

10  
Lej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

-----  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGON

"OBTENCION DE PARAMETROS PARA EL  
REDISEÑO DE ELEMENTOS MECANICOS EN LA  
CABINA DORMITORIO DE UN TRACTOCAMION  
MEDIANTE LA APLICACION DE LA SIMULACION  
DINAMICA"

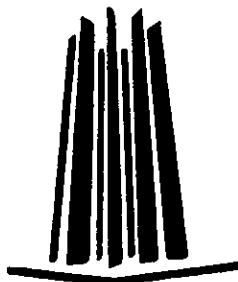
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

**AARON BERNAL JUAREZ**

ASESOR: ING. JAVIER NAVA PEREZ



MEXICO.

261342 1998.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CAMPUS ARAGÓN

UNIDAD ACADÉMICA

Ing. RAUL BARRON VERA  
Jefe del Área de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente .

En atención a la solicitud de fecha 16 de marzo del año en curso, por la que se comunica que el alumno AARON BERNAL JUAREZ, de la carrera de INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "OBTENCION DE PARAMETROS PARA EL REDISEÑO DE ELEMENTOS MECANICOS EN LA CABINA DORMITORIO DE UN TRACTOCAMION MEDIANTE LA APLICACION DE LA SIMULACION DINAMICA", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, a 18 de marzo de 1998  
EL JEFE DE LA UNIDAD

  
Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis.  
c c p Interesado.  
AIR/vr



A MIS PADRES

MANUEL Y CELIA, POR HABERME BRINDADO SU APOYO Y DARME LA OPORTUNIDAD DE ALCANZAR LA META QUE REFLEJA NO SOLO MI ESFUERZO SINO TAMBIEN EL DE ELLOS.

A MIS HIJOS

JOSE ROBERTO Y KARLA BEATRIZ PORQUE SON EL MOTIVO PRINCIPAL DE MI EXISTENCIA Y PORQUE ESPERO QUE TAMBIEN SEPAN ALCANZAR SUS PROPIAS METAS.

A MI ESPOSA

MARTHA PATRICIA QUE CON PACIENCIA Y AMOR SUPO AFRONTAR LOS PROBLEMAS EN MI AUSENCIA.

A MIS HERMANOS

JUAN, CAROLINA, MERCEDES, MANUEL, CARLOS, MARGARITA Y NOE QUE EN TODO MOMENTO ME MOTIVARON Y APOYARON A SEGUIR ADELANTE.

A MIS SOBRINOS

QUE ESTE LOGRO LES SIRVA COMO EJEMPLO EN SU VIDA FUTURA.

*Aarón*

## CONTENIDO

### INTRODUCCION

<b>1. FUNDAMENTOS DEL MODELADO DE SISTEMAS</b>	<b>1</b>
1.1. VENTAJAS DEL MODELADO DE SISTEMAS	2
1.2. CLASIFICACION DE LOS MODELOS SEGUN SUS CARACTERISTICAS	4
1.2.1. Modelos según el grado de abstracción	5
1.2.2. Modelos según característica de proceder	7
1.2.3. Modelos según el grado de certidumbre	8
1.2.4 Modelos de acuerdo a la forma	9
1.2.5. Modelos según el método de solución	9
1.3. CLASES DE MODELOS	10
1.4. FORMULACION DE MODELOS	13
1.4.1. Etapas en el desarrollo de modelos	15
<b>2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LAS VIBRACIONES MECANICAS</b>	<b>21</b>
2.1. MEDIDA DE LAS VIBRACIONES	22
2.1.1. Características generales de los medidores de vibración	31
2.2. MEDIDORES DE VELOCIDAD	33
2.2.1. Elementos sensibles	38
2.3. EL RUIDO COMO CONSECUENCIA DE LA VIBRACION	43
2.3.1. niveles y unidades	48
<b>3. TECNICAS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LOS CAMPOS DE ESFUERZOS</b>	<b>51</b>
3.1. FOTOELASTICIDAD	51

3.2. FOTOELASTICIDAD BIDIMENSIONAL	55
3.3. FOTOELASTICIDAD TRIDIMENSIONAL	58
3.4. RECUBRIMIENTOS FRAGILES	65
3.5. CUADRICULAS	69
3.6. MOARE	73
3.7. METODOS DE PUNTO POR PUNTO	79
3.7.1. Medidores eléctricos de deformación	80
3.7.2. Medidores de deformación de los tipos ópticos y mecánicos	83
4. MEDICION DE LA DEFORMACIONES UNITARIAS POR MEDIO DE LA TECNICA DE EXTENSOMETRIA	85
4.1. APLICACION DE LA EXTENSOMETRIA	86
4.2. BASES TEORICAS	88
4.3. LA GALGA EXTENSOMETRICA	97
4.3.1. Método a seguir para la colocación de galgas	103
4.4. TIPOS DE MONTAJES DEL PUENTE DE WHEASTONE	104
4.5. PRINCIPIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES	112
5. EL EQUIPO DE SIMULACION DINAMICA	114
5.1. EQUIPO PRINCIPAL DE UN SISTEMA DE CONTROL	115

5.2. SISTEMAS DE ENSAYOS DINAMICOS DE ORGANOS Y ESTRUCTURAS	122
5.2.1. Sistemas de ensayos controlados por computadora	130
6. PRUEBAS DE SIMULACION DINAMICA	136
6.1. RECOMENDACIONES GENERALES PARA HACER PRUEBAS DE DINAMICA VEHICULAR Y DURABILIDAD	136
6.2 REALIZACION DE PRUEBAS DE SIMULACION DINAMICA, PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	147
6.2.1 Desarrollo de la prueba	149
- CONCLUSIONES	
- BIBLIOGRAFIA	

## INTRODUCCION

Los consumidores mundiales y las exigencias cada vez mayores han obligado a las industrias con mayor interés en el desarrollo global a mejorar continuamente la garantía de la calidad de sus productos. No solo es cuestión de mantener el nivel de calidad conseguido, sino el objetivo es que se ha de aumentar en lo posible, dentro de los márgenes de costos justificados. Se deben adoptar medidas para garantizar la calidad del servicio entre el usuario y estos organismos de manera muy estrecha. Actualmente la técnica y la economía han llevado a este tipo de industrias a una profunda división del trabajo, ya que básicamente los proveedores son los responsables de la calidad de sus productos; ellos son los que deben tomar las medidas eficaces para garantizar la calidad de sus suministros; el control de entrada de sus suministros para el mantenimiento es una medida complementaria de la garantía de calidad. Sin embargo los requerimientos de uso de un equipo así como la disponibilidad y costo de materiales, mano de obra y tecnología están sujetos a ajustes y cambios provocados por el desarrollo tecnológico. Por este motivo un servicio o producto que resulta adecuado en un momento, después de un tiempo puede resultar regular o inclusive malo, el usuario lo juzga en tanto a la satisfacción que le proporciona y no respecto a su cumplimiento con normas, tampoco justifica las fallas porque sea difícil la supervisión del personal o el aseguramiento de la calidad de los productos de los proveedores, la prestación de los servicios de calidad solo es posible a través de la coordinación adecuada de los grupos que integran la empresa como son el conjunto de elementos materiales, técnicos y humanos interrelacionados de manera que proporcione productos que satisfagan al consumidor final.

Con la finalidad de corroborar la calidad en el diseño de materiales y manufactura, así como determinar en muchos casos el tiempo de vida útil de elementos mecánicos vehiculares; se requiere utilizar técnicas especializadas en el análisis de los elementos mecánicos, bajo condiciones reales de servicio sin la necesidad de que estos se encuentren operando dinámicamente; es decir sin que estén en servicio por lo cual se requieren equipos que simulen estas



condiciones manteniendo los vehiculos dentro de un laboratorio de pruebas, y de esta manera obtener los parámetros reales de falla, como son las microdeformaciones mediante las cuales determinamos los esfuerzos reales de operación; así como también se observa el comportamiento real de cualquier elemento analizando después de un tiempo, la aparición de fisuras, desprendimientos, fracturas, deformaciones, etc., es decir, el tiempo de vida útil de los elementos con la finalidad de corregir esos errores y rediseñarlos para incrementar el nivel de calidad de los mismos; en el caso particular que nos ocupa, se requiere conocer los parámetros reales de operación que sufre la cabina dormitorio de un tractocamión prototipo antes de salir al mercado con el fin de corregir desviaciones que puedan provocar fallas durante la comercialización del producto dando como resultado altos costos por reclamaciones de los clientes.

Con base en lo mencionado, se estructuró este trabajo de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describen los modelos de sistemas en general, desglosando las clases de modelos y proporcionando una estructura para desarrollarlos.

En el capítulo 2 se describen las características de las vibraciones mecánicas, que es una parte fundamental de la investigación que nos ocupa; además de mencionar las características principales del ruido que, como se sabe es provocado por la vibración.

En el capítulo 3 Se enlistan técnicas que determinarán los campos de esfuerzos que son utilizados principalmente en los laboratorios de mecanica.

El capítulo 4 describe principalmente la técnica de extensometría que es una herramienta que nos sirve para medir las deformaciones por medio de dispositivos especiales.

En el capítulo 5 se muestra un panorama general de la aplicación de ensayos de simulación dinámica mencionando el equipo fundamental para el desarrollo de los mismos.

Por último, en el capítulo 6 se desarrolla una prueba real de dinámica vehicular, que permite poner en práctica los conocimientos anteriores.

## CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DEL MODELADO DE SISTEMAS

En relación con la ingeniería de sistemas puede definirse un modelo como una representación cuantitativa o cualitativa de un sistema, esta representación debe mostrar las relaciones entre los diversos factores que son de interés para el análisis que se esté llevando a cabo.

Un modelo es una representación abstracta de la realidad.

El número de variables que intervienen en la operación de un sistema suele ser sumamente grande y es siempre necesario por razones de costo, al establecer el modelo, incluir en éste solamente aquellos factores que sean relevantes para el análisis.

Los modelos deben ser examinados y comprobados repetidamente con datos observados para lograr un modelo aceptable.

Los modelos que son más fáciles de resolver son también los más fáciles de comprender y aplicar; sin embargo, si el modelo se simplifica hasta el punto en donde ya no representa el mundo real, proporciona resultados erróneos o engañosos.

Las aproximaciones en los modelos pueden tomar una o más de las siguientes formas:

1. En el modelo se usan relaciones lineales para representar las relaciones reales que no son lineales en el sistema.

2. Se omiten las variables que no tienen un efecto significativo en el funcionamiento del sistema.

3. Algunas variables se consideran en conjunto y subsecuentemente se tratan como una sola variable; si las variables tienen esencialmente las mismas características, la variable agregada suministrará una buena aproximación.

### **Modelos para la solución de problemas**

La selección de un procedimiento para deducir de un modelo, una solución del problema depende de las características del modelo.

Los procedimientos pueden ser:

- *analíticos.*
- *numéricos.*

Los procedimientos analíticos tienen un carácter esencialmente deductivo, mientras que los numéricos lo tienen inductivo. Existen métodos de solución del tipo iterativo, que son aquellos que se aproximan a la solución exacta en base a una serie de repeticiones de la misma regla analítica sobre los resultados de una repetición anterior.

## **1.1 VENTAJAS DEL MODELADO**

### **Economía**

El modelado es de importancia en ingeniería de sistemas, porque permite estudiar el comportamiento de un sistema bajo diversas condiciones de operación, sin necesidad de construir el sistema y someterlo a condiciones de operación real.

## **Predictiva**

En ocasiones se aplica la metodología de modelado al estudio de sistemas reales ya existentes, con el objeto de determinar cual será el futuro estado del sistema; un ejemplo de esta aplicación es el empleo de modelos en la predicción de la actividad económica de un país; en otras ocasiones estos modelos se emplean para diseñar políticas de control de la actividad económica de el mismo. En el primer caso resulta clara la necesidad del empleo de un modelo y en el segundo es demasiado costoso y peligroso experimentar con políticas de control sobre el sistema real.

## **Seguridad**

Un ejemplo donde es posible emplear un modelo para fines de análisis y seguridad es el que sigue:

Si se desea investigar los efectos de sismos sobre una presa, resulta demasiado peligroso hacerlo sobre el prototipo, es necesario emplear un modelo

## **Diseño**

También se emplean los modelos en el proceso del diseño, en estos casos, la construcción de prototipos para las diversas alternativas de diseño puede tener un costo prohibitivo y es necesario evaluar las alternativas de diseño combinando los procesos de modelación y simulación.

## 1.2 CLASIFICACION DE LOS MODELOS SEGUN SUS CARACTERISTICAS

Las características que se toman en cuenta para la clasificación de modelos son: La variación y adaptabilidad de los modelos en el tiempo, el grado de intervención de factores aleatorios y la forma o grado de abstracción de los modelos.

CLASIFICACION DE LOS MODELO	
CRITERIO DE CLASIFICACION	CATEGORIA DE MODELO
Grado de abstracción	Físico Gráfico Esquemático Analogico Matematico De descripción
Característica de proceder	Estatico Dinámico
Grado de certidumbre	Determinístico Probabilístico
Forma (estructura)	Asignación Inventario Fila de espera Reemplazo Competitivo
Método de solución	Análítico Simulación

Figura 1.1 Clasificación general de los modelos

### 1.2.1 Modelos según el grado de abstracción

#### **Modelos físicos**

Los modelos físicos son transformaciones de los sistemas originales, en otros sistemas más sencillos en general que los originales y que conservan las características esenciales de éstos.

Estos modelos son representaciones físicas de los objetos materiales originales; conservándose, en estas representaciones, la "dimensionalidad" de los objetos originales.

#### **Modelo gráfico**

Los modelos constituyen ayudas no solo en el análisis de un diseño en sus pasos iniciales, sino en la representación del producto o sistema en forma tridimensional de fácil apreciación.

El análisis de un modelo puede servir para determinar espacios o relaciones que afecten la interacción de las diferentes partes.

Las componentes reales del diseño propuesto se pueden construir y examinar por medio de repetidas pruebas para determinar sus límites de resistencia y fatiga; la escala y detalles de presentación pueden variar según el propósito del modelo y debe ser suficientemente grande para permitir las operaciones y movimientos del diseño que se realiza.

Modelos de disposición de sistemas se emplean para ilustrar las relaciones entre los sistemas de fabricación, sistemas de tránsito o procesos industriales.

### **Modelo esquemático**

Las gráficas de fluctuaciones de precios, los diagramas de barras, los diagramas de organización, diagramas de bloques, las redes, los diagramas de proceso, los diagramas simbólicos de actividades, los mapas de rutas, todos representan el mundo real en una forma esquemática; los aspectos gráficos son útiles para propósitos de demostración.

Los símbolos sobre tales diagramas pueden arreglarse fácilmente para investigar el efecto de la reorganización, una experimentación semejante con el lugar real de trabajo podría ser dañino.

### **Modelo analógico**

Estos modelos son representaciones físicas de los objetos materiales originales, en las cuales, el objeto no tiene un parecido directo con el objeto original; sin embargo, puede establecerse un mapeo o correspondencia uno a uno entre las variables fundamentales del modelo y las del objeto original.

Al construir un modelo de la mayoría de los objetos, acontecimientos, procesos o sistemas no es siempre conveniente reproducir todas las propiedades pertinentes, ni siquiera a escala reducida o aumentada.

En el grado en que un modelo representa un conjunto de propiedades por medio de otro conjunto de propiedades es un modelo analógico; el modelo analógico se utiliza con buenos resultados en la representación de situaciones dinámicas, es decir en la representación de procesos o sistemas.

### **Modelo matemático**

Las expresiones cuantitativas, es decir, los modelos mas abstractos, generalmente son los más útiles en la solución. Cuando puede construirse un modelo matemático para representar en forma exacta la situación de un problema, suministra una poderosa arma para el estudio, es fácil de manipular,

el efecto de las variables interactuantes se aprecia claramente y sobre todo es un modelo preciso; también por lo general, cualquier deficiencia debida al empleo de los modelos matemáticos se origina por algún error cometido en las suposiciones básicas y en las premisas sobre las cuales están basados.

En contraste con los otros tipos de modelos es más fácil decidir lo que va a emplear, que como se va a emplear.

En general los sistemas estáticos (que no varían con el tiempo) consisten en ecuaciones algebraicas, mientras que las representaciones matemáticas de leyes físicas se integran mediante ecuaciones diferenciales.

### **Modelos descriptivos**

Este tipo de modelos consiste en una serie de aseveraciones sobre el sistema original, expresadas en los términos empleados en los lenguajes humanos naturales, y constituyen la clase menos abstracta de los modelos formales y solo pueden ser manipulados y transformados con las reglas de la gramática.

#### **1.2.2 Modelos según característica de proceder**

Comprende dos tipos de modelos:

- Estático
- Dinámico

#### **Modelo dinámico**

En general, el modelo dinámico considera el tiempo como una de las variables y admite el impacto de los cambios en el transcurso del tiempo.



Es un modelo en el cual las características varían, de manera apreciable, con el tiempo.

### **Modelo estático**

El caso contrario es el modelo estático, que no considera el impacto de los cambios, es decir, que es independiente del tiempo.

Es un modelo en el cual las características fundamentales no varían, de manera apreciable con el tiempo.

### 1.2.3 Modelos según el grado de certidumbre

La clasificación de modelos en determinísticos y probabilísticos es mutuamente exclusiva entre sí, pero no lo es con respecto a otras clasificaciones.

De acuerdo a este punto de vista, los modelos pueden dividirse en:

*-Determinístico*

*-Probabilístico*

Los modelos probabilísticos son aquellos modelos que contienen elementos aleatorios o probabilísticos que afectan el comportamiento del sistema, por lo tanto corresponde a situaciones que no se pueden predecir con certidumbre.

En cambio, los modelos determinísticos son aquellos que asumen condiciones de certidumbre perfectamente conocida, esto implica que cada decisión o estrategia resulta en una única y conocida consecuencia; esto quiere decir que no contienen elementos aleatorios que afectan el comportamiento del sistema.

#### 1.2.4 Modelos de acuerdo a la forma

La forma se refiere a la estructura del problema, la manera que los diferentes componentes del problema se encuentran relacionados.

Ejemplos: Modelos de asignación, de inventario, de cola, de reemplazo, etc.

#### 1.2.5 Modelos según el método de solución

##### **Modelo analítico**

En el proceder analítico podemos identificar dos niveles de modelos.

En la primera categoría tenemos una solución general en una forma abstracta.

En la segunda categoría tenemos una metodología general que es usada para resolver un problema específico.

##### **Modelo de simulación**

Este tipo de modelos es más preciso, aunque menos natural; consiste en hacer una serie de aseveraciones sobre el sistema original, estas aseveraciones están generalmente expresadas en un lenguaje de simulación especial, aunque también pueden contener expresiones en lenguaje humano natural o fórmulas y expresiones matemáticas.

Su proceder es de naturaleza iterativa, el problema no es resuelto directamente, la metodología general (algoritmo) es empleada para producir una solución numérica y luego por iteraciones sucesivas lograr una solución mejor hasta llegar a la óptima.

### 1.3 CLASES DE MODELOS

Debe tomarse en cuenta que para representar un modelo mediante un prototipo, cambia ésta de acuerdo con la finalidad con la que se destine; entre las finalidades que se persiguen al establecer un modelo pueden citarse:

- Describir el sistema y sus componentes
- Describir el comportamiento del sistema ante diferentes estímulos.
- Visualizar aspectos de confiabilidad
- Evaluar costos y eficiencias.
- Visualizar tiempos y movimientos, etc.

A continuación se clasifican las funciones que pueden realizar los modelos.

#### **Modelos de descripción**

Estos modelos pueden tomar diferentes formas como son:

- a) Un diagrama esquemático donde se muestran los principales elementos constitutivos del sistema.
- b) Un diagrama o programa de trabajo, que muestra como se realiza un trabajo
- c) Descripciones detalladas de procedimientos.

Los modelos de descripción son generalmente de naturaleza cualitativa y permiten tener una visión general del sistema, de sus componentes y de sus funciones; estos modelos pueden hacer énfasis en los componentes y sus relaciones con el sistema. (fig. 1.2), en las funciones que debe realizar el sistema (tabla de actividades), o en la manera como lleva a cabo un proceso (hoja de proceso de fabricación de un elemento).

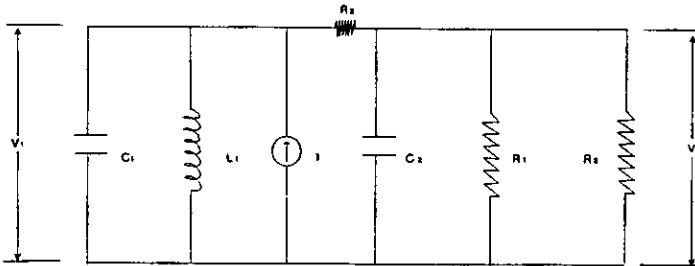


fig. 1.2 Ejemplo de un modelo de descripción

### Modelos de comportamiento

Los modelos de comportamiento son generalmente de naturaleza cuantitativa, de ellos se pueden obtener características del sistema como: exactitud, rapidez de respuesta, rapidez de frecuencia, etc. Se establece tomando en cuenta las características de las componentes y su interconexión; las fórmulas matemáticas utilizadas en ingeniería son también modelos de comportamiento.

### Modelos de tiempo

Considerese el ejemplo correspondiente a la figura 1.3, la característica que sobresale en este tipo de modelos es el tiempo (tiempos de transporte, de espera, de iniciación, de realización, etc.); en particular, este tipo de modelos es de utilidad cuando se desea controlar el tiempo de avance y realización de un proyecto (pert y ruta crítica).

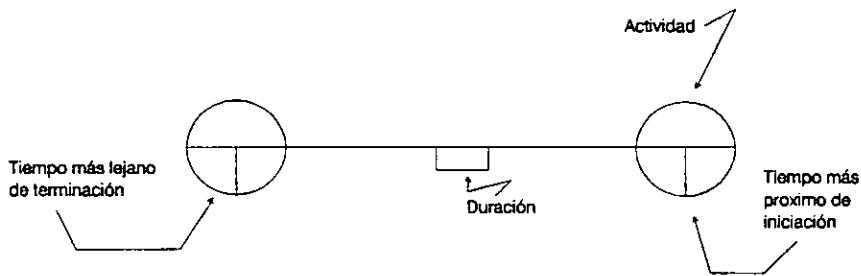


fig.1.3 Ejemplo de un modelo de tiempo de una actividad productiva

### Modelos de confiabilidad

Tiene la finalidad fundamental de mostrar la parte que cada componente del sistema juega en la operación exitosa del mismo; también ayuda en la visualización de cuáles componentes son fundamentales y cuáles no, cuáles podrían mejorar la confiabilidad del sistema si contaran con unidades de apoyo en caso de falla.

