida primeramente porque es la que más se ajusta a un análisis real de la estructura; es utilizada para el análisis de materiales de comportamiento dúctil es decir su coeficiente de deformación es mayor o igual a 0,05 en el caso del material empleado para el análisis posee un coeficiente de ductibilidad de 0,213”³. Otro dato que se considera es que la resistencia a la cedencia tenga valores similares ya sea para compresión o tensión.

4.2 ANÁLISIS ESTÁTICO

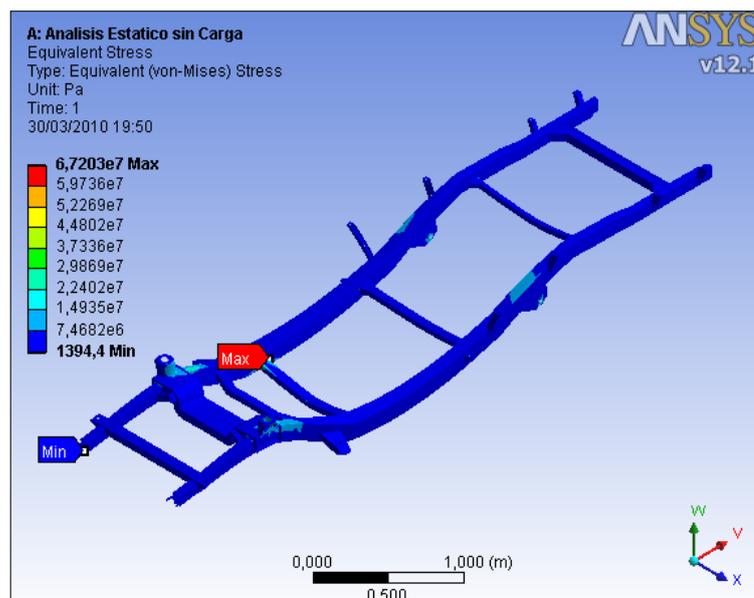
Para el desarrollo del análisis estático se debe tener en cuenta modificar la magnitud de la carga transportada para los cuatro casos que se plantearon anteriormente.

4.2.1 Análisis de la Estructura sin Carga

Para el desarrollo de este caso se considera que el compartimiento de carga del vehículo se encuentra vacío, por lo tanto se toma en cuenta solamente los componentes que se encuentran suspendidos en la estructura –Véase Cuadro 2.9-.

4.2.1.1 Esfuerzo Máximo

Gráfico 4.9. Esfuerzo Máximo sin Carga.

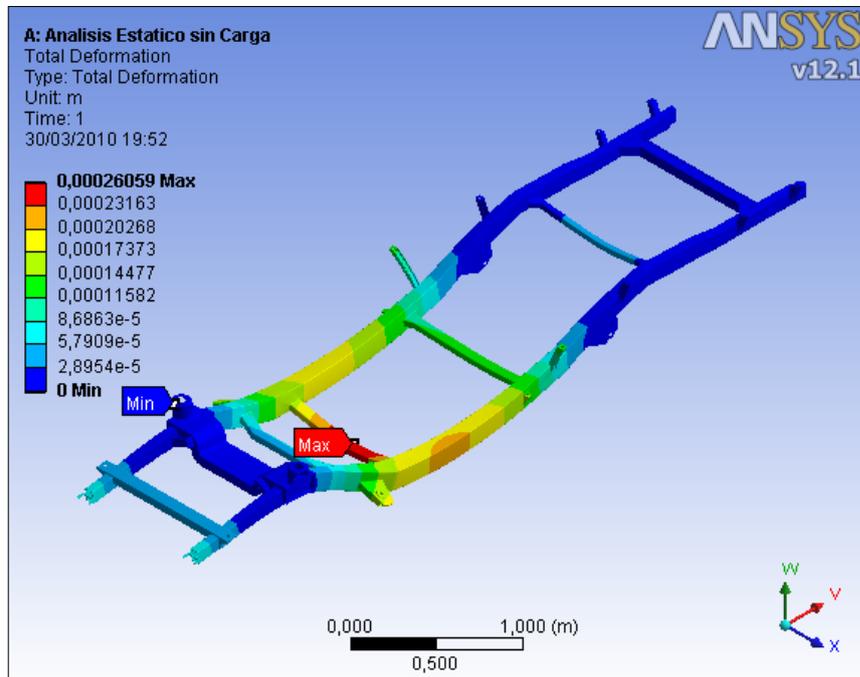


Fuente: Autores

³ SHIGLEY Joshep, MISCHKE Charles. Diseño en Ingeniería Mecánica. 6^{ta} Edición México. Editorial Mc Graw Hill 2002. 1257p. Página 339.

4.2.1.2 Deformación Máxima

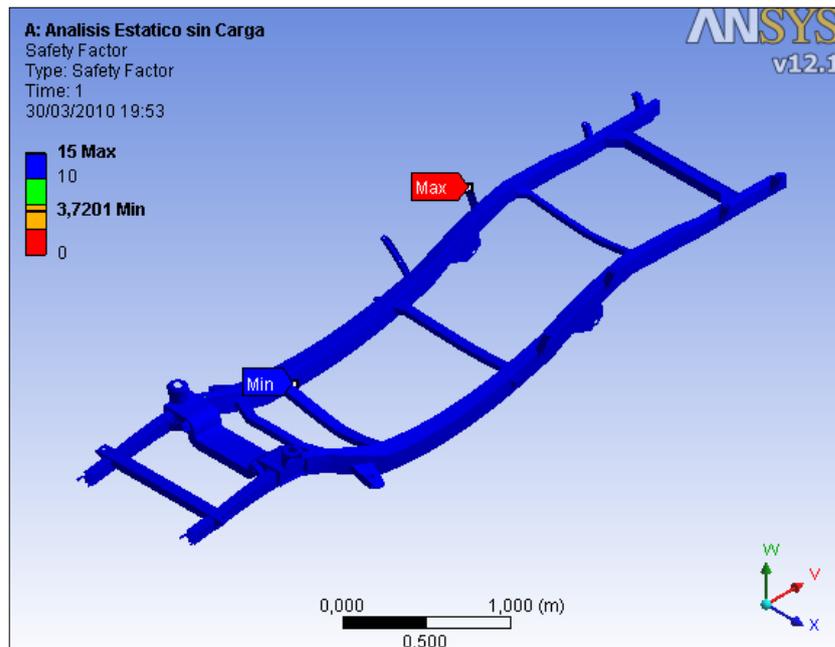
Gráfico 4.10. Deformación Máxima sin Carga.



Fuente: Autores.

4.2.1.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.11. Factor de Seguridad sin Carga.



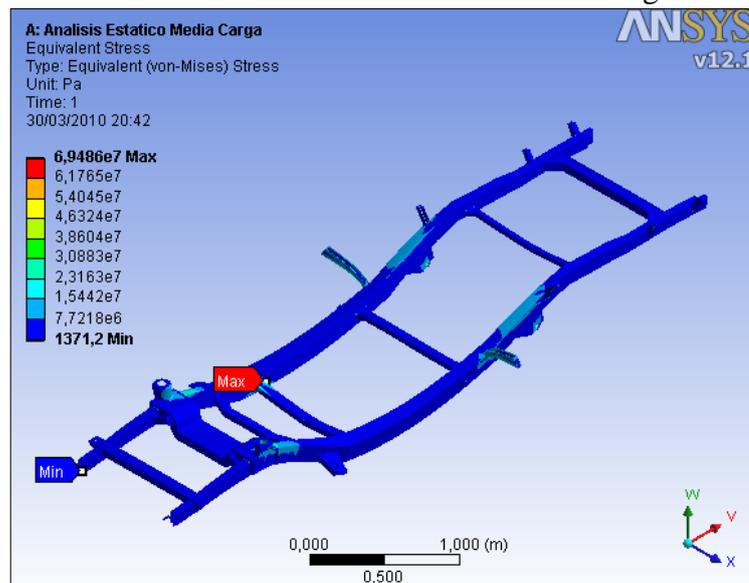
Fuente: Autores.

4.2.2 Análisis de la Estructura con Media Carga

En este análisis además de considerar los componentes suspendidos en la estructura – Véase Cuadro 2.9- se toma en cuenta la magnitud de la carga transportada que en este caso es de 700 Kg.

4.2.2.1 Esfuerzo Máximo

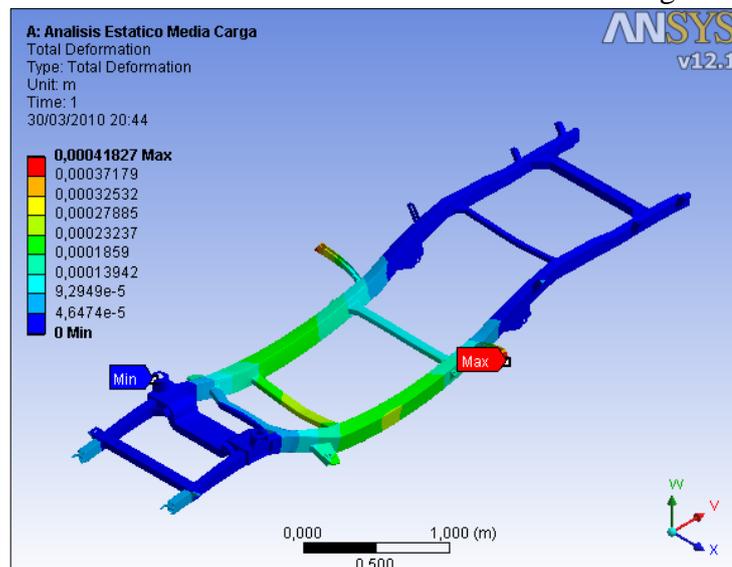
Gráfico 4.12. Esfuerzo Máximo Media Carga.



Fuente: Autores.

4.2.2.2 Deformación Máxima

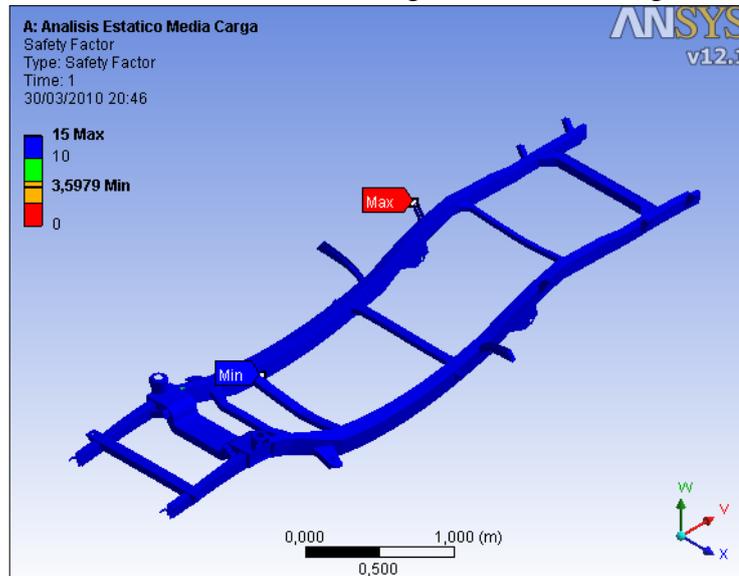
Gráfico 4.13. Deformación Máxima Media Carga.



Fuente: Autores.

4.2.2.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.14. Factor de Seguridad Media Carga.



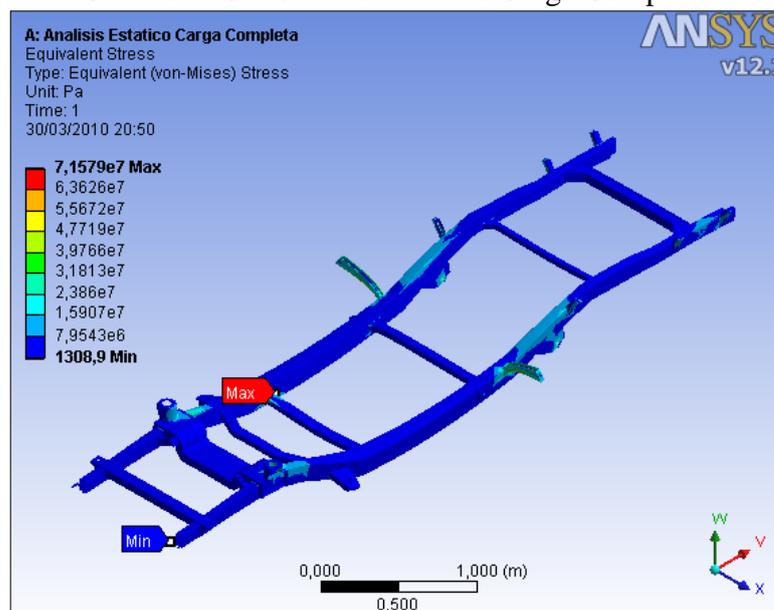
Fuente: Autores.

