



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD PROFESIONAL AZCAPOTZALCO**

**CÁLCULO ESTÁTICO DE LA  
ESTRUCTURA DE UN TROLEBÚS  
CERO EMISIONES PARA  
LA CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S**

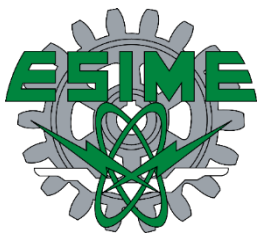
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTAN**

**JOSÉ RUÍZ JIMÉNEZ**

**JOSÉ ANDRÉS VALDÉS REQUENA**

**Asesores:**



**M en SHO. Vicente Mayagoitia Barragán  
Lic. Dora Elena Chacón Vázquez**

**México D.F., Septiembre 2014**

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD AZCAPOTZALCO**

**AUTORIZACIÓN DE TEMA**

**TESIS COLECTIVA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:** INGENIERO MECÁNICO  
**DEBERÁN DESARROLLAR LOS C.** RUIZ JIMENEZ JOSE  
VALDES REQUEÑA JOSE ANDRES

**CÁLCULO ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA DE UN TROLEBÚS CERO EMISIONES PARA LA CIUDAD DE MÉXICO**

La movilidad en la Ciudad de México se enfrenta a insuficiencias, originadas por el crecimiento en la demanda de viajes, una red de vialidades saturadas con desarticulaciones e ineficiencias y principalmente por la falta de coordinación de los diversos modos de transporte, que afectan la velocidad, los tiempos empleados, las emisiones de contaminantes y la salud de los habitantes.

Una Empresa Mexicana, consciente de la problemática que en materia de transporte aqueja a la Ciudad de México, tiene el objetivo de desarrollar la estructura un trolebús con alto nivel de fiabilidad, la cual será una opción de transporte limpio, económico y no contaminante, y que a su vez garantice viajar en uno de los transportes más seguros, debido a las condiciones operativas bajo las cuales se presta el servicio.

**EL TEMA COMPRENDERÁ LOS SIGUIENTES PUNTOS:**

- 1. GENERALIDADES**
- 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**
- 3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA**
- 4. CÁLCULO Y ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA**

Azcapotzalco, D. F., a 18 de Septiembre del 2014

**ASESOR**

**ASESOR**

**M. EN SHO. VICENTE MAYAGOITIA BARRAGÁN**

**LIC. DORA ELENA CHACÓN VÁZQUEZ**

**IPN**  
Azcapotzalco  
Departamento de Trayectorias  
y Servicios Académicos  
**Vo. Bo.**

**EL DIRECTOR**

**ING. ISMAEL JAIDAR MONTER**

# ÍNDICE

Índice de Figuras	
Índice de Tablas	
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 GENERALIDADES</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes	4
1.2 Inicios del Transporte Eléctrico	7
1.3 Alternativa para el Servicio de Transporte Urbano	12
1.4 Fabricación de los primeros Trolebuses en México	14
1.5 Trolebús Cero Emisiones	16
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>20</b>
2.1 Fuerzas	21
2.1.1 Fuerzas Externas	22
2.1.2 Fuerzas Internas	24
2.1.3 Fuerzas Coplanares	25
2.2 Esfuerzos	25
2.2.1 Esfuerzo Normal Simple	27
2.2.2 Esfuerzo Cortante Simple	28
2.2.3 Concentradores de Esfuerzos	29
2.2.4 Esfuerzo de Trabajo o Factor de Seguridad	30
2.2.5 Momento Flexionante	30
2.3 Tensión	32
2.3.1 Ley de Hooke	34
2.3.2 Propiedades Mecánicas	36
2.3.3 Coeficiente de Poisson	40
2.3.4 Teoría de Falla	41
2.3.4.1 Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo	42
2.3.4.2 Teoría de la Energía de Distorsión	45
2.3.4.3 Teoría de la Fricción Interna	47
2.3.4.4 Teoría del Esfuerzo Máximo Normal	50
2.3.4.5 Teoría del Coulomb-Morh Frágil	51
2.4 Equilibrio de Cuerpos Rígidos	52
2.4.1 Reacciones en los Soportes (Apoyos)	52
2.4.2 Ecuaciones de Equilibrio	54
2.4.3 Tres Dimensiones	55

<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>56</b>
3.1 Caracterización Mecánica de Material	58
3.1.1 Ensayo de Dureza	61
3.1.2 Ensayo de Tensión	62
3.2 Especificaciones Técnicas para el Dimensionamiento de la Estructura	63
3.3 Modelado de la Estructura	64
3.3.1 Distribución de Cargas	67
3.4 Metodología de Simulación	72
<b>CAPÍTULO 4 CÁLCULO Y ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>74</b>
4.1 Identificación Mecánica	75
4.1.1 Pruebas del Ensayo de Dureza	75
4.1.2 Pruebas del Ensayo de Tensión	78
4.2 Curva Esfuerzo-Deformación	79
4.3 Respuesta de la Estructura bajo diferentes Condiciones de Operación	80
4.3.1 Carga Normal de Operación	81
4.3.2 Análisis Estático a 2.5 veces la Carga Normal de Operación	87
4.4 Análisis Modal en Condiciones de Vibración Libre	91
<b>Conclusiones</b>	<b>94</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1 Tranvías de Mulitas en la Ciudad de México	4
Figura 2 La primera Ruta de Tranvías Zócalo-Tacubaya	5
Figura 3 Tranvías Eléctricos	5
Figura 4 Camiones, Trolebuses, Peseros	6
Figura 5 METRO	6
Figura 6 Tren Ligero	7
Figura 7 Cambio de Tracción Animal por Eléctrica	8
Figura 8 Tranvía Eléctrico	9
Figura 9 Terminales de Tranvías en el Zócalo de la Ciudad	9
Figura 10 Tranvías modelo Brill	10
Figura 11 Nuevos Tranvías PCC	11
Figura 12 Primeros modelos de Trolebuses	12
Figura 13 Diversos modelos de Trolebuses	13
Figura 14 Sistema de Transporte Colectivo METRO	13
Figura 15 Trolebús MASA	14
Figura 16 Trolebús en la década de los 80's	14
Figura 17 Trolebuses Articulados	15
Figura 18 Trolebús Servicio Especial	15
Figura 19 Trolebús con Inversor de Corriente Alterna VVVF	16
Figura 20 Trolebús Cero Emisiones	18
Figura 21 Flota Vehicular	19
Figura 22 Esfuerzo-Deformación	21
Figura 23 Fuerzas Externas (verde) y Fuerzas Internas (rojo)	22
Figura 24 Fuerzas de Superficie y Fuerzas de Cuerpo	23
Figura 25 Fuerzas Internas	24
Figura 26 Fuerzas Coplanares	25
Figura 27 Esfuerzo Normal Simple	27
Figura 28 Esfuerzo Cortante Simple	28
Figura 29 Concentrador de Esfuerzos en una Placa sometida a Tensión	29
Figura 30 Flexión Positiva	31
Figura 31 Flexión Negativa	31
Figura 32 Elementos sometido a Tensión	32
Figura 33 Dispositivo para Prueba de Tensión	32
Figura 34 Ensayo de Tensión de Material Frágil y Dúctil	33
Figura 35 Ley de Hooke	34
Figura 36 Diagrama Esfuerzo-Deformación	35
Figura 37 Diagrama Esfuerzo-Deformación	36

Figura 38 Ensanchamiento por Efecto Poisson $\nu=0.5$	40
Figura 39 Círculo de Mohr para un Elemento	43
Figura 40 Círculo de Mohr para el Ensayo de Tensión al momento de la Fluencia	44
Figura 41 Gráfica de la Teoría de Tresca	45
Figura 42 Esfuerzo de Von Misses	46
Figura 43 Gráfica de la Teoría de la Energía de Distorsión	46
Figura 44 Criterio de Von Misses en Tres Dimensiones	47
Figura 45 Círculos de Mohr de los Ensayos de Tensión y Compresión	48
Figura 46 Gráfica de la Teoría de Coulomb-Mohr Dúctil	49
Figura 47 Gráfica de la Teoría del Esfuerzo Máximo Normal	50
Figura 48 Gráfica de la Teoría de Coulomb-Mohr Frágil	51
Figura 49 Análisis en Tres Dimensiones	55
Figura 50 Metodología empleada para el Desarrollo Experimental	57
Figura 51 Máquina para realizar el Ensayo de la Dureza Vickers	61
Figura 52 Máquina para realizar el Ensayo Universal de Tensión	62
Figura 53 Esquema de Dimensiones Exteriores del Trolebús	63
Figura 54 Nodos de la Estructura del Trolebús	65
Figura 55 Visualización de la Estructura	66
Figura 56 Distribución de Cargas	68
Figura 57 Distribución de Cargas (9 personas) y Diagrama de Cuerpo Libre	69
Figura 58 Comportamiento Esfuerzo-Deformación	71
Figura 59 Cargas y Restricciones aplicadas a la Estructura del Trolebús	73
Figura 60 Dimensionamiento de Perfiles	76
Figura 61 Secciones del Elemento Estructural	77
Figura 62 Geometría y Dimensiones de las Probetas para el Ensayo de Tensión	78
Figura 63 Pruebas en la Máquina de Ensayos Universales	79
Figura 64 Curva Esfuerzo-Deformación	79
Figura 65 Desplazamientos Nodales en: a) Dirección X, b) Dirección Y, c) Dirección Z	81
Figura 66 Suma Vectorial de los Desplazamientos Nodales	82
Figura 67 Fuerzas Axiales (unidades en N)	83
Figura 68 Esfuerzos Axiales (unidades en Pa)	84
Figura 69 Esfuerzos de Flexión (unidades en Pa)	85
Figura 70 Deformaciones Elásticas	86
Figura 71 Suma Vectorial de los Desplazamientos Nodales a una Carga aumentada 2.5 veces	88
Figura 72 Esfuerzos de Flexión generados a una Carga Útil incrementada 2.5 veces (unidades en Pa)	89
Figura 73 Deformaciones Elásticas a una Carga Útil incrementada 2.5 veces	90
Figura 74 Modos de Vibración Libre	92
Figura 75 Frecuencias Naturales vs Modo de Vibración	93

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabla 1 Categorías de Emisiones Parciales o Bajas	17
Tabla 2 Tipos de Esfuerzos	26
Tabla 3 Teorías de Falla	42
Tabla 4 Reacciones en Cuerpos Bidimensionales	53
Tabla 5 Tipos de Acero y sus características	59
Tabla 6 Características del Acero	60
Tabla 7 Conceptos y Dimensiones del Trolebús	64
Tabla 8 Fuerzas de Reacción en Ejes	70

## INTRODUCCIÓN

El transporte eléctrico tiene un futuro muy importante, es fundamental que se invierta en el para que no solo siga operando en las condiciones actuales sino para hacer crecer el sistema. Con 62 años de antigüedad, el Trolebús de la Ciudad de México ha tenido una importancia histórica enorme para el transporte del Distrito Federal, ya que es el sistema de transporte más antiguo de la ciudad y uno de los más influyentes; representa una enorme oportunidad desaprovechada, debido a que se les ha abandonado, por lo que se enfrentan al reto de renovarse o desaparecer, pues no se ha invertido en este servicio lo suficiente y su infraestructura rebasa ya, en la mayoría de sus unidades, su vida útil; a pesar de ser un medio de transporte que presenta las siguientes ventajas:

- ❖ El servicio es una opción de transporte limpio, económico y no contamine. No contaminan de manera ambiental y en ruido (son sumamente silenciosos)
- ❖ Es uno de los sistemas más seguros que operan en la capital, debido a las condiciones operativas bajo las cuales se presta el servicio, así como al diseño de unidades
- ❖ Es el que menor índice de accidentes registra: 10%, mientras que los microbuses llegan a registrar hasta 50% de accidentes

Ante esta problemática el Gobierno de la Ciudad de México preocupado por cumplir los retos que este sistema exige, tiene contemplado diseñar nuevas rutas que garanticen su vialidad y que brinden atención a los diversos sectores de la población, coadyuvando así con la política del gobierno para construir un corredor ecológico que genere beneficios tangibles a la comunidad. Además de sostener la operación actual y sus niveles, con la sustitución de la flota vehicular. Dada esta situación se ha decidido convertir a una de las vialidades más importantes de la Ciudad en un Corredor Cero Emisiones, con el objetivo de proporcionar el servicio de transportación de pasajeros en forma exclusiva, mediante trolebuses con alto nivel de fiabilidad.

La confiabilidad estructural y la duración de su vida de servicio, son los criterios principales para el diseño de los vehículos usados en aplicaciones de transporte. Si bien las



consideraciones en el diseño incluyen comodidad, seguridad, estabilidad direccional, etc. La integridad estructural y el reducido peso muerto forman los aspectos más importantes para llevar a cabo viajes económicos. Además, la competitividad global juega un papel importante en la forma que los componentes vehiculares son diseñados y construidos.

Es importante señalar que en algunos casos, los vehículos son fabricados usando diseños burdos, lo que conduce a altos costos de material y reduce la capacidad de carga. En vista de la regulación de dimensiones y peso vehiculares, sobre un máximo permisible, la industria de la transportación tiene identificada la necesidad de desarrollar unidades de peso ligero, para maximizar la capacidad de carga sin comprometer la estructura. De esta manera, los requerimientos de la manufactura moderna de vehículos para transportación de personal demandan un diseño de las unidades con un tiempo de vida razonable, para que estas sean comercialmente aceptables.

Primeramente se realizó una investigación en lo referente al desarrollo del Transporte Eléctrico en la Ciudad de México, haciendo una recapitulación de la importancia de los trolebuses para el transporte urbano en la ciudad, así como la implementación del trolebús cero emisiones. A continuación se llevó a cabo un análisis de los conceptos básicos para realizar la metodología para el desarrollo de la estructura del autobús; para que finalmente se realice el cálculo análisis estático de la estructura del trolebús a través del Método del Elemento Finito.

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

- 1.1 Antecedentes**
- 1.2 Inicios del transporte eléctrico**
- 1.3 Alternativa para el servicio urbano**
- 1.4 Fabricación de los primeros trolebuses**
- 1.5 Trolebús Cero Emisiones**

## 1.1 Antecedentes

Durante la Guerra de Independencia no se realizaron nuevas obras de comunicación, hasta que la República fue establecida se prestó atención a la urbanización de la Ciudad de México. Sin embargo, con relación al transporte, no hubo cambios durante la primera mitad del siglo XIX. En esa época, la ciudad era grande para las proporciones de ese tiempo con calles de barro y piedra. La gente que venía a trabajar o comerciar desde puntos cercanos, lo hacía en grandes carretones tirados por animales. Consecuentemente, transitaban caminantes, gente a caballo, recuas, diligencias que transportaban a clases privilegiadas y caravanas que transportaban mercancía.



Figura 1 Tranvías de Mulitas en la Ciudad de México

El 12 de octubre de 1852, el presidente Mariano Arista expidió la patente que celebraba el contrato y otorgaba la concesión, para que el señor José Gómez de la Cortina iniciara el Sistema Tranviario en la Ciudad de México, intentando comunicar a las poblaciones vecinas de Tlalpan con algunas zonas más importantes de la ciudad, como San Ángel, Mixcoac y Tacubaya, ampliándose dicha concesión en 1856 para construir la línea que ligara el Zócalo con Tacubaya (figura 2).



**Figura 2 La primera Ruta de Tranvías Zócalo-Tacubaya**

Los camiones de pasajeros se introdujeron en 1916, para esa época había tranvías eléctricos (figura 3) con asientos de caoba, estos se conectaban a tranvías jalados por mulas. El último de estos vehículos, hizo su recorrido final en 1934, el transporte eléctrico compitió con el naciente transporte de camiones, automóviles de alquiler y particulares accionados por gasolina, así como con el sistema de transporte del siglo XIX que se negaba a desaparecer.



**Figura 3 Tranvías Eléctricos**

Para esta época no estaban muy desarrollados aspectos como la seguridad, pues estos vehículos se encontraban abiertos en ambos lados y sin ventanas protectoras, se mantenía el concepto de postes laterales formando un marco estructural más rígido, se empleaba madera, pero no como elemento estructural de carga importante. Los pasajeros iban sentados en bancas laterales, las paredes, no eran curvas sino rectas y el conductor permanecía dentro de la cabina, lo que brindaba una mayor protección contra los elementos climáticos, observándose un avance en el concepto de la amortiguación, lo cual otorga una mayor vida útil a la estructura.



En la segunda mitad del siglo XX desaparecieron los tranvías, los cuales fueron sustituidos por camiones, trolebuses, taxis y peseros (figura 4) que se movían en rutas fijas

**Figura 4 Camiones, Trolebuses, Peseros**

Con la inauguración del Metro (figura 5) en el 1969, se crea un nuevo eje de organización del transporte urbano, que se ha ido desarrollando poco a poco a medida de que el sistema ha crecido. Con este paso, la ciudad de México obtiene un sistema masivo de transporte que la pone a la altura de las principales ciudades del mundo. Además, viene a satisfacer las necesidades de comunicación de una población que va creciendo de forma acelerada desde 1960.



**Figura 5 METRO**

Una vez que los tranvías desaparecieron, se inició la construcción de la primera línea del tren ligero (figura 6). Esta paso a formar parte de la red del servicio de transportes eléctricos de Distrito Federal, el cual opera en el sur de la ciudad de México, prestando servicio a las delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco desde 1986. Originalmente, la flota vehicular estaba constituida por 17 trenes con una capacidad máxima de 370 pasajeros por unidad. Estos fueron construidos mediante adecuaciones de los tranvías modelo PCC, sin embargo debido a la antigüedad de diversos componentes, se presentan averías continuamente; se sacaron de operación en la década de 1990 cuando se adquirieron nuevos trenes, que son los que están operando actualmente.

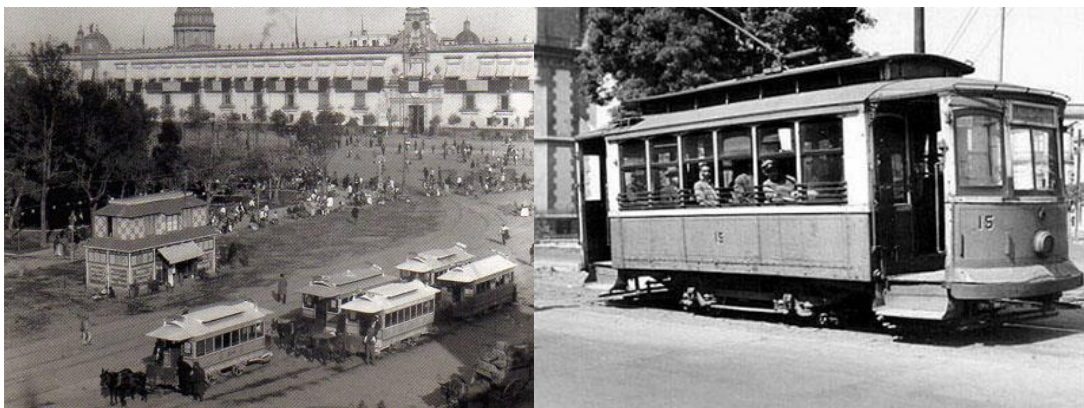


Figura 6 Tren Ligero

## 1.2 Inicios del Transporte Eléctrico

Desde finales del siglo pasado se le ha dado una gran importancia al mejoramiento del transporte público urbano en la ciudad de México; el primer intento que podría considerarse significativo fue aquel que señaló el cambio de la tracción animal por la

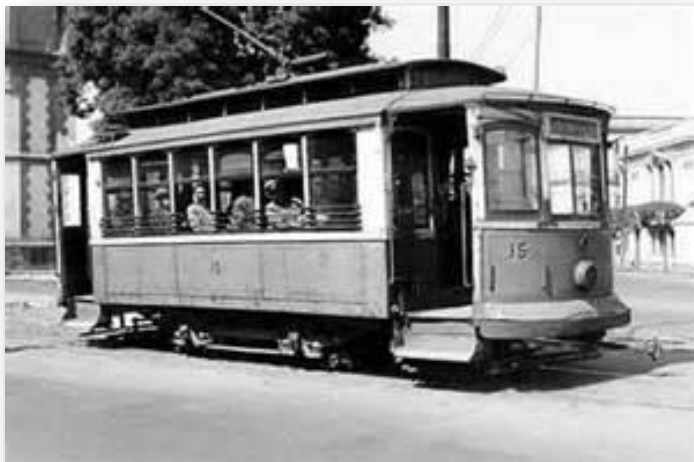
eléctrica (figura 7), autorizado través del acuerdo del 20 de febrero de 1881, expedido por el ayuntamiento.



**Figura 7 Cambio de Tracción Animal por Eléctrica**

Lo anterior constituyó el punto inicial de desarrollo del transporte eléctrico, lo cual no produjo resultados inmediatos, sin embargo abrió la brecha para la renovación del transporte urbano y fue hasta el 14 de Abril de 1896, que la compañía limitada de los ferrocarriles del distrito, pidió permiso al ayuntamiento para cambiar, en algunas de sus líneas, la tracción animal por la eléctrica. Para ello se realizaron diversos estudios acerca de las ventajas y los inconvenientes que podría ocasionar a la ciudad el cambio de tracción, encontrándose que, de la mejor conservación de pavimento y mayor limpieza en las calles, los viajes se efectuarían en el menor tiempo y se podrían fraccionar los trenes de modo que pudieran salir con mayor frecuencia, lo que representaba sin duda una gran ventaja para el público.

Los beneficios de la electricidad comenzaron a aprovecharse en el transporte público de la ciudad de México a finales del siglo XIX, dando frutos con los primeros tranvías eléctricos para el servicio de pasajeros, que comenzaron a operar el 15 de enero de 1900, con una capacidad de 24 a 32 asientos por carro, contando con dos motores General Electric de 19 KW cada uno, siendo la carrocería de madera. Este acto se considera un paso importante en la Ciudad de México hacia la modernidad.



La primera línea de tranvía eléctrico (figura 8) unió la ciudad de México con Tacubaya que era considerada en esos años, zona rural y por la distancia

**Figura 8 Tranvía Eléctrico**

A partir del 1 de marzo de 1901, la compañía limitada de tranvías eléctricos de México se hizo cargo de la explotación que, en diversas rutas realizaba la compañía de ferrocarriles del Distrito Federal, la cual se construyó en 1907 y adquirió vigor el desarrollo de su red en toda la ciudad de México (figura 9).



**Figura 9 Terminales de Tranvías en el Zócalo de la Ciudad**



Para los años siguientes comenzaron a operar seis líneas más a la Villa de Guadalupe, Arcos de Belén, Mixcoac, San Ángel, Tlalpan y Dolores.

La compañía de tranvías de México, con una red de 225 Km de vías para 1909, vio terminar la primera etapa de la hidroeléctrica de Necaxa, quedando así los generadores a vapor como auxiliar. La expansión de años subsecuentes (figura 10) donde se cumplió todo lo programado para antes de 1913, sin embargo los proyectos a terminar en 1918, como las líneas de Puebla y Toluca, quedaron suspendidas en Tulyehualco y la venta respectivamente; el fragor de estas obras se experimentó con innovaciones como el uso de concreto en durmientes o losas para la vía de 1 435 mm de ancho.



**Figura 10** Tranvías modelo Brill

Para 1922, su servicio era el de mayor difusión para el traslado de pasajeros, carga, funeraria, etc., estaba a la vanguardia de la publicidad ya que en la mayoría de las unidades se promocionaban diferentes empresas.

En mayo de 1927, la red de tranvías alcanza su apogeo con 347.5 Km sobre 16 rutas urbanas, 12 suburbanas y 5 ramales, donde los trenes recorrían en conjunto diariamente, 65 000 Km mediante 400 carros de pasajeros, 75 fletes y 25 funerarios.

Desde su nacimiento, los tranvías eléctricos en la ciudad de México se destacaron con un sistema de vanguardia tecnológica en varios sentidos: a partir de la serie, de la que el “Cero” es el único sobreviviente, se definió el uso de carrocerías más anchas con filas de asientos dobles; se experimentó con carros de 72 asientos acomodados en dos pisos, se implanto el uso de espejos retrovisores, el despacho centralizado de corridas, el sistema de tarifa múltiple para uso en carros de clase mixta, que permitía una diversificación de ingresos y servicios tales como:

- ❖ Fúnebres
- ❖ Presidarios
- ❖ Excursiones privadas
- ❖ Turísticas
- ❖ Trenes de carga por horario
- ❖ Circulación de un tranvía presidencia

En 1945, con la base en la recién promulgada Ley sobre Transportes Urbanos y Suburbanos del Distrito Federal, se crea el servicio dándole el nombre, en Abril de 1947, de Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal.

En octubre de 1952, el Departamento del Distrito Federal adquiere todos los bienes de las empresas: Compañía Limitada de Tranvías de México y Compañía de Ferrocarriles del Distrito Federal, las cuales pasaron a formar parte del patrimonio del organismo Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal.

En agosto de 1953, el Departamento del Distrito Federal autorizó la compra de 91 tranvías modelo PCC (figura 11). Este tipo de tranvía fue manufacturado en Estados Unidos, para su época era un diseño moderno y aerodinámico, tenía puertas automáticas, podía llevar hasta cien personas, era más cómodo y silencioso que los tranvías convencionales.



Figura 11 Nuevos Tranvías PCC

Consolidando esta acción, el 30 de diciembre de 1955, el Congreso de la Unión decreta la Ley de la institución Descentralizada de Servicio Público, denominada: Servicios de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, la cual fue publicada en el diario Oficial de la Federación el 4 de enero de 1956, abrogando el ordenamiento del año 1946.