### Modelos de costo

Modelos como los de la figura 1.4 son auxiliares valiosos en la obtención de costos por unidad, eficiencias, costos relativos de las diferentes componentes, etc., como en todo proyecto de ingeniería de sistemas, los costos y eficiencias son factores determinantes de diseño y debe prestárseles la atención debida; estos modelos son muy útiles, ya que la decisión de realizar o no un proyecto depende, en última instancia, de su rentabilidad; el cálculo de ésta cantidad puede presentar dificultades, en particular cuando intervienen factores intangibles o difíciles de traducir a valor monetario, en estos casos, los modelos presentan valiosa ayuda para visualizar los costos y los precios relativos.

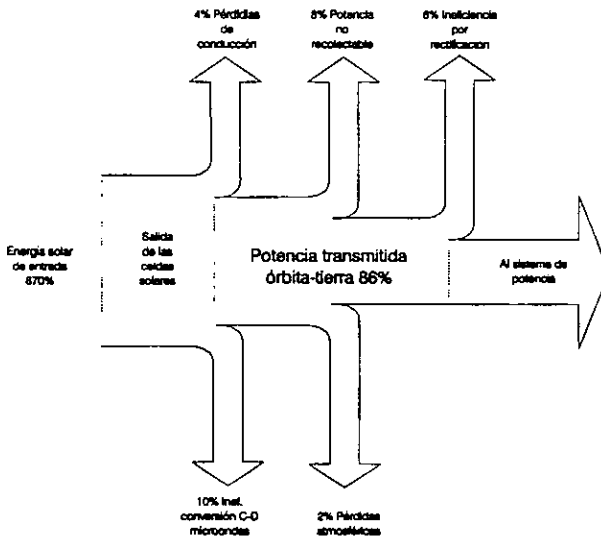


fig. 1.4 Ejemplo de modelos de costo

## 1.4 FORMULACION DE MODELOS

Ahora se describen las diversas etapas que se siguen al construir un modelo, las funciones de cada una y la relación entre ellas, además se presentan métodos, que son útiles para construir modelos.

### Selección del modelo

Una vez que se ha determinado la función del modelo, es necesario decidir qué tipo de modelo se va a construir y de que manera se implementará; para tomar esta decisión, es necesario conocer la naturaleza del sistema que se va a modelar.

La figura 1.5 muestra una importante característica que se observa al construir un modelo; a medida que se avanza en la construcción del mismo, aumenta el grado de conocimiento que se tiene del sistema que se está modelando.

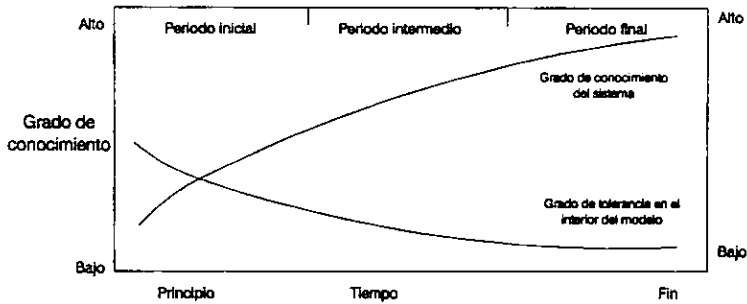


fig. 1.5 Características en el comportamiento de la construcción de modelos.

Este aumento en el conocimiento del sistema permite ir aumentando la complejidad del modelo y como resultado disminuir las respuestas en el prototipo y las del modelo.

Como el tipo del modelo que se emplea en un proyecto y su implementación dependen del conocimiento que se tenga del sistema; y este conocimiento aumenta al avanzarse en el proyecto, a menudo es conveniente partir de un modelo muy sencillo y evolucionar hacia modelos más complejos.

Al iniciar el estudio se suelen utilizar modelos sumamente sencillos que permiten obtener solamente resultados aproximados, es decir, con cierto grado de error; cuando se tiene un grado intermedio de conocimiento del sistema se pueden realizar modelos que permiten realizar pronósticos basados en correlaciones estadísticas, para establecer estos modelos se requiere gran cantidad de datos; los resultados obtenidos sólo son válidos si el sistema y el ambiente se conservan invariantes, o solo sufren cambios pequeños; cuando el conocimiento que se tiene del sistema es mayor, se pueden establecer modelos

causales, para establecer estos modelos se requiere de los conocimientos de los mecanismos o relaciones causa-efecto que determinan el comportamiento del sistema y, un esfuerzo considerable en su realización; sin embargo, permiten obtener resultados precisos aún con grandes variaciones en las condiciones de operación del sistema.

#### 1.4.1 Etapas en el desarrollo de modelos

Cuando se analizan sistemas de grandes dimensiones, donde el empleo de modelos es muy frecuente, conviene seguir los siguientes pasos en el desarrollo de modelos:

- Formulación de objetivos del modelo.
- Análisis del sistema.
- Síntesis del sistema.
- Verificación del modelo.
- Validación del modelo.
- Inferencias.

La figura 1.6 presenta un esquema de las etapas anteriores y muestra la relación funcional entre ellas.

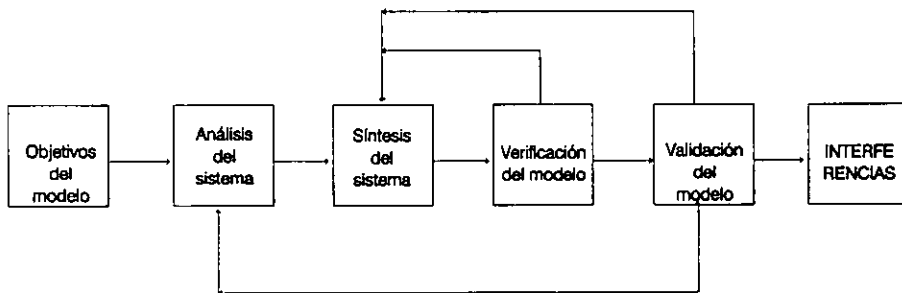


fig. 1.6 Esquema general de las etapas en el desarrollo de modelos



### **Etapas de formulación de los objetivos de modelo**

Esta etapa puede considerarse como preliminar en el desarrollo de un modelo, para realizarla adecuadamente es necesario haber establecido como se evaluará el comportamiento del sistema y por lo tanto, el objetivo del sistema; es importante que en esta etapa el ingeniero de sistemas empiece a proyectarse a sí mismo en el sistema, y sienta, casi intuitivamente, el mecanismo mediante el cual las diferentes partes del sistema actúan entre sí.

El diseñador, tiene el peligro de proyectar en el sistema también sus valores y juicios, con lo cual se pierde en parte la objetividad necesaria para la creación de buenos modelos.

### **Etapas de análisis del sistema**

La finalidad de esta etapa del modelado es aislar las partes, iteraciones, relaciones y mecanismos dinámicos del sistema.

Al analizar un sistema es muy importante establecer qué variables son endógenas o internas y cuales son exógenas o externas al sistema, la variación del primer tipo de variables depende de la dinámica del sistema, mientras que la variación de la segunda es independiente del mismo; al establecer el modelo del sistema, es necesario explicar, es decir, establecer relaciones funcionales que determinen la variación de las variables endógenas; no es necesario, por otra parte explicar la variación de las variables exógenas, ya que estas no están determinadas por el sistema en estudio, su cambio depende de factores externos. Si se analiza un sistema mecánico, como el esquematizado en la figura 1.7, la fuerza  $F$  es una variable exógena, es decir, su variación es independiente de la configuración y los parámetros del sistema, ya que es un dato o una excitación; por otra parte, variables como las velocidades  $S_1$  y  $S_2$  son variables endógenas, su valor depende de la configuración del sistema y de los parámetros del mismo y, desde luego, de las variables exógenas.

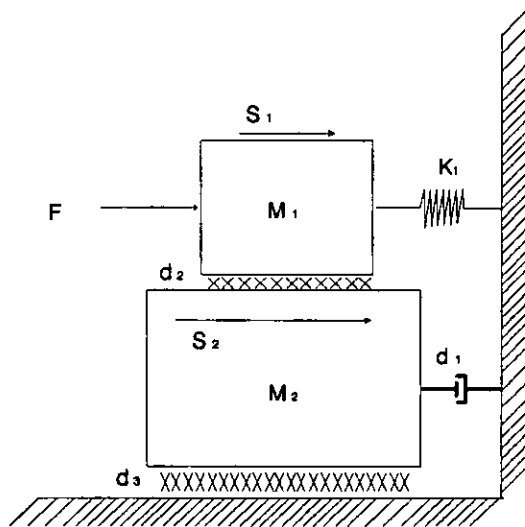


fig. 1.7 Esquema de un sistema mecánico con variables endógenas ( $S_1$  y  $S_2$ ) y variables exógenas ( $F$ ).

$$F = M_1 \frac{dS_1}{dt} + K_1 S_1 dt + d_2 (S_1 - S_2)$$

$$0 = M_2 \frac{dS_2}{dt} + S_2 (d_1 + d_3) + d_2 (S_2 - S_1)$$

Además de identificar las variables endógenas o internas al sistema es necesario identificar la variable de estado del sistema, con este nombre se conoce al conjunto de variables, cuyo valor es necesario conocer en un determinado instante de tiempo  $t_1$  para poder determinar, dada la variación en las variables exógenas en el intervalo  $t_1, t_2$ , el nuevo estado del sistema en el tiempo  $t_2$ . Así, por ejemplo, en un circuito eléctrico es necesario conocer la tensión en todos los capacitadores y la corriente en todas las inductancias en el instante  $t_1$ , para poder determinar el nuevo estado del sistema  $t_2$ , conocidas todas las excitaciones en el intervalo  $t_1, t_2$ .

Se deberá también buscar las leyes que rigen los cambios en las variables de estado, estos cambios pueden tener lugar de manera discreta o continua: la manera más apropiada de establecer las leyes de transición de estados, en el caso discreto, es mediante ecuaciones de diferencias; en el caso continuo mediante ecuaciones diferenciales. No siempre es posible establecer las ecuaciones diferenciales (o de diferencias) que rigen las transiciones de las variables de estado, debido principalmente a falta de conocimientos precisos del comportamiento del sistema, en estos casos se deberán utilizar métodos alternativos para describir las leyes de transición de estados.

Los objetivos de la etapa de análisis del sistema pueden sintetizarse de la siguiente manera:

- Determinación de las fronteras del sistema
- Determinación de lo que es el medio ambiente en el que se desenvuelve el sistema.
- Determinación de los elementos que constituyen el sistema.
- Determinación de los elementos o actividades, dentro del sistema, que tienen características retroalimentativas.
- Determinación de las variables de estado del sistema.
- Determinación de las leyes de transición de las variables de estado

### **Etapa de síntesis del sistema**

En esta etapa se integran todos los conocimientos que se tienen del sistema en un modelo que represente, de la mejor manera posible, las características del sistema en las que estamos interesados.

Antes de proceder a la estructuración del modelo, es necesario tomar una decisión sobre el tipo de modelo que se utilizará para estudiar el sistema; como hemos señalado, el modelo puede ser del tipo réplica o de tipo formal y de tipo estático o de tipo dinámico y de tipo determinístico o de tipo estocástico.

Para decir que tipo de modelo se va a construir es necesario considerar tanto el costo de los diferentes tipos de modelo, como el beneficio o información que se puede obtener de ellos, debe escogerse el tipo de modelo que satisfaga económicamente las necesidades de cada proyecto.

Nótese además que cada sistema está compuesto a su vez por sistemas menores, o subsistemas; al mismo tiempo que forma parte de un sistema mayor; dentro de la etapa de síntesis del sistema, la decisión sobre qué tipo de modelo se va a emplear, debe hacerse para el sistema principal y, para los subsistemas más importantes.

### **Etapa de verificación del modelo**

La verificación de un modelo consiste en determinar si éste opera como su planeador ha concebido que debiera hacerlo.

La manera de realizar la verificación del modelo depende del tipo de éste, por ejemplo, la verificación de la maqueta de una construcción, consiste en determinar si ésta luce como su diseñador la ha planeado; la verificación de un modelo, que es programa de computadora, consiste en una serie de pruebas para eliminar las fallas del programa (Bugs) así como corridas de calibración.

Durante esta fase no se determina si el modelo es una representación adecuada del prototipo, este trabajo se realiza durante la fase de validación, que se describe a continuación.

En esta etapa de creación de modelos, se comparan las respuestas obtenidas empleando el modelo, ya verificado en la etapa anterior, con las respuestas correspondientes del sistema real.

No siempre se puede efectuar la validación de modelo, en ocasiones, el sistema real no se encuentra disponible para realizar las pruebas; o pueden ser muy costosos los experimentos de validación. Desde luego que cuando no se puede realizar la etapa de validación, la confiabilidad de los resultados obtenidos con el modelo es baja.

Como se puede apreciar en la figura 6, si la etapa de validación no se termina con éxito, debe reiniciarse el proceso de creación del modelo, a partir de las etapas de análisis ó, síntesis del sistema; una situación semejante se presenta cuando la etapa anterior, la de verificación del modelo, no se termina correctamente.

### **Etapa de inferencias**

Con éste nombre se conoce la ultima etapa del proceso de creación de modelo; en esta etapa se obtienen los beneficios del esfuerzo realizado al construir modelos, esta fase consiste de una serie de experimentos con una o más de las siguientes finalidades:

a) determinar el comportamiento dinámico del sistema como respuesta a ciertas entradas durante un periodo de tiempo.

b) determinar los cambios relativos (marginales) en los resultados producidos por cambios unitarios en los elementos del sistema, a este proceso tambien se le conoce con el nombre de análisis de sensibilidad.

c) determinación de los puntos óptimos de operación, dicho de otra manera encontrar las condiciones ambientales y, la mejor combinación de entradas; que hacen que el sistema se comporte de manera óptima, dado un cierto criterio de comportamiento.

## CAPITULO 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LAS VIBRACIONES MECANICAS

El movimiento de los sólidos puede dar lugar a la generación y transmisión de ruido, para determinar el origen y métodos para su eliminación, es con frecuencia, necesario medir este movimiento; en esta parte se consideran los movimientos vibratoriales y transitorios y se incluye una descripción de los tipos principales de golpes y vibraciones o transductores electromecánicos, sus métodos de calibración y el análisis de las medidas.

La vibración permanente se define como un movimiento continuo de un sistema vibrante sobre el cual ha actuado una fuerza definida durante el tiempo suficiente como para establecer movimiento periódico, existen vibraciones cuasi-estables, en las cuales se emplean técnicas y equipos para su medida que en los estables que se definieron anteriormente; Las vibraciones cuasi-estables consisten en movimientos vibratorios que ponen poca periodicidad, pero su amplitud media permanece constante un considerable período de tiempo, esta condición de cuasi-estable es característica de un ruido aleatorio, su espectro de amplitud media frente a frecuencias es continuo, aunque no necesariamente constante. Las vibraciones periódicas se caracterizan por sus espectros de líneas, pueden existir mezclas de estos dos tipos de vibración, el título general de <<vibración estable>> se aplica frecuentemente a cualquiera de estos tipos de vibración.

Los rangos de frecuencia de mayor importancia para las estructuras son los provocados para la maquinaria se extienden desde ciclos por segundo a varios miles, pero existen casos en que son de interés vibraciones fuera de este rango.

## **Movimientos transitorios**

Un movimiento transitorio es una perturbación de duración relativamente corta que no ha llegado a ser permanente, por cuestiones de instrumentación, al menos se puede dar como descomponible en componentes de Fourier; componentes armónicos o de Fourier son expresiones sinónimas, los movimientos transitorios mecánicos más importantes se pueden descubrir normalmente de una forma adecuada mediante las componentes de Fourier extendidas desde unos pocos hasta varios miles de ciclos por segundo.

### **2.1 MEDIDA DE LAS VIBRACIONES**

Cuando se quiere medir el movimiento de un punto, se debe utilizar un aparato con un elemento sensible que indique las posiciones, las velocidades y aceleraciones del punto. Un transductor electromecánico convierte la energía del movimiento mecánico en energía eléctrica o viceversa, los acústicos llaman generalmente a aparatos de este tipo transductores, mientras que muchos ingenieros relacionados con las vibraciones los llaman pickup; así, un pickup es un aparato que convierte el movimiento mecánico que se quiere medir en energía eléctrica, óptica, hidráulica, mecánica o cualquier otro tipo; junto con otros aparatos, puede usarse para medir la amplitud, la velocidad o la aceleración de la vibración.

### **INSTRUMENTOS PARA LA MEDIDA DE LAS VIBRACIONES**

#### **Vibrómetros Eléctricos (medidores de vibración)**

Un vibrómetro está considerado como un aparato que indica la amplitud de la vibración, mientras que un vibrógrafo da una grabación oscilográfica de la misma, se pueden obtener medidas de vibración eléctricas en las cuales la amplitud de la vibración se indica directamente sobre un medidor, un modelo típico consiste en un pickup, un atenuador ajustable, un amplificador y un medidor de lectura directa, estos aparatos son bastante populares, ya que son

de manejo sencillo, portátiles, compactos y cubren con un amplio rango de frecuencias; se suministran conexiones para acoplar a un osciloscopio, para un par de auriculares, para poder escuchar la vibración que se está midiendo, o para conectar a un analizador.

Se incorporan redes integradas, de forma que se puede leer directamente la aceleración, la velocidad o el desplazamiento eficaces.

Algunos fabricantes de sonómetros producen <<cajas de control>>, que hacen posible utilizar los pickups conectados a sus sonómetros; por medio de una red de integración en la caja de control, se puede enviar voltajes al sonómetro que sean proporcionales a la aceleración, velocidad o el desplazamiento, siendo seleccionada la respuesta adecuada por medio de un interruptor.

### **Vibrómetros y vibrógrafos mecánicos**

Los vibrómetros y vibrógrafos mecánicos-ópticos emplean trenes de engranajes o brazos de palanca, ópticos o mecánicos, para amplificar los movimientos vibratorios antes de ser indicados o grabados; estos aparatos se sujetan con la mano, conectando la sonda con la superficie que vibra, las manos y los brazos, constituyen un muelle suave, de forma que, para frecuencias suficientemente altas, la medida permanezca esencialmente estacionaria mientras la sonda arrastra un tren de engranajes o brazos de palanca, un débil muelle mantiene la sonda de contacto con la superficie vibrante; se obtiene un límite superior de amplitud de la aceleración cuando la sonda pierde el contacto con la superficie.

La fig. 2.1 muestra cómo el movimiento transmitido a una sonda por una superficie vibrante balancea un espejo y actúa sobre una palanca óptica, un rayo de luz reflejado desde el espejo y reflejado sobre una escala suministra una indicación de la amplitud de la vibración; se puede conectar un aparato similar, como el de la fig. 2.2, que amplifique mecánicamente el movimiento de la sonda en una esfera indicadora, la carcasa de estos aparatos deben ser



claramente pesados si se han de manejar a mano; sus rangos de frecuencia y amplitud se muestran en la fig. 2.3.

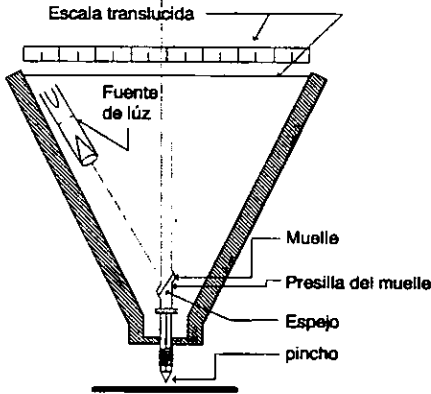


Figura 2.1. Vibrometro

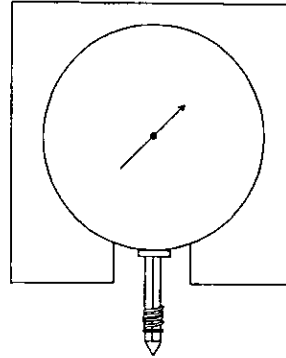


Fig. 2.2 Vibrometro con esfera indicadora

El aparato basado en el rayo de luz es capaz de operar en rangos de frecuencia más altos a causa de la menor de sus partes móviles; la presentación del rango amplitud-frecuencia se da frecuentemente según el método ilustrado, el campo de operación de un aparato está dentro del área encerrada por las líneas que indican los límites del rango, así, los vibrómetros ilustrados tienen un límite de baja frecuencia, a causa de la incapacidad del operario para mantenerlo fijo, un límite de desplazamiento máximo impuesto por el límite de la escala, un límite de aceleración máxima a causa de la pérdida de contacto entre la sonda de la superficie vibrante y diversas consideraciones sobre las fuerzas actuales, una limitación de alta frecuencia a causa de las resonancias de los componentes del instrumento y un límite de desplazamiento mínimo provocado por fallos de sensibilidad.

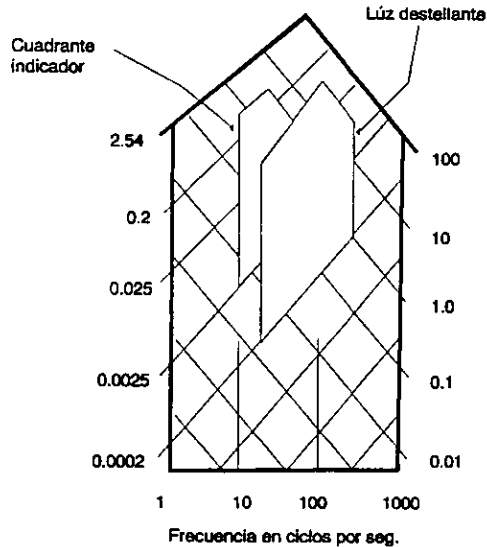


Fig. 2.3 Rangos de frecuencia-amplitud en el vibrómetro mecánico

Los vibrógrafos mecánicos se ilustran esquemáticamente en la fig. 2.4., estos instrumentos constan de un papel móvil o película sobre el cual una plumilla graba el movimiento que se está midiendo. En la fig. 2.4(a) la carcasa sigue la vibración que se mide, y una masa sostenida por un muelle suave es la referencia estética si las frecuencias de la vibración son suficientemente altas; en la fig. 2.4(b) se puede sujetar rígidamente con la sonda mantenida contra la superficie vibrante, sin embargo, normalmente la masa se sujeta con la mano, que constituye un muelle suave con la sonda contra la superficie.

