



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

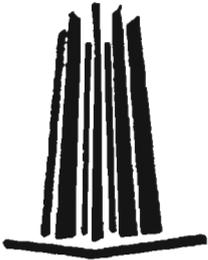
**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO
DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE REACCIONES EN
ARMADURAS”**

T E S I S

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

**P R E S E N T A :
FERNANDO NÉSTOR GARCÍA CASTILLO**



Asesor de Tesis: M. en I. Jacinto Cortés Pérez

SAN JUAN DE ARAGÓN MÉXICO AGOSTO DE 2005

m. 341566



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

EL PRESENTE TRABAJO ES DEDICADO A:

MIS PADRES:

Por que gracias a ellos siempre he realizado las metas y sueños que me he propuesto, pues su ejemplo, honradez, humildad, sinceridad, fe y amor, junto a sus sabios consejos me guían como una inmensa luz entre las sombras, fruto de la grandiosa labor y sacrificio que día a día han hecho a través de los años.

Por que me enorgullece verlos caminar juntos de la mano como novios y amarse tanto sin importarles el tiempo ni quien este a su alrededor, detalle que he visto en muy pocas parejas de su edad.

Pero principalmente por que los amo y por que no he encontrado nada con que pueda pagarles todos estos años de dicha y felicidad.

GUADALUPE CASTILLO:

Por que has luchado conmigo desde mis primeras clases hasta ahora, batallando con mi carácter y mi falta de comunicación. Por tus cuidados, atenciones y paciencia después de tantas cosas que me han sucedido; sobre todo, por estos largos meses después de mi operación ya que por ti estoy recuperado.

Por que se que tienes una capacidad enorme que por atendernos desgraciadamente no has podido demostrar, lo que me recuerda tu sacrificio al dejar pasar tus sueños e ideas por nosotros, aun que pensándolo bien creo que realmente no sacrificaste nada, por que has logrado lo que deseabas y me lo demuestran tus ojos llenos de brillo cuando me platicas como llegaste a donde estas, reflejando que eres completamente feliz.

Y además por que de alguna forma trato de corresponderte el infinito amor que me demuestras siempre.

FERNANDO MOISÉS GARCÍA ÁVILA:

Por que siempre has sido mi ejemplo a seguir, pues desde mis lejanos recuerdos apareces luchando por nosotros desde antes que salga el sol hasta que muere la noche.

Por que aun no entiendo de donde te sale tanta fuerza para no frenar tu paso, para vencer tantos obstáculos y envidias que te tienen e incluso a la misma enfermedad.

Por que simplemente eres el hombre que más admiro en esta tierra, ya que tus palabras, consejos, sabiduría y experiencia no solo las transmites o las dices, sino que las aplicas, que desde mi punto de vista es lo más difícil.

Y por que debes estar contento debido a que a pesar de que no existe tu jeringa llena de tus experiencias que me querías inyectar cuando no te entendía, si dejaste muchas cosas en mi mente que me compromete a ser una persona mejor, aun que jamás podré alcanzarte.

MIS HERMANOS:

Por que cada uno tiene virtudes e ideas tan grandes que los ha hecho sobresalir de los demás y que trato de aprenderles cada que los veo.

Por que quiero compartirles este logro para motivarlos a que continúen desarrollándose profesionalmente, pues los tres en algún tiempo de alguna forma dejamos los estudios parcialmente.

Y por que junto a sus familias son mi motivación para salir adelante.

NANCY GARCÍA CASTILLO:

Por que desde hace muchos años extraño tu presencia en casa a pesar de que estas bien y seguimos juntos, por tenerte como compañía en los primeros días de mi carrera y en los últimos de mi negocio, etapas donde sin ti no se que hubiera hecho.

C. OMAR GARCÍA CASTILLO:

Por que pocas veces supe entenderte y defenderte, cosas que nunca más sucederán, detalles que conmigo siempre has tenido. Por que en mis ratos de inseguridad me enseñaste lo valioso que soy y por que te siento cada vez más cerca gracias a la familia que has formado.

MIS SOBRINOS: DIEGO Y ALEJANDRO

Por que son el reto para toda la familia a llevarlos por mejor camino y seguir creciendo.

JACINTO CORTÉS PÉREZ:

Por enseñarme caminos que por mi cuenta no hubiera encontrado. Por que comparto muchos de sus ideales y no descansare hasta hacerlos realidad.

Con cariño y admiración por que sus logros son motivantes para seguir adelante.

MIS COMPAÑEROS

Que fueron rechazados en el 92 a pesar de que existían salones vacíos con profesores asignados en el cch-Naucaipan.

Por sus ganas de estudiar y presentarse a las clases durante meses aunque no estuvieran inscritos.

Por que estoy convencido que muchos de ustedes hubieran llegado al nivel escolar en el que me encuentro y mucho más si se les hubieran abierto esa oportunidad.

RECONOCIMIENTOS

M. en I. Jacinto Cortés Pérez:

Por el gran apoyo brindado y por sus conocimientos que me ha compartido. Por impulsarme a estudiar una maestría que ha cambiado mi vida por completo. Por dirigirme mi tesis con esa visión y profesionalismo que lo caracteriza. Por ayudarme en los momentos en que estuve inactivo por motivos de salud y por tenerme la confianza que hasta ahora me ha demostrado.

Raúl Rojo Vioria y Juan Pablo Campos López:

Por apoyarme en la realización y acotación de gran parte de los dibujos, pues después de mi operación me fue imposible elaborarlos. Esperando poder pagarles ese inmenso favor una y otra vez cuando me necesiten.

Atenea Vital Arana:

Por ayudarme a corregir mi redacción y tantos errores de ortografía.

Armando Vega Serrano y Fernando Paris Delgado Gómez:

Por sus grandes contribuciones y comentarios referentes al presente trabajo.

M. en I. Alberto Reyes Solís, Ing. Alfredo Aldaz Benitez, Ing. Ismael Huitrón Márquez, Ing. Javier Nava Pérez:

Por su apoyo y comentarios sobre la tesis.

La Universidad Nacional Autónoma de México y Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón:

Por que mis conocimientos académicos son resultado de los muchos profesores que me han transmitido su sabiduría desde el CC-H hasta ahora.

AGRADECIMIENTOS

Al CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN por las facilidades y oportunidades que me brindo durante la realización de la presente tesis.

A los compañeros del **Laboratorio de Mecánica** del Centro Tecnológico Aragón por su amistad apoyo y conocimientos que hace posible no solo la realización de ésta tesis, sino de tantos proyectos que han surgido en este poco tiempo de existir:

Ing. José Antonio Souza Jiménez, Raúl Rojo Vilorio, Juan Pablo Campos López, Aldo Peralta Guerra, David Becerril García, Mario Robles Ávila, Armando Vega Serrano, Fernando Paris Delgado Gómez, así como a todos lo que por alguna razón omití sin menospreciar su contribución y apoyo. Por que se que juntos podemos llegar bastante lejos, pues en ustedes veo muchas virtudes que nos harán crecer hasta dejar de depender, al menos en nuestra área, del extranjero por el bien de la escuela y de nuestro país.

ÍNDICE

	Pág.
Introducción	i
CAPÍTULO 1 CONCEPTOS GENERALES DE ESTRUCTURAS	
1.1 ¿Qué es una estructura?	1
1.1.2 Antecedentes históricos	1
1.2 Clasificación y aplicaciones de las estructuras	3
1.2.1 Estructuras a tensión	4
1.2.2 Estructuras a compresión	4
1.2.3 Estructura de esfuerzo cortante	4
1.2.4 Estructuras de flexión	5
1.2.5 Armaduras	5
1.2.5.1 Armaduras planas	
1.2.5.2 Armaduras espaciales	
1.2.6 Análisis de armaduras planas	10
1.2.6.1 Hipótesis para el análisis de armaduras	
1.2.6.2 Estabilidad interna	
1.2.6.3 Fuerzas cero	
1.2.7 Análisis de armaduras espaciales	13
1.2.7.1 Reacciones	
1.2.7.2 Determinación, indeterminación e inestabilidad estática	
1.2.7.3 Fuerzas cero	
1.2.8 Métodos convencionales para el cálculo de reacciones en armaduras	14
1.2.8.1 Método de los nodos	
1.2.8.2 Método de las secciones	
1.2.8.3 Métodos avanzados	
1.2.8.4 Método tensorial.	
1.3 Tipos de cargas	20
1.3.1 Cargas muertas	21
1.3.2 Cargas vivas	22
1.3.3 Cargas ambientales	22
1.4 Métodos de aplicación y medición de cargas	22
1.4.1 Métodos mecánicos	23
1.4.1.1 Palanca Simple	
1.4.1.2 Palanca compuesta	
1.4.1.3 Péndulo	
1.4.1.4 Resorte y aro de prueba	
1.4.2 Métodos hidráulicos y neumáticos	25
1.4.3 Métodos eléctricos	26

1.5 Métodos de medición de deformación	27
1.5.1 Galgas extensométricas mecánicas	28
1.5.2 Galgas extensométricas ópticas	29
1.5.3 Galgas extensométricas acústicas	30
1.5.4 Galgas extensométricas eléctricas	31

CAPÍTULO 2 DISEÑO DE LA ARMADURA

2.1 Requerimientos de diseño y planteamiento del problema	34
2.2 Evaluación y selección de las alternativas de solución	34
2.2.1 Alternativas para la configuración	
2.2.2 Alternativas para tipo de carga	
2.2.3 Alternativas para forma y medición de cargas	
2.2.4 Alternativas para medición de reacciones en cada elemento	
2.3 Diseño de configuración	42
2.3.1 Marco universal	44
2.3.2 Barras y geometría	45
2.3.3 Nodos y articulaciones con soporte	48
2.3.4 Aro de carga y soporte	50
2.3.5 Celdas de carga y medición de reacciones	52
2.4 Diseño de detalle	55
2.4.1 Memoria de cálculo	56
2.4.1.1 Conjunto seguro-ancla	
2.4.1.2 Conjunto seguro-nodo	
2.4.1.3 Conjunto seguro-barras	
2.4.1.4 Conjunto seguro-cabeza	
2.4.1.5 Conjunto base de bastón-nodo	
2.4.1.6 barra larga	
2.4.1.7 barra corta	
2.4.1.8 Aro	
2.4.1.9 Tornillo	

CAPÍTULO 3 PRUEBAS REALIZADAS AL PROTOTIPO

3.1 Introducción	67
3.2 Descripción general de la armadura	67
3.3 Realización del experimento y resultados	69
3.3.1 Pruebas preliminares	70
3.3.2 Cálculo de reacciones en los elementos	70
3.3.2.1 Método de los nodos	
3.3.2.2 Método de las secciones	
3.3.2.3 Método analítico de descomposición de vectores	
3.3.2.4 Análisis de resultados	
3.4 Manual de prácticas de laboratorio	80

Apéndices

- I. Planos de ensamble y elementos
- II. Puente de Wheatstone
- III. Método de instalación de galgas extensométricas

Referencias

Introducción

Actualmente en México existe la gran necesidad de desarrollar tecnología propia que frene la dependencia que sufrimos del exterior, así como la fuga de divisas. Aunque recientemente se han dado una serie de discusiones en torno a la solución de dicho problema, es poco lo que a la fecha ha podido concretarse debido a múltiples razones, entre las que destacan: la falta de personal altamente calificado en áreas de la ingeniería, el poco interés que existe de parte de las empresas para invertir en desarrollo tecnológico, entre otras. Es claro que la participación de las universidades en este problema es estratégica; por lo que, es urgente que se establezcan relaciones entre las empresas, sobre todo micro y pequeñas, y las instituciones de investigación.

Una de las muchas áreas de oportunidad para el desarrollo de tecnología resulta ser precisamente la de equipamiento de laboratorio de enseñanza. Casualmente, las propias instituciones de educación superior, donde se debería estar formando los futuros creadores de tecnología, son unos de los principales compradores de tecnología de importación. Es claro que algunos de los equipos que se necesitan para la enseñanza requieren el uso de tecnología avanzada, pero también es cierto que muchos de estos equipos pueden ser diseñados y construidos sin mayores problemas aplicando conocimiento que hoy es del dominio público o cuando menos se pueden encontrar en fuentes bibliográficas especializadas. Las razones por las cuales ocurre lo anterior son diversas y salen del alcance del presente trabajo. No obstante, en la presente tesis se abordará un caso concreto en el que se desarrollaron una serie de equipos didácticos para un laboratorio de ingeniería civil. Dicho proyecto surgió de la concertación de un convenio de vinculación entre el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro Tecnológico Aragón y la empresa Equipos Didácticos Científicos e Industriales S. A. de C. V. dedicada a la importación y comercialización de equipos para la enseñanza en ingeniería.

El proyecto concertado con la empresa consistió en el diseño, construcción e instrumentación de cinco equipos didácticos que simulan diversos fenómenos de la mecánica de sólidos. En particular el presente trabajo se concentró en uno de dichos equipos, el cual se denomina: **Equipo para ensayo de reacciones en armaduras.**

Cabe destacar que para la realización del proyecto fue necesario integrar a distintas áreas de la ingeniería, tales como: mecánica, eléctrica, industrial y en computación de la ENEP Aragón.

A continuación se presenta la metodología empleada en el presente trabajo para lograr diseñar, construir e instrumentar un equipo para el ensayo de reacciones en armaduras, fácil de armar y desarmar, que ofrece la posibilidad de tener dos diferentes configuraciones, capaz de medir las fuerzas en cada miembro generadas por la aplicación de una carga estática, que puede variar un rango determinado, en uno de los nodos. Así mismo el equipo diseñado cuenta con un equipo electrónico que permite mostrar los valores de las reacciones y la carga aplicada en una pantalla digital, esto mediante la instrumentación de cada uno de los elementos con galgas extensométricas.

En el capítulo 1 se presenta una serie de conceptos básicos que son necesarios para la comprensión del diseño final, el hacerlo de esta forma contrariamente a un proceso de diseño. en el cual se empieza por plantear el problema a partir de una necesidad. es pensando únicamente en el lector que desconociera el tema. Por tanto, el diseño formal se encuentra a partir de los siguientes dos capítulos.

En el capítulo 2 se presenta una etapa del ciclo de diseño, donde se formula, analiza, evalúa y especifica el problema. para dar la solución al mismo, omitiendo únicamente la parte de búsqueda de alternativas de solución implícita ya en el capítulo anterior. Se anexa además una parte denominada memoria de cálculo. donde se muestra un análisis realizado a diferentes partes críticas de la armadura con el fin de encontrar la carga máxima que puede soportar.

En el capítulo 3 se muestra la siguiente etapa del diseño, donde se presentan las pruebas realizadas al prototipo. una vez fabricada la armadura, y los cálculos analíticos correspondientes con la comparación de ambos. con el fin de evaluar la efectividad del equipo diseñado. Además, se propone un método analítico para resolver en función de la fuerza aplicada las cargas, reacciones y la forma, tensión o compresión, de cada uno de los elementos de la armadura utilizando tensores. Por último se dan las conclusiones generales del diseño.

Finalmente. en el apéndice I se muestra una lista de partes de la armadura en general. así como los planos de cada elemento y los ensambles para la fabricación de la misma. pensando en un posible sistema de manufactura en serie, no contemplada en este trabajo. En el apéndice II se detalla una parte muy importante de la extensometría utilizada para medir las cargas. como lo es el circuito eléctrico conocido como puente de Wheatstone. Por último, en el apéndice III se explica brevemente el proceso correcto para instalar una galga extensométrica, el cual debe ser muy cuidadoso y no puede omitirse, es tan importante esta parte. que si no se tomara en cuenta las mediciones realizadas serían erróneas.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES DE ESTRUCTURAS

1.1 ¿Qué es una estructura?

La ingeniería estructural, como muchas ramas de la ingeniería, es un campo enorme que va creciendo cada vez más, debido al auge de las computadoras, entre otras cosas. De hecho, hoy en día se cuenta con un acervo informativo sobre el tema; sin embargo, pocos son los autores que definen el término de estructura. De los pocos que se detienen en la definición anterior existen los que sólo lo mencionan brevemente, por ejemplo:

“Una estructura consiste en una serie de partes conectadas usadas para soportar una carga.”
[1]

Hasta los que dan definiciones incompletas y poco convincentes:

“Una estructura en ingeniería es cualquier cosa construida por el hombre.”[2]

Ambos autores mencionan que sus definiciones abarcan edificios, puentes, tanques de almacenamiento, estructuras de aviones, barcos, muros de contención, torres, presas, etc.

Una buena definición podemos encontrarla en el Marshall:

“Cuerpo capaz de resistir cargas aplicadas sin que exista una deformación excesiva de una de sus partes con respecto a otra.”[3]

Juntando las definiciones anteriores se puede concluir que una estructura es:

“Una serie de partes conectadas para resistir cargas aplicadas sin que exista una deformación excesiva de una de sus partes respecto a las otras.”

Esta definición elimina del campo de las estructuras aquellos mecanismos en los que los efectos cinemáticos y dinámicos son importantes.

La función de una estructura es; por lo tanto, transmitir fuerzas en un punto del espacio a otro, resistiendo su aplicación y sin perder su estabilidad.

1.1.2 Antecedentes históricos

Sin duda alguna la planeación, el diseño y la construcción de estructuras son esencialmente tan viejos como el mismo ser humano, porque aunque la naturaleza proporciona en este planeta un ambiente aceptable para nosotros, la forma natural de este ambiente es raramente conveniente a nuestras necesidades. Los primeros seres humanos podían encontrar probablemente las cuevas naturales o los árboles huecos para tener abrigo parcial; sin embargo, esto no era suficiente, así que comenzaron a suplir la naturaleza para resolver mejor sus necesidades; de tal modo, construyeron sus primeras estructuras.

No se puede saber si las primeras estructuras eran simples soluciones a necesidades o algo un poco más avanzado, como algún puente hecho con una viga. El motivo es que los expedientes históricos no son tan antiguos en ingeniería estructural como lo es la documentación en cuanto a los progresos espirituales, filosóficos, políticos, económicos, y artísticos. Por otra parte, la exploración arqueológica ha dado una cierta evidencia física limitada de las estructuras producidas por la ingeniería antigua y aunque los conceptos y las ideas detrás de su construcción se pierden, es posible deducirlos/as.

Es claro que las necesidades básicas de la gente como son alimento y abrigo, cambian con el tiempo, al igual que las soluciones para el cumplimiento de las mismas. Cuando el

conocimiento teórico todavía no se ha desarrollado para satisfacer las necesidades de su época, el diseñador debe confiar en la experiencia de campo o en la intuición para garantizar el buen comportamiento estructural.

En la época antigua, se realizaron grandes construcciones como las pirámides egipcias, los templos griegos, los coliseos, acueductos romanos, etc. Las formas más tempranas de construcción de las cuales tenemos verdadero conocimiento, son las viviendas en algunos de los lagos suizos.

No hay duda que los egipcios y otros constructores antiguos tenían formuladas leyes basadas empíricamente sobre previas experiencias para planear nuevas estructuras, pero esto no implica que no tuvieran un buen desarrollo estructural. Los filósofos como Aristóteles (384-322 a.c.) y Arquímedes (287-212 a.c.) formularon las bases de la mecánica estructural dando los principios fundamentales de la estática.

Posteriormente, de las notas de Leonardo da Vinci (1452-1519) puede verse claramente que entendía los fundamentos del desarrollo de los materiales estructurales. Sin embargo, los ingenieros empezaron a ver el diseño estructural desde el punto de vista de la mecánica, las matemáticas y la ciencia hasta la mitad del siglo XVII.

Galileo Galilei se considera como el iniciador de la teoría de las estructuras, pues en su libro titulado dos ciencias nuevas que se publicó en 1638, analizó la falla de algunas de las estructuras simples, incluyendo las vigas en voladizo.

Aunque las predicciones de Galileo de las resistencias de las vigas sólo fueron aproximadas, su trabajo puso el cimiento para los desarrollos futuros en la teoría de las estructuras y anunció una nueva era en la ingeniería estructural, en la cual los principios analíticos de la mecánica y la resistencia de materiales tendrían una importante influencia en el diseño de las estructuras.

La mecánica estructural avanzó a paso rápido en la segunda mitad del siglo XVII y hacia el XVIII:

Robert Hooke (1636-1703), desarrolló la ley de las reacciones lineales entre la fuerza y la deformación de los materiales (la denominada ley de Hooke). Sir Isaac Newton (1642-1727) formuló las leyes del movimiento y desarrolló el cálculo. John Bernoulli (1667-1727) formuló el principio del trabajo virtual. Leonhard Euler (1707-1783) desarrolló la teoría del pandeo de columnas. Coulomb (1736-1806) presentó el análisis de la flexión en vigas elásticas. En 1826, L. M. Navier (1785-1836) publicó un tratado sobre el comportamiento elástico de las estructuras, el cual se considera el primer libro de texto sobre la teoría moderna de la resistencia de materiales.

El desarrollo de la mecánica estructural continuó enormemente en el siglo XIX y hacia la primera mitad del siglo XX, cuando se desarrollaron la mayor parte de los métodos clásicos para el análisis de las estructuras. Entre los colaboradores en este periodo se encuentran:

Clapeyron (1799-1864) formuló la ecuación de los tres momentos para el análisis de las vigas continuas. J. C. Maxwell (1831-1879) presentó el método de las deformaciones coherentes y la ley de las deflexiones recíprocas. Otto Mohr (1835-1918) desarrolló el método de la viga conjugada para el cálculo de las deflexiones y los círculos de Mohr del esfuerzo y la deformación unitaria. Alberto Castigliano (1847-1884) formuló el teorema del trabajo mínimo. Greene (1842-1903) desarrolló el método del momento-área. H. Müller-

Breslau (1851-1925) presentó un principio para la construcción de las líneas de influencia. A. Maney (1888-1947) desarrolló el método de la pendiente-deflexión, que se considera como el precursor del método matricial de las rigideces. Ardi Cross (1885-1959) desarrolló el método de la distribución de momentos en 1924. [4]

Finalmente, el advenimiento de las computadoras en la década de 1970 revolucionó el análisis estructural, debido a que la computadora puede resolver grandes sistemas de ecuaciones simultáneas, entre otras cosas. Así un análisis que llevaba días, y a veces semanas, en la era previa a la computadora, ahora se puede realizar en segundos. Hoy día es común realizar análisis estructurales por medio de programas computacionales que permiten ver una simulación completa del fenómeno estudiado y obtener nuevos métodos de solución que superan ya en mucho a los clásicos. Tan impresionante es la cantidad del conocimiento que se ha acumulado durante estos últimos años, que muchos ingenieros estructurales han estado inclinados a limitar sus diseños por códigos y formulaciones matemáticas disponibles.

1.2 Clasificación y aplicaciones de las estructuras

Existen varias clasificaciones de las estructuras dependiendo del enfoque que se quiera analizar. A continuación se muestran varios ejemplos:

a) Clasificación debido a los elementos que las componen: [2]

1. Lineales o constituidas por elementos en los que una de sus dimensiones es mucho mayor que las otras dos, entre éstas se encuentran las vigas y las columnas, y para su análisis pueden representarse por su eje.
2. De superficie. Se caracterizan por que dos de sus dimensiones son mucho mayores que la tercera (espesor) y en el análisis pueden representarse por el plano medio. Estas superficies pueden ser planas, por ejemplo las losas, o curvas como en el caso de los cascarones.
3. Volúmenes. Se caracterizan por que las tres dimensiones son del mismo orden de magnitud, y en el análisis hay que tomar en cuenta las tres, tal es el caso de las presas, losas gruesas que se utilizan en cimentaciones especiales, etc.

b) Clasificación debido a la organización de los elementos que los componen:

1. Planas. Cuando las cargas y los ejes de todos los elementos están contenidos en un plano.
2. Espaciales. Cuando las cargas y los ejes están contenidos en planos distintos.

c) Clasificación debido al grado de hiperestaticidad (diferencia entre número de ecuaciones independientes y número de reacciones y acciones internas en una armadura):

1. Isostáticas. Cuando el grado de hiperestaticidad es igual a cero.
2. Hiperestáticas. Cuando el grado de hiperestaticidad es mayor a cero.

d) Clasificación debido al material que las constituye

1. Estructuras hechas con materiales que siguen la ley de Hooke.

2. Estructuras hechas con materiales que no siguen la ley de Hooke, es decir, que la relación fuerza-desplazamiento no es una relación lineal.
- e) Clasificación debido al tipo de esfuerzos primarios que pueden desarrollar en sus miembros las cargas principales del diseño del material que las constituye [4]
1. Estructuras a Tensión
 2. Estructuras a Compresión
 3. Estructura de Esfuerzo Cortante
 4. Estructuras de Flexión

Puesto que en el diseño de la armadura se requiere obtener el comportamiento de la misma bajo una o varias cargas en acción, en las secciones subsecuentes se adentrará un poco más en esta última clasificación.

1.2.1 Estructuras a tensión

Estos miembros quedan sujetos a tensión pura bajo la acción de cargas externas. Debido a que el esfuerzo de tensión se distribuye de manera uniforme sobre las áreas de las secciones transversales de los miembros, el material de una estructura de este tipo se utiliza de manera más eficiente. Con frecuencia, se emplean estructuras de tensión compuestas de cables flexibles de acero para sostener puentes o techos de claros largos. En virtud de su flexibilidad, los cables tienen una rigidez despreciable a la tensión y sólo pueden desarrollar tensión. De este modo bajo cargas externas, un cable adopta la forma que le permite soportar la carga sólo por fuerzas de tensión. Es decir, la forma de un cable cambia al modificar las cargas que actúan sobre él. Por ejemplo, un solo cable puede tomar diferente forma bajo diferentes condiciones de carga.

Además de las estructuras de cables, como los puentes colgantes, otros ejemplos de estructuras a tensión incluyen las barras verticales usadas como suspensotes; por ejemplo, para sostener balcones o tanques y las estructuras de membrana como los toldos.

1.2.2 Estructuras a compresión

Éstas desarrollan principalmente esfuerzos de compresión bajo la acción de cargas externas. Dos ejemplos son las columnas y los arcos; las columnas son miembros rectos sujetos a cargas axiales de compresión. Cuando un miembro recto se sujeta a cargas laterales o a momentos, o a ambas acciones, se llama viga-columna.

Debido a que las estructuras a compresión son susceptibles de sufrir pandeo o inestabilidad, en sus diseños debe de considerarse la posibilidad de una falla de este tipo, si es necesario debe proporcionarse un arriostamiento adecuado para evitar esas fallas.

1.2.3 Estructura de esfuerzo cortante

Las estructuras de esfuerzo cortante, como los muros de esfuerzo cortante de concreto reforzado, se usan en edificios de varios pisos para reducir los movimientos laterales debidos a las cargas del viento y las excitaciones de los temblores de la tierra. En las estructuras de esfuerzos cortantes en un plano, con esfuerzos relativamente pequeños de flexión, bajo la acción de cargas externas.

1.2.4 Estructuras de flexión

En las estructuras de flexión se desarrollan principalmente esfuerzos normales debido a la acción de fuerzas externas de flexión. En algunas estructuras, los esfuerzos cortantes asociados con los cambios en los momentos flexionantes también pueden ser significativos y deben de considerarse en sus diseños.

Algunas de las estructuras de uso común como las vigas, los armazones rígidos, las losas y las placas, se pueden clasificar como estructuras de flexión. Una viga es un miembro recto que se carga en sentido perpendicular a su eje longitudinal, en ésta el esfuerzo normal varía en forma lineal sobre el ancho de la viga, desde el esfuerzo máximo de compresión en la fibra más alejada del eje neutro en el lado cóncavo de la viga flexionada, hasta el esfuerzo máximo de tensión en la fibra más exterior del lado convexo.

En la práctica se pueden encontrar estas estructuras básicas en forma independiente o, como sucede en la mayoría de los casos, dos o más de ellas formando una sola como en un edificio o puente.

1.2.5 Armaduras

Una *armadura* es un montaje de miembros rectos conectados en sus extremos por conexiones flexibles para formar una configuración rígida [4].

Se cree que un arquitecto italiano, Andrea Palladio (1519-1580) fue quien analizó y construyó las primeras armaduras. Sus extensas notas sobre arquitectura incluyen descripciones detalladas y dibujos de armaduras de madera bastante similares a las usadas actualmente [5].

Una *armadura* consta entonces de elementos rectos conectados en puntos comunes a dos o más elementos llamados nodos. Los miembros de una armadura se unen solamente en sus extremos; es decir, un miembro no puede ser continuo a través de un nodo. Por lo general, los miembros de una armadura son delgados y pueden soportar poca carga lateral, por lo tanto las cargas deben aplicarse sobre los nodos y no directamente sobre los miembros. Se considera que el peso de los elementos de una armadura ésta aplicado sobre los nodos; la mitad del peso del miembro actúa sobre cada uno de los dos nodos correspondientes. Aunque en realidad los miembros se unen con soldaduras o remaches, se supone que se juntan de tal modo que las fuerzas que actúan sobre cada extremo se reducen a una fuerza única, sin dejar lugar a pares de fuerza; por lo tanto, se supone que las únicas fuerzas que se aplican sobre un miembro de una armadura son longitudinales en cada extremo del mismo [6].

Las *armaduras* se usan con mucha frecuencia ya que su peso es ligero y tiene alta resistencia, sus aplicaciones van desde soportar puentes y tejados hasta ser soporte de estructuras espaciales. Las armaduras modernas se construyen al conectar los miembros, que suelen ser fabricados de acero estructural, perfiles de aluminio o puntales de madera.

El estudio de las armaduras, como muchos análisis en ingeniería, puede ser realizado de acuerdo a las dimensiones convenientes según sea el caso, es decir, se pueden representar bidimensionalmente, llamadas Planas, o tridimensionalmente, denominadas espaciales, esto debido a su forma, disposición de sus miembros o carga aplicada. Por lo común, las

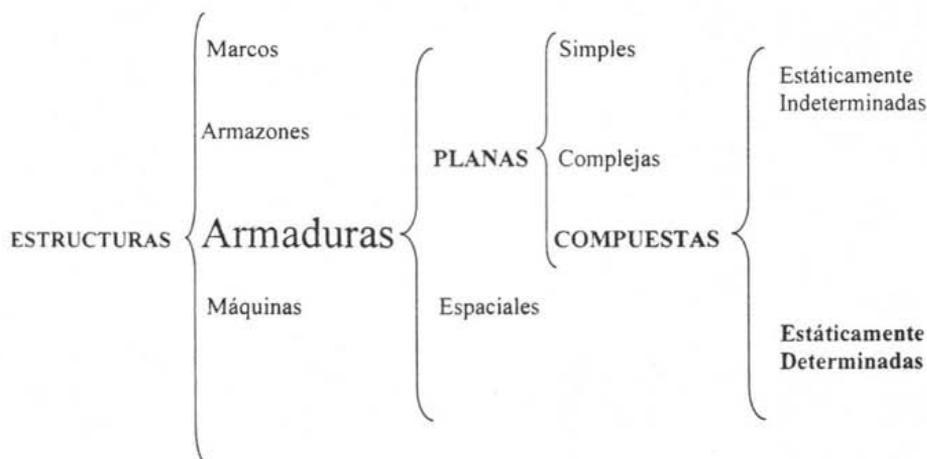
primeras se usan para soportar plataformas de puentes y tejados de edificios, las segundas pueden ser encontradas en torres de transmisión y los domos reticulados.

Para llevar acabo un estudio completo de cualquier armadura se requiere aplicar una parte de la mecánica muy importante: la Estática. Esto se debe a que se supone que la armadura es un cuerpo carente de movimiento. A nivel macroscópico se puede ver sin problema que una estructura no se mueve, pero debe recordarse que toda armadura esta diseñada para recibir cargas y que está compuesta de miembros materiales; por lo tanto, esta propensa a deformarse. La determinación de estas cargas y deformaciones se llama: **análisis estructural**.

Por otro lado, al aplicar las leyes de la Estática es posible encontrar ciertas dificultades en la resolución del sistema estructural; el sistema puede o no tener solución. En general las primeras son llamadas estructuras estáticamente determinadas y las segundas indeterminadas.

Se considera que una armadura es *estáticamente determinada*, si las fuerzas en todos sus miembros, así como todas las reacciones externas, se pueden determinar al usar las ecuaciones de equilibrio, si sucediera lo contrario se dice que es *estáticamente indeterminada*. Además existen también estructuras que ni siquiera son estables, estas son llamadas armaduras inestables. Por lo tanto, es importante antes de realizar un estudio completo verificar si es posible o no estudiar la armadura.

Para facilitar el análisis de las armaduras se puede considerar que todas las armaduras siguen ciertos patrones; por ejemplo, una armadura puede estar compuesta de "n" número de armaduras, llamadas **simples** para formar un conjunto mayor denominadas **compuestas**. Con base en lo anterior es posible llegar a una clasificación enfocada a los propósitos de este estudio resumido en el siguiente esquema.



1.2.5.1 Armaduras planas

a) Elemento básico de una armadura plana

Se puede formar la armadura internamente estable¹ o rígida más sencilla al conectar tres miembros en sus extremos por articulaciones, para formar un triángulo, como es muestra en la Figura 1.1:

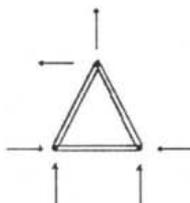


Figura 1.1 Armadura triangular o elemento básico

La armadura triangular es llamada: elemento básico de armadura. Es internamente estable pues es un cuerpo rígido que no cambia su forma bajo las cargas. Por otro lado, una armadura rectangular formada al conectar cuatro miembros en sus extremos por articulaciones (Fig 1.2), como se puede observar, es internamente inestable por que cambia su forma y se aplastará si se sujeta a un sistema general de fuerzas coplanares.

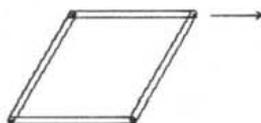


Figura 1.2 Armadura inestable

b) Armaduras simples

Se puede agrandar el elemento básico de armadura al agregar dos nuevos miembros, I y II, a dos de los nodos existentes y al conectarlos para formar un nuevo nodo, como se puede ver en la Figura 1.3:

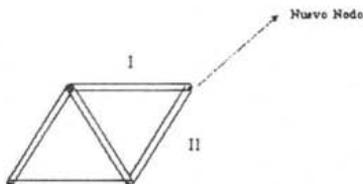


Figura 1.3. Elemento básico agrandado al agregar dos nuevos miembros y formar un nuevo nodo.

¹ Una armadura es internamente estable si cumple: $m \geq 2j - 3$ donde m es el número de elementos y j el número de nodos

Esta nueva armadura agrandada será internamente estable. La armadura se puede agrandar todavía más al repetir el mismo procedimiento tantas veces como se desee, como se muestra en la Figura 1.4

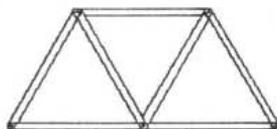


Figura 1.4 Armadura agrandada al agregarle 4 nuevos elementos.

Las armaduras construidas por este procedimiento se llaman armaduras simples. Una armadura simple se forma al agrandar el elemento básico de la armadura, el cual contiene tres miembros y tres nodos, añadiendo dos miembros adicionales por cada nuevo nodo de tal manera que el número total de miembros "m" en una armadura simple se expresa por:

$$m = 3 + 2(j - 3) = 2j - 3 \quad (1)$$

Donde j = número total de nodos, incluyendo aquellos fijados en los apoyos.

c) Armaduras compuestas

Una armadura compuesta se construye al conectar dos o más armaduras simples para formar un solo cuerpo rígido. Para impedir cualquier movimiento relativo entre las armaduras simples, cada armadura debe conectarse a la otra u otras, por medio de conexiones capaces de transmitir por lo menos tres componentes de fuerzas, no siendo todas paralelas ni concurrentes.

d) Armaduras complejas

Las armaduras que no se pueden clasificar como simples ni compuestas se conocen como armaduras complejas.

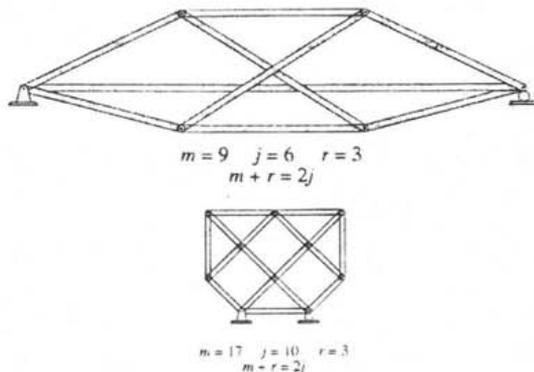


Figura 1.5 Armaduras complejas [4]

1.2.5.2 Armaduras espaciales.

Debido a su forma, disposición de los miembros o cargas aplicadas, las armaduras espaciales no se pueden subdividir en armaduras planas para los fines del análisis y por lo tanto, deben analizarse como estructuras tridimensionales sujetas a sistemas de fuerzas tridimensionales. Para simplificar el análisis de las armaduras espaciales, se supone que los miembros de la armadura están conectados en sus extremos por articulaciones de rotula sin fricción, todas las cargas externas se aplican sólo en los nodos (uniones) y el eje centroidal de cada miembro coincide con la recta que une los centros de los nodos adyacentes. En virtud de estas hipótesis simplificadoras, los miembros de las armaduras espaciales se pueden tratar como miembros con fuerzas axiales aplicadas.

La armadura espacial internamente estable más sencilla se puede formar al conectar seis miembros en sus extremos por medio de articulaciones de rótula para formar un tetraedro.

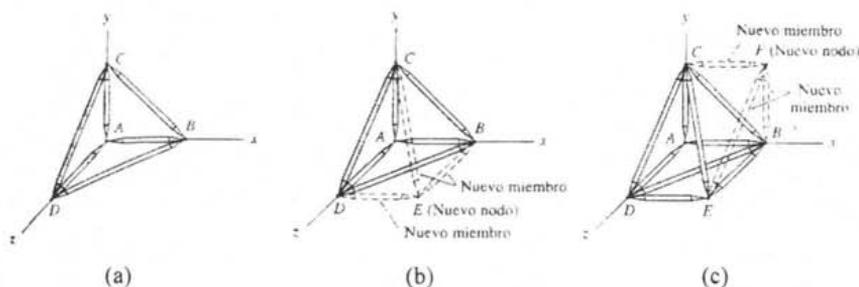


Figura 1.6 Armaduras espaciales [4]

Esta armadura tetraédrica se puede considerar como el elemento básico de la armadura espacial. Debe tenerse en cuenta que este elemento básico de la armadura es internamente estable, en el sentido que es un cuerpo tridimensional rígido que no cambiara su forma bajo una carga tridimensional general aplicada en sus nodos. La armadura básica ABCD de la Figura 1.6 (a) se puede agrandar al sujetar tres nuevos miembros, BE, CE y DE a los tres nodos existentes B, C y D e interconectarlos para formar un nuevo nodo E como se muestra en la Figura 1.6 (b). En tanto que el nuevo nodo E no se encuentre en el plano que contiene los puntos existentes B, C y D, la nueva armadura agrandada será internamente estable. La armadura puede agrandarse todavía más al repetir el mismo procedimiento, tantas veces como se desee. Las armaduras construidas por este procedimiento se denominan armaduras espaciales simples.

Una armadura espacial simple se forma al agrandar el elemento tetraédrico básico, que contiene seis miembros y cuatro nodos, agregando tres miembros adicionales por cada nodo adicional de modo que el número total de miembros m en una armadura espacial simple se expresa como:

$$m = 6 + 3(j-4) = 3j - 6 \quad (2)$$

donde: j = número total de nodos, incluyendo los fijados a los apoyos.

1.2.6 Análisis de armaduras planas

1.2.6.1 Hipótesis para el análisis de armaduras

El análisis de las armaduras suele basarse en las hipótesis simplificadoras siguientes:

1. Todos los miembros están conectados sólo en sus extremos por articulaciones sin fricción (por articulaciones de rótula sin fricción, en las armaduras espaciales).
2. Todas las cargas y reacciones en los apoyos están aplicadas sólo en los nodos.
3. El eje centroidal de cada miembro coincide con la línea que une los centros de los nodos adyacentes.

La razón para establecer estas hipótesis es obtener una armadura ideal, cuyos miembros sólo estén sujetos a fuerzas axiales. Como cada miembro de una armadura ideal está conectado en sus extremos por articulaciones sin fricción, sin cargas aplicadas entre sus extremos, el miembro estará sujeto sólo a dos fuerzas en sus extremos.

Como se muestra en la Figura 1.7 estas fuerzas pueden actuar en sentidos opuestos o en el mismo sentido.