4.2.3 Análisis de la Estructura con Carga Completa

En este caso además de considerar todos los componentes suspendidos en el chasis – Véase Cuadro 2.9-, se incluye en el análisis una carga transportada de 1340 Kg.

4.2.3.1 Esfuerzo Máximo

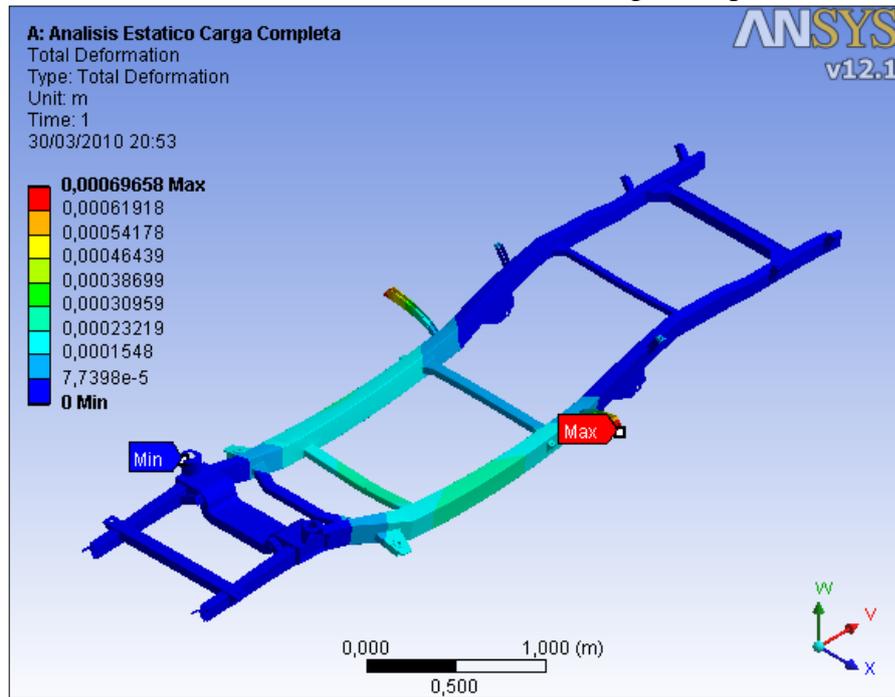
Gráfico 4.15. Esfuerzo Máximo Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.2.3.2 Deformación Máxima

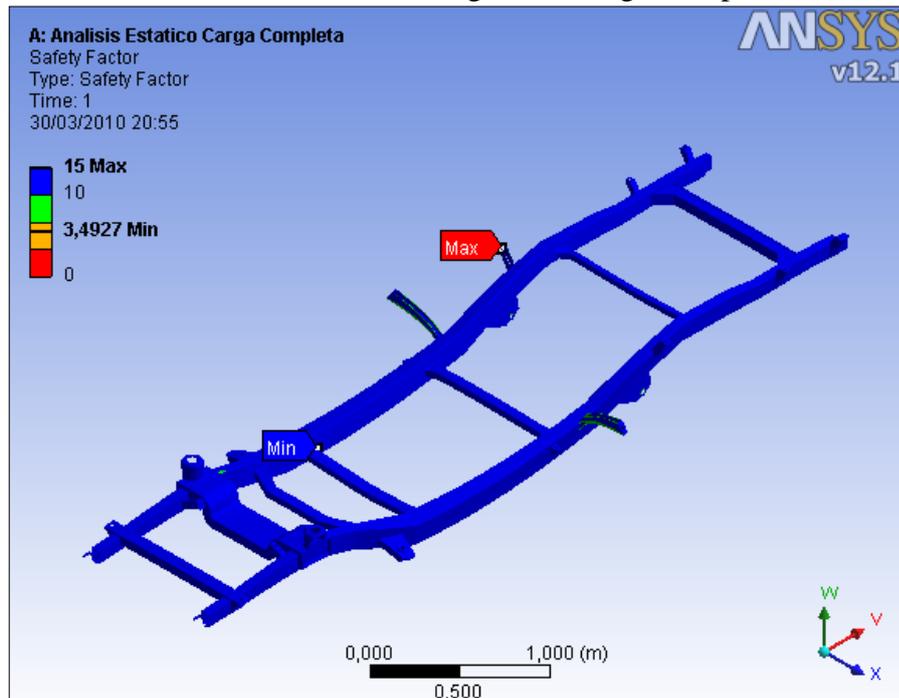
Gráfico 4.16. Deformación Máxima Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.2.3.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.17. Factor de Seguridad Carga Completa.



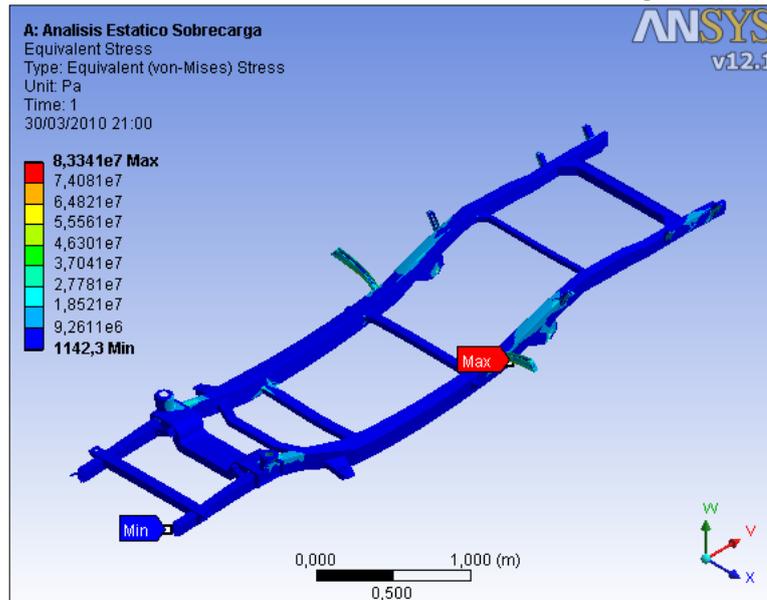
Fuente: Autores.

4.2.4 Análisis de la Estructura con Sobrecarga

En este análisis además de considerar los componentes suspendidos en la estructura – Véase Cuadro 2.9- se toma en cuenta la magnitud de la carga transportada que en este caso es de 1600 Kg.

4.2.4.1 Esfuerzo Máximo

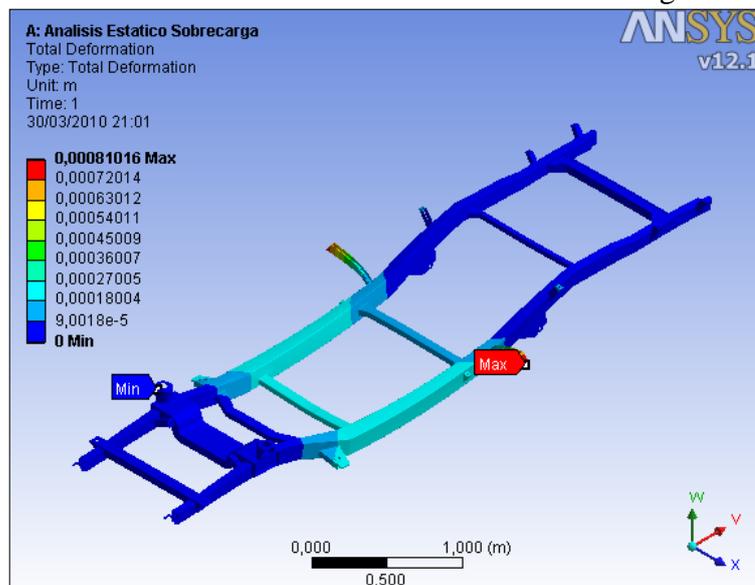
Gráfico 4.18. Esfuerzo Máximo Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.2.4.2 Deformación Máxima

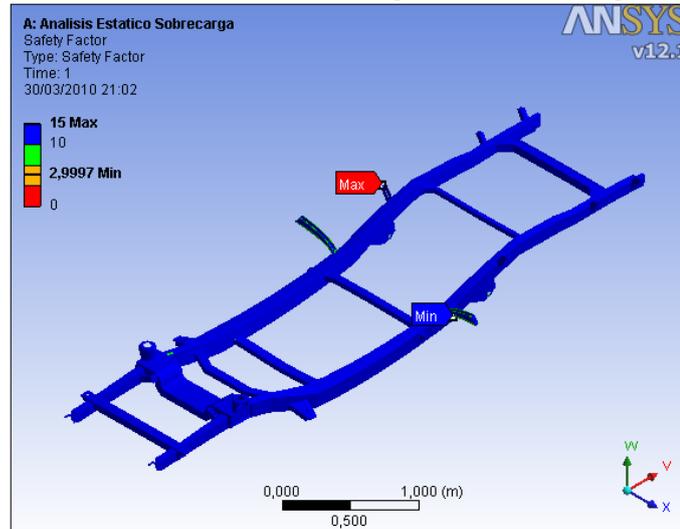
Gráfico 4.19. Deformación Máxima Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.2.4.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.20. Factor de Seguridad Sobrecarga.



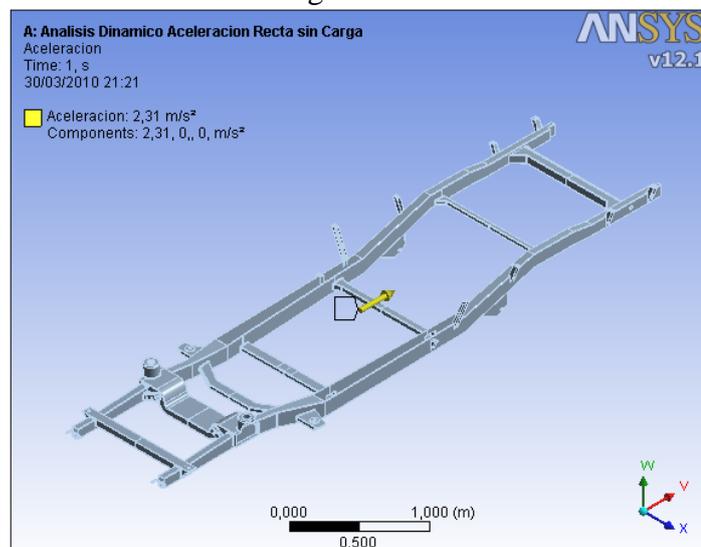
Fuente: Autores.

4.3 ANÁLISIS DINÁMICO ACELERACIÓN EN RECTA

Para el análisis dinámico tanto en aceleración como en desaceleración se debe tener en cuenta las magnitudes de aceleración y peso para cada uno de los casos.

En el desarrollo del caso aceleración en recta se debe introducir el valor de la misma- $2,31\text{m}/\text{sg}^2$ - en la componente X, con la dirección del vector contraria a la del desplazamiento.

Gráfico 4.21. Magnitud de la Aceleración.