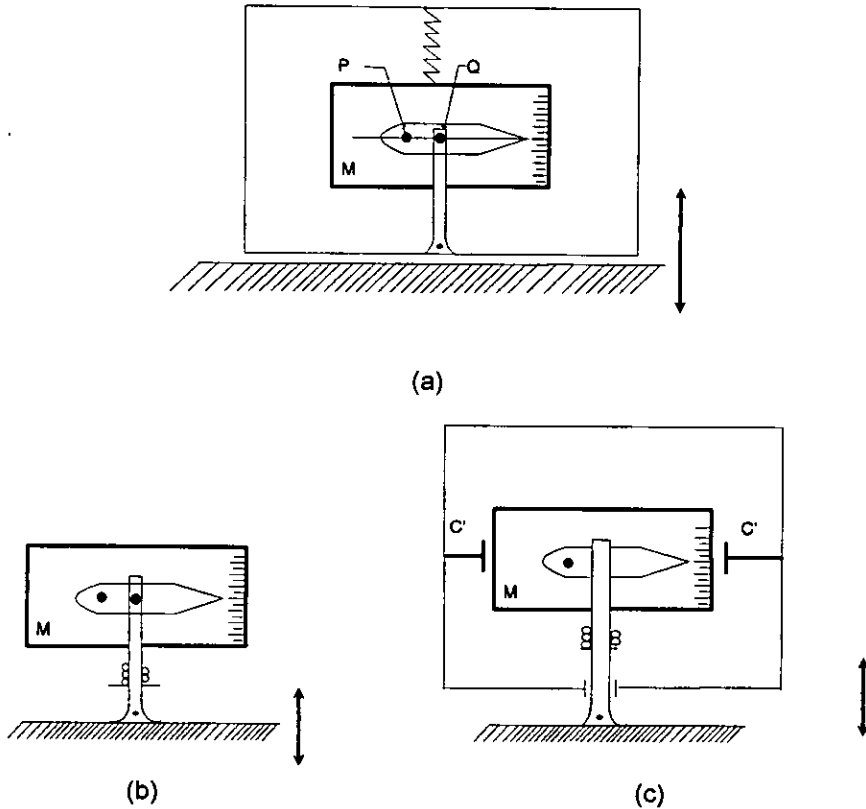


Fig. 2.4 Vibrógrafos. El brazo marcador gira sobre el punto  $P$  adicto a la masa  $M$ . La aguja unida  $O$  encajada al punto  $Q$  a la derecha del marcador. En el diagrama (c) los ganchos  $C$  y  $C'$  protegen la masa y la aguja de la caja.

Un tercer método en la fig. 2.4(c) es una combinación de los sistemas mostrados en las figuras 2.4(a) y 2.4(b) fijando la masa a la carcasa, se obtiene el sistema de la fig. 2.4(b), si se deja libre la masa y se une la sonda a la carcasa, el sistema equivale al de la fig. 2.4(a).

Los vibrógrafos de este tipo más general, se fabrican de forma que la grabación se hace con una pluma de alambre de presión ligeramente contra una película de celuloide; una palanca mecánica amplifica, en un factor de 8, el movimiento vibratorio, de forma que se pueden medir vibraciones por debajo de

0.0002 cm; el surco impresionado en este film es difícil de ver, a menos que se utilice una luz y un equipo óptico apropiado. Aunque el vibrógrafo Askania y el vibrómetro grabador de General Eléctric son más precisos que otros instrumentos son preferibles frecuentemente, ya que sus graduaciones que están impresas sobre papel encerado son visibles más fácilmente.

### Medidas de frecuencia mecánicas (sistema de lengüetas)

Las medidas de las frecuencias de los sistemas mecánicos en vibración se hacen normalmente usando sistemas mecánicos resonantes.

Los elementos sensibles suelen ser lengüetas calibradas en su extremo libre, cuyas frecuencias se seleccionan para cubrir un espectro de frecuencias de interés; el vibrómetro de la figura 2.5 tiene una lengüeta que es de longitud ajustable, el extremo de la misma, que está en el interior de la carcasa del aparato, tiene una alargadera que se lleva por una rendija y que indica sobre una escala la frecuencia natural de la lengüeta, la carcasa del instrumento se mantiene contra la superficie vibrante y se ajusta la longitud libre de la lengüeta hasta que su amplitud sea máxima para un modo fundamental de vibración, marcando en la escala la frecuencia.

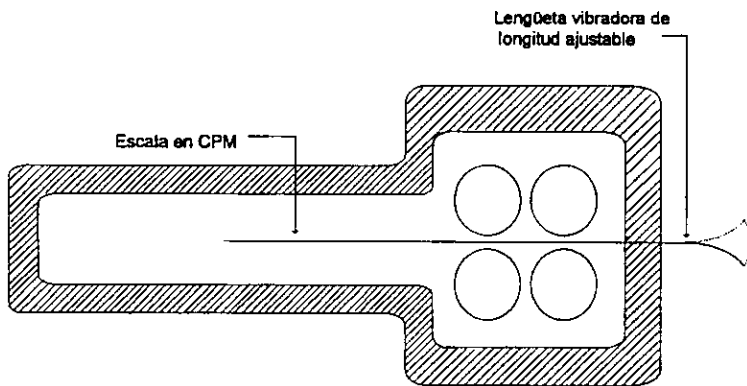


Fig. 2.5 Vibrómetro de lengüeta

Este instrumento, junto con el mostrado en la figura 2.1 hacen una pareja excelente para medidas rápidas de la vibración cuando no sea de interés la forma de onda.

### **Películas y fotografía rápida**

Se han desarrollado las técnicas de las películas de alta velocidad de forma que se pueden obtener rápidamente resultados aceptables para quienes están familiarizados con los principios generales de la fotografía, es lo más útil para estudiar a cámara lenta el comportamiento del equipo en vibración cuando está en movimiento; en las cámaras que se utilizan en estos estudios, la imagen fotográfica es obligada a trasladarse con la película por medio de la difracción en un prisma de vidrio plano que gira; se puede obtener velocidades superiores a 1500 cuadros por segundo, las cámaras sin obturador pueden sincronizarse con fuentes de luz estroboscópica para producir varios miles de cuadros por segundo.

Cuando se fotografía un objeto con una cámara sin obturador con iluminación ordinaria, se producen rayas que indican la posición de las áreas de más contraste de la imagen, mediante algunos refinamientos, es posible obtener curvas de desplazamiento-tiempo de este tipo, que pueden incluir amplitudes por encima de varios centímetros, con una presión de unas pocas milésimas de centímetro y unas pocas cienmilésimas de segundo.

### **Estroboscópios**

Si un cuerpo que gira o vibra periódicamente se ilumina con cortos destellos de luz, a intervalos de tiempos aproximadamente iguales al período de vibración o a algún múltiplo de este período, el cuerpo aparecerá inmóvil o con un movimiento lento; la velocidad de vibración aparente será igual a la frecuencia de la vibración y la del flash, como la velocidad del flash es conocida, se puede usar este método para determinar la frecuencia, así como para observar los

detalles de funcionamiento de las partes móviles. La medida de la amplitud de la vibración por métodos estroboscópicos supone una mayor exactitud y comodidad de medida.

Para determinar con precisión las frecuencias de vibración o rotación, se utiliza un aparato basado en los principios estroboscópicos, un elemento sensible provoca una señal eléctrica obtenida de la fuente de vibración, esta señal enciende un grupo de tubos de descarga de neón de manera que ilumina a un conjunto de discos registro, la velocidad de rotación de los discos está controlada (al 0.05 por 100) por un diapasón cuya frecuencia puede variarse, ajustando el diapasón hasta que ciertos sectores del disco aparezcan inmóviles, se puede determinar la frecuencia de la vibración.

Se ha desarrollado un aparato que provoca luz estroboscópica de alrededor de 1 cps menos que la frecuencia de rotación o vibración; esto sucederá, incluso, aunque la frecuencia de vibración varíe rápidamente, esto permite observar a cámara lenta, bajo condiciones variables, cuando será imposible un control manual.

### **Interferómetros**

Se han desarrollado interferómetros lumínicos para la medida de las vibraciones en investigación de laboratorio, pero son de uso incómodo; ha sido desarrollado otro interferómetro para la medida de la amplitud de la vibración acústica que requiere unir a la superficie vibrante un plano óptico de alrededor de 1cm de diámetro, se pueden determinar amplitudes desde 10 a 10 cm con una exactitud de alrededor de 10 cm.

## Acelerómetros

Un acelerómetro consiste esencialmente en una masa soportada sistemáticamente con respecto a una caja y guiada para prevenir el movimiento en direcciones que no sean sísmicas (Un sistema sísmico consiste en una masa suspendida en una caja por un resorte, el movimiento relativo de la caja puede ser amortiguado). En el rango de frecuencia de operación del acelerómetro, el cual se encuentra por debajo de su frecuencia resonante, la masa experimenta prácticamente la misma aceleración que el cuerpo del acelerómetro, la masa ejerce sobre el resorte sísmico una fuerza que es directamente proporcional a la amplitud de la componente de la aceleración, y la salida es una función conocida de la fuerza.

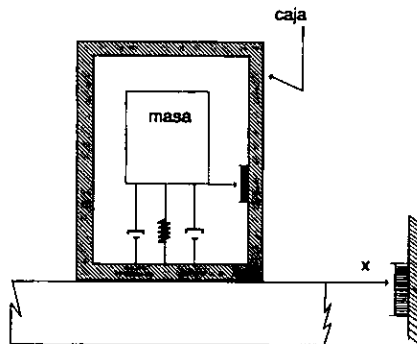


Fig. 2.6 Un medidor sísmico. El movimiento de la caja está dado por  $X$ . El desplazamiento relativo de la masa sísmica con respecto a la caja está dado por  $Y$ . La unidad es un sistema lineal amortiguado y de un simple-grado de libertad, que tiene una constante de resorte  $K$  y un factor de amortiguación  $C$ .

Los problemas de instrumentación en las mediciones de vibración son generalmente reducidas si las medidas a altas frecuencias y amplitud de desplazamiento bajo son hechas por medidores sensibles a la velocidad o la aceleración, ya que, para un desplazamiento dado, la aceleración varía como el

cuadrado de la frecuencia, y la velocidad se incrementa linealmente con la frecuencia.

### 2.1.1 Características generales de los medidores de vibración

#### Rango de frecuencia

Los medidores deberán ser solamente usados en un rango de frecuencias específicas, dentro del cual existe una relación simple entre el movimiento que se mide y la salida del transductor. Un estudio de las siguientes ecuaciones de la respuesta de la masa del medidor a las vibraciones es útil para definir el rango de frecuencia conveniente de un medidor de tipo sísmico, se le puede imponer limitaciones adicionales por los circuitos eléctricos empleados en asociación con éste.

$$x = X \text{ sen } 2\pi ft$$

Si un medidor de tipo sísmico, mostrado en la figura 2.6 está sujeto a un desplazamiento a lo largo de su eje sensible, entonces, bajo condiciones permanentes, el desplazamiento relativo de la masa con respecto a la caja viene dado por

$$y = Y \text{ sen } (2\pi ft - \phi)$$

La salida de los medidores de este tipo son proporcionales a  $Y$  o a su derivada con respecto al tiempo; por lo tanto, un conocimiento de las relaciones entre  $Y$  y  $X$  proporcionan información, así como la frecuencia para el cual existe un comportamiento mecánico aceptable.

#### Distorsión de fase.

A muy baja frecuencia, la masa y la caja del marcador sísmico (fig 2.6) vibran en fase, a medida que la frecuencia aumenta, el desplazamiento de la masa se



retrasa detrás de la caja, hasta que en la resonancia el retraso es de  $90^\circ$  y a muy alta frecuencia es de  $180^\circ$ .

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{2cf/Cc \, fn}{1 - (f/fn)^2} \right]$$

Si el movimiento que ha sido medido contiene varias frecuencias diferentes el movimiento indicado por el medidor puede ser, entonces, distorsionado por el cambio de sus relaciones de fase y la frecuencia entonces habrá una constante de tiempo de retardo para la transmisión de todas las frecuencias y no habrá ninguna distorsión.

### **Montaje**

El montaje del acelerómetro debe ser lo suficientemente rígido como para prevenir un movimiento relativo apreciable entre el acelerómetro y la estructura.; para indicar una aceleración de  $10^\circ$  dentro de un 1 por 100, a una frecuencia  $f$  ciclos por segundo, el movimiento relativo entre el acelerómetro y la estructura debe tener una amplitud de menos de  $1/f^2$ , es decir, menos de 0.0002 cm a 100 cps y menos 0.00002 cm a 1000 cps.

### **Peso**

El peso del acelerómetro, junto con su montaje, debe ser lo bastante pequeño como para que la inercia del acelerómetro no altere apreciablemente el movimiento que se mide.

### **Respuesta a movimientos transitorios**

Las limitaciones impuestas bajo la consideración de las condiciones de estado permanente, se aplican también a condiciones transitorias, además, especificaciones más severas se requieren para el caso transitorio; se han

hecho estudios del sistema simple a varios tipos de excitaciones transitorias, los trabajos más extensos consideran que la excitación es una fuerza directamente aplicada a la masa, un desplazamiento de la caja o una aceleración de la caja, las formas de excitación han incluido pulsaciones sinusoidales, combinaciones de formas exponenciales y muchas otras.

## 2.2 MEDIDORES DE VELOCIDAD

Un medidor de velocidad es aquel que genera un voltaje proporcional a la velocidad relativa de dos elementos principales del medidor, siendo frecuentemente estos dos elementos una bobina de cable y una fuente de campo magnético, existen dos tipos generales de medidores de velocidad:

1) *El de tipo sísmico* (fig. 2.6), en el cual un elemento es soportado sísmicamente desde la caja, a fin de formar un sistema de baja frecuencia y con un simple grado de libertad, mientras que el otro elemento es solidario a la caja; los medidores de velocidad del tipo sísmico operan a frecuencias por encima de la frecuencia natural del sistema sísmico, el elemento soportado flexible es esencialmente estacionario, mientras que la caja sobre el cual está montado sigue el movimiento de la estructura sobre la cual la caja está montada; el elemento transductor proporciona una velocidad que es proporcional a la velocidad de las dos partes; desde que el voltaje desarrollado en la bobina es proporcional a la tasa de cambio del flujo magnético, el voltaje será proporcional a la velocidad de las dos partes, se muestra en la fig 2.7 las instalaciones típicas de las dos partes, que han sido utilizadas en los medidores de velocidad.

2) *El de tipo sonda* en el cual el movimiento relativo entre un elemento y otro es deducido de una sonda que se prolonga a través de la caja, una punta de la sonda está asida al elemento móvil del medidor y la otra punta está en contacto con la estructura cuya vibración ha de ser medida, cuando se la sostiene a mano, la caja del medidor del tipo sonda permanece esencialmente fija en el

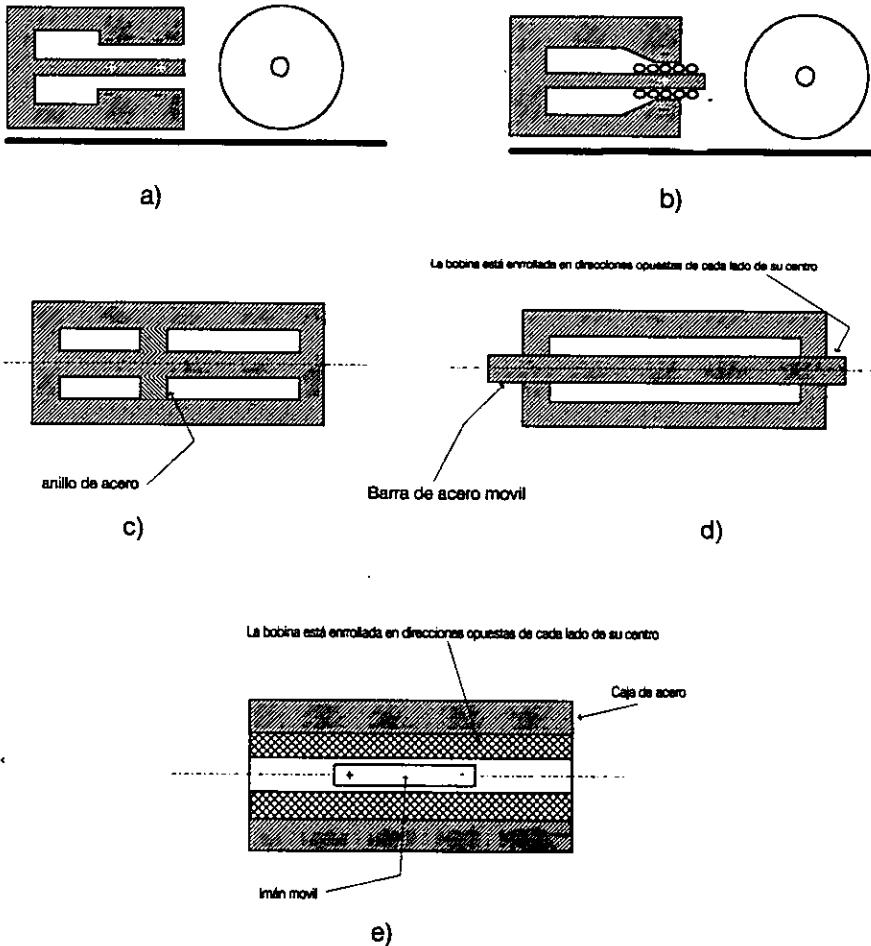


Fig. 2.7 Instalaciones típicas de medidores de velocidad

espacio, de tal manera que el voltaje de salida depende del movimiento de la estructura vibrante.

El principio ilustrado por la fig. 2.7(c) y (e) permiten un desplazamiento relativo amplio para dimensiones externas dadas, una unidad de este tipo

(llamada medidor Hastz) pesa casi 5 Kg. y permite un desplazamiento relativo de 15 cm. La cantidad de amortiguación para medidores de velocidad del tipo de amplio desplazamiento, los cuales se utilizan en primer lugar para medidas de golpes, es normalmente de valor más pequeño posible.

Aunque el tipo de medidor de velocidad es bastante amplio, se utiliza frecuentemente en lugar de los acelerómetros; la impedancia relativamente baja y alto voltaje de salida de estas unidades son fundamentos para su popularidad y la energía disponible de estas unidades es suficiente, a menudo, para mover los galvanómetros de los osciloscopios directamente.

### **Rango de frecuencia**

Los medidores de velocidad están limitados en su escala superior por resonancias locales, que se producen en sus partes o en sus instalaciones de montaje; estos y otros factores relativos a la respuesta de frecuencia acentúan la importancia de las curvas de calibración fiables para el medidor, tendrían que cubrir la frecuencia y la escala de amplitud que se encuentran durante el funcionamiento; el medidor de tipo sísmico opera en la escala de frecuencias por encima de la frecuencia natural no amortiguada, limitada a valores que permitan que la sonda mantenga el contacto con la parte vibrante, las escalas de amplitud de frecuencia para medidores típicos de velocidad se muestran en la figura 2.8; las mediciones de movimiento de choque, cuando se trata de un desplazamiento de varios cm. requieren medidores más grandes, estos medidores han sido utilizados principalmente para medir el movimiento de choque sobre estructuras pesadas, y el medidor puede corresponder en peso.

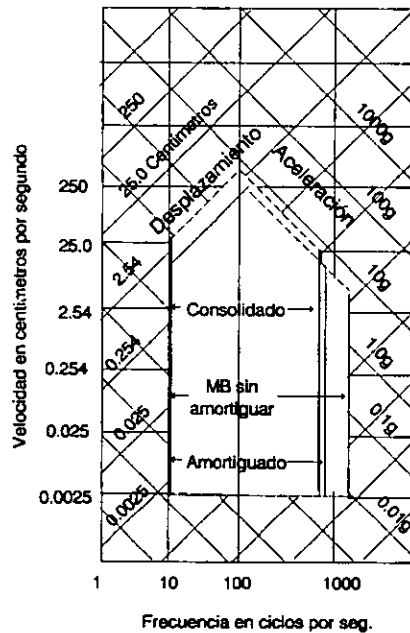


Fig. 2.8 Escalas de amplitud-frecuencia de los medidores de vibración de tipo velocidad.

El primer medidor de éstos que ha sido utilizado ampliamente se llamó medidor de velocidad de tipo inglés; el conjunto imantado es guiado sobre rodillos de tal manera que se puede mover sólo en dirección axial, y es soportado por resortes que dan al sistema móvil una frecuencia natural de alrededor de 7 cps. en esa dirección.

Los desplazamientos superiores a 7.6 cm pueden ser medidos con una unidad de este tipo, que pesa casi 18 kg. Un medidor de velocidad se muestra en la fig. 2.9, que es esencialmente un modelo de medidor de vibración a gran escala; la unidad tiene una bobina de 7.6 cm. y pesa 8 kg, la bobina se enrosca en la punta de un brazo que está soportado por cojinetes en la otra punta, la frecuencia natural del brazo de bobina está determinada por la rigidez del resorte directo y se ajusta a unos 3 cps, el voltaje de salida es de 3.5 mv por cm por seg., cuando se encuentra conectado a una carga de 10 ohmios.

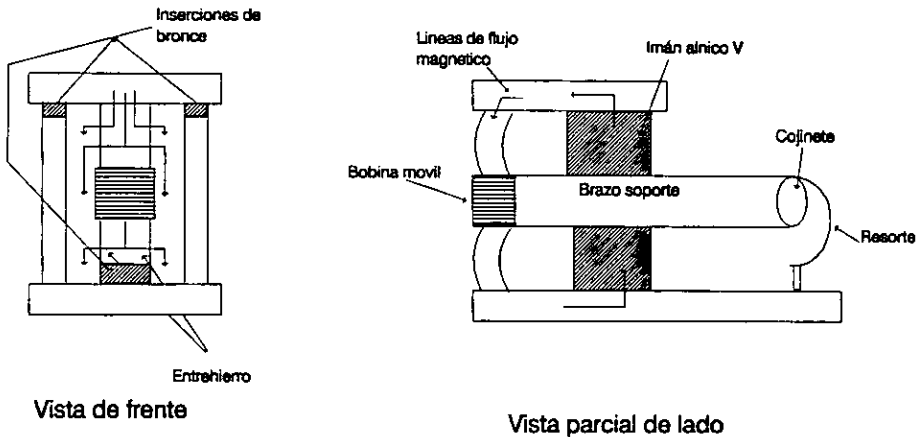


Fig. 9 Medidor de velocidad

Se pueden encontrar marcadores de vibración de velocidad de pequeño tamaño, que pesan casi 280 g. pero que tienen casi la misma construcción que la unidad más grande mostrada en la fig. 2.9; algunos modelos están amortiguados eléctricamente a 0.65 del crítico, por tener el elemento bobina enroscado sobre una forma de aluminio cortocircuitada, también se encuentran modelos sin amortiguación, estos medidores se ven poco afectados por temperaturas entre  $-45$  y  $120$  °C; la frecuencia natural para muchos modelos es de alrededor de 5 cps y tiene una sensibilidad de 40 mV por cm por seg, la bobina tiene un juego total de 15 cm.

Un medidor de velocidad diseñado para medir vibración permanente puede ser fabricado de tamaño relativamente pequeño, este medidor está mostrado en la fig. 2.9, la unidad pesa 280 g, provee 43 mV por cm por seg. de velocidad, y está amortiguada por líquido alrededor de 0.65 del crítico, es utilizable un rango de temperatura entre  $-17$  y  $65$  °C; aunque el juego total para un desplazamiento relativo del imán sea un poco más grande que 2.5 cm, esta unidad se dice que

es capaz de medir amplitudes de vibración que tienen desplazamiento por encima de 5 cm para movimientos horizontales; se da un valor máximo de sólo 3.5 cm para la vibración vertical por las desviaciones estáticas del imán desde una posición central.