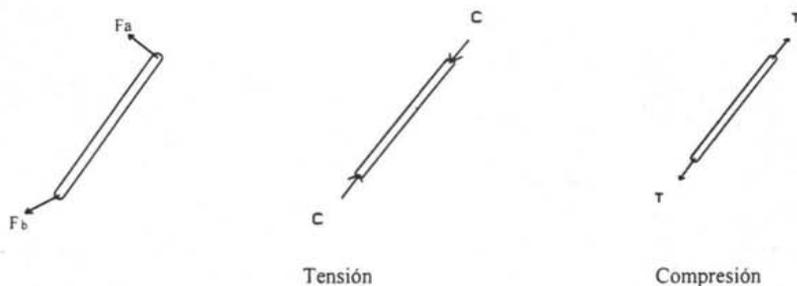


Figura 1.7 Fuerzas en un elemento

Dado que el miembro está en equilibrio, la fuerza resultante y el par resultante de las fuerzas F_a y F_b , T_a y T_b o C_a y C_b , según sea el caso, deben ser cero; es decir, las fuerzas deben satisfacer las tres ecuaciones de equilibrio. A partir de la figura anterior, se puede ver que para que la fuerza resultante de las dos fuerzas sea cero $\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$, estas dos fuerzas deben tener magnitudes iguales pero sentidos opuestos. Para que su par resultante sea igual a cero $\sum M_x = 0$, las dos fuerzas deben de ser colineales; es decir, deben tener la misma línea de acción. Dado que el eje centroidal de cada miembro de la armadura es una recta que coincide con la que conecta los centros de los nodos adyacentes, el miembro no está sujeto a momento flexionante ni a fuerza cortante y está a tensión axial (siendo tensionado o comprimido). Estas fuerzas axiales sobre los miembros, determinadas a partir del análisis de una armadura ideal, se llaman **fuerzas primarias**.

En las armaduras reales, estas idealizaciones casi nunca se llevan a efecto por completo, incluso, algunos de los miembros de la armadura pueden ser continuos en los nodos. Aunque las cargas externas son transmitidas a las armaduras en los nodos por medio de vigas de piso, largueros, etc., los pesos muertos de los miembros se distribuyen a lo largo de sus longitudes. Los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes causadas por estas y

otras desviaciones por lo general se mencionan como fuerzas secundarias. Aunque las fuerzas secundarias no se pueden eliminar, en la mayor parte de las armaduras se pueden reducir de manera apreciable al usar miembros más o menos esbeltos y al diseñar las conexiones de modo que los ejes centroidales de aquellos miembros que encuentran un nodo sean concurrentes en un punto, esto hace que las fuerzas secundarias sean pequeñas en comparación con las primarias y se puedan omitir en sus diseños.

1.2.6.2 Estabilidad interna

Si la resultante de todas las fuerzas que actúan en la armadura es cero, se dice que la armadura se encuentra en equilibrio.

La ecuación (1) expresa el requisito del número mínimo de miembros que en una armadura plana de "j" nodos debe contener, si se espera que sea internamente estable. Si una armadura plana contiene "m" miembros y "j" nodos, entonces si $m < 2j - 3$ la armadura es internamente inestable, mientras que si $m \geq 2j - 3$ la armadura es internamente estable. La estabilidad interna es una condición necesaria pero no suficiente para garantizar esa estabilidad. Una armadura no sólo debe contener miembros suficientes para satisfacer la condición $m \geq 2j - 3$, sino que los miembros también deben estar dispuestos de manera apropiada para garantizar la rigidez de la armadura completa. En una armadura estable cada nodo esta conectado al resto de la estructura por al menos dos miembros no paralelos y cada parte de la armadura debe estar conectada al resto de la misma por conexiones capaces de transmitir al menos tres componentes de fuerzas no paralelas y no concurrentes.

Para la determinación, indeterminación e inestabilidad estáticas de las armaduras planas que contengan "m" miembros y "j" nodos y que estén apoyadas por "r" número de reacciones externas, se necesita calcular el total de "m + r" cantidades desconocidas. Dado que se tienen "j" nodos y se pueden escribir dos ecuaciones de equilibrio, $\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$, para cada uno de ellos, el número total de ecuaciones de equilibrio de las que se dispone es el de "2j". Si el número de incógnitas m + r para una armadura es igual al número de ecuaciones de equilibrio 2j, es decir, "m + r = 2j" pueden determinarse todas las incógnitas al resolver todas las ecuaciones de equilibrio y la armadura es estáticamente determinada.

Si una armadura tiene más incógnitas (m + r) que las ecuaciones de equilibrio de las que se dispone (2j), es decir, "m + r > 2j" no pueden determinarse todas las incógnitas al resolver las ecuaciones de equilibrio de las que se dispone. Se dice que una armadura de este tipo es estáticamente indeterminada. Las armaduras estáticamente indeterminadas tienen más miembros o reacciones externas, o ambas cosas, que los mínimos requeridos para contar con la estabilidad. Los miembros y las reacciones en exceso se dicen que son redundantes y el número de estos miembros y reacciones excedentes se conoce como grado de indeterminación estática, "i" la cual se puede expresar como:

$$i = (m + r) - 2j \quad (3)$$

Si el número de incógnitas m + r para una armadura es menor que el número de ecuaciones de equilibrio de los nodos 2j, esto es: "m + r < 2j", se dice que la armadura es estáticamente inestable. La inestabilidad estática puede deberse a que la armadura tiene menos miembros que el número requerido para contar con la estabilidad interna, o bien, a

un número insuficiente de reacciones externas, o ambas condiciones. Resumiendo se pueden establecer las siguientes condiciones para calificar una armadura:

- a) $m + r > 2j$ armadura estáticamente indeterminada.
- b) $m + r = 2j$ armadura estáticamente determinada.
- c) $m + r < 2j$ armadura estáticamente inestable.

La primera condición para la inestabilidad estática de las armaduras, es tanto necesaria como suficiente en el sentido de que si $m + r < 2j$ se tiene la certidumbre de que la armadura es estáticamente inestable. Sin embargo, las dos condiciones restantes, para la determinación estática $m = 2j - r$ y la indeterminación $m > 2j - r$, son condiciones necesarias pero no suficientes. Por lo tanto, estas dos ecuaciones sencillamente expresan que el número de miembros y de reacciones es suficiente para tener estabilidad, pero no dan información referente a su disposición. Una armadura puede tener un número suficiente de miembros y de reacciones externas, pero todavía puede ser inestable debido a una disposición inapropiada de los miembros o de los apoyos externos, o de ambos.

1.2.6.3 Fuerzas cero

Dentro del análisis de armaduras pueden existir miembros que tengan fuerzas igual a cero, por que las armaduras suelen diseñarse para soportar varias condiciones diferentes de carga. Se puede facilitar el análisis de las armaduras si se pueden identificar los miembros de fuerza cero por inspección. Dos tipos comunes de disposiciones de los miembros que dan por resultado miembros de fuerza cero son las siguientes:

1. Si sólo se conectan los miembros no colineales a un nodo que no tiene cargas o reacciones externas aplicadas a él, entonces la fuerza en los dos miembros es cero como se muestra en la Figura 1.8^a.
2. Si se conectan tres miembros, dos de los cuales son colineales, a un nodo que no tiene cargas o reacciones externas aplicadas a él, entonces la fuerza en el miembro que no es colineal es cero, ver Figura 1.8b.

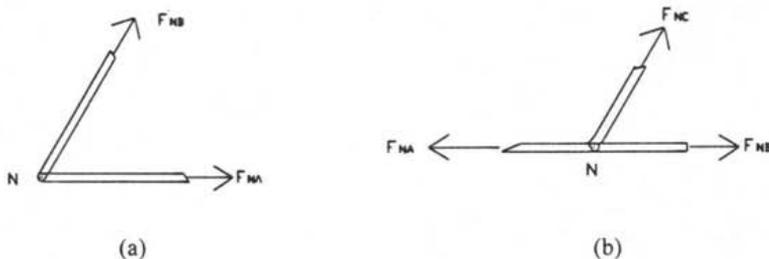


Figura 1.8 Elementos con fuera cero

1.2.7 Análisis en armaduras espaciales

1.2.7.1 Reacciones

El número y direcciones de las fuerzas de reacción que un apoyo puede ejercer sobre la armadura dependen del número y direcciones de las traslaciones que impide. Para que una estructura espacial internamente estable esté en equilibrio bajo un sistema general de fuerzas tridimensionales, debe estar apoyada al menos por seis reacciones que satisfagan las seis ecuaciones de equilibrio: $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum F_z = 0$, $\sum M_x = 0$, $\sum M_y = 0$, $\sum M_z = 0$

En virtud de que sólo se tienen seis ecuaciones de equilibrio, no se pueden usar para determinar más de seis reacciones. Por consiguiente, una estructura espacial internamente estable que sea estáticamente determinada externamente debe estar apoyada por seis reacciones. Si una estructura espacial está apoyada por más de seis reacciones, entonces todas esas reacciones no se pueden determinar a partir de las seis ecuaciones de equilibrio y se dice que una estructura de este tipo es estáticamente indeterminada externamente. Inversamente, si una estructura espacial está apoyada por menos de seis reacciones, éstas no son suficientes para impedir todos los movimientos posibles de la estructura en el espacio tridimensional y se dice que la estructura de este tipo es estáticamente inestable externamente. Considerando lo anterior, se tienen los siguientes criterios para calificar a las armaduras espaciales:

- a) $r < 6$ la estructura espacial es estáticamente inestable externamente
- b) $r = 6$ la estructura espacial es estáticamente determinada externamente
- c) $r > 6$ la estructura espacial es estáticamente indeterminada externamente

Donde: r = número de reacciones.

Como en el caso de las estructuras planas, las condiciones para la determinación e indeterminación estáticas son necesarias, pero no suficientes. Para que una estructura espacial sea geoméricamente estable externamente, las reacciones deben estar dispuestas apropiadamente de modo que puedan impedir las traslaciones en las direcciones de cada uno de los tres ejes de coordenadas, así como las rotaciones en torno a cada uno de ellos. Por ejemplo, si las líneas de acción de todas las reacciones de las estructuras espaciales fueran paralelas o se intersecan con un eje común, la estructura sería geoméricamente inestable.

1.2.7.2 Determinación, indeterminación e inestabilidad estática

Si una estructura espacial contiene m miembros y está apoyada por r reacciones externas; entonces, para su análisis se necesita determinar un total de $m + r$ fuerzas desconocidas. Puesto que la armadura está en equilibrio, cada uno de sus nodos también debe estar en equilibrio. En cada nodo, las fuerzas internas y externas forman un sistema de fuerzas concurrentes tridimensionales que deben satisfacer las tres ecuaciones de equilibrio: $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum F_z = 0$. Por lo tanto, si la armadura contiene j nodos, el número total de ecuaciones de equilibrio de las que dispone es $3j$ luego si $m + r = 3j$, se pueden determinar todas las incógnitas al resolver las $3j$ ecuaciones de equilibrio y la armadura es estáticamente determinada.

Las armaduras espaciales que contienen más incógnitas que las ecuaciones de equilibrio de las que se dispone $m + r > 3j$ son estáticamente indeterminadas y aquellas con menos incógnitas que las ecuaciones de equilibrio $m + r < 3j$ son estáticamente inestables. Por consiguiente, las condiciones de inestabilidad, determinación e indeterminación estáticas de las armaduras espaciales se pueden resumir del modo siguiente:

- a) $m + r < 3j$ armadura espacial estáticamente inestable
- b) $m + r = 3j$ armadura espacial estáticamente determinada
- c) $m + r > 3j$ armadura espacial estáticamente indeterminada

Para que los criterios en relación con la determinación e indeterminación estáticas sean válidos, la armadura debe ser estable y actuar como un solo cuerpo rígido bajo un sistema general tridimensional de cargas, cuando se separa de los apoyos.

1.2.7.3 Fuerzas cero

El análisis de las armaduras espaciales se puede facilitar por la identificación y por inspección de los miembros de fuerza cero. Dos tipos de disposiciones de los miembros, que dan por resultado miembros de fuerza cero, son las siguientes Figura 1.9:

1. Si todos los miembros conectados a un nodo, con la excepción de uno, se encuentran en un solo plano y no están aplicadas cargas o reacciones externas a ese nodo, entonces la fuerza en el miembro que no es coplanar es cero.
2. Si todos los miembros conectados a un nodo, excepto dos, tienen fuerzas cero y no están aplicadas cargas o reacciones externas a ese nodo; entonces, a menos que los dos miembros restantes sean colineales, la fuerza en cada uno de ellos también es cero.

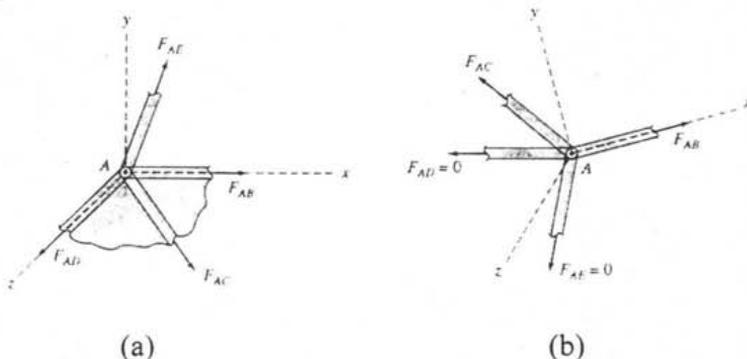


Figura 1.9 fuerzas cero en armaduras espaciales. [4]

1.2.8 Métodos convencionales para el cálculo de reacciones en armaduras

Existen gran variedad de métodos para calcular fuerzas y reacciones en armaduras y pueden clasificarse de diferentes formas:

Atendiendo a su análisis [7]:

Simples:

- Cinemáticamente: Analizables por las reglas de unión de dos y tres discos.
- Estáticamente: analizables por los métodos conocidos por la estática

Compuestas:

- Las construidas por dos o más simples

Complejas:

- Todas las demás

Análisis cuantitativo

Existen varios métodos para determinar las fuerzas axiales en las barras de una armadura isostática simple, los más importantes son los siguientes:

- Analíticos: método de los nodos, método de las secciones
- Gráficos: método de Maxwell-Cremona y el método de Culmann.
- Analítico-gráfico: método de los trabajos virtuales
- Métodos matriciales

A pesar de que se tiene gran variedad de formas de resolver una armadura, se encuentran ciertos métodos ampliamente utilizados, por su sencillez y facilidad de aplicación, denominados clásicos. De los cuales se presentan dos de los llamados analíticos, por que son los que comúnmente se encuentran en los libros básicos de análisis estático de armaduras. Dichos métodos son: nodos y secciones.

1.2.8.1 Método de los nodos

En este método, se determinan las fuerzas axiales en los miembros de una armadura estáticamente determinada al considerar el equilibrio de sus nodos. Como la armadura completa está en equilibrio, cada uno de sus nodos también debe estarlo. En cada nodo de la armadura, las fuerzas de los miembros y cuales quiera cargas y reacciones aplicadas forman un sistema de fuerzas concurrentes y coplanares, las cuales deben satisfacer dos ecuaciones de equilibrio, $\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$, para que ese nodo esté en equilibrio. Estas dos ecuaciones de equilibrio se deben satisfacer en cada nodo de la armadura. Sólo se tienen dos ecuaciones de equilibrio en un nodo; de modo que, no se pueden usar para determinar más de dos fuerzas desconocidas. El método de los nodos consiste en seleccionar un nodo con no más de dos fuerzas desconocidas, no colineales, que actúen sobre él y aplicar las fuerzas de equilibrio con el fin de determinar esas dos fuerzas desconocidas. El procedimiento se puede repetir hasta que se hayan obtenido todas las fuerzas deseadas. Es posible determinar las fuerzas desconocidas en los miembros y las reacciones a partir de las ecuaciones de equilibrio de los nodos, pero en muchas armaduras puede no ser posible hallar un nodo con dos o menos incógnitas; por lo que, para iniciar el análisis es necesario conocer las reacciones. En esos casos las reacciones se calculan al usar las ecuaciones de equilibrio y de condición, si existen, para la armadura completa, antes de proceder con el método de los nodos para determinar las fuerzas en los miembros.

Teniendo cada nodo con no más de dos incógnitas, y como se conocen las fuerzas en los miembros, se suponen de manera arbitraria el sentido de las fuerzas axiales, tensión o compresión, en los miembros realizando uno o más diagramas de cuerpo libre. En el diagrama de cuerpo libre de los nodos, deben de mostrarse las fuerzas en los miembros en direcciones puestas a las que tienen sobre los extremos de esos miembros de acuerdo con la tercera ley de Newton. Por lo regular, al analizar una armadura suelen omitirse los diagramas de cuerpo libre de los miembros y sólo se dibujan los de los nodos, de modo que es importante entender que una fuerza axial de tensión en un miembro siempre se indica en el nodo por una flecha que tira hacia fuera de este y que una fuerza de compresión en un miembro siempre se indica por una flecha que empuja hacia el nodo.

1.2.8.2 Método de las secciones

El método de los nodos es muy eficiente cuando se deben determinar las fuerzas en todos los miembros de una armadura; sin embargo, si sólo se desean las fuerzas en ciertos miembros, el método de los nodos no es el más rápido, porque puede comprender el cálculo de fuerzas en varios otros miembros de la armadura, antes que se alcance el nodo para encontrar la fuerza deseada en un miembro. El método de las secciones nos permite determinar en forma directa las fuerzas en los miembros específicos, sin que se calculen en primer lugar muchas fuerzas innecesarias en los miembros, como puede requerirse por el método de los nodos. El método de las secciones consiste en dividir la armadura en dos partes, al pasar una sección imaginaria a través de los miembros cuyas fuerzas se desean conocer. Entonces se determinan las fuerzas deseadas en los miembros al considerar el equilibrio de una de las dos partes de la armadura. Cada parte de la armadura se trata como un cuerpo rígido en equilibrio, bajo la acción de cuales quiera cargas y reacciones aplicadas y las fuerzas en los miembros que han sido cortados por la sección. Las fuerzas desconocidas en los miembros se determinan al aplicar las tres ecuaciones de equilibrio a una de las dos partes de la armadura. Sólo se tienen tres ecuaciones de equilibrio disponibles, de modo que no se pueden usar para determinar más de tres fuerzas desconocidas; por lo tanto, deben de elegirse las secciones de modo que no pasen más de tres miembros con fuerzas desconocidas. En algunas armaduras, la disposición de los miembros puede ser tal que al utilizar secciones que pasen a través de más de tres miembros con fuerzas desconocidas, se puede determinar una o, cuando más, dos de estas fuerzas desconocidas. Dichas secciones se emplean en el análisis de sólo ciertos tipos de armaduras.

1.2.8.3 Métodos avanzados

Durante las últimas décadas han ocurrido grandes cambios en los métodos de análisis estructural usados en la práctica de la ingeniería. Los métodos analíticos anteriormente señalados son clásicos en el análisis de equilibrio de una armadura; sin embargo, tienen limitantes, por lo que actualmente se han buscado otras alternativas de solución, ya que hoy día se realizan armaduras más complejas y el analizarlas con estos métodos sería una labor demasiado tediosa. La búsqueda de nuevos métodos de solución para armaduras empezó con el avance de una herramienta poderosa como la computadora y ha sido motivada por el uso cada vez más frecuente de armaduras complejas. Cabe destacar que el empleo de la computadora para el análisis de armaduras es cada vez mayor, por lo que, actualmente se ha acelerado esta tendencia.

Aunque la computadora podía realizar cálculos que llevan horas en segundos, la programación de las fórmulas para calcular las fuerzas en la armadura resulta aún laborioso. Una solución que encontraron los programadores fue la representación matricial, que es mucho más manejable y amigable al momento de trabajar con programas computacionales, reduciendo tiempos. Por esta razón fueron creados diferentes métodos llamados matriciales, en los cuales solamente hay que transformar las ecuaciones empleadas a una representación alternativa, la matricial o mas generalmente en forma tensorial. [8]

El análisis de armaduras por computadora no implica la adición de conceptos nuevos de ingeniería estructural; sin embargo, es preciso tener cuidado en el manejo de ellas ya que la computadora es capaz de realizar operaciones aritméticas en forma extraordinaria, pero sólo puede efectuar aquellas que sean descritas por medio de instrucciones simples, precisas y sin ambigüedades. Es decir, se necesita estar conciente de lo que se va a obtener y de los posibles errores que se pudieran cometer, pues la computadora sólo lista sus resultados lógicos o no para su aplicación, así que la función del ingeniero en esta parte será la de toma de decisión en el momento de evaluar los resultados, en base a su experiencia, conocimientos y metas en el proyecto.

1.2.8.3 Método tensorial

➤ Tensor

Matemáticamente [9], un tensor es una transformación (T) lineal de un espacio vectorial (V) en el mismo es decir:

$$T : V \rightarrow V$$

Así mismo, una función (transformación) lineal es aquella que cumple con lo siguiente:

$$f(\alpha x_1 + \beta x_2) = \alpha f(x_1) + \beta f(x_2) \quad (4)$$

donde:

α, β son escalares

x_1, x_2 son elementos del dominio de la función.

Los tensores, aparecieron originalmente en las derivadas de funciones, tales como los campos, aunque posteriormente han sido encontrados en una gran cantidad de problemas como: sistemas de ecuaciones, deformaciones del espacio geométrico, simetrías, etc. A partir del hecho de que los tensores representan derivadas de campos (escalares, vectoriales, tensoriales) es común definir los tensores según su orden. En dicha clasificación, se dice que un escalar es un tensor de orden cero, un vector es un vector de orden 1, una matriz es uno de orden 2, etc. Dicha forma de clasificar a los tensores, proviene de la existencia de un isomorfismo entre las matrices cuadradas y los tensores así como del número de elementos necesarios para definirlos [10]. Existe una regla simple para calcular el número de elementos necesarios para describir un tensor a partir de su orden o rango [11]. Dicha regla establece que los tensores pueden ser definidos en una base 3 y se clasifican por orden según el exponente que tenga, es decir:

$$3^r = n \quad (5)$$

donde: 3 es la base

r = el orden o rango del tensor

n = número de elementos necesarios para describirlo.

Considerando lo anterior se tiene que:

Un tensor de orden cero se define por un solo elemento, ya que: $3^0 = 1$; uno de orden uno se define con 3 elementos, ya que: $3^1 = 3$; uno de orden 2 requiere 9 elementos puesto que:

$3^2 = 9$ y uno de orden 4 requiere 81, ya que: $3^4 = 81$.

Por otro lado, en física los tensores son ampliamente utilizados debido a que es necesario describir matemáticamente una serie de cantidades diferentes. De hecho existen cantidades escalares (temperatura, la densidad, etc.), vectoriales (fuerza, la velocidad, la aceleración, etc.) y tensoriales (esfuerzos, propiedades de materiales anisótropos, etc.) que pueden ser representadas con tensores de distinto orden como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Clasificación de los tensores por orden o rango, representación matemática y algunas representaciones físicas.

Orden	No de elementos necesarios para describirlo	Representación matemática	Cantidades físicas que puede representar
Cero	1	Escalar (a)	Masa, energía, potencia, temperatura, densidad, etc
Uno	3	Vector (a_i)	velocidad, fuerza, etc
Dos	9	Matriz cuadrada de 3x3 (A_{ij})	Esfuerzo, deformación, etc.
Cuatro	81	Arreglo espacial (M_{ijkl})	Tensor de constantes: elásticas, propiedades dieléctricas, conductividad térmica, etc. En general propiedades de materiales anisótropos

➤ Tensor de transformación

Una aplicación común de los tensores es el denominado cambio de base, obtenido a partir de un tensor de transformación, es decir, dados dos sistemas coordenados X_1, X_2, X_3 y X'_1, X'_2, X'_3 , no necesariamente ortonormales, con un origen común "O" podemos pasar de un sistema a otro. El caso más simple del cambio de coordenadas mediante la aplicación de un tensor de transformación es de dos bases ortonormales que comparten el mismo origen y un eje respecto al cual, una de las bases se encuentra rotada rigidamente, un ángulo θ , como se muestra en la Figura 1.10.

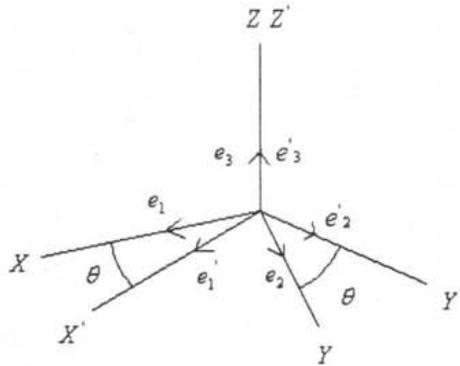


Figura 1.10 Sistemas de ejes coordenados con un mismo origen "O" y un eje coincidente

Para cambiar las coordenadas de un punto, y de su vector de posición, se recurre a la ecuación propuesta por Granero [10] la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\{u\}_{x'y'z'} = A_{xyz \rightarrow x'y'z'} \{u\}_{xyz} \quad (6)$$

Donde:

$\{u\}_{x'y'z'}$ Son las componentes del vector u en el sistema $x' y' z'$

$\{u\}_{xyz}$ Son las componentes del vector u en el sistema $x y z$

$A_{xyz \rightarrow x'y'z'}$ Es el tensor que transforma las componentes de vector $\{u\}_{x'y'z'}$ en $\{u\}_{xyz}$

Según Granero, las columnas de $A_{xyz \rightarrow x'y'z'}$ son las componentes de los vectores de la base $x' y' z'$ referidas al sistema xyz es decir:

$$A_{xyz \rightarrow x'y'z'} = \left(\{e_1\}_{xyz} \{e_2\}_{xyz} \{e_3\}_{xyz} \right) \quad (7)$$

La ecuación (6) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\{u\}_{xyz} = \left(A_{xyz \rightarrow x'y'z'} \right)^{-1} \{u\}_{x'y'z'}$$

Donde:

$$\left(A_{xyz \rightarrow x'y'z'} \right)^{-1} = A_{x'y'z' \rightarrow xyz} = \left(\{e_1\}_{x'y'z'} \{e_2\}_{x'y'z'} \{e_3\}_{x'y'z'} \right)$$

En la Figura 1.10, se ve que:

$$\{e_1\}_{xyz} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\{e_2\}_{xyz} = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\{e_3\}_{xyz} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto:

$$A_{x'yz \rightarrow xyz} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Claramente se ve que el tensor que se obtiene es una rotación rígida respecto a "z", lo cual era de esperarse. En la sección de resultados, del presente trabajo, se aplica este método para calcular las reacciones en los elementos de la armadura diseñada. Cabe destacar que en dicho caso la base xyz es ortonormal, mientras que la x'y'z' no lo es. No obstante dicha diferencia con el caso presentado en la presente sección, el método aplica y como se verá posteriormente ofrece ventajas respecto a los métodos de solución de armaduras típicamente empleados.

1.3 Tipos de Cargas

La finalidad principal de un elemento estructural es soportar las cargas aplicadas y transmitir las a todos los elementos o a la tierra. Dentro de los análisis estáticos, dinámicos, etc. Encontramos fuerzas las cuales actúan sobre el cuerpo o elemento que se está analizando. Las cargas a las que puede estar sometida una estructura son llamadas:

- a) muertas
- b) vivas
- c) ambientales

También las cargas se pueden dividir según los siguientes criterios:

- a) Dependiendo de la forma en que son aplicadas sobre el elemento mecánico, por ejemplo: se denominan **concentradas** cuando la superficie de aplicación de las mismas es pequeña en relación a la superficie del elemento y **Distribuidas**, uniforme o no uniformemente a lo

largo del elemento, cuando la superficie en que son aplicadas cubre buena parte de la frontera del elemento.

b) Dependiendo de su posición en el espacio pueden ser: **Fijas** cuando no cambian de posición durante la vida de la estructura, como es el caso de las cargas muertas y **Móviles** cuando su posición varía con el tiempo.

c) Cuando su magnitud varía en el tiempo se denominan: **Estáticas**, cuando su magnitud varía poco con el tiempo y se aplican lentamente y **Dinámicas** cuando su magnitud cambia constantemente en el tiempo, como es el caso de las fuerzas centrífugas que se originan en los motores, de las fuerzas sísmicas, etc.

Otro tipo de cargas son las que se deben al cambio de temperatura, movimientos de apoyo y/o desajustes en los elementos prefabricados, las generadas por movimientos telúricos, algunas presiones de suelo, etc. Hay que tomar en cuenta que tales cargas no son independientes entre sí, por lo que es posible encontrar una sola de ellas o combinadas. Por ejemplo, ¿qué pasaría si la estructura fuera diseñada para trabajar en el fondo del mar?. En este caso el agua podría comportarse en ciertos casos como carga muerta, marea tranquila, o como carga viva (marea torrencial). En análisis de compuertas para presas sumergidas, parcial o totalmente, se considera principalmente la presión hidrostática, la cual actúa siempre normal a la superficie variando su magnitud en forma lineal con la altura.

1.3.1 Cargas muertas

Estas cargas son debidas al propio peso de la armadura y por otras cargas que están permanentemente unidas a ella, por lo tanto, son de magnitudes constantes y posiciones fijas. En la tabla 1.2 se dan algunos pesos de algunos materiales comunes en construcción de estructuras [4].

Tabla 1.2 Relación de pesos específicos para diferentes materiales empleados para la fabricación de armaduras.

Material	Peso Especifico	
	lbf/ft ³	KN/m ³
Aluminio	165	25.9
Ladrillo	120	18.8
Acero estructural	490	77
Concreto reforzado	150	23.6
Madera	40	6.3

1.3.2 Cargas vivas

Son aquellas cuyas magnitudes y/o posiciones varían por causa del uso de la estructura. La posición de la carga viva puede cambiar de modo que cada miembro de la armadura debe diseñarse para la posición de la carga que causa el esfuerzo máximo en ese miembro. Los diferentes miembros de la armadura pueden alcanzar sus niveles máximos de esfuerzo en diferentes posiciones de la carga dada. Por ejemplo, conforme un camión se mueve a través de un puente de armadura, los esfuerzos de los miembros de esa armadura varían al cambiar la posición del camión. Si un miembro queda sujeto a su esfuerzo máximo, cuando el camión está en cierta posición, entonces otro miembro alejado del primero puede alcanzar su nivel máximo de esfuerzo cuando el camión está en una posición diferente sobre el puente.

Cuando se aplican cargas vivas con rapidez a una estructura, causan esfuerzos más grandes que los que se producirían si las mismas cargas se hubieran aplicado en forma gradual. Al efecto dinámico de la carga que causa este incremento en la estructura se le denomina impacto.

1.3.3 Cargas ambientales

Como su nombre lo indica, estas cargas se deben al ambiente que rodea a la armadura. La importancia de estas es menor para la mayoría de los casos en la Ciudad de México ya que muchos equipos son diseñados para trabajar en ambientes externos favorables, desde el punto de vista de cargas ambientales; sin embargo, la ciudad es una zona con alto grado de sismicidad, lo cual no debe ser omitido por los diseñadores para evitar catástrofes como en 1985.

Algunas de las cargas consideradas en esta clasificación se encuentran:

- a) Las cargas del viento, donde se toma en consideración la altura, la ciudad, si es terreno abierto o cerrado, si es zona costera considerando los huracanes, etc.
- b) Cargas de nieve, consideradas en países donde es común este fenómeno natural. Estas cargas son muy parecidas a las del viento ya que dependen de la localización geográfica.
- c) Cargas de lluvia. Aunque las cargas de nieve presentan un problema más severo que las cargas por la lluvia en los techos inclinados, la situación puede invertirse en los techos horizontales; particularmente en climas cálidos. Si el agua sobre un techo se acumula más rápidamente de lo que puede ser drenada, el resultado se denomina encharcamiento; la carga incrementada sobre el techo deflexiona a este dándole la forma de un plato que puede contener más agua que a su vez ocasiona mayores deflexiones. Este proceso se repite hasta que se excede el equilibrio y la estructura se desploma.

1.4 Métodos de aplicación y medición de cargas

Los aparatos para medir la fuerza se fabrican en gran variedad de tipos clasificándose, según el método aplicado, en tres grupos principales [12]:

1. mecánicos
2. hidráulicos y neumáticos
3. eléctricos

1.4.1 Métodos mecánicos

1.4.1.1 Palanca simple

La palanca simple proporciona un dispositivo de medición de fuerza por igualación de momentos. Una fuerza desconocida que actúe en un extremo de una palanca apoyada sobre un pivote, puede equilibrarse aplicando una fuerza conocida en el otro extremo. Cuando la palanca esté en equilibrio, serán iguales los momentos de las dos fuerzas con relación al pivote, así puede calcularse fácilmente la fuerza desconocida partiendo de la relación de brazos de palanca y de la fuerza conocida Figura 1.11

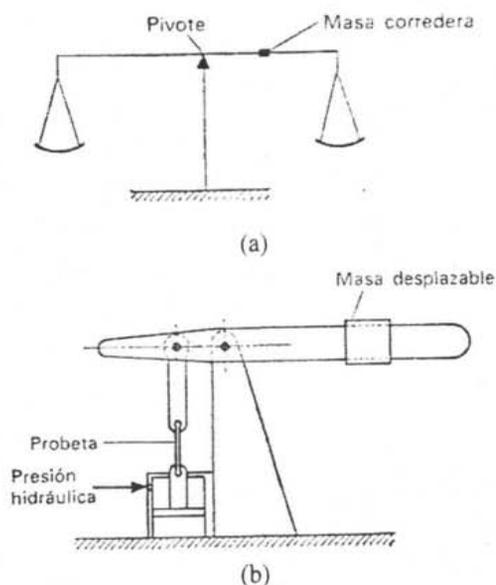


Figura 1.11 [12]

(a) Balanza de química

(b) Máquina de ensayos de tracción, tipo palanca

1.4.1.2 Palanca compuesta

La palanca simple puede convertirse en compuesta introduciendo una serie de pivotes de apoyo y palancas adicionales. Resulta por tanto, una máquina mas compacta que es capaz de ejercer mayores cargas, pudiendo este principio aplicarse a un cierto numero de máquinas de ensayo Figura 1.12.

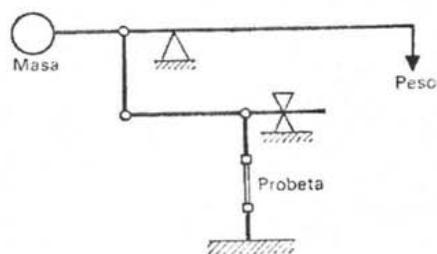


Figura 1.12 Máquina de ensayos tipo palanca compuesta [12]

1.4.1.3 Péndulo

Muchas máquinas de ensayo de materiales de baja resistencia tales como: alambre, plástico o fibra, llevan incorporado un péndulo simple. Una máquina típica es similar a la máquina de ensayos con romana pero ésta, es sustituida por un péndulo. La carga puede aplicarse mediante un tornillo o un motor consiguiendo así que el péndulo ascienda a lo largo de una escala cuadrante Figura 1.13.

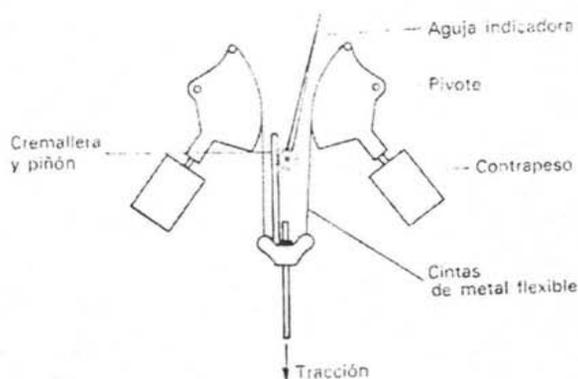


Figura 1.13 Balanza de lectura directa que utiliza el principio del péndulo simple [12]

1.4.1.4 Resorte y aro de prueba

Si se aplica una fuerza a un cuerpo elástico tal como un resorte o una barra de acero, este cuerpo se deformará. Siempre que la fuerza no sea excesiva, puede medirse la deformación elástica de la barra o resorte, y esta deformación es proporcional a la fuerza aplicada.

El aro de prueba es un anillo del que se conocen las dimensiones físicas y las propiedades mecánicas. Una fuerza externa de tracción o de compresión aplicada en el sentido diametral al aro, provoca una deformación que es proporcional a la fuerza. La magnitud de la deformación puede medirse mediante un comparador, micrómetro o indicador de deformación. Figura 1.14.

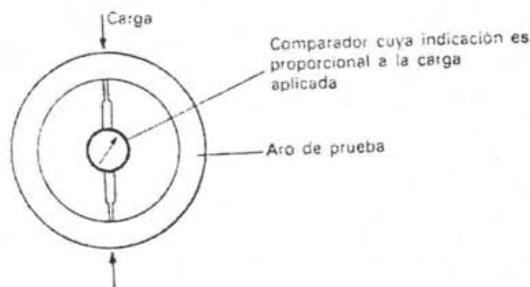
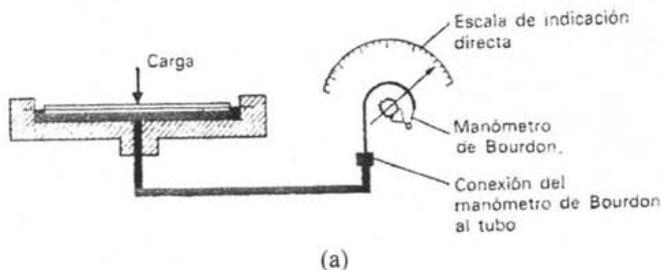


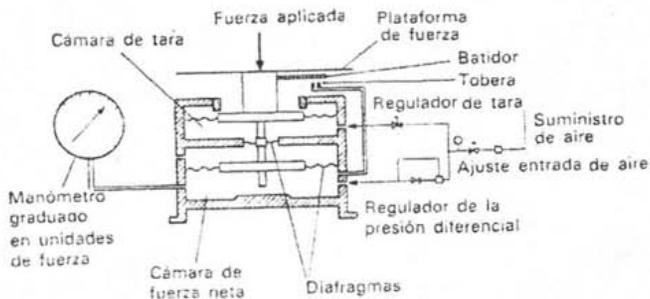
Figura 1.14 Aro de carga [12]

1.4.2 Métodos hidráulicos y neumáticos

La presión hidráulica puede utilizarse para medir fuerza, Figura 1.14a. Se conecta una cámara o capsula con un diafragma que contiene aceite, a un tubo de Bourdon o cualquier otro dispositivo adecuado de medición de presión. Cuando se aplica una fuerza al diafragma, se desarrolla en la cámara una presión igual a la fuerza aplicada dividida por la superficie efectiva del diafragma. Esta presión indica el manómetro de Bourdon, el cual puede estar directamente calibrado en unidades de fuerza. Este aparato es similar al instrumento de prueba de presión del tipo de peso muerto.

En la figura Figura 1.14b se muestra una cámara neumática en la que se utiliza aire a presión para medir la fuerza. Este dispositivo es similar al aparato neumático convencional que funciona según el principio de equilibrio de fuerzas y que emplea una tobera y un batidor. El peso de la plataforma sobre la que se aplica la fuerza y de los otros elementos, cuando no actúa fuerza exterior alguna, se equilibra ajustando la presión en la cámara de tara. Cuando se aplica una fuerza externa, el batidor se acercara a la tobera, reduciendo así el paso de aire desde ésta a la atmósfera. De esta manera, la presión en la cámara de fuerza neta se incrementará a medida que aumente la fuerza exterior, siendo esta presión directamente proporcional a la fuerza aplicada. La fuerza puede medirse adecuadamente usando un manómetro de Bourdon con la escala calibrada en unidades de fuerza. Figura 1.15.





(b)

Figura 1.15 [12]

(a) Cámara de carga hidráulica

(b) Cámara de carga neumática

1.4.3 Métodos eléctricos

La Figura 1.16 representa un transductor de fuerza con indicadores de deformación.