El uso del tranvía comenzó a declinar en el transporte de cinco años y durante casi una década entre los años 1959 y 1968, solo operaron 11 rutas troncales y dos locales, haciéndose un gran esfuerzo por rehabilitar en 1960 los PCC.

### 1.3 Alternativa para el Servicio de Transporte Urbano

Los primeros trolebuses (figura 12) en la Ciudad de México comenzaron a operar en 1946, el STE adquirió veinte unidades modelo Westram, las cuales fueron reparadas y puestas en operación el 9 de marzo de 1951, fecha en que fue inaugurado el servicio formal de la línea Tacuba-Calzada de Tlalpan.



Figura 12 Primeros modelos de Trolebuses

El crecimiento del parque vehicular (figura 13) comenzó en 1952, cuando llegaron de Italia los primeros trolebuses Turbocar, adquiriéndose el año siguiente 30 unidades más de origen italiano modelo Cassaro. En 1954, se incorporaron 50 trolebuses más, a la flota vehicular ya existente, dos años después se adquirieron 117 y posteriormente 67 unidades más, dando un total de 294 unidades.



Figura 13 Diversos modelos de Trolebuses

Con las constantes adquisiciones de vehículos, el STE llegó a construirse como la columna vertebral del transporte público de la ciudad de México a finales de la década de 1960, contando con una flota vehicular de 872 unidades, constituidas por tranvías y trolebuses; situación que cambió con la primera línea del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

El METRO (figura 14) es la obra civil y arquitectónica más grande y compleja de la Ciudad de México. Su principal característica es que está en un proceso permanente de transformación y crecimiento, por la incorporación de nuevas tecnologías y la ampliación de la red



Figura 14 Sistema de Transporte Colectivo METRO

## 1.4 Fabricación de los Primeros Trolebuses en México

Una vez creado el Servicio de Transportes Eléctricos se iniciaron los planes para reestructurar y renovar el servicio. La gran mayoría del material rodante había rebasado su vida útil y era necesario reemplazarlo. Las necesidades de una urbe en constante crecimiento como la ciudad de México, exigía que los carros cubrieran los niveles óptimos de capacidad, velocidad, economía de mantenimiento, servicio rápido y eficiencia.



En la década de los ochenta, se pusieron en servicio, en el eje vial Lázaro Cárdenas, los primeros 10 trolebuses fabricados en México por Mexicana de Autobuses S.A. (MASA) (figura 15).

Figura 15 Trolebús MASA

Durante el año de 1980 se recibieron cien trolebuses nuevos de mexicana de Autobuses S.A., a través de la Sociedad Mexicana de Crédito Industrial S.A. (MASA-Somex). Se inicia la restauración de las carrocerías e interiores, así como de los componentes mecánicos y eléctricos de 241 trolebuses, cambiando la imagen (figura 16).



Figura 16 Trolebús en la década de los 80's

Estos operaron con eficiencia y seguridad, algunas pequeñas fallas técnicas de esta nueva experiencia, fueron corregidas sobre la marcha por el equipo de técnicos del STE, apoyados por los técnicos de Mexicana de Autobuses S.A., y por técnicos japoneses que intervienen en el programa, consecuentemente esa fecha es histórica en el derrotero de transportes eléctricos y de la industria mexicana.

En 1985 se acoplaron dos unidades y después de la evaluación prototipo se aprueba la conversión a unidades llamadas trolebuses articulados (figura 17).



Figura 17 Trolebuses Articulados



Figura 18 Trolebús Servicio Especial

En la década de los 90s fue necesario hacer una rehabilitación del parque vehicular adquirido, adaptándose 5 trolebuses para prestar servicio especial (figura 18) a personas con alguna discapacidad y de la tercera edad.

La STE adquirió un equipo de tracción con tecnología de punta (inversor de corriente alterna VVVF), utilizando módulos inteligentes IPM's (figura 19), instalado en una carrocería nueva. Estos nuevos trolebuses con avances tecnológicos y diseños vanguardistas tienen un alto grado de confort y seguridad para los usuarios.



Figura 19 Trolebús con Inversor de Corriente Alterna VVVF

## 1.5 Trolebuses Cero Emisiones

Un vehículo de cero emisiones conocido como ZEV (Zero-emissions vehicle), no emite sustancias contaminantes a través del tubo de escape generadas por la fuente de propulsión a bordo del vehículo.

La primera definición de vehículo de emisiones cero tiene su origen en el Programa del Vehículo de Bajas Emisiones, conocido como LEV I (Low-Emission Vehicle) adoptado por CARB en 1990. El mandato ZEV ha evolucionado desde entonces y ha sido modificado para crear nuevas categorías de emisiones parciales o bajas (Tabla 1)

CATEGORÍAS DE EMISIONES PARCIALES O BAJAS	
<b>Vehículo de bajas emisiones (LEV: Low-Emission Vehicle)</b>	Estándar de emisiones menos exigente
<b>Vehículos de ultrabajas emisiones (ULEV: Ultra Low Emission Vehicle)</b>	Son 50% más limpios con respecto a las emisiones de los automóviles nuevos promedio del año modelo 2003
<b>Vehículos de super-ultrabajas emisiones (SULEV: Super Ultra Low Emission Vehicle)</b>	Emiten niveles menores de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos nitrosos y partículas finas, con respecto a los vehículos convencionales; son 90% más limpios con respecto a las emisiones de los automóviles nuevos promedio del año modelo 2003
<b>Vehículo de cero emisiones parciales (PZEV: Partial Zero Emission Vehicle):</b>	Cumple el estándar SULEV, tiene garantía de 15 años o 150.000 millas y cero emisión de vapores, son 80% más limpios con respecto a las emisiones de los automóviles nuevos promedio del año modelo 2002
<b>Vehículo de tecnología avanzada de cero emisiones parciales (AT-PZEV: Advanced Technology PZEV)</b>	Cumple con los estándares PZEV y que está dotado de alguna tecnología que permite cero emisiones (ZEV). Estos vehículos son 80% más limpios con respecto a las emisiones de los automóviles nuevos promedio del año modelo 2002
<b>Vehículo de cero emisiones (ZEV: Zero Emission Vehicle)</b>	Emite cero emisiones por el tubo de escape, y es un 98% más limpio con respecto a las emisiones de los automóviles nuevos promedio del año modelo 2003. La definición se refiere a las emisiones directas producidas por el vehículo y no toma en cuenta las emisiones asociadas al ciclo completo de producción de la energía o del combustible utilizado por el motor para impulsar el vehículo

Tabla 1 Categorías de Emisiones Parciales o Bajas

El Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, preocupado por brindar un servicio de trolebuses eficiente y de calidad, ha mejorado sus unidades, ya sea rehabilitando las que, como resultado del uso intensivo así lo requieran, o mediante la adquisición de nuevos trolebuses con avances tecnológicos, siempre pensando en el beneficio social para los habitantes de la zona urbana de la ciudad de México.



Este modo de transporte contribuye a disminuir los índices de contaminación que afectan a nuestra ciudad. Además, el trolebús a lo largo de su historia, ha conquistado la preferencia del público usuario, transportando más de 250 000 pasajeros diariamente.

Por esta razón, el Gobierno del Distrito Federal, consciente de la problemática que en materia de transporte aqueja a la Ciudad de México, tiene el objetivo de proporcionar el servicio de trolebús con alto nivel de fiabilidad, es una opción de transporte limpio, económico y no contaminante, que ofrece la garantía de viajar en uno de los transportes más seguros, debido a las condiciones operativas bajo las cuales se presta el servicio, así como al diseño de las unidades (figura 20).

Las ventajas que este tipo de transporte ofrece son:

- ❖ Mejoramiento de la vialidad para transporte público de pasajeros y automóviles privados
- ❖ Reducción del ruido y la contaminación
- ❖ Reducción en los tiempos de traslado durante el viaje
- ❖ Interconexión con otros modos de transporte
- ❖ Mejoramiento del entorno urbano
- ❖ Incremento en la seguridad de los usuarios y peatones
- ❖ Reducción del nivel de estrés
- ❖ Fortalecimiento en la confianza de la ciudadanía hacia el uso de transporte eléctrico



Figura 20 Trolebús Cero Emisiones



**Figura 21 Flota Vehicular**

La Red del Servicio actualmente cuenta con una flota vehicular (figura 21) de 340 trolebuses que operan en sus 12 líneas, a un intervalo de paso promedio de 6 minutos, con una longitud de operación de 203.64 kilómetros, incluyendo los Corredores Cero Emisiones dentro del Distrito Federal, beneficiando a la población de 9 Delegaciones

# **CAPÍTULO 2**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

- 2.1 Fuerzas**
- 2.2 Esfuerzos**
- 2.3 Tensión**
- 2.4 Equilibrio de Cuerpos Rígidos**

La mecánica de materiales estudia las deformaciones unitarias y desplazamiento de estructuras y sus componentes debido a las cargas que actúan sobre ellas, razón por la que es una disciplina básica, en muchos campos de la ingeniería, entender el comportamiento mecánico es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de estructuras. Estudia los efectos internos del esfuerzo y la deformación (figura 22) en un cuerpo sólido que está sometido a una carga externa. El esfuerzo se encuentra asociado con la resistencia del material del que está hecho el cuerpo, mientras que la deformación es una medida de la elongación (cambio de tamaño y forma) que experimenta éste.

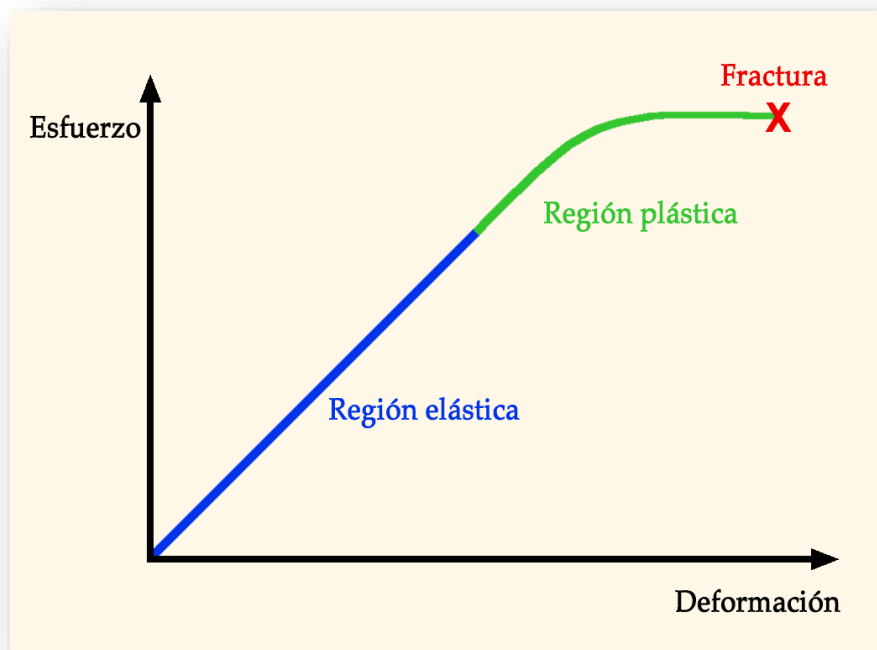


Figura 22 Esfuerzo-Deformación

## 2.1 Fuerzas

La fuerza es una magnitud vectorial que mide la intensidad del intercambio de momento lineal entre dos partículas; es todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los materiales. Existen dos tipos de fuerzas (figura 23):

- ❖ **Fuerza Externa:** Fuerza que se ejerce sobre un cuerpo desde el exterior. Acción o influencia capaz de modificar el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo que son dirigidos hacia el interior
- ❖ **Fuerza Interna:** Fuerza que se ejerce en el interior del cuerpo. Acción o influencia capaz de modificar el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo que son dirigidos hacia el exterior

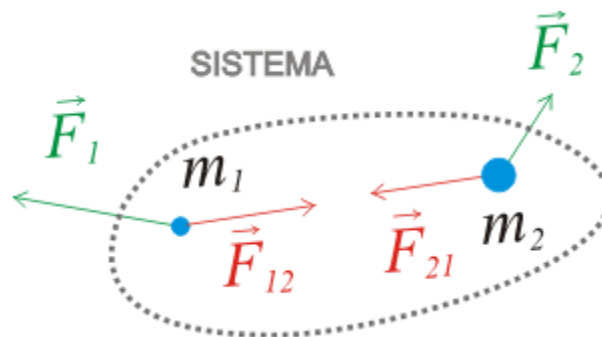


Figura 23 Fuerzas Externas (verde) y Fuerzas Internas (rojo)

### 2.1.1 Fuerzas Externas

Una fuerza es externa al sistema si dicha fuerza es el resultado de la interacción de una partícula del sistema con otra que se encuentra fuera de él. Estas fuerzas son las responsables del comportamiento externo del sistema. Un cuerpo puede estar sometido a dos tipos de cargas (figura 24):

- ❖ **Fuerzas de Superficie:** Son causadas por el contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro. En todos los casos esas fuerzas están distribuidas sobre el área de contacto entre los cuerpos. Si está área es pequeña en comparación con el área de la

superficie total del cuerpo, entonces la fuerza de superficie puede pasar a ser una fuerza concentrada, que se aplica a un punto sobre el cuerpo. Si la carga de la superficie se aplica a lo largo de un área estrecha o línea, la carga puede considerarse como una carga linealmente distribuida,  $w(s)$ . Aquí la carga se mide como si tuviese una intensidad de fuerza/longitud a lo largo de la línea  $s$ . la fuerza resultante de  $F_R w(s)$  es equivalente al área, y esta resultante actúa a través del centroide  $C$  (centro geométrico) de dicha área. Las cargas ubicadas en toda la longitud de una viga es un ejemplo típico en el que, a menudo, se aplica este principio.

- ❖ **Fuerzas de Cuerpo:** Se desarrolla cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo sin contacto físico directo entre éstos. Entre algunos ejemplos se encuentran los efectos causados por la gravitación de la tierra o por su campo electromagnético. Aunque las fuerzas de cuerpo afectan cada una de las partículas que lo forman, estas fuerzas se representan por una sola fuerza concentrada que actúa sobre el cuerpo. En el caso de la gravitación, esta fuerza se llama el peso del cuerpo y actúa a través del centro de gravedad del mismo.

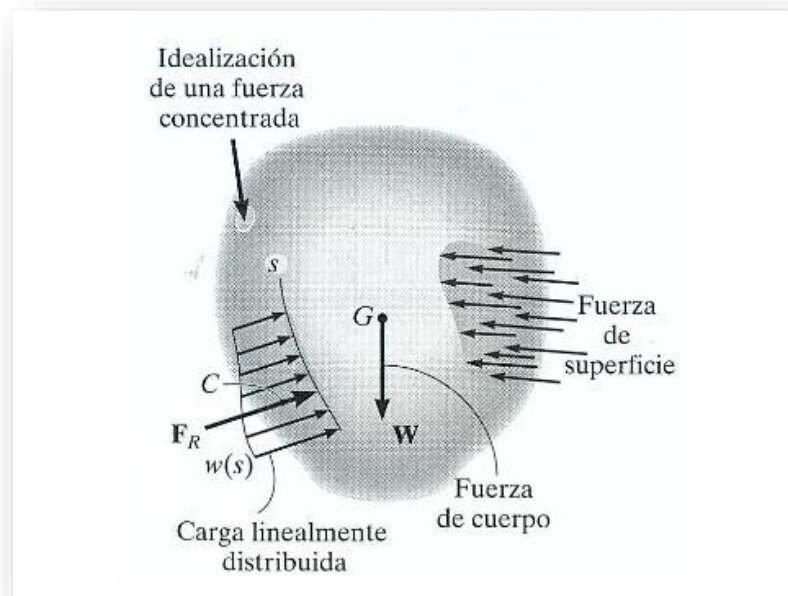


Figura 24 Fuerzas de Superficie y Fuerzas de Cuerpo

### 2.1.2. Fuerzas Internas

Se dice que una fuerza es interna (figura 25) al sistema si dicha fuerza es el resultado de la interacción de una partícula del sistema con otra partícula que se encuentra dentro de él. Estas fuerzas son las que determinan el grado de rigidez o cohesión de un determinado cuerpo o sistema y no influyen en el comportamiento externo del sistema. Son fuerzas de reacción en el interior de los cuerpos las cuales actúan para equilibrarlo y evitar que se deforme bajo la acción de cargas externas. Dichas deformaciones se reflejan en esfuerzos dentro del material. En la mecánica de materiales, la estática se usa para determinar las cargas resultantes que actúan dentro de un cuerpo.

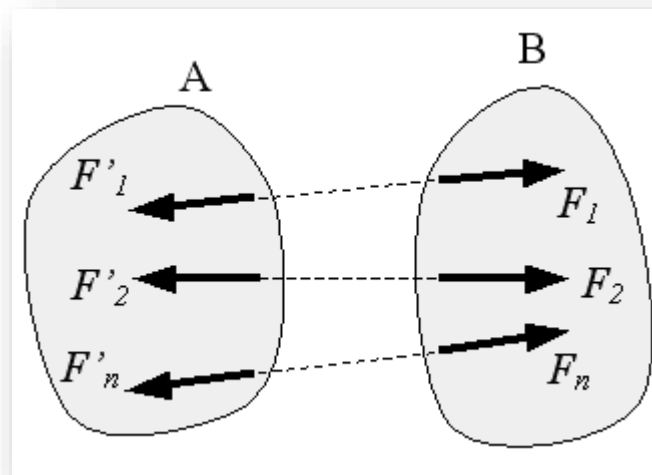


Figura 25 Fuerzas Internas

Se considera al cuerpo en equilibrio por medio de las cuatro fuerzas externas. A fin de obtener las cargas internas que actúan sobre una región específica dentro del cuerpo, es necesario hacer una sección imaginaria o corte a través de la región donde van a determinar las cargas internas. Después, las dos partes del cuerpo se separan y se dibuja el diagrama del cuerpo libre de una de las partes.

Observe que en realidad existe una distribución de la fuerza interna que actúa sobre el área expuesta de la sección. Estas fuerzas representan los efectos del material de la parte superior del cuerpo que actúa sobre el material adyacente de la parte inferior.

### 2.1.3. Fuerzas Coplanares

Si el cuerpo está sometido a un sistema de fuerzas coplanares (figura 26), entonces en la sección sólo existen componentes de fuerza normal, de fuerza cortante y de momento flexionante. Si se usan los ejes coordenados  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , como se muestra en el segmento de la izquierda, entonces  $N$  puede obtenerse al aplicar  $\Sigma F_x = 0$  y  $V$  se puede obtener de  $\Sigma F_y = 0$ , el momento flexionante  $M_0$  se puede determinar mediante la suma de momentos respecto al punto  $O$  (el eje  $z$ ),  $\Sigma M_0 = 0$ , a fin de eliminar los momentos causados por la incógnitas  $N$  y  $V$ .

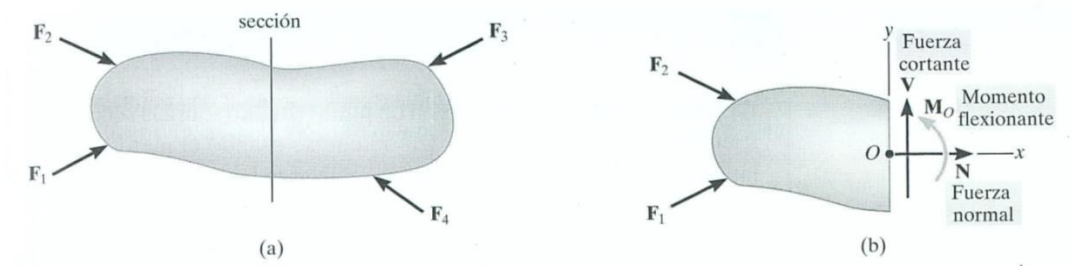


Figura 26 Fuerzas Coplanares

## 2.2 Esfuerzos

Uno de los problemas básicos de la ingeniería es seleccionar el material más apropiado y dimensionarlo correctamente, de manera que permita que la estructura o máquina proyectada trabaje con la mayor eficacia. Para ello, es esencial determinar la resistencia, la rigidez y otras propiedades de los materiales (Tabla 2).



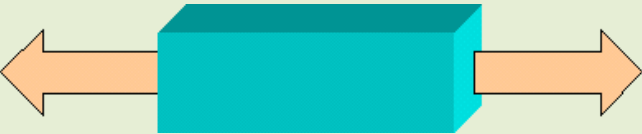

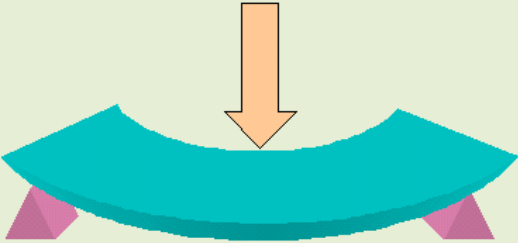

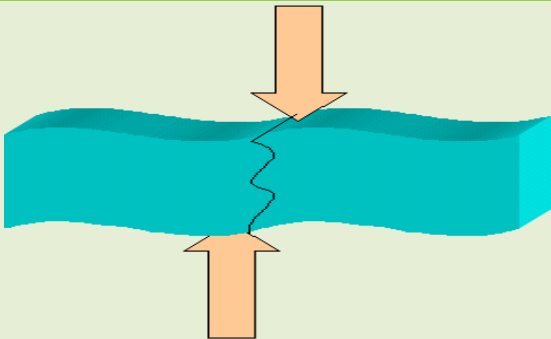
TIPOS DE ESFUERZOS	
	<p><b>TRACCIÓN</b> La estructura se alarga, es decir se estira</p>
	<p><b>COMPRESIÓN</b> La estructura se comprime, es decir se acorta</p>
	<p><b>FLEXIÓN</b> La estructura tiene tendencia a doblarse</p>
	<p><b>TORSIÓN</b> La estructura tienden a girar, es decir a retorcerse</p>
	<p><b>CORTADURA O CIZALLADURA</b> La estructura se desgarrá o se corta</p>

Tabla 2 Tipos de Esfuerzos

### 2.2.1 Esfuerzo Normal Simple

Cuando el esfuerzo es constante o uniforme, por fuerzas normales al plano sobre el que actúan, se llama estado de esfuerzo simple (figura 27):

- ❖ Resultado de la aplicación de cargas perpendiculares a la sección transversal del elemento. El análisis de cargas y deformaciones resultan en una ecuación para el cálculo de esfuerzos normales debidos a cargas axiales de tensión
- ❖ Si la carga aplicada es axial, pero de compresión, el análisis de cargas y deformaciones resultan en una ecuación para el cálculo de esfuerzos normales debidos a cargas axiales de compresión

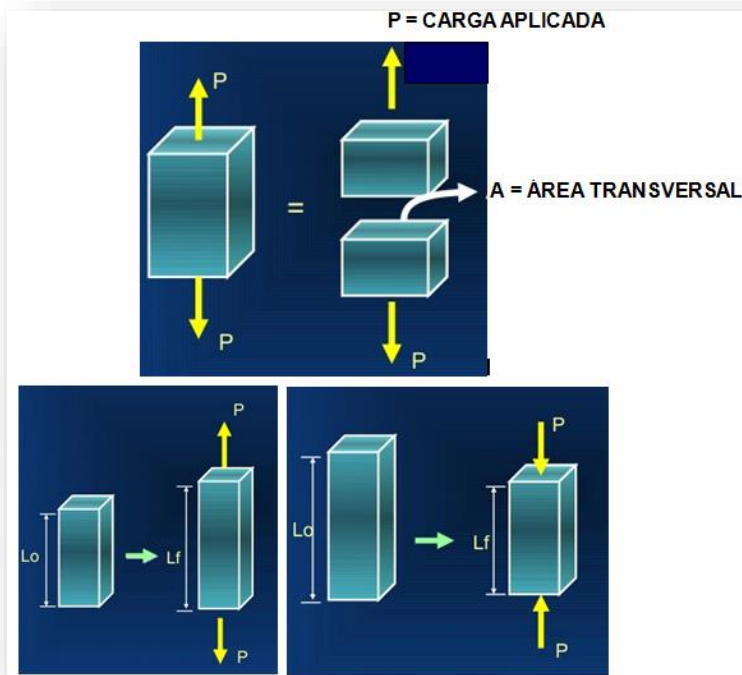


Figura 27 Esfuerzo Normal Simple

En donde:

$\sigma$  = Esfuerzo o fuerza por unidad de área

$P$  = Carga aplicada

$A$  = Área de la sección transversal

La fuerza por unidad de área que soporta un material se denomina **esfuerzo** y se expresa matemáticamente en la forma:

$$\sigma = \frac{p}{A}$$

### 2.2.2 Esfuerzo Cortante Simple

El esfuerzo cortante es producido por fuerzas que actúan paralelamente al plano que las resiste, puede denominarse esfuerzo tangencial. Aparecen esfuerzos cortantes (figura 28) siempre que las fuerzas aplicadas obliguen a que una sección del sólido tienda a deslizarse sobre la sección adyacente. El análisis de cargas y deformaciones resultan en una ecuación para el cálculo de esfuerzos cortantes debido a cargas axiales de corte:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

En donde:

$\tau$  = Esfuerzo

F= Fuerza que produce el esfuerzo cortante

A= Área sometida a esfuerzo cortante

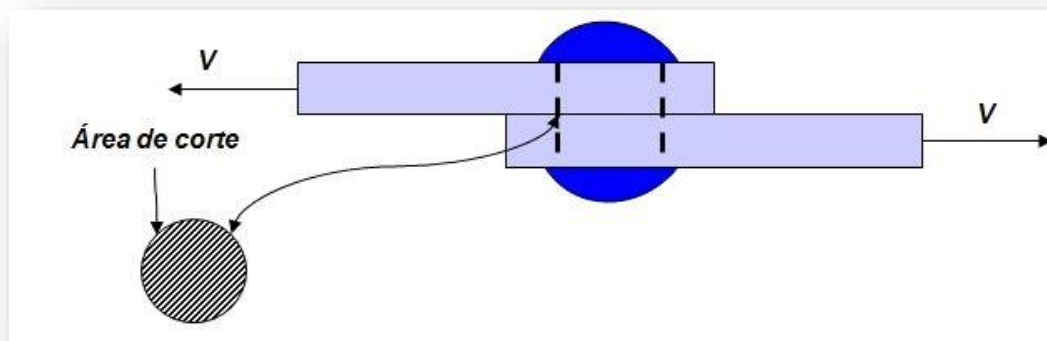


Figura 28 Esfuerzo Cortante Simple

### 2.2.3 Concentradores de Esfuerzos

Los concentradores de esfuerzos (figura 29) se pueden definir como los cambios de geometría en un cuerpo sometido a una carga, como pueden ser grietas, agujeros o muescas teniendo cada uno su propio factor de concentración de esfuerzos.