### **Distorsión de fase**

Existe normalmente una distorsión de fase considerable para medidores de desplazamiento o de velocidad que operan a frecuencia más alta que la resonancia, la distorsión de fase es menor para pequeñas cantidades de amortiguación, el ángulo de la fase no es importante para condiciones permanentes, pero ha de ser considerado en trabajos transitorios.

#### **2.2.1 Elementos sensibles**

##### ***Cristales Piezoeléctricos.***

Se utilizan comúnmente cuatro elementos piezoeléctricos como elementos sensibles: cuarzo, sal Rochelle, ADF (Fosfato diácido de amonio) y titanato de bario; dado que los cristales piezoeléctricos producen potenciales eléctricos sobre ciertas superficies, siempre que sus dimensiones sean cambiadas a medida que se aplica el esfuerzo, estos materiales serán corrientemente utilizados como elementos sensibles en los acelerómetros. El efecto de capacitancia de cable sobre la sensibilidad es significativo con estos elementos de manera que es generalmente deseable utilizar un pre-amplificador conectado al medidor por un cable corto.

##### **Cuarzo**

El cuarzo es un material mecánicamente excelente, pero su coeficiente piezoeléctrico es relativamente bajo, los acelerómetros de cristal de cuarzo se han utilizado con éxito, pero los ingenieros que trabajan en la materia

encuentran que este tipo no es satisfactorio por su alta impedancia y su baja energía de salida.

### **Sal Rochelle**

La sal Rochelle es mecánicamente débil, higroscópica y sensible a la temperatura, pero posee la más alta sensibilidad piezoeléctrica que cualquier material conocido; temperaturas superiores a 54°C dañarán al cristal permanentemente, las aceleraciones a lo largo de un eje perpendicular a las caras del cristal causan una curvatura de los cristales, la cual pone un cristal bajo compresión y el otro bajo tensión, y provoca que se desarrolle una carga eléctrica sobre las caras grandes del cristal; este modelo no tiene que ser sometido a aceleraciones mayores de 10 g, aunque otros modelos de elementos de sal Rochelle pueden ser utilizados por encima de 5000 g.

### **Cristales ADF**

Estos son más bastos y menos sensibles a la temperatura que la sal Rochelle, no son higroscópicos y no le dañan temperaturas menores que 93°C; una serie de medidores de tipo acelerómetro, conveniente para condiciones permanentes y transitorias y empleando cristales Adf, que ha sido desarrollada, medirá aceleraciones por encima de casi 2000 g y sobre una escala de frecuencias de 10 a más de 10 000 cps, extendiéndose sus sensibilidades a 125 mV por g con capacidad normal a través del cristal.

### **Titanato de bario**

El titanato de bario no es corriente entre materiales piezoeléctricos por el hecho de que su eje sensible piezoeléctrico no está determinado por la orientación del cristal, pero puede ser realizado en cualquier dirección arbitraria por la aplicación, bajo buenas condiciones de temperatura, de un voltaje polarizado; esto permite que el titanato de bario sea moldeado con una cerámica policristalina, la cerámica puede ser polarizada como se desea



después de su fabricación. La sal Rochelle, el ADF y el titanato de bario son clasificados todos como materiales <<ferroeléctricos>>, por su similitud entre su reacción a un campo eléctrico y la del acero a un campo magnético, la analogía es más clara, sin embargo, para el titanato de bario que puede ser utilizado como una estructura policristalina, y a la cual se le han sumado impurezas para mejorar sus propiedades piezoeléctricas, a bajas frecuencias, los efectos de relajación pueden causar efectos no lineales si las presiones o voltajes se aplican durante más de unas pocas décimas de segundo, no es recomendable, sin calibraciones, medir amplitudes de frecuencia que sean menores a algunos ciclos por segundo.

Algunos acelerómetros muy pequeños y simples, del tipo de compresión de titanato de bario, han sido desarrollados, uno de estos solo pesa 3 g y poseen una sensibilidad de alrededor de 2.5 mV por g (0.001 microfaradios de capacidad); su salida es esencialmente plana, desde unos pocos hasta 15 000 cps.

El titanato de bario puede ser moldeado entre dos hojas de metal, con el espesor de la cerámica tan pequeña como 0.02 cm, este elemento puede ser encolado sobre la superficie y desarrollará una carga de salida proporcional al esfuerzo de la superficie.

### ***Hilo de resistencia sensible al esfuerzo***

La resistencia eléctrica de un hilo cambia cuando se le somete a un esfuerzo; este cambio es débil, en parte al cambio y en parte debido al cambio de resistencia específica; este principio ha sido aplicado a una gran cantidad de transductores, incluyendo a los acelerómetros. La masa está forzada por un par de resortes de hoja en voladizo de tal manera que se pueda mover en la dirección de los hilos de medida de la tensión, los cuatro grupos de cables están enrollados bajo tensión, cuando la masa se mueve en una dirección respecto a la caja, dos grupos de hilos están sometidos a una tensión mayor y los otros dos tienen la tensión relajada, los topes previenen un excesivo esfuerzo, los cuatro grupos de cable están conectados formando un puente de

Wheastone, como se puede ver en la fig. 2.10, se necesita una fuente externa de tensión para activar el puente, generalmente del orden de 10V; de esta manera, se llega a un máximo de sensibilidad, y la unidad no se ve influida por los cambios de temperatura, los cuales afectan a todos los brazos de la misma manera.

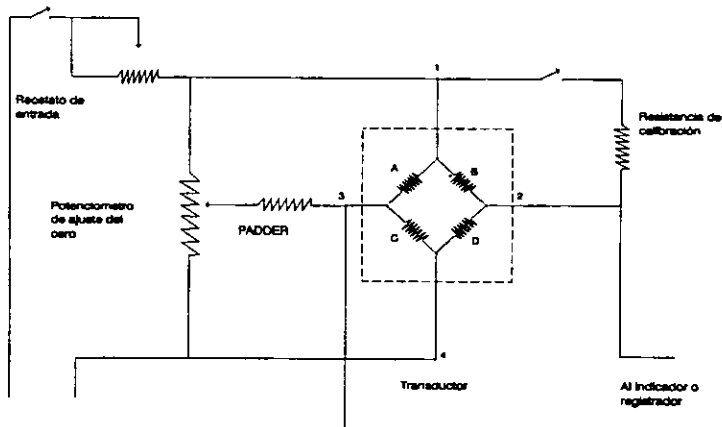


Fig. 10 Circuito eléctrico del puente de Wheastone

Los acelerómetros de hilos tensados dan un nivel de salida, a fin de escala, es generalmente del orden de 50 mV, con circuito abierto; su impedancia interna es baja, sin embargo, para que sean utilizadas para dirigir directamente elementos sensibles de un galvanómetro-oscilográfico; otros factores que se suman a su popularidad son la buena aproximación a la linealidad, con variaciones continuas de salida con respecto a la entrada, su constancia del calibrado y el hecho de que gran cantidad de la instrumentación auxiliar que ha sido constuída para que la resistencia del hilo sensible a la tensión pueda ser utilizado para amplificar y registrar la salida de estos acelerómetros.

Las frecuencias naturales de estos acelerómetros se extienden a casi 5000 cps., se utiliza generalmente un líquido de amortiguación, el cual es eficaz para frecuencias naturales más bajas que algunos cientos de ciclos por seg., pero que no son fácilmente mantenidas en el valor requerido para unidades de alta frecuencia.

### ***Potenciómetro de resistencia variable***

Los elementos sensibles de un potenciómetro de resistencia variable consiste en un elemento resistivo, tal como la resistencia bobinada de una banda de carbón o de una película conductora depositada; es posible producir elementos cuyas salidas sean función lineal o sigan otras funciones del desplazamiento, seleccionando adecuadamente el mandril o la forma sobre la cual se bobina el elemento, estos elementos sensibles son adecuados para medir movimientos entre casi 0.2 cm y varios centímetros con una precisión del orden del uno por 100 del final de escala; los aspectos deseables son gran poder de salida, amplio rango, insensibilidad a los cambios de temperatura y baja impedancia interna; una de las dificultades que se experimentan en algunas aplicaciones es mantener un buen contacto del cursor, además, se requiere una fuente externa de voltaje para activar el elemento, el cual usualmente tiene una relativamente baja frecuencia de resonancia; la resolución de los elementos bobinados es limitada, dependiendo principalmente del número de vueltas y su espaciamiento, siendo mejor generalmente que el 1 por 100 del final de la escala.

Existen, para las medidas de desplazamiento y aceleración una gran cantidad de instalaciones de potenciómetros; los cursores deslizantes hacen que la mayoría de estas técnicas sean incómodas para los medidores que tienen condiciones permanentes, donde el desgaste es un factor determinante, tales aparatos son utilizados para medir los desplazamientos asociados con los movimientos de choque; tal unidad fabricada, teniendo una distancia de desplazamiento de 12 cm está diseñada para operar mientras que se encuentra sometida a aceleraciones axiales por encima de 1500g y a aceleraciones transversales superiores a 500g.

## 2.3 EL RUIDO COMO CONSECUENCIA DE LA VIBRACION MECANICA

Cuando se axiona el claxon del automóvil, se produce en el aire un fenómeno físico llamado sonido, de forma que una persona cercana puede atestiguar que ha escuchado el sonido del claxon; por tanto, hay dos formas de definir el sonido:

- como fenómeno físico ( en este caso en el aire)
- como sensación auditiva en el oyente.

En todas partes siempre hay algo de ruido, normalmente el ruido proviene de diversas fuentes, unas próximas, otras lejanas; puede venir reflejado por las paredes, e incluso una parte de él puede venir de todas direcciones. El ruido total asociado con un determinado entorno se denomina ruido ambiente.

### **Frecuencia**

Mucho ruido se produce por vibraciones de algún material sólido; por ejemplo el caso del claxon de un automóvil, se trata de un diafragma que se mueve rápidamente hacia adelante y hacia atrás, lo que hace que el aire en contacto con el diafragma siga el mismo movimiento; el número de movimientos de este tipo por unidad de tiempo es del mismo para el diafragma y para el aire circundante, este número se denomina frecuencia.

A manera de ejemplo, consideremos el zumbido de un pequeño aspirador doméstico, colocando un medidor de vibración cerca de la ventosa de aspiración, se obtiene una grafica de su vibración mecánica como la que se representa en la figura 2.11.

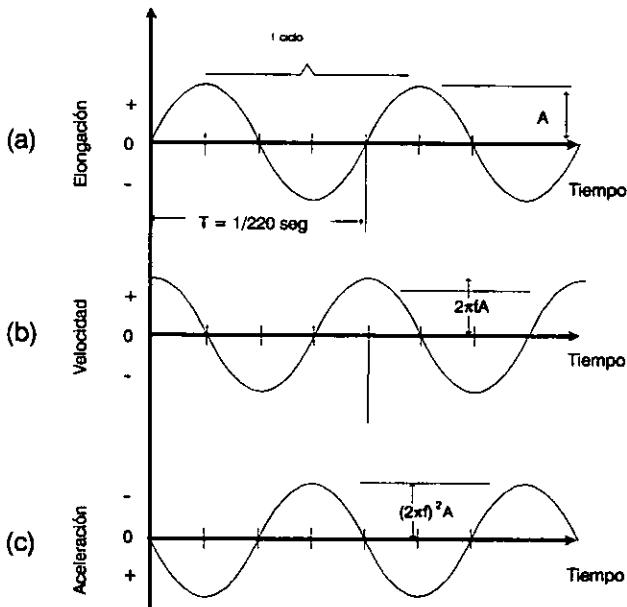


Figura 11 Vibración de un punto de la ventosa de un aspirador.

La secuencia de movimiento se repite una y otra vez; es un movimiento periódico, cada secuencia única de movimiento es un ciclo; el tiempo requerido para que un punto de la ventosa recorra un ciclo es el período de movimiento; en este caso 1/220 seg. La frecuencia del movimiento periódico es el número de ciclos efectuados por unidad de tiempo, la unidad de tiempo es el segundo y la unidad de frecuencia es el herzio o ciclo por segundo, que se escribe abreviadamente Hz. La frecuencia es el inverso del período T.

$$f = 1/T$$

En este ejemplo, por tanto,  $f = 220$  Hz.

Algunas veces se utiliza el concepto de velocidad angular, que está relacionada con la frecuencia por la fórmula  $\omega = 2\pi f$

## Elongación

La curva de la figura 11 corresponde a la función trigonométrica seno; por tanto se llama onda senoidal:

$$x = A \operatorname{sen} 2 \pi f t$$

La distancia  $x$  a la que está desplazada la ventosa respecto de su posición de reposo en un instante  $T$  se denomina elongación, la elongación máxima se denomina amplitud  $A$ , el espacio total recorrido es  $2A$  y se llama doble amplitud, o amplitud pico a pico; en el caso particular de la ventosa del aspirador la amplitud es  $0,00254$  cm y la amplitud pico a pico es  $0.00508$  cm.

## Velocidad

La figura 2.11a representa el movimiento de un punto de la superficie de la ventosa del aspirador, en el instante inicial esta "partícula" tiene velocidad máxima; en el pico superior de la onda la velocidad es nula; siguiendo el movimiento se ve que, en el momento en que la onda corta al eje de abscisas, la velocidad es negativa y máxima en el valor absoluto y en el pico inferior vuelve a ser nula. La figura 2.11b representa la variación de la velocidad  $u$  de una partícula de la ventosa con respecto al tiempo, es una onda cosenoidal dada por:

$$u = (2 \pi f A) \cos 2 \pi f t$$

ó

$$u = (2 \pi f A) \operatorname{sen} (2 \pi f t + \pi/2)$$

Se dice que las dos ondas tienen una diferencia de fase de  $2 \pi f (t / 4) = 2 \pi f (1/4 f) = \pi / 2$

### **Aceleración**

De la observación la fig. 2.11b se deduce que la velocidad de la partícula varía periódicamente en dirección y magnitud, la magnitud que expresa la variación de la velocidad con el tiempo es la aceleración:

$$a = -(2\pi f)A \operatorname{sen} 2\pi f t$$

La amplitud de la aceleración o aceleración máxima es  $a = (2\pi f)^2 A$ ; en el caso del aspirador la aceleración máxima es  $4.85 \text{ cm/seg}^2$ , la aceleración se puede expresar también como:

$$a = -(2\pi f)^2 x = -\omega^2 x$$

### **Movimiento Armónico Simple**

Un movimiento que puede describirse por medio de una onda sinusoidal se denomina movimiento armónico simple; de acuerdo con la ecuación  $a = (2\pi f)^2 x = -\omega^2 x$ , el movimiento armónico simple se caracteriza porque la aceleración es siempre proporcional a la elongación, pero de sentido contrario.

### **Amplitud eficaz**

Como se ha visto, una manera de caracterizar una onda es por medio de su amplitud pico a pico; en algunos casos es conveniente utilizar otras formas de descripción de onda, por ejemplo; mediante el llamado valor o amplitud eficaz, que es la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la elongación durante un período.

## Fase

La fig. 2.12b muestra una onda senoidal que tiene una frecuencia tres veces mayor que la figura 2.12a y una amplitud tres veces menor, ambas ondas cruzan el eje de las abscisas en la misma dirección y al mismo tiempo, por lo tanto se dice de ambas que están en fase.

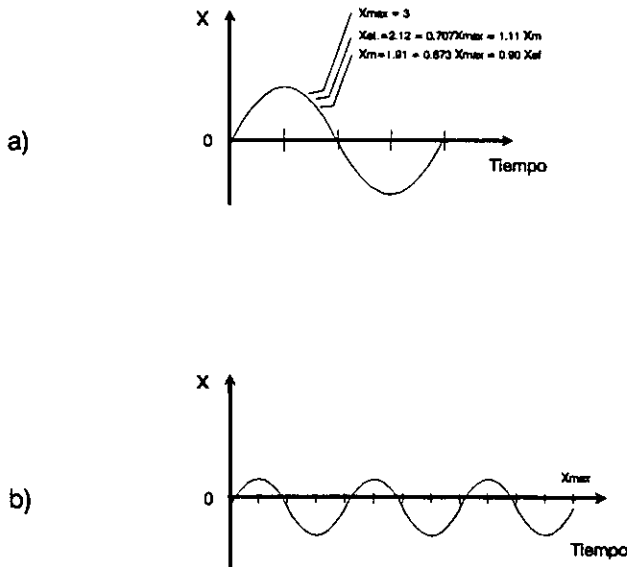


Fig. 2.12 Combinación de las ondas  $3\text{sen}2\pi ft$  y  $+\text{sen}6\pi ft$ . Ondas en fase.

## Reverberación

En una habitación ordinaria, una gran parte del sonido está reflejado por las paredes, así, el sonido, en un punto determinado de la habitación, está compuesto del sonido que se propaga de la fuente sonora más el que procede de la reflexión en las paredes, en tales circunstancias, la presión sonora no



disminuye en la proporción a la distancia, las diferencias de absorción y la variedad de las superficies de reflexión tienden a aumentar la dispersión del sonido dentro de la habitación, se dice que el campo acústico es perfectamente difuso, como consecuencia de las reflexiones en las superficies límite de la habitación, el sonido permanece aun cuando la fuente sonora haya dejado de emitir; este sonido remanente se llama reverberación. El efecto es más apreciable en una cámara reverberante, cuyas paredes tienen muy poca absorción y en cuyo interior el sonido persiste durante un tiempo considerable.

### 2.3.1 Niveles y unidades

#### **Nivel de Presión Sonora**

La presión sonora en la proximidad de un motor potente puede ser perfectamente mayor de 200 microbares, que es un millón de veces la presión mínima audible, para facilitar el manejo de un margen tan amplio de valores de presión se ha hecho usual la utilización de niveles de presión sonora en vez de presiones sonoras; entre ambas magnitudes existe una relación logarítmica que viene representada en la fig. 2.13.

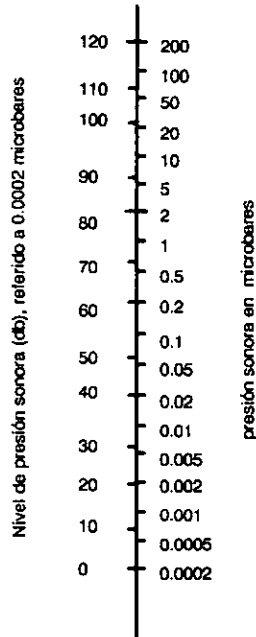


Figura 2.13. Relación entre presión sonora y nivel de presión sonora.

en esta relación logarítmica se ve una relación de un millón a uno entre los límites de margen de presiones, corresponde a un margen de 120 unidades de nivel de presión; la escala logarítmica es útil también por tal razón; los cálculos que necesitan multiplicaciones de presiones sonoras se pueden hacer con sumas de niveles.

La unidad usual de niveles de presión sonora es el decibelio, escrito abreviadamente db; dada una presión sonora, su aumento al doble equivale a un incremento de 6 db del nivel de presión sonora anterior, por ejemplo en la figura 2.13, a una presión de un microbar corresponde un nivel de 74 db, y una presión de dos microbares corresponde un nivel 80 db. El que una presión sonora se multiplique por 10 equivale a un aumento del nivel de 20 db.

El nivel de presión sonora  $L_p$ , en decibelios, corresponde a una presión sonora dada  $p$ , se define por la relación

$$L_p = 10 \log p_2 / p_0^2 = 20 \log p / p_0 \text{ db}$$

donde  $p_0$  es una presión de referencia y el logaritmo es logaritmo decimal.

### Nivel Típico de presión sonora

La tabla que a continuación presentamos puede dar una idea de los niveles de presión sonora de diversas fuentes, estos niveles de presión dados corresponden a una amplia banda de frecuencias; en la tabla se especifica la distancia a que está para que el nivel de presión dado sea significativo; solamente en el caso de ruido ambiente, originado, por varias fuentes, se puede omitir la distancia. La mayor parte de los valores de la tabla se han calculado promediando durante un largo período de tiempo, sin embargo, en el caso del bombo, se da el valor de pico; evidentemente, un cálculo en forma de promedio durante un intervalo daría un valor muy inferior, especialmente si se trata de música muy suave.

Nivel de presión sonora $L_p$ , db	Fuente
140	Prensa hidráulica, 90 cm.
130	Pico de sonido de bombo a 90 cm.
120	Claxon de automóvil, a 90 cm.
110	Interior del avión DC-6.
100	Torno automático a 90 cm.
90	Automóvil a 64 Km/h.
80	Ruido ambiente de oficina con máquina de escribir.
70	Conversación, a 90 cm.
60	Ruido de ambiente de una cocina doméstica.

Tabla: Niveles de presión sonora en banda ancha para varios sonidos.

### CAPITULO 3. TECNICAS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LOS CAMPOS DE ESFUERZOS

Como se sabe, algunas de las técnicas experimentales permiten la determinación de los campos de esfuerzos; se les llama técnicas de campo completo, estas técnicas contribuyen considerablemente a la comprensión de los fenómenos que se producen en los medios elásticos continuos, representandolos gráficamente una de las más antiguas y las más precisas es la fotoelasticidad que se vale de la birrefringencia asociada a las cargas que se aplican a algunos materiales transparentes, cuando se colocan en un campo de luz polarizada.

#### 3.1 FOTOELASTICIDAD

Se puede obtener dos clases de datos de los espectros fotoelásticos:

1) las "isocromáticas" (fig. 3.1) o lugar geométrico de los puntos en los que el esfuerzo cortante principal máximo  $\tau_{m\acute{a}x}$  es constante, actuando en el plano de la probeta, y

2) los "isoclínicos" (fig. 3.2) o lugar geométrico de los puntos que tienen la misma inclinación  $\theta$  de los esfuerzos principales obrando en el plano de la probeta.

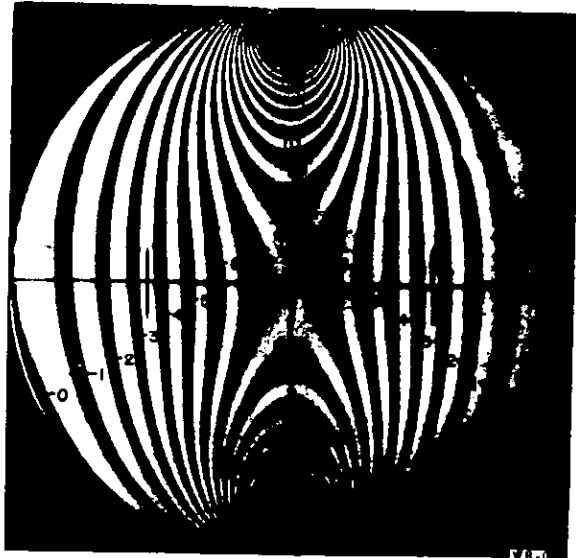


fig. 3.1 Espectro isocromático en un disco circular bajo compresión diametral. Las franjas son el lugar geométrico de los puntos en que los valores máximos de los esfuerzos cortantes son iguales.