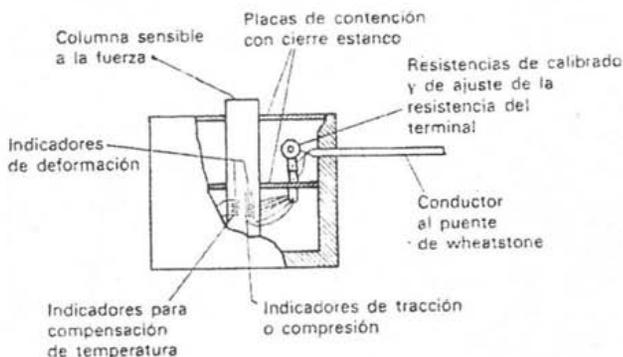


Figura 1.16 Transductor de fuerza con indicadores de deformación [12]

En este sistema, una columna de acero de dimensiones convenientes para proporcionar la deformación deseada en virtud de una carga conocida, es estirada, o bien comprimida por dicha carga. Los indicadores de deformación van unidos a la columna, alternándose la resistencia eléctrica de acuerdo con la carga; por otra parte, van conectados a los brazos apropiados de un puente de Wheatstone el cual se equilibra antes de aplicar la fuerza a la columna; así, la tensión que se produce en la cámara de carga al aplicar una fuerza, transforma el equilibrio del puente, el cual indica la magnitud de la fuerza sobre una escala graduada en unidades adecuadas. Existen dos métodos eléctricos más recientes de medición de fuerzas, que son: el presductor y el de equilibrio de fuerzas electromagnéticas.

El presductor se basa en el principio de que cuando se aplica una fuerza a un material, por ejemplo un soporte de acero, se origina una tensión interna en este cuerpo. Si se establece

un campo magnético, esta tensión alterara la distribución de flujo magnético en el interior de la pieza. Figura 1.17.

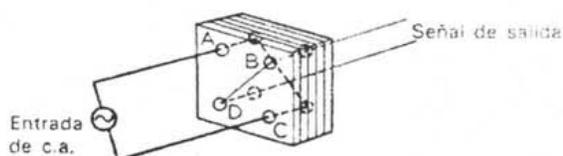


Figura 1.17. Presductor [12]

El presductor consiste en un bloque de láminas unidas, con cuatro agujeros que atraviesan todo el espesor. Se hace pasar un alambre por un orificio, diagonalmente a través del dorso de las láminas, retornando al anverso por otro agujero. Este conductor se alimenta con corriente alterna. Por los otros dos orificios en diagonal se hace pasar luego otro conductor que va conectado a un circuito con los instrumentos adecuados. Siempre que no se aplique tensión al bloque, se establece un flujo magnético asimétrico en su interior y no se introduce voltaje en el conductor de salida. Al aplicar una alteración del flujo interior, induciéndose un voltaje en el conductor de salida, el cual es proporcional a la fuerza aplicada en el bloque. Este tipo de instrumento puede utilizarse normalmente para la medición de fuerzas hasta 220 N y más.

Cuando se miden fuerzas menores de 10 N, puede hacerse uso del principio de equilibrio de la fuerza electromagnética. Si se aplica una fuerza que desvía la bobina móvil desde su posición de cero, se transmite una señal desde el detector capacitivo al amplificador. Éste transmite una corriente proporcional a esta señal, que es suficiente para producir una fuerza de restitución sobre la bobina, la cual queda así situada en un campo magnético estable. Esta corriente de restitución es proporcional a la fuerza de desviación.

1.5 Métodos de medición de deformación

Para poder obtener el estado de esfuerzos en un cierto plano de un material bajo condiciones específicas, es necesario hacerlo de forma indirecta, ya que el esfuerzo no es una cantidad palpable realmente. Para lograr esto se hace uso de desplazamientos medidos respecto a distancias entre puntos, las cuales varían cuando aplicamos fuerzas a algún elemento mecánico. El estado de deformaciones está caracterizado por relacionarse con los desplazamientos por medio de seis ecuaciones:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \quad (9)$$

Y los esfuerzos son relacionados con las deformaciones por medio de la ley generalizada de Hooke.

La opción más viable para realizar lo anterior son las galgas extensométricas o extensómetros, comúnmente conocidos como strain-gage.

Existen cuatro tipos de ellas [13]:

1. mecánicas
2. eléctricas
3. ópticas
4. acústicas

1.5.1 Galgas extensométricas mecánicas

El extensómetro de Berry, Figura 1.18, es un ejemplo mecánico de extensómetro, se usa para aplicaciones estructurales en obras públicas bajo condiciones de deformación aproximadamente lineal, con longitudes de calibrado de hasta 200 mm. Una característica interesante de este instrumento se refiere al husillo del pivote, el cual está Cinemáticamente situado y cargado mediante resorte, lo que elimina la holgura en el cojinete.

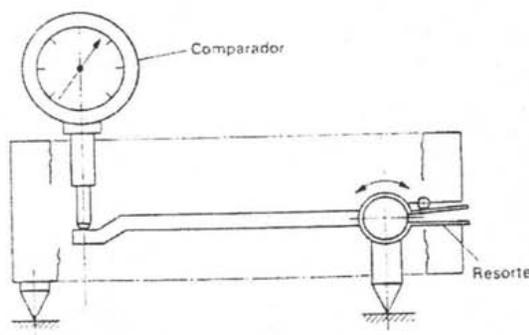


Figura 1.18 Extensómetro de Berry [12]

El aparato de Huggenberger, Figura 1.19, es otro extensómetro mecánico bien conocido del que existen diferentes modelos, siendo el de mayor aplicación, capaz de trabajar con longitudes de calibrado entre 12 y 25 mm, aproximadamente. Este aparato se apoya totalmente sobre pivotes de arista de cuchillo, con rozamiento muy reducido y si se desea, puede reajustarse a cero después de cada lectura de alargamiento. Es posible tener ampliaciones de hasta 2000, lo cual depende del tipo utilizado.

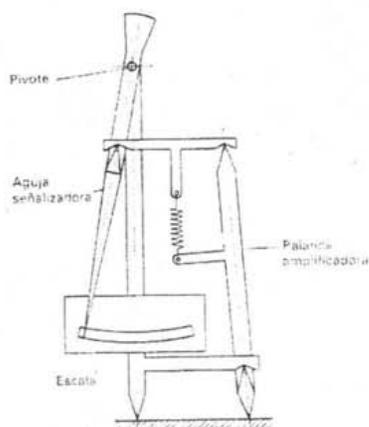


Figura 1.19 Extensómetro de Huggenberger [12]

Existen extensómetros basados en el principio de Johanssón; en el cual se usa una cinta de metal enroscada, sometida a torsión a la que se une en el centro una ligera aguja indicadora. Un extremo de la cinta va unido al brazo fijo con arista de cuchillo y el extremo opuesto al brazo móvil, también con aristas de cuchillo; que a su vez, está unido al cuerpo del aparato por un resorte de lámina o muelle de flexión. El alargamiento hace que la cinta se desenrosque y; por lo tanto, motiva que la aguja indicadora gire frente a la escala. El rozamiento del instrumento se reduce prácticamente a cero y según el modelo pueden obtenerse ampliaciones de hasta 5000 con longitudes de calibrado entre 1 y 50 mm. Con el dispositivo de cinta de torsión se hace referencia a veces al principio del Microkator de Johanssón, Figura 1.20. Una ventaja de este instrumento es su perfil poco elevado.

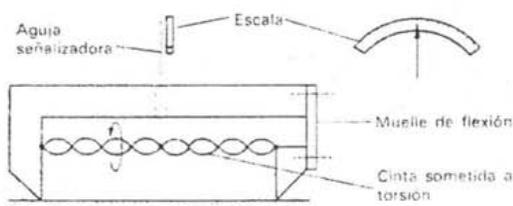


Figura 1.20 Extensómetro tipo microkator [12]

1.5.2 Galgas extensométricas ópticas

Otro instrumento de perfil bajo es el extensómetro óptico de Tuckerman, Figura 1.21, el cual requiere un autocolimador para tomar las lecturas de los alargamientos. Comporta un apoyo fijo con arista de cuchillo y otro móvil de la misma forma, al cual va unido un espejo. Mediante el autocolimador se transmite una imagen reticular al espejo, el cual a su vez la refleja al prisma que va alejado en el aparato y de aquí vuelve al autocolimador. Habiendo establecido inicialmente la posición de la imagen reflejada para un alargamiento cero, cualquier deformación hará girar el apoyo con arista de cuchillo y por tanto el espejo; el desplazamiento de la imagen reflejada sobre el autocolimador indica el alargamiento. El

autocolimador posee la ventaja de que no es necesario ajustarlo a una distancia fija del espejo reflector y del prisma; así, si hace falta, las lecturas del instrumento pueden tomarse fácilmente a una distancia considerable, metros, de la pieza deformada. Este extensómetro puede usarse para la medición dinámica hasta 40 Hz utilizando un registrador fotográfico, y pueden determinarse deformaciones de hasta $2 \mu\text{m/m}$. según el modelo, las longitudes de calibrado varían entre unos 6 y 250 mm.

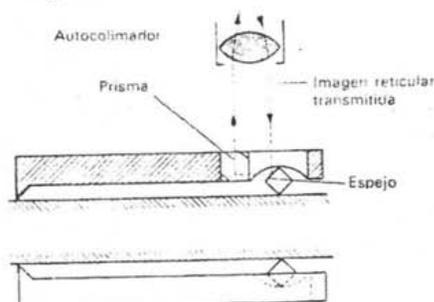


Figura 1.21 Extensómetro óptico de Tuckerman [12]

1.5.3 Galgas extensométricas acústicas

Un alambre tensado vibra a su frecuencia natural. La frecuencia natural varía si por ejemplo, aumenta o decrece la temperatura o la tensión. Cuando todas las condiciones que pueden afectar al alambre deformado permanecen estables, el único factor que variará la frecuencia de vibración es un aumento o una disminución de la tensión. Tales variaciones de frecuencia son proporcionales a las variaciones de tensión y por tanto, al alargamiento o deformaron del alambre. Al objeto de usar la frecuencia de vibración del alambre del extensómetro como una fuente de información de deformación, es preciso disponer de un sistema vibracional previamente calibrado, tal como un oscilador variable con el que pueda compararse.

En el sistema acústico de medición de deformación se monta una cuerda de piano de aproximadamente 0.3 mm entre los apoyos fijo y móvil; con arista de cuchillo, del instrumento y encima de dicha cuerda se sitúa un imán permanente cilíndrico sobre el que se enrolla una bobina. La disposición del interruptor de pulsador permite hacer llegar un impulso de corriente continua a la bobina, que hace vibrar el alambre a su frecuencia natural durante un corto periodo de tiempo, transmitiendo una débil corriente alterna al amplificador de señal del extensómetro y de aquí a las placas X de un osciloscopio. Las placas Y del osciloscopio reciben una señal de referencia desde el oscilador variable, entre 200 y 2000 Hz, la cual se ajusta luego hasta que aparece en la pantalla una figura Lissajous circular o elíptica, que es cuando se igualan las frecuencias del instrumento y del oscilador y cuando se reconoce la frecuencia de vibración de la cuerda de piano. El oscilador variable puede comprobarse sustituyendo la señal del extensómetro por la señal de un diapason normal, Figura 1.22.

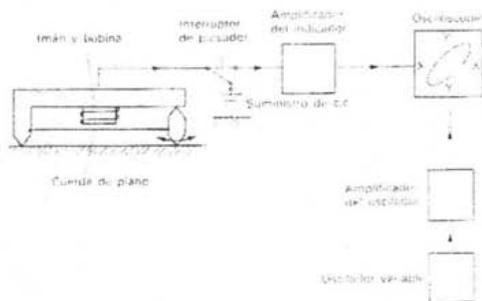


Figura 1.22 Sistema de indicador de deformación acústica [12]

La deformación de un alambre varía con el cuadrado de la frecuencia así:

$$\frac{\delta L}{L} = \frac{4L^2 \rho}{AEf^2} \quad (10)$$

Donde:

- L = longitud del alambre (m)
- A = sección transversal del alambre (m²)
- E = modulo de Young del alambre (Pa)
- f = frecuencia de vibración (Hz)
- ρ = densidad de l material (Kg/m³)

De esta forma es fácil determinar la deformación causada conociendo la variación de frecuencia en el extensómetro, pero en la actualidad puede disponerse de versiones de lectura de salida digital.

Los extensómetros acústicos se usan principalmente en obras públicas y tienen las ventajas de robustez y seguridad de funcionamiento a largo plazo. Su sensibilidad llega a ser del orden de 0.5 $\mu\text{m/m}$, habiéndose empleado longitudes de calibrado de 20 a 340 mm. Debido a que el sistema mide la frecuencia, las resistencias del interruptor y de los conductores no afectan a la señal de salida. Estos extensómetros se protegen fácilmente para usarlos en el exterior, en cualquier tipo de estructuras, y, en lugar de fijarlos sobre apoyos con arista de cuchillo pueden sujetarse a la propia estructura, la cual sirve entonces de soporte del alambre; por ejemplo, sobre jácenas de acero. Los extensómetros acústicos han funcionado satisfactoriamente cuando se han montado en un tubo protector y sumergido en hormigón y, siempre que las cubiertas están provistas de cierres estancos realizados cuidadosamente, su aplicación debajo del agua ofrece pocos problemas. Un inconveniente es que se requiere una tensión considerable para tener un alambre suficientemente tirante; **por tanto, estos extensómetros no son adecuados para estructuras ligeras.**

1.5.4 Galgas extensométricas eléctricas

El principio de funcionamiento de la galga fue descubierto por Lord Kelvin cuando cargo un alambre de cobre y hierro a tensión y noto que la resistencia eléctrica se incrementaba con la deformación aplicada al alambre. Posteriormente observo que el alambre de hierro

mostraba mayor incremento en la resistencia que el alambre de cobre, cuando ambos estaban sujetos a la misma deformación. Kelvin utilizó un puente de Wheatstone para medir el cambio de resistencia. En este clásico experimento estableció tres factores que son de gran ayuda para un buen desempeño de la galga extensométrica:

1. Los cambios de la resistencia en el alambre son una función de la deformación.
2. Diferentes materiales tienen diferentes sensibilidades.
3. El puente de Wheatstone puede ser usado para la medición exacta de estos cambios.

A continuación se muestra una galga extensométrica eléctrica Figura 1.23.

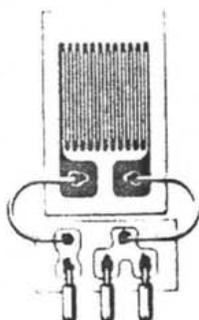


Figura 1.23 Galga extensométrica eléctrica [13]

La resistencia R de un conductor uniforme con longitud L , área de sección transversal y resistencia específica ρ está dado por:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (11)$$

Donde:

R = resistencia de un conductor uniforme

L = longitud

A = área de la sección transversal

ρ = resistencia específica de cada material.

Diferenciando la ecuación y dividiendo por la resistencia total

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

El término dA representa el cambio en el área de la sección transversal del conductor a través de la deformación transversal, que es igual a $-\nu \frac{dL}{L}$. Si denotamos el diámetro para la deformación axial como d_0 , entonces el diámetro después de la deformación aplicada está dado por:

$$df = d_0 \left(1 - \nu \frac{dL}{L} \right)$$

de la cual es claro

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L} + \nu^2 \left(\frac{dL}{L} \right)^2 \approx -2\nu \frac{dL}{L}$$

Sustituyendo en esta última la ecuación (11) ya diferenciada:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1 + 2\nu)$$

Que finalmente se puede reescribir

$$SA = \frac{dR}{R} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho} \quad (12)$$

Donde SA es la sensibilidad de la aleación metálica usada en la conducción y es definida como el cambio de resistencia por unidad de resistencia inicial dividido por la deformación aplicada.

La ecuación (12) muestra que la sensibilidad se debe a dos factores: el cambio en dimensión del conductor, el cual es expresado por $1+2\nu$ y el cambio en la resistencia específica

$$\frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$$

CAPÍTULO 2
DISEÑO DE LA ARMADURA

2.1 Requerimientos de diseño y planteamiento del problema

Hoy en día una de las necesidades del mercado educativo en México es contar con equipos didácticos que sirvan como apoyo para la enseñanza de temas relacionados con la mecánica de sólidos y el análisis de estructuras. Dicha necesidad llevó a una empresa dedicada al abastecimiento de material y equipo didáctico a apoyarse en el laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro Tecnológico Aragón. Lo anterior debido a que se trata de una pequeña empresa dedicada; más bien, a la comercialización que al diseño y construcción de equipos. En particular una de las demandas de la empresa fue diseñar y construir un equipo capaz de simular los fenómenos físicos observados en armaduras. Entre las características que la empresa requería del equipo mencionado se encuentran las siguientes:

- Ser una armadura a escala con facilidad de montaje y desmontaje.
- Poder medir tanto la fuerza externa aplicada a la armadura, así como las fuerzas generadas por la misma en cada uno de los elementos de la armadura.
- Poder variar la fuerza aplicada en cierto rango.
- Ser más económico que los encontrados en el mercado (proveedores extranjeros).
- Que tuviera la posibilidad de cambiar a diferentes configuraciones.

Finalmente, el dispositivo debía ser fabricado en un tiempo breve.

Considerando los requerimientos mencionados se procedió a plantear el problema desde el punto de vista del diseño por lo que se identificaron las siguientes aspectos relevantes a resolver.

1. Determinar tipo de configuración a realizar.
2. Tipo de carga que sería aplicada a la armadura y el número.
3. Forma de aplicación y medición de cargas
4. Medición fuerzas de reacción, tensión o compresión, en cada uno de los elementos.

2.2 Evaluación y selección de las alternativas de solución

En esta sección se analizan las diversas opciones disponibles actualmente para resolver cada uno de los puntos relevantes mencionados anteriormente. Hay que destacar que la de búsqueda de alternativas de solución se realizó a esta altura del diseño y que fue ya presentada en detalle en el primer capítulo.

A continuación se describen brevemente las principales ventajas y desventajas que ofrecen cada una de las alternativas, y considerando las especificaciones y limitaciones del problema planteado por la empresa, se toma la decisión más factible para dicho fin.

2.2.1 Alternativas para la configuración

En las secciones 1.2.5.1 y 1.2.5.2 se mostró que existen armaduras planas y tridimensionales. Así mismo se mencionó que en cada caso pueden ser simples, compuestas y complejas. Considerando que se trata de un equipo didáctico que facilite a los alumnos la comprensión de los conceptos de reacciones en armaduras, el cálculo de las mismas y que además sea fácil de montar y desmontar, la decisión fue la de elegir la configuración de armadura plana compuesta.

A pesar de que se seleccionaron las armaduras planas sobre las espaciales, como se mencionó anteriormente, éstas las podemos encontrar de diferentes formas: simples, compuestas o complejas. La principal característica de estas armaduras es que se puede desprestigiar una de sus dimensiones.

Puesto que es muy difícil encontrar una armadura simple por sí sola se presentan, en general, las ventajas y desventajas de armaduras simples y compuestas juntas:

Ventajas:

- Es posible garantizar la estabilidad interna y externa de la armadura.
- Se puede formar armaduras internamente estables de n número de miembros y nodos uniendo elementos, no necesariamente elementos básicos, sin afectar la estabilidad.
- Se tiene una relación entre número de miembros y número de nodos que garantiza esta estabilidad.
- Se tiene una relación que garantiza que la armadura sea estáticamente determinada.
- Es posible aplicar el método de los nodos y el de las secciones sin mucha complejidad, a menos que la armadura tenga muchos elementos.

Desventajas:

- Conforme aumenta el número de miembros de la armadura crece el número de cálculos realizados por los métodos convencionales, haciéndolos laboriosos y tediosos, por lo que hay que utilizar métodos avanzados.

Cuando las armaduras planas son complejas, las desventajas que se presentan son:

- No poseen un arreglo patrón que las caracterice.
- No se puede aplicar el método de los nodos ni el de las secciones, aun cuando la armadura sea estáticamente determinada. En la Figura 1.5, armaduras complejas del capítulo anterior, se puede ver que aún cuando la armadura es estáticamente determinada, después del cálculo de las reacciones no se puede aplicar el método de los nodos, por que no se puede hallar un nodo en el cual existan dos o menos fuerzas desconocidas en los miembros. Del mismo modo, no se puede emplear el método de las secciones por que toda sección pasaría a través de más de tres miembros con fuerzas desconocidas. Se puede determinar las fuerzas de los

miembros en este tipo de armaduras al escribir dos ecuaciones de equilibrio en términos de las fuerzas desconocidas en los miembros, para cada nodo de la armadura y a continuación resolver el sistema de 2j ecuaciones en forma simultánea.

Entonces desde el punto de vista analítico, la diferencia principal entre las armaduras simples o compuestas y las complejas se basa en el hecho de que para las últimas, no se pueden aplicar los métodos convencionales de solución para el análisis de la armadura, lo cual no serviría para dar una clase básica de dichos métodos.

Como se puede ver la mejor opción es una armadura compuesta, ya que la armadura a diseñar debe tener pocos elementos, con el fin de facilitar su análisis.

2.2.2 Alternativas para tipo de carga

Por las mismas razones que en la configuración se eligió aplicar una sola carga a la armadura, faltando únicamente seleccionar el tipo y posición de la misma.

➤ Cargas Muertas

Ventajas:

- Pueden ser despreciadas si los elementos son delgados.
- Son permanentes
- Tienen magnitudes constantes
- Posiciones fijas.

Desventajas:

- No pueden evitarse.
- Si los elementos son muy largos o muy pesados pueden afectar el sistema.

➤ Cargas Vivas

Ventajas:

- Es más factible encontrar este tipo de cargas

Desventajas:

- Magnitudes variables.
- Posición cambiante.
- Cada miembro de la armadura debe diseñarse para la posición de la carga que causa el esfuerzo máximo en ese miembro.

- Los diferentes miembros de la armadura pueden alcanzar sus niveles máximos de esfuerzo en diferentes posiciones de la carga dada.
- Cuando se aplican con rapidez a una estructura, causan esfuerzos más grandes que los que se producirían si las mismas cargas se hubieran aplicado en forma gradual.
- El análisis es complicado.

➤ Cargas Ambientales

Ventajas:

- A pesar de que presentan características de cargas vivas y muertas, es posible establecer ciertos patrones de análisis dependiendo del ambiente en el que se esté trabajando.
- Son muy comunes en la práctica.

Desventajas:

- Su análisis presenta las características de cargas vivas y muertas dependiendo del momento en que se encuentren, por lo que hace más complicado su análisis.
- No dependen del diseñador, sino más bien de ambiente que se este trabajando.

En base a lo anterior puede verse que las cargas muertas son las más fáciles de manejar y analizar.

2.2.3 Alternativas para forma y medición de cargas

➤ Palanca simple y compuesta

Ventajas:

- Cálculo fácil de una fuerza desconocida compacta.
- Puede usarse para ensayo de materiales; como alambre de poca resistencia, plásticos, fibra, etc.
- Fácil conversión de palanca simple a compuesta, la cual es más compacta y capaz de ejercer mayores cargas.
- Posibilidad de aplicarse a un cierto número de máquinas de ensayo.

Desventajas:

- Se debe aplicar una fuerza conocida para obtener la otra.
- Solo se aplica a materiales de baja resistencia, tales como alambre, plástico o fibra.

➤ Péndulo

Ventajas:

- Muchas máquinas de ensayo de materiales, lo llevan incorporado.
- La carga puede aplicarse mediante un tornillo o un motor.
- El péndulo asciende a lo largo de una escala cuadrante.
- La lectura es directa.

Desventajas:

- Solo se aplica a materiales de baja resistencia; tales como alambre, plástico o fibra.

Como los miembros de la armadura a diseñar son rígidos de alta resistencia, no es posible realizar una medición por alguna de las dos opciones anteriores, por lo que se descartan estas posibilidades.

➤ Resorte y aro de prueba

Ventajas:

- Es posible usar un resorte o barra de acero.
- Si la fuerza no es excesiva en el sistema, puede medirse la deformación.
- El aro de prueba es un anillo del que se conocen las dimensiones físicas y las propiedades mecánicas.
- La magnitud de la deformación puede medirse mediante un comparador, micrómetro o indicador de deformación.
- Lectura directa.

Es factible unir un aro de prueba en la armadura como si fuera parte de la misma.

➤ Hidráulico y neumático

Hidráulico

Ventajas:

- medición directa.
- Puede ser calibrado en unidades de fuerza.
- Se utilizan para generar y medir grandes fuerzas.

Neumático

Ventajas:

- Puede ser calibrado en unidades de fuerza.
- Lectura directa.

Desventajas:

- Trabaja por equilibrio de fuerzas.
- Hay que ajustar cuando no tiene carga aplicada.

En ambos casos es factible utilizar estos dispositivos en la armadura.

➤ Eléctricos

Ventajas:

- Medición de fuerza a distancia.
- Altamente sensibles.
- Pueden detectar fuerzas muy pequeñas.
- Medición directa.

Desventajas:

- Pueden dar resultados poco fidedignos.
- Puede utilizarse normalmente para la medición de fuerzas hasta 220 N.

A pesar de las desventajas es factible utilizar este dispositivo en la armadura.

Como existe más de una forma de aplicar la fuerza a la armadura se tuvo que tomar otro patrón de selección, el cual fue elegir el más sencillo y barato. Por lo que se eligió el aro de carga pues es el más factible de conseguir, más económico y más fácil de adaptar al equipo, ya que solo es necesario un aro de acero, un tornillo para aplicar la fuerza y un manómetro.

2.2.4 Alternativas para medición de reacciones en cada elemento

Antes de inventar y desarrollar los indicadores de deformación por resistencia, el dispositivo más usado para determinar la deformación era el extensómetro (mecánico y acústico).

Ventajas generales:

- Se usan aun en las piezas de ensayo de tracción y para aplicaciones estructurales en obras públicas donde se requieren indicadores de gran longitud.

Desventajas generales:

- La principal limitación es su tamaño
- Dificultad de aplicación
- Los elementos a los cuales se unen deben ser geoméricamente sencillos, longitud suficiente y de sección transversal uniforme
- Limitada a la medición de la deformación estática.

➤ Galgas extensométricas mecánicas

Extensómetro de Berry

Ventajas:

- Se usa para aplicaciones estructurales en obras públicas bajo condiciones de deformación aproximadamente lineal, con longitudes de calibrado de hasta 200 mm.
- Lectura directa.

Aparato de Huggenberger

Ventajas:

- Existen diferentes modelos.
- Es el extensómetro mecánico de mayor aplicación.
- Trabaja con longitudes de calibrado entre 12 y 25 mm.
- Rozamiento muy reducido.
- Puede reajustarse a cero después de cada lectura de alargamiento.
- Es posible tener amplificaciones de hasta 2000.

Extensómetro microkator

Ventajas:

- El rozamiento del instrumento se reduce prácticamente a cero.
- Pueden obtenerse amplificaciones de hasta 5000 con longitudes de calibrado entre 1 y 50 mm.
- Perfil poco elevado.

➤ Galgas extensométricas ópticas

Extensómetro óptico de Tuckerman

Ventajas:

- Perfil bajo.
- No es necesario ajustarlo a una distancia fija del espejo reflector y del prisma.
- Las lecturas del instrumento pueden tomarse fácilmente a una distancia considerable, metros de la pieza deformada.
- Puede usarse para la medición dinámica hasta 40 Hz.
- Pueden determinarse deformaciones de hasta $2 \mu\text{m/m}$.
- Las longitudes de calibrado varían entre unos 6 y 250 mm.

➤ Galgas extensométricas acústicas

Ventajas:

- Es fácil determinar la deformación causada.
- En la actualidad puede disponerse de versiones de lectura de salida digital.
- Robustas y seguridad de funcionamiento a largo plazo.
- Sensibilidad del orden de $0.5 \mu\text{m/m}$, habiéndose empleado longitudes de calibrado de 20 a 340 mm.
- Debido a que el sistema mide la frecuencia, las resistencias del interruptor y de los conductores, no afectan a la señal de salida.
- Se protegen fácilmente para usarlos en el exterior, en cualquier tipo de estructuras
- Pueden sujetarse a la propia estructura.
- Funcionan satisfactoriamente sumergidos en hormigón y debajo del agua ofrece pocos problemas.

Desventajas:

- Es preciso disponer de un sistema vibracional previamente calibrado.
- Se usan principalmente en obras públicas,
- Se requiere una tensión considerable para tener un alambre suficientemente tirante.
- No son adecuados para estructuras ligeras.

➤ Galgas extensométricas eléctricas

Ventajas:

- Son los mas utilizados actualmente
- Medición directa
- Existen diferentes tipos de indicadores, entre los que se encuentran los digitales
- Se puede aplicar a elementos muy pequeños
- Pueden unirse a la estructura, mediante pegamento
- Es posible medir tensión y compresión

A pesar de que existe gran variedad de extensómetros se decidió utilizar los eléctricos ya que son los que mas se utilizan actualmente, son fáciles de conseguir y pueden ser adheridos a cada uno de los elementos de la armadura.

2.3 Diseño de configuración

En esta sección se da una descripción detallada de los componentes fundamentales que constituyen el equipo desarrollado en el presente trabajo, después de haber seleccionado las mejores alternativas en cada caso. Así mismo, se describe el funcionamiento de cada una de dichas partes dentro del conjunto. Un listado de las componentes fundamentales del equipo así como el número de piezas que intervienen en el equipo, se muestra en la Tabla 2.1. Las dimensiones de cada una de dichas componentes, así como los sub-ensambles y el ensamble completo del equipo se presentan en el **apéndice I**.

El equipo consta de las siguientes partes funcionales principales:

Tabla 2.1 Listado de las componentes fundamentales del equipo de armadura

Componentes:		
Número de parte	Descripción	Cantidad
1	Marco universal de pruebas	1
2	Barras (con conexión):	
	CORTAS, 300 mm	5
	LARGAS, 424 mm	2
3	Nodos independientes	3
4	Articulaciones de conexión con soporte	2
5	Celda y aro de carga	1
6	Soporte de aro de carga	1
7	Amplificador de mediciones	1

Materiales utilizados

Los criterios en cuanto a materiales fueron fundamentalmente la rigidez, la resistencia y el peso de la armadura, debido a que se trata de equipo de laboratorio que trabajará de manera continua y estará expuesto uso relativamente rudo. Así mismo, se consideró que las fuerzas de cuerpo pueden influir en los resultados que se obtendrán al realizar las prácticas en el equipo; por lo que, en general se optó por el empleo de materiales metálicos; tales como acero y aluminio.

Las barras fueron diseñadas en acero ya que nos permite un mejor rango de medición por su modulo de elasticidad mayor que el del aluminio.

En la Figura 2.1 se muestra una vista lateral del equipo desarrollado en la cual se indican los elementos fundamentales mencionados en la tabla 2.1.

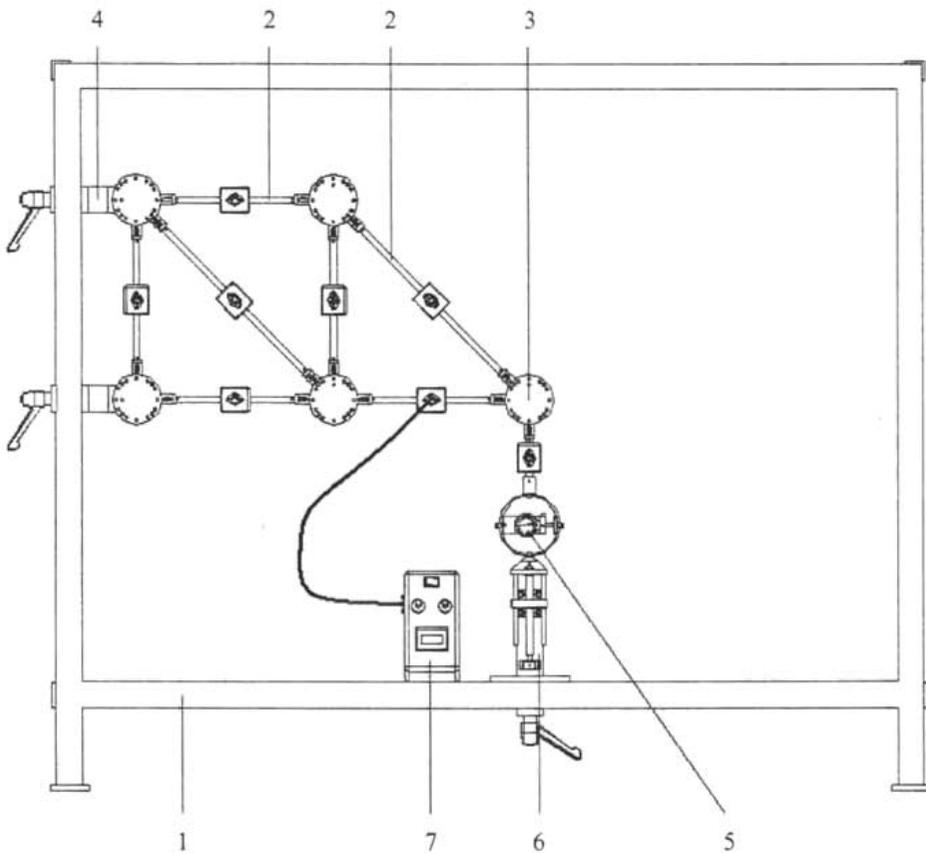


Figura 2.1 Componentes

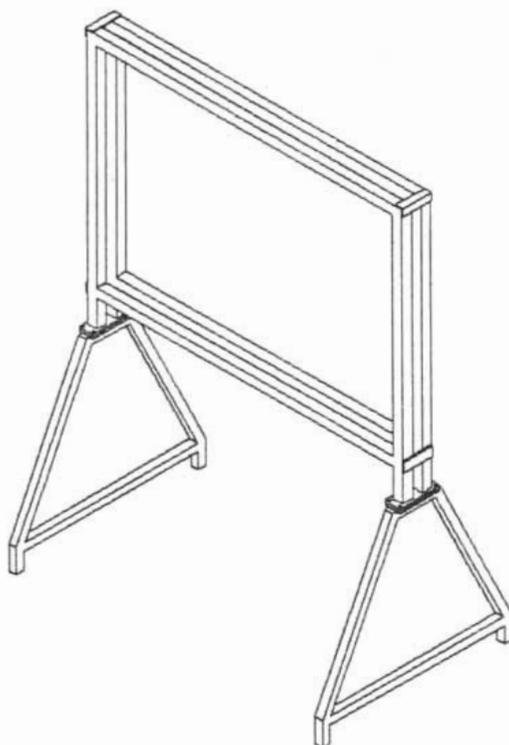
A continuación se describe cada una de las partes fundamentales y su función en el conjunto.

2.3.1 Marco Universal

La función de este elemento es soportar y fijar completamente la armadura, para medir de tal manera que se pueda aplicar las cargas y realizar las mediciones sin problemas. El marco cuenta con la suficiente rigidez para evitar deflexiones que dificulten la realización de las pruebas. Antes de seleccionar la geometría de la configuración se tomo como base el marco seleccionado para montar la armadura. El cual fue uno disponible comercialmente, cuyas características y dimensiones son:

- Marco rectangular de 52 pulgadas de largo, 4.8 de ancho y 43.85 pulgadas de alto.
- Con dos bases triangulares de 31.5 pulgadas de largo, 1.25 de ancho y 28.3 pulgadas de alto.

Se consideró conveniente emplear este marco debido a su disponibilidad en el mercado; pero además, por que sus dimensiones son convenientes para realizar demostraciones ante un grupo. La geometría del marco y sus dimensiones se muestran en la siguiente Figura 2.2



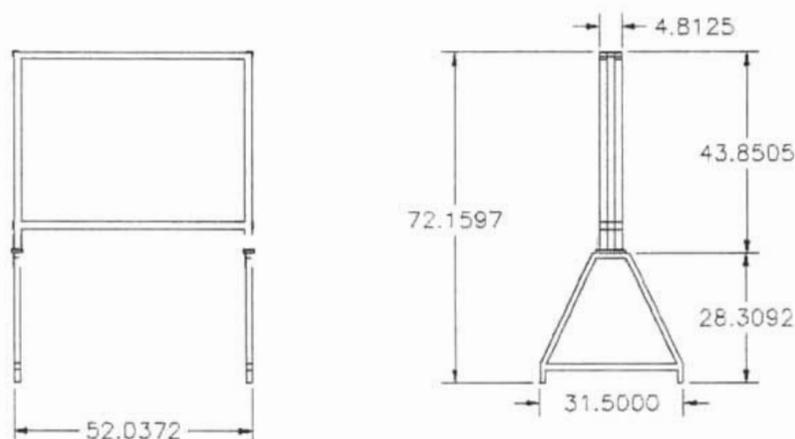
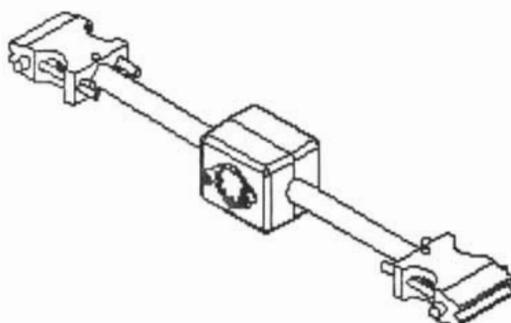


Figura 2.2 Marco universal

2.3.2 Barras y geometría

Considerando la configuración propuesta para la armadura, plana compuesta con elementos a 45° , las barras empleadas fueron en dos tamaños diferentes: 5 largas y 2 cortas. Estas consisten en tubos de acero inoxidable provistos, en cada extremo, de broches que permiten la conexión de cada barra a los nodos de la armadura. Así mismo, llevan montado en la parte central una caja provista de un conector eléctrico tipo dim, que sirve para conectar el circuito formado con los extensómetros adheridos a la barra al dispositivo amplificador. En la Figura 2.3 se muestran los dos tamaños de miembros empleados en la armadura.



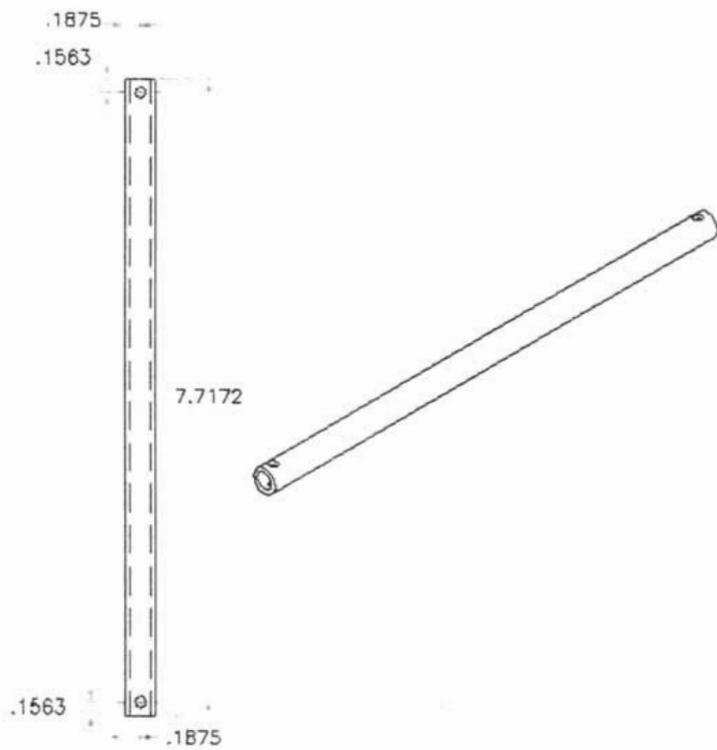
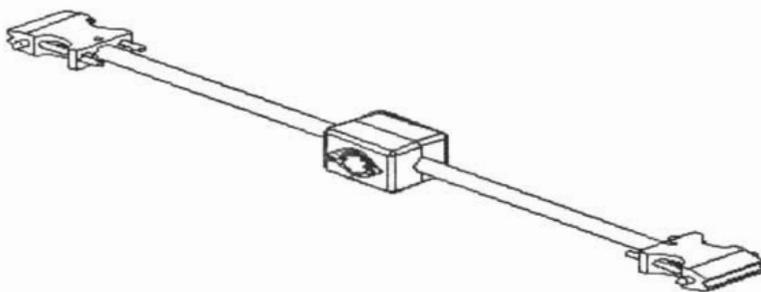


Figura 2.3 (a) Barra corta



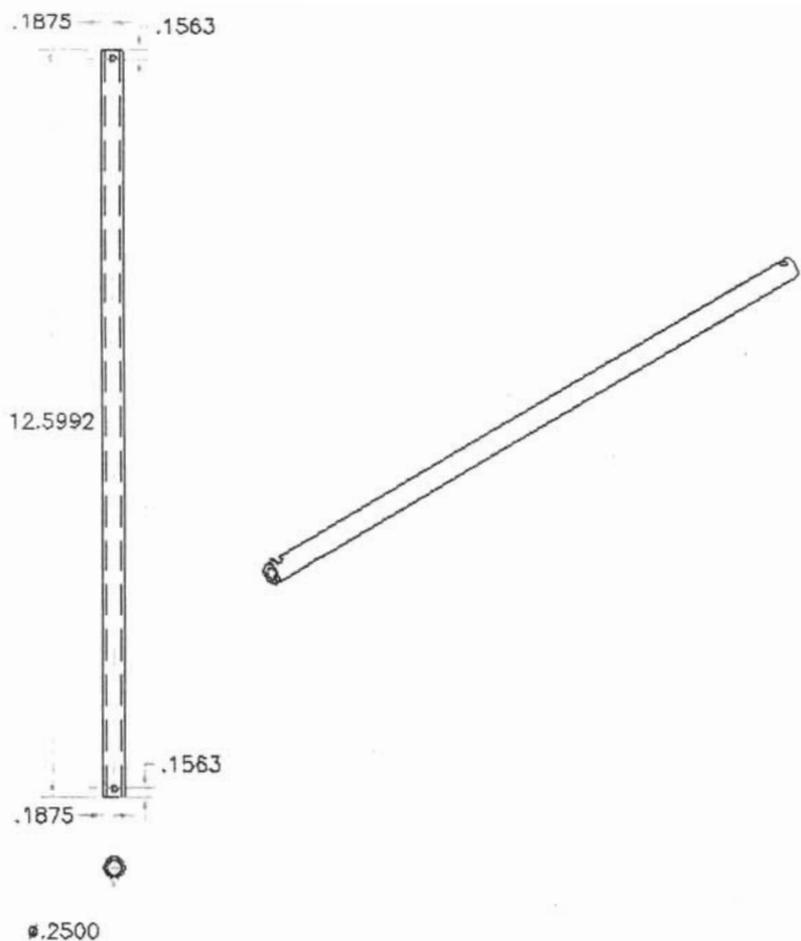


Figura 2.3 (b) Barra larga

Las dos formas que pueden obtenerse con estas barras fueron denominadas: tipo I el corto y tipo II el largo. En la Figura 2.4 se muestran dos configuraciones posibles de armadura en las que se indican los tipos empleados en cada caso.