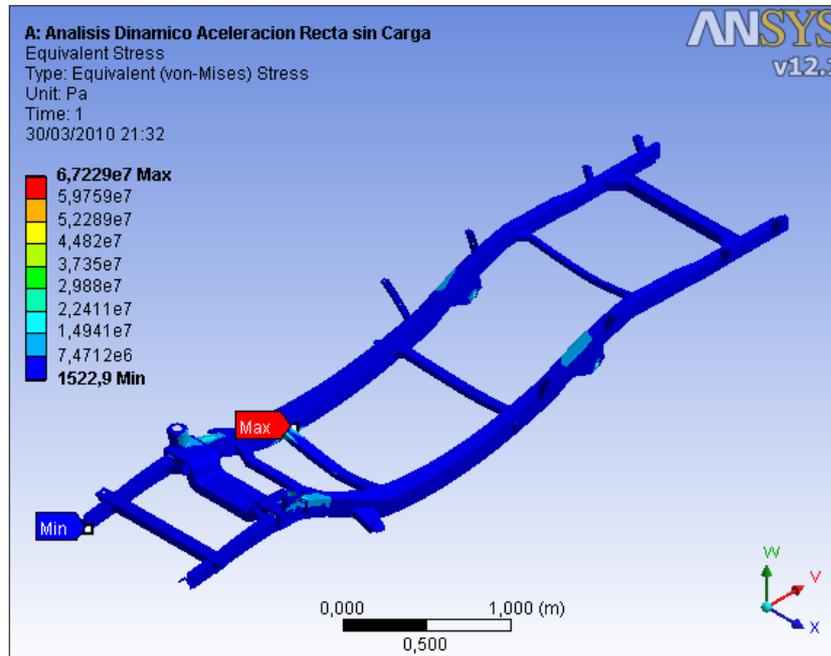


Fuente: Autores.

4.3.1 Aceleración en Recta sin Carga

4.3.1.1 Esfuerzo Máximo

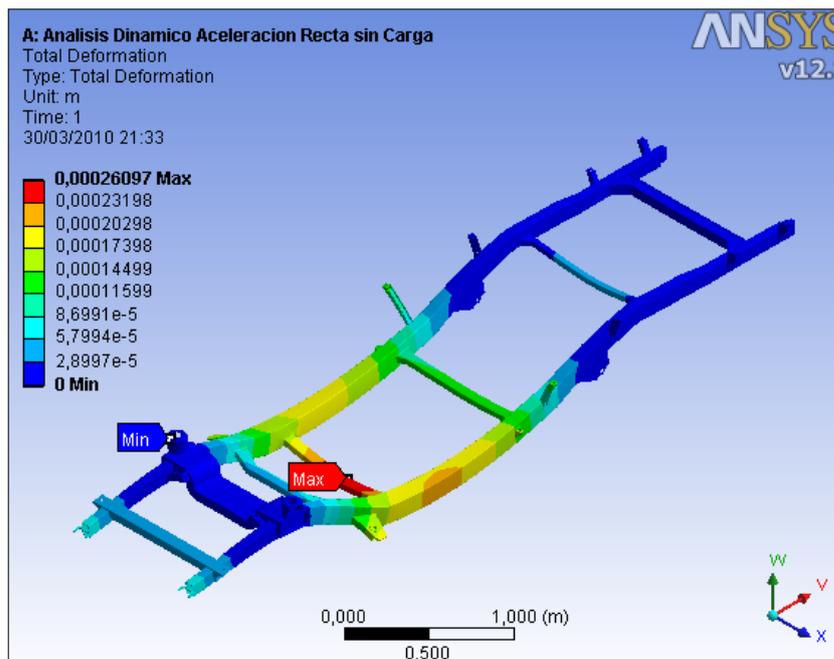
Gráfico 4.22. Esfuerzo Máximo Aceleración sin Carga.



Fuente: Autores.

4.3.1.2 Deformación Máxima

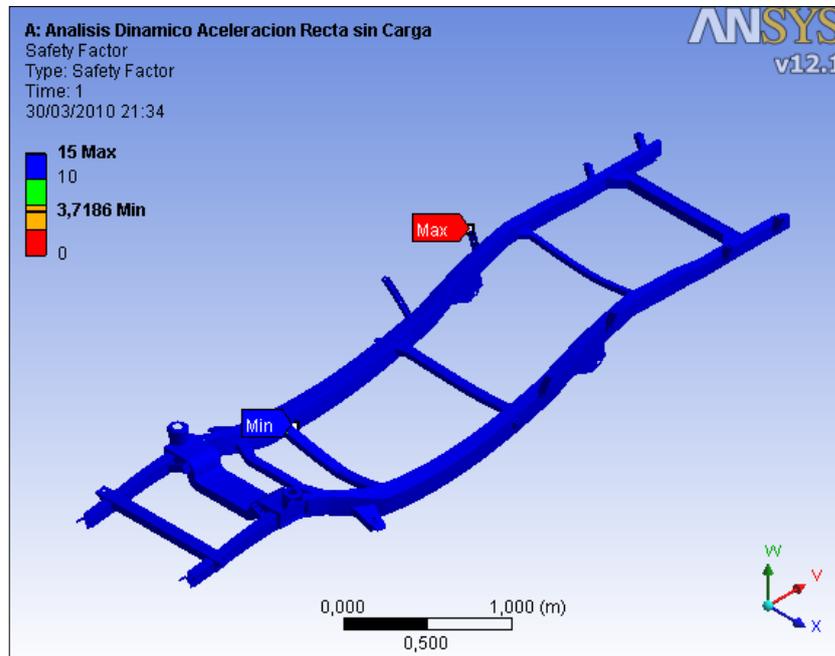
Gráfico 4.23. Deformación Máxima Aceleración sin Carga.



Fuente: Autores.

4.3.1.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.24. Factor de Seguridad Aceleración sin Carga.

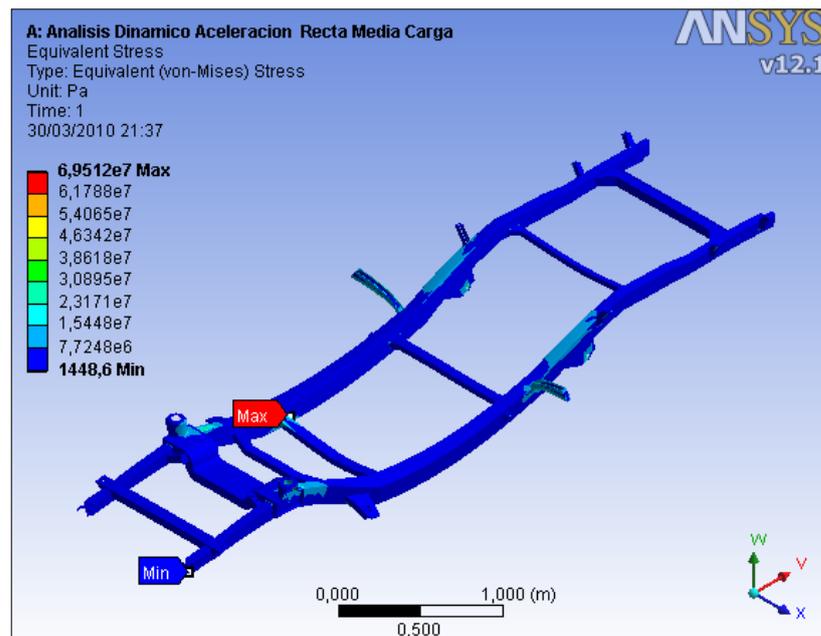


Fuente: Autores.

4.3.2 Aceleración en Recta con Media Carga

4.3.2.1 Esfuerzo Máximo

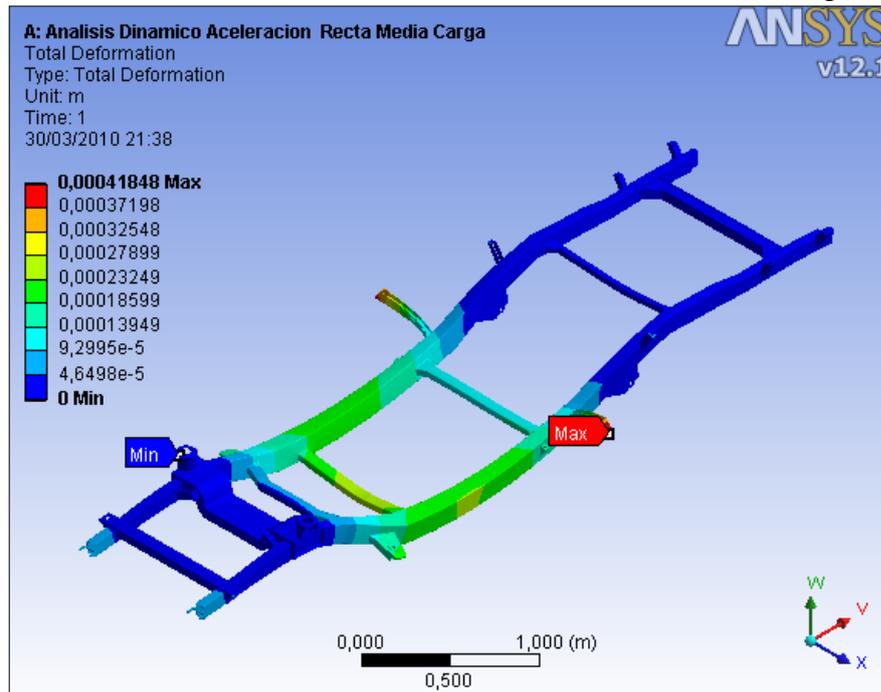
Gráfico 4.25. Esfuerzo Máximo Aceleración Media Carga.



Fuente: Autores.

4.3.2.2 Deformación Máxima

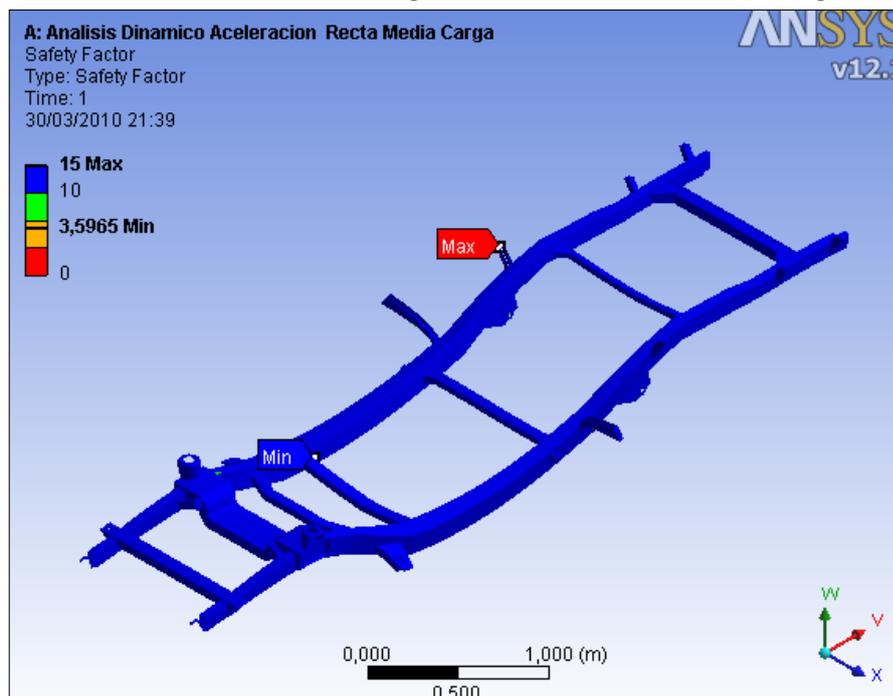
Gráfico: 4.26. Deformación Máxima Aceleración Media Carga.



Fuente: Autores.

4.3.2.3 Factor de Seguridad

Gráfico: 4.27. Factor de Seguridad Aceleración Media Carga.

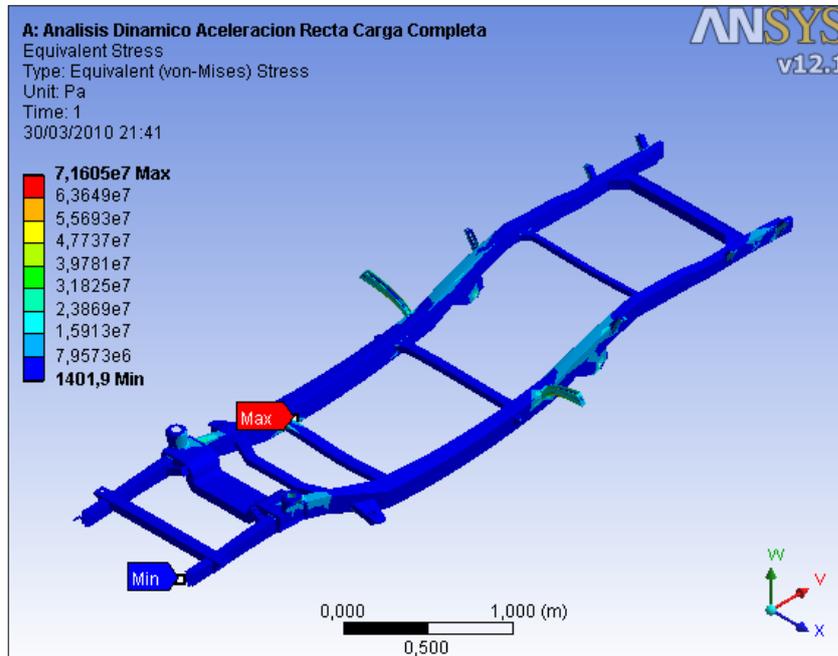


Fuente: Autores.