Las ecuaciones elementales empleadas en el diseño mecánico se basan en elementos que tienen una sección transversal constante o que el cambio de esta es gradual, pero la presencia de concentradores de esfuerzos modifican la distribución de esfuerzos en elementos sometidos a carga, por lo que existen esfuerzos mayores en las zonas donde se tiene la presencia de estas discontinuidades geométricas. El concepto de concentradores de esfuerzos, se refiere al estado macroscópico de esfuerzos y tiene un sentido único para problemas en el plano que involucran la definición de esfuerzo promedio. Entonces si se barrena un agujero en una placa sometida a tensión, el esfuerzo presente en el elemento es constante siempre y cuando se mida a una distancia apreciable del agujero (en dirección perpendicular a la aplicación de la carga), pero el esfuerzo tangencial paralelo a la aplicación de la carga en el borde del agujero, se incrementará considerablemente.

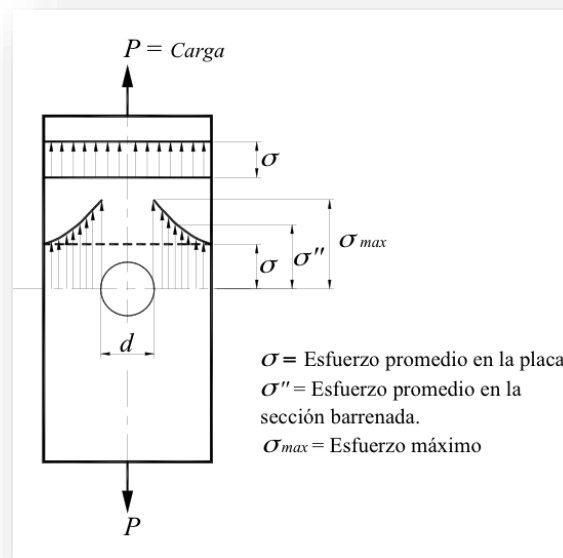


Figura 29 Concentrador de Esfuerzos en una Placa sometida a Tensión

El cambio o incremento en el esfuerzo en el borde es denominado concentración de esfuerzos. Se observa que la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en los bordes de la sección barrenada  $\sigma_{(max)}$ , perpendicular a la aplicación de la carga y posteriormente disminuye gradualmente hasta un esfuerzo  $\sigma$  (siempre y cuando la geometría se lo permita).

### 2.2.4 Esfuerzo de Trabajo o Factor de Seguridad

El esfuerzo de trabajo es el esfuerzo real que soporta el material bajo la acción de unas cargas, y no debe sobrepasar al esfuerzo admisible, que es el máximo al que puede ser sometido el material, con un cierto grado de seguridad en la estructura o elemento que se considere. En un diseño real, el esfuerzo admisible  $\sigma_w$  ha de ser inferior al límite de proporcionalidad, con objeto de que pueda aplicarse en todo momento la relación lineal entre esfuerzos y deformaciones que establece la Ley de Hooke, como es difícil determinar exactamente el límite de proporcionalidad, se acostumbra tomar como base para fijar el esfuerzo admisible el límite de fluencia ( $\sigma_{yp}$ ), o en su defecto, el esfuerzo ultimo dividiéndolos entre un número  $N$ , convenientemente elegido, que se llama factor de seguridad.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_{yp}}{N} \quad \text{o bien} \quad \sigma_w = \frac{\sigma_{ult}}{N}$$

### 2.2.5 Momento Flexionante

El momento flexionante es la suma de los momentos de todas las fuerzas que actúan en la porción de la viga a la izquierda o la derecha de una sección, respecto al eje perpendicular al plano de las fuerzas y que pasa por el centro de gravedad centroide de la sección considerada. Analíticamente viene dado por:

$$M = (\Sigma M)_{izq} = (\Sigma M)_{der}$$

En donde el subíndice *izq* pone de manifiesto que el momento se evalúa con las fuerzas de la izquierda y el subíndice *der* que se refiere a las fuerzas de la derecha.

El criterio más aceptado es que el momento flexionante es positivo si la flexión que produce en la viga presenta la concavidad hacia arriba.

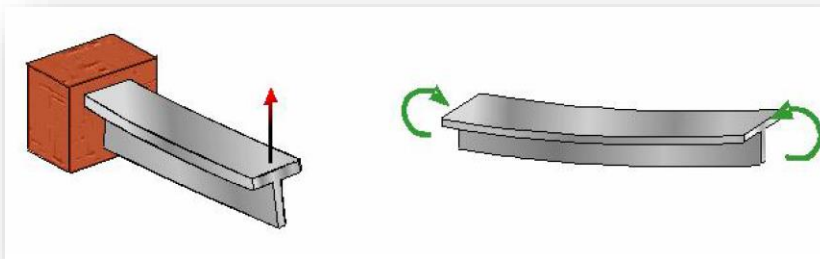


Figura 30 Flexión Positiva

Las fuerzas que actúan hacia arriba respecto de cualquier sección producen momentos flexionantes positivos (figura 30), observándose una deformación cóncava

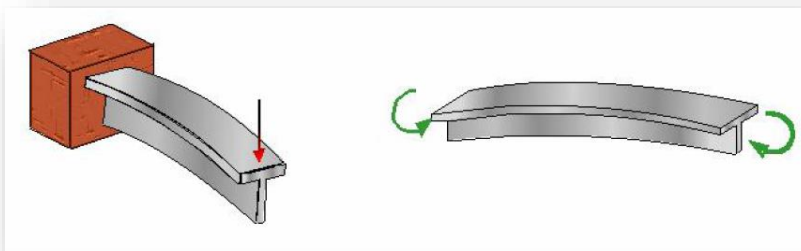


Figura 31 Flexión Negativa

Las fuerzas que actúan hacia abajo respecto de cualquier sección producen momentos flexionantes negativos (figura 31), observándose una deformación convexa

### 2.3 Tensión

El ensayo de tensión o tracción se utiliza para medir la resistencia de un material (metales y aleaciones) a una fuerza estática aplicada lentamente; su procedimiento consiste en someter una muestra del material a un esfuerzo axial que aumente la tensión a una velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto (figuras 32 y 33).

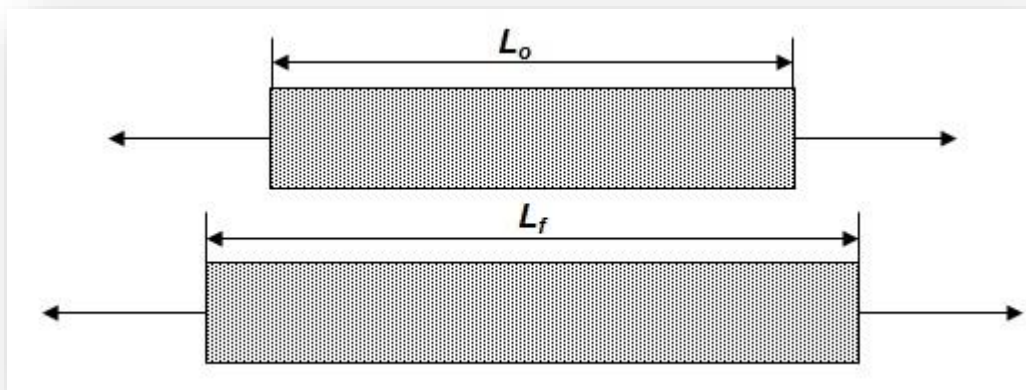


Figura 32 Elemento sometido a Tensión

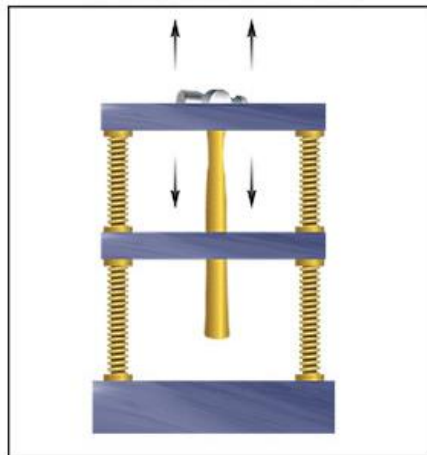


Figura 33 Dispositivo para Prueba de Tensión

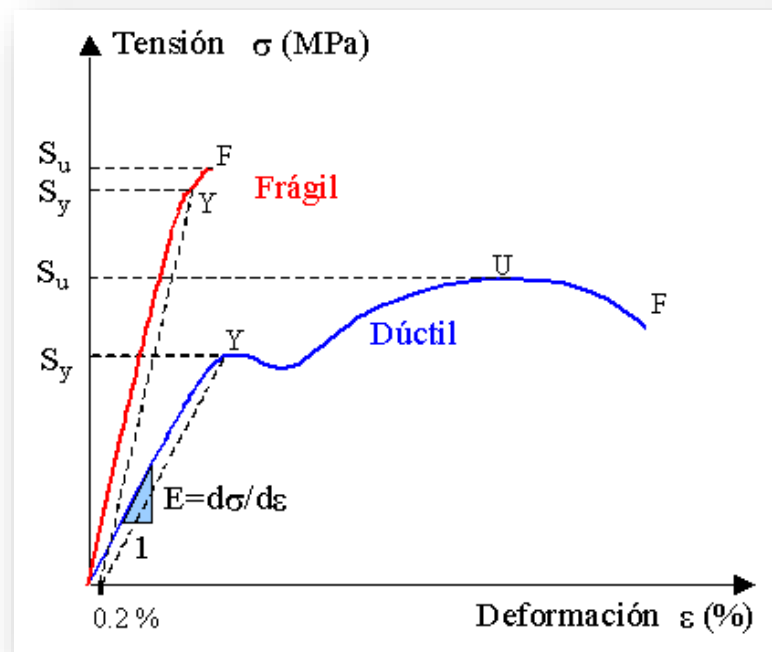


Figura 34 Ensayo de Tensión de Material Frágil y Dúctil

Las dos curvas correspondientes al Ensayo de Tensión de un material frágil y uno dúctil (figura 34). La curva obtenida tiene los siguientes puntos característicos:

- ❖ **Y:** Límite de fluencia (punto que marca el fin de la zona de comportamiento elástico en el que la deformación permanente alcanza el 0.2%)
- ❖ **U:** Límite de resistencia última (máxima tensión que resiste el material antes de romper)
- ❖ **F:** Límite de rotura (punto en el que rompe el material)

Las tensiones correspondientes a los puntos de fluencia y rotura, se conocen como:

$S_y$  = Límite de Fluencia

$S_u$  = Límite de Rotura

En los materiales frágiles los puntos U y F coinciden en la práctica en un mismo punto.



### 2.3.1 Ley de Hooke

La Ley de Hooke (figura 35) establece que el límite de la tensión elástica de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza.

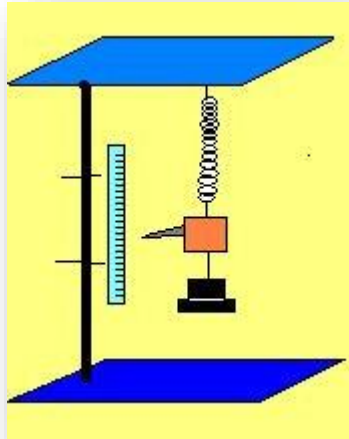


Figura 35 Ley de Hooke

Mientras no se exceda el límite de elasticidad de un cuerpo la deformación elástica que sufre es directamente proporcional al esfuerzo recibido

Los diagramas de esfuerzo y deformación para la mayoría de los materiales de ingeniería presentan una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación dentro de la región elástica. En consecuencia, un incremento en el esfuerzo ocasiona un aumento proporcional en la deformación. Este hecho fue descubierto por Robert Hooke en 1676 mediante el uso de resortes y se conoce como la ley de Hooke (figura 36). Puede expresarse en forma matemática como:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Aquí  $E$  representa la constante de proporcionalidad, que se denomina Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

La ecuación de Hooke representa la ecuación de la porción recta inicial del diagrama esfuerzo–deformación (figura 36) hasta el límite de proporcionalidad. A diferencia del módulo de elasticidad que representa la pendiente de esta recta. Como la deformación es adimensional, a partir de la ley de Hooke  $E$  tendrá las mismas unidades que el esfuerzo: psi, ksi o Pa.

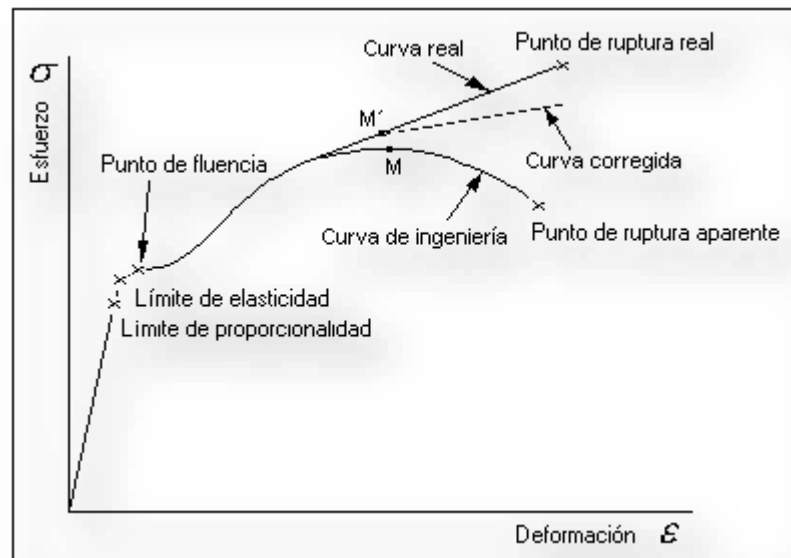


Figura 36 Diagrama Esfuerzo-Deformación

Los puntos importantes del diagrama de esfuerzo-deformación son:

**A) Límite de Proporcionalidad:** Hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal

**B) Límite de Elasticidad:** Más allá de este límite el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente

**C) Esfuerzo de Fluencia:** Aparece en el diagrama un considerable alargamiento o cedencia sin el correspondiente aumento de carga. Este fenómeno no se observa en los materiales frágiles

**D) Esfuerzo Último:** Máxima ordenada del diagrama esfuerzo– deformación

**E) Punto de Ruptura:** Cuando el material falla

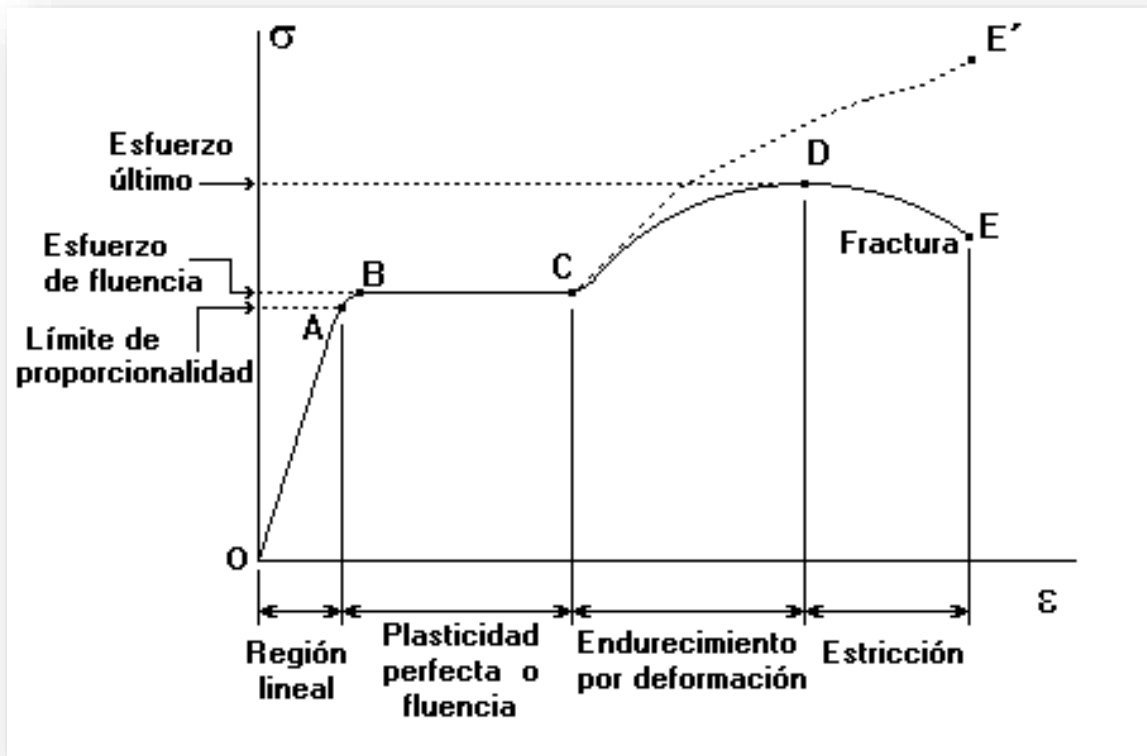


Figura 37 Diagrama Esfuerzo-Deformación

Dado que el límite de proporcionalidad, elasticidad y punto de cedencia están tan cerca se considera para la mayoría de los casos como el mismo punto. De manera que el material al llegar a la cedencia deja de tener un comportamiento elástico y la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación (Figura 37) deja de existir.

### 2.3.2 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales permiten diferenciar un material de otro ya sea por su composición, estructura o comportamiento ante algún efecto físico o químico, estas propiedades son usadas en dichos materiales de acuerdo a algunas necesidades en

donde se enfoca en el material para que este solucione la exigencia creada. Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tensión son:

**Módulo de elasticidad:** En la primera parte del ensayo de tensión, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. Siempre que el límite elástico no se supere, una deformación elástica (deformación) es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada por unidad de área (esfuerzo). Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5%. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la Ley de Hooke:

$$\sigma(\text{tensión}) = E \varepsilon(\text{deformación})$$

o

$$E = \frac{\sigma(\text{tensión})}{\varepsilon(\text{deformación})} = Pa$$

Donde **E** es el Módulo de Elasticidad Longitudinal o Módulo de Young: para materiales cuya longitud es mucho mayor que el ancho del espesor

$$\text{Módulo de Young} = \frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{\text{Deformación Longitudinal}}$$

**Límite elástico convencional de 0.2%:** Es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de esfuerzo al que un metal o aleación muestra una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva esfuerzo–deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como al esfuerzo al que se produce una deformación

elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 %.

**Resistencia a la tracción:** Es la máxima tensión que se alcanza en la curva esfuerzo–deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal (estricción), la tensión convencional decrece con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura, porque la deformación convencional se determina utilizando el área original de la sección transversal de la probeta. Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. Un punto importante del diagrama esfuerzo–deformación convencional que se debe entender es que el metal o aleación puede soportar esfuerzos superiores a la propio esfuerzo de fractura. Esto sólo se debe a que se utiliza el área original de la sección transversal para determinar el esfuerzo convencional y el esfuerzo descendiente en la última parte del ensayo. La resistencia a la tracción de un metal se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva esfuerzo–deformación hasta el eje de los esfuerzos. El valor del esfuerzo donde esa línea intersecta al eje de los esfuerzos se denomina resistencia máxima o resistencia a la tracción. Este parámetro no es de mucha utilidad en el diseño ingenieril con aleaciones dúctiles porque se produce mucha deformación plástica antes de alcanzarlo. No obstante, la resistencia a la tracción puede aportar alguna información sobre la presencia de defectos. Si el metal contiene porosidad o inclusiones, estos defectos pueden producir que el valor de la resistencia máxima sea menor que la normal.

**Porcentaje de alargamiento a la fractura:** El porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de la ductilidad del metal. Esto suele expresarse como como porcentaje de alargamiento. En general, a mayor ductilidad del metal, mayor porcentaje de deformación. Para establecer la deformación durante el ensayo, se puede utilizar un extensómetro que permita determinar continuamente la deformación. No obstante, el porcentaje de deformación de una probeta después de la fractura se puede medir uniendo los fragmentos y midiendo la longitud final con un calibre. El porcentaje de alargamiento se calcula mediante la ecuación:

$$\begin{aligned} \% \text{ Alargamiento} &= \frac{\text{Longitud final} - \text{Longitud inicial}}{\text{Longitud inicial}} \times 100\% \\ &= \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \end{aligned}$$

El porcentaje de alargamiento a fractura tiene importancia no sólo como medida de la ductilidad, sino también como índice de calidad del metal. Si existe porosidad o inclusiones en el metal, o si existe un deterioro debido a un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de alargamiento decrecerá por debajo del valor normal.

**Porcentaje de estricción a fractura:** La ductilidad de un metal o aleación también se puede expresar en términos de porcentaje de reducción de área o estricción. Esta magnitud normalmente se obtiene del ensayo de tensión utilizando una probeta de 0.50 pulgadas (12.7 mm). Después del ensayo, se determina el diámetro de la sección transversal de la zona de la fractura. Utilizando las medidas del diámetro inicial y del diámetro final, el porcentaje de estricción se determina según la ecuación.

$$\begin{aligned} \% \text{ Reducción de área} &= \frac{\text{Área inicial} - \text{Área final}}{\text{Área inicial}} \times 100\% \\ &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \end{aligned}$$

El porcentaje de reducción de área, como el porcentaje de alargamiento, es una medida de la ductilidad del material y un índice de su calidad. El porcentaje de reducción en el área se puede disminuir si existen defectos como inclusiones y/o porosidad en la muestra metálica.

### 2.3.3 Coeficiente de Poisson

La deformación longitudinal elástica de un metal produce un cambio simultáneo de las dimensiones laterales. Un esfuerzo a tracción produce una deformación axial y una contracción lateral. Si la conducta es isotrópica son iguales. La relación es denominada como Coeficiente de Poisson.

$$\nu = - \frac{\varepsilon \text{ (lateral)}}{\varepsilon \text{ (longitudinal)}} = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

Para materiales ideales,  $\nu = 0.5$  (figura 38), no obstante, en materiales reales el Coeficiente de Poisson oscila entre 0.25 y 0.4, con un valor medio alrededor 0.3.

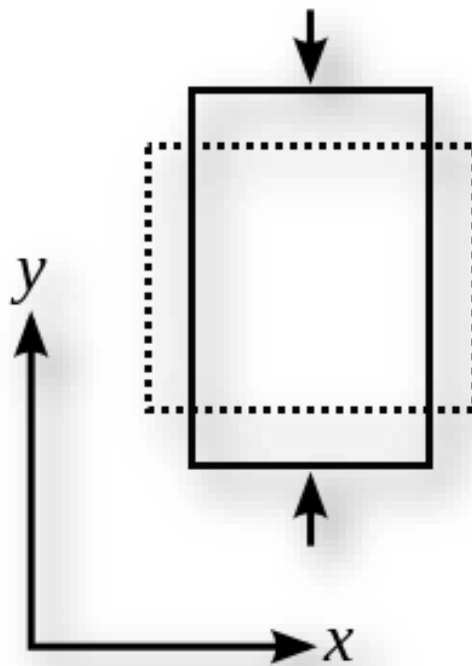


Figura 38 Ensanchamiento por Efecto Poisson  $\nu=0.5$

### 2.3.4 Teoría de Falla

La falla es la pérdida de función de un elemento tanto por deformación (fluencia) como por separación de sus partes (fractura). Se han propuesto diversas teorías sobre la falla, con objeto de predecir, con arreglo al comportamiento del material en los ensayos de tensión o compresión simple, las condiciones en que se producirá la ruptura bajo cualquier tipo de cargas combinadas. No se considera la falla por una desarticulación local de la estructura, o por falla de estabilidad elástica (pandeo, o flexión lateral, en columnas). El comienzo de la deformación plástica, es decir, de la fluencia, queda patente en los ensayos de tensión simple por la desviación de la proporcionalidad esfuerzo deformación. Prácticamente, la fluencia comienza cuando las deformaciones plásticas empiezan a ser apreciables. Ahora bien, cuando no se trata de esfuerzo simple, sino de esfuerzos combinados en varias direcciones, la fluencia dependerá de la combinación de estas componentes del esfuerzo.