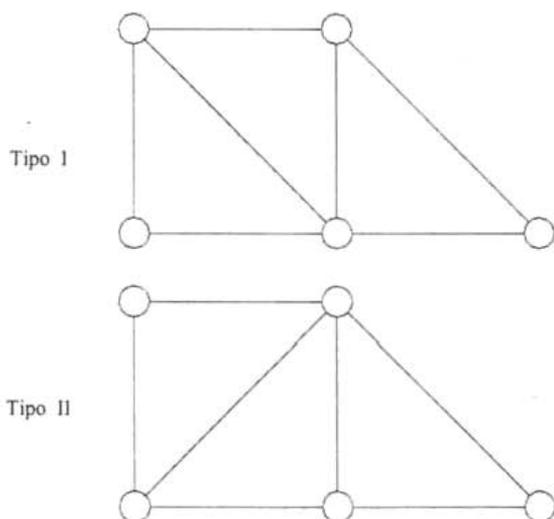
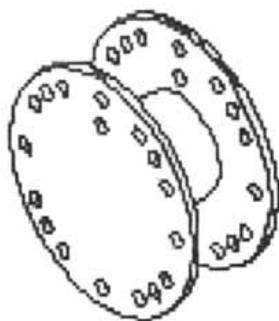


Figura 2.4. Miembros tipo I y tipo II.

2.3.3 Nodos y articulaciones con soporte

Para simular los nodos de la armadura, se construyeron piezas circulares con un desbaste parcial y barrenos en posiciones que permiten acoplar, mediante los broches descritos en el apartado anterior, miembros de carga; de tal forma que, pueden formar ángulos de 30, 45, 60 y 90° con el centro de la pieza. En la Figura 2.5 se muestra un diagrama isométrico del nodo, así como la forma en la que se ensamblan los elementos de carga al mismo y las posiciones en las que se pueden colocar.



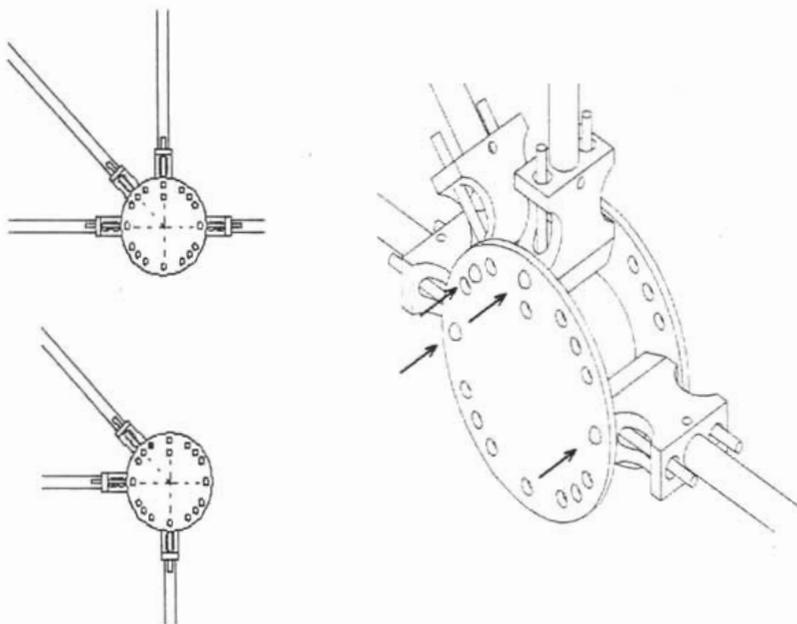
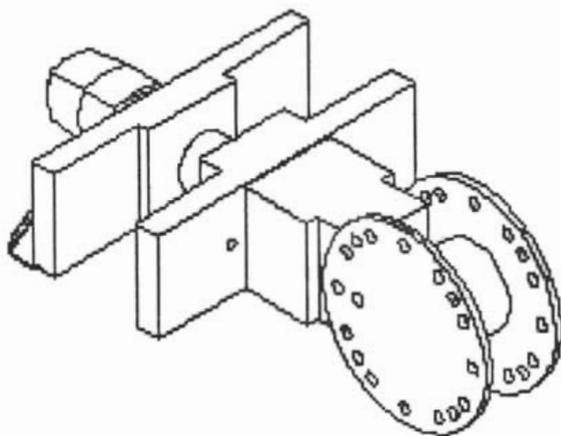


Figura 2.5 Nodo

Los nodos que van fijos al marco están provistos de una pieza que permite la conexión de elementos así como su fijación al marco. En la Figura 2.6 se muestra un diagrama en el que se aprecia el nodo y la pieza que permite fijarlo al marco denominado articulación de conexión con soporte; así mismo, se muestra la posición que toman estos dos nodos en la armadura montada al marco.



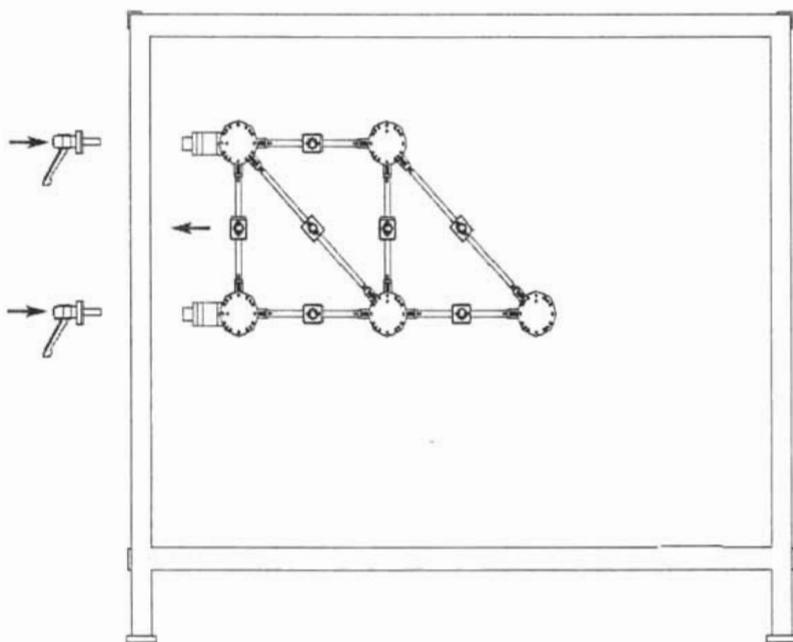


Figura 2.6 ensamble de articulación con soporte

2.3.4 Aro de carga y soporte

La función de este elemento es proporcionar la carga externa que será aplicada a la armadura. El dispositivo consiste en una pequeña prensa de tornillo acoplada a un anillo circular, que a su vez es fijado a un tramo de tubo provisto de un broche conector idéntico al de los miembros de carga. El dispositivo es acoplado al nodo de la armadura, mientras que en la prensa es introducido el alojamiento de una pieza fija al marco. La carga es aplicada simplemente al girar la perilla fija al tornillo de la prensa de carga. La determinación de la magnitud de la carga aplicada se realiza de dos formas: empleando la escala mecánica del micrómetro instalado en el aro de carga; o bien, conectando la celda de carga colocada en el tubo de acero inoxidable al amplificador. Es recomendable realizar una calibración del micrómetro empleando la celda de carga para luego determinar la magnitud de una carga cualquiera usando el micrómetro y emplear el instrumento amplificador para medir la magnitud de la reacción en uno de los elementos. En la Figura 2.7 se muestra un diagrama del aro de carga ensamblado con la prensa y el elemento que transmite la carga a la armadura.

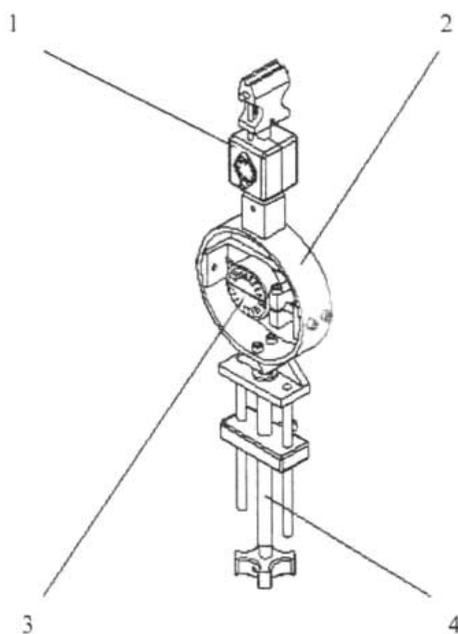
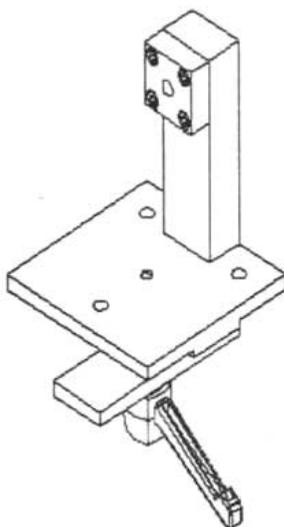


Figura 2.7 (1. Celda de carga, 2. Aro de carga, 3. Indicador 4. Tornillo)

Como se mencionó anteriormente el aro de carga es acoplado al marco mediante una pieza que fue llamada soporte del aro de carga. Dicho elemento se puede apreciar en la Figura 2.8. así como la forma en que es fijado al marco mediante una manija.



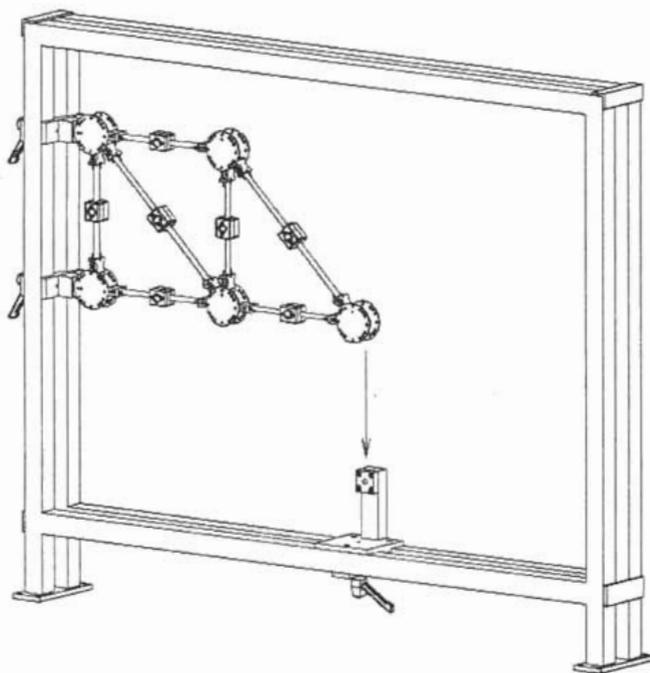


Figura 2.8 Soporte de aro de carga

2.3.5 Celdas de carga y medición de reacciones

Como se mencionó anteriormente, para medir las reacciones en cada elemento así como la fuerza proveniente del anillo de carga se utilizaron galgas extensométricas, las cuales son instaladas de manera especial para lograr medir la magnitud de las fuerzas en el elemento en cuestión. La instalación de las galgas en el elemento corresponde con un circuito tipo de "puente completo". En realidad existen 4 diferentes arreglos de este puente que pueden ser instalados para medir deformaciones. Para mayor referencia se puede revisar el **Apéndice II**; el cual está dedicado específicamente al circuito puente de Wheatstone. Esta técnica resulta muy simple y relativamente económica debido a que no es necesario alterar la geometría de los miembros, además de que resulta muy precisa. Cabe destacar que el empleo de dicha técnica requiere el diseño de un dispositivo electrónico capaz de manejar la señal de voltaje, proveniente de los strain gages, de tal manera que sea presentada numéricamente en una pantalla. No obstante, se trata de circuitos amplificadores conocidos que fueron diseñados con la colaboración de personal del laboratorio de Instrumentación del Centro Tecnológico Aragón.

El arreglo de puente completo y la forma en que fueron instalados cada uno de los cuatro extensómetros se puede apreciar en la Figura 2.9. Como se aprecia en la Figura, los extensómetros 1 y 3 del puente son instalados en el elemento de tal manera que la deformación medida es aquella que experimenta el elemento a lo largo del eje de aplicación de la carga, mientras que los extensómetros 2 y 4 del puente son colocados transversalmente en el elemento.

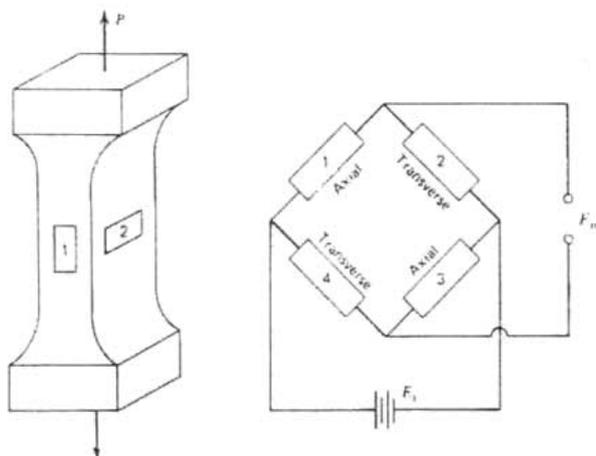


Figura 2.9. Instalación de los cuatro extensómetros

Debido a que el equipo sería empleado en una región del país calurosa, fueron agregadas al circuito de puente completo una serie de resistencias de compensación; las cuales tienen como fin evitar que las lecturas provenientes de las celdas de carga sean alteradas por las fluctuaciones térmicas del ambiente.

Por otro lado, cabe destacar que la instalación de los extensómetros en la muestra y en especial tratándose de celdas de carga, requiere un procedimiento delicado que debe ser seguido meticulosamente para asegurar el buen funcionamiento de la celda. En el **Apéndice III** se presenta una breve explicación de dicho procedimiento.

Como se mencionó anteriormente, el cambio en la resistencia, y por tanto la magnitud de fuerza aplicada sobre el elemento, puede ser monitoreado uniendo el alambre a las terminales de la galga con un conveniente sistema de instrumentación. Un diagrama a bloques del circuito empleado para dicho fin se muestra de manera breve en la Figura 2.10²

² Circuito realizado con la colaboración de Armando Vega Serrano

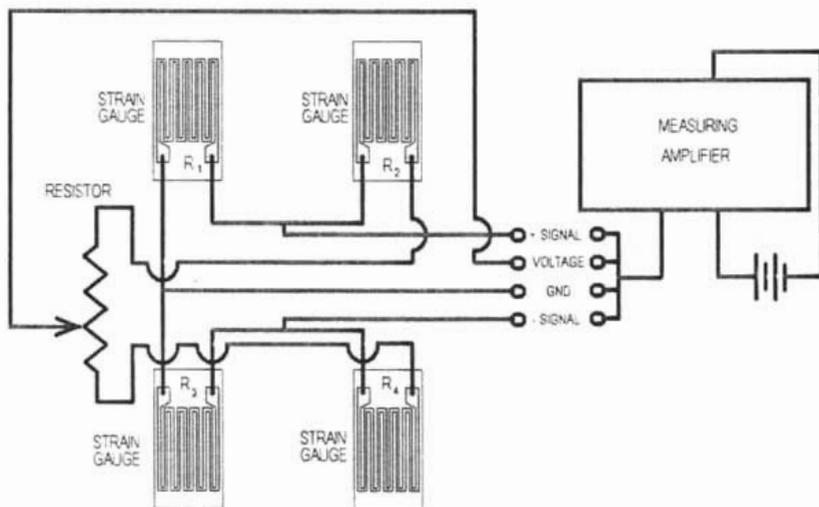


Figura 2.10. Diagrama de conexión eléctrica

Mediante un procedimiento de balanceo de las resistencias de compensación, cada miembro fue calibrado originalmente para trabajar en un rango de temperaturas de entre 20 y 50° C. A temperaturas extremas se debe volverse a calibrar. Para alcanzar el estado de equilibrio térmico, el miembro debe de usarse por cerca de 10 minutos antes de ser recalibrado. El miembro no debe estar cargado mientras es calibrado.

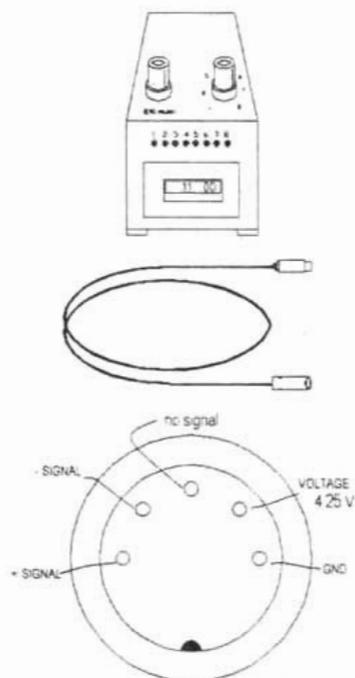
1. Amplificador de lecturas

Sirve para ver físicamente el valor y tipo de reacción (tensión valor positivo, compresión valor negativo) de cada fuerza en cada miembro, en Newtons. El amplificador de lecturas da los resultados en una escala de 10 unidades equivalentes con 20 Newton (N) en una pantalla digital de 4 dígitos. Está diseñado para medir fuerzas en un rango de -500 a 500N. Es necesario girar la perilla de la izquierda para calibrar a cero la pantalla.

Los objetos de prueba son conectados con un cable de 5 pines que se conecta en un socket que se encuentra en la cara posterior del amplificador. La notación de cada pin es la mostrada en la Figura. El amplificador funciona con corriente alterna (DC).

El botón de encendido se encuentra en la parte trasera del aparato.

La perilla de la derecha del amplificador está numerada del 1 al 8. El amplificador está diseñado para que a cada celda de carga, instalada en cada miembro de la armadura, le corresponda con un canal calibrado para medir la señal del elemento, cuyo número sea el correspondiente. El amplificador viene con la configuración óptima. Cuando el aparato es reconfigurado, no se garantiza una correcta operación.



2.11 amplificador de lecturas

Datos técnicos:

- Tensión de alimentación: 127 V, 60Hz.
- Medición por galgas extensométricas en arreglo de puente completo de Wheatstone.
- Rango de medición: Fuerza máxima 500 N.

2.4 Diseño de detalle

En este apartado se presentan los cálculos que fueron realizados para determinar las dimensiones de cada uno de los elementos mecánicos que componen la armadura didáctica. Como resultado de dicho análisis es determinada la carga máxima que puede soportar el equipo y las medidas precautorias que deben tomarse para asegurar su buen funcionamiento. Para realizar los cálculos fueron empleadas fórmulas de diseño disponibles en manuales y libros de ingeniería tanto de resistencia de materiales como de diseño de elementos de máquinas.

2.4.1. Memoria de cálculo

Los cálculos de esta sección se realizaron en las partes críticas de la armadura, considerando que estarán sometidas a tensión o compresión, donde se podrían sufrir fallas debidas a los esfuerzos generados en los elementos. Se tomará de todos los resultados obtenidos el menor valor para considerar en el diseño la máxima carga que se podrá aplicar al nodo seleccionado. En cada caso se muestran las figuras de los elementos analizados, resaltando que material se utilizó para fabricarlos y sus propiedades. Cuando se analizan dos miembros de diferente material se toman las propiedades del que tiene menor resistencia última. Así mismo se eligió un factor de seguridad de 4, debido a que será un equipo utilizado por gran variedad de alumnos y tomando en cuenta que existen más riesgos de sobrecargar el equipo en un laboratorio.

Se emplea entonces la relación de factor de seguridad [15] dado por:

$$F_S = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{adm}}$$
$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ult}}{F_S} \quad (13)$$

Donde:

F_S = Factor de seguridad

σ_{ult} = Esfuerzo último

σ_{adm} = Esfuerzo admisible

2.4.1.1 Conjunto seguro (Inox)-ancla(Al)

El conjunto seguro-ancla se puede observar en la Figura 2.12. Claramente se aprecia que el conjunto se encuentra sujeto a esfuerzo de aplastamiento, por tanto [15]:

$$\sigma_b = \frac{W}{A} = \frac{W}{td}$$
$$W = \frac{\sigma_b td}{4} \quad (14)$$

Donde:

σ_b = esfuerzo último de aplastamiento.

W = carga máxima permisible.

A = área de contacto.

t = altura de parte de la ancla en contacto con seguro.

d = diámetro.

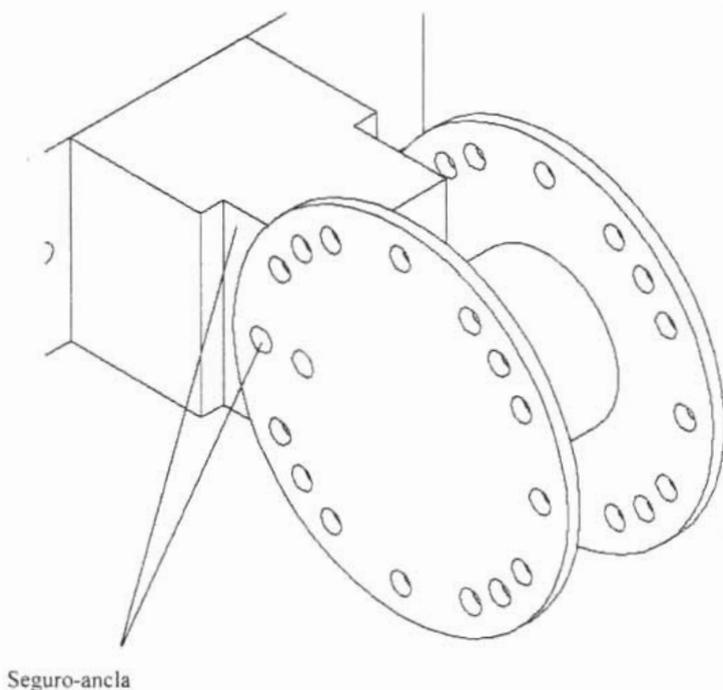


Figura 2.12 Conjunto Seguro-ancla.

Cabe mencionar que el seguro fue fabricado de acero inoxidable mientras que para el ancla se empleo aluminio (Al) comercial; por lo que, para los cálculos se emplearon las propiedades del aluminio:

Utilizando la ecuación (14)

Con:

$$t = 1.1719 \text{ in} = 0.03 \text{ m}$$

$$d = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W = \frac{(100 \text{ MPa})(0.03 \text{ m})(4.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{4} = 3600 \text{ N}$$

2.4.1.2 Conjunto: seguro (Inox)- nodo (D-Al)

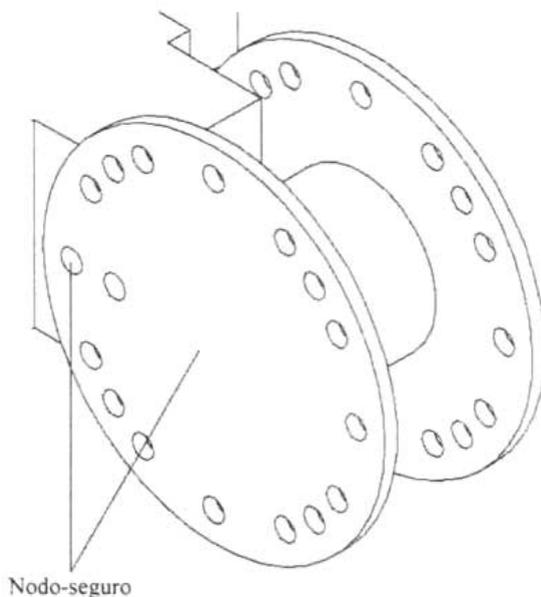
Para este caso también se tiene esfuerzo de aplastamiento. Se emplean las propiedades del acero inoxidable. Donde:

σ_h = esfuerzo último de aplastamiento.

W = carga máxima permisible.

A = área de contacto.

t = altura de la parte del nodo en contacto con seguro.
 d = diámetro.



2.13 conjunto Nodo-Seguro.

Utilizando nuevamente ecuación (14) con:

$$t = 0.1094 \text{ in} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W = \frac{(275 \text{ MPa})(2.8 \times 10^{-3} \text{ m})(4.8 \times 10^{-3})}{4} = 924 \text{ N}$$

2.4.1.3 Seguro (Inox)-Barras (Inox)

Los cálculos se realizan con propiedades del acero inoxidable, ya que ambas partes son del mismo material. Como las barras son huecas, estas ejercen esfuerzos cortantes dobles [15], por lo tanto se tiene:

Formula:

$$\frac{\tau_b}{4} = \frac{W}{2A} \quad \tau_b = \frac{2W}{A} = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2$$

$$W' = \frac{\tau_b \cdot \pi d^2}{8} \quad (15)$$

Donde:

τ_b = esfuerzo cortante último.

W' = carga máxima admisible.

A = área transversal del seguro.

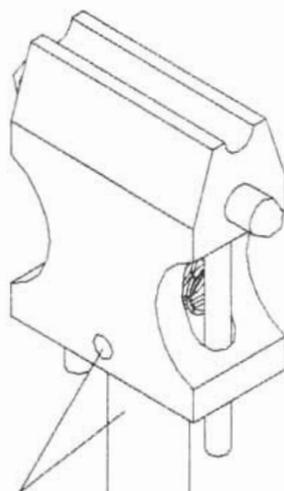
d = diámetro del seguro.

Utilizando (14) con:

$$\tau_b = 275 \text{ MPa}$$

$$d = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W' = \frac{(275 \text{ MPa})(4.8 \times 10^{-3})^2 \pi}{8} = 2488 \text{ N}$$



Seguro-barras

Figura 2.14 Diagrama del conjunto Seguro-barras.

2.4.1.4 Seguro (inox) –cabeza(D-Al)

Nuevamente se tiene un esfuerzo de aplastamiento por lo que se utiliza ecuación (14) los cálculos son con propiedades del acero inoxidable.

Donde:

$$t = 0.1094 \text{ in} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 0.125 \text{ in} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W = \frac{(275 \text{ MPa})(2.8 \times 10^{-3} \text{ m})(3.2 \times 10^{-3})}{4} = 616 \text{ N}$$

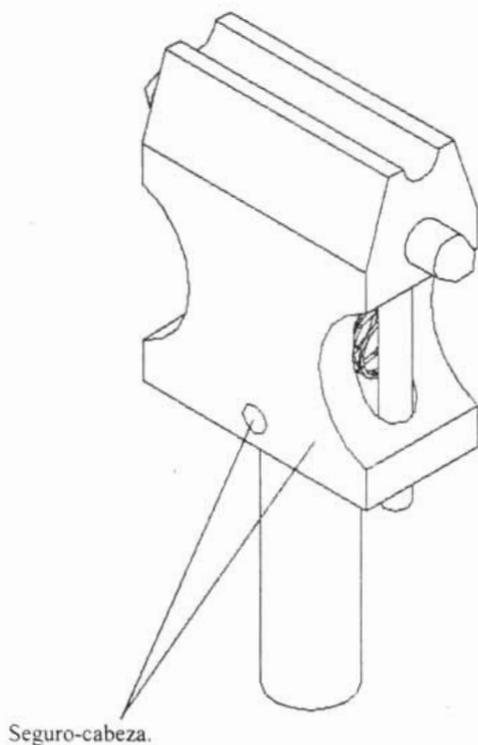


Figura 2.15 conjunto Seguro-cabeza.

2.4.1.5 Base de bastón (D-Al)-nodo (D-Al)

Al igual que el caso anterior se ejerce un esfuerzo de aplastamiento. Utilizando ecuación (14) con propiedades del dura aluminio.

Donde:

$$t = 0.1094 \text{ in} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W = \frac{(600 \text{ MPa})(2.8 \times 10^{-3} \text{ m})(4.8 \times 10^{-3})}{4} = 2016 \text{ N}$$

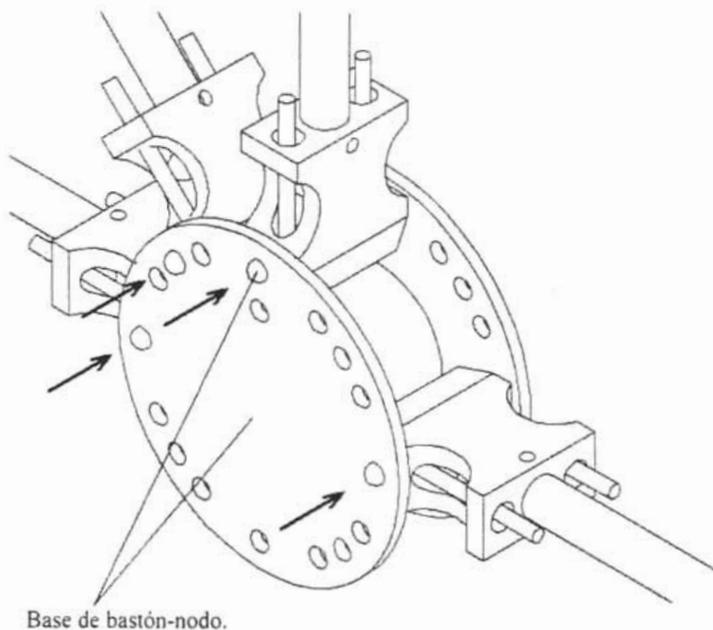


Figura 2.16 Conjunto base de bastón-nodo.

2.4.1.6 Barra larga (Inox)

Cada una de las barras será sometida a pandeo, utilizando fórmulas de pandeo de columnas con propiedades de (inox), tenemos:

Fórmula [15]:

$$W_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde:

W_{cr} = Carga crítica.

E = Módulo de elasticidad.

I = Momento de inercia de la sección transversal del tubo.

L = Longitud total de la barra.

Tomando el factor de seguridad acordado y el momento de inercia como:

$$I = \pi r^3 t$$

Se tiene:

$$W_{cr} = \frac{\pi^3 E r^3 t}{4L^2} \quad (16)$$

Con:

$$t = 0.125 \text{ in} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 12.5992 \text{ in} = 0.3235 \text{ m}$$

$$W_{cr} = \frac{\pi^3 (200 \text{ GPa}) (4.8 \times 10^{-3})^3 (3.2 \times 10^{-3})}{4(0.3235)^2} = 5273 \text{ N}$$

2.4.1.7 Barra corta

Con las mismas consideraciones que en la barra larga:

$$t = 0.125 \text{ in} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 0.1875 \text{ in} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 7.7172 \text{ in} = 0.1975 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$W_{cr} = \frac{\pi^3 (200 \text{ GPa}) (4.8 \times 10^{-3})^3 (3.2 \times 10^{-3})}{4(0.1975)^2} = 14057 \text{ N}$$

2.4.1.8 Aro (acero 1018)

Basándose en la fórmula para un aro sujeto a una compresión diametral [16]:

$$\frac{W}{\Delta} = 53.77 \frac{EI}{D^3}$$

$$\Delta = 0.02D$$

$$W = 1.0754 \left(\frac{EI}{D^2} \right)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$W = 0.2688 \left(\frac{Ebh^3}{12D^2} \right) \quad (17)$$

Donde:

$$b = 1 \text{ in} = 0.0256 \text{ m}$$

$$h = 0.25 \text{ in} = 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D = 3.75 \text{ in} = 0.096 \text{ m}$$

$$W = 0.2688 \left(\frac{(190 \text{ GPa})(0.0256 \text{ m})(6.4 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12(0.096 \text{ m})^2} \right) = 3078 \text{ N}$$

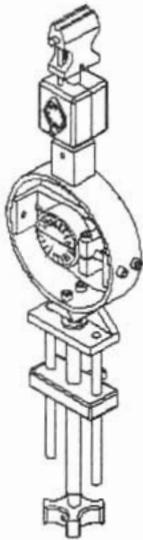
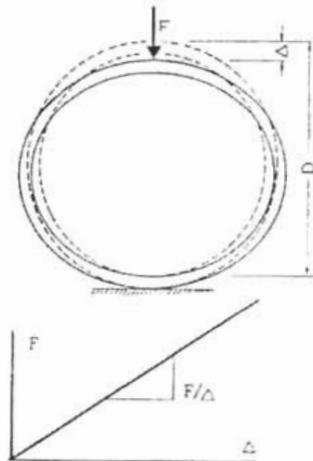


Figura 2.17 Aro.



$$F/\Delta = 53.77 (EI/D^3)$$

Figura 2.18 Cambio geométrico asociado a una carga de compresión diametral donde se define la rigidez del aro [16].

2.4.1.9 Tornillo (acero 1018)

Se calcula la carga máxima en el tornillo con propiedades de acero 1018 sometido a flexión por medio de la formula [17]:

$$\sigma_f = \frac{3Wh}{2\pi_m nb^2}$$

$$W = \frac{\sigma_f \pi_m nb^2}{6h} \quad (18)$$

Donde:

$$n = 781.25 \text{ hilos por metro}$$

$$r_m = 0.10335 \text{ in} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = 0.0433 \text{ in} = 1.108 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$b = 1.28 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W' = \frac{\pi(260 \text{ MPa})(2.6 \times 10^{-3})(781.25)(1.28 \times 10^{-3})^2}{6(1.108 \times 10^{-3})} = 415189 \text{ N}$$

Cuando está sometido a cortante se tiene:

$$\sigma_s = \frac{W}{2\pi_m n b}$$

$$W = \frac{\sigma_s \pi_m n b}{2} \tag{19}$$

$$n = 781.25 \text{ hilos por metro}$$

$$r_m = 0.10335 \text{ in} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$b = 1.28 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$W = \frac{(150 \text{ MPa})\pi(781.25)(2.64 \times 10^{-3} \text{ m})(1.28 \times 10^{-3} \text{ m})}{2} = 622035 \text{ N}$$

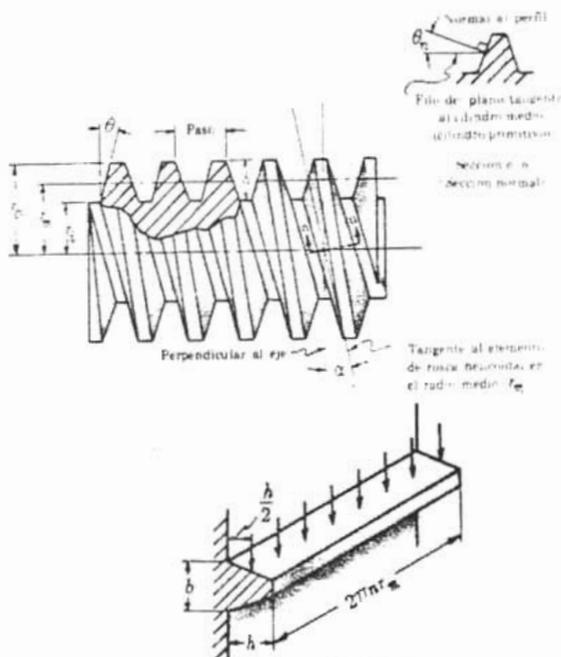


Figura 2.19 Tornillo [17].

Los resultados calculados se resumen en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Características de los diferentes conjuntos y cargas máximas obtenidas.

PARTE	MATERIAL	PROPIEDADES DE FLUENCIA	FÓRMULA	DATOS	FUERZA MÁXIMA
Seguro Ancla	Acero inox. Aluminio	(Al) $\sigma_T = 100$ MPa $\sigma_C = 55$ MPa $E = 70$ GPa	$W = \frac{\sigma_b t d}{4}$	$t = 1.1719$ in $\phi = 0.1875$ in	3600 N
Nodo Seguro	Dura Aluminio Acero Inoxidable	(Inox) $\sigma_T = 275$ MPa $E = 200$ GPa	$W = \frac{\sigma_b t d}{4}$	$t = 0.1094$ in $\phi = 0.1875$ in	924 N
Seguro Barras	Acero inox. Acero Inox.	(Inox) $\sigma_T = 275$ MPa $E = 200$ GPa	$W = \frac{\tau_b \pi d^2}{8}$	$\phi = 0.1875$ in	2488 N
Seguro Cabeza	Acero inoxidable Dura- Aluminio	(Inox) $\sigma_T = 275$ MPa $E = 200$ GPa	$W = \frac{\tau_b \pi d^2}{8}$	$t = 0.1094$ in $\phi = 0.125$ in	616 N
Base de bastón-nodo	Dura Aluminio	$\sigma_T = 600$ MPa	$W = \frac{\tau_b \pi d^2}{8}$	$t = 0.1094$ in $\phi = 0.1875$ in	2016 N
Barra Larga	Acero Inoxidable	$\sigma_T = 275$ MPa $E = 200$ GPa	$W_{cr} = \frac{\pi^3 E r^3 t}{4 L^2}$	Radio 4.8×10^{-3} m Longitud 22.5×10^{-3} m $t = 3.2 \times 10^{-3}$ m	5273 N
Barra Corta	Acero Inoxidable	$\sigma_T = 275$ MPa $E = 200$ GPa	$W_{cr} = \frac{\pi^3 E r^3 t}{4 L^2}$	Radio 4.8×10^{-3} m Longitud 197.5×10^{-3} m $t = 3.2 \times 10^{-3}$ m	14057 N
Aro	Acero 1018	$\sigma_T = 260$ MPa $\sigma_C = 150$ MPa $E = 190$ GPa	$W = 0.2688 \left(\frac{E b h^3}{12 D^2} \right)$	b = 1 in h = 0.25 in D = 3.75 in	3078 N

Tornillo Rosca "v" Sharp a 60°	Acero 1018	$\sigma_T = 260 \text{ MPa}$ $\sigma_C = 150 \text{ MPa}$ $E = 190 \text{ GPa}$	Flexión	hilos por metro $n = 781.25$	415189 N
			$W = \frac{\sigma_f \pi r_m n b^2}{6h}$	$r_m = 2.6 \times 10^{-3} \text{ m}$	
			Cortante	$h = 1.108 \times 10^{-3} \text{ m}$	622035 N
			$W = \frac{\sigma_f \pi r_m n b}{2}$	$b = 1.28 \times 10^{-3} \text{ m}$	

CAPÍTULO 3

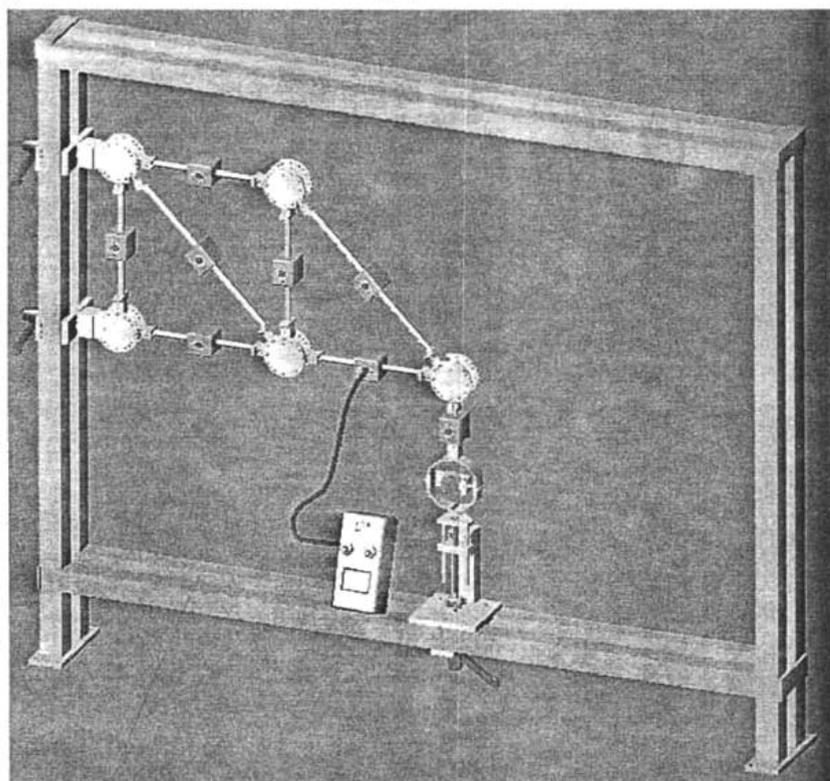
PRUEBAS REALIZADAS AL PROTOTIPO

3.1 Introducción

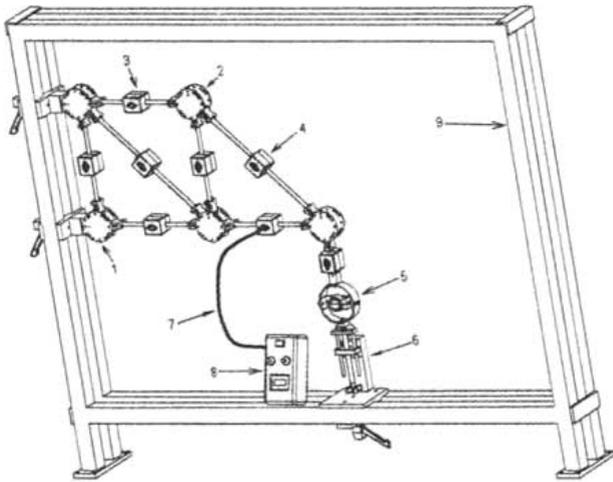
En el presente capítulo se muestra el equipo didáctico para el estudio de las reacciones diseñado y construido, Figura 3.1, así como una descripción general de su operación. Se hace una comparación de los datos experimentales obtenidos con el equipo y los calculados con diversos métodos reportados en la literatura. Cabe destacar que además de los métodos tradicionales se propone en el presente trabajo un método analítico basado en la descomposición de la fuerza externa y las reacciones en componentes referidas a dos bases, en general no ortonormales, definidas en cada nodo de la armadura. Entre las ventajas encontradas con dicho método se encuentran la facilidad de programar el algoritmo para la solución de la armadura, así como la posibilidad de identificar de inmediato el miembro que soporta mayor carga y la magnitud de la misma.