4.3.3 Aceleración en Recta con Carga Completa

4.3.3.1 Esfuerzo Máximo

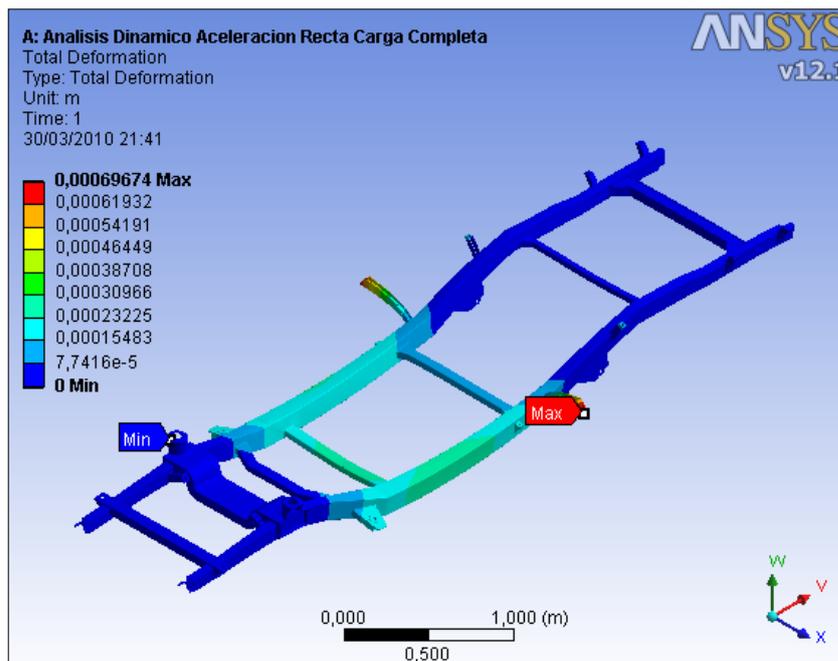
Gráfico 4.28. Esfuerzo Máximo Aceleración Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.3.3.2 Deformación Máxima

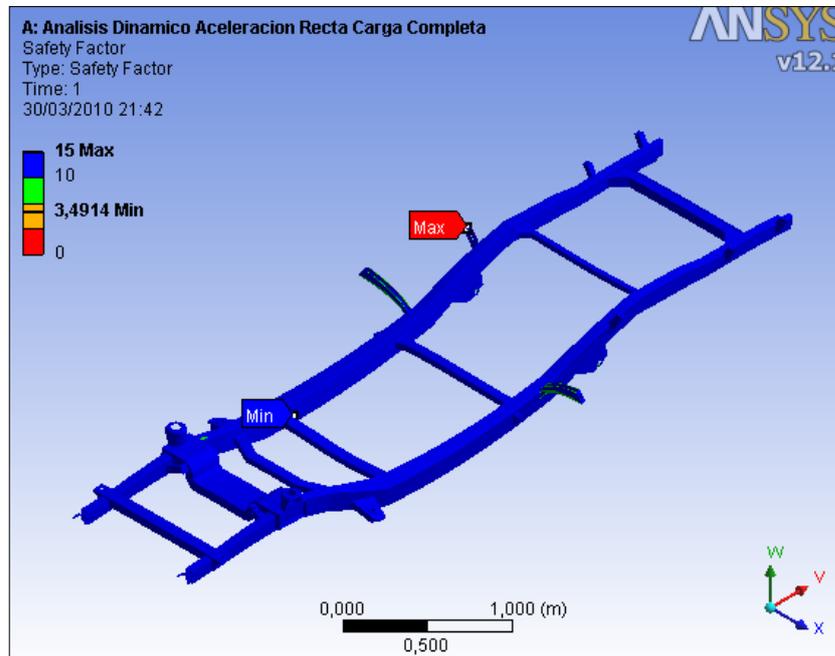
Gráfico 4.29. Deformación Máxima Aceleración Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.3.3.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.30. Factor de Seguridad Aceleración Carga Completa.

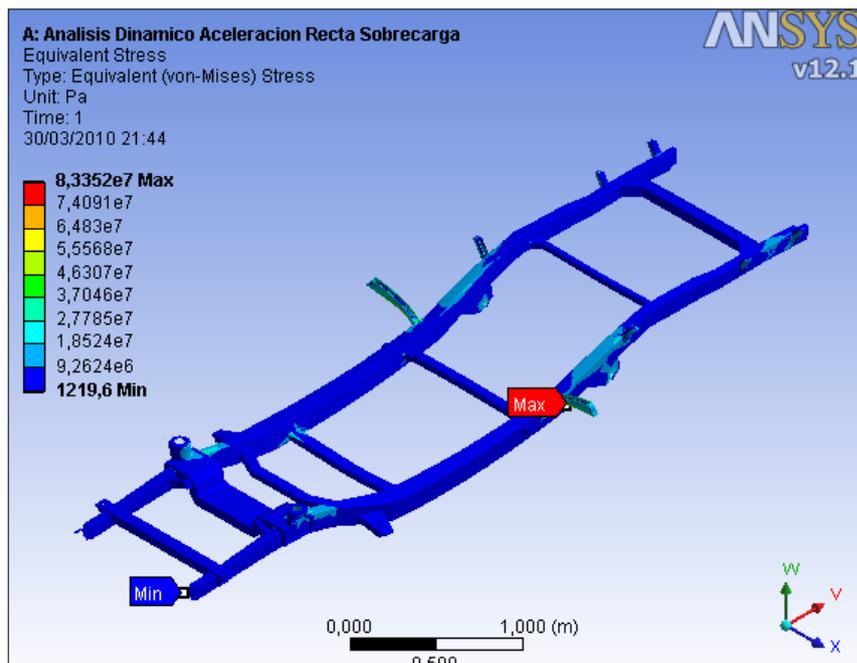


Fuente: Autores.

4.3.4 Aceleración en Recta con Sobrecarga

4.3.4.1 Esfuerzo Máximo

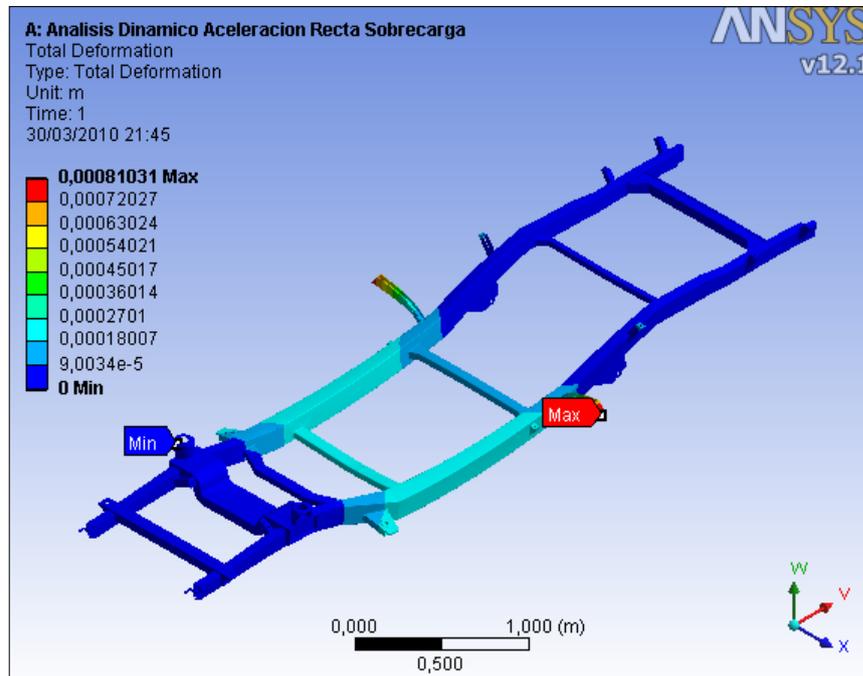
Gráfico 4.31 Esfuerzo Máximo Aceleración Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.3.4.2 Deformación Máxima

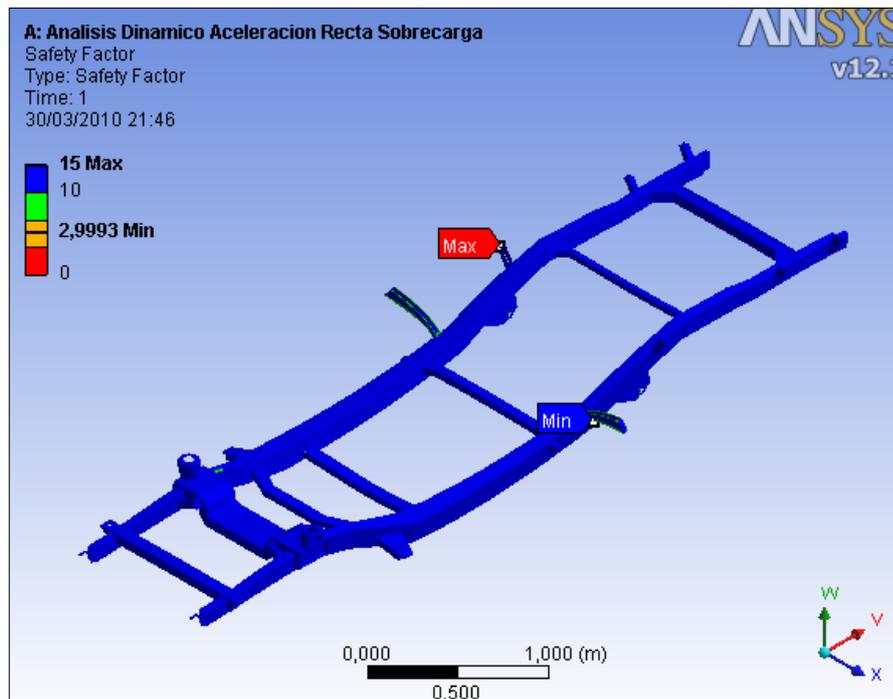
Gráfico 4.32 Deformación Máxima Aceleración Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.3.4.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.33. Factor de Seguridad Aceleración Sobrecarga.

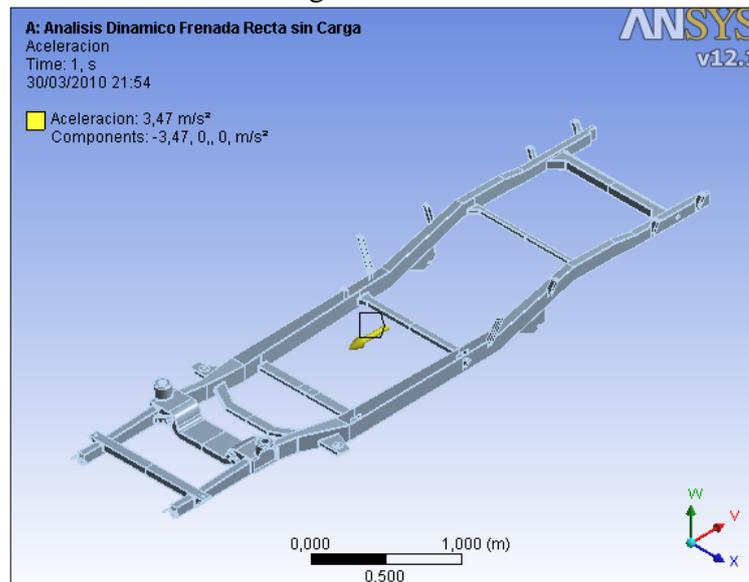


Fuente: Autores.

4.4 ANÁLISIS DINÁMICO FRENADA EN RECTA

En el caso de desaceleración en recta se debe tener en cuenta la misma magnitud de $-3,47\text{m}/\text{sg}^2$ en la componente X, con la dirección del vector similar a la de desplazamiento.

Gráfico 4.34 Magnitud de la Desaceleración.