Los mecanismos de falla dependen de la estructura microscópica del material y de la forma de sus enlaces atómicos. Para predecir la falla de materiales bajo cargas estáticas (se considera carga estática a aquella que no varía su magnitud ni dirección en el tiempo) y poder hacer diseños de elementos de máquinas confiables se han desarrollado varias teorías para grupos de materiales, basándose en observaciones experimentales.



Las teorías de falla (Tabla 3) se dividen en dos grupos:

TEORÍAS DE FALLA	
MATERIALES DÚCTILES	MATERIALES FRÁGILES
<b>Material que en el Ensayo de Tensión haya tenido más del 5% de deformación antes de la fractura. La falla se presenta cuando el material empieza a fluir (falla por deformación)</b>	Material que en el Ensayo de Tensión haya tenido menos del 5% de deformación antes de la fractura. La falla se presenta cuando el material sufre de separación de sus partes (falla por fractura)
<b>Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo: Teoría de Tresca</b>	Teoría del Máximo Esfuerzo Normal: Teoría de Rankine
<b>Teoría de la Energía de Distorsión: Teoría de Von Misses</b>	Teoría de Coulomb-Mohr Frágil
<b>Teoría de la Fricción Interna: Teoría Coulomb-Mohr Dúctil</b>	

Tabla 3 Teorías de Falla

### 2.3.4.1 Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo

También conocida como Teoría de Tresca, establece que la fluencia del material se produce por el esfuerzo cortante, surgió de la observación de la estricción que se produce en una probeta cuando es sometida a un ensayo de tensión. La teoría dice que la falla se producirá cuando el esfuerzo cortante máximo absoluto en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo cortante máximo absoluto de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento que se produce la fluencia.

Para un elemento bajo la acción de esfuerzos se tiene el Círculo de Mohr (figura 39):

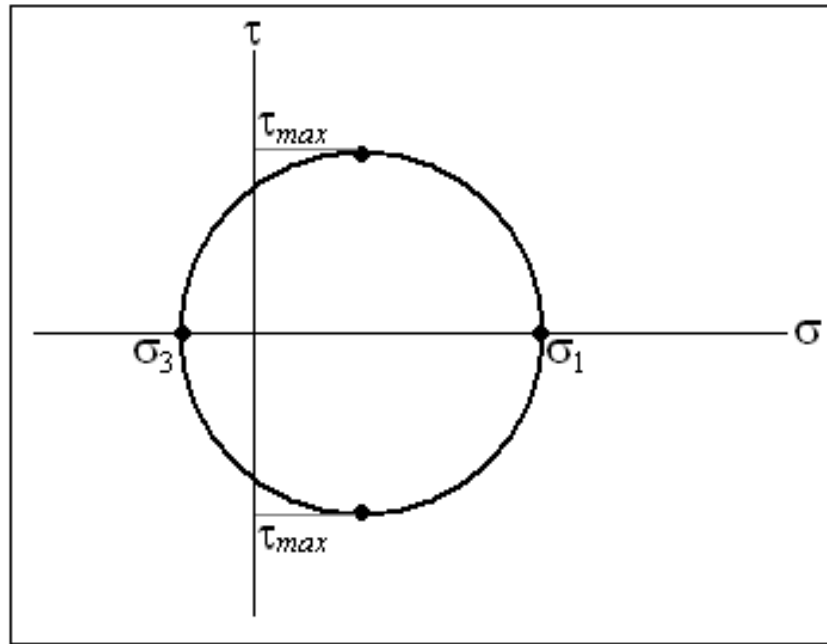


Figura 39 Círculo de Mohr para un elemento

El esfuerzo cortante máximo absoluto es:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

El círculo de Mohr (figura 40) para el ensayo de tensión en el momento de la fluencia es:

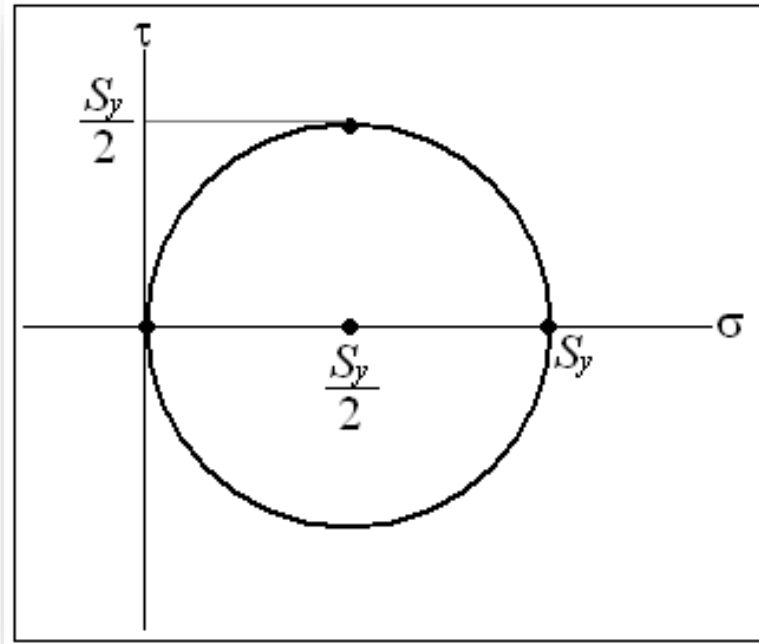


Figura 40 Círculo de Mohr para el Ensayo de Tensión al momento de la Fluencia

El esfuerzo cortante máximo absoluto para el ensayo de tensión al momento de la fluencia es:

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2}$$

Si se igualan las ecuaciones, se tiene

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{S_y}{2}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = S_y$$

En el plano, la teoría de Tresca (figura 41) se representa gráficamente como:

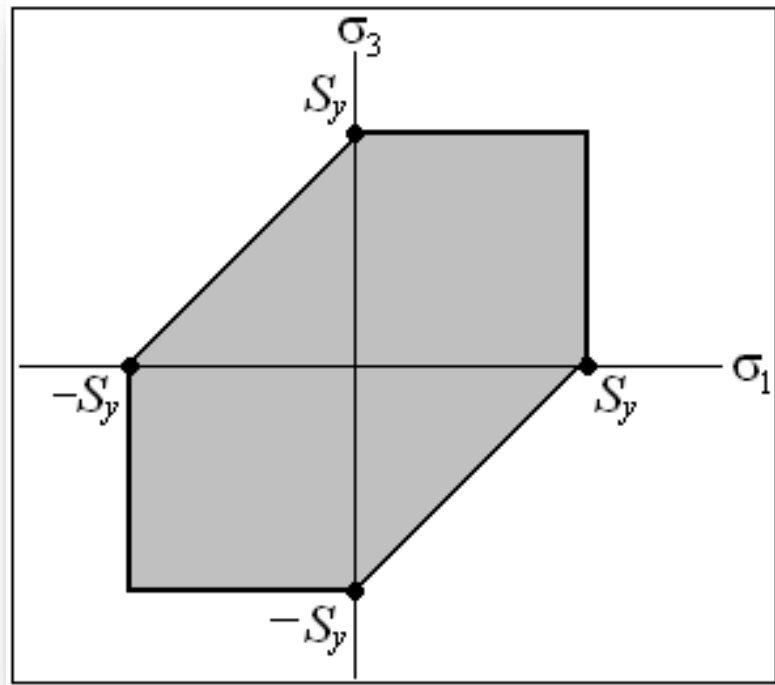


Figura 41 Gráfica de la Teoría de Tresca

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos y se encuentra fuera del área sombreada.

#### 2.3.4.2 Teoría de la Energía de Distorsión

Propuesta por R. Von Mises al observar que los materiales bajo esfuerzos hidrostáticos soportan esfuerzos mucho mayores que sus esfuerzos de fluencia bajo otros estados de carga. La falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la

energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia

La teoría de Von Mises dice que la distorsión del elemento es debida a los esfuerzos principales restándole los esfuerzos hidrostáticos:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

La energía de distorsión es la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos.

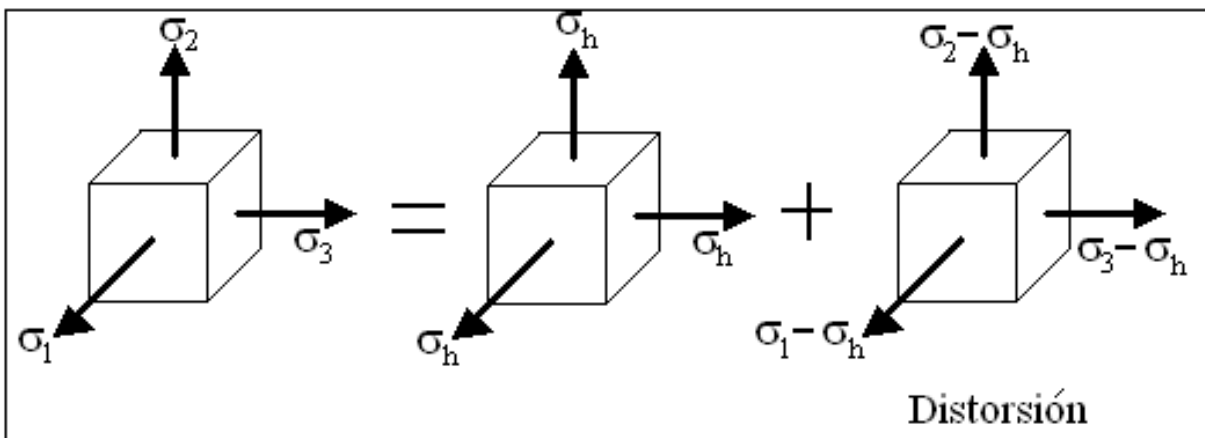


Figura 42 Esfuerzo de Von Mises

Se define el **esfuerzo de Von Mises** (figura 42) como:

$$\sigma' \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_3}$$

La teoría de Von Misses (figuras 43 y 44) se representa gráficamente como:

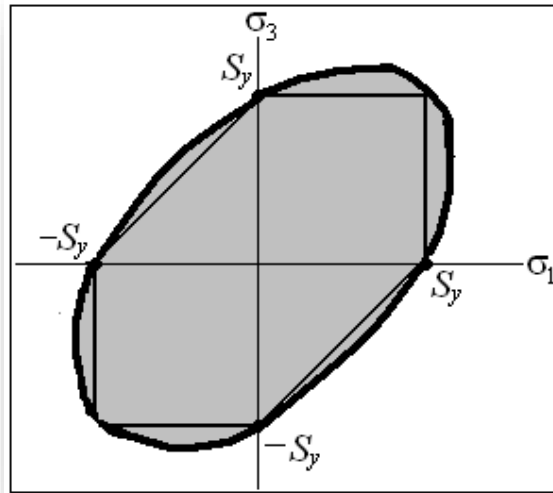


Figura 43 Gráfica de la Teoría de la Energía de Distorsión

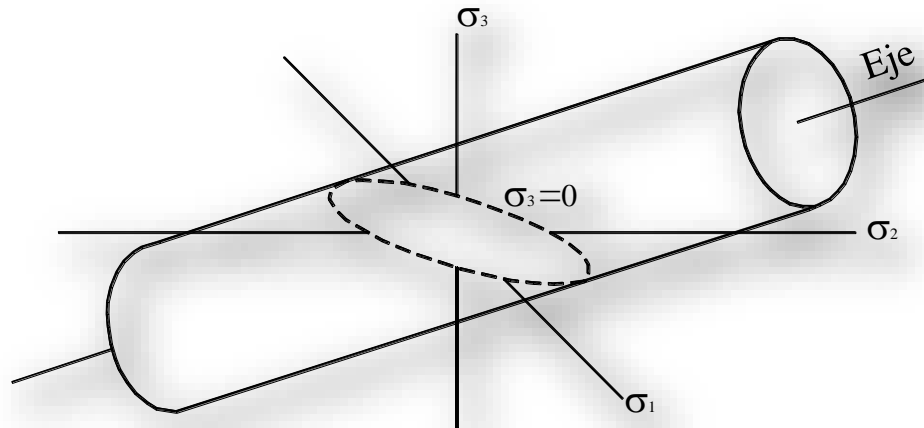


Figura 44 Criterio de Von Misses en tres dimensiones

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos se encuentra fuera del área sombreada. La línea más gruesa representa las locaciones donde se presentará la falla de acuerdo con Von Misses, las líneas interiores más delgadas representan las locaciones de falla de acuerdo con Tresca.

En la gráfica de la Teoría de Tresca (figura 41) y en la gráfica de la Teoría de Distorsión (figura 43) puede observarse que la teoría de Von Mises tiene una mayor área que la teoría de Tresca en la cual no se presentará falla, por eso la teoría del esfuerzo cortante máximo es la teoría escogida para hacer cálculos *conservadores* de falla de un material y tener mayor certeza de que no se producirá falla.

### 2.3.4.3 Teoría de la Fricción Interna

Propuesta por Coulomb-Mohr Dúctil, esta teoría tiene en cuenta que el esfuerzo de fluencia a tensión ( $S_{yt}$ ) es diferente al esfuerzo de fluencia a compresión ( $S_{yc}$ ), donde generalmente  $S_{yc} > S_{yt}$ .

Se basa en los ensayos de tensión y compresión, y establece que en el plano  $\sigma - \tau$  la línea tangente a los círculos de Mohr de los ensayos de tensión y compresión (figura 45) al momento de la fluencia es la locación de la falla para un estado de esfuerzos en un elemento.

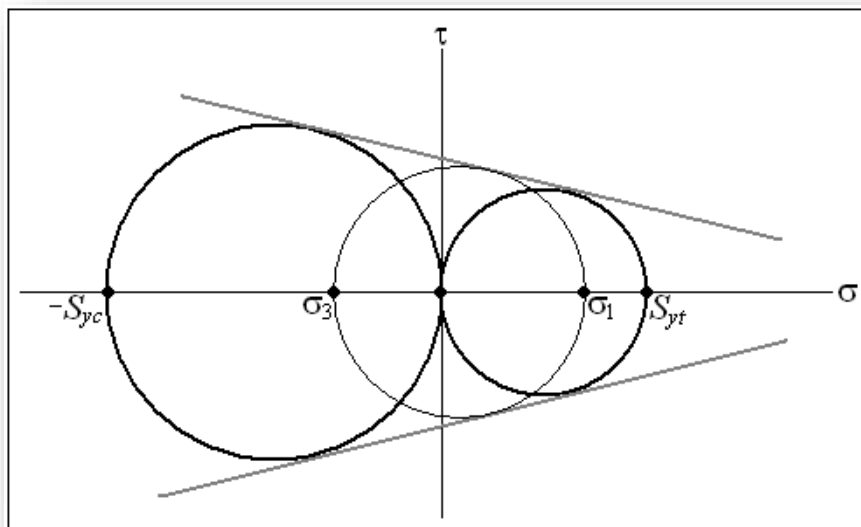


Figura 45 Círculos de Mohr de los Ensayos de Tensión y Compresión

Al momento de la falla en línea negra gruesa, y el Círculo de Mohr de un estado de esfuerzos de un elemento al momento de la falla en línea negra delgada. La línea más clara es la línea donde se produce la falla.

La ecuación de la línea de falla resulta ser:

$$\frac{\sigma_1}{S_{yt}} - \frac{\sigma_3}{S_{yc}} = 1$$

La teoría de Coulomb-Mohr Dúctil (figura 46) se representa gráficamente como:

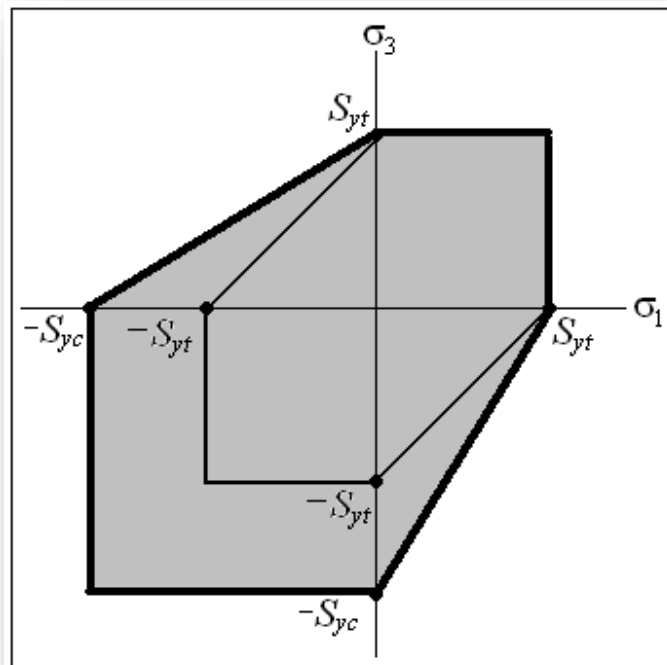


Figura 46 Gráfica de la Teoría de Coulomb-Mohr Dúctil



La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se encuentra fuera del área sombreada. La línea más gruesa representa las locaciones donde se presentará la falla de acuerdo con Coulomb-Mohr, las líneas interiores más delgadas representan las locaciones de falla de acuerdo con Tresca.

En la Gráfica de la Teoría de Tresca (figura 41) y en la Gráfica de la Teoría de Coulomb-Mohr Dúctil (figura 46) puede observarse que la teoría de Coulomb-Mohr tiene una mayor área que la teoría de Tresca en la cual no se presentará falla, por eso es que la teoría del esfuerzo cortante máximo es la teoría escogida para hacer cálculos conservadores de falla de un material y tener mayor certeza de que no se producirá falla.

#### 2.3.4.4 Teoría del Esfuerzo Máximo Normal

La teoría del esfuerzo máximo, propuesta por Rankine, se basa en que la falla se producirá cuando el esfuerzo normal máximo en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo normal máximo de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento que se produce la fractura.

La teoría no tiene en cuenta el efecto de otras componentes de los esfuerzos principales, ni el valor que pueda alcanzar el esfuerzo cortante sobre otros planos distintos de los principales. La Teoría del Esfuerzo Máximo Normal (figura 47) se representa gráficamente como:

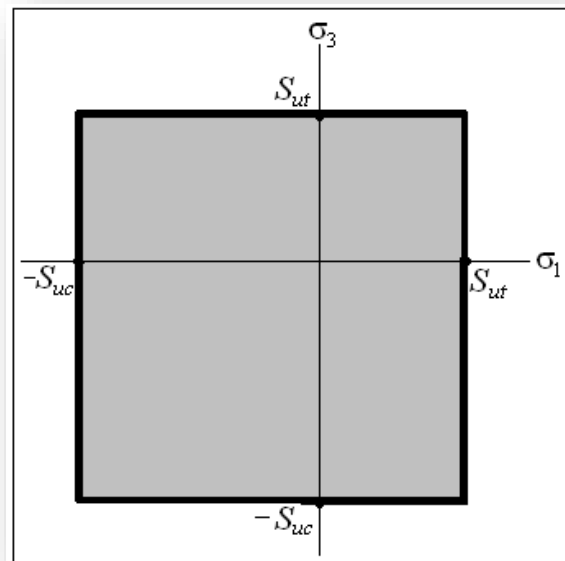


Figura 47 Gráfica de la Teoría del Esfuerzo Máximo Normal

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se encuentra fuera del área sombreada.

### 2.3.4.5 .Teoría de Coulomb-Mohr Frágil

Se deriva de forma similar a la teoría de Coulomb-Mohr Dúctil sólo que, al tratarse de materiales frágiles, se tienen en cuenta las resistencias últimas del material a la tensión y compresión en lugar de los esfuerzos de fluencia. La ecuación de la línea de falla resulta ser:

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = 1$$

La Teoría de Coulomb-Mohr Frágil (figura 48) se representa gráficamente como:

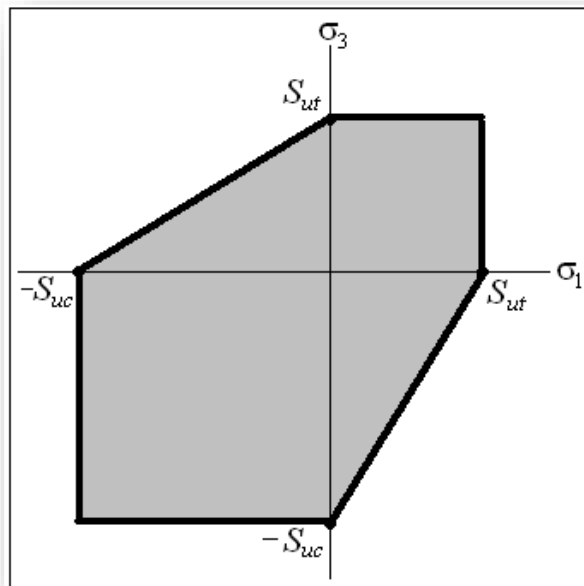


Figura 48 Gráfica de la Teoría de Coulomb-Mohr Frágil

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se encuentra fuera del área sombreada, se puede observar que el área libre de falla es mayor

según la teoría del máximo esfuerzo normal que según la teoría de Coulomb-Mohr Frágil, por lo anterior, para cálculos de diseño conservadores en materiales frágiles se recomienda usar la teoría de Coulomb-Mohr Frágil.

## 2.4 Equilibrio de cuerpos rígidos

Equilibrio es el estado en el cual se encuentra un cuerpo cuando las fuerzas que actúan sobre él se compensan y anulan recíprocamente.

Cuando un cuerpo está en equilibrio estático, sin ningún tipo de modificación, no sufrirá aceleración de traslación o rotación, en tanto, si el cuerpo se desplaza levemente pueden suceder tres cosas:

- ❖ Que el objeto regrese a su posición original (equilibrio estable).
- ❖ Que el objeto se aparte aún más de su posición original (equilibrio inestable).
- ❖ Que se mantenga en su nueva posición (equilibrio indiferente o neutro).

El equilibrio mecánico es una situación estacionaria en la que se cumplen cualquiera de estas condiciones:

- ❖ Cuando la suma de fuerzas y momentos sobre cada partícula del sistemas es cero
- ❖ Cuando su posición en el espacio de configuración es un punto en el que el gradiente de energía potencial es cero

### 2.4.1 Reacciones en los Soportes (Apoyos)

Las reacciones ejercidas sobre una estructura bidimensional (Tabla 4) pueden ser divididas en tres grupos que corresponden a tres tipos diferentes de apoyos o conexiones:

- ❖ **Reacciones equivalentes a una fuerza cuya línea de acción es conocida:** Los apoyos o conexiones incluyen rodillos, balancines, superficies sin fricción, eslabones y cables cortos. Cada uno de éstos puede impedir movimiento sólo en una dirección. Cada una de estas reacciones involucra a una sola incógnita, es decir, la magnitud de la reacción.

- ❖ **Reacciones equivalentes a una fuerza de magnitud y dirección desconocidas:**  
 Los apoyos y conexiones incluyen pernos sin fricción, articulaciones o bisagras y superficies rugosas. Estos pueden impedir la traslación de un cuerpo rígido en todas las direcciones pero no pueden impedir la rotación del mismo con respecto a la conexión. Las reacciones de este tipo involucran dos incógnitas
- ❖ **.Reacciones equivalentes a una fuerza y un par:** Estas reacciones se origina por apoyos fijos los cuales se oponen a cualquier movimiento del cuerpo libre, y por lo tanto, lo restringen completamente. Los soportes fijos producen fuerza sobre toda la superficie de contacto, sin embargo estas fuerzas forman un sistema que se puede reducir a una fuerza y un par. Las reacciones de este grupo involucran tres incógnitas, las cuales consisten en las dos componentes de la fuerza y en el momento del par









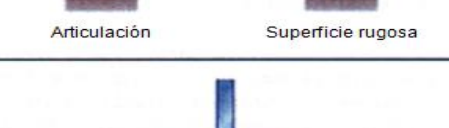

Apoyo o enlace	Reacción	No. de incógnitas
 <p>Rodillos      Balancín      Superficie lisa</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Cable      Bicla</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Corredera o cursor      Pasador en ranura lisa</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Articulación      Superficie rugosa</p>	 <p>Fuerza con dirección desconocida</p>	2
 <p>Empotramiento</p>	 <p>Fuerza y par</p>	3

Tabla 4 Reacciones en Cuerpos Bidimensionales

### 2.4.2 Ecuaciones de Equilibrio

El equilibrio de un cuerpo requiere un balance de fuerzas para impedir que el cuerpo se traslade o tenga un movimiento acelerado a lo largo de una trayectoria recta o curva, y un balance de momentos para impedir que el cuerpo gire. Estas condiciones pueden expresarse de manera matemática mediante dos ecuaciones vectoriales.

$$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{0}$$

$$\Sigma \mathbf{M}_o = \mathbf{0}$$

Aquí  $\Sigma \mathbf{F}$  representa la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y  $\Sigma \mathbf{M}_o$  es la suma de todos los momentos respecto a cualquier punto  $O$  ya sea sobre o fuera del cuerpo. Si se fija un sistema de coordenadas  $x, y, z$  con el origen en el punto  $O$ , los vectores de fuerza y de momento pueden separarse en componentes a lo largo de los ejes coordenados y en las dos ecuaciones anteriores pueden escribirse en forma escalar como seis ecuaciones, consideradas como:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma F_z = 0$$

$$\Sigma M_x = 0 \quad \Sigma M_y = 0 \quad \Sigma M_z = 0$$

Con frecuencia, en la práctica de la ingeniería, la carga sobre un cuerpo puede representarse como un sistema de fuerzas coplanares. Si este es el caso, y las fuerzas se encuentran en el plano  $x-y$ , entonces las condiciones para el equilibrio del cuerpo pueden especificarse mediante sólo tres ecuaciones escalares de equilibrio que son:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma M_o = 0$$

Aquí todos los momentos se suman con respecto al punto  $O$ , y éstos estarán dirigidos al eje  $z$ . La aplicación exitosa de las ecuaciones de equilibrio requiere la especificación completa de todas las fuerzas conocidas y desconocidas que actúan sobre el cuerpo, por lo que la mejor manera de tomar en cuenta todas esas fuerzas es dibujar el diagrama de cuerpo libre del cuerpo.