Es necesario hacer aquí una explicación sobre la interpretación de estos espectros fotoelásticos.

Las franjas que más comúnmente aparecen en las fotografías fotoelásticas son "isocromáticas", que se pueden concebir (como las pruebas efectuadas con recubrimientos frágiles y las pruebas de moaré) como líneas de nivel (fig. 3.3); quienes están familiarizados con los métodos topográficos saben que puede representarse la altura de una colina con una familia de líneas de nivel, la altura sobre un plano de referencia de todos los puntos de una de estas líneas es la

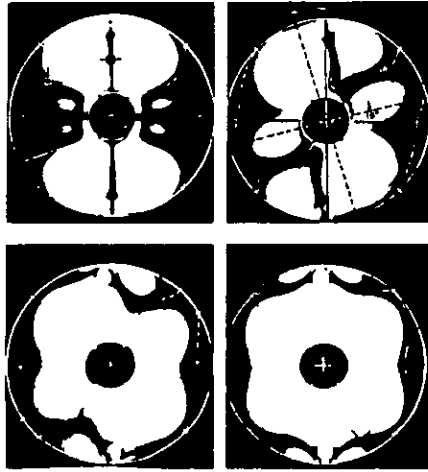


fig. 3.2 Espectros isoclinicos en un anillo circular bajo compresión diametral. Los ejes de las franjas se han marcado con tinta blanca. En todos los puntos de un espectro isoclinico, la dirección de los esfuerzos principales se obtiene por el parámetro isoclinico.

misma, y se da generalmente en pulgadas o pies, la diferencia de altura entre los puntos que pertenecen a las líneas de nivel contiguas es generalmente constante. Las franjas isocromáticas dan la altura (valor) de los esfuerzos cortantes máximos (que es constante) para todos los puntos que pertenecen a la misma franja isocromática con respecto a un plano de referencia, que es el plano en que el esfuerzo es cero y que puede determinarse por medio de ciertos procedimientos; el valor de la diferencia de esfuerzos entre puntos que pertenecen a líneas contiguas se obtiene por calibración.

Hay dos clases de fotografías isocromáticas; unas se identifican por estar en un campo claro o blanco, las otras se identifican por estar en un campo obscuro o negro, estas últimas se obtienen en un polariscopio de luz polarizada circulante con polarizador y analizador cruzados y placas de cuarto de onda cruzadas.



Fig. 3.3 Modelo en relieve de las franjas isocromáticas en el disco circular bajo una compresión diametral, que aparece en la fig. 3.1. Se muestran como líneas de nivel constante sobre una superficie que representa los esfuerzos cortantes máximos.

Las primeras se obtienen cuando el polarizador y el analizador son paralelos, el significado de las líneas es esencialmente el mismo en ambas clases de fotografías, pero su orden es ligeramente diferente; en las fotografías de campo oscuro, la secuencia de las líneas se cuenta como sigue: 0,1,2,3, etc. en una fotografía de campo claro la secuencia de las líneas se cuenta como sigue:  $1/2$ ,  $11/2$ ,  $21/2$ ,  $31/2$ , etc., por lo tanto si se superpusieran dos de estas fotografías, las líneas de una fotografía caerían entre las líneas de la otra; con el uso de dos fotografías se aumenta la precisión y la sensibilidad de las determinaciones, pero fundamentalmente una fotografía es suficiente para el análisis (fig. 3.4). En la figura 3.5 se muestra la combinación de ambas isocromáticas.



fig. 3.4 Isocromática de un anillo circular sometido a compresión diametral. Espectros en campo claro y en campo oscuro.

### 3.2 FOTOELASTICIDAD BIDIMENSIONAL

Los esfuerzos cortantes máximos en un plano son los asociados con las franjas isocromáticas que aparecen en ese plano. Llamemos a este plano  $x,y$ .

$$(\tau_{\text{máx}})_{x,y} = -\tau_{x,y} / \text{sen}2\theta = nF\sigma \quad \text{ec. 3.1}$$

En un problema de esfuerzos planos, estos esfuerzos cortantes son los máximos en un punto, solo cuando los dos esfuerzos principales son de signos opuestos.

$$\tau_{\text{máx}} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2; \quad \sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3; \quad \sigma_2 = \sigma_z$$

Si los dos esfuerzos principales en el plano son del mismo signo, hay un esfuerzo cortante máximo mayor en un plano a  $45^\circ$  con el plano de la placa, este esfuerzo cortante no tiene efecto en las franjas isocromáticas.



$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_1 / 2 ; \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0 ; \quad \sigma_3 = \sigma_z$$

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_3 / 2 ; \quad \sigma_1 = 0 > \sigma_2 > \sigma_3 ; \quad \sigma_1 = \sigma_z$$

En los bordes libres en las placas delgadas, dos de los esfuerzos principales son cero (además del que es perpendicular al plano de la placa, también el que es perpendicular al borde límite libre); por lo tanto, las franjas isocromáticas dan directamente en los bordes libres el valor de los otros esfuerzos principales, el que es paralelo al borde, por ejemplo, la franja del decimo orden en el borde inferior en la fig. 3.4 da el esfuerzo de tracción máximo y su posición en el cuerpo; este tipo de análisis fotoelástico elemental es uno de los medios experimentales más valiosos del analista de esfuerzos, y es la base de varios estudios valiosos de las formas geométricas, tales como filetes, hombros, dientes de engranes, agujeros, etc.

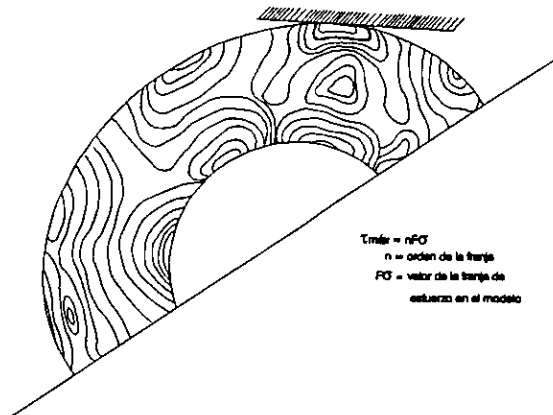


fig. 3.5 Esfuerzos cortantes máximos expresados por los órdenes de las franjas en un anillo sometido a compresión diametral. figura compuesta de franjas isocromáticas en campo oscuro y en campo claro.

En la fig. 3.6 se da un ejemplo de evaluación de un espectro isocromático, las franjas  $n$  se han construido através de dos diámetros, usando la calibración correspondiente  $F\sigma$  (valor de franja de esfuerzo en el modelo), que en este caso es de 80 lb por  $\text{pulg}^2/\text{franja}$ , La construcción da directamente el esfuerzo cortante

máximo en los dos diámetros.

$$(\tau_{\text{máx}})_{x,y} = nF\sigma \quad \text{ec. 3.2}$$

En el diámetro inclinado se conoce el valor de los esfuerzos cortantes máximos, pero sus direcciones no; en el diámetro horizontal, se sabe que los esfuerzos principales son paralelos y perpendiculares al diámetro, debido a la simetría; por lo tanto, las direcciones de los esfuerzos cortantes máximos a lo largo de este diámetro tienen una dirección de  $45^\circ$  en cualquier lugar con respecto a la dirección del diámetro.

Los otros datos fotoelásticos se obtienen de las franjas isoclínicas que se usan con mucho menor frecuencia que las isocromáticas, en la figura 3.2 se muestra un ejemplo de franjas isoclínicas; se obtienen con un polariscopio plano, con polarizadores y analizadores cruzados, y cada una de ellas corresponde a una posición angular de la combinación polarizador-analizador, cuando se ha registrado un número suficiente de las mismas, se representan juntas.

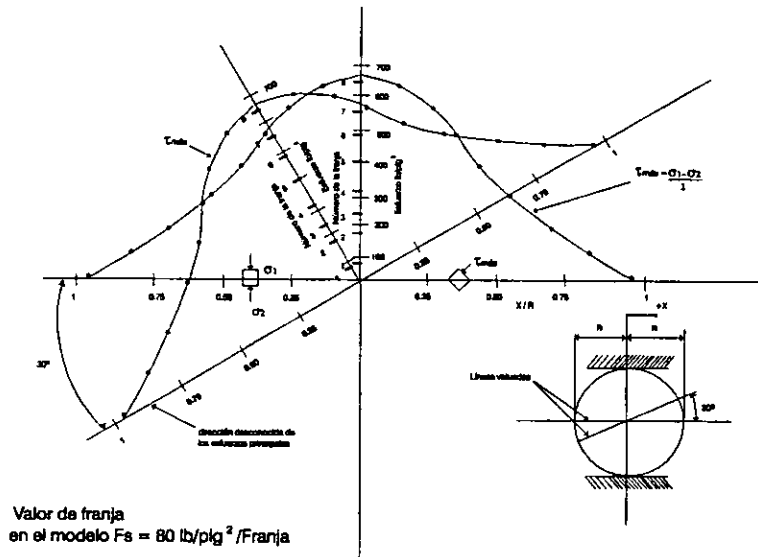


Fig. 3.6 Ejemplo de evaluación de un espectro isocromático

### 3.3 FOTOELASTICIDAD TRIDIMENSIONAL

En un problema de tres dimensiones las isocromáticas se asocian con el esfuerzo cortante máximo en el plano de observación que es, en general el plano de la tajada tomado de un modelo "congelado" a estos se les llama esfuerzos "cortantes máximos secundarios" y no son necesariamente los máximos en el punto porque el plano de la tajada no es necesariamente un plano principal.

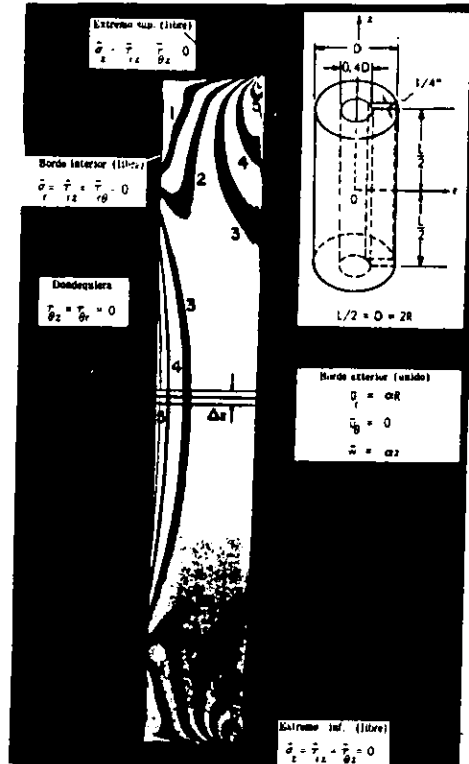


fig.3.7 Espectro isocromático de una tajada meridiana de un cilindro circular unido sobre el diámetro exterior a un casquillo rígido y encogido.

Se muestra un ejemplo de la evaluación en un modelo fotoelástico tridimensional en las figuras de la 3.7 a la 3.11, aquí, la evaluación sigue más adelante que en el ejemplo anterior en el sentido en que los esfuerzos principales se determinan a lo largo de una línea interior en el cuerpo; las figuras 3.7 y 3.8 son espectros isocromáticos de dos tajadas cortadas en los dos planos de simetría de un cilindro circular hueco en el que se han fijado (o

"congelado") la birrefringencia y la deformación permanentes, y la deformación se produjo sujetando el cilindro en su diámetro exterior, mientras que se producía en el una deformación uniforme  $\alpha$ .

Para determinar los esfuerzos principales en un cuerpo tridimensional, es necesario tener generalmente los espectros correspondientes a dos planos (y algunas veces a tres), que pasen por el punto que se analiza; los dos planos mostrados en las figs. 3.7 y 3.8 se cortan a lo largo de la línea central radial en el cilindro. como los dos planos son de simetría, el esfuerzo radial  $\sigma_r$ , el circunferencial  $\sigma_\theta$ , y el axial  $\sigma_z$  a lo largo de la línea radial son principales.

$$\sigma_r = \sigma_{(r-\Delta r)} - \Delta \tau_{rz} \Delta r / \Delta z + (\sigma_\sigma - \sigma_r) \Delta r / r \quad \text{ec. 3.3}$$

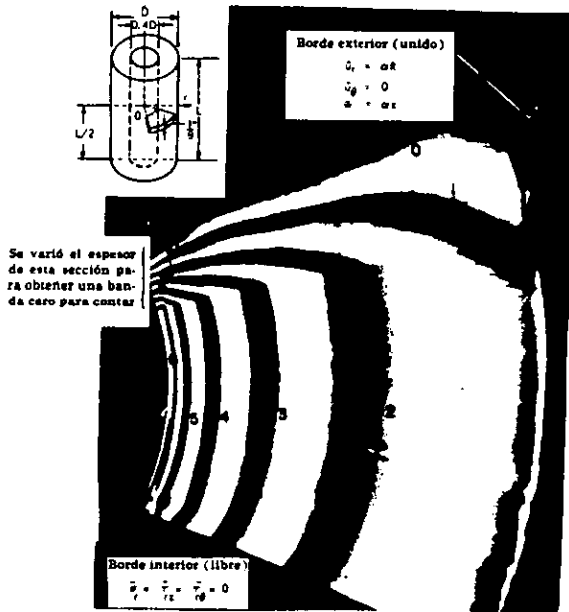


fig. 3.8 Espectro isocromático de una tajada en forma de aro de un cilindro circular unido al diámetro exterior de un casquillo rígido, y encogido

Como  $\sigma_r$  se conoce en el diámetro interior  $\sigma_r=0$ , la integración se comienza ahí. Para calcular  $\sigma_r$  a una distancia  $\Delta r$  del borde libre, se nota primero que el primer término de la ec. 3.3 se conoce,  $\sigma_r - \Delta r = 0$ .

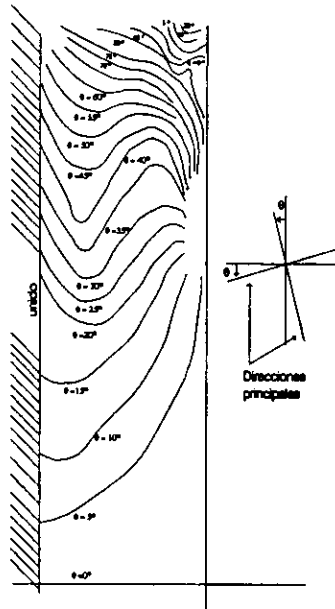


Fig. 3.9 Líneas isoclinicas de una torsión meridiana de un cilindro circular unido en el diámetro exterior a un casquillo rígido y encogido.

$\Delta\tau_{rz}$  se determina en el meridiano plano  $(r,z)$  (fig. 3.7) entre dos líneas, cada una de ellas a una distancia de  $1/2\Delta z$  de la línea radial que se analiza ya que en este caso  $\tau_{rz}$  es simétrico, pero de signo opuesto, con relación a la línea de análisis,  $\Delta\tau_{rz}$  tiene el doble del valor de  $\tau_{rz}$  a lo largo de cada línea y solamente este se calculó sobre un lado de la línea radial.

$\tau_{máxlrz}$  se calcula primero a lo largo de la línea de la ecuación 3.2.

$$\tau_{rz} = \tau_{máxlrz} \text{ sen } 2\theta$$

$$\tau_{rz} = -n'F'_{\sigma} \text{sen } 2\theta'$$

ec. 3.4

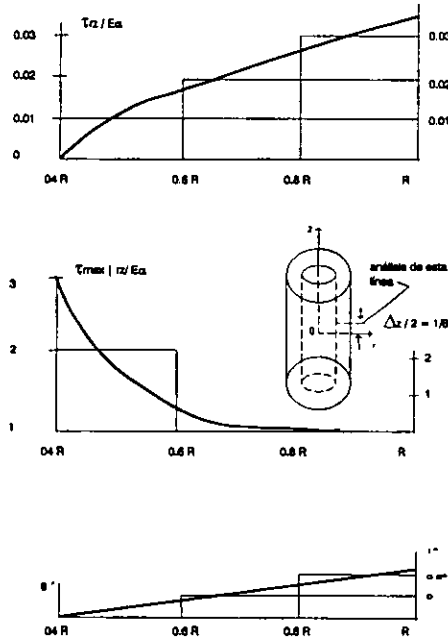


fig. 3.10 Esfuerzos cortantes a lo largo de una línea radial a 1/8 plg de la línea central en un anillo circular unido en el diámetro exterior a un casquillo rígido y encogido

en la que  $n'$  es el orden de la franja de la tajada meridiana a lo largo de la línea  $z = 1/8$  plg, que es una separación común cuando se usa este método.  $F'_{\sigma}$  es el valor de la franja del modelo de la tajada meridiana, la constante de calibración, en este caso  $F'_{\sigma} = 0.4 E\alpha$  lb por  $\text{plg}^2$ / franja.

$\theta'$  es el ángulo de la isoclínica obtenido de la fig. 3.9, el espectro isoclínico de la tajada meridiana.

En la fig. 3.10 se han construido los valores de  $\tau_{\max}|_{rz}\theta'$  y de  $\tau_{rz}$ , entonces los valores de  $\Delta\tau_{rz}$  tienen un valor igual al doble de los valores

correspondientes de  $\tau_{rz}$ , también la anchura entre las dos líneas está representada por  $\Delta z = 1/4$  plg y  $\Delta r$  representa el incremento de espacio del borde lo que da el segundo término de la ecuación 3.3, el tercer término se obtiene fácilmente ya que  $r$  y  $\Delta r$  se conocen, y  $(\sigma_\theta - \sigma_r)$  se obtiene de

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \tau_{rz} = 2 \tau_{\text{máx}} |r\theta = 2n' F'' \sigma \quad \text{ec. 3.5}$$

Aquí el  $\tau_{\text{máx}} |r\theta$ ,  $n'$ , y  $F'' \sigma$  se asocian con la tajada en la forma de aro mostrada en la fig. 3.8, en esta tajada, que tiene un espesor igual solamente a la mitad del espesor de la tajada meridiana,  $F'' \sigma = 0.8 E \alpha$  lb por plg<sup>2</sup>/franja; conviene hacer notar que en este problema  $\sigma_\theta > \sigma_r$ , que puede conocerse de la observación de tajadas transversales siguiendo los procedimientos explicados en otra parte.

Entonces se calcula  $\sigma_r$  a una distancia  $\Delta r$  del borde y después se usa este esfuerzo radial como un primer término de la ecuación 3.3, los otros dos términos se calculan en un segundo intervalo  $\Delta r$ , y así sucesivamente. Se debe elegir cada intervalo lo suficientemente pequeño para obtener una buena aproximación, de esta manera  $\sigma_r$  se determina en  $z = 0$ . Ahora  $\sigma_\theta$  se puede calcular usando la ec. 3.5, el esfuerzo axial  $\sigma_z$  se obtiene entonces directamente de

$$\begin{aligned} \sigma_z - \sigma_r &= 2\tau_{\text{máx}} |rz = 2n' F' \sigma \\ \sigma_z &= \sigma_r + 2n' F' \sigma \end{aligned} \quad \text{ec. 3.6}$$

Los valores resultantes de los esfuerzos principales  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  a lo largo de la línea radial se dan en la fig. 3.11, los esfuerzos se expresan en forma adimensional en función de  $E$  (el módulo de Young) y  $\alpha$  la carga por contracción aplicada al modelo.



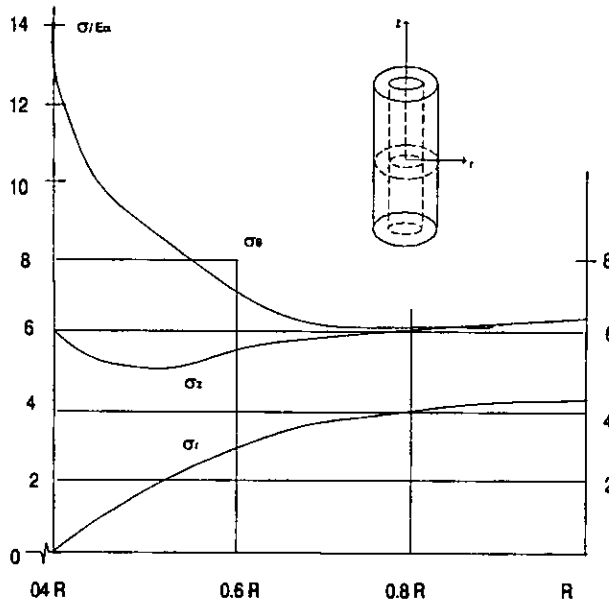


fig. 3.11 Esfuerzos principales en el plano central en un cilindro circular pegado en el diámetro exterior a un casquillo rígido y encogido.

El procedimiento que se acaba de describir es el que debe seguirse en la evaluación de cualquier tajada transversal del cilindro; es obvio que en el caso particular del análisis de la tajada central y de tajadas muy cercanas a la central, el segundo término de la Ec. 3.3 es despreciable y la evaluación, por lo tanto, puede simplificarse, ya que la ecuación toma aproximadamente la forma de la ecuación de equilibrio de Lamé, así

$$\sigma_r|_1 \sim \sigma_r|_0 + \int_0^1 (\sigma_\theta - \sigma_r) \frac{dr}{r}$$

$$\sigma_r|_1 / 2F_\sigma \sim \sigma_r|_0 / 2F_\sigma + (n/r)_{av} \Delta r$$

en la que  $\Delta r$  es la distancia radial entre el punto 0 y 1  
 $(n/r)_{av}$  es el promedio de la relación  $(n/r)$  en el intervalo  $\Delta r$ .

### **Ventajas y limitaciones**

-En general, es fácil obtener medidas bidimensionales fotoelásticas con suficiente sensibilidad y precisión;

-La fabricación adecuada de los modelos requiere técnicas especiales, pero la evaluación de los esfuerzos en los bordes libres es muy sencilla

-La separación de esfuerzos en el interior del modelo requiere mucho tiempo y es mucho menos precisa (a menos que se combine el método con otros experimentales)

-La aplicación para la determinación de esfuerzos que cambian rápidamente con el tiempo, requiere instrumentos más elaborados y experiencia especial en el registro de datos dinámicos.

-Las pruebas tridimensionales requieren que el operador conozca técnicas más adelantadas sobre la fabricación y prueba de modelos; la evaluación en los bordes libres es todavía relativamente sencilla, pero la separación de esfuerzos dentro del cuerpo requiere gran experiencia de comprensión de los esfuerzos y de la distribución de la deformación de los cuerpos tridimensionales.

-Generalmente los modelos tienen que hacerse de los componentes que van a analizarse; es posible, sin embargo, pegar recubrimientos fotoelásticos en los mismos prototipos, y observar el fenómeno por reflexión pero como estos recubrimientos tienen que ser delgados, la sensibilidad de este método es generalmente pequeña.