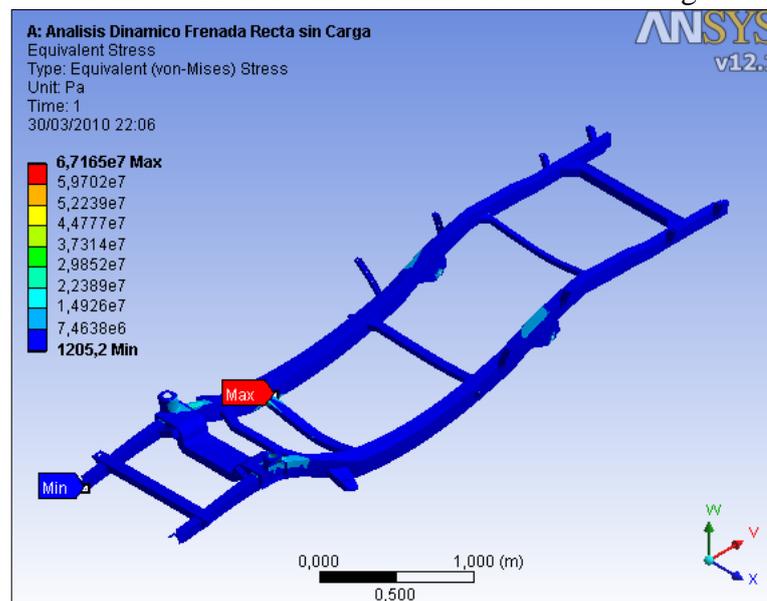


Fuente: Autores.

4.4.1 Frenada en Recta sin Carga

4.4.1.1 Esfuerzo Máximo

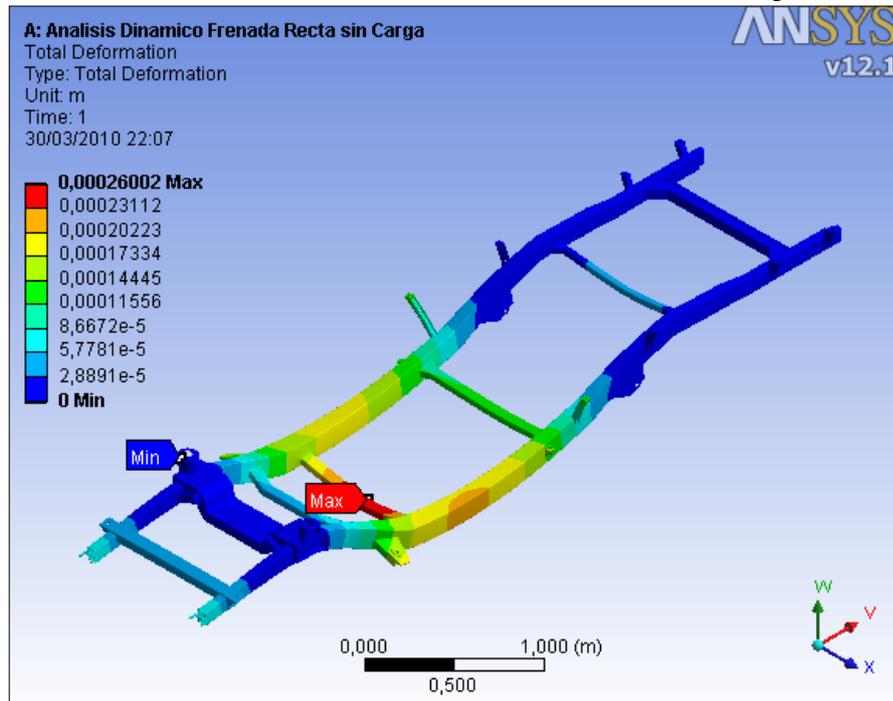
Gráfico 4.35 Esfuerzo Máximo Frenada sin Carga.



Fuente: Autores.

4.4.1.2 Deformación Máxima

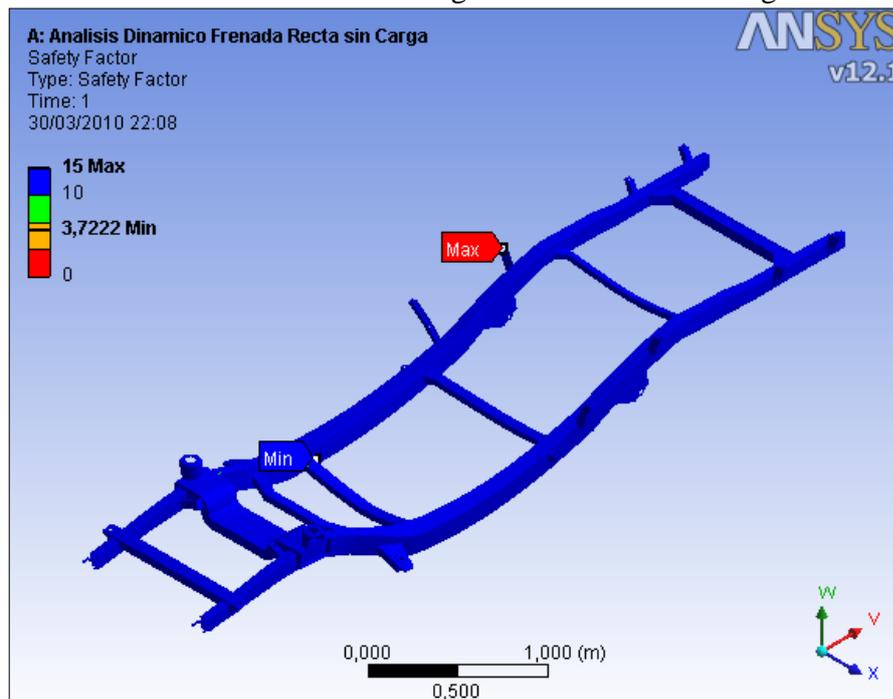
Gráfico 4.36 Deformación Máxima Frenada sin Carga.



Fuente: Autores.

4.4.1.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.37. Factor de Seguridad Frenada sin Carga.

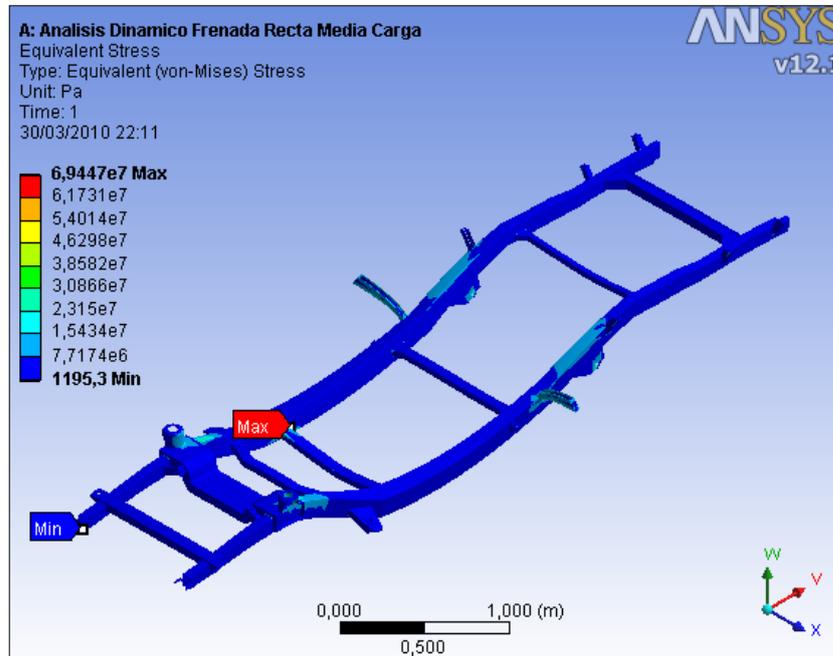


Fuente: Autores.

4.4.2 Frenada en Recta con Media Carga

4.4.2.1 Esfuerzo Máximo

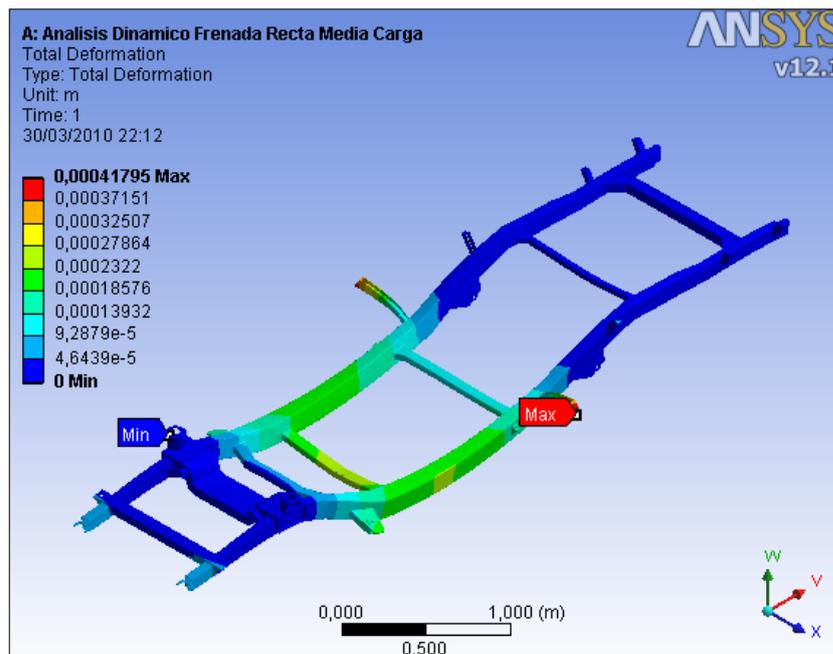
Gráfico 4.38 Esfuerzo Máximo Frenada Media Carga.



Fuente: Autores.

4.4.2.2 Deformación Máxima

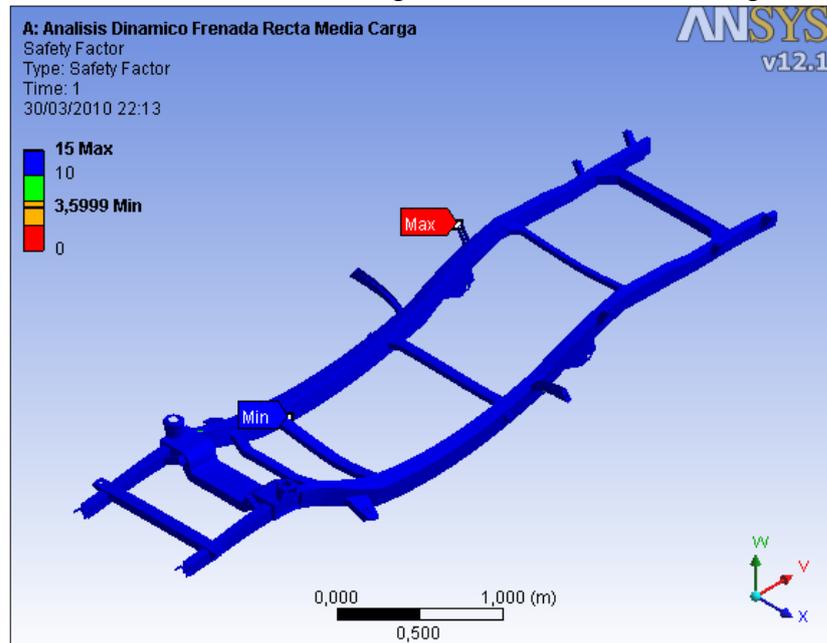
Gráfico 4.39 Deformación Máxima Frenada Media Carga.



Fuente: Autores.

4.4.2.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.40 Factor de Seguridad Frenada Media Carga.