### 2.4.3 Tres Dimensiones

Con la distribución de fuerza en el área seleccionada se desarrollan ecuaciones que pueden usarse para el análisis y diseño de un cuerpo (figura 49). Sin embargo, para hacer esto deben considerarse las componentes de  $F_R$  y  $M_{R0}$  actuando de forma normal o perpendicular al área seleccionada. Se pueden definir cuatro diferentes tipos de cargas resultantes de la manera siguiente:

- ❖ **Fuerza normal  $N$ :** Esta fuerza actúa perpendicularmente al área. Se desarrolla siempre que las cargas externas tienden a empujar o jalar sobre los dos segmentos del cuerpo
- ❖ **Esfuerzo cortante  $V$ :** Se encuentra en el plano del área y se desarrolla cuando las cargas externas tienden a ocasionar que los dos segmentos del cuerpo se deslicen uno sobre otro
- ❖ **Momento de torsión o torque  $T$ :** Se desarrolla cuando las cargas externas tienden a torcer un segmento de cuerpo con respecto al otro alrededor de un eje perpendicular al área
- ❖ **Momento flexionante  $M$ :** Es causado por las cargas externas que tienden a flexionar el cuerpo respecto a un eje que se encuentra dentro del plano del área

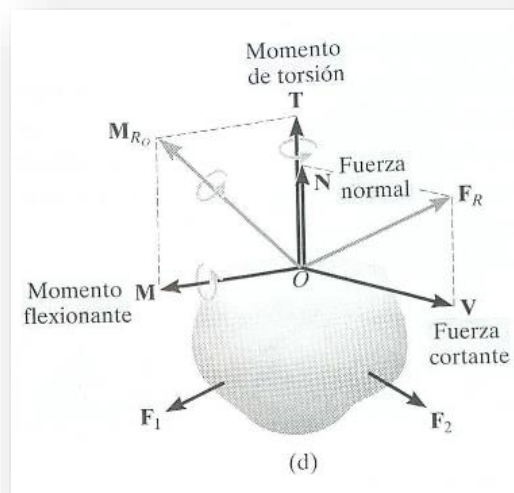


Figura 49 Análisis en Tres Dimensiones

# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA**

- 3.1 Caracterización Mecánica del Material**
- 3.2 Especificaciones Técnicas para el Dimensionamiento de la Estructura**
- 3.3 Modelado de la Estructura**
- 3.4 Metodología de Simulación**

La metodología empleada (figura 50) en el desarrollado experimental para llevar a cabo el Diseño Estructural del Trolebús, se presenta en el siguiente diagrama de flujo:

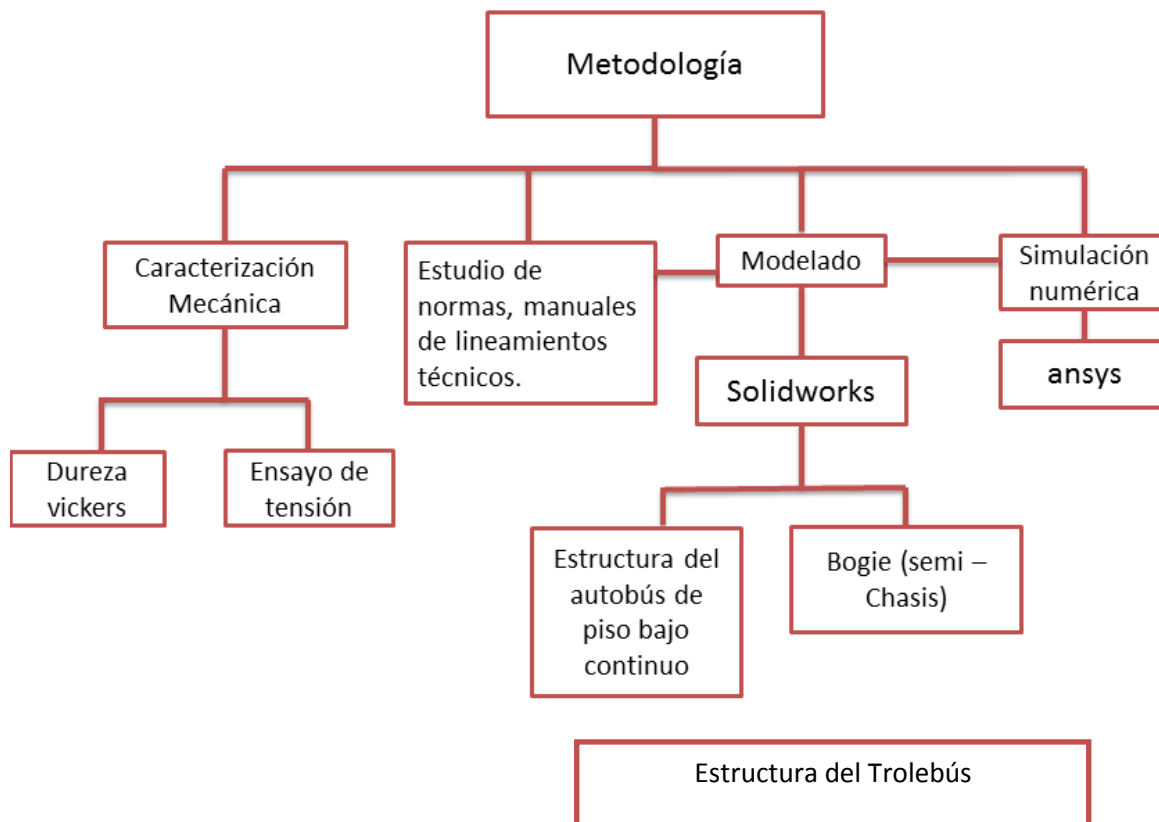


Figura 50 Metodología empleada para el desarrollo experimental

El material base de la estructura es Acero Galvanizado, el cual fue proporcionado por la empresa para su análisis

Inicialmente se procedió con la elaboración de una probeta para llevar a cabo la Prueba de Dureza Vickers, y se maquinaron 4 probetas para la realización de Ensayos de Tensión. Con lo anterior se dio paso a la caracterización mecánica del material con el que se diseñó la estructura del trolebús.



Posteriormente, se procedió a realizar la investigación documental, en Manuales y Normatividad vigentes, todo lo relacionado con las principales dimensiones que debe cumplir el diseño de una estructura para este tipo de vehículos; con la finalidad de cotejar si las dimensiones propuestas por la empresa estaban dentro de los rangos establecidos.

Conjuntamente, se estaba realizando el modelado de la estructura del trolebús en el Programa de Simulación Solidworks, para llevar a cabo las simulaciones requeridas. De los dibujos obtenidos se extrajeron coordenadas en **X**, **Y** y **Z**, de cada una de las uniones entre los elementos que conformaban la estructura, para reproducirlo en el Programa ANSYS (Mechanical Apdl) y realizar la simulación numérica de toda la estructura.

### 3.1 Caracterización Mecánica del Material

La caracterización mecánica del material es el primer paso para llevar a cabo un adecuado diseño y análisis de la estructura, ya que permite realizar simulaciones numéricas, tomando en cuenta las propiedades mecánicas reales del material base: Acero Galvanizado.

El acero se define como aquel material en el que el hierro es el elemento predominante, el contenido en carbono es, generalmente inferior al 2% y contiene además a otros elementos. El límite superior del 2% en el contenido de carbono (C) es el límite que separa al acero de la fundición. En general, un aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, pero como contrapartida incrementa su fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Los aceros se pueden clasificar en función de este porcentaje (Tabla 3)

TIPO DE ACERO	CARACTERÍSTICAS
<b>Acero dulce</b>	Cuando el porcentaje de carbono es del 0,25% máximo. Estos aceros tienen una resistencia última de rotura en el rango de 48-55 kg/mm <sup>2</sup> y una dureza Brinell en el entorno de 135-160 HB. Son aceros que presentan una buena soldabilidad aplicando la técnica adecuada. Aplicaciones: Piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.
<b>Acero semidulce</b>	El porcentaje de carbono está en el entorno del 0,35%. Tiene una resistencia última a la rotura de 55-62 kg/mm <sup>2</sup> y una dureza Brinell de 150-170 HB. Estos aceros bajo un tratamiento térmico por templado pueden alcanzar una resistencia mecánica de hasta 80 kg/mm <sup>2</sup> y una dureza de 215-245 HB. Aplicaciones: Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes
<b>Acero semiduro</b>	Si el porcentaje de carbono es del 0,45%. Tienen una resistencia a la rotura de 62-70 kg/mm <sup>2</sup> y una dureza de 280 HB. Después de someterlos a un tratamiento de templado su resistencia mecánica puede aumentar hasta alcanzar los 90 kg/mm <sup>2</sup> . Aplicaciones: Ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc
<b>Acero duro</b>	El porcentaje de carbono es del 0,55%. Tienen una resistencia mecánica de 70-75 kg/mm <sup>2</sup> , y una dureza Brinell de 200-220 HB. Bajo un tratamiento de templado estos aceros pueden alcanzar un valor de resistencia de 100 kg/mm <sup>2</sup> y una dureza de 275-300 HB. Aplicaciones: Ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados

Tabla 5 Tipos de Acero y sus características

El control de calidad de los aceros en nuestro país se basa en dos ensayos:

- ❖ **Comprobación química:** Esta se hace porque existen muchos tipos de acero y se exige a la empresa que los fabrica un comprobante de su composición química.
- ❖ **Ensayo de tracción axial:** Este ensayo siempre se hace en obra de forma aleatoria a los aceros que se reciben. El objetivo de este ensayo es obtener en cualquier acero su límite de elasticidad y su esfuerzo de rotura para así se conoce la calidad del material y compararlo con los parámetros que se establecen para los aceros de buena calidad, también se obtiene el porcentaje de alargamiento el cual permite conocer la ductilidad del acero.

CARACTERÍSTICAS DEL ACERO	
POSITIVAS	NEGATIVAS
<p><b>Alta resistencia mecánica</b> Materiales con alta resistencia mecánica, que soportan esfuerzos de tracción y compresión por su contribución química, evaluando su límite elástico y el esfuerzo de rotura</p>	<p><b>Oxidación</b> Los aceros tienen una alta capacidad de oxidarse si se exponen al aire y al agua simultáneamente y se puede producir corrosión del material si se trata de agua salina</p>
<p><b>Elasticidad</b> Es muy alta, en un ensayo de tracción del acero al estirarse antes de llegar a su límite elástico vuelve a su condición original</p>	
<p><b>Soldabilidad</b> Es un material que se puede unir por medio de soldadura y gracias a esto se pueden componer una serie de estructuras con piezas rectas</p>	
<p><b>Ductilidad</b> Los aceros tienen una alta capacidad para trabajarlos, doblarlos y torcerlos</p>	
<p><b>Forjabilidad</b> Al calentarse y al darle martillazos se les puede dar cualquier forma</p>	
<p><b>Trabajabilidad</b> Se pueden cortar y perforar a pesar de que es muy resistente y aun así siguen manteniendo su eficacia</p>	
	<p><b>Transmisor de Calor y Electricidad</b> El acero es un alto transmisor de corriente y a su vez se debilita mucho a altas temperaturas, por lo que es preferible utilizar aceros al níquel o al aluminio o tratar de protegerlos haciendo ventilados y evitar hacer fábricas de combustible o plásticos con este tipo de material</p>

Tabla 6 Características del Acero

Las características negativas mencionadas son manejables teniendo en cuenta la utilización de los materiales y el mantenimiento que se les dé a los mismos

### 3.1.1 Ensayo de Dureza

La prueba Dureza se realizó en la Máquina de Ensayo de Dureza Vickers (figura 51) empleando una carga de 10 kg, por un periodo de 10 segundos.



**Figura 51** Máquina para realizar el Ensayo de la Dureza Vickers

La dureza es una propiedad que mide la capacidad de resistencia que ofrecen los materiales a procesos de abrasión, desgaste, penetración o de rallado. Para medir la dureza de un material se emplea un tipo de ensayo consistente en calibrar la resistencia de un material a la penetración de un punzón o una cuchilla que se usa como indentador. Este indentador usualmente consta en su extremo, o bien de una esfera, o bien de una pieza en forma de pirámide, o en forma de cono y que está compuesto de un material mucho más duro que el acero que se está midiendo. La profundidad de la entalla que produce en el acero al ser rallado por este penetrador nos dará una medida de la dureza del material.

Existen varios métodos para calibrar la dureza de un material, siendo el método Brinell y el método Rockwell los más comunes.

El método Brinell (ASTM E10) es un tipo de ensayo utilizado para calcular la dureza de los materiales. Consiste en una esfera de 10 mm de diámetro, usualmente de un acero endurecido, que se presiona contra la superficie del material objeto de estudio bajo una carga estática de 3.000 kg. El tamaño de la huella nos proporcionará una medida de la dureza, denominada Dureza Brinell, bajo estas condiciones del ensayo.

### 3.1.2 Ensayo de Tensión

Para la realización del Ensayo de Tensión se toma como referencia normativa la designación ASTM E8 (Standard Test for Tension Testing of Metallic Materials).

El ensayo de tracción fue realizado en una máquina de Ensayos Universales Zwick/Roell (figura 52), con una capacidad de carga de 100 kN y una velocidad desplazamiento del cabezal de 1mm/min.



**Figura 52 Máquina para realizar el Ensayo Universal de Tensión**

El ensayo de tracción consiste en someter a una probeta de acero normalizada a un esfuerzo creciente de tracción según su eje hasta la rotura de la misma. El ensayo de tracción permite el cálculo de diversas propiedades mecánicas del acero. El incremento en longitud de la sección reducida de las probetas fue cuantificado por medio de un extensómetro con una longitud calibrada de 25 mm.

### 3.2 Especificaciones Técnicas para el Dimensionamiento de la Estructura

Se realizó el dibujo de la Estructura del Trolebús de Piso Bajo Continuo tomando como referencia los Lineamientos Técnicos para el Transporte Público en el Distrito Federal, en el cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas requeridas para este tipo de vehículos.

En el esquema del autobús se indican los conceptos y dimensiones (figura 53 y Tabla 7) que este tipo de unidad debe cumplir como requisitos mínimos de seguridad.

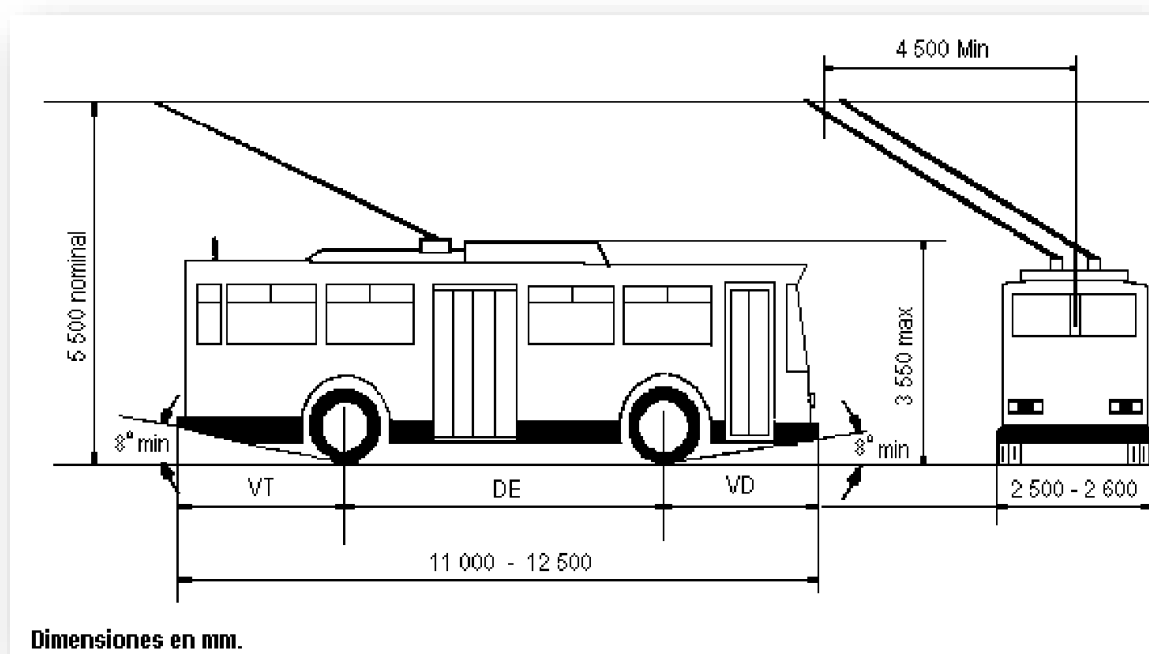


Figura 53 Esquema de Dimensiones Exteriores del Trolebús

CONCEPTO	DIMENSIÓN
Largo exterior	De 11,000 a 12,500 mm
Ancho exterior incluyendo defensas, sin espejos	De 2,500 a 2,600 mm
Altura máxima de la carrocería	3,100 mm
Altura máxima con colector de corriente (troles abajo)	3,550 mm
Distancia mínima para rebasar	De 4,500 a 5,500 mm de altura
Angulo mínimo de entrada	8°
Angulo mínimo de salida	8°
Altura máxima de suelo a piso del habitáculo con el vehículo vacío, medida en zona de ascenso de pasajeros	890 mm

Tabla 7 Conceptos y Dimensiones del Trolebús

Una vez analizadas las dimensiones reglamentarias para este tipo de unidades, se procedió a acotar las dimensiones propuestas por la empresa y realizar así algunos cambios para poder cumplir con las especificaciones establecidas.

### 3.3 Modelado de la Estructura

La simulación numérica del análisis de la estructura se inicia con el modelado del autobús en 3D en ANSYS 14 (Mechanical APDL) versión académica, para que con la capacidad de resolución del ANSYS 14, no tener la restricción del número de elementos. Además se pueden realizar otras simulaciones que no son posibles en WORKBENCH (interfaz de ANSYS 14); situación que permitió complementar la parte de la simulación.

Para realizar el modelado de la estructura se toman en cuenta las dimensiones del modelado en SOLIDWORKS, posteriormente se ubica un punto en la parte central de la sección transversal del elemento, al cual se coloca en un sistema de coordenadas **X**, **Y** y **Z**,

con esos datos se tienen los puntos en los cuales se conecta con otro elemento, y así sucesivamente hasta completar toda la estructura.

Posteriormente los datos se ingresan a los puntos clave (key points), a través de los cuales se obtendrán los nodos. Los nodos representan el inicio, final y conexión de un elemento con respecto a otro, hasta este momento únicamente se tiene una nube de puntos.

Al modelar de esta forma se puede pasar fácilmente de key points (puntos clave) a nodos, los cuales se unen mediante líneas, permitiendo generar áreas, volúmenes y el modelado de la estructura en 3D; para poder realizar el modelado de la estructura fue necesario crear 2377 nodos.

Los nodos unidos mediante líneas (figura 54) forman la estructura del autobús con una forma idéntica a la que se obtuvo del modelado en Solidworks; se puede observar que cada nodo tiene un número, el cual indica la cantidad de nodos para realizar el modelado; los nodos de los ejes **X**, **Y** y **Z**, es el punto donde se inicia el modelado ya que sus coordenadas son 0,0,0. Cabe aclarar que el acercamiento se hizo de la parte central de la estructura.



Figura 54 Nodos de la Estructura del Trolebús



La visualización de la estructura (figura 55) en las imágenes de ANSYS:

- ❖ Estructura con líneas unidas
- ❖ Estructura con keypoints

muestran los nodos unidos mediante líneas, las cuales son de diferentes colores para poder diferenciar donde empieza y termina un elemento con respecto a otro.

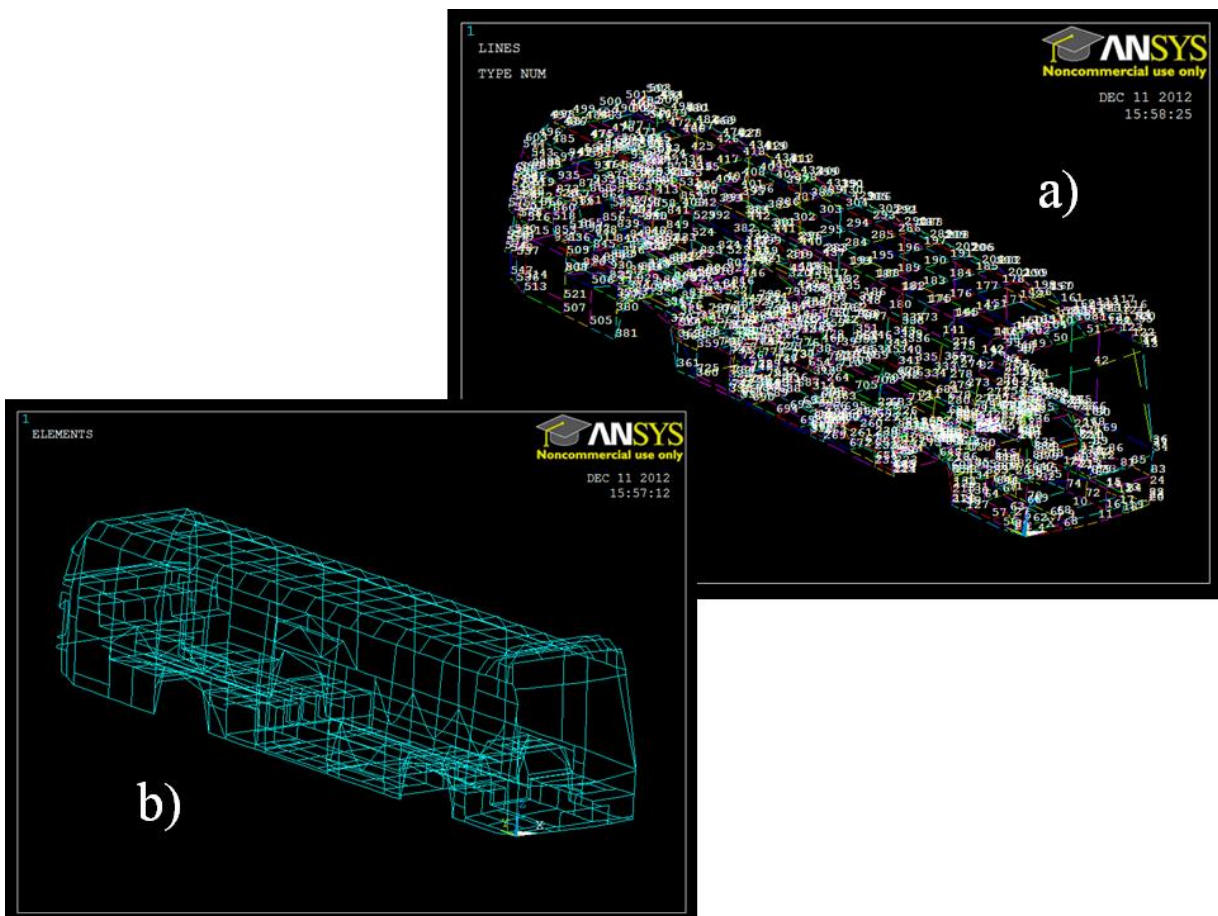


Figura 55 Visualización de la Estructura

Una vez que se unieron los nodos por medio de líneas se dispuso a crear los elementos, utilizándose el elemento Beam 188 (elemento tipo viga), porque al tener 6° o 7° de libertad, se permite analizar cada elemento mediante 3 ejes de traslación, 3 ejes de rotación y 1 eje opcional para la magnitud. Al trabajar con este elemento, se pueden ingresar diferentes secciones transversales, lo cual es una limitante en elementos tipo liga o sólidos.

Posteriormente para generar los elementos se dan de alta todas las secciones transversales con las que se modelo la estructura, después se verifica en que área de la estructura se está para determinar que sección corresponde. Después se malla la línea, lo cual permite crear el elemento con la sección y las propiedades mecánicas que se obtuvieron del Ensayo de Tensión.

### 3.3.1 Distribución de Cargas

Las cargas producidas por los pasajeros fueron cuantificadas en función de la propuesta realizada, la cual está apoyada en las especificaciones técnicas indicadas en la normatividad vigente en la Ciudad de México, para este tipo de vehículos; y de acuerdo al modelo CAD, ambos proporcionados por la empresa (figura 56). Es importante mencionar que no se consideraron áreas de carga permanente en las puertas de ascenso y descenso, aunque estas zonas incluyan elementos estructurales.