3.2 Descripción general de la armadura

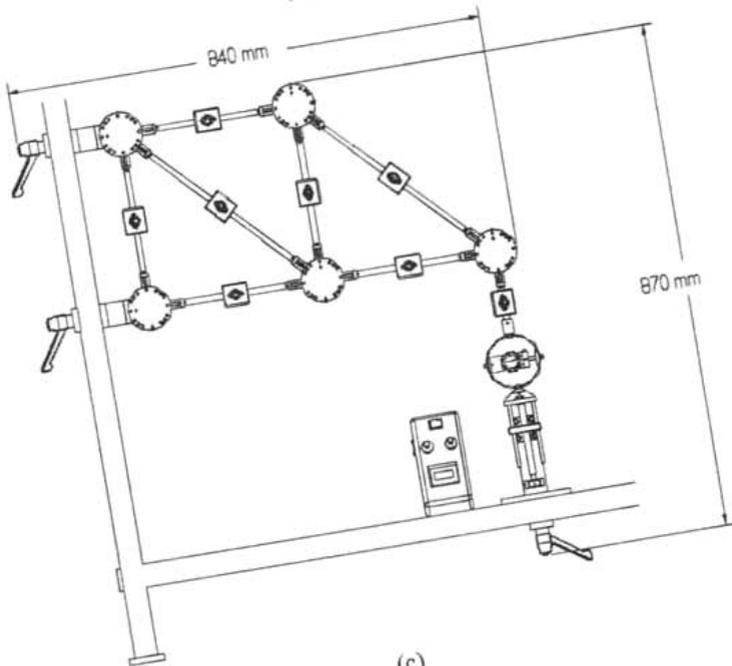
Como se mencionó anteriormente, en la Figura 3.1 se muestra la configuración final del equipo; en la Figura 3.1(a) se aprecia la vista isométrica sólida del equipo, mientras que en la Figura 3.1(b) se presenta también un isométrico indicando las partes principales, para la realización de los experimentos, del mismo y finalmente en la Figura 3.1 (c) se muestran algunas dimensiones adicionales del equipo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1

3.3 Realización del experimento y resultados

Para la realización del experimento se eligió una de las posibles configuraciones de la armadura, la cual se muestra en la Figura 3.2. La Armadura fue ensamblada en un lienzo y posteriormente fijada al marco, cuidando que una vez colocada se encontrara bien alineada. La armadura no debe ser ensamblada sobre el marco por que no se obtendrían buenos resultados.

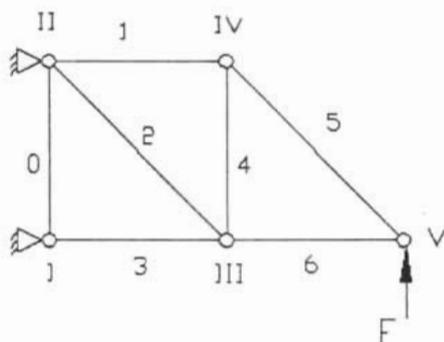


Figura 3.2.

Una vez montada la armadura se aplicó una fuerza F en el nodo V . El procedimiento para la aplicación de la carga consiste en conectar el instrumento de medición a la celda instrumentada en el elemento acoplado al aro de carga. Como el instrumento de medición fue calibrado, ajustando un amplificador variable situado internamente en el instrumento, para registrar la lectura de fuerza en Newtons entonces se giró la perilla del anillo de carga hasta que en la pantalla aparece el valor deseado de la carga. Posteriormente, se registró el desplazamiento sufrido por el indicador de carátula, colocado en el anillo de carga, y se obtuvo la equivalencia correspondiente; en las pruebas preliminares realizadas al equipo se encontró que la equivalencia entre desplazamiento del indicador de carátula y la carga es:

$$1 \text{ división de la escala} = 1/100\text{mm} = 1 \text{ N.}$$

Para evitar errores en las mediciones, se tomaron dos lecturas: una con el miembro descargado y otra con el miembro cargado.

El procedimiento descrito anteriormente, deber ser seguido debido a que se cuenta con un instrumento con un solo conector, por lo que sólo es posible medir la reacción de un elemento a la vez. La "calibración" del indicador de carátula permite aplicar la carga deseada cada vez que se toma lectura de un elemento de la armadura. El instrumento de medición cuenta con un canal, con su respectivo amplificador variable, para cada celda de carga instrumentada en cada elemento de la armadura. A su vez cada celda fue calibrada con una ganancia en particular, por lo que se debe seleccionar en el instrumento el número de canal que corresponde con el número de celda o de lo contrario se pueden incurrir en errores de lectura.

Si durante la operación del equipo se aprecia que el instrumento electrónico de medición no regresa a cero después de retirada la carga, entonces puede existir algún error en las conexiones o bien haber ocurrido alguna avería en el equipo. De hecho, las mediciones que indica el instrumento electrónico pueden variar entre 5 y 10 unidades por lo que se inició el experimento después de transcurrido dicho tiempo. No es recomendable esperar demasiado para tomar la lectura ya que el instrumento puede inestabilizarse debido a efectos térmicos.

3.3.1 Pruebas preliminares

Siguiendo el procedimiento anterior fueron realizadas una serie de pruebas al prototipo de armadura. La magnitud de la carga aplicada fue variando de 50 a 200 N; en la tabla 3.1 se muestran los valores obtenidos en una de dichas pruebas en la cual se aplicó una carga de 200N.

Tabla 3.1 Resultados de las mediciones en los elementos:

F [N]	S ₀ [N]	S ₁ [N]	S ₂ [N]	S ₃ [N]	S ₄ [N]	S ₅ [N]	S ₆ [N]
200	+15	-233	-272	+402	+240	-301	+234
Tipo	Neutral	Compresión	Compresión	Tensión	Tensión	Compresión	Tensión

Analizando los valores de la tabla, es claro que la reacción más grande es de aproximadamente el doble de la carga aplicada y se presentan en el elemento número 3, mientras que la más pequeña se presenta en el elemento 0. Así mismo, es claro que los elementos 0, 3, 4 y 6 se encuentran sujetos a tensión mientras los elementos 1, 2 y 5 se encuentran a compresión.

En realidad, para evaluar la precisión con la que el equipo experimental simula el fenómeno en estudio, las reacciones en armaduras, es preciso realizar una serie de cálculos teóricos empleando los diferentes métodos reportados en la literatura.

Es importante resaltar que se tienen dos rangos de carga máxima, uno tomando como referencia los esfuerzos inducidos en los elementos de la estructura, obtenidos en la sección anterior, donde la máxima carga permitida es de 616 N, y otro por el rango permitido por el aparato de medición que es de 500N. Por lo que se considerará esta última como el máximo valor de carga permitido.

Considerando lo anterior, es claro que para emplear el equipo experimental se requiere hacer los cálculos correspondientes antes de realizar las pruebas para evitar exceder el valor de carga máxima admisible, por lo que la tabla 3.1 solo sirve como referencia.

3.3.2 Cálculo de reacciones en los elementos

Como se mencionó anteriormente, en esta sección se presentan los valores de las reacciones en cada elemento de la armadura. Los cálculos se obtuvieron empleando dos métodos teóricos convencionales. También se utilizó el denominado método de descomposición de

vectores propuesto en el presente trabajo. Posteriormente los resultados de cada uno de los métodos citados son comparados con los resultados experimentales de la tabla 3.1.

Los tres métodos empleados son:

- a. Nodos.
- b. Secciones.
- c. Tensor de transformación.

3.3.2.1 Método de los nodos

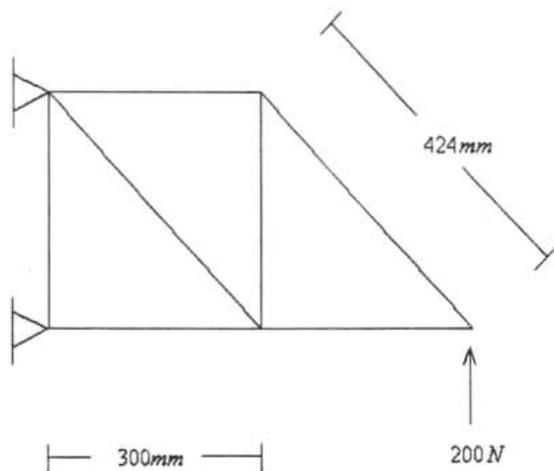


Figura 3.3

El primer paso para la aplicación de este método es comprobar que la armadura es estáticamente determinada y estable, lo cual se realiza aplicando la ecuación (3):

$$m + r = 2j; \quad 7 + 3 = 2(5); \quad 10 = 10$$

Donde claramente se ve que para este caso el número de elementos m es 7, el número máximo de elementos en cada nodo es 3, mientras que el número total de nodos j es 5, por lo que la armadura es estáticamente determinada

Luego, por inspección se identifican los miembros de fuerza cero en la armadura. Es claro que en nuestra armadura existe un solo miembro de fuerza cero, el que está entre el nodo I y II, el cual ha sido llamado elemento cero.

El siguiente paso en el análisis es dibujar el diagrama de cuerpo libre de la armadura completa, mostrando todas las cargas y reacciones externas, indicando con un cero el elemento de fuerza cero como se muestra en la Figura 3.4

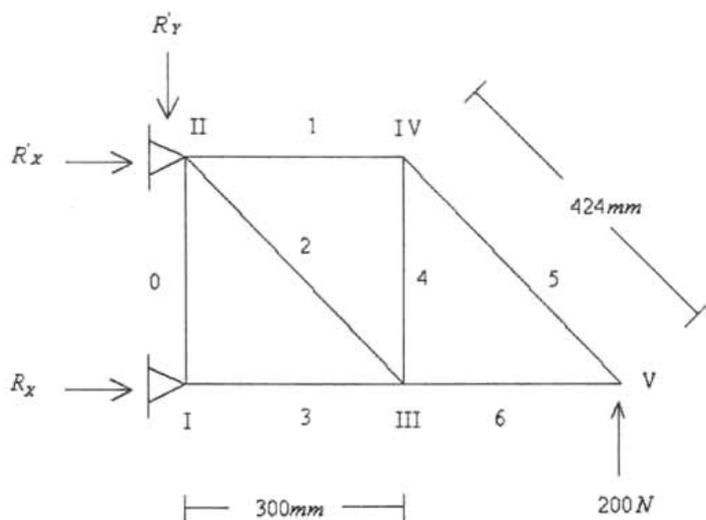


Figura 3.4 Diagrama de cuerpo libre de la armadura completa

Posteriormente, se procede a examinar el diagrama de cuerpo libre para seleccionar un nodo que no tenga más de dos fuerzas desconocidas, las cuales no deben de ser colineales, actuando sobre él. Si existiera tal nodo se podría entonces continuar con el paso siguiente. Como no es el caso, se determinan las reacciones al aplicar las tres ecuaciones de equilibrio y las ecuaciones de condición al diagrama de cuerpo libre de la armadura como un todo; enseguida, se selecciona un nodo con dos o menos incógnitas y se continúa con el paso siguiente.

Eligiendo el nodo V

$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0$$

$$R_x + R'_x = 0$$

(a)

$$\uparrow \oplus \sum M_I = 0$$

$\uparrow \oplus$ Sumatoria de momentos en I

$$(200\text{ N})(0.6\text{ m}) - (R'_x)(0.3\text{ m}) = 0$$

$$R'_x = \frac{(200\text{ N})(0.6\text{ m})}{(0.3\text{ m})} = 400\text{ N}$$

Sustituyendo R'_x en (a)

$$400 + R'_x = 0$$

$$R'_x = -400$$

El signo negativo indica que la dirección real es contraria a la supuesta

$$\uparrow \oplus \sum F_y = 0$$

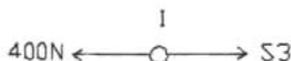
$$-R'_y + 200 = 0$$

(b)

$$R'_y = 200N$$

Se dibuja el diagrama de cuerpo libre del nodo seleccionado, mostrando las fuerzas de tensión por medio de vectores que tiren hacia fuera del nodo y las de compresión por flechas que empujen hacia el nodo. Suele ser conveniente suponer que las fuerzas desconocidas en los miembros son de tensión.

Nodo I



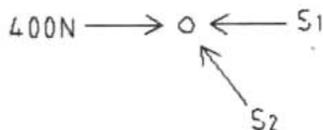
Se determinaron las fuerzas desconocidas al aplicar las dos ecuaciones de equilibrio,

$\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$, una respuesta positiva para la fuerza en un miembro significa que el miembro está a tensión, como se supuso al principio, en tanto que una negativa indica que el miembro está a compresión.

$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0 \quad -400 + S_3 = 0$$

$$S_3 = 400N \quad \text{ELEMENTO A TENSION}$$

Nodo II



$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0$$

$$400 - S_1 - S_2 \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \end{pmatrix} = 0$$

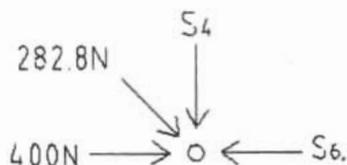
$$\uparrow \oplus \sum F_y = 0$$

$$S_2 \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \end{pmatrix} - 200 = 0$$

$$S_2 = 282.84 \text{ N} \quad \text{ELEMENTO A COMPRESIÓN}$$

$$\text{Por lo tanto } S_1 = 200 \text{ N} \quad \text{ELEMENTO A COMPRESIÓN}$$

Nodo III



$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0$$

$$-400 + 282.8 \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \end{pmatrix} - S_6 = 0$$

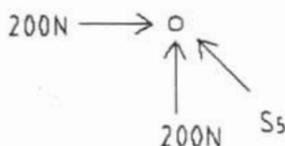
$$S_6 = -200 \text{ N} \quad \text{ELEMENTO A TENSIÓN}$$

$$\uparrow \oplus \sum F_y = 0$$

$$S_4 + 282.84 \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \end{pmatrix} = 0$$

$$S_4 = 200 \text{ N} \quad \text{ELEMENTO A TENSIÓN}$$

Nodo IV



$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0$$

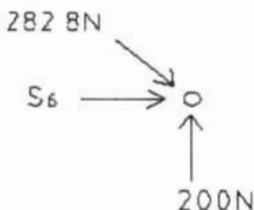
$$200 - S_5 \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.4 \end{pmatrix} = 0$$

$$S_5 = 282.84 \text{ N} \quad \text{ELEMENTO A COMPRESIÓN}$$

Con esto se han determinado todas las fuerzas y reacciones deseadas que actúan en los miembros.

Para comprobar los cálculos se aplica una ecuación alternativa de equilibrio que no se haya usado para calcular las fuerzas en los miembros. De preferencia esta ecuación alternativa debe contener las fuerzas en los miembros determinadas en el análisis. Si éste análisis se ha realizado de manera correcta, entonces debe satisfacerse esta ecuación alternativa de equilibrio.

Analizando el Nodo V y suponiendo que desconocemos S_6



$$\rightarrow \oplus \sum F_x = 0 \quad S_6 + 282.84 \left(\frac{0.3}{0.4} \right) = 0$$

$$S_6 = -200N \quad \text{ELEMENTO A TENSIÓN}$$

Lo que confirma el resultado que habíamos obtenido.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos por el método de los nodos

F [N]	S_0 [N]	S_1 [N]	S_2 [N]	S_3 [N]	S_4 [N]	S_5 [N]	S_6 [N]
200	0	+200	+282.84	-400	-200	+282.84	-200
Tipo	Neutral	Compresión	Compresión	Tensión	Tensión	Compresión	Tensión

3.3.2.2 Método de las secciones

En este método se selecciona una sección que pase por tantos miembros como sea posible de aquellos cuyas fuerzas se desean, pero no más de tres miembros con fuerzas desconocidas. La sección debe cortar la armadura en dos partes.

Si se deseara calcular S_1 se puede realizar un corte A-A' a la armadura como sigue:

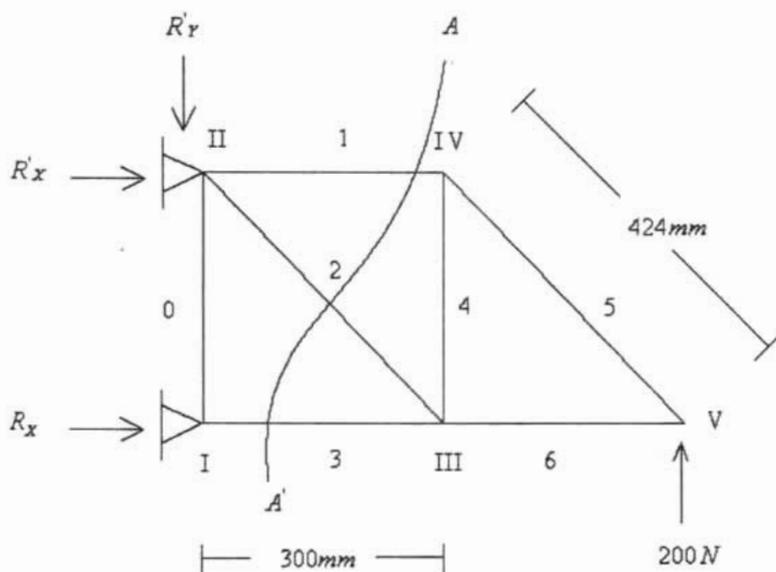


Figura 3.5

Aunque se puede usar cualquiera de las dos partes de la armadura para calcular las fuerzas en los miembros, se debe seleccionar aquella que requiera menos cantidad de esfuerzo de cálculo en la determinación de las fuerzas desconocidas. Para evitar el cálculo de reacciones, si una de las dos partes de la armadura no tiene alguna de éstas actuando sobre ella, entonces se selecciona esta parte para el análisis de las fuerzas en los miembros y se continúa con el paso siguiente. Si las dos partes de la armadura están sujetas a apoyos externos, entonces se calculan las reacciones mediante la aplicación de las ecuaciones de equilibrio y de condición al cuerpo libre de la armadura completa. Enseguida, para el análisis de las fuerzas en los miembros, se selecciona la parte de la armadura que tenga el número de cargas y reacciones externas aplicadas a ella.

Se dibuja el diagrama de cuerpo libre de la parte de la armadura seleccionada, mostrando todas las cargas y reacciones externas aplicadas a ella, así como las fuerzas en los miembros que hayan sido cortadas por la sección. Suele suponerse que las fuerzas desconocidas en los miembros son de tensión y por tanto, se muestran en el diagrama de cuerpo libre por medio de flechas que tiran hacia fuera de los nodos.

En base a los comentarios anteriores se seleccionó la parte derecha de la armadura, que además carece de reacciones, por lo que se hace el cálculo directo de S1.

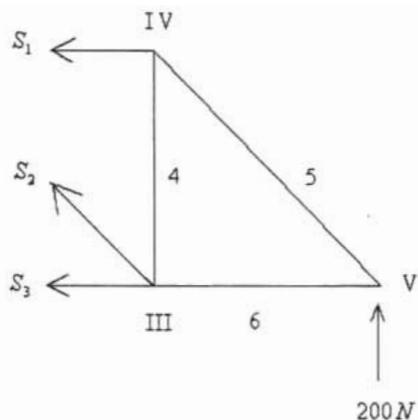


Figura 3.6

Aplicando sumatoria de momentos en el nodo III, tomando como positivos las fuerzas que pretenden hacer girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj, tenemos:

$$\downarrow \oplus \sum M_{III} = 0$$

$$S_1(0.3) + 200(0.3) = 0$$

Por lo tanto

$$S_1 = -200N$$

ELEMENTO A COMPRESIÓN

Si se deseara calcular S_3 basta con prolongar la armadura y realizar los cálculos correspondientes:

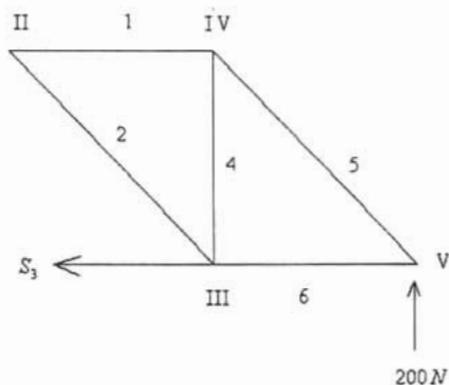


Figura 3.7

Aplicando sumatoria de momentos en el nodo II, tomando como positivos las fuerzas que pretender hacer girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj:

$$\downarrow \oplus \sum M_{II} = 0 \qquad -S_3(0.3) + 200(0.6) = 0$$

Por lo tanto

$$S_3 = 400N \qquad \text{ELEMENTO A TENSIÓN}$$

Puede verse que se obtuvieron los mismos resultados encontrados en el método de los nodos, si se quisiera calcular las fuerzas restantes sólo es necesario continuar haciéndolo por el método de los nodos, como ya se hizo anteriormente.

3.3.2.3 Método analítico de descomposición de vectores

Para calcular las fuerzas en los elementos se debe iniciar con el nodo V. En este caso, es más fácil encontrar la matriz de paso de $x'y'$ a xy , la cual se expresa como:

$$M_{x'y' \rightarrow xy} = \begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{2} \\ 0 & \sqrt{2} \\ & 2 \end{pmatrix}$$

Después, la matriz deseada; $M_{xy \rightarrow x'y'}$, se obtiene calculando la inversa de la matriz anterior, es decir:

$$M_{xy \rightarrow x'y'} = M_{x'y' \rightarrow xy}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{pmatrix}$$

Finalmente, al multiplicar la matriz anterior por el negativo del vector fuerza, aplicado sobre el nodo V, se obtienen las magnitudes de S6 y S5 como:

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ -\sqrt{2}F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S6 \\ S5 \end{pmatrix}$$

Para identificar con mayor claridad las bases definidas en el nodo en particular se recomienda usar la siguiente notación, para el caso del nodo V:

$$M_{xy \rightarrow x'y'} = M_{I' \rightarrow I''}$$

Una vez conociendo S5 se procede a calcular S1 y S4; analizando el nodo IV de manera análoga a como se analizó V, pero sin cambiar el signo de la fuerza en la base original. Luego, conociendo S4 y tomando S6 del primer cálculo, se obtienen S3 y S2, analizando la

Junta III. Finalmente, se calcula R_{ax} analizando el nodo II considerando que se trata de una articulación.

En la Figura se muestran las bases, o sistemas de referencia definidos en cada junta. Cabe mencionar que para el aparato de armadura todos los ángulos son de 45° .

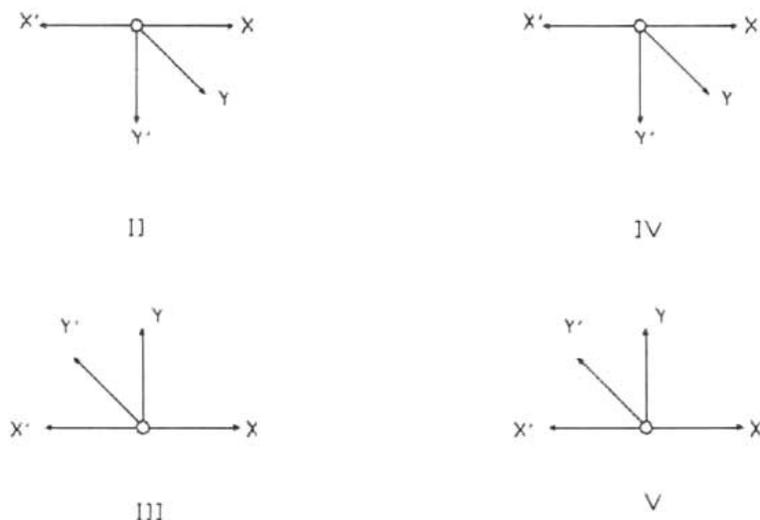


Figura 3.8 Definición de bases asociadas a cada junta o nodo.

En la siguiente tabla se presenta el resultado del análisis realizado en cada junta donde se dan las magnitudes de las fuerzas en cada elemento, referidos a la Figura 3.2, en términos de la fuerza (F) externa aplicada en el nodo V.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos por el método analítico de descomposición de vectores.

F [N]	S_0 [N]	S_1 [N]	S_2 [N]	S_3 [N]	S_4 [N]	S_5 [N]	S_6 [N]
F	0	-F	$-\sqrt{2}F$	2F	F	$-\sqrt{2}F$	F

Este método es particularmente importante porque de la tabla anterior podemos determinar, de manera teórica, los valores de fuerza esperados en cada elemento para una fuerza externa dada. Así mismo, de los valores mostrados en la tabla se puede ver fácilmente que la máxima carga es el doble (400 N) de la carga original aplicada al nodo V.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

3.3.2.4 Análisis de resultados

Podemos ver por medio de las siguientes tablas la comparación de los resultados, primero de las tres formas presentadas y segundo el de los valores calculados y medidos, con su respectiva desviación:

Método	F [N]	S ₀ [N]	S ₁ [N]	S ₂ [N]	S ₃ [N]	S ₄ [N]	S ₅ [N]	S ₆ [N]
Medido	200	+15	-233	-272	+402	+240	-301	+234
Nodos y Secciones	200	0	200	282.84	400	200	282.84	200
Descomposición de vectores	F	0	-F	$-\sqrt{2}F$	2F	F	$-\sqrt{2}F$	F

Método	F [N]	S ₀ [N]	S ₁ [N]	S ₂ [N]	S ₃ [N]	S ₄ [N]	S ₅ [N]	S ₆ [N]
Medido	200	+15	-233	-272	+402	+240	-301	+234
Calculado	200	0	200	282.84	400	200	282.84	200
Desviación	--	--	16.5%	3.83%	0.5%	20%	6.41%	17%

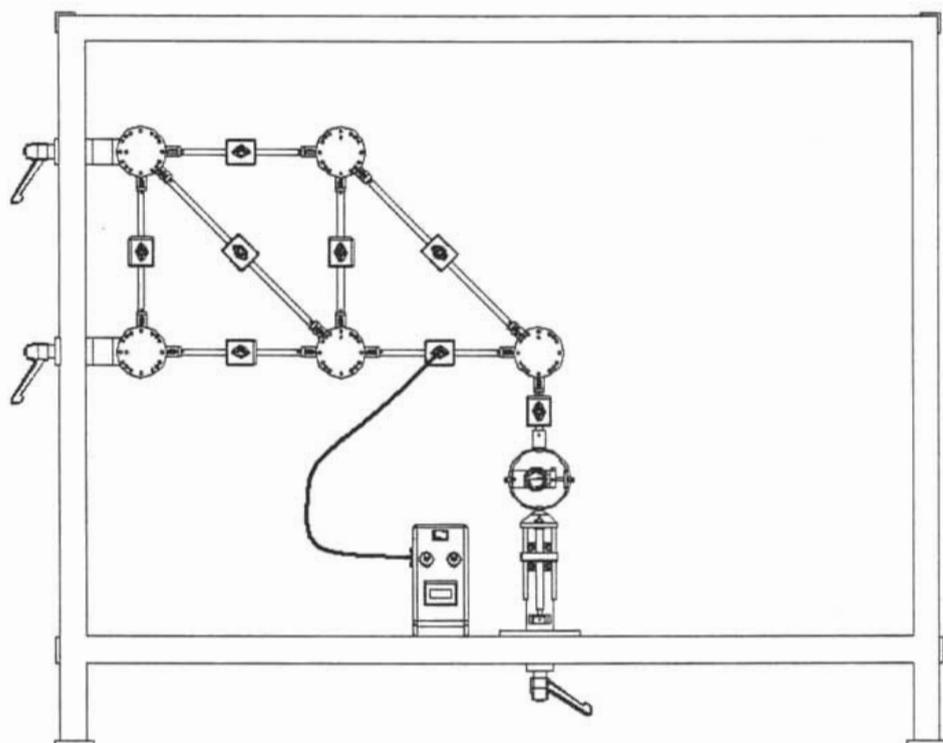
A pesar de que la mayor desviación es de 20 %, se considera razonable debido a que se trata de un aparato que no es de alta precisión, pues tiene la finalidad de apoyar la comprensión del fenómeno de reacciones en armaduras, así como las limitaciones que posee cada método tanto analítico como experimental.

Por otro lado se demostró que el método analítico de descomposición de vectores propuesto determina las reacciones en función de la carga original sin ninguna diferencia entre los métodos convencionales utilizados.

3.4 Manual de prácticas de laboratorio

Como resultado de la presente tesis se creó un manual de prácticas de laboratorio, donde se propone una metodología para hacer buen uso del equipo y facilitar la comprensión de la teoría a través de la práctica. En este manual se resume lo expuesto hasta ahora, se recomienda adicionalmente utilizar el método gráfico para enriquecer los datos comparativos y finalmente se agrega un cuestionario donde se le hacen preguntas al alumno que surgieron en el diseño de la armadura.

MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO



Guía de Prácticas de Laboratorio

Por favor lea cuidadosamente este instructivo antes de instalar su equipo

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Objetivo
- 3 Descripción
 - 3.1 Diagrama del ensamblado
 - 3.2 Ensamblado de la armadura
 - 3.3 Medición de las fuerzas en los miembros
 - 3.3.1 Miembros con galgas de extensométricas
 - 3.3.2 Diagrama de conexión eléctrico
 - 3.3.3 Amplificador de lecturas
- 4 Experimentos
 - 4.1 Medidas de seguridad
 - 4.2 Preparación y realización del experimento
 - 4.3 Determinación de fuerzas por el método deseado
 - 4.3.1 Determinación de las fuerzas por el método gráfico del polígono de fuerzas
 - 4.4 Comparación de resultados
 - 4.5 Método analítico de descomposición de vectores
- 5 Cuestionario
- 6 Conclusiones
- 7 Apéndice
 - 7.1 Datos técnicos

1. Introducción

El **Aparato de Fuerzas en Armaduras** está diseñado para ensamblarse en un Marco Universal de Pruebas, permite la **investigación experimental de la distribución de fuerzas en la armadura**.

Las características del Aparato son las siguientes:

- Construcción de dos diferentes configuraciones de la armadura, donde los miembros convergen en un rango de distancias apropiado, como se muestra en la Figura 1.1.
- La estructura es fácil de armar y desarmar ya que sólo se deben presionar los extremos de los conectores para separarlos de las articulaciones.
- La armadura usa un máximo de 12 miembros.
- La fuerza en cada miembro se mide con el uso de galgas extensométricas.
- Las mediciones de las galgas extensométricas aparecen en la pantalla digital de un instrumento amplificador.

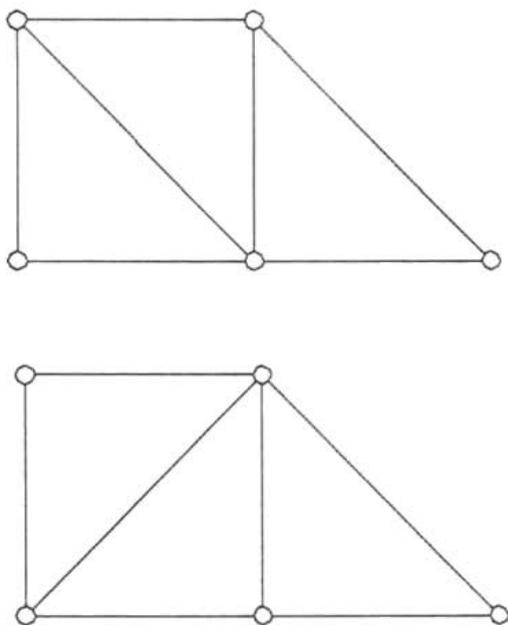


Fig 1.1 Posibles configuraciones

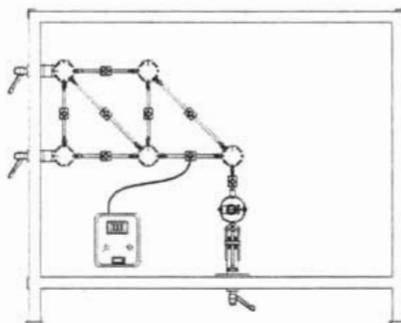
2. Objetivo

Comparar las mediciones obtenidas experimentalmente en cada elemento con las calculadas teóricamente o gráficamente por el método convencional deseado (nodos, secciones, gráfico, etc.), para observar la variación de cada una de ellas verificando si son aceptables o no.

Conocer y corroborar el método de descomposición de vectores para la solución de armaduras, el cual es un método de solución teórica no convencional.

3. Descripción

3.1 DIAGRAMA DE ENSAMBLADO

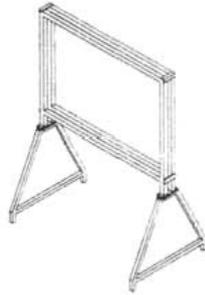


El *Aparato de Fuerzas en Armaduras* consta de los siguientes elementos:

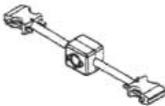
Número de parte	Descripción	Cantidad
1	Marco universal de pruebas	1
2	Barras (con conexión): CORTAS, 300 mm LARGAS, 424 mm	5 2
3	Nodos independientes	3
4	Articulaciones de conexión con soporte	2
5	Celda y aro de carga	1
6	Soporte de aro de carga	1
7	Amplificador de lecturas	1
8	Cable de conexión	1

Descripción

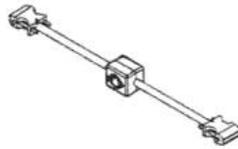
1. Marco Universal de Pruebas



2. Barra corta



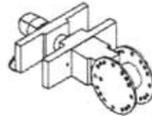
Barra larga



3. Nodos independientes



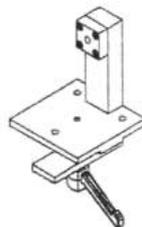
4. Articulación con soporte



5. Celda y aro de carga

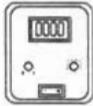


6. Soporte del aro de carga



Descripción

7. Amplificador de lecturas

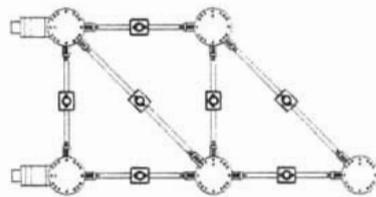


8. Cable de conexión

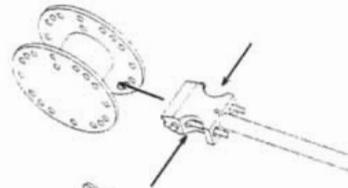


3.2 Ensamblado de la armadura

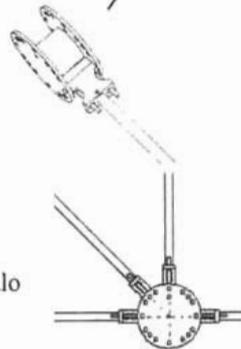
Ensamble la armadura sobre un banco con la configuración mostrada en el diagrama de la Figura



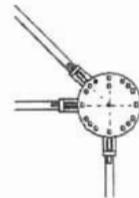
Presione con los dedos los extremos del conector y deslícelo entre los orificios de la articulación, después suéltelo para que se sujete de los orificios.



La posición en que se coloque el conector determinará el ángulo en que se posicione cada miembro.

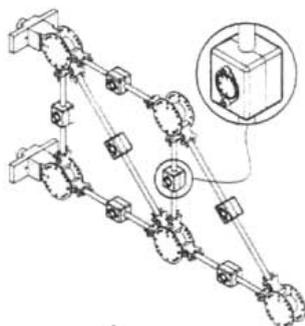


Cada miembro debe estar dirigido hacia el centro de la articulación que lo conecta.

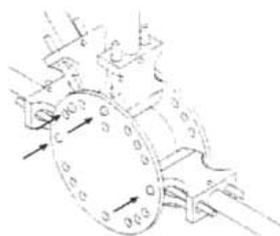


Descripción

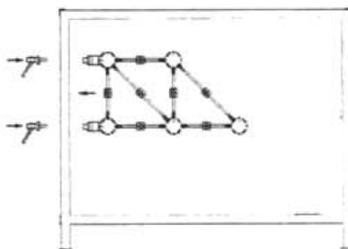
IMPORTANTE: Cuide que todos los conectores de las celdas de carga queden hacia el mismo lado.



PRECAUCIÓN: Para construir una armadura estable, cada miembro debe ser conectado firmemente a la articulación correspondiente, verificando que los pasadores entren perfectamente en los orificios.



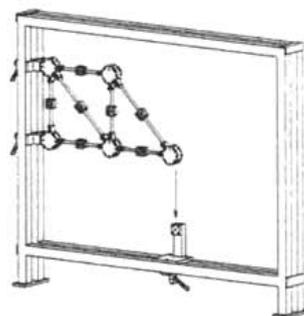
Fije la armadura ensamblada en el marco. Fije ambos soportes en la parte vertical izquierda del marco. El soporte superior a una altura próxima de 670 mm.



Coloque el soporte del aro de carga por debajo de la articulación extrema derecha.

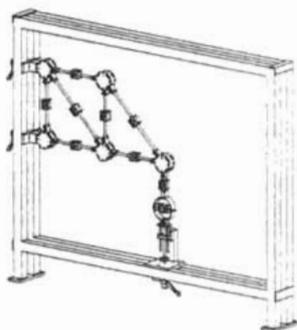
Fije el aro de carga en la cara inferior del marco.

Conecte el aro de carga a la articulación. Para ello ajuste con el tornillo.



Descripción

El conjunto debe quedar como se muestra en la figura:



NOTA: Verifique que la longitud de los miembros sea la que se mide entre los centros de las articulaciones que los conectan. La longitud real de cada miembro es 60 mm menor que la indicada anteriormente. Las longitudes reales de los miembros son las siguientes:

Miembro 1: 240 mm
Miembro 2: 364 mm

3.3 Medición de las fuerzas en los miembros

Para la medición de las fuerzas que actúan en la armadura se tienen que observar tres posibles resultados en cada elemento:

- Tensión (valor positivo)
- Compresión (valor negativo)
- Elementos neutro

3.3.1 Miembros con galgas de extensométricas

Las fuerzas en los miembros se miden con galgas extensométricas.