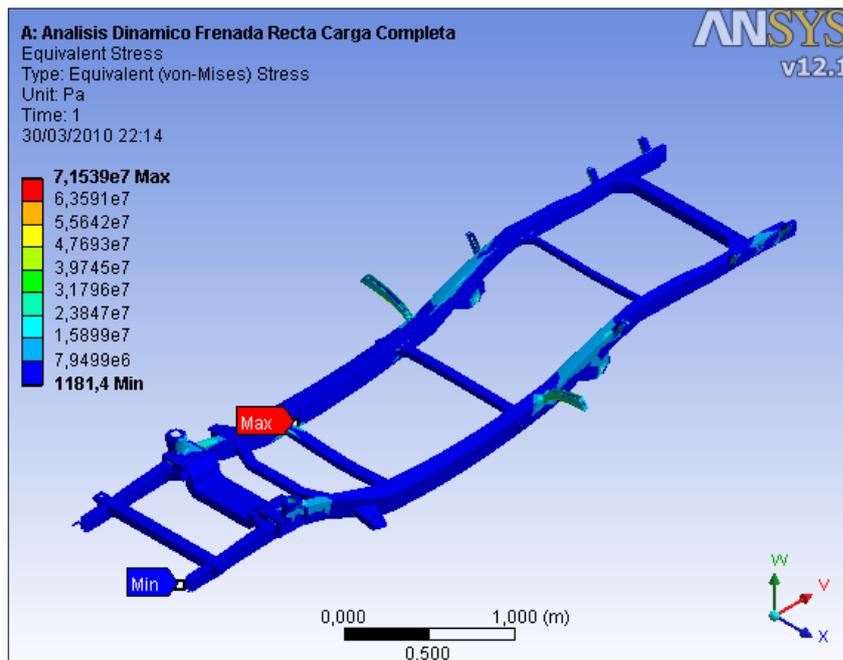


Fuente: Autores.

4.4.3 Frenada en Recta con Carga Completa

4.4.3.1 Esfuerzo Máximo

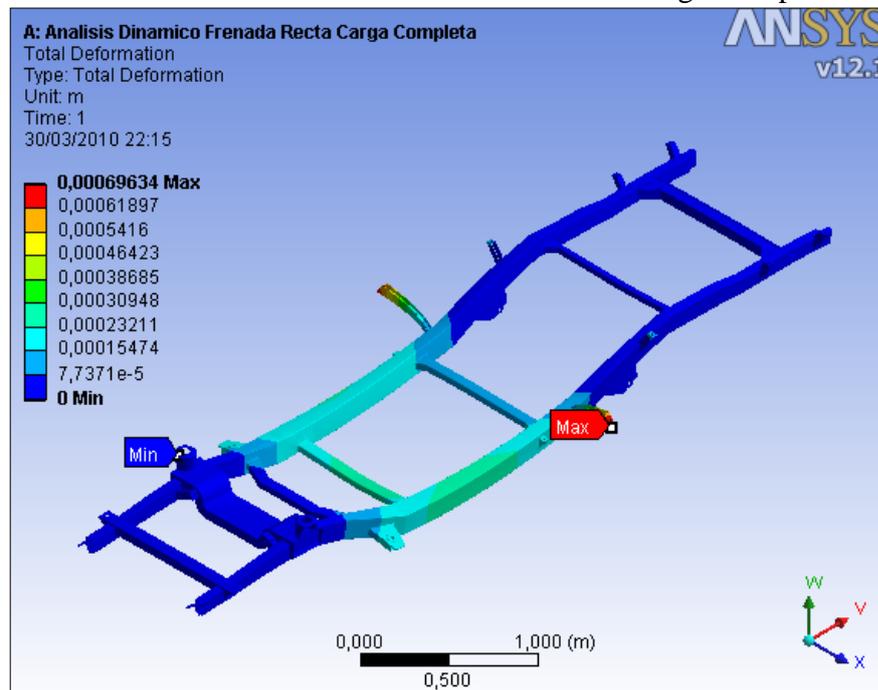
Gráfico 4.41 Esfuerzo Máximo Frenada Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.4.3.2 Deformación Máxima

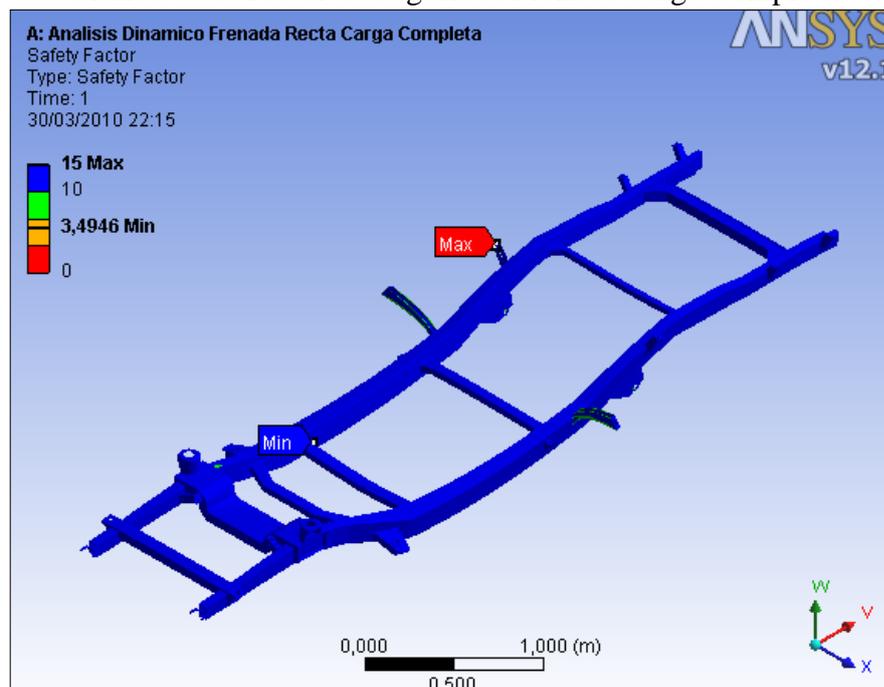
Gráfico 4.42. Deformación Máxima Frenada Carga Completa.



Fuente: Autores.

4.4.3.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.43. Factor de Seguridad Frenada Carga Completa.

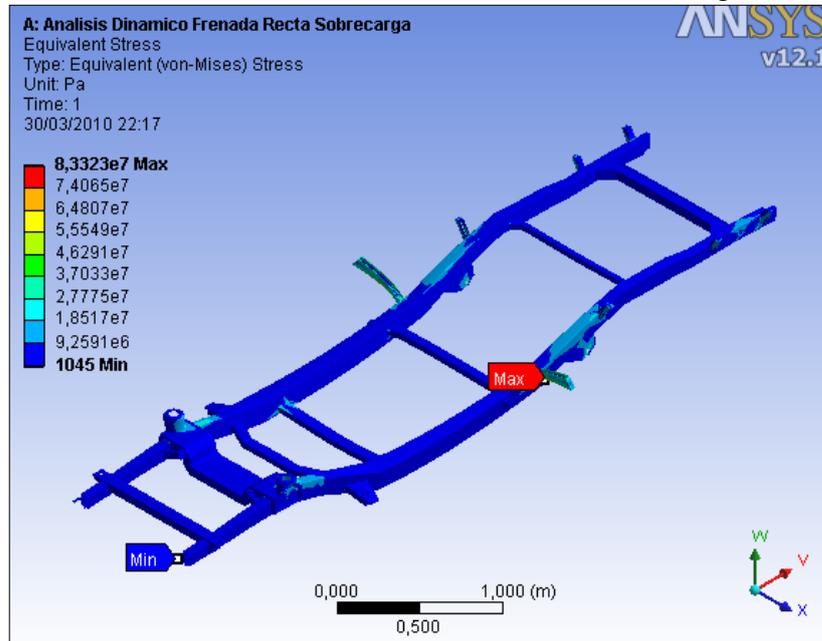


Fuente: Autores.

4.4.4 Frenada en Recta con Sobrecarga

4.4.4.1 Esfuerzo Máximo

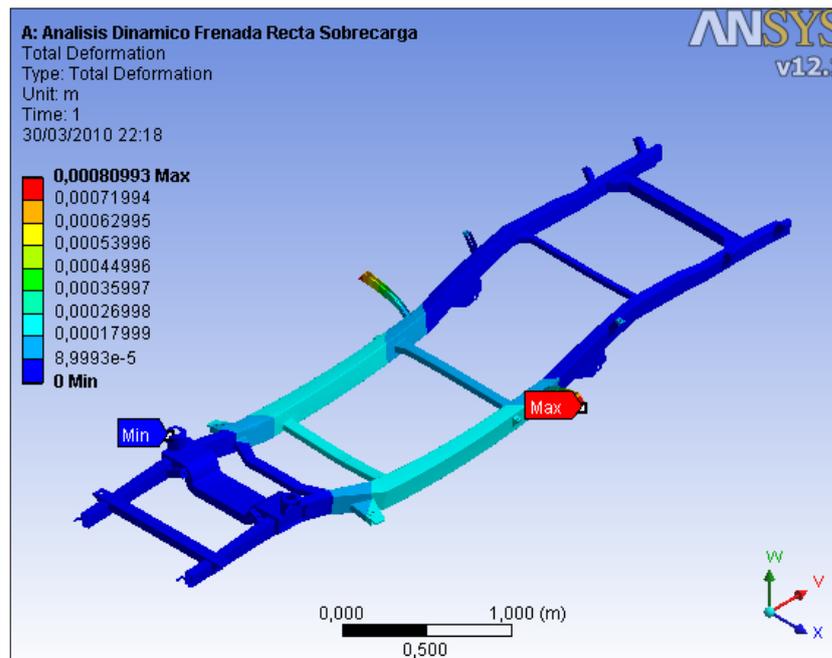
Gráfico 4.44 Esfuerzo Máximo Frenada Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.4.4.2 Deformación Máxima

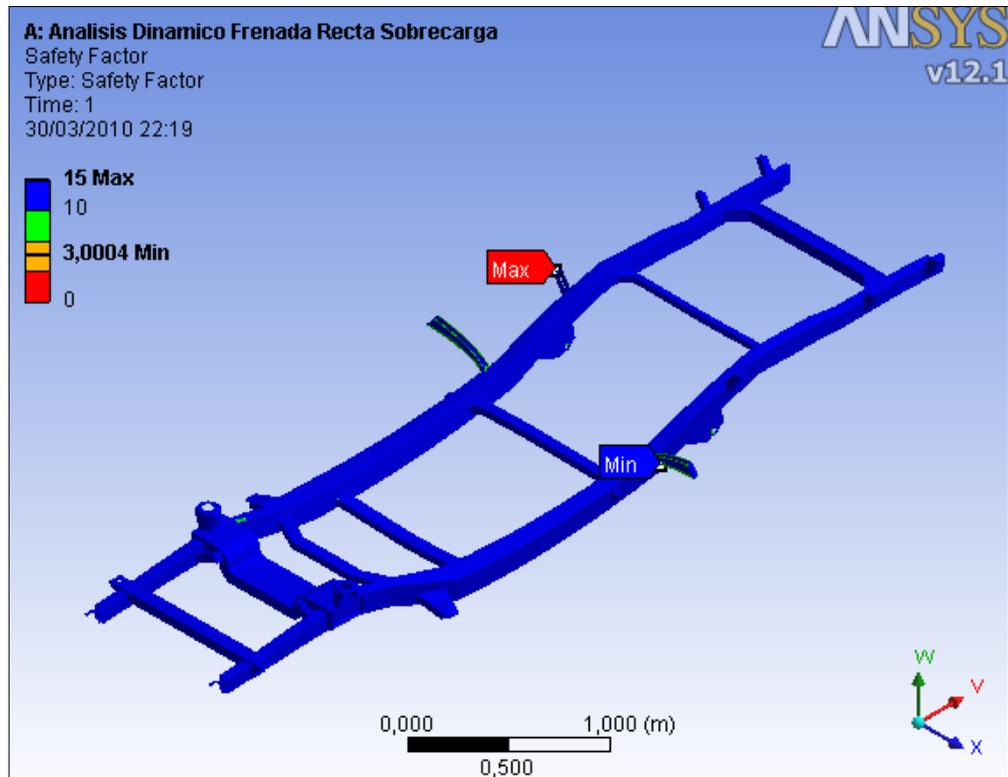
Gráfico 4.45 Deformación Máxima Frenada Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.4.4.3 Factor de Seguridad

Gráfico 4.46. Factor de Seguridad Frenada Sobrecarga.



Fuente: Autores.

4.5 TABLAS DE RESULTADOS

Cuadro 4.1. Resultados del Análisis Estático.

ANÁLISIS ESTÁTICO				
	Sin Carga	Media Carga	Carga Completa	Sobrecarga
Esfuerzo Máximo	6,72e ⁷ Pa.	6,94e ⁷ Pa.	7,15e ⁷ Pa.	8,33e ⁷ Pa.
Deformación Máxima	2,60e ⁻⁴ m.	4,18e ⁻⁴ m.	6,96e ⁻⁴ m.	8,10e ⁻⁴ m.
Factor de Seguridad	3,72	3,59	3,49	2,99

Fuente: Autores.