### **3.4 RECUBRIMIENTOS FRÁGILES**

Por medio de los recubrimientos frágiles se puede obtener también información de campo completo que ayuda a la visualización de los campos de esfuerzo, cuando fallan estos recubrimientos, se pueden obtener dos clases de datos: A los primeros se les llama espectros isostáticos o trayectorias de los esfuerzos principales (fig. 3.12)., estas líneas son tangentes y perpendiculares

en cada punto a la dirección de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  en este punto; hay dos familias de espectros isostáticos, perpendiculares entre sí. El otro grupo de líneas lo constituyen los espectros isoentáticos, o lugares geométricos de los extremos de las grietas (figs. 3.12 y 3.13), estas líneas pueden considerarse en una primera aproximación como isobaras o lugares geométricos de los puntos que tienen esfuerzos principales mínimos o máximos del

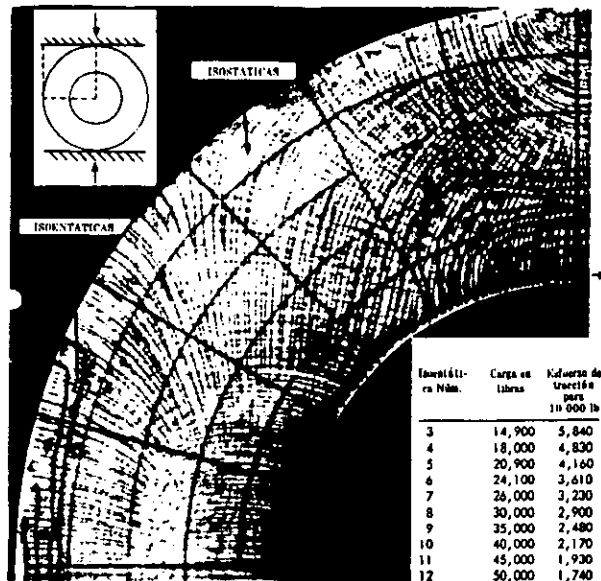


fig. 3.12 Isostáticas e isoentáticas en un anillo circular bajo compresión diametral (valores aproximados de los esfuerzos máximos de tensión dentro de la zona isoentática).

mismo valor  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , se usa algunas veces la palabra "aparente" para indicar que los valores obtenidos no corresponden rigurosamente a los esfuerzos; se requieren dos pruebas para obtener las dos familias de isoentáticas: una por medio de cargas directas y la otra por "relajamiento" o inversión de cargas.

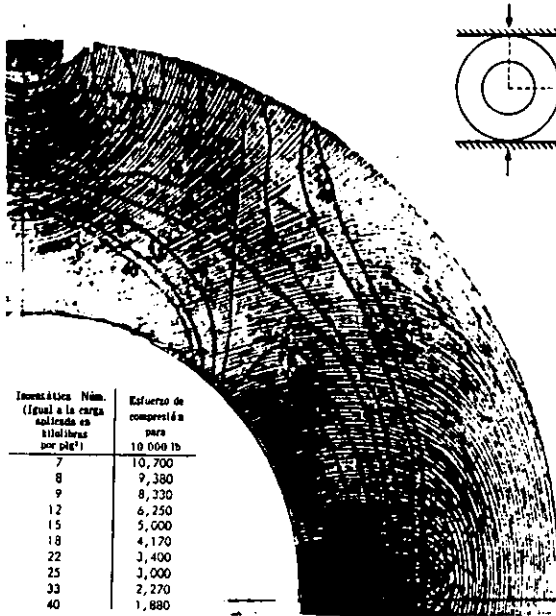


fig. 3.13 Isocromáticas e isocromáticas en un anillo circular bajo compresión diametral (valores de los esfuerzos máximos de compresión dentro de la zona isocromática)

En la fig. 3.14 se da un ejemplo de la evaluación de un espectro de recubrimiento frágil, se han representado las direcciones y los valores de los esfuerzos principales en un radio que forma un ángulo de  $15^\circ$  con el eje vertical se han representado las direcciones para todos los puntos de la línea, ya que se dispone de un juego completo de isocromáticas; se dan solamente los dos

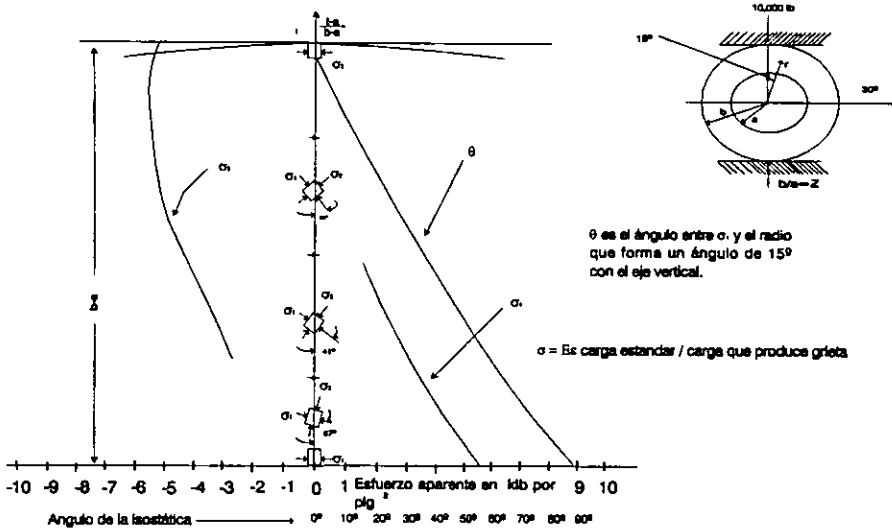


fig. 3.14 Ejemplo de la evaluación de un espectro obtenido en un recubrimiento frágil.

esfuerzos principales en una parte de la zona central de la línea, ya que se dispone de un juego completo de isostáticas, se dan solamente los dos esfuerzos principales en una parte de la zona central de la línea, donde se puede obtener información de dos espectros isoentáticos y cerca de los bordes, solamente se puede calcular directamente uno de los esfuerzos principales, el mayor; el espectro isoentático puede analizarse usando la siguiente fórmula aproximada:

$$\sigma = E \epsilon_{\delta} \text{ carga estandar / carga que produce grieta} \quad \text{ec. 3.7}$$

en la que E es el módulo de elasticidad del cuerpo analizado y  $\epsilon_{\delta}$  es la sensibilidad a las deformaciones del recubrimiento usando en esas condiciones especiales de la prueba: temperatura, velocidad de carga, edad, etc.

## **Ventajas y limitaciones**

-Se pueden obtener las trayectorias de los esfuerzos principales con precisión usando recubrimientos frágiles.

-La determinación del valor de los esfuerzos principales está sujeta a mayores errores y requiere más habilidad por parte del operador, aún para este objeto, el método resulta muy práctico cuando la temperatura no cambia bruscamente, puede aplicarse a los mismos prototipos, o componentes, sin requerir la fabricación de un modelo, resulta menos práctico cuando se aplican cargas en diferentes condiciones al mismo cuerpo, ya que es necesario un nuevo recubrimiento para cada condición de carga.

-Los recubrimientos fotoelásticos y los medidores de deformaciones no están sujetos a esta limitación.

-Para la solución de los problemas dinámicos el recubrimiento debe calibrarse correctamente.

-Las técnicas de aplicación a los problemas dinámicos son mucho más complicadas que para trabajos estáticos, y una de las dificultades para subsanar este problema es la fotografía de acercamiento de las grietas a niveles de esfuerzo inferiores a aquellos en que se cierran las grietas bajo cargas estáticas.

-Con respecto a los recubrimientos fotoelásticos, los recubrimientos frágiles tienen la importante ventaja de ser mucho más delgados.

## **3.5 CUADRICULAS**

Se pueden marcar líneas (o puntos) en la superficie de una probeta o, en el caso de que la probeta sea transparente, dentro de la misma, el cambio de distancia entre puntos de las líneas (o entre los puntos) como una consecuencia de la deformación de la probeta puede medirse; en general resulta práctico tener un sistema de líneas (o de puntos) formando una cuadrícula. Este método es probablemente el más fácil de entender y el más directo de todos los métodos experimentales de análisis, permite también una observación directa

del espectro de deformación, el cambio de distancia entre dos puntos, dividido entre la distancia que los separa, da el promedio de deformación entre ellos.

No es necesario que la distancia entre todas las líneas de la cuadrícula sea la misma, ni igual a un valor predeterminado, porque la cuadrícula tiene que leerse dos veces (antes y después de la deformación de la probeta); la precisión del método depende de la precisión de las técnicas usadas para grabar o marcar las líneas de la cuadrícula y de la técnica empleada para medir las distancias entre las líneas.

La primer información que puede obtenerse de un modelo de cuadrícula es la descripción del movimiento de los puntos sobre la superficie del cuerpo, la fig. 15 muestra dos fotografías superpuestas la primera corresponde a la cuadrícula deformada, después que se ha sujetado al anillo a una compresión diametral y las porciones más oscuras de la fotografía corresponden a



fig. 3.15 Anillo de hule transparente con cuadrícula marcada sobre su superficie, tomado antes y después de sujetarse a una carga diametral.

aquellas partes de la probeta cuyas imágenes se sobreponen, pero las porciones claras no se sobreponen; en la fig. 3.16 se muestra, por medio de flechas, el desplazamiento de varios puntos en el proceso de deformación; se pueden descomponer las componentes de estos desplazamientos totales, ya sea a lo largo de ejes cartesianos, dando las componentes de desplazamiento  $u$

y  $v$ , o a lo largo de direcciones radiales o tangenciales, dando las componentes de desalojamiento  $u_r$  y  $u_\theta$ .

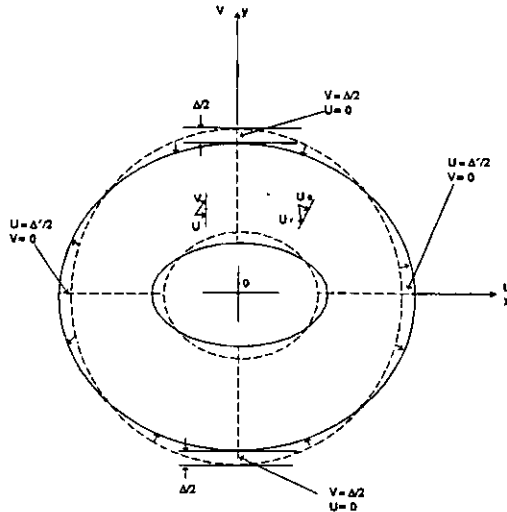


fig. 3.16 Desplazamientos en un anillo sujeto a compresión diametral. las flechas indican, en magnitud y dirección, el desplazamiento total de los puntos.

En la figura se aprecia que, como era de esperarse, los ejes de simetría se desplazan sin rotación. en la fig. 3.16, se supuso, por comodidad, que el centro del anillo no se mueve, en general, es posible decidir arbitrariamente sobre la posición del punto de referencia que no se mueve durante el proceso de deformación; algunas veces es conveniente fijar el fondo de la probeta como se muestra en la fig. 3.19.



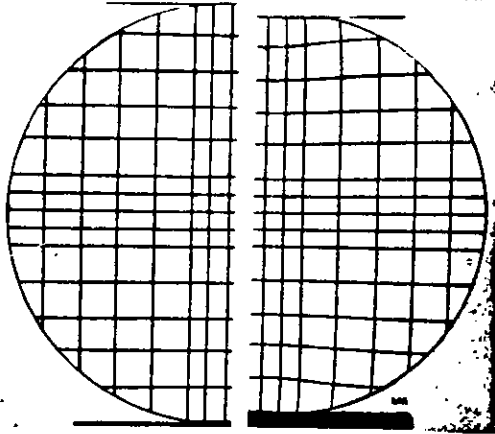


fig. 3.17 Fotografía de una película de hilos de hule incrustados en el plano central de un disco de hule de uretano transparente. El disco está bajo compresión diametral. La mitad izquierda es una fotografía tomada antes de aplicar la deformación, la derecha es una fotografía tomada después de la deformación.

En la fig. 3.17 se ilustran los métodos de evaluación de un modelo de cuadrícula; en los puntos situados a lo largo del eje vertical, las componentes de desplazamiento en la dirección vertical  $v$  se miden y se dibujan valiéndose de la posición de los puntos, la curva obtenida se diferencia gráficamente, dando la curva  $\epsilon_y$ ; en la mayor parte de los casos el valor de la secante

$$\epsilon_{med} = \Delta v / \Delta y$$

es suficientemente preciso, sin embargo, el punto de inflexión de la curva de desplazamiento, debe usarse la tangente.

Como el eje vertical es también de simetría, solamente tienen que determinarse dos componentes de deformación normales,  $\epsilon_z$  y  $\epsilon_y$  la otra  $\epsilon_x$ , se obtiene de manera semejante construyendo curvas  $u$  para puntos situados en líneas horizontales a través de el eje vertical, la diferenciación gráfica da como resultado  $\epsilon_x$ .

En el caso general, tiene que determinarse una tercera cantidad; por ejemplo,  $\epsilon_{45^\circ}$  para lo que se requiere construir una tercera curva de desplazamiento, y otra de diferenciación; después que se han obtenido  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ , y  $\epsilon_{45^\circ}$ , se calculan los esfuerzos principales.

### **Ventajas y limitaciones**

-Los métodos de las cuadrículas no se usan comunmente porque les falta sensibilidad para la determinación de deformaciones pequeñas, pero se adaptan muy bien a la determinación de las mismas, pero en materiales como el hule, en plásticos, o en metales que sufren deformacion plástica.

-La interpretación de los datos es directa, pero el análisis es muy largo.

-Han encontrado aplicacion en la determinación de deformaciones dentro de los cuerpos transparentes de formas complicadas, y para complementar la información fotoelástica.

-Las cuadrículas pueden aplicarse a la superficie de cualquier prototipo prácticamente, pero, como el moaré, se usan con mayor frecuencia en los modelos.

### **3.6 MOARE**

Un cuarto método para la determinación de las propiedades de los medios continuos es el moaré, las franjas del moaré (figs. 3.18 y 3.20) son lugares geométricos de los puntos que presentan el mismo valor de los componentes de desplazamientos ( $u$  o  $v$  por ejemplo) a lo largo de una dirección (la dirección perpendicular a las líneas de la cuadrícula); a estos lugares geométricos se les llama espectros isotéticos, pueden tambien considerarse como líneas de nivel constante o líneas de nivel que dan los valores de los desplazamientos componentes por la altura de la línea (fig. 3.18) sobre la línea del cero o de referencia (donde no hay desplazamiento).

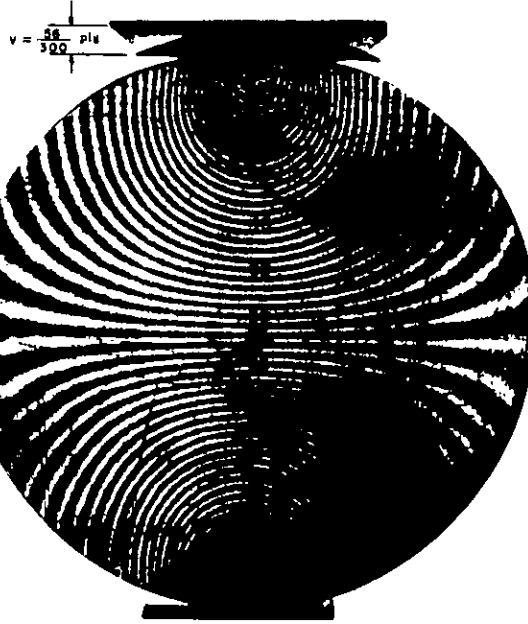


fig. 3.18 Franjas de moiré en un disco circular bajo compresión diametral, las franjas son lugares geométricos de los puntos que tienen un desplazamiento vertical del mismo valor.

La pendiente de la superficie de desalojamiento en la dirección perpendicular a las líneas de la cuadrícula del moaré, cuando las rotaciones son pequeñas, es la deformación, cuando las líneas de la cuadrícula son respectivamente paralelas a las direcciones de  $y$  y de  $x$ , se pueden obtener las siguientes deformaciones:

$$\varepsilon_x = u / x \quad \text{y} \quad \varepsilon_y = v / y,$$

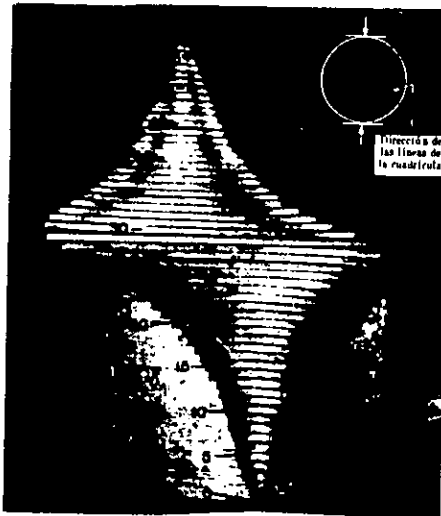


Fig. 3.19 Modelo en relieve de las franjas de moaré en el disco bajo compresión diametral mostrado en la figura 3.18. Se muestra cómo las líneas de nivel constante sobre una superficie que representa las componentes de desalojamiento en la dirección perpendicular a la rejilla principal.

Si las rotaciones de las líneas son importantes, estas expresiones deben corregirse con términos adicionales, las pendientes de las superficies de desplazamiento en las direcciones paralelas a las líneas de la cuadrícula permiten la determinación de las deformaciones por corte.

$$\gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$$

Si las deformaciones son importantes, esta expresión debe corregirse con términos adicionales.

Algunas veces, las derivadas cruzadas son más difíciles de obtener que las directas, y se aconseja tener un tercer espectro de moaré obtenido con una cuadrícula orientada a  $45^\circ$  de la dirección de las otras dos (fig. 3.21); por diferenciación se pueden obtener tres deformaciones normales:  $\epsilon_{0^\circ}$ ,  $\epsilon_{45^\circ}$ , y  $\epsilon_{90^\circ}$ .

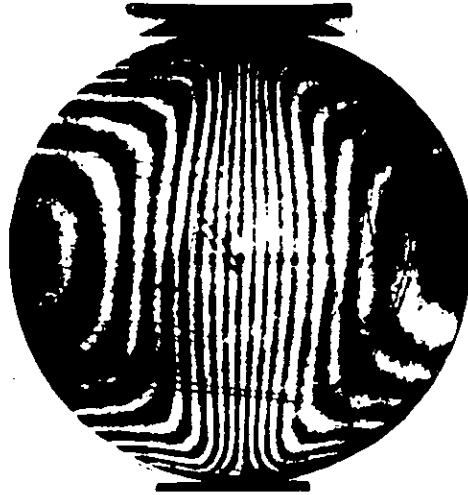


Fig. 3.20 Franjas de moaré en un disco bajo compresión diametral. Las franjas son lugares geométricos de puntos que tienen el mismo valor de desplazamiento horizontal.

El principio fundamental del moaré es que las franjas se producen por la componente del desplazamiento de los puntos en la cuadrícula móvil con respecto a la fija o cuadrícula principal, en la dirección perpendicular a esta última; la diferencia en la componente de desplazamiento de los puntos que pertenecen a dos franjas vecinas de moaré es igual a la distancia entre las líneas de la cuadrícula o paso y las deformaciones pueden calcularse, por lo tanto construyendo los desplazamientos y diferenciándolos, o, en forma finita

por la expresión

$$\varepsilon_x = \Delta u / \Delta x = \text{Paso} / \text{Distancia entre franjas}$$



fig. 21 Franjas de moaré en un disco bajo compresión diametral. Las franjas son lugares geométricos de los puntos que tienen el mismo valor de desplazamiento a  $45^\circ$

En la figura 3.22 se muestra una ilustración del análisis de deformaciones usando el moaré, en este caso solo se ha evaluado el eje horizontal del disco, en vez del eje vertical, como se hizo para la ilustración de la evaluación de las deformaciones de la cuadrícula; el desplazamiento  $u$  de los puntos situados en el eje horizontal se determina contando las franjas y dibujando sus órdenes según la posición de los puntos, cada franja de moaré es equivalente a un desplazamiento adicional de  $1/300$  plg., porque el paso de la cuadrícula usada es de tal medida. La curva de desplazamiento se diferencia como se explicó en la sección anterior.

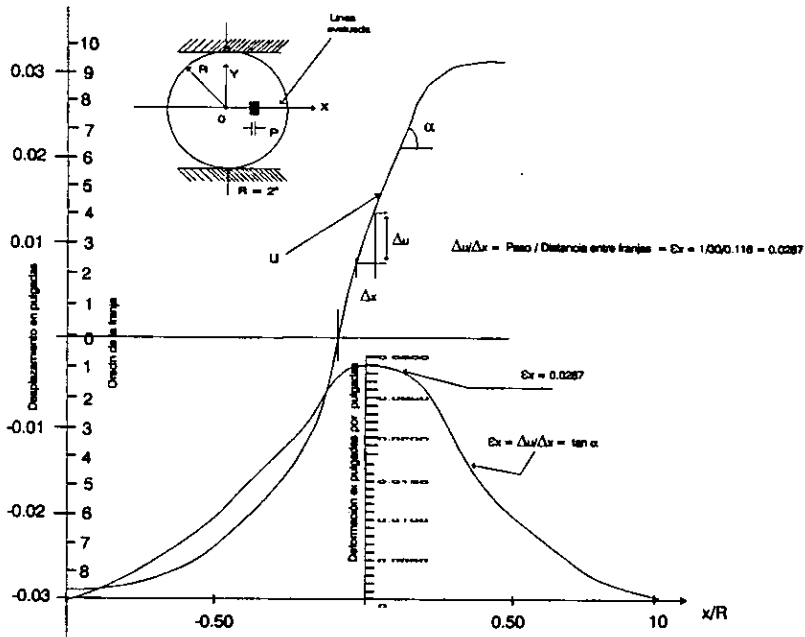


fig. 3.22 Ejemplo de evaluación de un espectro de moaré de la familia de desplazamientos y deformaciones a lo largo del diámetro perpendicular a la dirección de la carga. Ver fig. 3.20.

La diferenciación puede hacerse usando dos isotéticas sobrepuestas, moviéndose una respecto de la otra a lo largo de la dirección de diferenciación.

### Ventajas y limitaciones

El moaré es un método que se adapta bien para la medida de desplazamientos, para el análisis estructural, el moaré da fácilmente y con precisión la forma deformada de los componentes de los marcos, arcos, etc., para el análisis de esfuerzos, deben diferenciarse los espectros del moaré y esta operación es con frecuencia molesta y algunas veces poco precisa; la interpretación de los espectros del moaré en función de los desplazamientos es muy sencilla, la conversión de los datos de desplazamiento en deformaciones cuando intervienen rotaciones, puede resultar muy complicada.

En muchos casos es posible hacer el análisis del moaré en el prototipo, pero se usa con mayor frecuencia en los modelos, se adapta particularmente bien a la solución de problemas de deformación térmica.