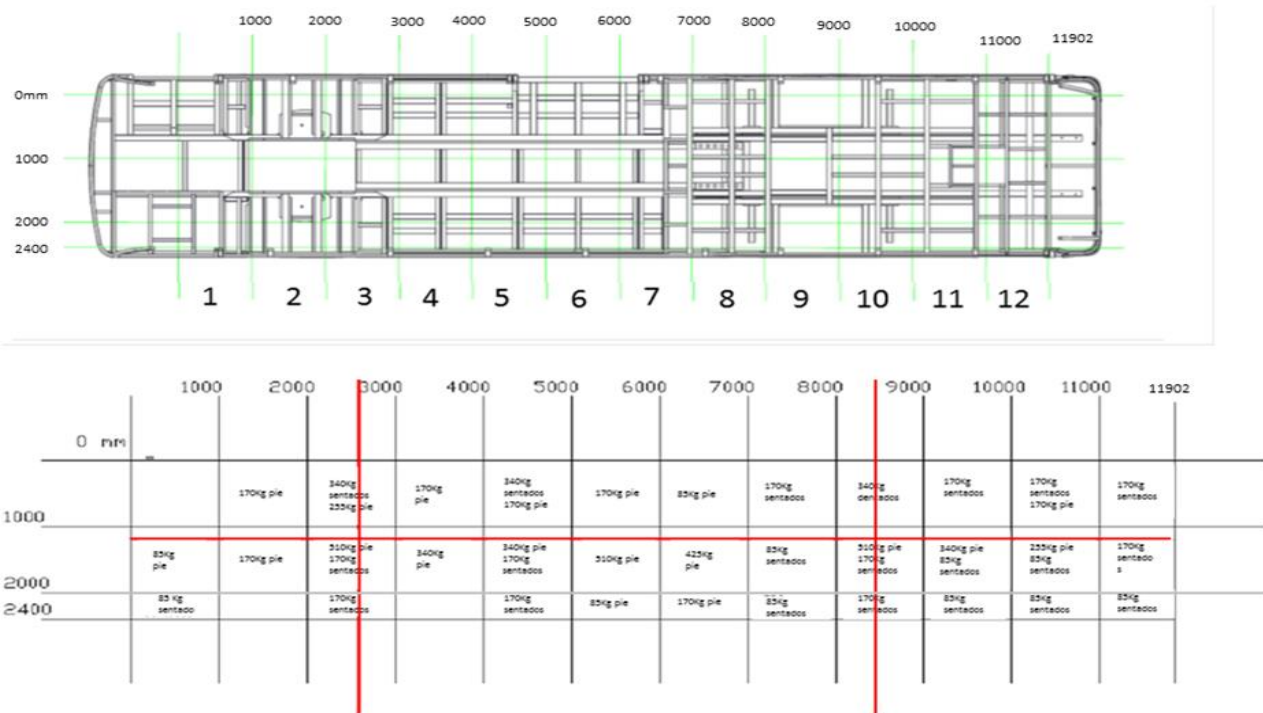
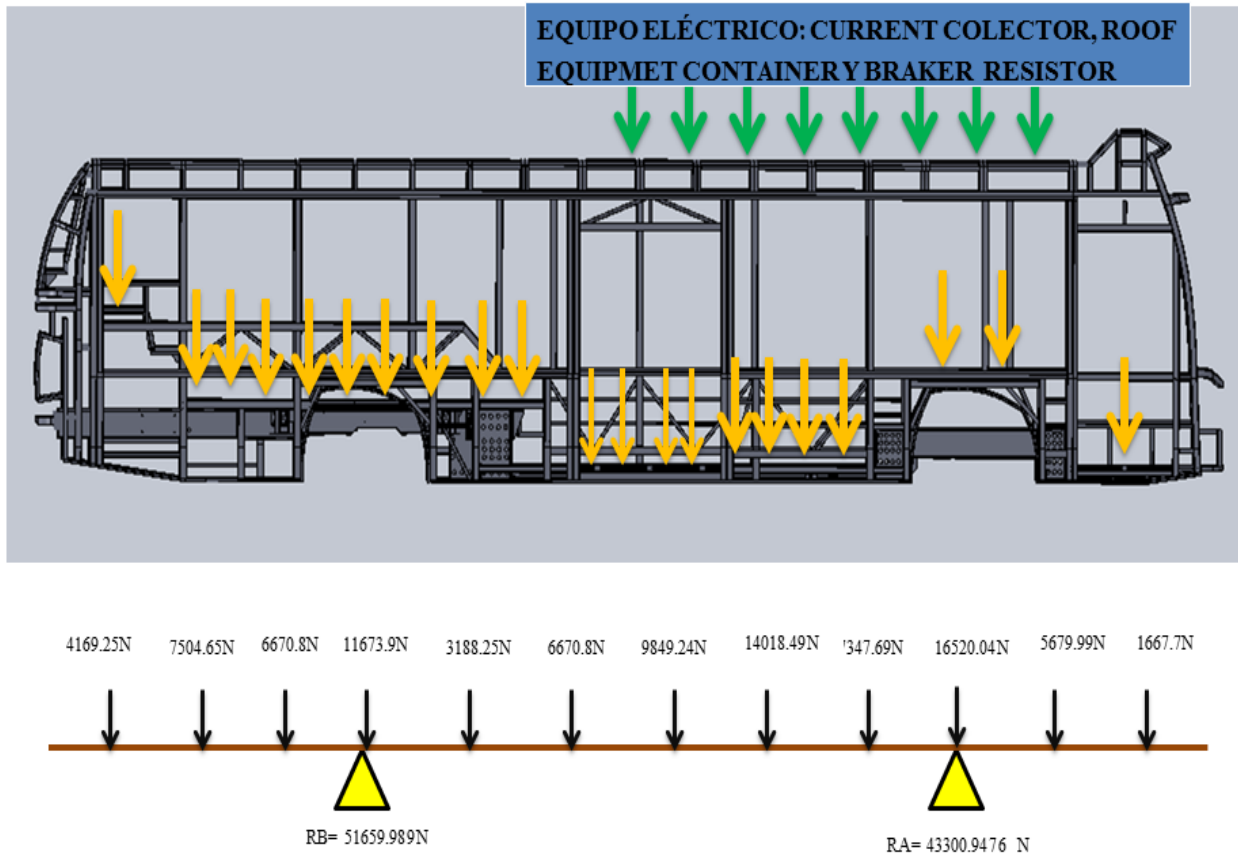


Figura 56 Distribución de Cargas

Los puntos donde se encuentran los soportes de los ejes delantero y trasero, se tomaron como apoyos fijos a través de los cuales se determinaron las reacciones producidas por las cargas.



**Figura 57 Distribución de Cargas (99 personas) y Diagrama de Cuerpo Libre**

Para simplificar el análisis de la distribución de cargas, la longitud total de la estructura del autobús se dividió en 12 partes (figura 57, Tabla 8), dando los resultados de las fuerzas y momentos de reacción para cada uno de los ejes.

CARGAS (Kg)	170	579	1684	749	1429	1004	680	325	1190	680	765	425	9680
<b>REACCIONES EN EJE DELANTERO(ED)</b>													
<b>MOMENTO POSITIVO</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CARGA (N)	1667.7	5679.99											
PALANCA (m)	2	1											
RESULTADO (N·m)	3335.4	5679.99											SUBTOTAL 9015.39
<b>MOMENTO NEGATIVO</b>													
CARGA (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
PALANCA (m)				7347.69	14018.49	9849.24	6670.8	3188.25	11673.9	6670.8	7504.65	4169.25	
RESULTADO (N·m)				7347.69	28036.98	29547.72	26683.2	15941.25	70043.4	46695.6	60037.2	34642.2983	318975.3383
<b>REACCIONES EN EJE TRASERO (ET)</b>													
<b>MOMENTO POSITIVO</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CARGA (N)	1667.7	5679.99	16520.04	7347.69	14018.49	9849.24	6670.8	3188.25					
PALANCA (m)	8	7	6	5	4	3	2	1					
RESULTADO (N·m)	13341.6	39759.93	99120.24	36738.45	56073.96	29547.72	13341.6	3188.25					SUBTOTAL 291111.75
<b>MOMENTO NEGATIVO</b>													
CARGA (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
PALANCA (m)										6670.8	7504.65	4169.25	
RESULTADO (N·m)										1	2	2.309	SUBTOTAL 31306.89825
RESUMEN DISTRIBUCION DE CARGAS	REV 17-12-12												
SUMATORIA DE CARGAS TOTAL									<b>TOTAL EJE TRASERO</b>				
PESO VIVO	8415 (99 PERSONAS 85 Kg)								<b>-309959.948 N·m</b>				
EQUIPO ELECTRICO	1195								<b>Reacion ET 51659.991 N;</b>				
													<b>1316.5135 Kg POR CADA LLANTA(4)</b>
									<b>TOTAL EJE DELANTERO</b>				
									<b>259804.852 N·m</b>				
									<b>Reacion ED 43300.809 N;</b>				
CARGA TOTAL (Kg)	9610												<b>2206.9729 Kg POR CADA LLANTA(2)</b>
PESO BRUTO VEHICULAR PE DISPONIBLES CARROCERIA(C	18600	MANUAL DE LINEAMIENTOS TECNICOS DEL D.F. 18600 Kg MAX											
	8990	Kg disponibles para carroceria											

Tabla 8 Fuerzas de Reacción en Ejes

A partir de un segmento de material proporcionado por la empresa (acero de bajo contenido de carbono recubierto por galvanizado), se determinaron las propiedades mecánicas a la tracción, considerando las recomendaciones establecidas por la ASTM E8.

De la Gráfica del Comportamiento Esfuerzo-Deformación (figura 58) convencional de los materiales empleados para alargamiento de chasis y fabricación de carrocería, se determinaron:

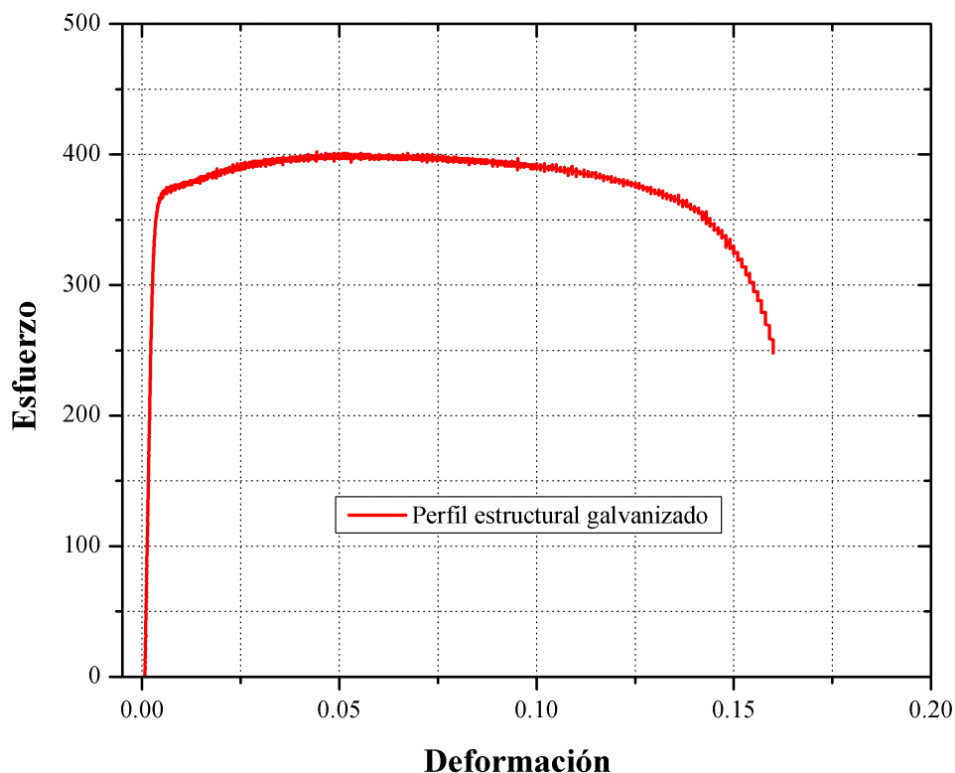


Figura 58 Comportamiento Esfuerzo-Deformación

A partir del gráfico del comportamiento esfuerzo-deformación, se determinaron:

- ❖ Esfuerzo de fluencia (360 MPa)
- ❖ Esfuerzo máximo (400 MPa)
- ❖ Porcentaje de alargamiento (16%)
- ❖ Módulo de Young (~195 GPa).

Dichos datos son considerados para realizar la simulación numérica de la estructura.

### 3.4 Metodología de Simulación

El Modelado de la Estructura en ANSYS (APDL), forma parte de la metodología de la simulación. Ya que al terminar con los pasos de:

- ❖ Ubicar los nodos que la forman
- ❖ Unión a través de los elementos beam188
- ❖ Definir las cargas y los puntos de apoyo fijos

Con estos pasos se cumple con la metodología necesaria para la realización de la simulación, puesto que:

- ❖ Se cuenta con cada uno de los elementos divididos en nodos
- ❖ Se han analizado las cargas que actuarán sobre la estructura
- ❖ Las condiciones de borde han sido ya definidas
- ❖ Las propiedades del material ya se ingresaron previamente
- ❖ Distribución de las diferentes secciones transversales de cada uno de los elementos que la conforman, tomando en cuenta que aquellos con un calibre de más espesor se ubican donde se espera mayor concentración de esfuerzos y desplazamientos mayores

Para cuestiones de la simulación:

- ❖ **La carga viva** fue de 111539.70 N: Repartida en 120 nodos, para la parte del piso de la estructura
- ❖ **La carga muerta** fue de 37 278 N: Repartida en 48 nodos (16677 N por el motor y 20601 N por los bancos de baterías)

Las simulaciones que se realizaron a la estructura dibujada en ANSYS (MECHANICAL APDL) son las siguientes:

- ❖ Desplazamientos en **X, Y y Z**
- ❖ Sumatoria de desplazamientos
- ❖ Fuerzas Axiales
- ❖ Esfuerzos Flexionantes

- ❖ Deformaciones Elásticas
- ❖ Análisis Modal (Vibraciones libres)

De las simulaciones previamente mencionadas la simulación de desplazamientos en **X**, **Y** y **Z**, sumatoria de desplazamientos y esfuerzos flexionantes se realizaron nuevamente pero con un incremento de 2.5 la carga viva, de acuerdo a lo señalado en los Lineamientos Técnicos para el Transporte del Pasajeros en la Ciudad de México, en el cual se maneja que con ese incremento de carga no debe de presentar un desplazamiento igual o mayor a los 15 mm.

La estructura la cual ya está lista para realizar las simulaciones, cuenta con las cargas viva y muerta ya distribuidas, los elementos ya tienen su sección transversal y propiedades mecánicas del material ya asignadas y las condiciones se borde ya fueron ubicadas (figura 59).

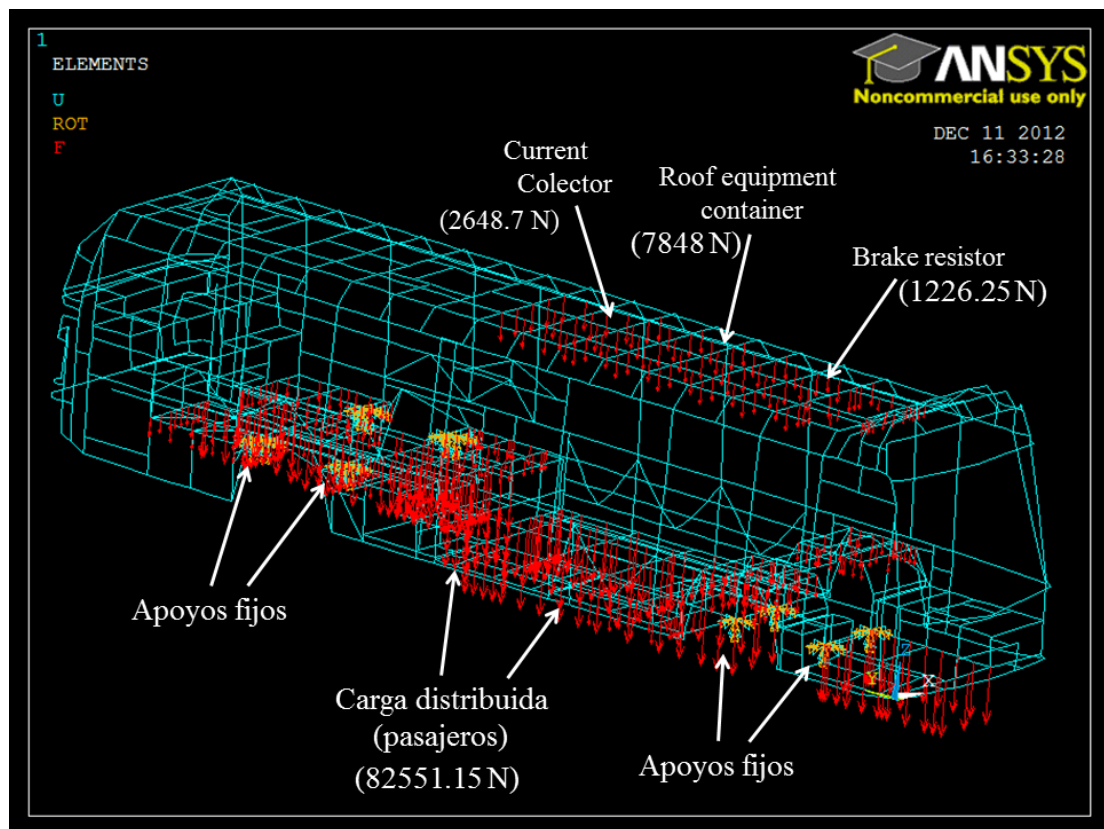


Figura 59 Cargas y Restricciones aplicadas a la Estructura del Trolebús



# **CAPÍTULO 4**

## **CÁLCULO Y ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA**

- 4.1 Identificación Mecánica**
- 4.2 Curva Esfuerzo-Deformación**
- 4.3 Respuesta de la Estructura bajo diferentes condiciones de operación**
- 4.4 Análisis Modal en Condiciones de Vibración Libre**

Continuando la secuencia de la metodología se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones como su análisis e interpretación, mostrando los datos correspondientes a la caracterización mecánica por medio de los Ensayos Dureza Vickers y de Tensión y, continuando con la interpretación de los resultados de las simulaciones por medio de Elemento Finito.

#### **4.1. Identificación Mecánica**

El objetivo principal de la caracterización mecánica es encontrar las principales propiedades mecánicas del material a ensayar: Acero Galvanizado ya que es el material base de la estructura.

Los aceros son aleaciones de hierro con una combinación variable de carbono y de otros elementos metálicos y no metálicos que le dan al material diferentes cualidades mecánicas y metalográficas que son aprovechados por la industria para someterlos a diferentes procesos de manufactura, diseño, construcción y demás aplicaciones que sean útiles para el ser humano. Los elementos de aleación que forman parte de la composición química del acero, le dan al material características más específicas ya que cada elemento (en porcentaje y peso), hace que el acero alcance ciertos niveles de dureza, ductilidad, resistencia, tenacidad y en cuanto a los procesos de manufactura, se requiere que los aceros sean conformables y soldables.

##### **4.1.1 Pruebas del Ensayo de Dureza**

Para la realización del ensayo de dureza se extrajeron 2 secciones de uno de los perfiles del material provistos por la empresa:

- ❖ En el sentido longitudinal de la laminación
- ❖ En el sentido perpendicular a la misma.

Dichas secciones se colocaron en resina, con la finalidad de poder maniobrarlas con mayor facilidad y realizar el pulido pertinente de las mismas, así como para asegurar la planicidad de la probeta en la mesa de trabajo al realizar las indentaciones.

A continuación (Figuras 60 y 61) se muestra el elemento estructural del cual se obtuvieron las probetas (secciones en el sentido longitudinal y perpendicular a la laminación), así como su dimensionamiento en mm.

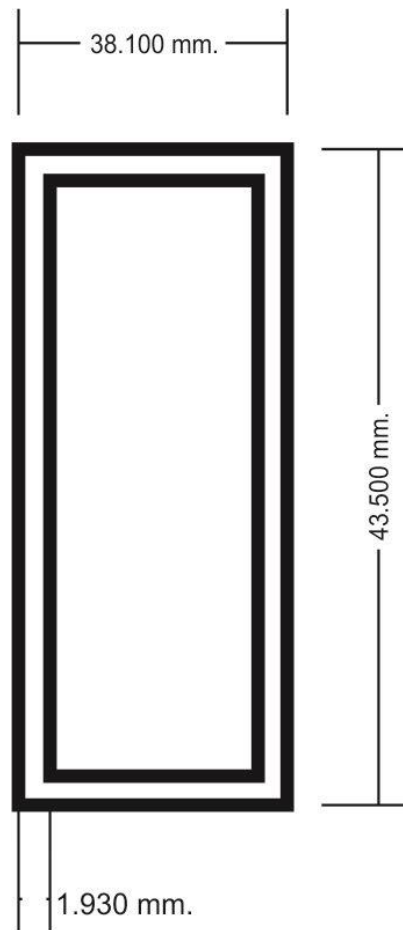
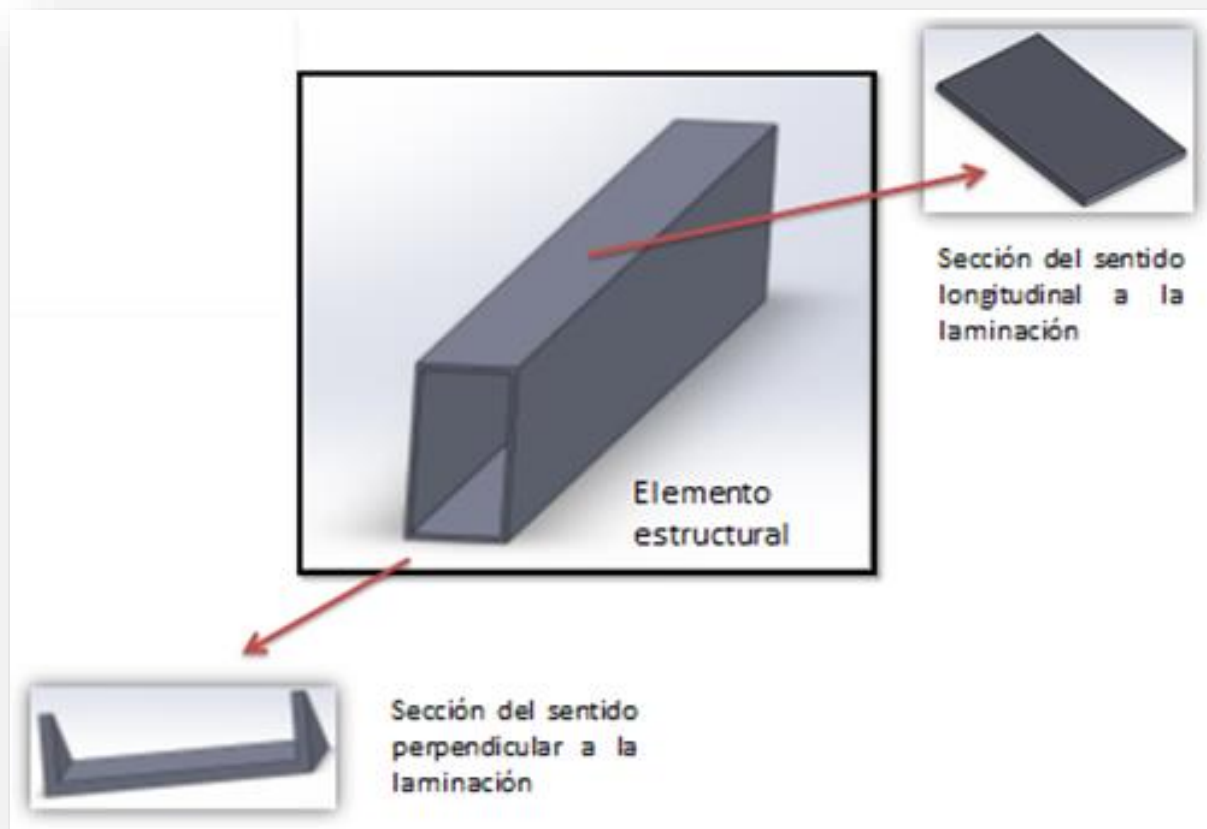


Figura 60 Dimensionamiento de Perfiles



**Figura 61 Secciones del Elemento Estructural**

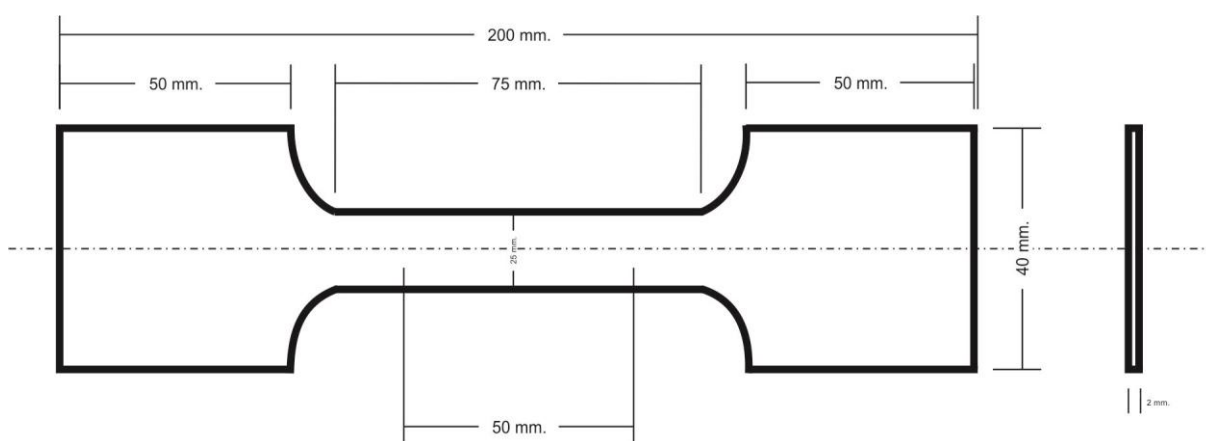
Se realizaron un total de 10 indentaciones:

- ❖ 5 en sentido longitudinal a la laminación
- ❖ 5 en el sentido transversal a la laminación

Obteniéndose los resultados promedio de HV en el sentido longitudinal y en el sentido transversal, lo que permitirá poder ingresar con dichos valores en tablas.