Cuadro 4.2 Resultados del Análisis Dinámico Frenada.

ANÁLISIS DINÁMICO FRENADA				
	Sin Carga	Media Carga	Carga Completa	Sobrecarga
Esfuerzo Máximo	6,71e ⁷ Pa.	6,94e ⁷ Pa.	7,15e ⁷ Pa.	8,33e ⁷ Pa.
Deformación Máxima	2,60e ⁻⁴ m.	4,17e ⁻⁴ m.	6,96e ⁻⁴ m.	8,09e ⁻⁴ m.
Factor de Seguridad	3,72	3,59	3,49	3,00

Fuente: Autores.

Cuadro 4.3 Resultados del Análisis Dinámico Aceleración.

ANÁLISIS DINÁMICO ACELERACIÓN				
	Sin Carga	Media Carga	Carga Completa	Sobrecarga
Esfuerzo Máximo	6,72e ⁷ Pa.	6,95e ⁷ Pa.	7,16e ⁷ Pa.	8,33e ⁷ Pa.
Deformación Máxima	2,60e ⁻⁴ m.	4,18e ⁻⁴ m.	6,96e ⁻⁴ m.	8,10e ⁻⁴ m.
Factor de Seguridad	3,71	3,59	3,49	2,99

Fuente: Autores.

En los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 se observa la tabulación de los resultados obtenidos en cada condición de contorno planteada para el análisis del chasis de la camioneta Toyota Hilux. Para cada condición de carga impuesta ya sea en el caso estático o dinámico se obtiene que el esfuerzo máximo de Von Mises, posee una leve variación.

Mientras que al comparar los resultados con la misma magnitud de carga en las condiciones estática, aceleración en recta y desaceleración en recta no sufren cambios; al analizar todos los valores se observa que no superan el límite de cedencia del material que es de $-2,5 \text{ e}^8 \text{ Pa.}$ indicando que la estructura no falla.

La deformación máxima calculada no supera la décima de milímetro, siendo estos valores correctos ya que el comportamiento de la estructura como un todo debe ser rígida. El factor de seguridad en todos los casos tiene un valor mayor a -3- que es considerado como ideal en el caso de estructuras de vehículos –Véase Página 39-.

4.6 CONCLUSIONES

En la simulación de la estructura el modelo debe ser lo más real posible, para esto es necesario obtener la mayor cantidad de medidas y formas de datos proporcionados por el fabricante, así como también conseguir las por mediciones realizadas en el chasis real, toda esta información tiene que ser plasmada en el proceso de generación de la geometría.

Para un adecuado mallado de la estructura se utiliza elementos tetraédricos, los cuales son autoajustables en las secciones que el software considere de mayor complejidad esto se consigue mediante una disminución del tamaño del elemento en dichas secciones.

La elección de la teoría de solución del problema es importante, debido a que permite obtener resultados con bajos márgenes de error, lo que en conclusión ayuda a simular correctamente el comportamiento general de la estructura, bajo las condiciones de contorno que se plantearon para el análisis.

Luego de tabular los resultados obtenidos y compararlos como varían en cada uno de los casos que se impuso como condiciones de contorno se puede concluir que la estructura en general se comporta de forma similar, sin grandes modificaciones en sus resultados y además dentro de los criterios que se consideran para el diseño de estructuras, lo que nos indica que la modelación del chasis en el software es correcta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conocer los principios básicos que definen al Método de Elementos Finitos resulta indispensable para comprender como el software admite la formulación de modelos matemáticos a partir de la definición de las ecuaciones diferenciales parciales, asociándolas al fenómeno estudiado.

Para obtener un preproceso bien configurado es importante considerar que la geometría, la discretización del continuo y la aplicación de las condiciones de contorno, son aspectos que permite una buena convergencia del problema; además, de elegir la teoría que se ajuste a las leyes constitutivas que rigen el modelo, ayudará a obtener resultados reales.

Luego de analizar los resultados obtenidos en la simulación estática y dinámica de la estructura se puede concluir que la utilización de este tipo de programas computacionales en el campo de la Ingeniería Automotriz ayuda a obtener resultados con bajos márgenes de error, además optimiza directamente el tiempo y costo empleado.

La utilización de dichos programas es importante en las carreras de ingeniería, ya que permite evaluar gran cantidad de problemas en este campo de estudio, por lo tanto es recomendado implementar la utilización de los mismos a lo largo de la preparación profesional de los estudiantes.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVILES, Rafael. Análisis de fatiga en máquinas. España. International Thomson Editores. 2005.

BARBAT, Alex H., CANET, Juan Miquel. Estructuras sometidas a Acciones Sísmicas. 2da Edición. España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 1994.

BAUMEISTER, Theodore, AVALLONE, Eugene A. Manual del Ingeniero mecánico. 2da Edición. México McGraw-Hill. 1984.

CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. España. Editorial Reverte. 2000.

CASCAJOSA, Manuel. Ingeniería de Vehículos, 2da Edición. México. Alfaomega Grupo Editor. 2005.

FLINN, Richard A., TROJAN, Paul K. Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. España. Edición Facsimilar. 1998.

FORNONS, José María. El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras. 1ra Edición. España. Universidad Politécnica de Barcelona. 1998.

HERNANDEZ, Roberto, FERNANDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. Metodología de la Investigación. México McGraw-Hill. 1998.

IZQUIERDO, Francisco, ALVAREZ, Carlos, LOPEZ, Vicente. Teoría de los Vehículos Automóviles. 1ra Edición. España. Sección de Publicaciones de la E.T.S. 2001.

NASH, William A. Teoría de problemas de resistencia de materiales. México. Edición McGraw-Hill.1984.

SANZ, GONZALES, Ángel. Tecnología de la Automoción. Madrid. Editorial Bruño.1979.

SHIGLEY, Joseph, MISCHKE, Charles. Diseño en Ingeniería Mecánica. 6ta Edición. México. McGraw-Hill. 2002.

SMITH, William F. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales 2da Edición. España. McGraw-Hill. 1996.

TOALONGO, Manuel. Métodos y Técnicas de Investigación. 2da Edición. Ecuador. Prole Laser. 2007.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA. Cálculo de tensiones en el chasis de un automóvil en movimiento. España. 2002.

[EnLínea].http://lim.ii.udc.es/docs/proceedings/2002_12_CNIM_.Cálculo_de_tensiones.pdf [Consulta: 20 de Junio del 2009].

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Ejemplo de diseño de chasis tubular. España. 1999 [En Línea] www1.ceit.es/automocion/proyectos/chasis/images/anejo_2.pdf [Consulta: 27 de Abril del 2009].

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Introducción el Método de los Elementos Finitos. Argentina.

[En Línea] www.profesores.frc.utn.edu.ar/.../Introducción_al_MEF.pdf [Consulta: 19 de Enero del 2009].

SOPORTE AL USUARIO DE COSMOS. Librería de elementos finitos de Cosmos. España. 2001. [En Línea] www.iberisa.com/soporte/cosmosm/fealib.htm [Consulta: 16 de Septiembre del 2009].

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Modelación y Simulación dinámica del vehículo tipo Kartcross del laboratorio de automoción de la Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián. España. 2001.

[En Línea] www.ceit.es/asignaturas/automocion/Proyectos/compamm/memoria.pdf
[Consulta: 18 de Marzo del 2009].

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA. Statics and dynamics structural analysis of a 4.5 Ton truck chasis. Malasia. 2007.

[En Línea] [https://www.fkm.utm.my/.../Structural%20Dynamics\(Roslan-jilid24\).pdf](https://www.fkm.utm.my/.../Structural%20Dynamics(Roslan-jilid24).pdf).
[Consulta: 9 de Marzo del 2009].

TECHNISCHE UNIVERSITAT DARMSTADT. The Finite Method Element and Applications in engineering using Ansys. Alemania. [En Línea] www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/134762509.pdf [Consulta: 11 de Marzo del 2009].

TOYOTA ECUADOR. Toyota Hilux CS. Ecuador.

[En Línea] http://toyota.com.ec/CAMIONETAS/Hilux_cs:06Cabina_Simple/home_388.html [Consulta: 29 de Julio del 2009].

ANEXOS

ANEXO I

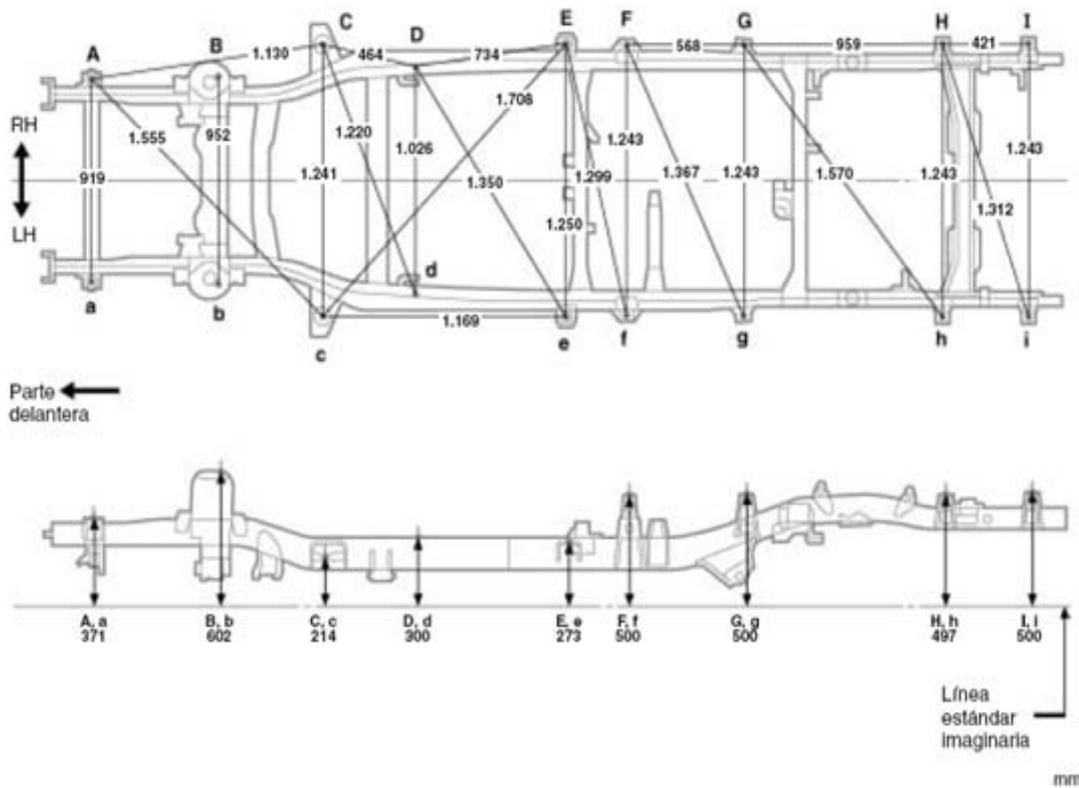
Dimensiones reales de la Camioneta Toyota Hilux 2006.