Conviene indicar que el efecto del moaré da directamente la transformación geométrica de una superficie sin tener que usar propiedad física intermedia alguna, como en el caso de la fotoelasticidad o de los medidores eléctricos de deformaciones, y por lo tanto no lo afectan los cambios ambientales, que pueden afectar a esas propiedades físicas.

Los métodos del moaré se pueden usar para la solución de algunos problemas dinámicos; como para el caso de las cargas estáticas, los cambios geométricos que tienen lugar en la superficie de la muestra pueden registrarse con precisión, la principal dificultad en esta clase de aplicación es asegurar el contacto entre la cuadrícula principal y la superficie de la probeta al pasar el esfuerzo transitorio.

### 3.7 METODOS DE PUNTO POR PUNTO

Los medidores de deformaciones mecánicos, ópticos, acústicos y eléctricos dan información de punto por punto, en otras palabras, en el caso de los problemas bidimensionales, donde la fotoelasticidad da  $\tau_{m\acute{a}x}$ , los recubrimientos frágiles  $\sigma_{m\acute{a}x}$  (aproxomadamente), y el moaré  $u$  ó  $v$ , en todo el campo o en partes del mismo, los medidores de deformaciones dan el cambio de distancia  $\Delta L$ , entre dos puntos separados por la distancia  $L$ , con estas medidas, se puede calcular la deformación promedio a lo largo del eje medidor; si no se conoce con anticipación la dirección de la deformación deseada, deben obtenerse dos determinaciones más en el punto, con objeto de calcular el estado de deformación.



### 3.7.1. Medidores eléctricos de deformación

Los medidores de deformación más comunmente usados, son los del tipo adherente de resistencia eléctrica; los medidores de deformación de resistencia eléctrica de alambre, se componen de una red de alambre fino (con un diámetro aproximado de 0.001 de plg.) colocada en una dirección preferente y pegada entre dos hojas de papel muy delgado o de plástico; puede tambien hacerse el medidor de una hoja metálica delgada o de material semiconductor; en la práctica, se pega el medidor a la probeta en un punto de especial interés, cuando se carga la probeta, las deformaciones producidas cambian el diámetro y la longitud de las hojas en la red del medidor, lo que a su vez cambia la resistencia ohmica del medidor, los instrumentos adecuados permiten determinar con precisión este cambio de resistencia, y la calibración correcta del medidor permite convertir el cambio de resistencia en deformación.

La mayor parte de los instrumentos que se usan en combinación con los medidores eléctricos de resistencia para la determinación de deformaciones estáticas, tienen sus cuadrantes graduados en micropulgadas por pulgada, por lo tanto, proporcionan datos directamente en función de la deformación y dificultades en la interpretación; en realidad surgen complicaciones si el fenómeno se analiza con más precisión y si se hace un estudio de la transmisión de desplazamiento de la superficie del cuerpo al cemento, del cemento al papel o plástico, de este a la otra capa de cemento, y finalmente, de esta al alambre o lámina, surge una complicación más en los alambres enrollados, ya que el desplazamiento al que se sujeta a la parte curva del alambre, no es el mismo (algunas veces hasta tiene el signo contrario) que el desplazamiento que se produce en la parte recta del propio alambre pero pueden hacerse algunas correcciones valiendose de una calibración adecuada; otras, como el error producido por el efecto de la "espiral" o "sensibilidad transversal", requieren el conocimiento del estado de deformación biaxial en el punto, que con frecuencia se ignora. Los errores producidos por los gradientes de desplazamiento dentro de la longitud de la base del medidor, o por la flexion del plano del medidor, pueden ser graves en algunos casos, en muchos problemas no lo son, y con frecuencia se desprecian para esto el analista de esfuerzos debe emplear su criterio en los casos dudosos en los que

puede ser necesario hacer otras medidas más.

La ventaja más notable de los medidores de deformaciones de resistencia eléctrica, es su capacidad de determinar deformaciones que cambian con el tiempo; la información se obtiene usualmente en la forma de trazos osciloscópicos u oscilogramas, la ordenada de estas gráficas es proporcional a la deformación y la abscisa al tiempo; esto requiere dos calibraciones: una para la deformación y otra para el tiempo. En la fig. 3.23 se muestra una ilustración; algunos osciloscopios tienen sistema de calibración interconstruidos, en la fig. 3.24 se muestra una ilustración de sus registros, en esta figura, la distancia entre líneas verticales corresponde a 60 milisegundos, y la distancia entre líneas horizontales corresponde a  $500 \times 10^6$ .

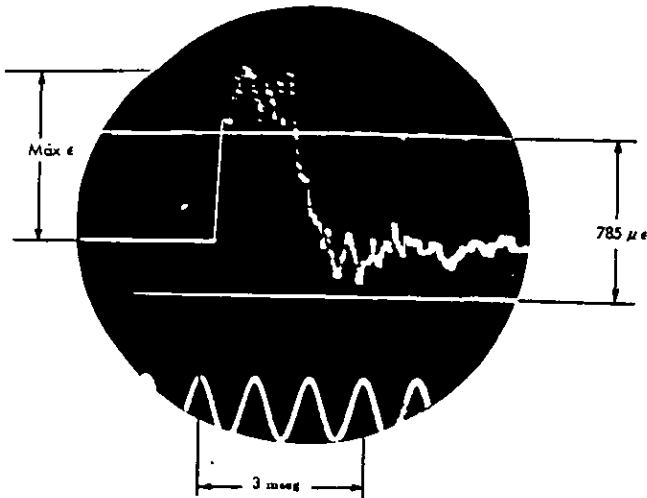


fig. 3.23 Registro de las deformaciones en función del tiempo.

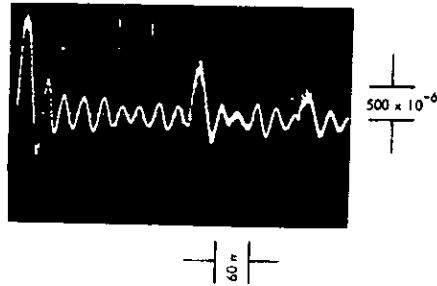


fig. 3.24 Registro de las deformaciones en función del tiempo para una carga del tipo dinámico. (La calibración la lleva el osciloscópio).

### Ventajas y limitaciones

-Cuando se desean las deformaciones en un punto o en unos cuantos puntos solamente, en la superficie de la probeta, se aconseja en general usar medidores de deformaciones en lugar de los métodos de campo completo para el análisis de los esfuerzos.

-Los medidores de deformaciones del tipo de resistencia eléctrica, son relativamente baratos y muy sensibles.

-La precisión de las medidas dependerá de las circunstancias, y será mayor, en general, cuando los medidores estén pegados sobre superficies metálicas, que cuando lo estén sobre plásticos, madera, concreto o cerámica, sin embargo existen técnicas especiales o medidores que pueden aplicarse con estos últimos materiales para obtener precisión en las medidas.

-Cuando las deformaciones cambian con el tiempo, con frecuencia no existen alternativas para usar medidores de deformación de resistencia eléctrica.

-Los recubrimientos frágiles y fotoelásticos pueden usarse en casos especiales, pero la interpretación de los datos es más difícil y hasta ahora se ha adquirido poca experiencia en esta clase de recubrimientos.

-Una ventaja muy importante de los medidores de deformación es que no requieren que se fabrique un modelo y ni siquiera requieren el conocimiento preciso de las cargas que actúan en la probeta, algunas veces se obtienen

resultados importantes con los medidores aplicados a un prototipo en servicio sin el conocimiento preciso de las condiciones de carga de este prototipo.

-Los medidores de deformaciones también son útiles cuando se aplican diferentes condiciones de carga a la misma probeta, los recubrimientos frágiles requerirían, en general, una nueva aplicación de recubrimiento para cada condición de carga.

-Cuando la temperatura o la humedad cambian apreciablemente durante la prueba, son necesarias precauciones especiales para obtener resultados precisos con los medidores de deformaciones de resistencia eléctrica del tipo adherente; en estos casos, pueden encontrarse más prácticos, los medidores de deformaciones del tipo separado, ópticos del tipo Tuckerman o medidores mecánicos, como los de Huggenberger.

### 3.7.2. Medidores de deformación de los tipos ópticos y mecánicos

Los medidores de deformaciones mecánicos y ópticos, algunas veces llamados extensómetros no se usan con frecuencia, sin embargo, algunos de ellos tienen ventajas definidas en situaciones especiales; los de Huggenberger pueden aplicarse en unos minutos, son muy precisos, bastante sensibles, y no los afectan las pequeñas variaciones de temperatura o de humedad; la longitud mínima de su base es de 1/2 plg. Los medidores de deformación del tipo Berry o Whittemore, que usan micrómetros de carátula como instrumentos de lectura son también muy estables y encuentran aplicaciones para hacer medidas en estructuras grandes, porque tienen bases relativamente largas. Los medidores ópticos de deformaciones inventados por Tuckerman son muy sensibles, su campo de aplicación principal es la determinación de las constantes elásticas en las pruebas de materiales; el de Optron se usa también con el mismo objeto.

Los catetómetros se usan para medir los desplazamientos en las estructuras grandes como en el caso de los análisis en presas. Finalmente deben mencionarse los micrómetros de carátula, que son los instrumentos que se encuentran con mayor frecuencia, los más baratos y los más fáciles de usar, Dan directamente el desalojamiento de un punto a lo largo de la dirección del

vástago del medidor, su sensibilidad es del orden de 0.001 de pulgada o de 0.0001 de pulgada.

## CAPITULO 4. MEDICION DE LAS DEFORMACIONES UNITARIAS POR MEDIO DE LA TECNICA DE EXTENSOMETRIA

La extensometría es una técnica que tiene por objeto tomar las medidas de la deformación unitaria que tienen los cuerpos cuando son sometidos a fuerzas exteriores y la determinación del estado superficial de las tensiones existentes en cada punto; no obstante los adelantos tecnológicos esta técnica de medición es insustituible ya que no hay procedimientos que puedan reemplazar esta forma de obtención de datos, en un principio, este tipo de ensayos estaba limitado al uso en laboratorios esto motivado por factores económicos y de desarrollo tecnológico; en la actualidad el desarrollo de la electrónica y sus métodos han facilitado su aplicación a los procesos industriales, otro obstáculo que se llega a presentar es que los posibles utilizadores no son especialistas en electrónica y se encuentran con dificultades para la elección del equipo que puede adaptarse a la aplicación en turno, sino hasta en el proceso de los datos obtenidos.

### Fundamentos

La extensometría tiene por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos, y sirve para evaluar las magnitudes físicas capaces de originar deformaciones superficiales en los cuerpos sobre los que actúen.

La unidad de medida usada es adimensional y se denomina "deformación unitaria.  $\Delta L/L$  La unidad correspondiente es la "microdeformación" ( $\mu\epsilon$ = microstrain).

$$1 \mu\epsilon = 10^{-6} m/m$$

## Principio de medida

Un transductor (galga) es unido sólidamente al cuerpo en estudio para que, mediante fuerzas externas se deformen ambos y así obtener la medida, la resistencia eléctrica es función de su longitud y su variación de longitud se obtiene en función de la resistencia eléctrica.

Ecuación fundamental:  $\Delta R/R = K \Delta L / L$

donde: R = resistencia eléctrica

$\Delta R$  = variación de resistencia

L = longitud de la galga

$\Delta L$  = variación de longitud

k = factor de galga

*Método de medición directo:* Cuando lo que se mide es la variación de la resistencia que experimenta la galga al variar su longitud; es importante señalar que en este método se obtiene gran precisión pero solo se utiliza en medidas de régimen estático.

*Método de medición indirecto:* Este se aplica cuando se mide una variación de tensión o de intensidad (que no es la variación de resistencia directamente, se aplica el método indirecto).

Este método es de menor precisión, ya que introduce conversión de magnitud, pero permite efectuar mediciones en régimen dinámico.

## 4.1 APLICACIONES DE LA EXTENSOMETRIA

Las medidas de extensometría son aplicadas ampliamente en los laboratorios, y en las más diversas industrias; como la construcción naval, aeronáutica, material ferroviario, industria del automóvil, estructuras metálicas, maquinaria, herramientas, grúas y caldería, oleoductos, unidades de alta presión, máquinas eléctricas, obras públicas, etc...

Su campo de aplicación se amplía continuamente y su utilización se beneficia de las nuevas tecnologías. Las galgas a circuito impreso y las semiconductoras, los amplificadores a frecuencia portadora, el registro magnético y el tratamiento electrónico de la información han perfeccionado y facilitado de tal manera desde la obtención hasta el procesamiento de datos, que la extensometría será en breve un imprescindible auxiliar tanto en el diseño como en fabricación y en control de calidad.

### ALCANCES EN LAS APLICACIONES

Las deformaciones unitarias medibles dependen naturalmente de la galga extensométrica utilizada, desde 50 hasta  $50.000\mu\epsilon$  son valores alcanzados normalmente, pero en condiciones especiales pueden medirse desde 1 hasta  $200.000\mu\epsilon$ .

Las galgas son muy sensibles a las variaciones de temperatura, y hay que instalar montajes adecuados para su compensación, desde  $-200^{\circ}\text{C}$  hasta  $+180^{\circ}\text{C}$  es la zona normal de trabajo, pero con galgas de base de asbesto se puede alcanzar los  $400^{\circ}\text{C}$  y con galgas de base metálica se puede llegar hasta los  $1100^{\circ}\text{C}$ .

La longitud de la zona del cuerpo cuya deformación se mide, puede variar desde 0,3 mm. hasta 150 mm. en aplicaciones muy especiales.

Los factores ambientales tales como presión, humedad, aceite, ácidos corrosivos, abrasivos, campos eléctricos y magnéticos, etc... no limitan el dominio de utilización de la extensometría si se cuida adecuadamente la elección de la galga y la protección adecuada.



## 4.2 BASES TEORICAS

### Estado superficial de tensiones

Cualquier fuerza exterior que actúa sobre un cuerpo, las resultantes de cada una de las fuerzas que actúan sobre cada una de las caras de un elemento infinitesimal, perteneciente al cuerpo en estudio, seguirán manteniendo al elemento.

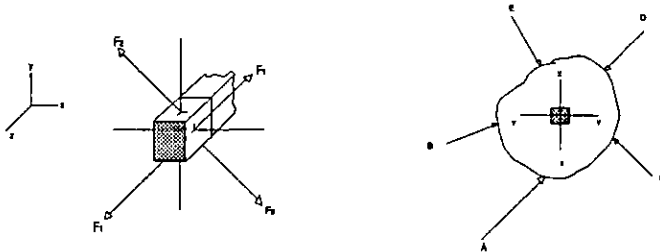


Fig. 4.1 Fuerzas sobre un elemento infinitesimal

También observamos que el momento de las fuerzas respecto al centro han de ser cero,  $\sigma_{2x} + \sigma_{1y} = 0$ , o sea  $\sigma_{2x} = -\sigma_{1y}$

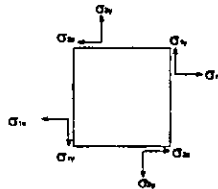


Fig. 4.2 Momento de las fuerzas respecto al centro en un elemento infinitesimal

Entonces, el estado superficial de tensiones de un elemento infinitesimal queda definido así:

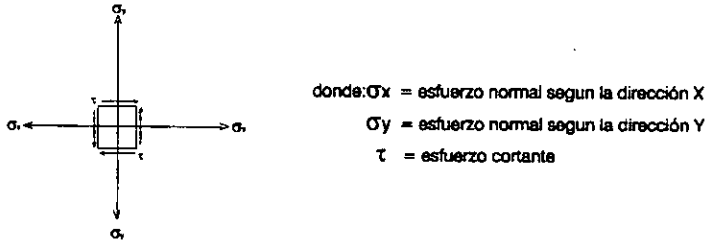


Fig. 4.3 Estado superficial de tensiones de un elemento infinitesimal

Este puede definirse tambien usando las direcciones para las cuales los esfuerzos normales son máximos y mínimos

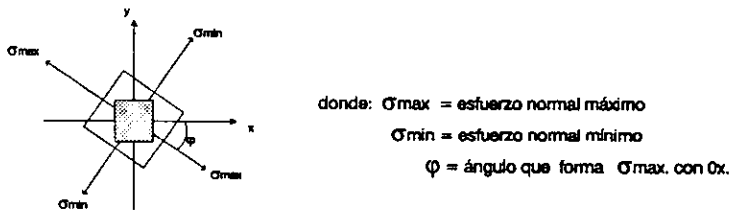


Fig. 4.4 Estado superficial de tensiones con los  $\sigma$  máximos y mínimos

Puede definirse también utilizando las direcciones para las cuales el esfuerzo cortante  $\tau$  es máximo:

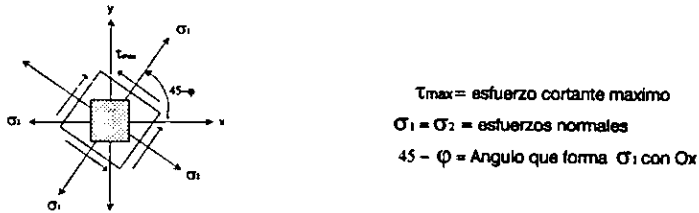


Fig. 4.5 Estado superficial de tensiones donde el  $\tau$  es máximo

### Relación entre esfuerzos y deformaciones

Para poder determinar físicamente los esfuerzos en los elementos en estudio, debemos utilizar tecnología que mida las deformaciones de éstos.

Para una barra de acero sometida a tracción, dentro de la zona de proporcionalidad OA, tenemos:

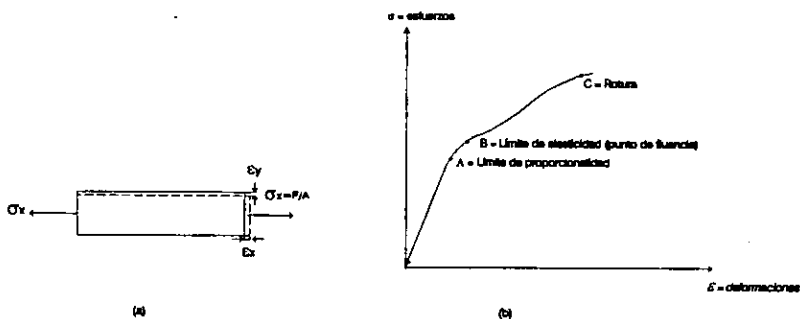


Fig. 4.6 a) Ensayo a tracción en una barra de acero b) diagrama de ensayo a tracción

**Caso general:**

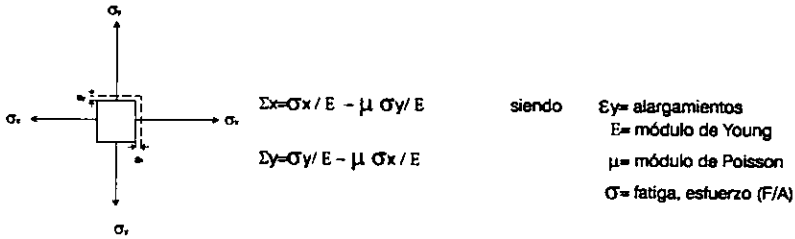


Fig. 4.7 Caso general de un ensayo a tracción en una barra

**Formulas de Euler**

Estas relacionan los esfuerzos normales y las deformaciones.

Para la deformación  $\gamma$  por esfuerzo cortante  $\tau$ , tenemos



Fig. 4.8 Deformación

**Constantes elásticas de los metales**

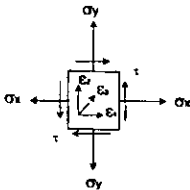
Para poder determinar con mayor exactitud las deformaciones en los materiales de estudio, debemos enlistar las características elásticas de los mismos, para lo cual contamos con una lista de los principales materiales y sus constantes elásticas.

**Tabla de constantes elásticas de los metales**

METAL	E Módulo de elasticidad (módulo de Young) 1000 000 1,000,000 kg/cm <sup>2</sup>	G Módulo de rigidez (módulo de elasticidad al esfzo. cortante) kg/cm <sup>2</sup>	K Módulo de elasticidad volumétrico 1 000 000 Kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ Módulo o constante de Poisson.
Acero fundido.....	2.00	0.794	1.42	0.26
Acero laminado en frío.	2.07	0.808	1.62	0.287
Acero inoxidable 18-8...	1.94	0.745	1.66	0.305
Todos los demás aceros incluyendo el de alto contenido de carbono, tratado térmicamente.....				
	2.01-2.11	0.773-0.836	1.59-1.68	0.283-0.292
Fundición (hierro).....	0.949-1.47	0.365-0.576	0.590-1.089	0.211-0.299
Hierro maleable.....	1.66	0.65	1.209	0.271
Cobre.....	1.09	0.407	1.258	0.355
Latón 70-30.....	1.11	0.422	1.104	0.331
Latón fundido.....	1.02	0.372	1.18	0.357
Bronce Tobin.....	0.970	0.358	1.14	0.359
Bronce fosforado.....	1.11	0.415	1.25	0.350
Aleaciones de aluminio diversas.....				
	0.696-0.724	0.260-0.274	0.696-0.717	0.330-0.334
Metal monel.....	1.76	0.668	1.58.0.315	
Inconel.....	2.18	0.773		
Niquel-Z.....	2.11	0.773		
Cobre al berilio.....	1.19	0.492		
Elektron (aleación de magnesio).....	0.443	0.176	0.337	0.281

### Estado superficial de tensiones en función de las deformaciones medidas en un punto

1º Estado superficial de tensiones de un elemento infinitesimal definido según dos direcciones perpendiculares cualesquiera.



$$\sigma_x = ((\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) / (1 - \mu)) E$$

$$\sigma_y = ((\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) / (1 - \mu)) E$$

$$\tau = (E / (1 + \mu)) (((\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2) - \epsilon_3)$$

Fig. 4.9. Estado superficial de tensiones según dos direcciones

2º Estado superficial de tensiones de un elemento infinitesimal definido por sus esfuerzos normales máximos y mínimos.

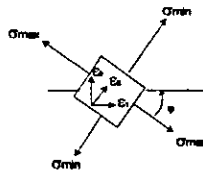


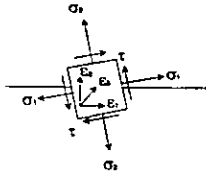
Fig. 4. 10 Estado superficial de tensiones según los esfuerzos normales

$$\sigma_{\max} = E / 2(1 - \mu) * (\epsilon_1 + \epsilon_2) - (E * 2^{1/2}) / (2(1 + \mu)) * ((\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{\min} = E / 2(1 - \mu) * (\epsilon_1 + \epsilon_2) - (E * 2^{1/2}) / 2(1 + \mu) * ((\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2)^{1/2}$$

$$\varphi = 1/2 \text{ arc. tg. } ((\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2\epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_2))$$

3º Estado superficial de tensiones de un elemento infinitesimal definido por el esfuerzo cortante máximo.



$$\sigma_1 = \sigma_2 = (E/2(1-\mu)) * (\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

$$\tau_{max} = (E/2(1-\mu)) * ((\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2)^{1/2}$$

$$\phi = (1/2) \text{arc. tg. } ((\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2\epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_2))$$

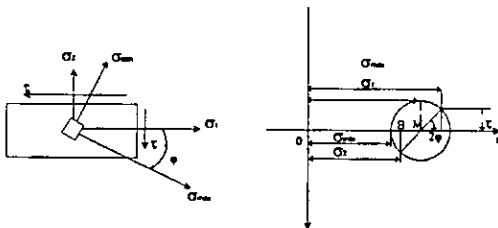
Fig. 4.11 Estado superficial de tensiones definido por el esfuerzo cortante

### Esfuerzos en función de las deformaciones unitarias

#### Caso general

Necesitamos encontrar las expresiones analíticas que permitan obtener los valores de  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ , (referido del eje xx y medido en el sentido de las agujas del reloj) y de "r" (radio del círculo de Mohr).