### 4.1.2 Pruebas del Ensayo de Tensión

El procedimiento inicia con el ensayo de 4 probetas extraídas de la sección plana de los elementos estructurales provistos por la empresa (material base de la estructura del autobús), para poder determinar las propiedades mecánicas a la tensión que posee. La geometría y las dimensiones (figura 62) de las 4 probetas cumplen con lo estipulado en la ASTM E8.



**Figura 62 Geometría y Dimensiones de las Probetas para el Ensayo de Tensión**

El Ensayo de Tensión se llevó a cabo en la máquina Zwick/Roell (figura 63), así como un acercamiento ilustrando la fractura en una de las probetas previamente ensayadas. Cabe señalar que este tipo de máquinas es de las más confiables al obtener los resultados del ensayo ya que por medio de los extensómetros con los que cuenta permite adquirir la mayor cantidad de datos posibles para así poder crear la curva esfuerzo–deformación real del material.

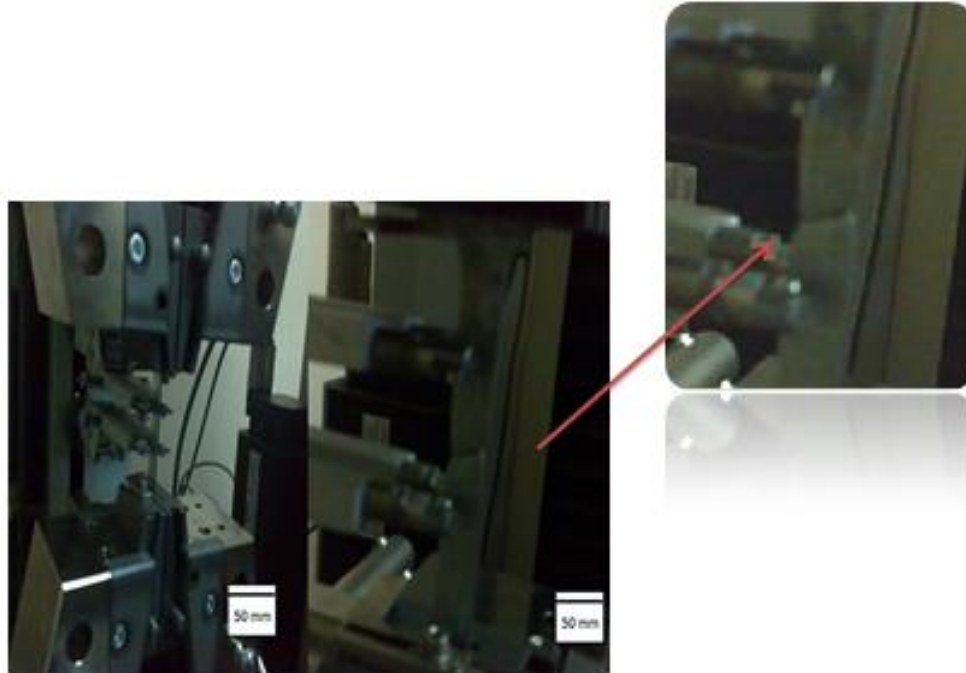


Figura 63 Pruebas en la Máquina de Ensayos Universales

## 4.2 Curva Esfuerzo – Deformación

El Gráfico Esfuerzo–Deformación (figura 64) muestra uno de los ensayos de tensión realizados al material base con el que se construirá la estructura.

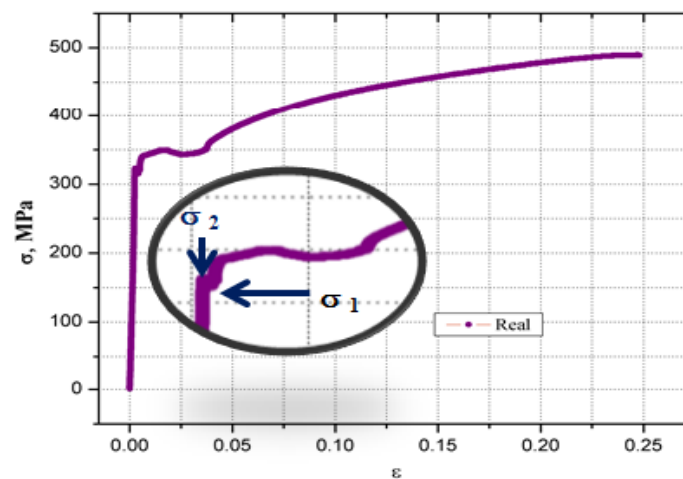


Figura 64 Curva Esfuerzo-Deformación

Utilizando la Ley de Hooke para la sección elástica–lineal se determina el Módulo de Elasticidad ( $E$ ), que en la Gráfica Esfuerzo–Deformación representa la pendiente o inclinación de la recta en la sección elástica. Lo anterior es importante determinarlo, ya que cada uno de los elementos diseñados para la estructura no debe de sufrir cargas que rebasen el punto de fluencia, debido a que en ese momento sufrirá deformaciones plásticas y habrá fallado el elemento. Para materiales isótropos como es el caso, el Coeficiente de Poisson es la relación existente entre la deformación transversal con la longitudinal siendo de 0.33 para este caso.

Analizando la gráfica anterior se puede identificar la zona elástica (correspondiente a la parte lineal), y la zona plástica (representada por sección curva, con altas deformaciones). En este caso el límite elástico del material base es 320 Mpa, un Módulo de Elasticidad de 227 Gpa y una elongación de 13%. Todos estos datos son necesarios para la realización de cada una de las simulaciones pertinentes porque cada elemento estructural debe de trabajar en el área elástica debajo de lo que es el esfuerzo de fluencia para este material.

### 4.3 Respuesta de la Estructura bajo diferentes Condiciones de Operación

A continuación se presentan los resultados obtenidos por simulación numérica de los desplazamientos en las direcciones **X**, **Y** y **Z**, la representación de su vector suma, los valores de los esfuerzos de flexión, fuerzas axiales, y deformaciones elásticas.

Estos resultados son presentados en dos apartados:

- ❖ Considerando condiciones de uso con cargas normales
- ❖ Empleando una magnitud de carga normal aumenta 2.5 veces,

de acuerdo a lo establecido en los Lineamientos Técnicos para el Transporte Público en la Ciudad de México. También se presentan los resultados de las frecuencias naturales obtenidas por medio de un análisis modal (20 modos), considerando vibración libre.

### 4.3.1.- Carga Normal de Operación

#### A.- Desplazamientos

En la distribución de los desplazamientos en **X**, **Y** y **Z** para la estructura del autobús (figura 65), se observa que:

- ❖ Los desplazamientos máximos se obtienen en la dirección axial a la aplicación principal de las cargas (dirección z).

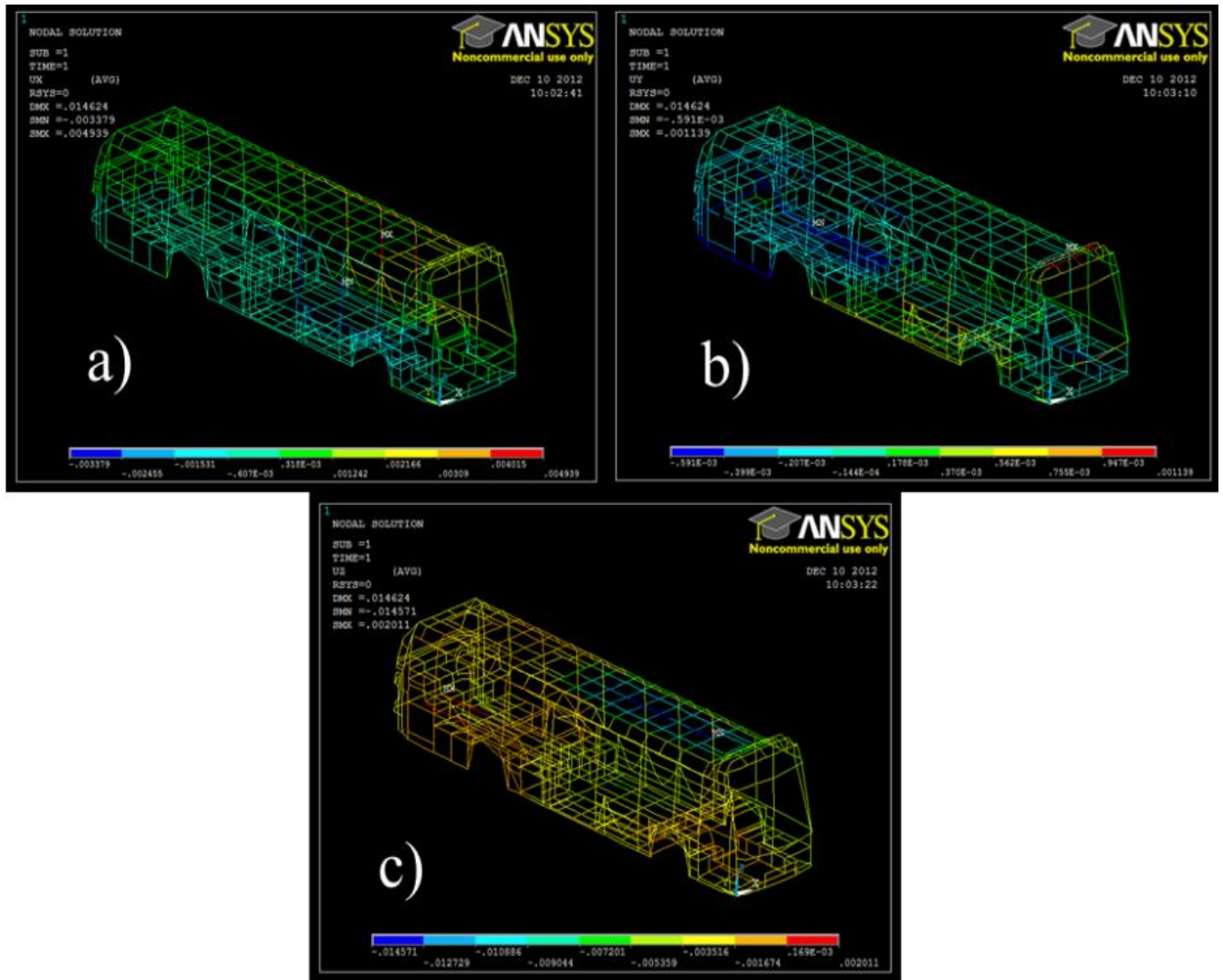


Figura 65 Desplazamientos Nodales en: a) Dirección X, b) Dirección Y, c) Dirección Z



- ❖ La máxima deflexión (~ 15 mm) se ubica en la zona correspondiente al toldo (nodo 383 y 454), tal como se muestra en la suma vectorial de desplazamientos (figura 66).

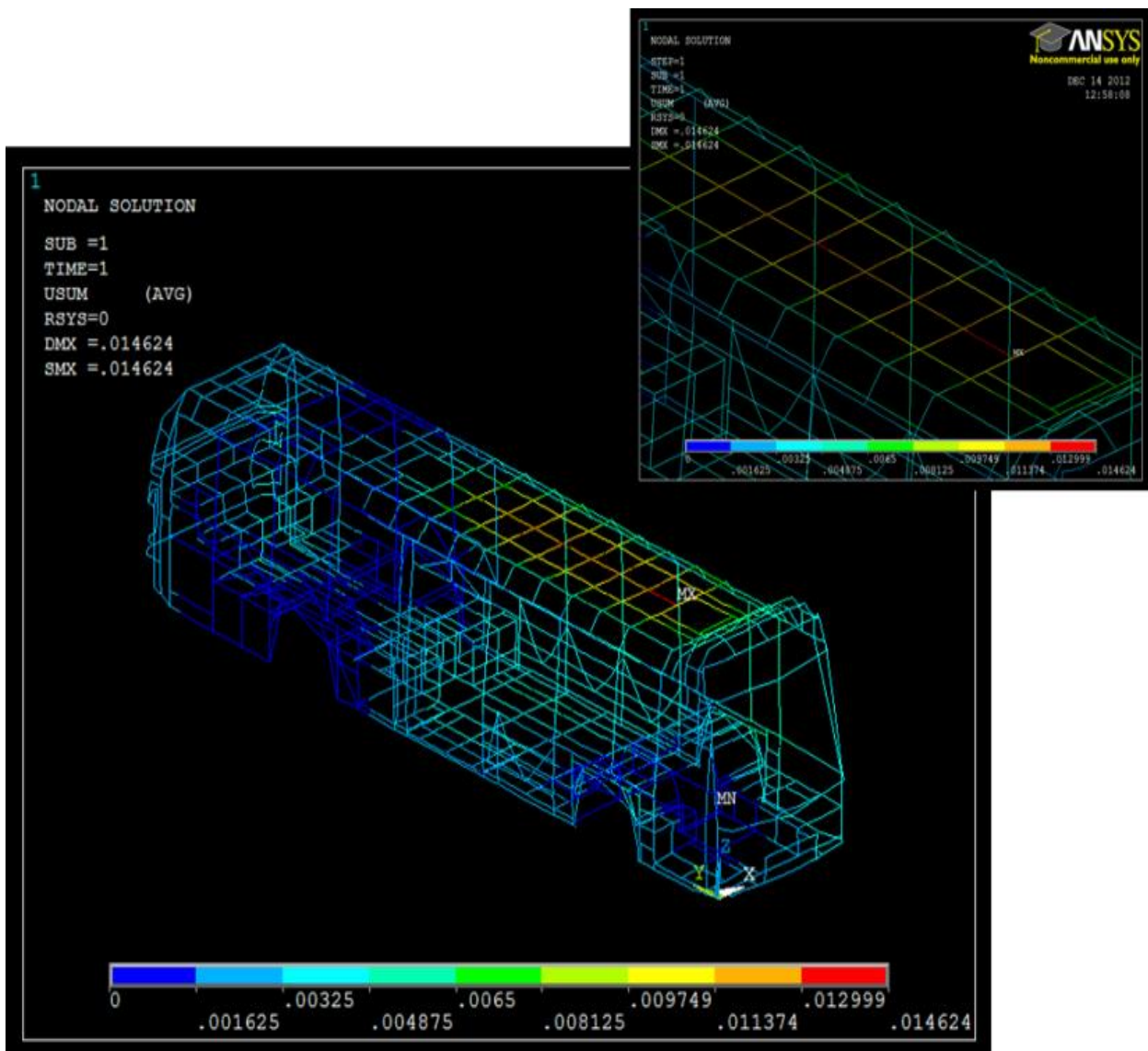


Figura 66 Suma Vectorial de los Desplazamientos Nodales

### B.- Fuerzas y Esfuerzos Axiales

Con el objetivo de determinar las condiciones de operación (tracción o compresión) de los elementos que componen a la estructura del autobús, se obtuvieron las fuerzas axiales de cada uno de los componentes. En la distribución general de las fuerzas axiales (figura 67), debe notarse que los elementos más comprometidos desde el punto de vista de cargas axiales, se encuentran en la parte central del chasis.

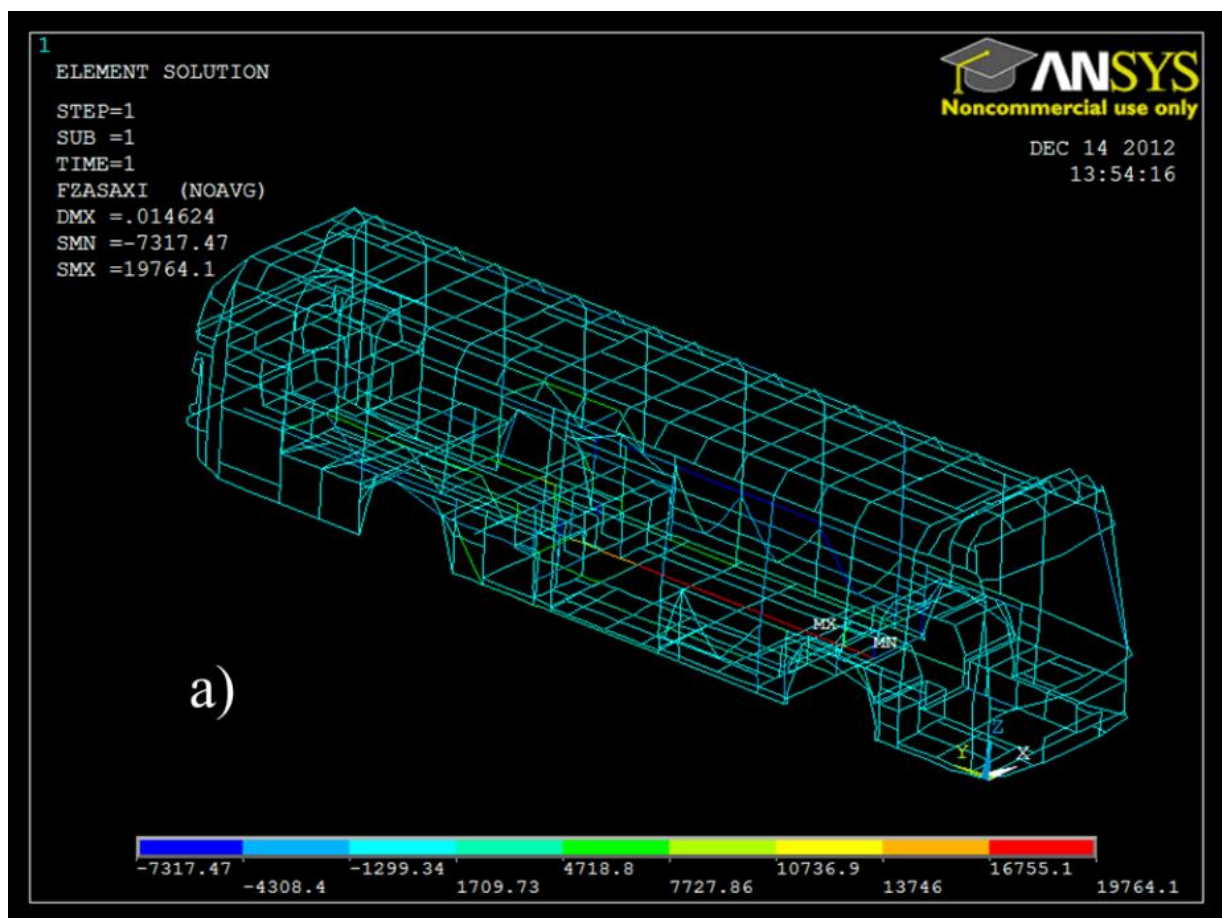


Figura 67 Fuerzas Axiales (unidades en N)

Estas cargas generan los esfuerzos (figura 68), a partir de la cual se observa que el esfuerzo de tracción máximo es aproximadamente 80 MPa, valor que se encuentra dentro de un rango de operación seguro, considerando las propiedades mecánicas a la tracción del acero empleado en la fabricación de la carrocería del autobús.

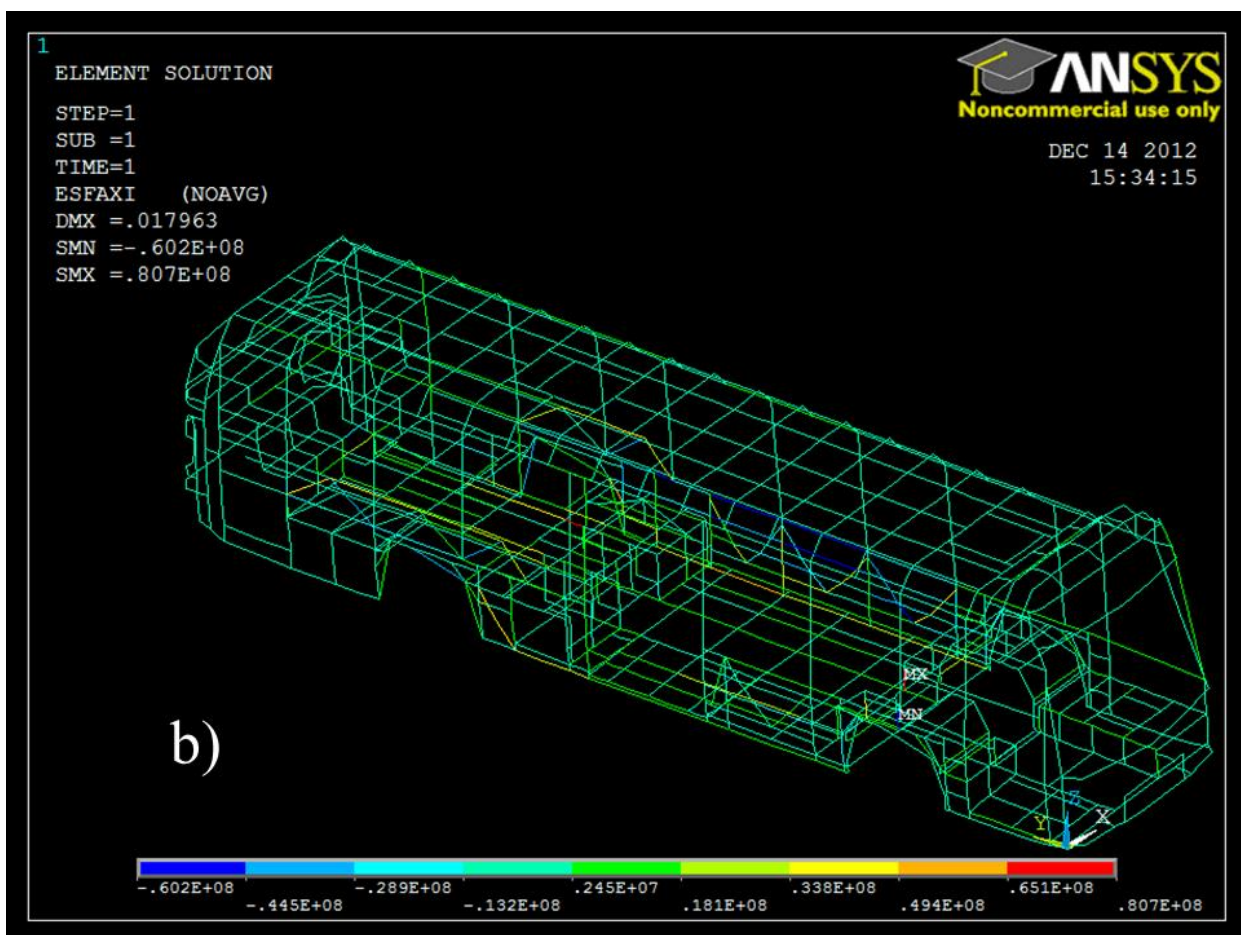


Figura 68 Esfuerzos Axiales (unidades en Pa)

### C.- Esfuerzos Flexionantes

Debido a que la mayoría de los componentes estructurales funcionarán en forma de viga, se determinaron los esfuerzos flexionantes positivos y negativos (tracción y compresión) en la dirección vertical para cada uno de los elementos de la estructura. La distribución de los esfuerzos de flexión (figura 69), debe notarse, que los esfuerzos máximos se ubican en la zona trasera del modelo, los cuales tiene un rango de -66 a 87 MPa. Sin embargo, es necesario complementar este análisis para observar el comportamiento bajo condiciones de esfuerzos combinados y el efecto de las cargas cíclicas (fatiga).

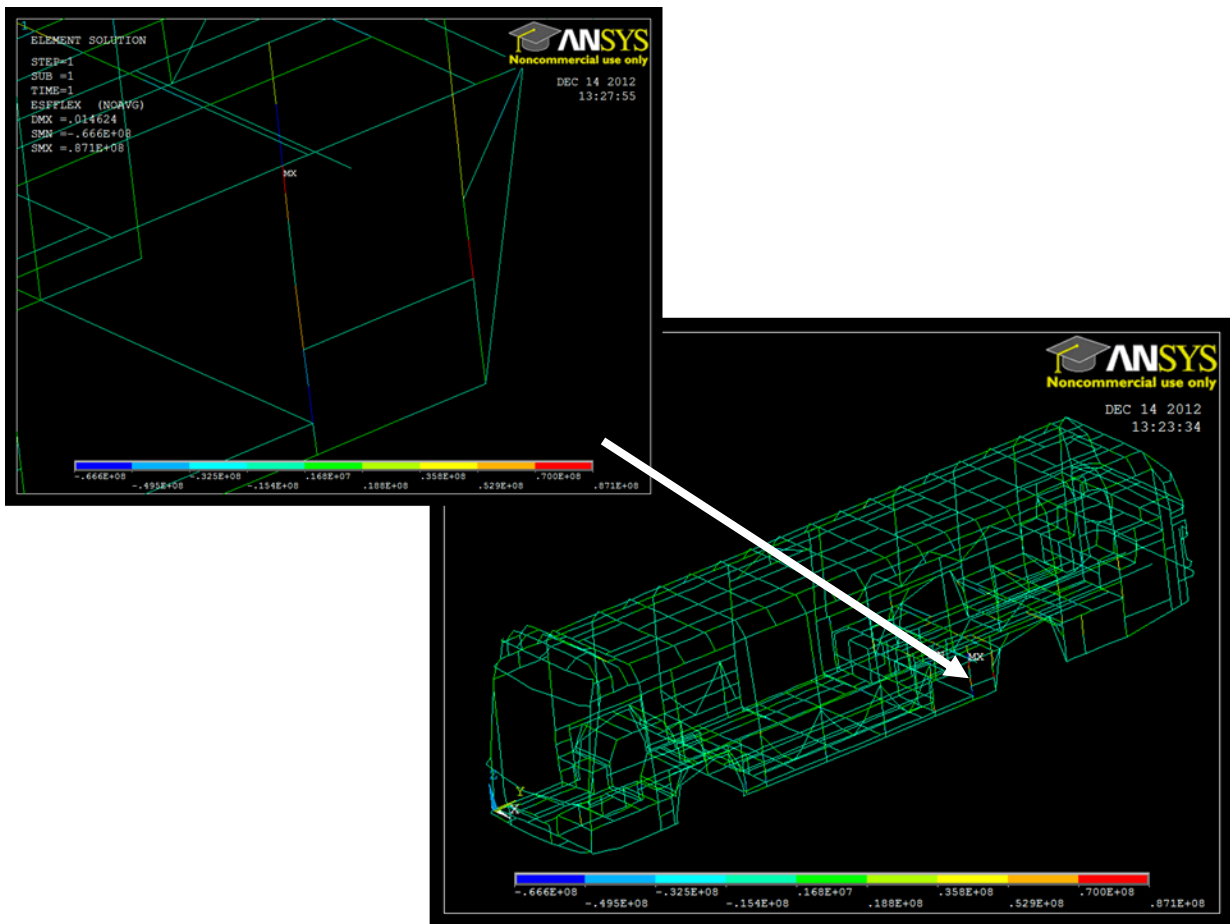


Figura 69 Esfuerzos de Flexión (unidades en Pa)

### D.- Deformación

Las deformaciones elásticas (figura 70) de los elementos estructurales fueron determinadas con el objetivo de validar las mediciones proporcionadas por la simulación numérica sin embargo, queda pendiente realizar dichas mediciones de forma experimental.