DI-10

DIMENSIONES DE LA CARROCERÍA

DIMENSIONES DEL BASTIDOR-Cara superior
Cubierta larga de habitáculo normal de vehículo 2WD

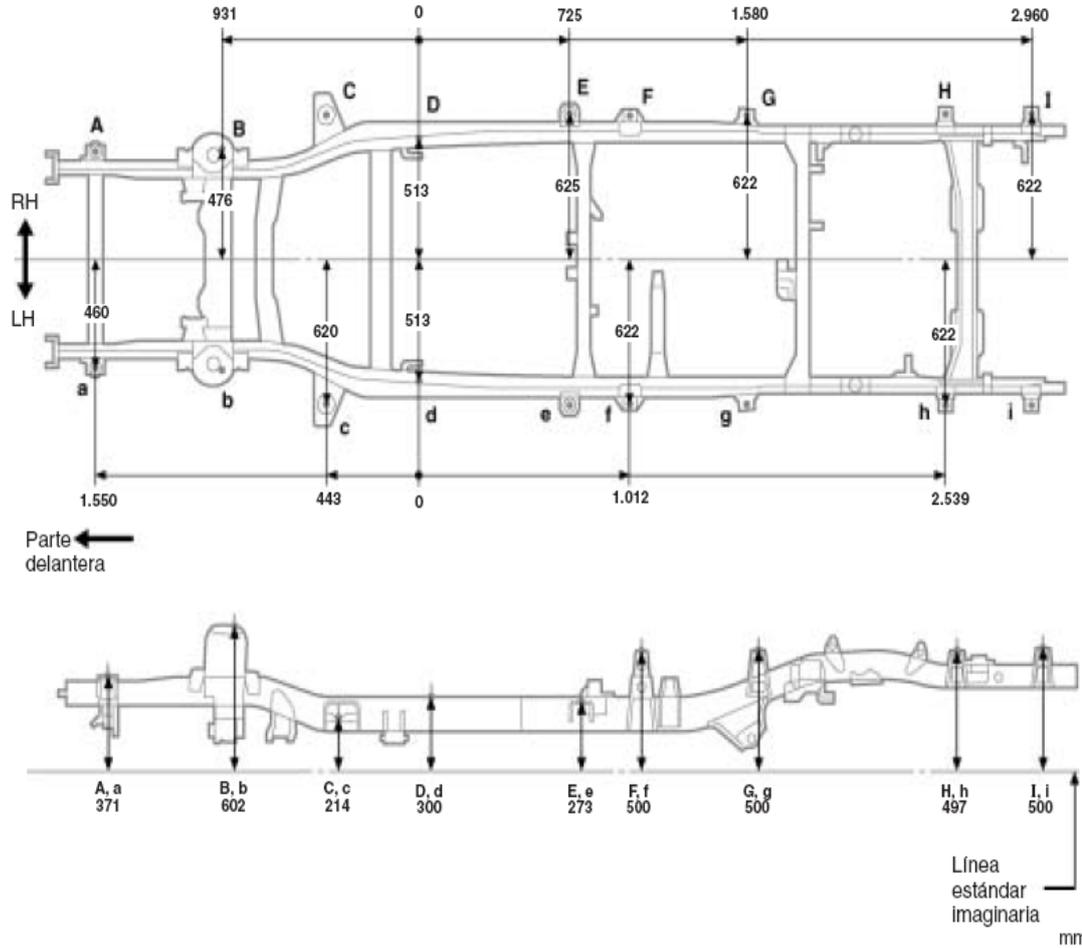
(Distancia tridimensional)



Símbolo	Nombre	Diám. del orificio	Símbolo	Nombre	Diám. del orificio
A, a	Orificio de montaje de la carrocería	26	F, f	Orificio de montaje de la carrocería trasero	23
B, b	Orificio de instalación del amortiguador	12,2	G	Orificio de montaje de la carrocería trasero	15
C, c	Orificio de montaje de la carrocería	31	g	Orificio de montaje de la carrocería trasero	23 × 15
D, d	Orificio estándar del canal interior del rail lateral	16 × 16	H, h	Orificio de montaje de la carrocería trasero	24
E, e	Orificio de montaje de la carrocería	27	I, i	Orificio de montaje de la carrocería trasero	24

DIMENSIONES DEL BASTIDOR-Cara superior
Cubierta larga de habitáculo normal de vehículo 2WD

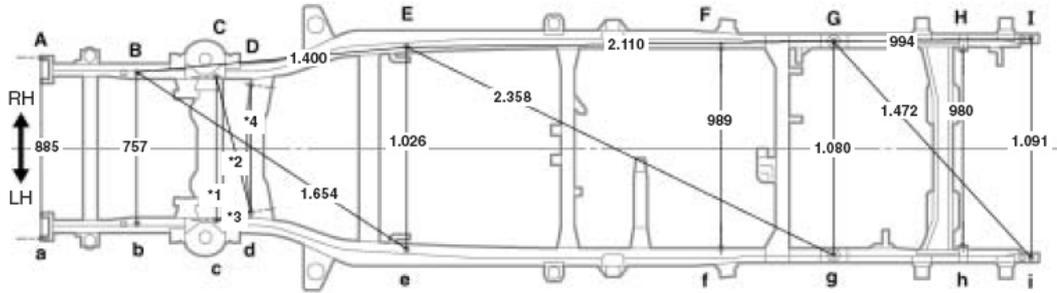
(Distancia bidimensional)



Símbolo	Nombre	Diám. del orificio	Símbolo	Nombre	Diám. del orificio
A, a	Orificio de montaje de la carrocería	26	F, f	Orificio de montaje de la carrocería trasero	23
B, b	Orificio de instalación del amortiguador	12,2	G	Orificio de montaje de la carrocería trasero	15
C, c	Orificio de montaje de la carrocería	31	g	Orificio de montaje de la carrocería trasero	23 × 15
D, d	Orificio estándar del canal interior del rail lateral	16 × 16	H, h	Orificio de montaje de la carrocería trasero	24
E, e	Orificio de montaje de la carrocería	27	I, i	Orificio de montaje de la carrocería trasero	24

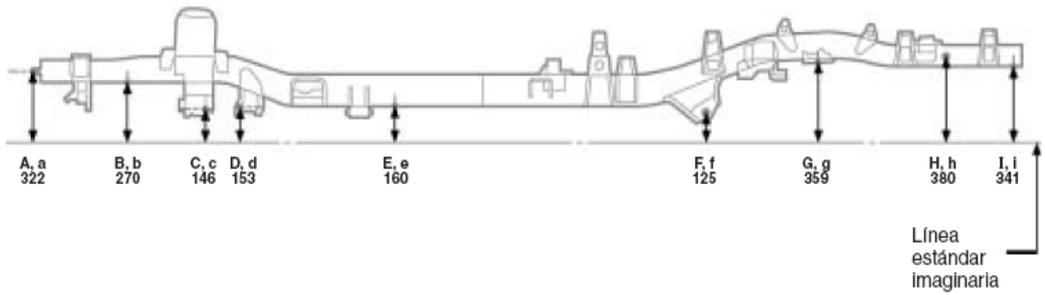
DIMENSIONES DEL BASTIDOR-Cara inferior
Cubierta larga de habitáculo normal de vehículo 2WD

(Distancia tridimensional)



*1	685
*2	682
*3	176
*4	634

Parte delantera ←

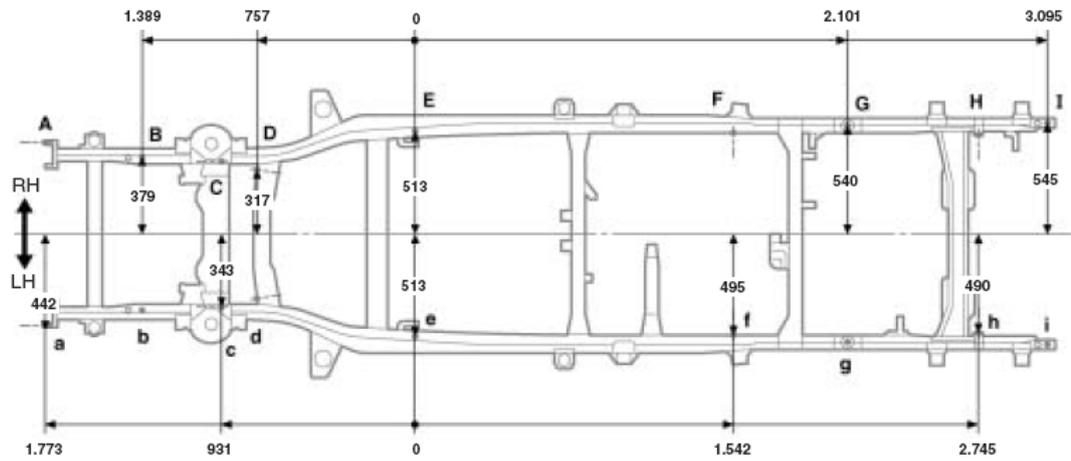


mm

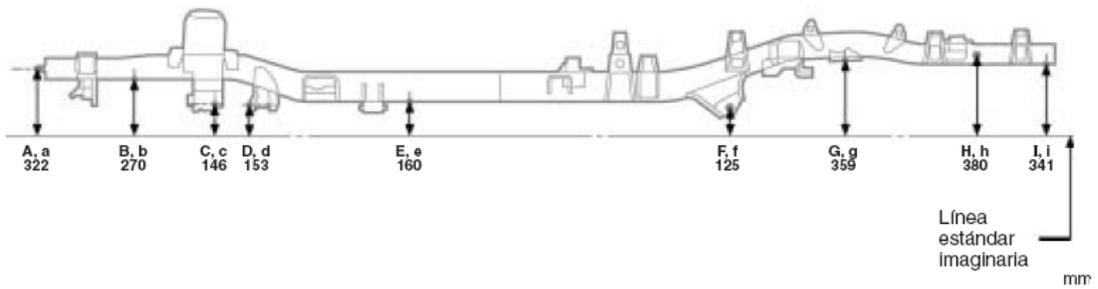
Símbolo	Nombre	Diám. del orificio	Símbolo	Nombre	Diám. del orificio
A, a	Perno de instalación del refuerzo del parachoques	perno de 10	F, f	Orificio del colgador delantero del muelle trasero interior	14,5
B, b	Tuerca de instalación del soporte de la barra estabilizadora	tuerca de 10	G, g	Orificio estándar del tope elástico del amortiguador	9
C, c	Orificio de instalación del brazo inferior de suspensión	16,5 × 34,5	H, h	Orificio del colgador trasero del muelle trasero-interior	30,35
D, d	Orificio de instalación del brazo inferior de suspensión	16,5 × 34,5	I, i	Orificio estándar del canal exterior del rail lateral	13
E, e	Orificio estándar del canal interior del rail lateral	16 × 16	—	—	—

DIMENSIONES DEL BASTIDOR-Cara inferior
Cubierta larga de habitáculo normal de vehículo 2WD

(Distancia bidimensional)



Parte delantera ←



Símbolo	Nombre	Diám. del orificio	Símbolo	Nombre	Diám. del orificio
A, a	Perno de instalación del refuerzo del parachoques	perno de 10	F, f	Orificio del colgador delantero del muelle trasero interior	14,5
B, b	Tuerca de instalación del soporte de la barra estabilizadora	tuerca de 10	G, g	Orificio estándar del tope elástico del amortiguador	9
C, c	Orificio de instalación del brazo inferior de suspensión	16,5 × 34,5	H, h	Orificio del colgador trasero del muelle trasero-interior	30,35
D, d	Orificio de instalación del brazo inferior de suspensión	16,5 × 34,5	I, i	Orificio estándar del canal exterior del rail lateral	13
E, e	Orificio estándar del canal interior del rail lateral	16 × 16	—	—	—

ANEXO II

Especificaciones técnicas y fotografías de la Camioneta Toyota Hilux 2006.





ESPECIFICACIONES**HILUX 4x2 CS
Gasolina****DIMENSIONES Y PESOS**

Exteriores	Largo	mm	5.255
	Ancho	mm	1.760
	Alto	mm	1.680
Distancia entre ejes		mm	3.085
Dimensiones del balde de carga	Largo	mm	2.315
	Ancho	mm	1.520
	Alto	mm	450
Capacidad de carga		kg	1.340
Capacidad tanque combustible		litros (gl)	76 (20.08)

DESEMPEÑO

Radio mínimo de viraje	Ruedas	5.9
	Carrocería	6.3

MOTOR

Tipo		2TR-FE
Mecanismo valvular		16 válvulas, DOHC con VVT-i
Desplazamiento	cm3	2.694
Relación de compresión		9.6 : 1
Sistema de combustible		EFI
Potencia máxima	Hp/rpm	160 / 5.200
Par motor - torque máximo	Nm/rpm	241 / 3.800

CHASIS

Frenos Delanteros / Posteriores		Discos ventilados / Tambores
Suspensión	Delantera	Mc Pherson de doble horquilla con barra estabilizadora
	Posterior	Eje rígido y ballestas
Mecanismo de dirección		Piñón y cremallera
Tipo de dirección		Hidráulica

EQUIPAMIENTO ESTANDAR

Barra de protección vidrio posterior	si
Calefacción	si
Guardalodos	si, posterior
Manijas exteriores	cromadas
Portavasos	1 en el panel delantero izquierdo y 1 en el panel delantero derecho
Retrovisores	cromados
Sistema de audio	Radio AM/FM CD MP3 USB AUX
Tacómetro	si