- Cada miembro tiene una celda de carga, instrumentada con galgas extensométricas, provista de un dispositivo de conexión.
- Las galgas están configuradas en un arreglo de puente completo.
- Cada miembro es provisto de un elemento compensador.

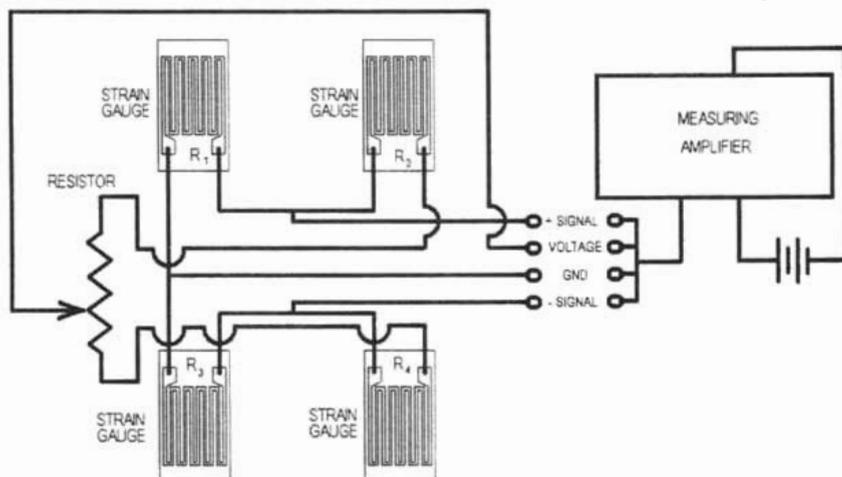
El compensador viene calibrado originalmente para trabajar en un rango de temperaturas de entre 20 y 50° C. A temperaturas extremas debe volverse a calibrar.

Descripción

Para alcanzar el estado de equilibrio térmico, el miembro debe de usarse por cerca de 10 minutos antes de ser recalibrado.

El miembro no debe estar cargado mientras es calibrado.

3.3.2 Diagrama de conexión eléctrica



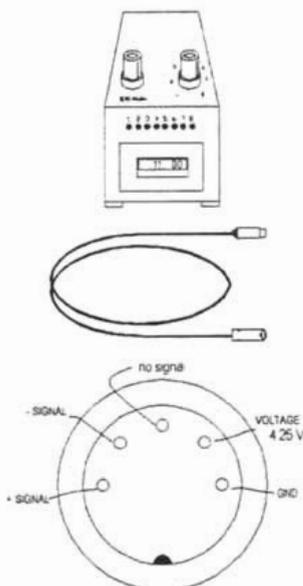
3.3.3 Amplificador de lecturas

El amplificador de lecturas da los resultados en una escala de 10 unidades equivalentes con 20 Newtons (N) en una pantalla digital de 4 dígitos.

Está diseñado para medir fuerzas en un rango de -500 a 500N

Gire la perilla de la izquierda para poner a cero la pantalla.

Los objetos de prueba son conectados con un cable (4) de 5 pines que se conecta en el socket (2) de la cara posterior del amplificador. La notación de cada pin es la mostrada en la Figura de la derecha.



El amplificador funciona con corriente alterna (AC).

El botón de encendido se encuentra en la parte trasera del aparato.

La perilla de la derecha del amplificador está numerada del 1 al 8. El amplificador está diseñado para que a cada celda de carga, instalada en cada miembro de la armadura, le corresponda con un canal calibrado para medir la señal del elemento cuyo número sea el correspondiente.

PRECAUCIÓN: El amplificador viene con la configuración óptima. Cuando el aparato es reconfigurado no se garantiza una correcta operación.

4. EXPERIMENTOS

4.1 MEDIDAS DE SEGURIDAD

PRECAUCIÓN: ¡Tenga cuidado de no sobrecargar el aparato la máxima carga en la armadura no debe exceder ± 250 N ;

IMPORTANTE: El sobrecargar el aparato es peligroso para los elementos, ya que estarían sujetos a deformación plástica y el aparato podría quedar inservible.

Para evitar errores en las mediciones se deben tomar dos lecturas; una con el miembro cargado y otra con el miembro sin carga.

- Al descargar la armadura las celdas de carga deben volver a cero o a un valor aproximado.
- Conecte el amplificador subsecuentemente con todos los miembros, cuidando que el canal seleccionado corresponda con el elemento que se mide.
- Cuando el valor que aparece en la pantalla se estabilice, léalo y anótelo. Es probable que la lectura del instrumento crezca ligeramente; en el primer minuto entre 5 y 10 unidades y luego se estabilice. Cuando se haya estabilizado tome la lectura. No se recomienda esperar demasiado tiempo para tomar la lectura ya que el instrumento puede inestabilizarse debido a efectos térmicos.

EXPERIMENTOS

- Conecte el amplificador con la celda de carga en la armadura y aplique la carga que se desee, por ejemplo 100 N. Controle la fuerza con el indicador de carátula del aro de carga cuya escala es:

$$1 \text{ división de la escala} = 1/100\text{mm} = 10 \text{ N.}$$

Conecte el amplificador nuevamente en todos los miembros de forma subsecuente y anote el valor de las medidas que se registren.

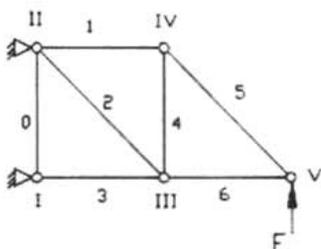
4.2 Preparación y realización del experimento.

Inicie la construcción de la armadura como se indica en la sección 3.

El siguiente paso es verificar que la estructura quede equilibrada, siguiendo los pasos que se indican en la sección 3.

Ahora la fuerza en cada elemento puede ser medida. Se recomienda el siguiente procedimiento:

- Presente la armadura sobre un plano.
- Numere consecutivamente cada elemento usando números arábigos.
- Numere consecutivamente cada junta con números romanos.
- Realice la medición de la fuerza en cada elemento como se indica en la sección 2, cargue con $F = 200 \text{ N}$ el nodo V, como se muestra en la Figura y anote los valores de las mediciones en una tabla.
-



Recuerde que se tiene que observar uno de los tres posibles resultados en cada elemento:

- Tensión (valor positivo)
- Compresión (valor negativo)
- Elemento neutro (valor cero)

EXPERIMENTOS

Tabla de resultados de las pruebas:

F [N]	S ₀ [N]	S ₁ [N]	S ₂ [N]	S ₃ [N]	S ₄ [N]	S ₅ [N]	S ₆ [N]
200							
Tipo							

4.3 Determinación de las fuerzas en los elementos con el método analítico deseado (nodos, secciones, etc.)

Determine la fuerza en cada elemento por el método teórico que usted desee y presente en la siguiente tabla los resultados obtenidos.

Tabla de resultados calculados:

F [N]	S ₀ [N]	S ₁ [N]	S ₂ [N]	S ₃ [N]	S ₄ [N]	S ₅ [N]	S ₆ [N]
200							
Tipo							

4.3.1 Determinación de las fuerzas en los elementos con el método gráfico del polígono de fuerzas.

La determinación de la fuerza en cada elemento comienza cuando una junta es cargada con un máximo de dos elementos, cuya fuerza es desconocida y una fuerza externa.

- Seleccione la junta conveniente (en este caso la junta V) y dibuje en un diagrama la fuerza F que actúa en ese punto usando una escala apropiada.
- Cierre el polígono de fuerzas tomando como referencia las direcciones de los elementos cuya fuerza se desconoce; los elementos de fuerza resultantes son S₅ y S₆.
- Dibuje la dirección de las fuerzas como se muestra en el dibujo. Se presentan los siguientes casos:

EXPERIMENTOS

El elemento cuya fuerza se dirige hacia la junta está sujeto a compresión.

El elemento cuya fuerza se dirige hacia fuera de la junta está sujeto a tensión.

En este caso: S_5 – elemento en compresión. S_6 – elemento en tensión.

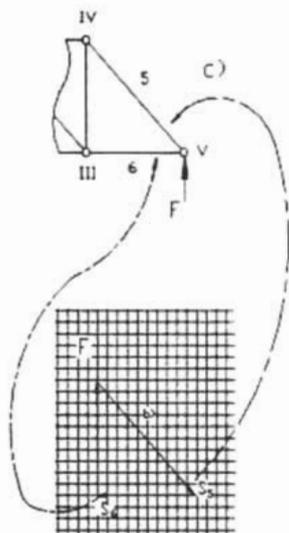


Figura 4.2

Seleccione la siguiente junta (junta IV) y regrese al paso b).

d) El proceso es completado una vez que la fuerza en todos los miembros se ha estabilizado.

Tabla de resultados obtenidos por el método gráfico

F [N]	S_0 [N]	S_1 [N]	S_2 [N]	S_3 [N]	S_4 [N]	S_5 [N]	S_6 [N]
200							
Tipo							

Para los elementos de la armadura (+ elemento en tensión / - elemento en compresión)

4.4 Comparación de resultados

Escriba los resultados obtenidos de las dos formas, teórica y práctica, en la siguiente tabla comparativa y calcule su desviación en porcentaje.

EXPERIMENTOS

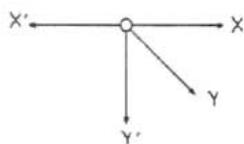
Tabla de comparación entre los valores medidos y los valores calculados de las fuerzas para los elementos de la armadura

	F(N)	S ₀ (N)	S ₁ (N)	S ₂ (N)	S ₃ (N)	S ₄ (N)	S ₅ (N)	S ₆ (N)
Medido	200							
Calculado	200							
Desviación (%)	---							

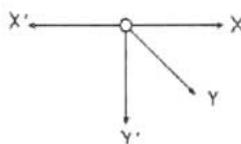
4.5 Método Analítico de descomposición de vectores

Este método consiste en calcular las componentes de cada una de las fuerzas definidas en una base original xy y referidas a una base $x'y'$. Lo anterior se logra simplemente obteniendo una matriz de paso, o mejor dicho un tensor de cambio de base, de la base xy a la base $x'y'$ y multiplicarla por el vector fuerza referido a la base xy .

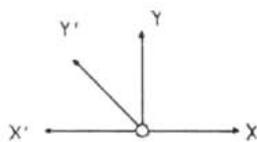
Las columnas de dicha matriz son las componentes de cada uno de los ejes originales (x y) en la nueva base ($x'y'$).



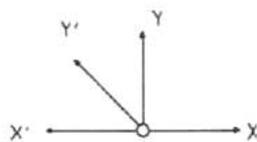
I)



IV)



III)



V)

Definición de bases asociadas a cada nodo.

EXPERIMENTOS

Para calcular las fuerzas en los elementos se debe iniciar con la junta V. En este caso, es más fácil encontrar la matriz de paso de $x'y'$ a xy la cual se expresa como:

$$M_{x'y' \rightarrow xy} = \begin{pmatrix} -1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}$$

luego, la matriz deseada; $M_{xy \rightarrow x'y'}$, se obtiene calculando la inversa de la matriz anterior es decir:

$$M_{xy \rightarrow x'y'} = M_{x'y' \rightarrow xy}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{pmatrix}$$

Finalmente, al multiplicar la matriz anterior por el negativo del vector fuerza, aplicado sobre la junta V, se obtienen las magnitudes de S6 y S5 como:

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ -\sqrt{2}F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S6 \\ S5 \end{pmatrix}$$

Para identificar con mayor claridad las bases definidas en una junta en particular se recomienda usar la siguiente notación, para el caso de la junta V:

$$M_{xy \rightarrow x'y'} = M_{I' \rightarrow I''}$$

Una vez conociendo S5 se procede a calcular S1 y S4, analizando la junta IV de manera análoga a como se analizó V, pero sin cambiar el signo de la fuerza en la base original. Luego, conociendo S4 y tomando S6 del primer cálculo, se obtienen S3 y S2 analizando la junta III. Finalmente se calcula Rax analizando la junta II considerando que se trata de una articulación.

En la Figura se muestran las bases o sistemas de referencia definidos en cada junta. Cabe mencionar que para el aparato de armadura todos los ángulos son de 45°.

En la siguiente tabla se presenta el resultado del análisis realizado en cada nodo donde se dan las magnitudes de las fuerzas en cada elemento, referidos a la Figura, en términos de la fuerza (F) externa aplicada en el nodo V.

F [N]	S0[N]	S1[N]	S2[N]	S3[N]	S4[N]	S5[N]	S6[N]
F	0	-F	$-\sqrt{2}F$	2F	F	$-\sqrt{2}F$	F

Este método es particularmente importante porque de la tabla anterior podemos determinar de manera teórica los valores de fuerza esperados en cada elemento para una fuerza externa dada. Así mismo, de los valores mostrados en la tabla, se puede ver fácilmente que la máxima carga externa es dos veces la carga que seleccione.

CUESTIONARIO

5. CUESTIONARIO

1. Explique ¿Cuáles fueron las desviaciones encontradas entre el método experimental y el método convencional?
2. ¿Las desviaciones son aceptables?
3. ¿Por qué cree que no se obtienen resultados exactos?
4. ¿El método de descomposición de vectores dió los resultados obtenidos por los métodos convencionales? ¿Le parece complicado?
5. ¿Qué otros métodos no convencionales existen para el cálculo de reacciones en armaduras?
6. ¿En la práctica cree que se encuentre con configuraciones tan sencillas como la estudiada?
7. ¿Cuál de todos los métodos convencionales es el que más le agrada?
8. Si tuviera que analizar una armadura parecida a la configuración Estudiada, pero con 20 nodos. ¿Utilizaría un método convencional para analizarlo? ¿Utilizaría el método que más le agrada?
9. ¿En qué tipos de errores se pudo caer al momento de medir las reacciones?
10. ¿Existirán otros métodos para medir reacciones aparte de las galgas Extensométricas? Coméntelo con su profesor.
11. ¿Qué mide realmente la galga extensométrica?
12. Si pudiera agregar o quitar algo referente a la práctica, ¿qué propondría?

6. Conclusiones

De sus propias conclusiones sobre la práctica

APÉNDICE

7 APÉNDICE

7.1 Datos técnicos

Elementos

Máxima fuerza en un elemento ± 500 N

Elemento N°	Longitud nominal	Longitud entre conectores	Número
1	300mm	240mm	5
2	424mm.	364mm	2

Medición de la fuerza con galgas de deformación a 350Ω con ajuste predeterminado.

Conexión de 5 pines DIN.

Pin	Asignación
1	Alimentación + U_s (10 V)
2	Señal +
3	-
4	Señal -
5	Alimentación - U_s (10 V)

Nodos

Número: 3
Posiciones angulares $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
Carga del aparato
Rango de fuerza ± 500 N
Escala 1000 N/mm
Ajuste 90 mm

Conclusiones generales

El estudio realizado permitió llegar a las siguientes conclusiones:

Se diseñó un equipo didáctico que permite simular el fenómeno de la generación de reacciones en una armadura compuesta plana debido a la aplicación de una carga puntual externa.

El equipo diseñado es capaz de funcionar con los siguientes parámetros:

- a. Medir las reacciones en cada uno de los elementos de la armadura con una precisión de 1 N.
- b. Soportar cargas puntuales 300 N.
- c. Ensayar dos configuraciones geométricas de armaduras planas.

El prototipo de la armadura diseñada fue capaz de simular el fenómeno con una precisión razonable para fines didácticos. La desviación máxima encontrada fue de 20 % respecto a los cálculos teóricos.

El prototipo fue construido con aproximadamente 85% de materiales disponibles en el mercado nacional y 95 % del mismo fue elaborado en el laboratorio y por técnicos nacionales.

Se generó la información técnica necesaria para reproducir el dispositivo o bien proponer un posible rediseño que abarate los costos de fabricación.

La calidad lograda en el prototipo iguala a la de equipos similares encontrados en el mercado, procedentes de Alemania e Inglaterra.

Los costos de fabricación del prototipo resultaron competitivos, lo cual permitió que la empresa que financió la construcción lo comercializara.

Se desarrolló un método analítico capaz de calcular la magnitud de las reacciones en cada miembro de la armadura en términos de la fuerza externa aplicada. El método propuesto resulta fácil de programar; por lo que, puede considerarse más versátil que otros métodos conocidos, además es aplicable a armaduras tanto planas como espaciales, siempre y cuando se cumpla la condición de que en un nodo se tenga una fuerza conocida y hasta 3 elementos convergentes.

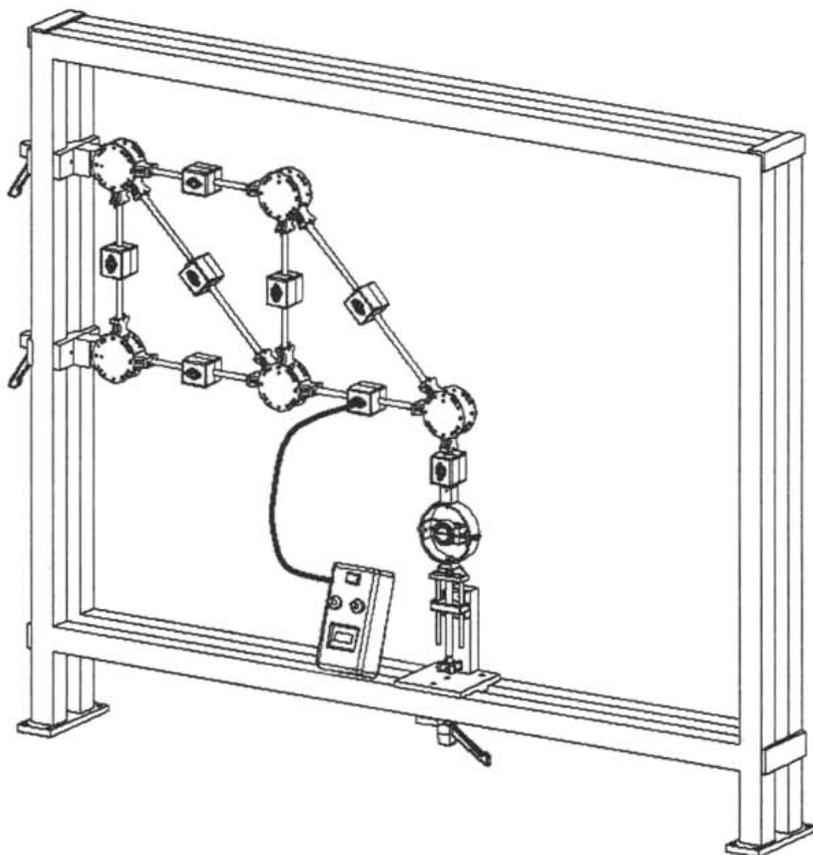
APÉNDICE I
PLANOS DE ENSAMBLE Y ELEMENTOS

LISTA DE ENSAMBLES Y PARTES

MAQUINA DE ARMADURAS			
Número de ensamble	Descripción	Cantidad	Código
I	Ensamble General	1	MA-I-00
II	Marco universal	1	MA-II-00
III	Articulación de conexión con soporte	2	MA-III-00
	Componentes		
	Manija	2	MA-III-01
	Zapata J	2	MA-III-02
	Acople zapata M	2	MA-III-03
	Zapata M	2	MA-III-04
	Ancla	2	MA-III-05
	Nodo	2	MA-III-06
	Seguro de nodo	4	MA-III-07
IV	Barra (con conexión)	7	MA-IV-00
	Componentes		
	Barra larga	2	MA-IV-01
	Barra corta	5	MA-IV-02
V	Cabeza principal (ensamble)	15	MA-V-00
	Componentes		
	Cabeza principal	15	MA-V-01
	Bastón de cabeza principal	30	MA-V-02
	Base de bastón	30	MA-V-03
	Resorte	15	MA-V-04
	Seguro	15	MA-V-05
VI	Aro de carga	1	MA-VI-00
	Componentes		
	Cabeza principal completo (ya incluido)	1	----
	Barra aro	1	MA-VI-01
	Soporta celda	1	MA-VI-02
	Aro de carga	1	MA-VI-03
	Soporte de indicador	1	MA-VI-04
	Indicador	1	MA-VI-05
	Apoyo aro	1	MA-VI-06
	Soporte de guía	1	MA-VI-07
	Guía	2	MA-VI-08
	Tornillo guía	1	MA-VI-09
	Maneral	1	MA-VI-10

**LISTA DE ENSAMBLES Y PARTES
(CONTINUACIÓN)**

	Soporte base indicador	1	MA-VI-11
	Complemento soporte guía	1	MA-VI-12
VII	Soporte de aro de carga	1	MA-VII-00
	Componentes		
	Apoyo	1	MA-VII-01
	Apoyo base	1	MA-VII-02
	Apoyo zapata	1	MA-VII-03
	Acople zapata M	1	MA-VII-04
	Zapata J	1	MA-VII-05
	Manija	1	MA-VII-06
VIII	Elementos independientes		
	Nodo	3	MA-VIII-01
	Din	8	MA-VIII-02
	Protector frente	8	MA-VIII-03
	Protector trasero	8	MA-VIII-04



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (ENEP-ARAGÓN)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto:

Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN:

Ensamble General

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL:

FABRICAL:

1

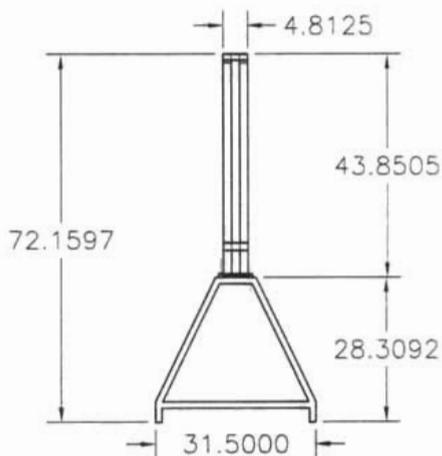
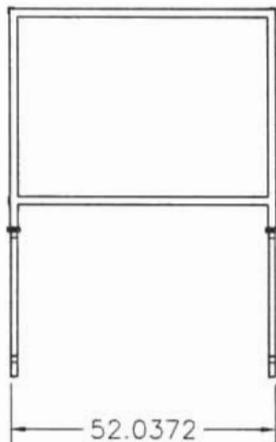
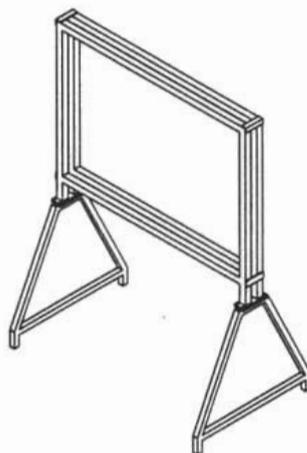
Dibujo: ****

ACOT.:

Revisó: Jacinto Cortés P.

Observaciones:

ESCALA:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (ENEP-ARAGÓN)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto:

Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN:

Marco Universal

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL:

ACERO 1018

FABRICAR:

1

Dibujo:

ACOT.:

PULG.

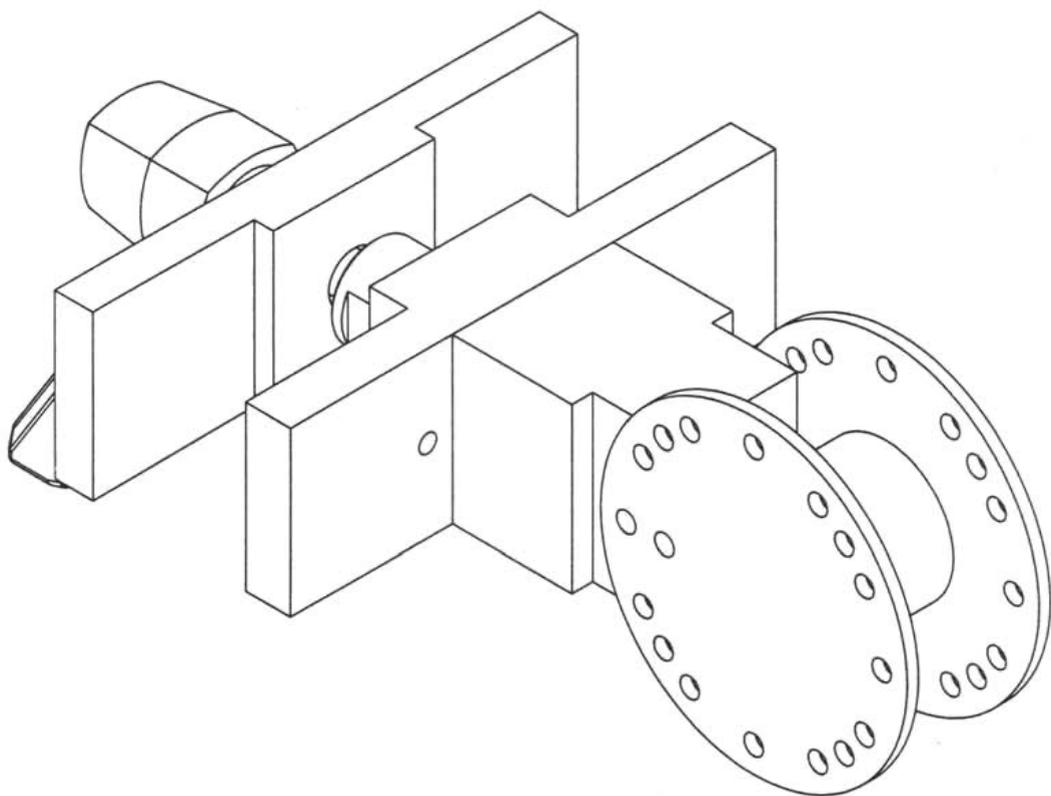
Revisa:

Jacinto Cortés P.

Observaciones:

ESCALA:

.0325:1



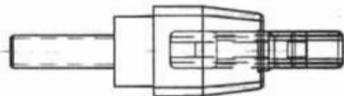
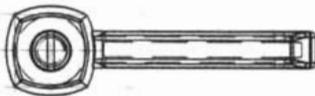
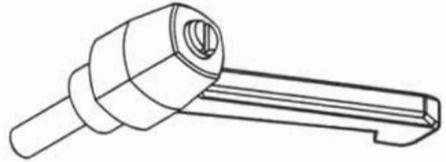
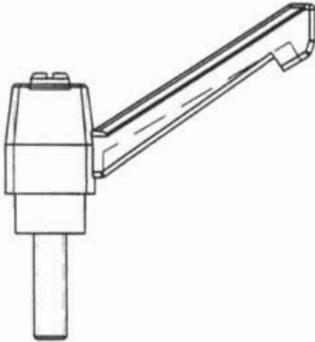
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (ENEP-ARAGÓN)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Articulación de Conexión
con Soporte

Diseño: F. Néstor García C.	MATERIAL:	FABRICAR: 2
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortés P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1
Autorizó: Jacinto Cortes P.		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto:

Máquina de Armaduras

DISEÑO:

Manija

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL:

FABRICAR:

2

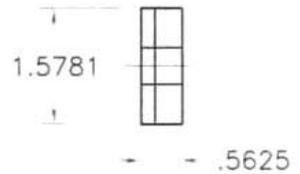
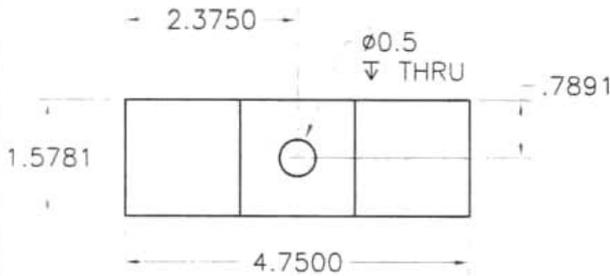
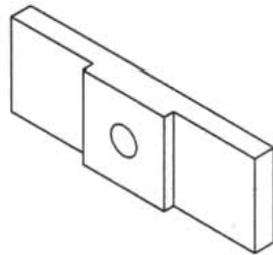
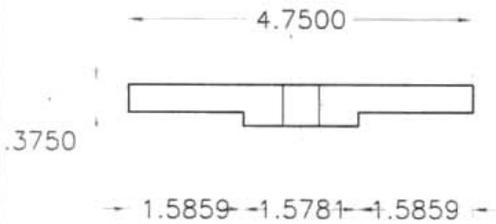
Dibujo: **** ****

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 0.6:1



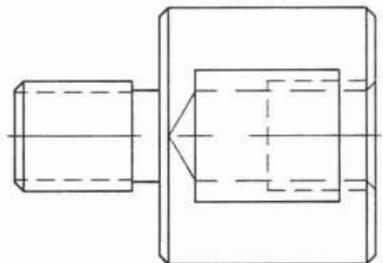
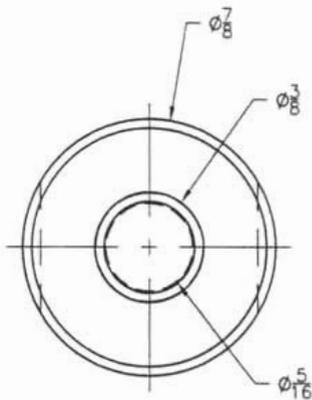
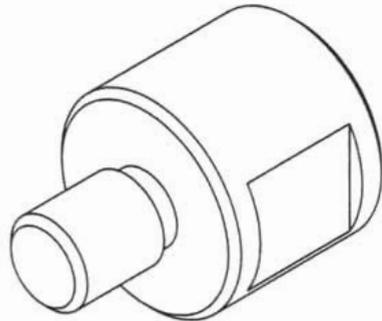
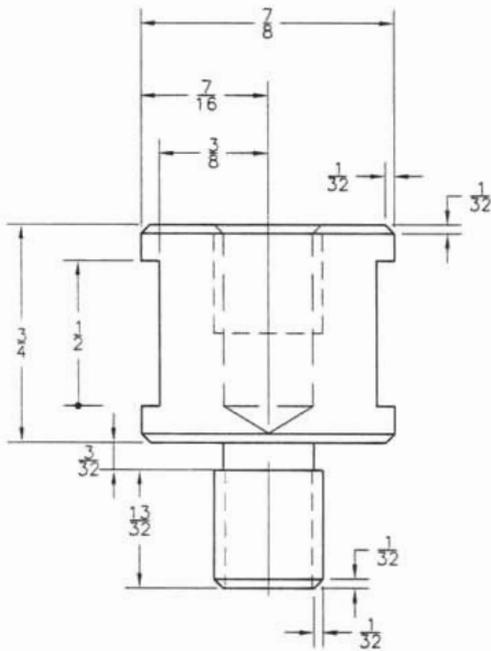
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Zapato J

Diseño: F. Néstor García C.	MATERIAL: Aluminio	FABRICA: 2
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.5:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Acople zapata "M"

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: BRONCE

FABRICAR: 2

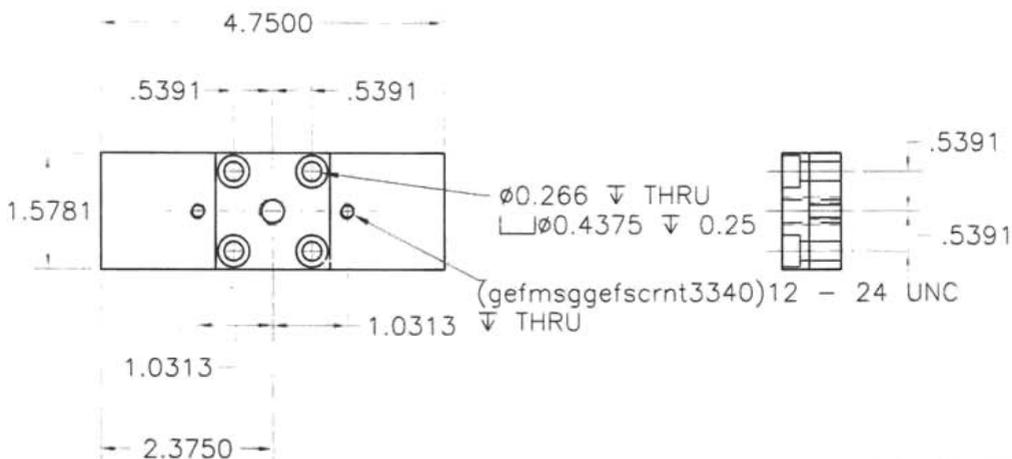
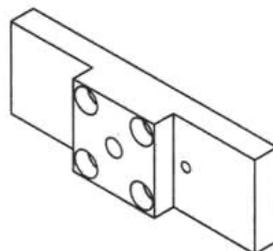
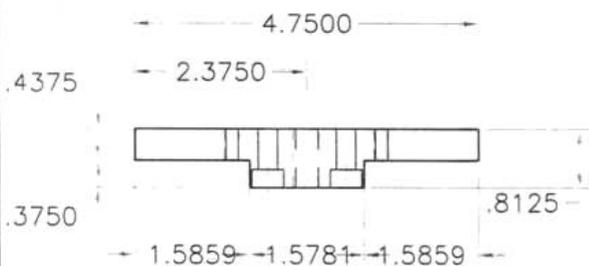
Dibujo: ***

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 2:1



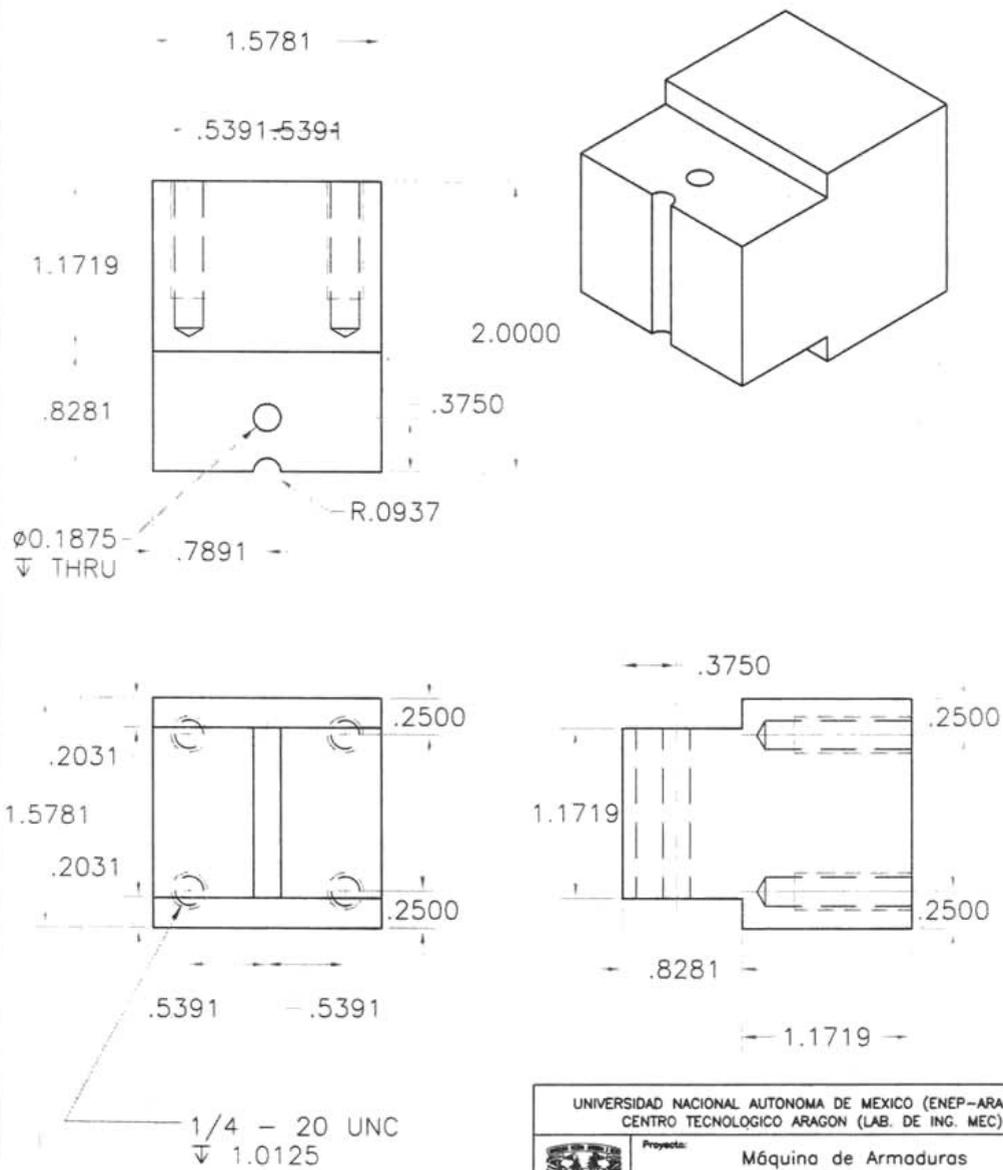
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



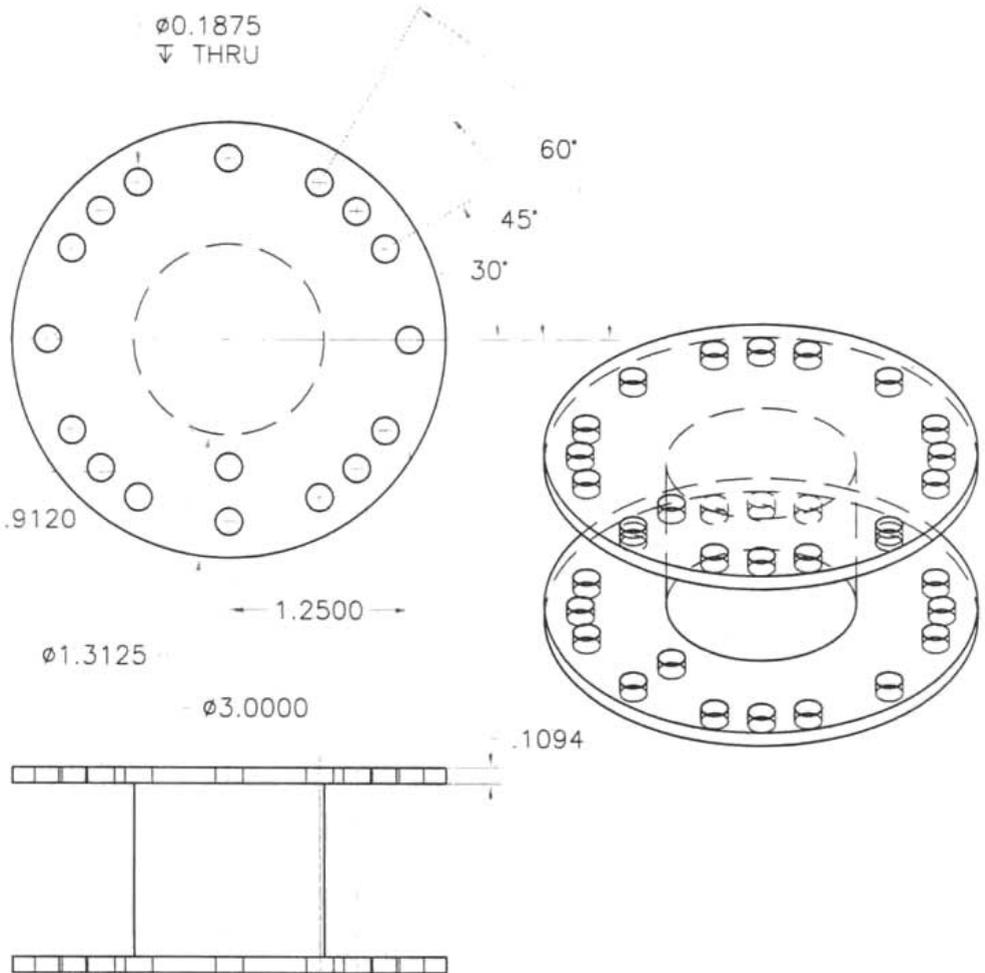
Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Zapata M

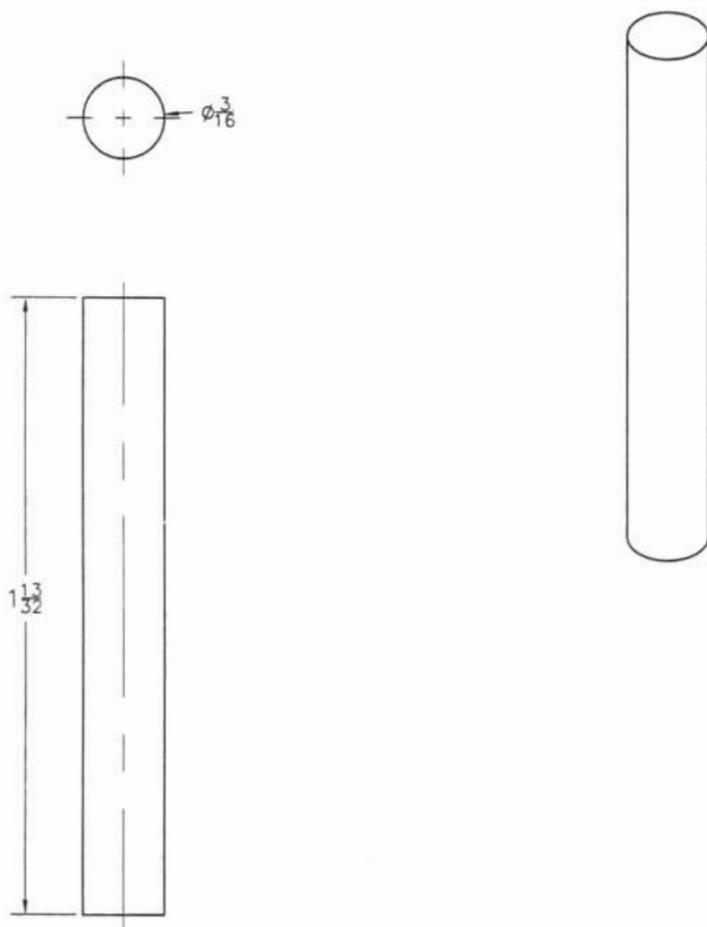
Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Aluminio	FABRICAL: 2
Dibujo: ****		ADOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.5:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto: Máquina de Armaduras		
	DESCRIPCIÓN: Ancla		
Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Aluminio	FABRICA: 2	
Dibujo: ***		ACOT.: PULG.	
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCION:	Nodo	
Diseño:	F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	Dura-Aluminio
Dibujo:	****	FABRICAR:	2
Revisó:	Jocinto Cortes P.	ADOT.:	PULG.
		Observaciones:	ESCALA: 1:1



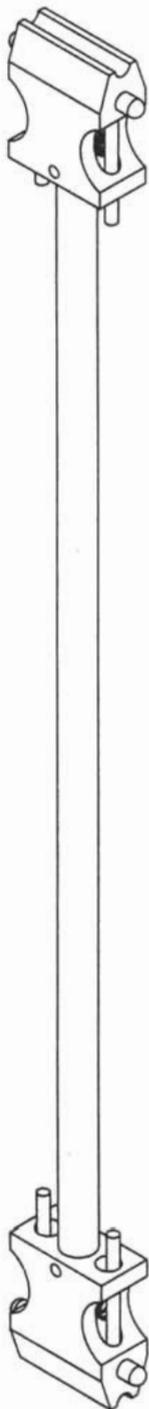
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Seguro Nodo

Diseño: F. Néstor García C.	MATERIAL: Acero Inoxidable	FABRICAR: 4
Dibujo: ****	Observaciones:	ADOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.		ESCALA: 3:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto: Máquina de Armaduras		
	DESCRIPCION: Barra con Conexion		
Diseñó: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: ACERO 1018	FABRICAR: 7	
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.	
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1	
Autorizó: Jacinto Cortes P.			