Figura 70 Deformaciones Elásticas

### 4.3.2 Análisis Estático a 2.5 Veces la Carga Normal de Operación

Se analizó la estructura del autobús, considerando que el vehículo es cargado 2.5 veces la carga útil y soportado rígidamente en los puntos de apoyo de la suspensión, de acuerdo a las recomendaciones establecidas en los Lineamientos Técnicos para Transporte Público en la Ciudad de México; en donde se establece, en la sección de Flexión, que los desplazamientos no deberán ser mayores a 0.015 m y las deformaciones deberán ser elásticas.

#### A.- Desplazamientos

Los resultados para los desplazamientos, fueron obtenidos considerando la distribución de cargas (figura 57), incrementando la carga útil 2.5 veces. La distribución vectorial y los valores correspondientes a cada nodo (Figura 71), muestran que el máximo desplazamiento se presenta en la región del toldo (ver ampliación en la Figura 73), dicho desplazamiento es aproximadamente 18 mm, el cual se encuentra por encima del límite máximo permitido (15 mm).

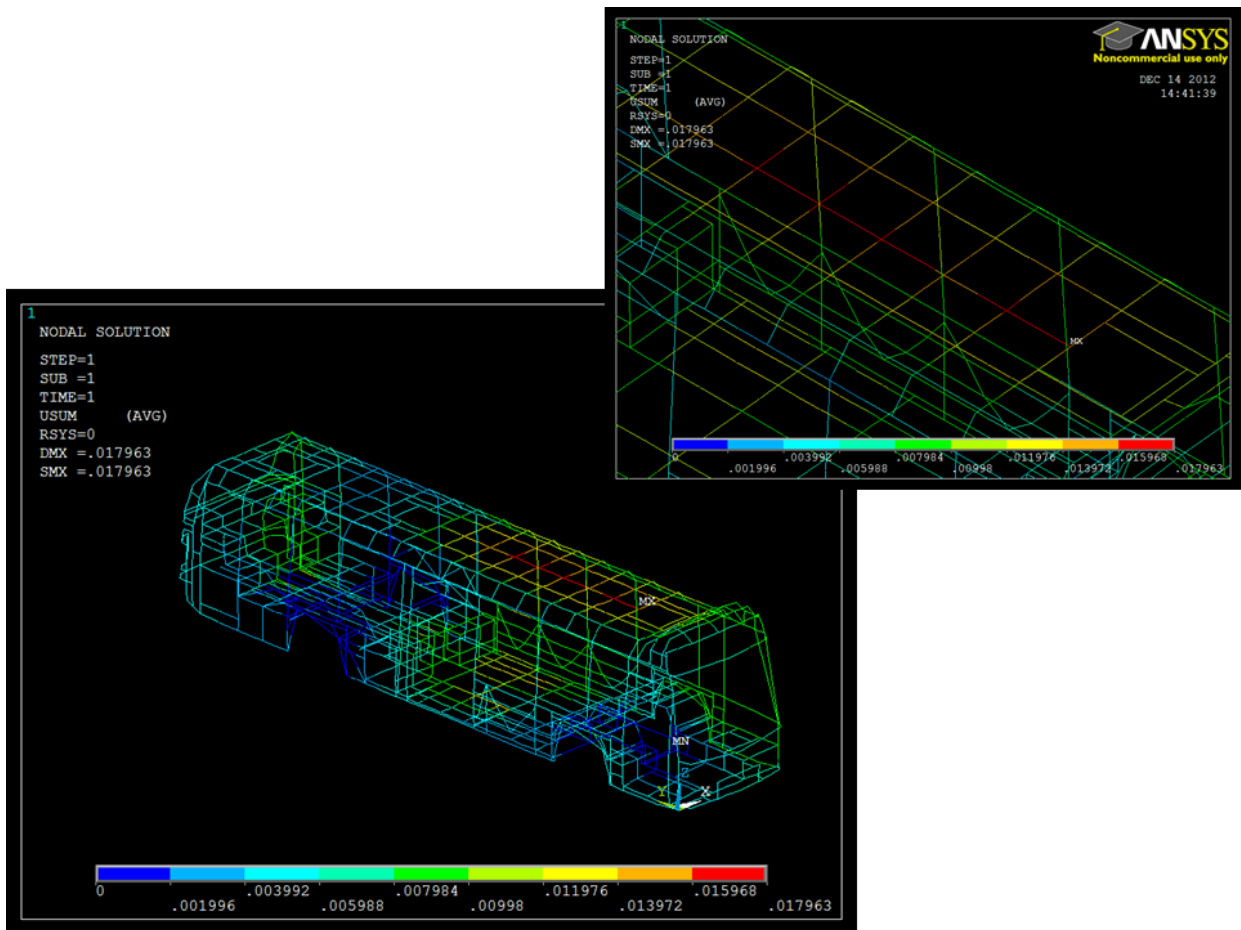


Figura 71 Suma vectorial de los desplazamientos nodales a una carga aumentada 2.5 veces

## B.- Esfuerzos de Flexión y Deformación

La distribución de los esfuerzos de flexión obtenidos cuando se aplica una carga útil incrementada 2.5 veces (figura 72), en donde el esfuerzo máximo de flexión positivo es alrededor de 208 MPa y el máximo negativo aproximadamente de 150 MPa.

El nivel de esfuerzos de flexión generados, indica que las condiciones de operación de los elementos flexionados no se verán comprometidas de acuerdo a las propiedades mecánicas de los materiales empleados en su fabricación.

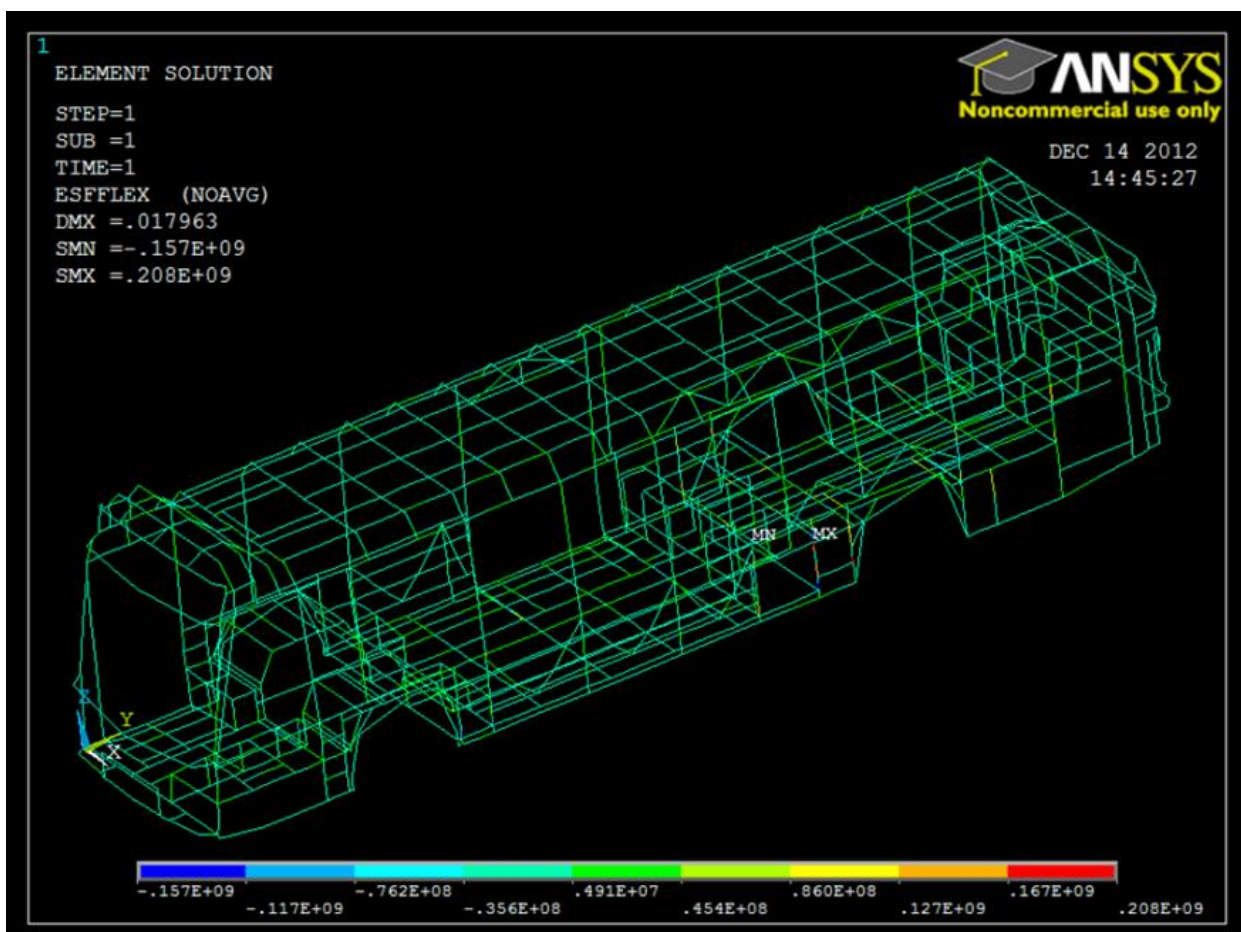


Figura 72 Esfuerzos de flexión generados a una carga útil incrementada 2.5 veces (unidades en Pa)



El nivel de deformaciones en los elementos de la estructura (figura 73) se encuentra dentro del rango elástico.

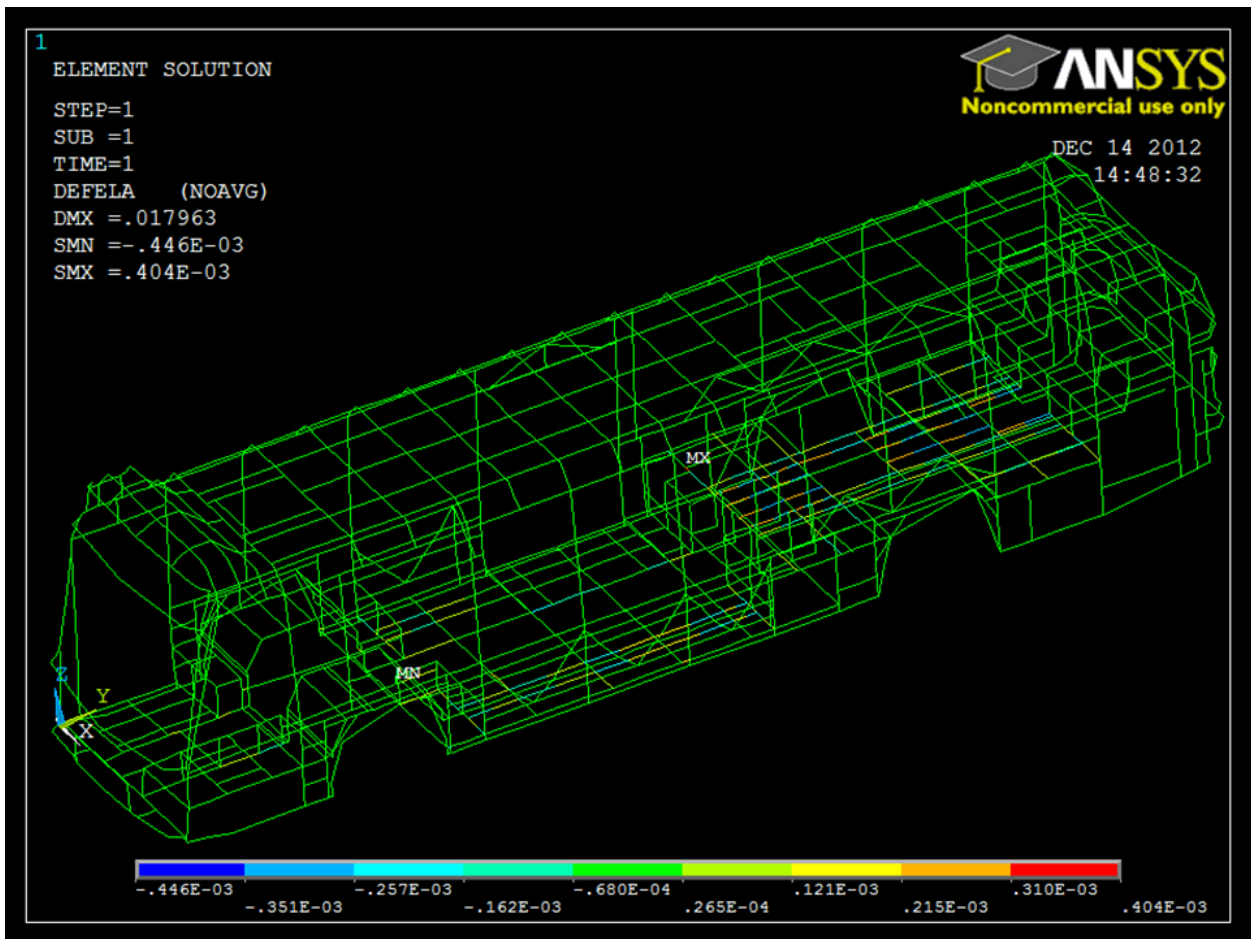


Figura 73 Deformaciones elásticas a una carga útil incrementada 2.5 veces

#### 4.4 Análisis Modal en Condiciones de Vibración Libre

El análisis de vibración libre se llevó a cabo con el objetivo de obtener los 20 modos y las frecuencias naturales de vibración a las cuales cada uno de estos modos podrían presentarse.

El estudio fue llevado a cabo tomando en consideración que el sistema puede modelarse a través de una masa total equivalente de la estructura del autobús, un resorte total equivalente con un comportamiento lineal y que no existe amortiguamiento.

Se consideró una densidad promedio del acero de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , algunas imágenes de los modos de vibración se presentan en la **Figura 74**.

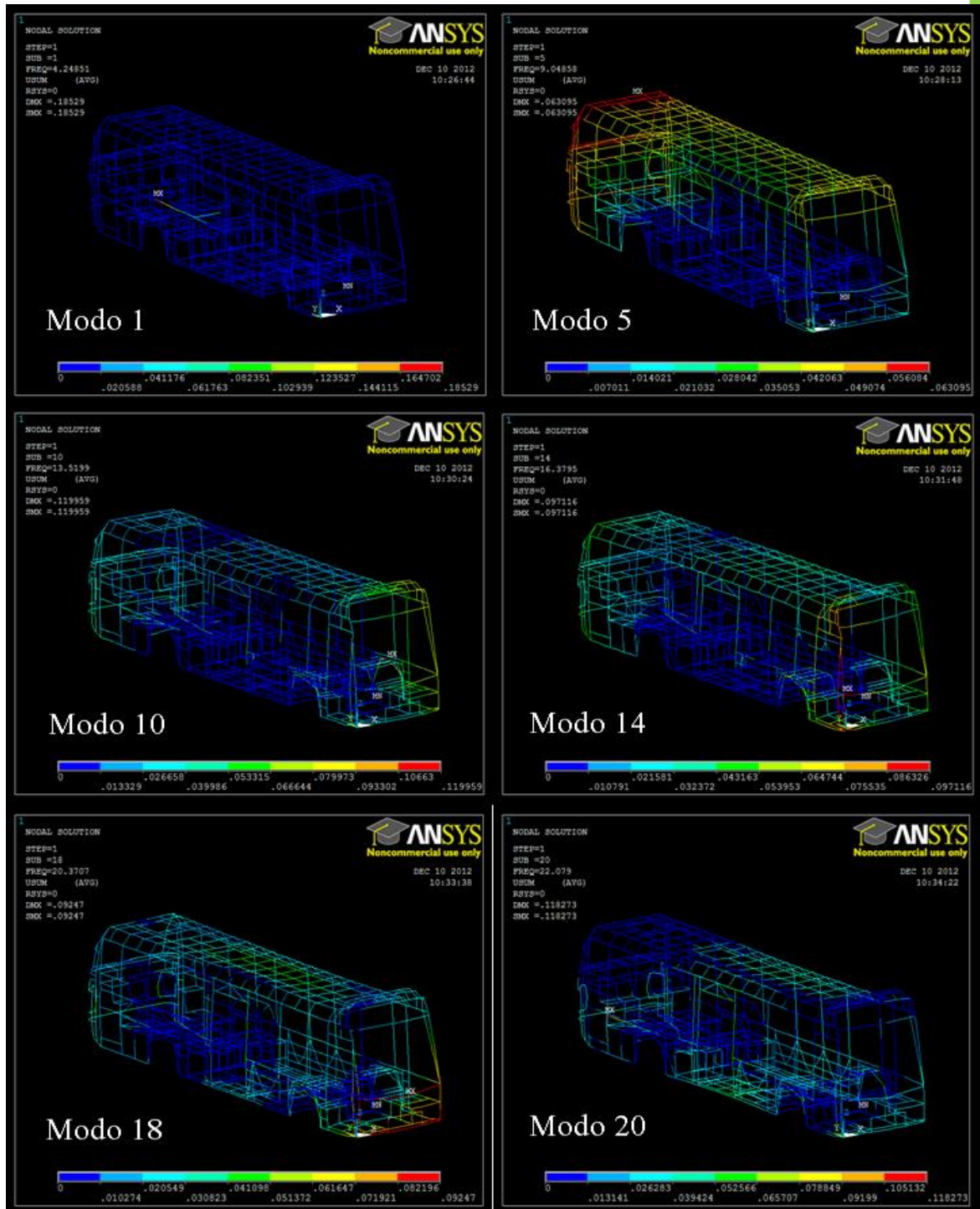


Figura 74 Modos de vibración libre

Las frecuencias naturales obtenidas de acuerdo a la estructura del autobús (figura 75), oscilan entre 4.2 y 22 Hz, tal como se puede observar en el gráfico de frecuencias con respecto a los modos de vibración.

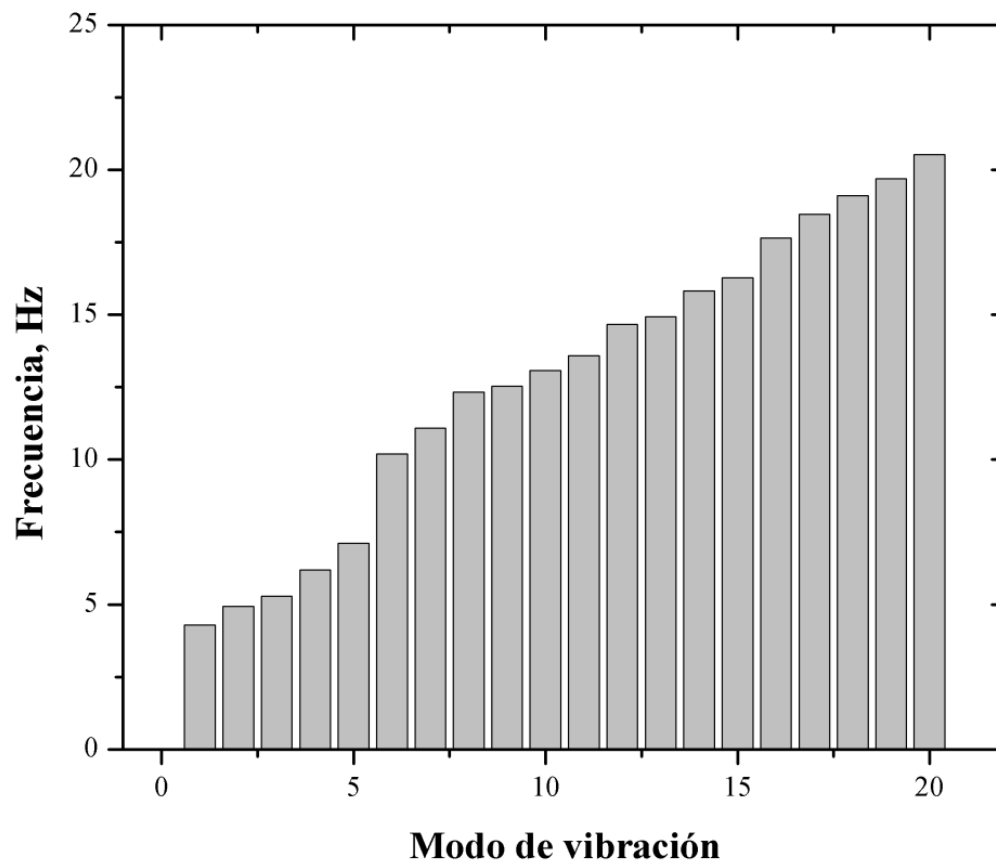


Figura 75 Frecuencias naturales vs modo de vibración

Las frecuencias naturales de vibración bajo diferentes modos, deben tenerse siempre en consideración, ya que por medio de estas, es posible evitar las fuentes de excitación externas que pudieran generar frecuencias de la misma magnitud y evitar el fenómeno de resonancia, el cual podría ocasionar una falla de la estructura.

Adicionalmente, se considera la necesidad de llevar a cabo un análisis de vibraciones forzadas, así como la medición experimental en diferentes puntos de la estructura del autobús.

## CONCLUSIONES

El objetivo es obtener el diseño y optimización de las características mecánicas y estructurales para la fabricación de un autobús de piso bajo continuo que será utilizado para prestar el servicio de Trolebús, tomando en consideración el comportamiento mecánico de los materiales dentro del área elástica como herramientas de diseño.

Dicha investigación permite obtener el esquema de una estructura de un autobús tipo Trolebús, la cual fue analizada y optimizada en cuanto a las características mecánicas y estructurales, utilizando como herramienta principal los software de Solidworks y ANSYS 14 (Mechanical APDL) versión académica, para llevar a cabo una Simulación Numérica de la estructura.

Dentro del análisis por medio de la Teoría del Elemento Finito se ubicaron zonas de la estructura para realizar las simulaciones en donde se tienen mayor concentración de esfuerzos y desplazamientos, originados por la carga viva y muerta, condiciones que son consideradas. Esta situación permite analizar dichos aspectos para asegurar el buen comportamiento físico-mecánico de la estructura, previo a la construcción del prototipo de la unidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos durante la experimentación se tiene lo siguiente:

- ❖ La caracterización del material base, por medio de Pruebas de Dureza y Pruebas de Tensión, es el primer paso para realizar un buen diseño, ya que de esto depende la veracidad del resultado obtenido en cualquier Simulación Numérica.
- ❖ El cambio de geometría y ubicación de las diferentes secciones transversales utilizadas en el diseño de la estructura del Autobús de Piso Bajo Continuo van acorde a la distribución de carga, concentraciones de esfuerzos y desplazamientos; en base

a esto se puede optimizar material y así construir estructuras más ligeras, ya que en zonas críticas es donde se usaron los elementos de mayor sección transversal.

- ❖ Como resultado de la realización de un sinnúmero de simulaciones, se puede garantizar que con los datos analizados en estático se está trabajando por debajo del punto de fluencia, corroborando que esto es dentro del área elástica.

Las simulaciones del análisis estructural por medio de la Teoría del Elemento Finito, son de suma importancia, pero no se debe dejar de la que por requerimientos internacionales es necesario efectuar pruebas dinámicas que respalden el comportamiento simulado.

## BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Strength Analysis of Bus Superstructure according to Regulation No. 66 of UN/ECE – J. Karlinski, M. Otak, P. Dzialak, E. Rusinski
- ❖ Experimental and Numerical Analysis of a Bus Component in Composite Material – C. Colombo, L. Vergani
- ❖ Ensayo de Tracción bajo la Norma ASTM E8
- ❖ Introducción al Análisis Estructural por Elementos Finitos – Doctor Jorge Eduardo Hurtado UNC
- ❖ [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
- ❖ [www.ste.df.gob.mx](http://www.ste.df.gob.mx)