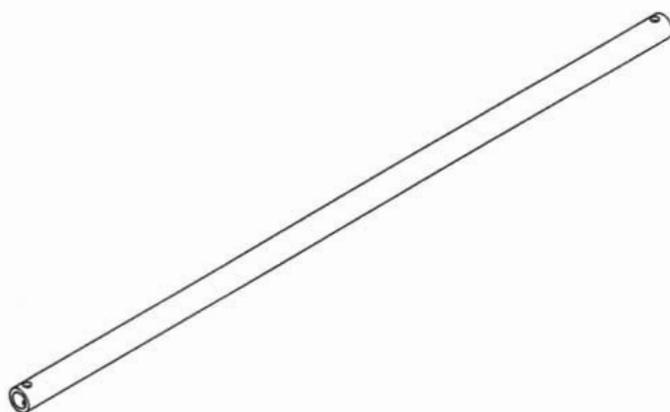
.1875 - - .1563

12.5992

.1875 - - .1563

.1875

∅.2500



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Barro Largo

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: Acero Inoxidable

FABRICAR: 2

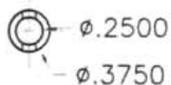
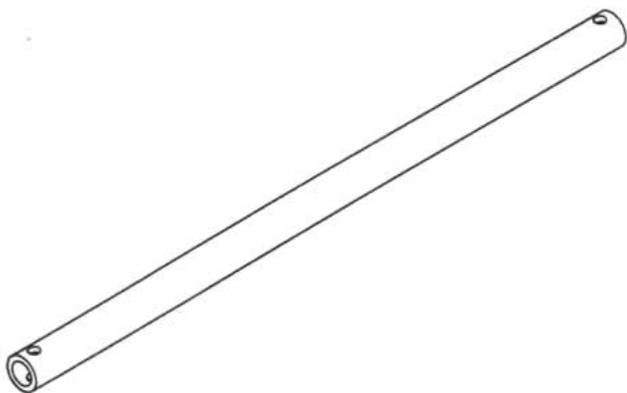
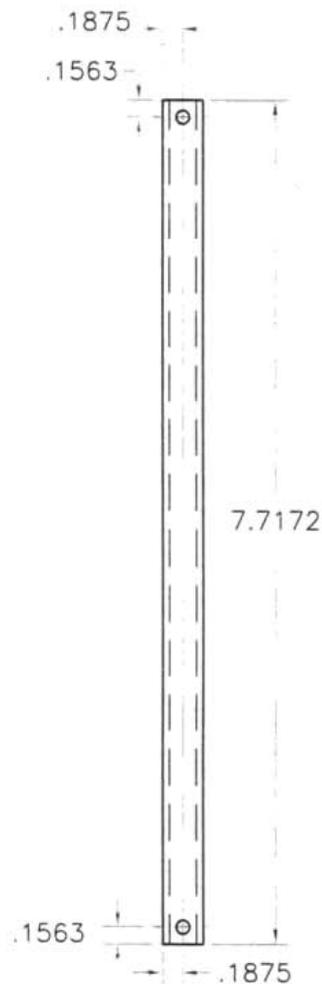
Dibujo: ****

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 0.5:1



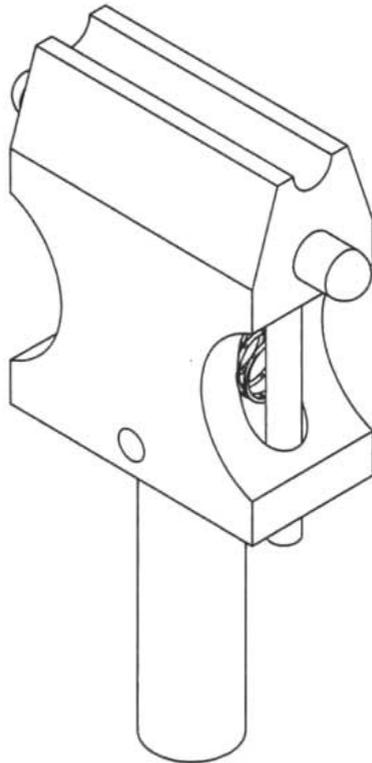
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

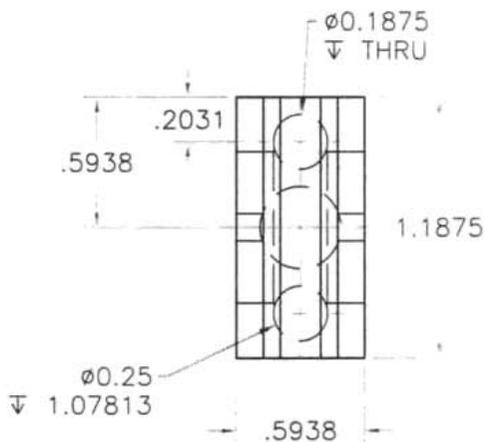
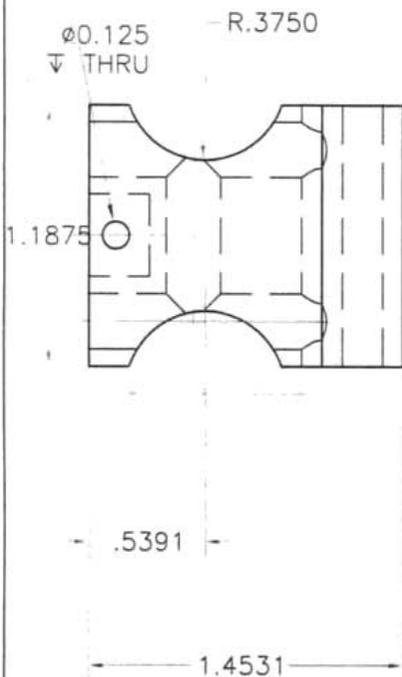
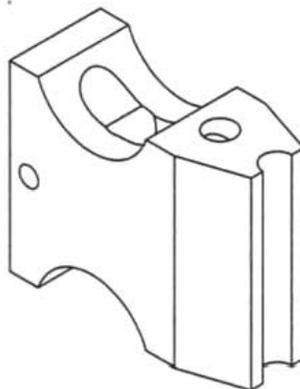
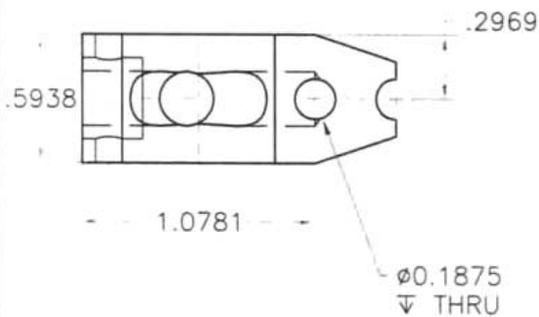
DESCRIPCION: Barra Corta

Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Acero Inoxidable	FABRICAR: 5
Dibujo: ***		ADOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)

	Proyecto:	Máquina de Armaduros	
	DESCRIPCION:	Cabeza Principal-Ensamble	
Diseño:	F. Néstor García C.	MATERIAL:	FABRICAR: 15
Dibujo:	**** **		ACOT.: PULG.
Revisó:	Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1
Autorizó:	Jacinto Cortes P.		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armadura

DESCRIPCION: Cabeza Principal

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: Dura-Aluminio

FABRICA: 15

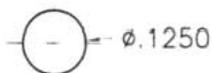
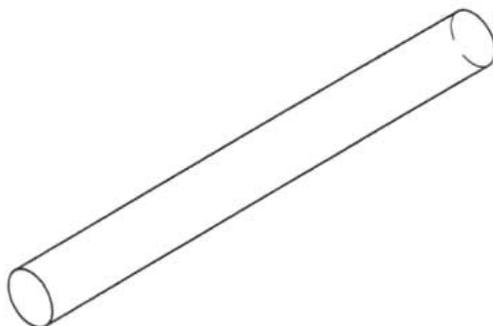
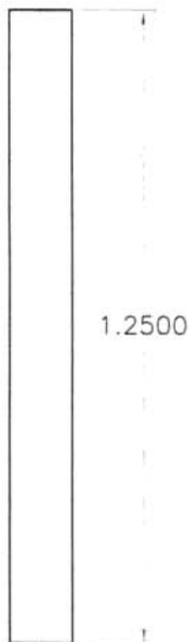
Dibujo: ****

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 0.75:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



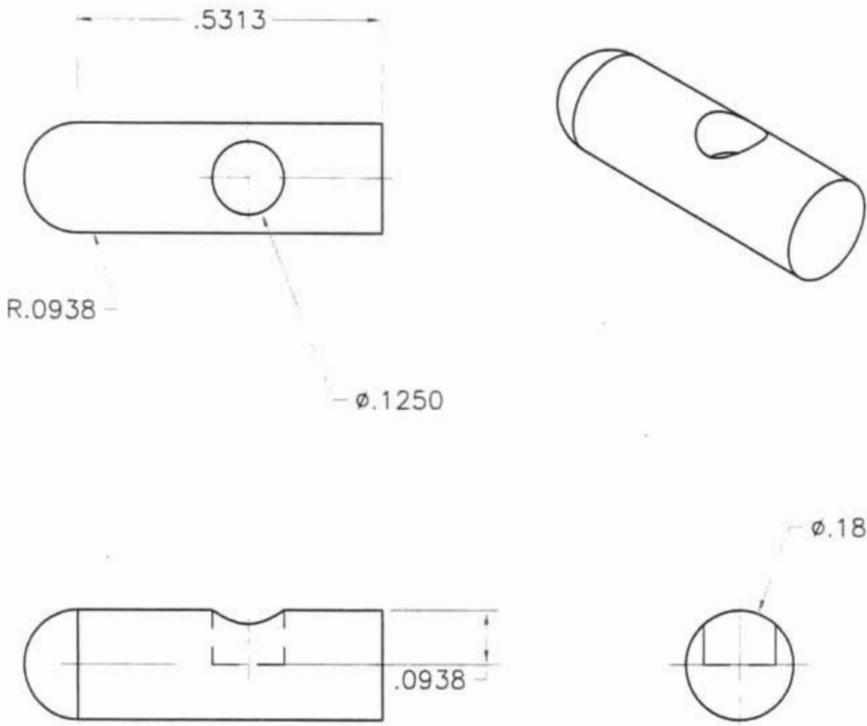
Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Bastón de Cabeza Principal

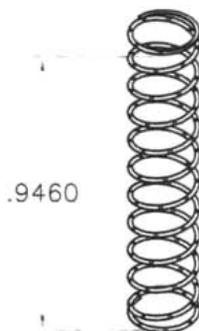
Diseño: F. Nestor Garcia C. MATERIAL: Duro-Aluminio FABRICA: 30

Dibujo: wwww ACOT.: PULG.

Rancho: Jacinto Cortes P. Observaciones: ESCALA: 3.5:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
		Proyecto: Máquina de Armaduras	
		DESCRIPCIÓN: Base de Bastón	
Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Dura-Aluminio	FABRICAR: 30	
Dibujo: **** ****		ACOT.: PULG.	
Revista: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 4:1	



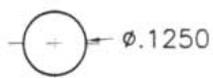
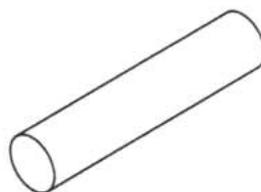
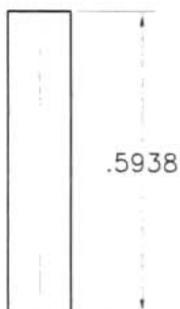
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Resorte Cabeza Principal

Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Acero	FABRICAR: 15
Dibujo: **** ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Seguro

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL: Acero Inoxidable

FABRICAR: 15

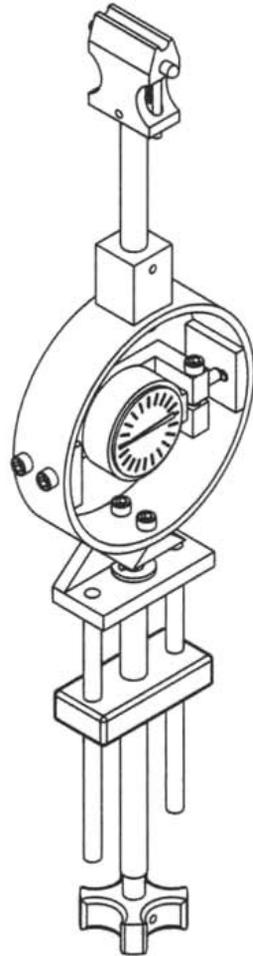
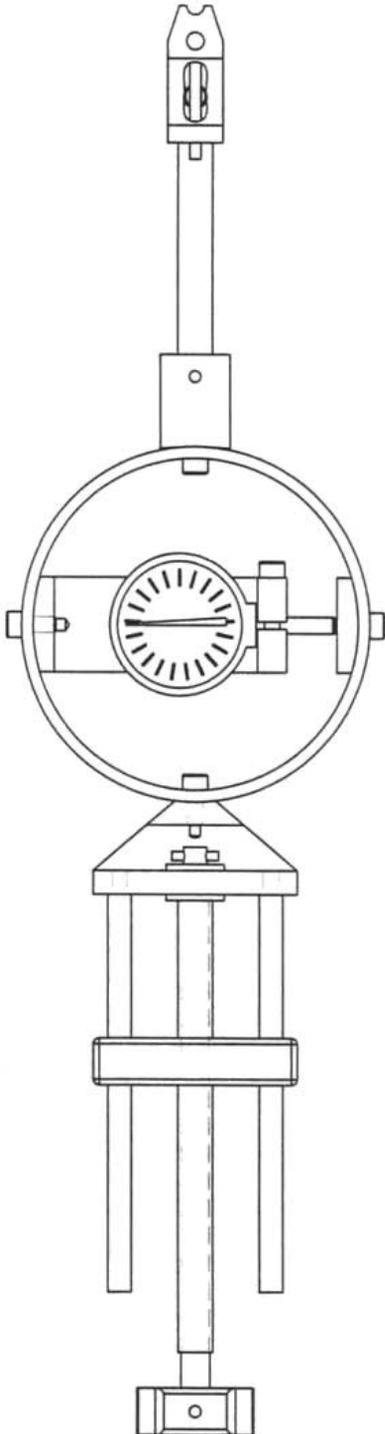
Dibujo: ****

ADOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 3.5:1



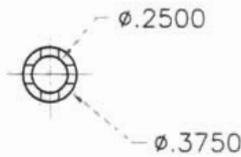
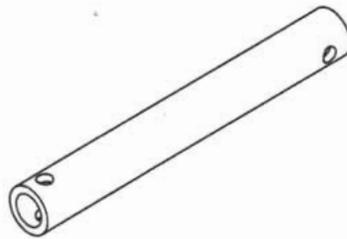
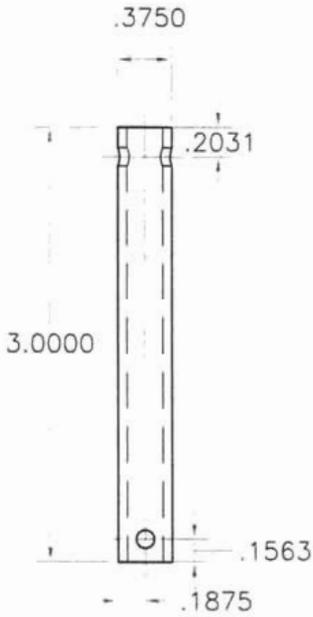
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



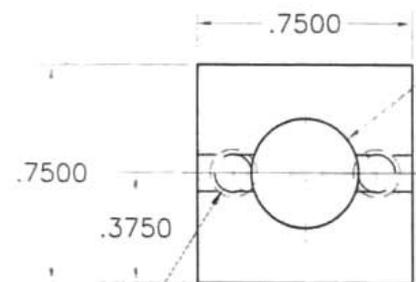
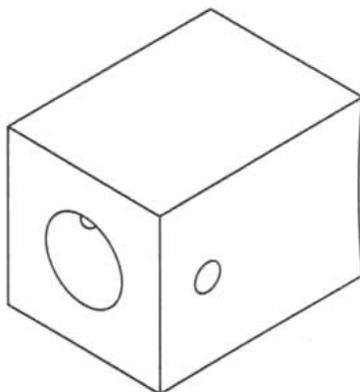
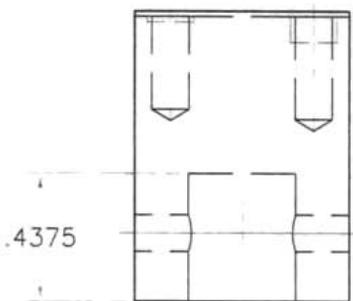
Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Aro de Carga-Ensamble

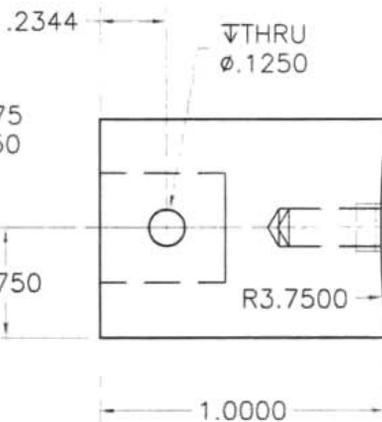
Diseño: F. Néstor García C.	MATERIAL:	FABRICAR: 1
Dibujo: **** **		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1
Autorizó: Jacinto Cortes P.		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCION:	Barra Aro	
Diseño:	F. Nesotr Garcia C.	MATERIAL:	Acero inoxidable
Dibujo:	***	FABRICAR:	1
Revisó:	Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ACOT.: PULG. ESCALA: 0.75:1



∇.4375
∅.3750



32 UNC
∇ 0.625

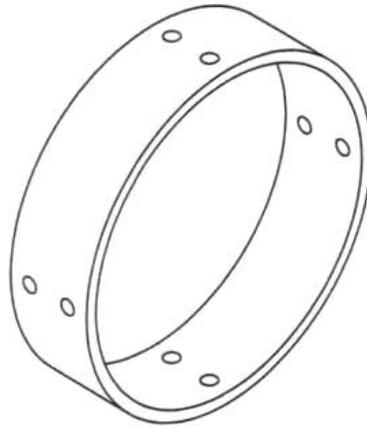
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



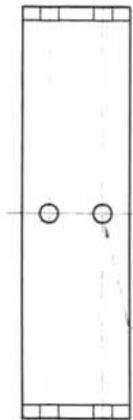
Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Soporta Celda

Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Aluminio	FABRICAR: 1
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1
Autorizó: Jacinto Cortes P.		

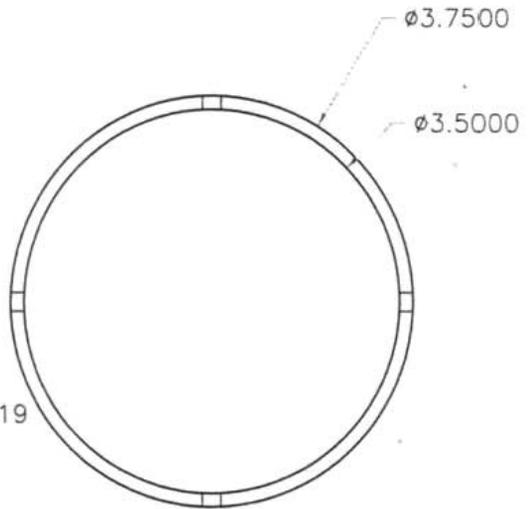


.2500 .2500



(8) THRU ϕ .1719

- 1.0000 -



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Aro de Carga

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: Acero Inoxidable

FABRICAR: 1

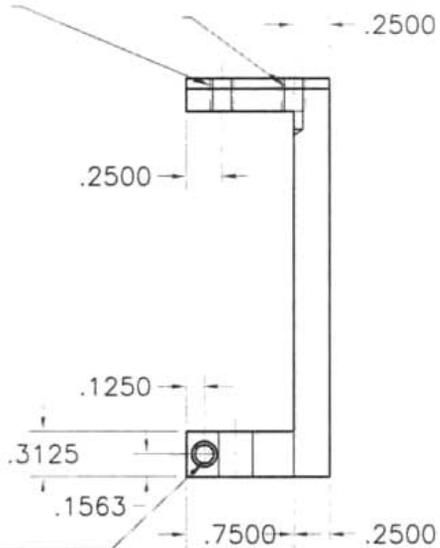
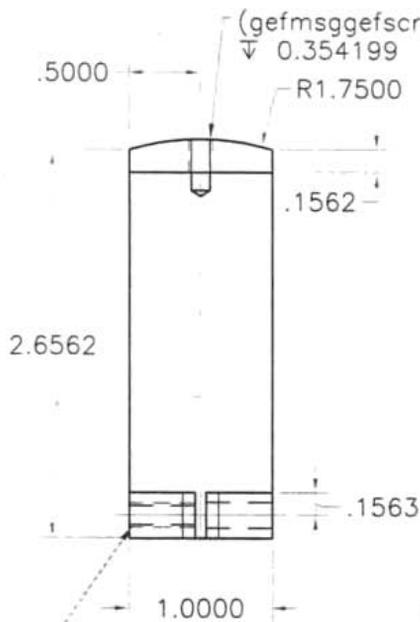
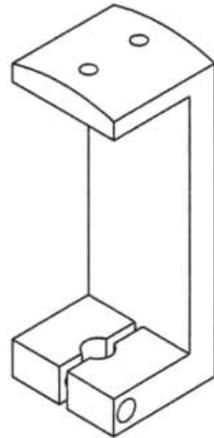
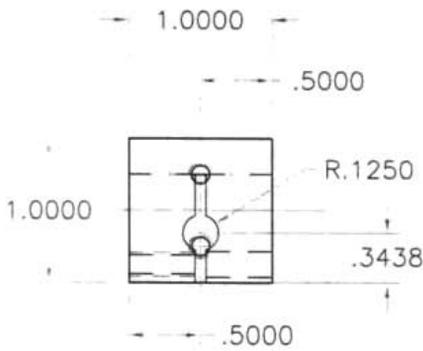
Dibujo: ***

ADOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

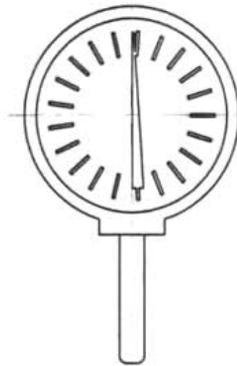
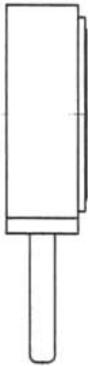
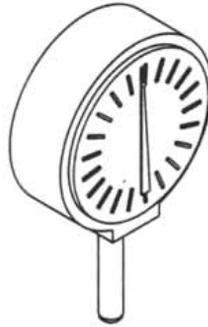
Observaciones:

ESCALA: 0.75:1



(gefmsggefscnt3340)8 - 32 UNC
 ∇ THRU

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCION:	Soporte de indicador	
Diseño:	F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	Aluminio
Dibujo:	****	FABRICA:	1
Revisó:	Jacinto Cortes P.	ADOT.:	PULG.
		Observaciones:	ESCALA: 0.75:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Indicador

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL:

FABRICAR: 1

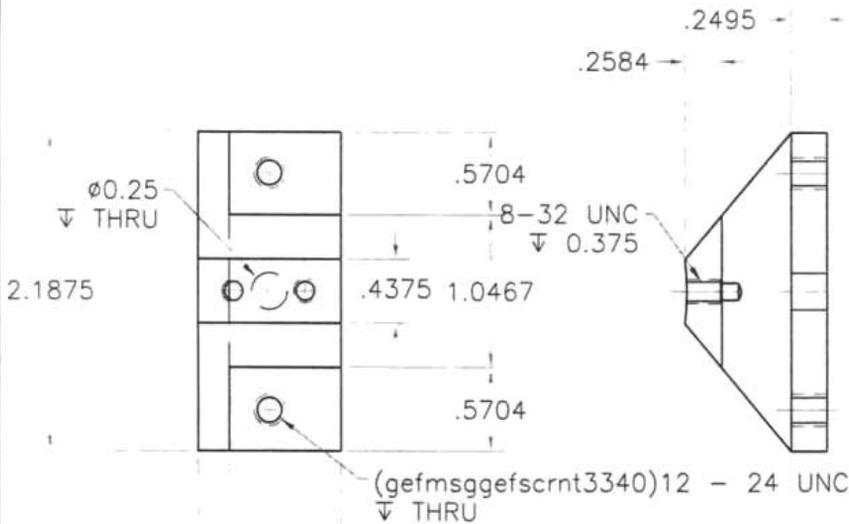
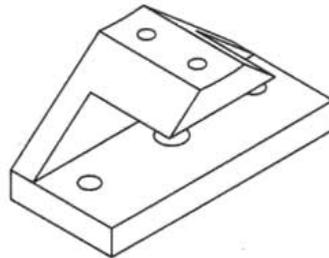
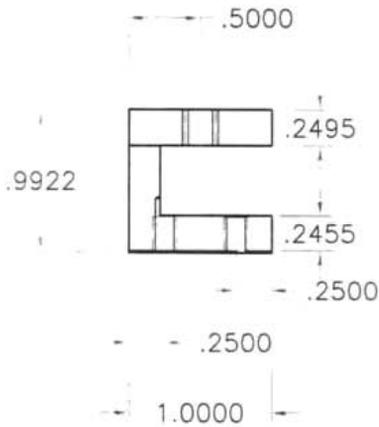
Dibujo: **** **

ACOT.: PULG.

Reviso: Jacinto Cortes P.

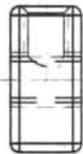
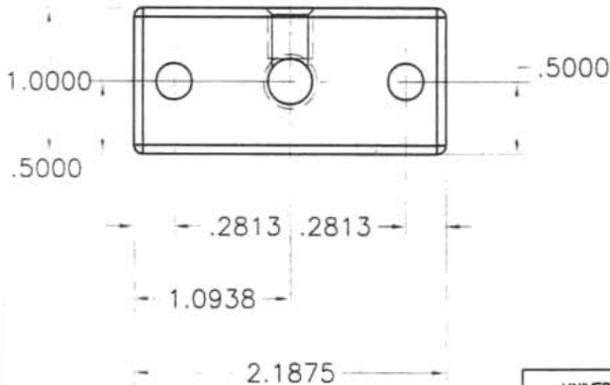
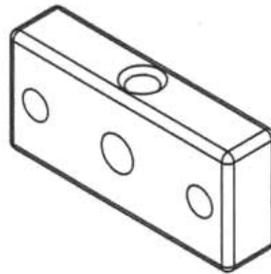
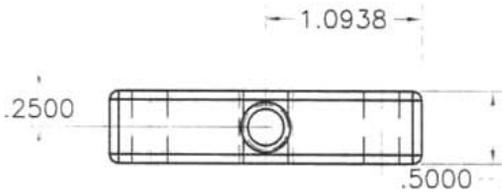
Observaciones:

ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)

	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCIÓN:	Apoyo Aro	
Diseño:	F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	Aluminio
Dibujo:	****	FABRICAR:	1
Revisión:	Jacinto Cortes P.	ACOT.: PULG.	
		Observaciones:	ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (ENEP-ARAGÓN)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Soporte de Guía

Diseño: F. Néstor García C.

Dibujo: ****

Revisó: Jacinto Cortes P.

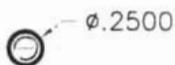
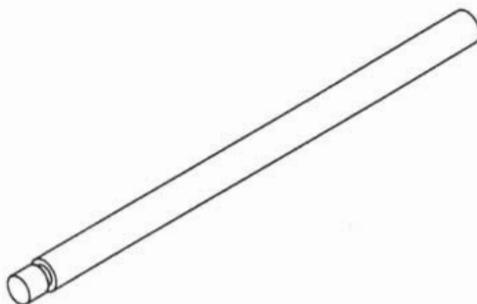
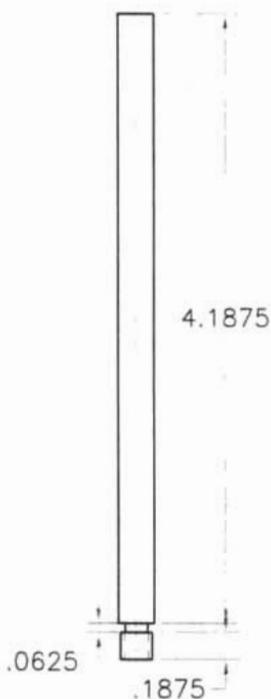
MATERIAL: ACERO 1018

Observaciones:

FABRICAR: 1

ACOT.: PULG.

ESCALA: 0.75:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Guía

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: Acero 1018

FABRICAR: 2

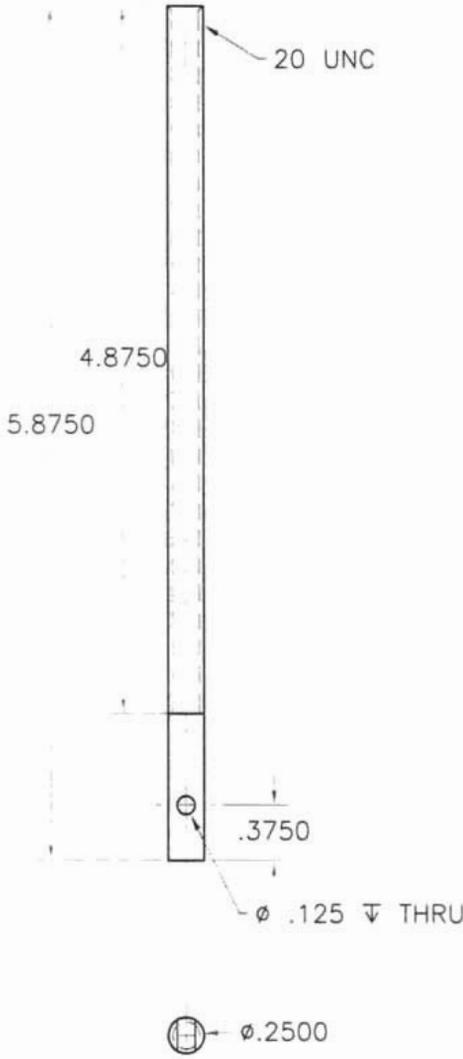
Dibujo: ****

ADOT.: PULG.

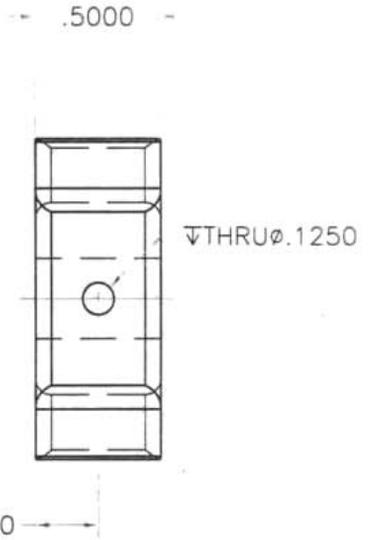
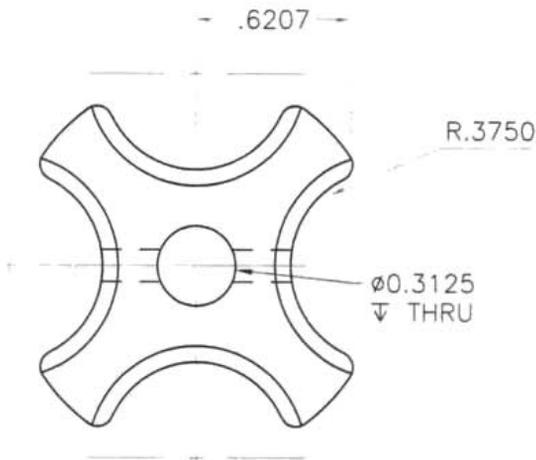
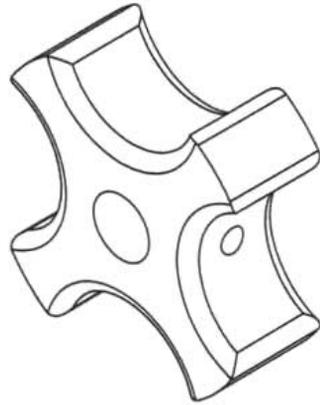
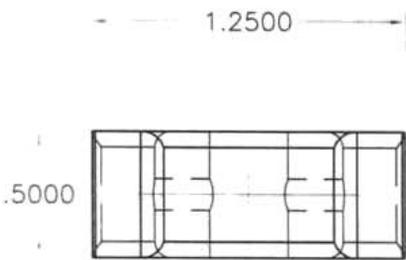
Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 1:1

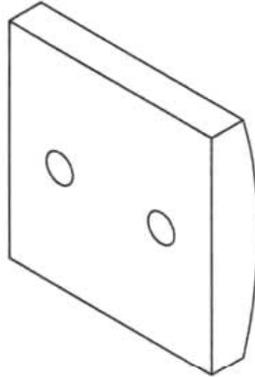
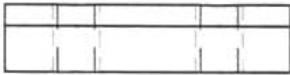


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto: Máquina de Armaduras		
	DESCRIPCION: Tornillo Guía		
Diseño: F. Nestor García C.	MATERIAL: Acero 1018	FABRICA: 1	ACOT.: PULG.
Dibujo: **** **	Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1



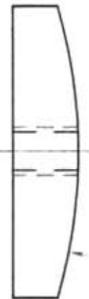
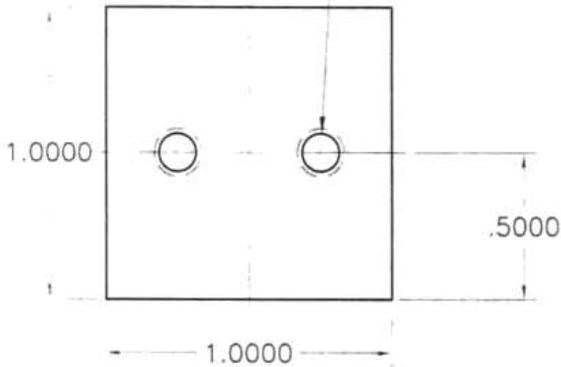
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCIÓN:	Maneral	
Diseño:	F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	Nylamin
Dibujo:	****	FABRICAR:	1
Revisó:	Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ACOT.: PULG. ESCALA: 1.75:1

--- .2500



--- .2500

(2)(gefmsggefscrrt3340)8 - 32 UNC
 ↓ THRU



R1.7500

.1562

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
 CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Soporte Base Indicador

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL:

FABRICA: 1

Dibujo: ***

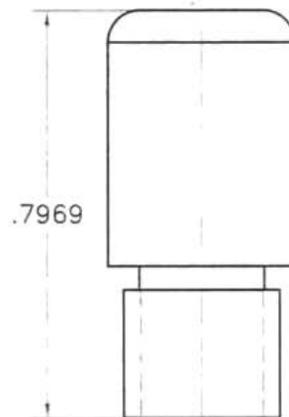
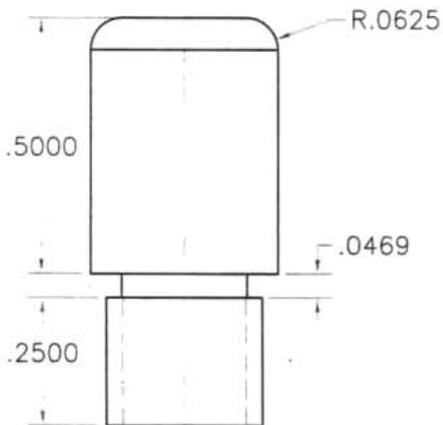
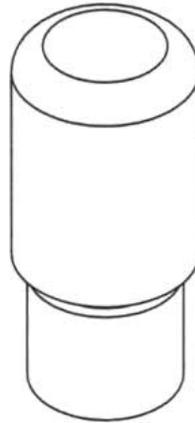
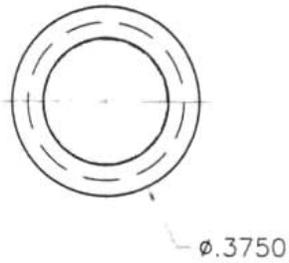
Aluminio

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 2:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)

Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Complemento soporte guía

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL: ACERO 1018

FABRICAR: 1

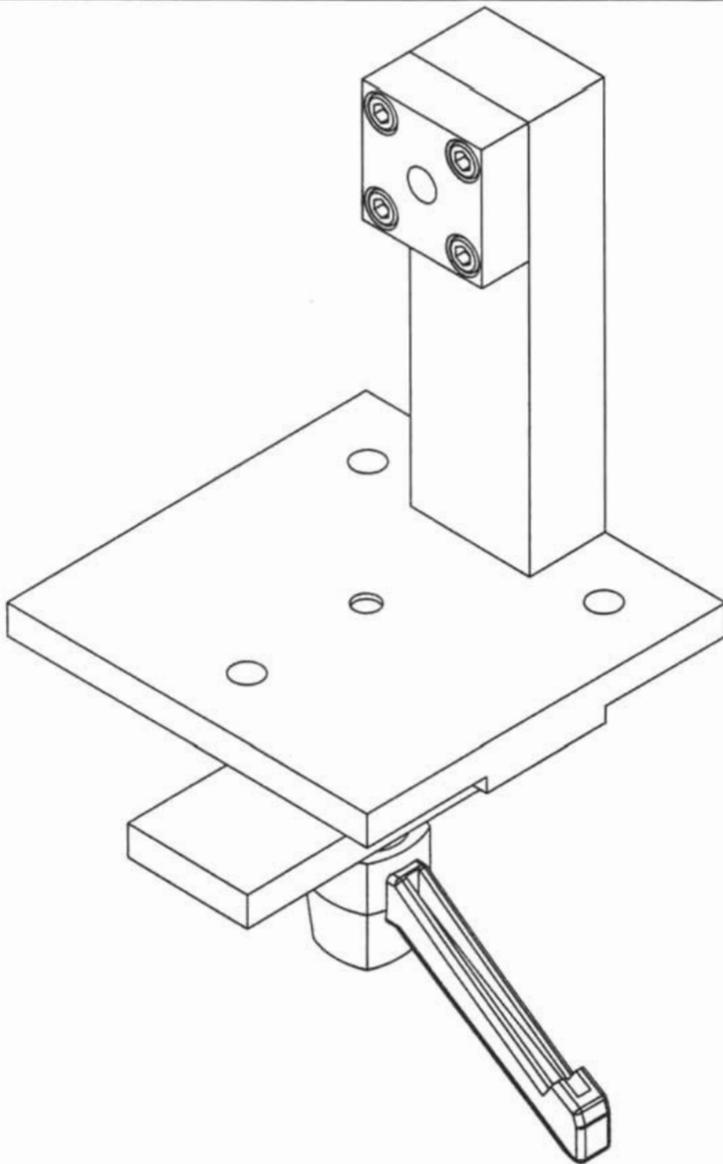
Dibujo: **** ****

ACOT.: PULG.

Revisó: Jocinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 0.75:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto:

Máquina de Armadura

DESCRIPCION:

Soporte de aro de Carga

Clasificación:

F. Nestor Garcia C.

MATERIAL:

FABRICA:

1

Dibujo:

ACOT.:

PULG.

Revisión:

Jacinto Cortes P.

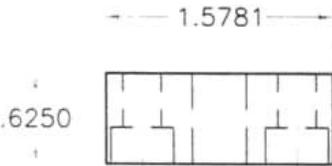
Observaciones:

ESCALA:

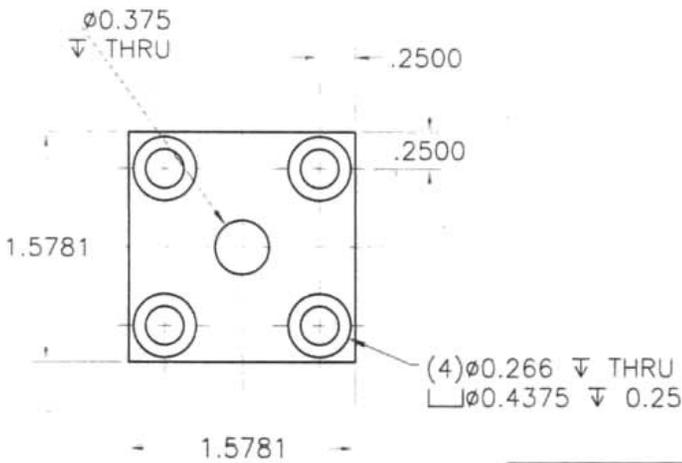
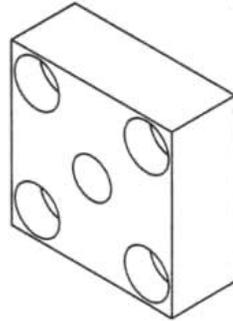
0.75:1

Autoriza:

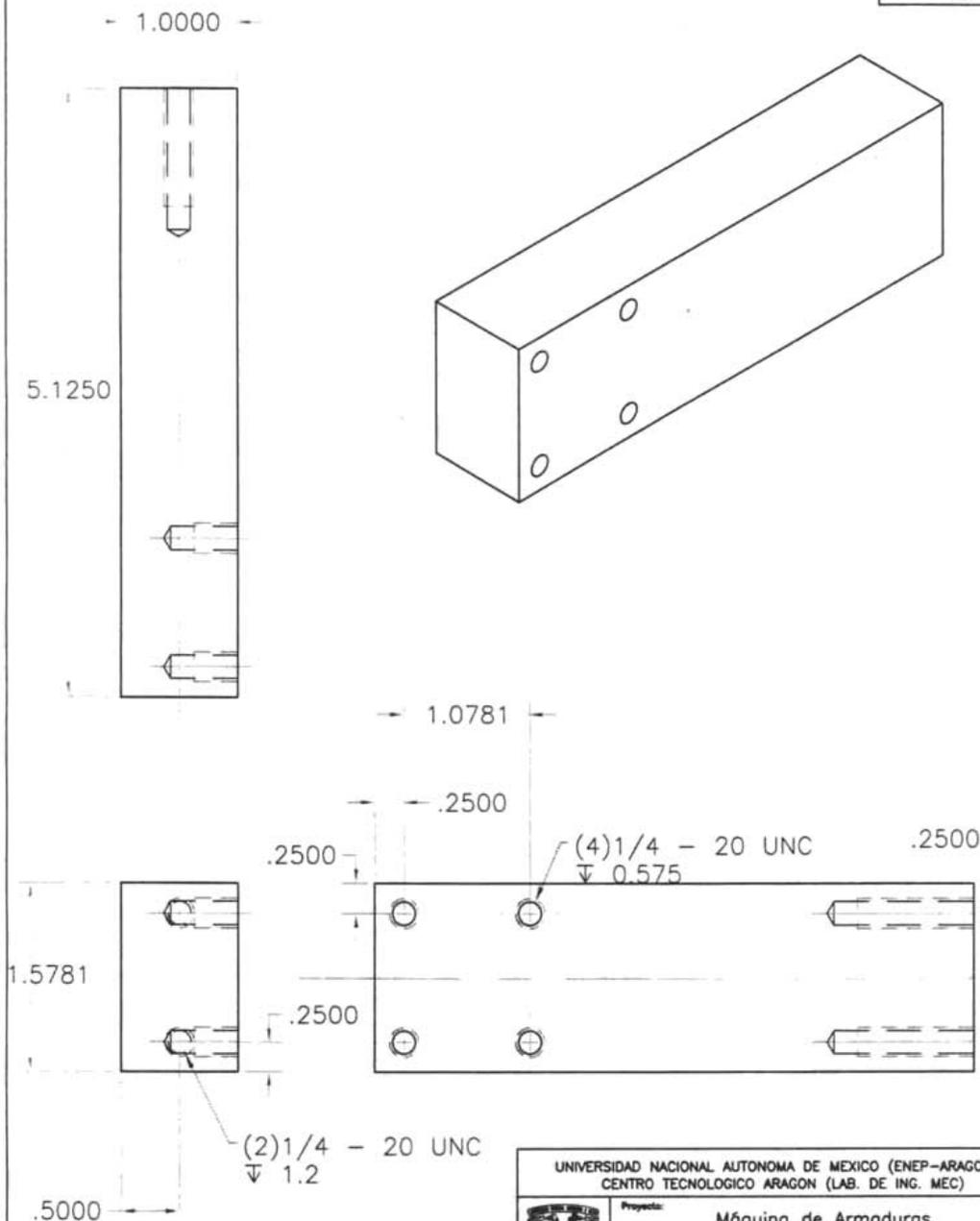
Jacinto Cortes P.



- .7891 -



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
		Proyecto: Máquina de Armaduras	
		DESCRIPCION: Apoyo	
Diseña: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: Acero Inoxidable	FABRICAR: 1	
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.	
Revisa: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto:

Máquina de Armaduras

DESCRIPCION:

Apoyo Base

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL:

ALUMINIO

FABRICAR:

1

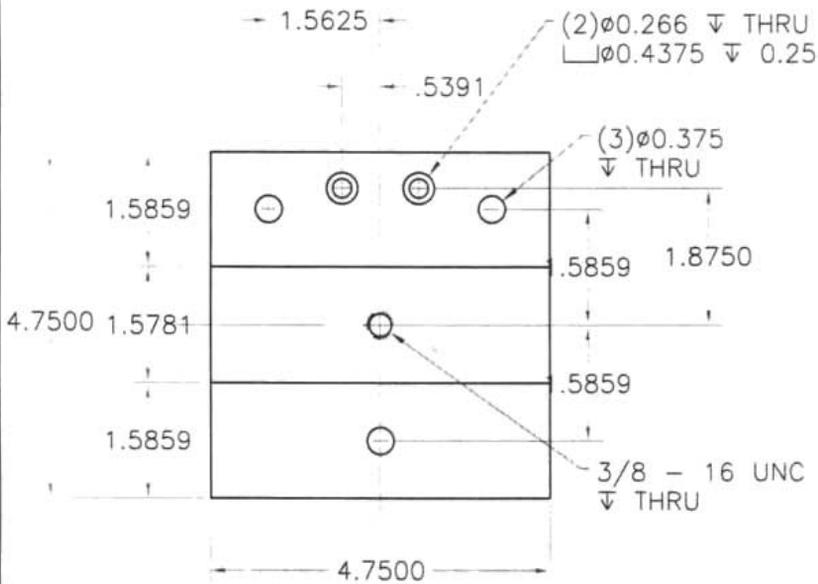
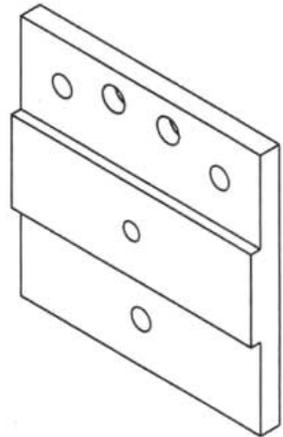
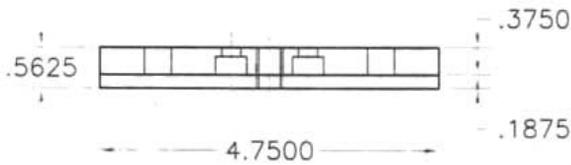
Dibujó: ***

ACOT.: PULG.

Borbo: Jacinto Cortes P.

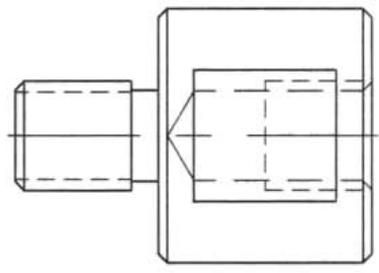
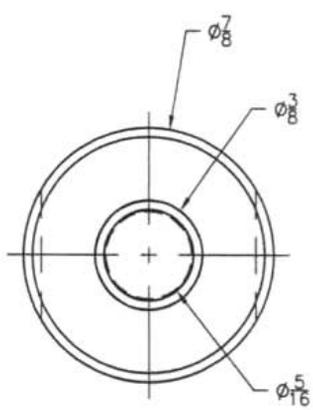
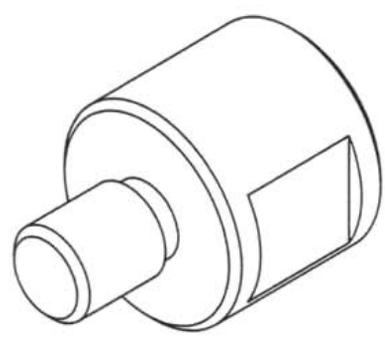
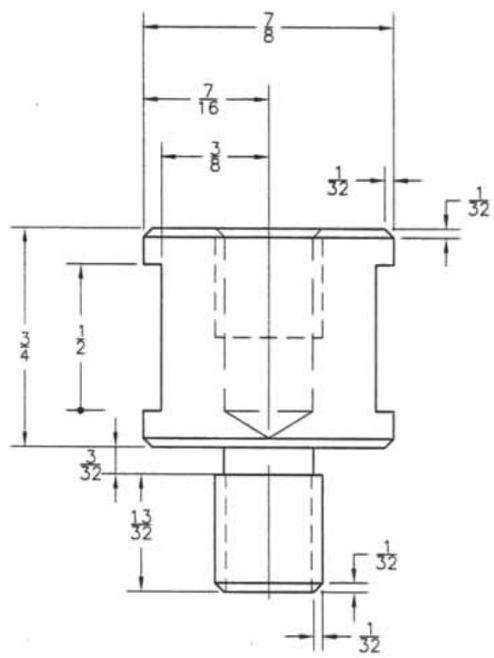
Observaciones:

ESCALA: .85:1

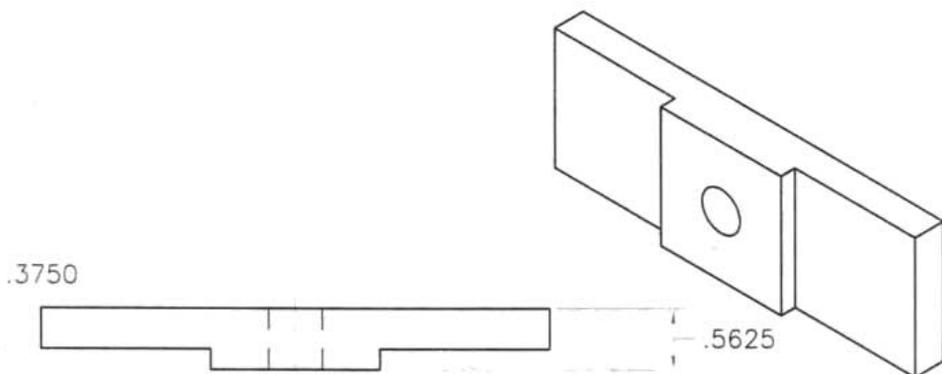


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
 CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)

	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCION:	Apoyo Zapata	
Diseño:	F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	Acero Inoxidable
Dibujo:	****	FABRICA:	1
Revisó:	Jacinto Cortes P.	ADOT.:	PULG.
	Observaciones:	ESCALA:	0.5:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
		Proyecto: Máquina de Armaduras	
		DESCRIPCIÓN: Acople zapata "M"	
Diseñó: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL: BRONCE	FABRICA: 1	
Dibujó: ***		ACOT.: PULG.	
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 2:1	



.3750

.1875

.5625

4.7500

1.5859

1.5781

1.5859

1.5781

∅0.5
▽ THRU

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Zapata J

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL: Aluminio

FABRICAR: 1

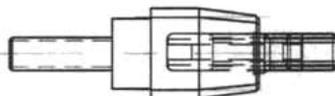
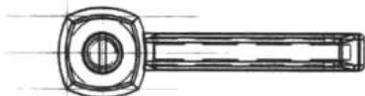
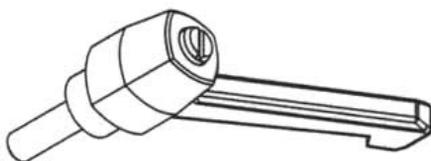
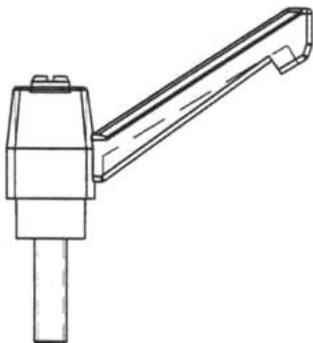
Dibujo: ****

ACOT.: PULG.

Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 0.75:1



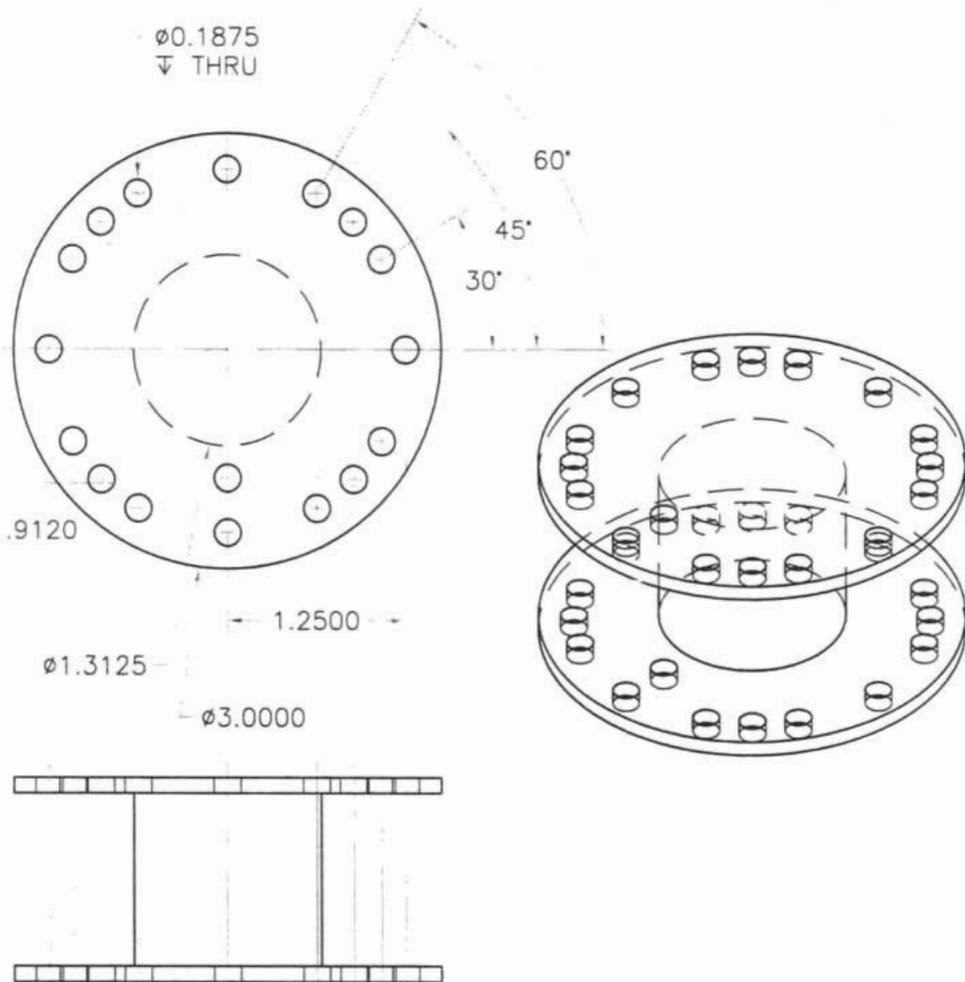
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Manija

Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	FABRICA: 1
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.6:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLOGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCION: Nodo

Diseño: F. Néstor García C.

MATERIAL: Dura-Aluminio

FABRICA: 3

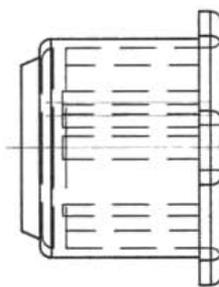
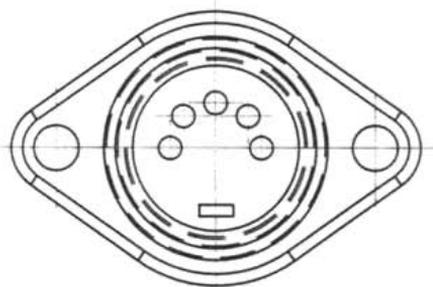
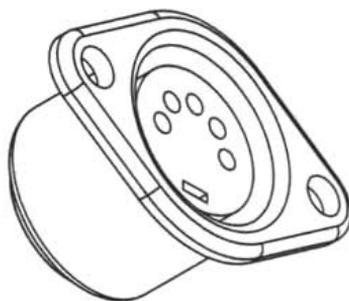
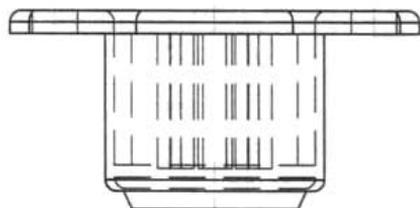
Dibujo: ****

ACOT.: PULG.

Revista: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON)
CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)



Proyecto: Máquina de Armaduras

DESCRIPCIÓN: Din

Diseño: F. Nestor Garcia C.

MATERIAL:

FABRICA: 8

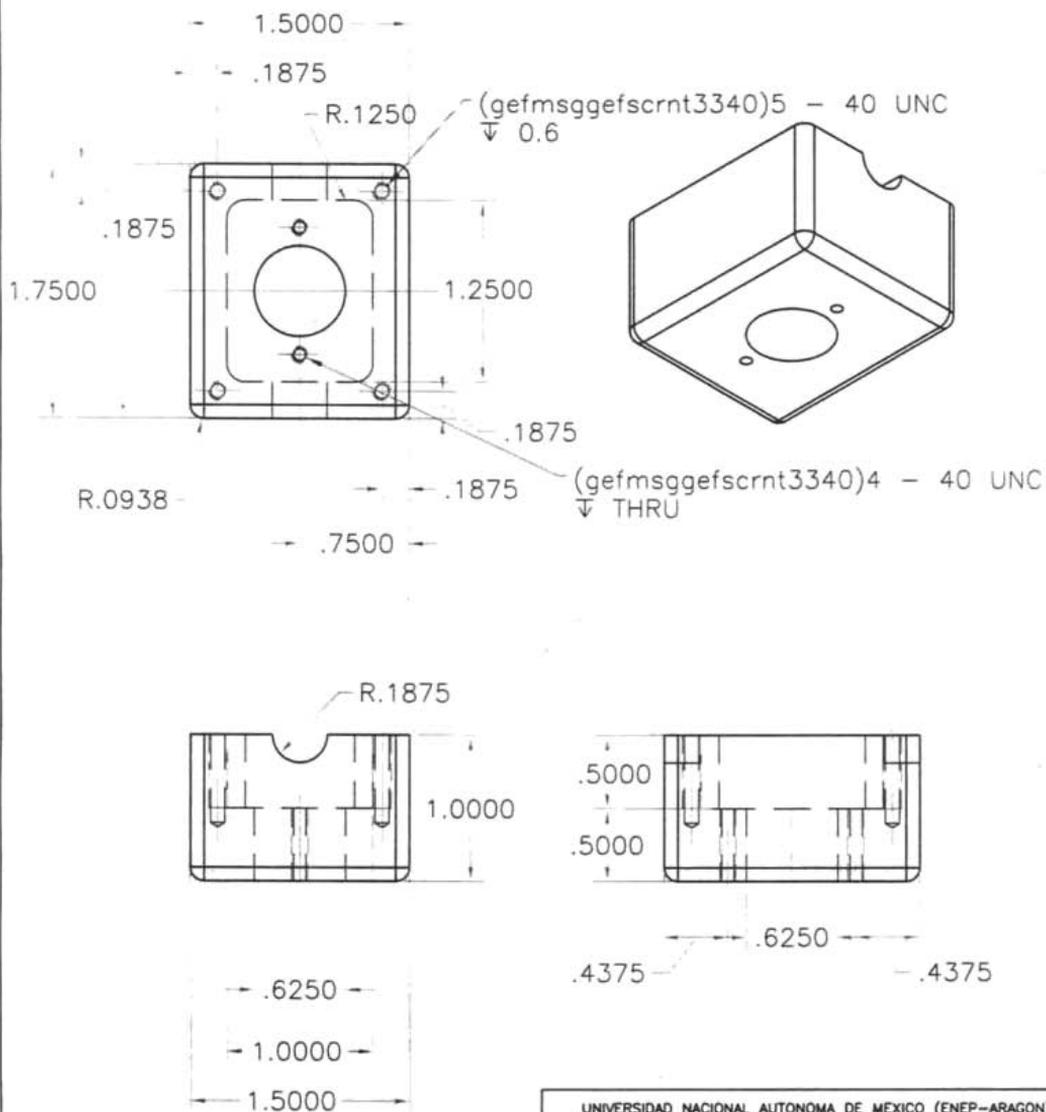
Dibujo: ****

ADOT.: PULG.

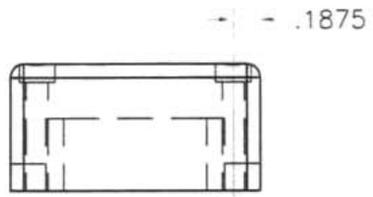
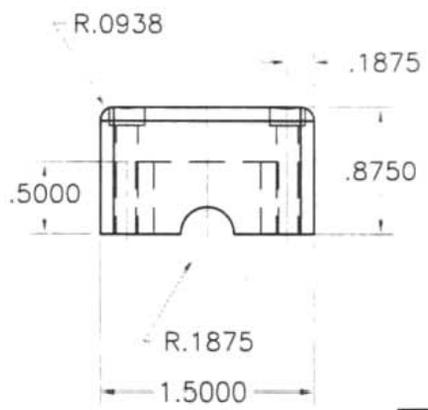
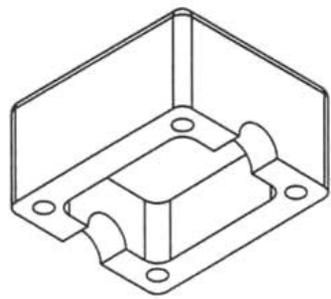
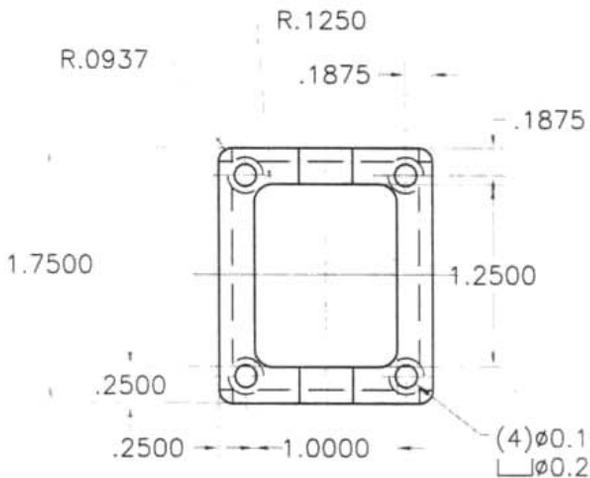
Revisó: Jacinto Cortes P.

Observaciones:

ESCALA: 2.5:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENP-ARAGON) CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)		
Proyecto: Máquina de Armaduras		
DESCRIPCIÓN: Protector Frente		
Diseño: F. Nestor Garcia C.	MATERIAL:	FABRICAR: B
Dibujo: ****		ACOT.: PULG.
Revisó: Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 1:1
Autorizó: Jacinto Cortes P.		



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (ENEP-ARAGON) CENTRO TECNOLÓGICO ARAGON (LAB. DE ING. MEC)			
	Proyecto:	Máquina de Armaduras	
	DESCRIPCIÓN:	Protector Trasero	
Diseño:	F. Néstor García C.	MATERIAL:	FABRICAR: 8
Dibujo:	****		ACOT.: PULG.
Revisó:	Jacinto Cortes P.	Observaciones:	ESCALA: 0.75:1
Autorizó:	Jacinto Cortes P.		

APÉNDICE II

Puente De Wheatstone

La gran sensibilidad del puente de Wheatstone se aplica para detectar variaciones de resistencia en las galgas extensométricas. Consta de un galvanómetro, cuatro resistencias (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) y una batería. La resistencia R_1 es el indicador usado para la medición de la deformación. La resistencia R_4 es un segundo indicador de deformación, que se supone permanece con resistencia constante. Las resistencias R_2 y R_3 son variables, mediante ajuste se usan para equilibrar una y otra vez el puente, esto es, para reducir a cero la corriente que pasa a través del brazo del galvanómetro. Cuando el puente está equilibrado la relación de las resistencias del indicador es igual a la de las resistencias variables:

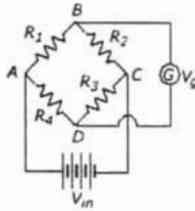
$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$
$$R_1 = R_4 \frac{R_2}{R_3}$$

Una característica importante del puente de Wheatstone es que su voltaje de salida es una función no lineal del cambio de resistencia en el puente; así la relación antes mostrada sólo es estrictamente verdadera cuando el puente está equilibrado, esto es, cuando los voltajes A y C son iguales y la corriente que pasa a través del brazo del galvanómetro es cero. No obstante si la variación de resistencia en el puente es reducida, la variación de voltaje de salida en el puente es prácticamente lineal; por ejemplo, para una variación de resistencia del 1%, la desviación respecto a la condición lineal será del orden de 0.0005% de este cambio.

El puente de Wheatstone es entonces un circuito que puede ser empleado para determinar los cambios en la resistencia que experimenta la galga cuando está sujeta a una deformación.

A diferencia de otro circuito llamado potenciómetro, el puente de Wheatstone puede ser usado para determinar lecturas dinámicas y estáticas. El puente puede ser usado como un dispositivo de lectura directa cuando el voltaje de salida ΔE es medido y relacionado con la deformación. También el puente puede ser usado como un sistema de balance-nulo cuando el voltaje de salida ΔE es ajustado para un valor cero.

El principio de operación del puente de Wheatstone como un dispositivo de lectura directa (cuando ΔE es medido para determinar la deformación), se considera el circuito mostrado en la figura



la caída del voltaje a través de R1 es denotada por V_{AB}:

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V$$

Similarmente el voltaje en R4:

$$V_{CD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

El voltaje de salida E para el Puente es equivalente a V_{BD}:

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD}$$

Sustituyendo las ecuaciones tenemos:

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V$$

Cuando el voltaje tiende a cero el puente puede ser considerado como un balance de:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Lo anterior nos permite utilizar el Puente para mediciones de deformación estática.

El puente es balanceado inicialmente ($E = 0$) antes de que sean aplicadas en las galgas las deformaciones. Así el voltaje ΔE puede ser medido relativo al voltaje cero para aplicaciones estáticas y dinámicas.

Considerando un puente balanceado con $R_1 R_3 = R_2 R_4$ para $E = 0$ y los cambios en las resistencias de R1, R2, R3 y R4 por un incremento ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 y ΔR_4 . el voltaje de salida puede ser obtenido como sigue:

$$\Delta E = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 & R_2 + \Delta R_2 \\ R_4 + \Delta R_4 & R_3 + \Delta R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2 & 0 \\ 0 & R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4 \end{vmatrix}} = V \frac{A}{B}$$

Donde A es el determinante en el numerador y B el determinante del denominador. Ampliando ambos determinantes, despreciando los términos de segundo orden y notando que $R_1 R_3 = R_2 R_4$, es posible mostrar que:

$$A = R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

y

$$B = \frac{R_1 R_3 (R_1 + R_2)^2}{R_1 R_2}$$

Combinando ecuaciones:

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Si $\frac{R_2}{R_1} = r$

$$\Delta E = V \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

➤ SENSIBILIDAD DEL PUENTE DE WHEATSTONE

La sensibilidad el puente puede ser considerada desde dos puntos de vista:

1. Cuando el voltaje aplicado es fijo
2. Cuando el voltaje aplicado es variable

La sensibilidad del circuito usando las relaciones del puente son:

$$S_c = \frac{\Delta E}{\varepsilon} = V \frac{r}{\varepsilon (1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Si un circuito de galgas múltiples es considerado con n galgas

$$\sum_{m=1}^{m=n} \frac{\Delta R_m}{R_m} = n \frac{\Delta R}{R} = n S_g \varepsilon$$

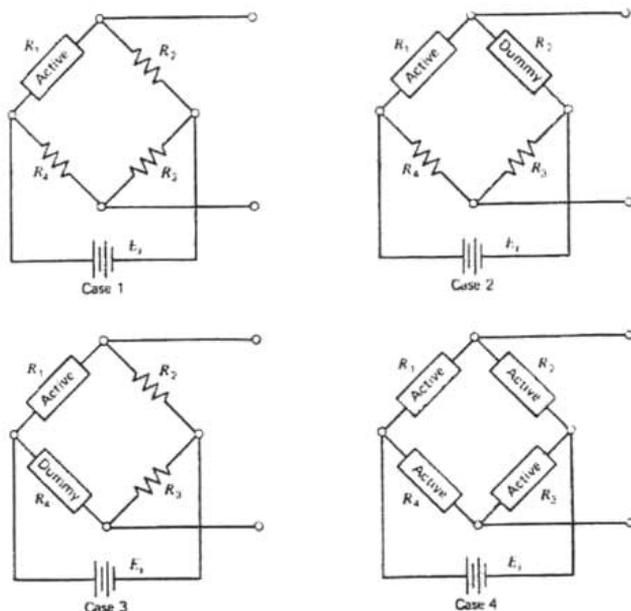
es posible describir S_c como:

$$S_c = V \frac{r}{(1+r)^2} n S_g$$

La ecuación de la sensibilidad es aplicable en los casos cuando el voltaje es fijo e independiente de la resistencia del puente. La ecuación muestra que la sensibilidad del puente depende del número n de brazos activos empleados, el factor de galga S_g , el voltaje de salida V y la relación de las resistencias $r = \frac{R_2}{R_1}$.

Cuando el voltaje fuente V es seleccionado para manejar las galgas en el puente ellas disipan un máximo de energía permisible, una diferente ecuación de sensibilidad puede ser empleada. Hay que destacar que el número de galgas usado en el puente y sus posiciones relativas son importantes. Tomando en cuenta lo anterior existen cuatro casos que son los más comunes arreglos de puentes.

En la **figura** se muestran cada uno de ellos.



Caso 1

Este arreglo utiliza una sola galga activa en la posición de R1 y es a menudo empleado en mediciones dinámicas y estáticas, donde la temperatura de compensación no es requerida. La resistencia R1 es igual a Rg y las otras tres resistencias son seleccionadas a máxima sensibilidad para mantener la condición de balance.

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Donde la sensibilidad

$$V = I_g (R_1 + R_2) = I_g R_g (1 + r) = (1 + r) \overline{P_g R_g}$$

$$\text{Si } r = \frac{R_2}{R_1}$$

$$S_i = \frac{r}{(1 + r)} S_g \overline{P_g R_g}$$

Caso 2

Este arreglo utiliza una galga activa en el brazo R1 y una galga inactiva en R2 y un valor fijo en R3 y R4 donde:

$$V = 2I_g R_g$$

$$S_i = \frac{1}{2} S_g \overline{P_g R_g}$$

Caso 3

En este arreglo la galga inactiva es insertada en R4 la galga activa está en R1, los valores fijos en R2 y R3 la sensibilidad es la misma que en el caso 1, la temperatura de compensación es la misma que el caso 2 pero sin pérdida de eficiencia en el circuito. Si una galga inactiva es utilizada para efectos de compensación de temperatura, el brazo R4 es preferido para la localización de la misma.

$$V = I_g (R_1 + R_2) = (1 + r) \overline{P_g R_g}$$

$$S_i = \frac{r}{(1 + r)} S_g \overline{P_g R_g}$$

Caso 4

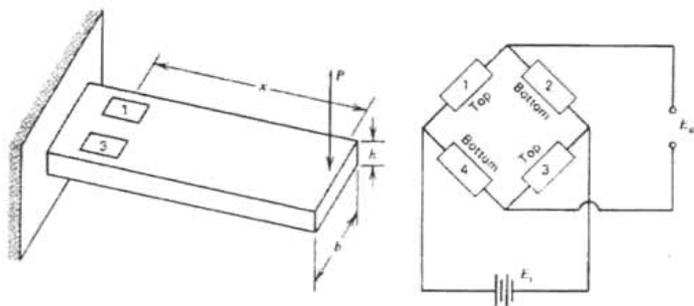
El cuarto arreglo tiene 4 galgas activas colocadas en el puente, con una galga en cada una de las ramas. Si las galgas son colocadas en una viga sometida a flexión las señales de cada

una de las 4 galgas se pueden sumar siendo el valor de $n = 4$ en la ecuación de sensibilidad. La energía disipada por cada una de las galgas está dada por:

$$V = 2I_g R_g = \overline{P_g R_g}$$

Donde la resistencia es la misma para todas las galgas, $r=1$. por lo tanto la sensibilidad queda:

$$S_c = 2I_g R_g S_g = 2S_g \overline{P_g R_g}$$



Las galgas 1 y 3 se colocan en la superficie de la viga por estar sujetas a tensión, mientras que 2 y 4 se colocan por debajo por estar sujetas a compresión.

Este último arreglo tiene el doble de sensibilidad que los casos 1 y 3 y el cuádruple que el caso 2. Por lo tanto, se puede ver que el uso de múltiples galgas aumenta la sensibilidad.

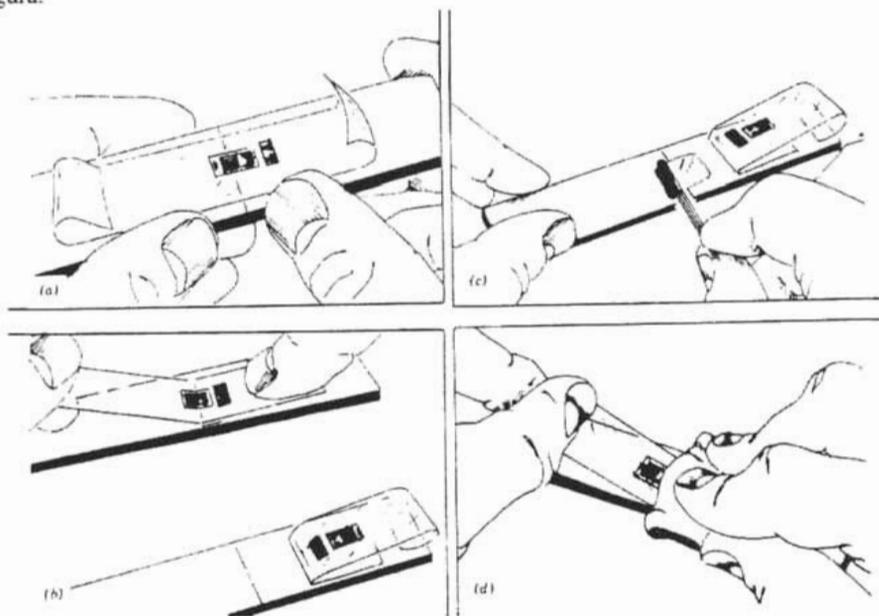
APÉNDICE III

Método De Instalación De Galgas Extensométricas

Para poder instalar la galga es necesario utilizar un correcto adhesivo y un procedimiento adecuado de montaje. El pegamento es de vital función en sistema de medición, puesto que debe de transmitir el desplazamiento de la superficie de la muestra hacia la rejilla de la galga sin distorsión. Una inadecuada selección de adhesivo puede provocar histéresis, cambiar el factor de galga y la resistencia inicial de la misma.

El área donde va a ser posicionada la galga debe ser cuidadosamente preparada antes de su instalación. Esto consiste en remover la herrumbre, dejar la superficie plana (no pulido alto), aplicar solventes para remover grasa o gasolina y finalmente la superficie puede ser tratada con una solución dada, apropiada y con afinidad química para el adhesivo.

Después la localización de la galga es marcada sobre la muestra con una línea muy clara, sin adhesivo, posicionándola usando una cinta transparente. La posición y orientación de la galga es mantenida por la cinta, el adhesivo es aplicado y la galga es presionada sobre la cinta para exprimir el exceso de adhesivo. El procedimiento anterior se muestra en la figura.



REFERENCIAS

1. Russell C. Hibbeler, *Structural Analysis*, 3ª ed., Prentice Hall, 1995.
2. Ramírez Valverde Enrique, *Análisis de estructuras hiperestáticas planas, métodos fundamentales*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Textos Científicos, Puebla, Pue., 2000, pp 11-20.
3. W. T. Marshall, H. M. Nelson, *Estructuras*, 3ª ed., Alfaomega, 1990, p 1.
4. Aslam Kassimali, *Análisis Estructural*, 2ª ed., Thomson Learning, 2001, pp 4-5.
5. L. E. Grinter, *Theory of Modern Steel Structures*, 2ª ed., Nueva York: Macmillan, 1962.
6. Ferdinand P. Beer. E. R. J., *Mecánica Vectorial Para Ingenieros, estática*, 5ª ed., McGraw-Hill, 1990.
7. Ramírez Valverde Enrique, *Análisis De Estructuras Isostáticas Planas*, Benemérita Universidad Autónoma De Puebla, textos científicos, Puebla, Pue., 2000, pp 27-30.
8. Robert E. Sennett, *Matrix Analysis of structures*, Prentice Hall, 1994, pp 32-52.
9. Gurtin Morton E., *An Introduction to Continuum Mechanics*, Academic Press, 1981, pp 1-9.
10. Granero Rodríguez Francisco, *Algebra y Geometría Analítica*, McGraw-Hill, 1985, p 47, 169-170.
11. M. Farrashkhalvat, J. P. Miles, *Tensor Methods For Engineers*, Ellis Horwood, 1990, pp 63-64.
12. C. V. Collett, A. D. Hope, *Mediciones en Ingeniería*, Gustavo Gili, S. A., Barcelona, 1976, pp 193-200.

13. W. Dally James, F. Riley William, *Experimental Stress Analysis*, 3ª ed., McGraw Hill, 1991, pp 129-130,134.
14. Michael J. F., *Desing for Engineers*, 2ª ed., Springer-Veriag, 1985, pp 2-12.
15. Ferdinand P. Beer. E. R. J., *Mecánica de Materiales*, 2ª ed., McGraw-Hill, 1993, pp 24-26.
16. Reynold King Watkins, *Structural Mechanics of Buried Pipes*, CRC Press, 2000, pp 76.
17. Allen S. Hall, *Teoría y Problemas de Diseño de Máquinas*, McGraw-Hill, 1971, pp 145-147.