#### a) Círculo de Mohr,



Con los valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\tau$  se puede dibujar un círculo de centro M que permite calcular las fatigas  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ .

Fig. 4.12 Círculo de Mohr

b) Cálculo de  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\varphi$ ,  $r$ , en función de  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_2$ .

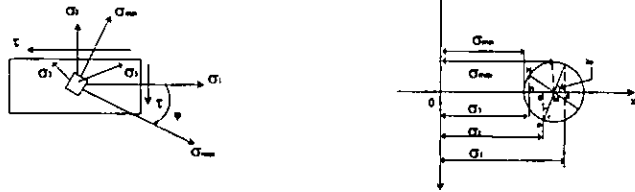


Fig. 4.13 Círculo de Mohr en función de  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_2$ .

Resolución:

1) Fijar sobre OX los puntos A, B y C tal que  $OA = \sigma_3$

$$OB = \sigma_2$$

$$OC = \sigma_1$$

2) Hallar el punto medio de BO = punto M

3) Sobre la perpendicular por A a OX se toma el segmento  $AN = BM$ .

4) Con centro en M y radio MN se traza el círculo de Mohr.

Después de dibujar el círculo de Mohr se pueden obtener analíticamente:

$$OM = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

$$\tau_{\max} = \left( (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 - \sigma_3 \right)^2 + \left( (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \right)^2$$



c) Cálculo de  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  en función de  $\varepsilon_1, \varepsilon_3, \varepsilon_2$ .

Si consideramos el estado superficial de tensiones, tenemos que

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E - \mu \sigma_2 / E$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_2 / E - \mu \sigma_1 / E$$

$$\varepsilon_3 = \sigma_3 / E - \mu \sigma_3 / E$$

$$\sigma_1 = ((\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) / (1 - \mu^2)) E$$

$$\sigma_2 = ((\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) / (1 - \mu^2)) E$$

$$\sigma_3 = (E \varepsilon_3) / (1 + \mu) + (E \mu / (1 - \mu^2)) * (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

#### Casos Particulares

a)  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$  en función de los alargamientos unitarios y según las direcciones principales  $0^\circ/90^\circ$ .

Si se presupone que son conocidas las direcciones principales, en este supuesto el cálculo se reduce a lo siguiente.

de  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  obtenidos anteriormente despejamos las tensiones:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 = ((\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) / (1 - \mu^2)) E$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_2 = ((\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) / (1 - \mu^2)) E$$

$$\varphi = 0$$

$$\tau_{\max} = r = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 = ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / (2(1 + \mu))) E$$

b)  $\tau_{\max}$  en función del alargamiento unitario.

Si se presupone que el material está sometido a un estado lineal de tensiones, tenemos:

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$$

$$\text{luego } \sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$$

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_1 / 2 = E \varepsilon_1 / 2$$

### 4.3 LA GALGA EXTENSOMETRICA

#### Principio de medida

Podemos partir de la afirmación de que la variación de la resistencia eléctrica de la galga es proporcional a la variación de su longitud.

Físicamente, la galga está constituida por un hilo metálico cilíndrico replegado varias veces sobre sí mismo, como lo indica la figura.

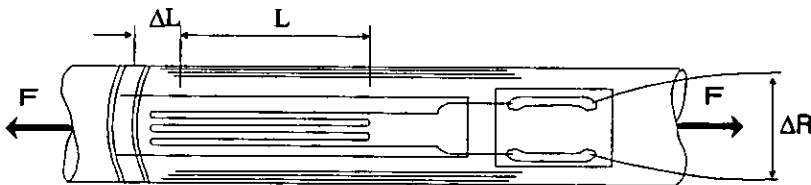


Fig. 4.14 Galga extensométrica

donde: L = longitud inicial de la galga

R = resistencia inicial de la galga

S = sección circular de hilo metálico

r = radio de la sección circular

ρ = resistividad del hilo metálico

υ = Coeficiente de Poisson del hilo metálico

de la ecuación de la resistencia de un hilo largo conductor cargado

$$R = \rho L / S$$

obtenemos la ecuación fundamental de la extensometría

$$\Delta R / R = K \Delta L / L$$

donde  $K = \text{factor de galga} = 1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)$

### **Características de las galgas**

Las características generales más importantes son las siguientes.

- 1) Resistencia de la galga. Desde 120 ohm hasta 1000 ohm
- 2) Factor de galga. Para galgas normales su valor es 2 y para las semiconductoras es hasta 200.
- 3) Histéresis mecánica. Un valor típico es 7
- 4) Límite de fatiga. Este se expresa por el número de ciclos que aguanta a un esfuerzo determinado.
- 5) Sensibilidad transversal. 1% de la sensibilidad longitudinal.
- 6) Deformación máxima. En los tipos normales un valor alcanzado es de  $3000 \mu \epsilon$ .
- 7) Influencia de la temperatura. Este es muy importante por que las deformaciones medidas en una galga no sometida a un esfuerzo, por efecto de la temperatura puede alcanzar hasta 50 y 60. Por esto es conveniente utilizar galgas autocompensadoras o proveer los dispositivos de montaje necesarios para lograr la compensación.

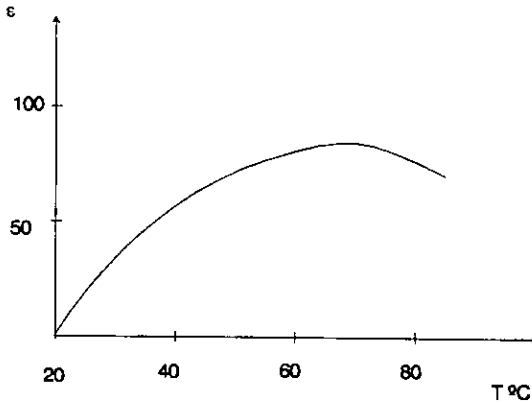


Fig. 4.15 Diagrama del efecto de deformación de la galga respecto de la temperatura

### Tipos de galgas extensométricas

a) *por su composición*

#### galgas de hilo

- de hilo plano  $\phi$  hilo 10-30 m. Cupro-Niquel
  - solenoides aplastados Base de papel fenólico o baquelita de 500 - 700  $\mu$ m.
- Fueron las primeras pero hoy se usan poco. Tienen precio bajo.

#### galgas de film

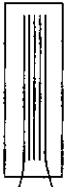
- son las más usadas.
- Es una trama peculiar.
- Niquel-Cobre
- nombres comerciales
- Constantan
- Selcom
- Ferry
- Karma
- Espesor de 4-10  $\mu$  m.
- Base: -epoxy
- poliester 20-80 m

galgas semiconductoras

- Silicon
- Germanio
- Arsenio de galio
- Material semiconductor
- Base -Epoxy
  - Poliester
- El factor k puede ser muy variable (hasta  $k > 100$ )
- Tiene un gran coeficiente térmico
- Precio aproximadamente 10 veces mayor que las de FILM.

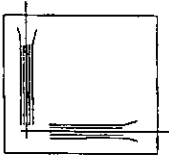
*B) Por su forma*

- Uniaxiales: un solo eje de medida



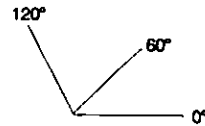
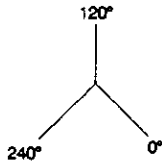
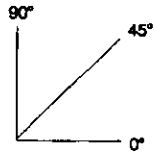
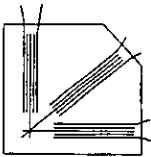
- Longitudes útiles: 0,3 m/m - 70 m/m
- Aplicación: Deformaciones sobre un solo eje
  - Determinación de fatigas cuando se conocen las direcciones de esfuerzo (una dirección)
  - Realización de captadores

- Biaxiales: dos ejes situados normalmente a 90°



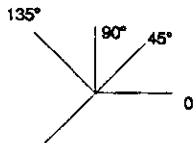
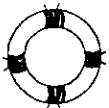
- Longitudes útiles: 1 - 20 m/m
- Aplicaciones: Estado de tensiones cuando se conocen las direcciones principales.  
Medida de par de torsión  
Captadores compensados

-Triaxiales: tres ejes



- Longitudes útiles: 2-15 m/m
- Aplicaciones: Determinación del estado de tensiones superficiales.

-Multiaxiales: Mas de tres ejes (normalmente 4 ejes).



-Aplicaciones: Comprobación de la medición.

### *Galgas especiales*

-De varios elementos:



Longitud total 5 m/m.

-Aplicación: Determinación de gradientes de tensiones superficiales.

-Espirales: Dimensiones  $\phi 15 - 20$  mm.

-Aplicación: Medida de presiones (diafragmas)

-Metálicas (hilo): Longitud 10m/m

-Fijación por soldadura

-Aplicación: Medidas de deformaciones hasta en  $+1000^{\circ}\text{C}$  de temperaturas.

-En base de asbesto

-Longitud 10m/m

-Aplicación hasta  $+400^{\circ}\text{C}$

-De gran elongación:

-Longitud 20 m/m

-Aplicación: Medidas en la zona plástica ( $\pm 15\%$ )

#### 4.3.1 Método a seguir para la colocación de galgas

- 1°. Soldar los hilos de la galga al terminal TF/2 ó TF/3 utilizado.
- 2°. Desbastar con esmeril la superficie de la pieza sobre la que irá fijada la galga y su terminal.
- 3°. Después de debastada, afinar la superficie con lija 000.
- 4°. Desengrasar aplicando CRC SPRAY y frotando con pañuelo suave.
- 5°. Limpiar con QUICK CLEAN IS SPRAY frotando la superficie con pañuelo hasta que estos queden completamente limpios después de su utilización.
- 6°. Aplicar sobre la superficie preparada, en la zona donde irá colocada la galga una gota de pegamento LOCTITE IS-12.
- 7°. Al cabo de 30 segundos, colocar la galga extensométrica sobre la superficie en la que se ha depositado la gota de pegamento. La galga se manipulará sin tocarla con los dedos, sujetando la terminal con unas pinzas.  
Situada la galga en el punto y dirección exactas, se coloca sobre ella una delgada lámina de teflón y se presiona sobre ella con una goma virgen de teflón para repartir uniformemente los esfuerzos sobre la superficie de la galga. Presionar durante tres minutos como mínimo.
- 8°. Retirar la lámina de teflón.
- 9°. Aplicar una gota del mismo pegamento sobre la zona en que irá colocado el terminal de la galga.
- 10°. Antes de 30 segundos, fijar el terminal a la superficie utilizando la lámina de teflón y la goma virgen utilizadas en el apartado 7º.
- 11°. Comprobar la continuidad, el valor ohmico (120 ohmios) y la derivada a masa (100 megaohms) de cada galga desde los terminales.
- 12°. Efectuar las conexiones entre terminales para formar las ramas del



punto.

- 13°. Realizar el conexionado de las líneas a los terminales de la galga.  
Las líneas de conexión han debido sujetarse previamente a la superficie lo más cerca posible de la zona donde se han pegado las galgas.
- 14°. Comprobar nuevamente la continuidad, el valor ohmico y la derivada a masa desde el extremo opuesto de la línea.
- 15°. Aplicar sobre las galgas y terminales una protección de SILICONE SCP-153, mediante un pulverizador.
- 16°. Después de 30 minutos, recubrir toda la zona con SILASTIC 732 RTV, cuidando de que no queden fisuras ni poros, y de que el recubrimiento se adhiera perfectamente al material.
- 17°. Después de 12 horas, comprobar nuevamente la continuidad, el valor ohmico y la deriva a masa de todas y cada una de las ramas del puente desde el otro extremo de las líneas de conexión.

#### 4.4 TIPOS DE MONTAJES DEL PUENTE DE WHEASTONE.

Existen dos métodos fundamentales para medir la resistencia de la galga extensométrica, el Potenciometro y mediante el puente de Wheastone.

El puente de Wheastone es el más utilizado por tener mediciones más precisas. y de este también existen dos formas de realizar las medidas:

-Método directo para medidas estáticas: se mide directamente la variación de resistencia por el método del cero (si en principio  $R_1=R_2=R_3=R_4$ , y  $R_1$  es la galga, se varía  $R_2$  hasta que la tensión de salida sea cero y se determina  $R_1$  mediante  $(R_1 + R_1) = ((R_2 + \Delta R_2)R_4)$ .

-Método indirecto para medidas dinámicas:

permite determinar la variación de la resistencia del puente por la variación de la tensión de salida.

### Principio de medida, Bases Teóricas.

La medida de deformaciones mecánicas por medio de galgas se basa sobre el hecho de que un conductor eléctrico alargado o contraído cambia de resistencia proporcionalmente a la variación de longitud, siempre que las variaciones queden dentro de ciertos límites.

La ecuación fundamental de la galga es la siguiente.

$$\Delta R / R = F \Delta L / L = F \cdot \epsilon$$

donde

$\epsilon = \Delta L / L =$  la variación relativa de longitud = deformación unitaria

$F =$  factor de proporcionalidad o factor de galga.

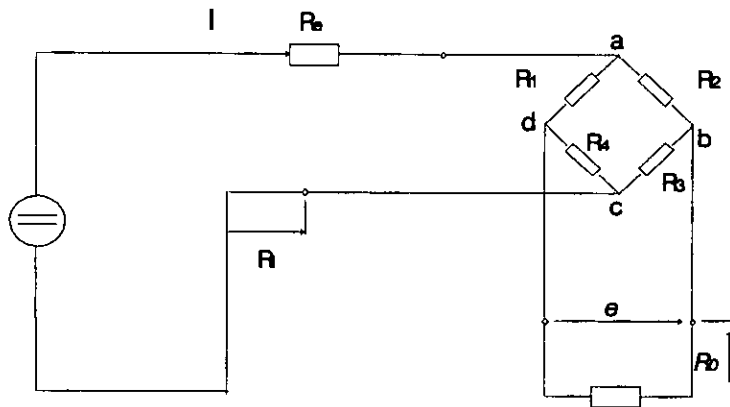


Fig. 4.16 Puente de Wheastone

El puente está equilibrado si se cumple la condición  $R_1/R_4 = R_2/R_3$  en este caso, la tensión "e" es igual a cero.

Si por cualquier razón, una o varias de las ramas del puente cambia de resistencia, la tensión de salida del puente quedará definida por

$$e = E \cdot \underbrace{1 / (1 + (R_S/R_I))}_{f1} \cdot \underbrace{1 / (1 + (R_O/R_M))}_{f2} \cdot \underbrace{(R_1 \cdot R_4 / (R_1 + R_4)^2)}_{f3} \cdot \underbrace{((\Delta R_1/R_1) - (\Delta R_2/R_2) + (\Delta R_3/R_3) - (\Delta R_4/R_4) \cdot (1-n))}_{f4}$$

donde:

$R_S$  = resistencia en serie en el circuito de alimentación,

$R_1, R_4$  = resistencia de las ramas del puente

$R_I$  = resistencia de entrada del puente  $R_I = R$  si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

$R_O$  = resistencia de salida del puente  $R_O = R$  si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

$R_m$  = resistencia de entrada del aparato de indicación.

$n$  = disminución de la linealidad por el hecho de que la condición

$I = cte.$  no es satisfecha perfectamente.

En la mayor parte de los casos se considera que cumplen ciertas condiciones que determinan la ecuación siguiente

$$e = E \cdot 1/4 (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4)$$

donde:  $e$  = Tensión de salida del puente.

Se hace notar que las dos ramas opuestas influyen la tensión de salida en el mismo sentido, es decir, las ramas 1 y 3 en el sentido opuesto a las ramas 2 y 4.

Según el tipo de la medida a efectuar, una, dos, tres o las cuatro ramas del puente pueden ser "activas", es decir, pueden sufrir una variación de resistencia debido a un alargamiento o a una contracción. En este caso, las ramas

opuestas trabajan en el mismo sentido, y las ramas adyacentes en el sentido opuesto, en orden a obtener siempre un aumento en la señal de salida.

Por ejemplo, si un puente con dos ramas activas se coloca sobre una barra que trabaja a flexión, las galgas 1 y 3 deberán ser colocadas en la cara sometida a tracción y las galgas 2 y 4 en el lado que trabaja a compresión.

Teniendo en cuenta que, en general, todas las galgas activas de un puente sufren la misma variación relativa de longitud y se completan recíprocamente en lo que concierne al sentido, la fórmula (3) se puede simplificar:

$$e = E \cdot 1/4 \cdot n \cdot \Delta R/R = E \cdot 1/4 \cdot n \cdot F \cdot \Delta L/L$$

siendo "n" el número de ramas activas del puente.

Para un puente con una sola rama activa:  $e = E \cdot 1/4 \cdot F \cdot \Delta L/L$

Para un puente con dos ramas activas:  $e = E \cdot 1/2 \cdot F \cdot \Delta L/L$

**Sensibilidad:** para un puente de galgas, la sensibilidad puede ser definida como sigue:

$$e = e / E \text{ (mV/V)}$$

sustituyendo se obtiene  $e = e / E = E \cdot 1/4 \cdot n \cdot F \cdot \Delta L/L$

**Calibración:** teniendo en cuenta que  $\Delta R/R = F \cdot \Delta L/L$ , y que para cada galga el factor "F" está indicado por el fabricante, es fácil calibrar alargamientos por medios puramente eléctricos.

Esto se hace colocando en paralelo sobre una de las ramas del puente resistencias de tolerancia muy pequeña ( $< \pm 0.5\%$ ).

Considerando el puente de Wheastone con una sola galga activa, teniendo las cuatro ramas del puente de resistencia de valor R. El puente está equilibrado, es decir, la tensión diagonal "e" es igual a cero.

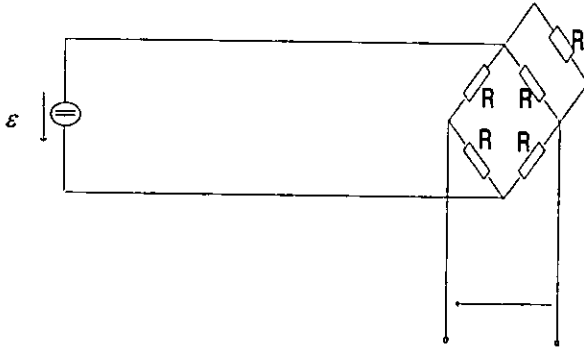


Fig. 4.17 Calibración del puente de Wheastone.

Si una resistencia  $R_p$  se coloca en paralelo a una de las resistencias R, se obtiene una rama de resistencia  $R'$ . Después de una serie de ecuaciones podemos concluir que

$$R_p = R / n \cdot F \cdot (\Delta L/L)$$

Esta es la ecuación general para calibrar el puente de Wheastone variando la resistencia de tolerancia donde n es el número de galgas activas.

## MONTAJES EN PUENTES DE WHEASTONE

### a) una sola galga activa $R_1$

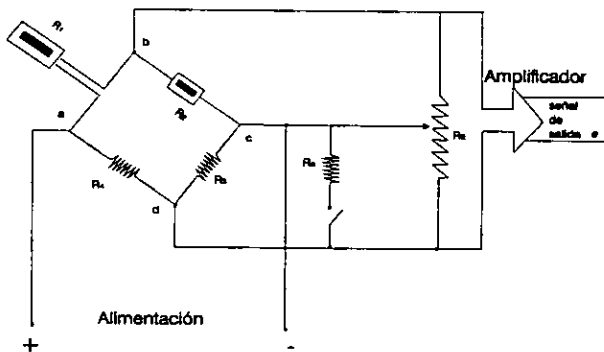


Fig. 4.18 Montaje del puente de Wheastone con una galga activa.

$R_1$ =galga activa ( $R_1=120\Omega$ )

$R_2$ =resistencia de compensación  $=R_1$

$R_3=R_4$ = resistencias constantes iguales a  $R_1$

$R_c$ =resistencia de calibración

$R_E$ = resistencia para equilibrado inicial del puente

La resistencia de compensación  $R_2$  suele ser una galga de las mismas características que la activa con objeto de compensar la variación de temperatura.

Configuración exterior del puente de medida con una sola galga activa.

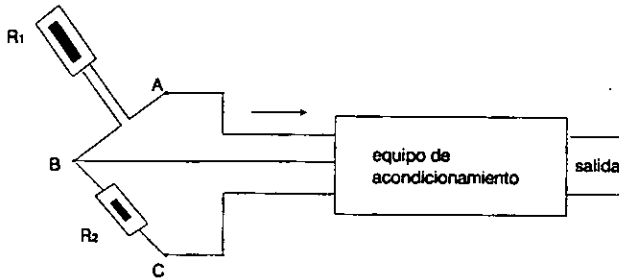


Fig. 4.19 Configuración exterior del puente con una galga activa

$$e = E(K_1 \epsilon_1) / 4 \quad ; \quad e_c = E(R/R_c) / 4$$

igualando  $e$  y  $e_c$  tenemos que la marca de calibración = valor de  $\epsilon$  correspondiente a  $R_c$

para  $K=2$

$$R = 120 \Omega$$

$$EC = 50 \mu\epsilon = \text{marca de calibración}$$

$$R_c = 120 M\Omega$$

b) dos galgas activas (puente compensado en temperatura).

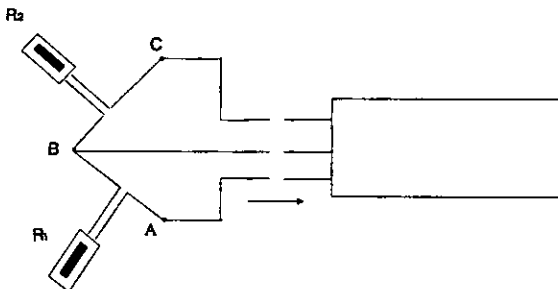


Fig. 4.20. Configuración exterior del puente con dos galgas activas

marca de calibración

$$\epsilon_c = \epsilon_1 - \epsilon_2 = R/kR_c$$

la marca de calibración da el valor de  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ . La relación de las deformaciones con esfuerzos dependerá de como se haya montado las galgas sobre el objeto a ensayar.

c) Cuatro galgas activas (nunca se utilizan tres galgas)

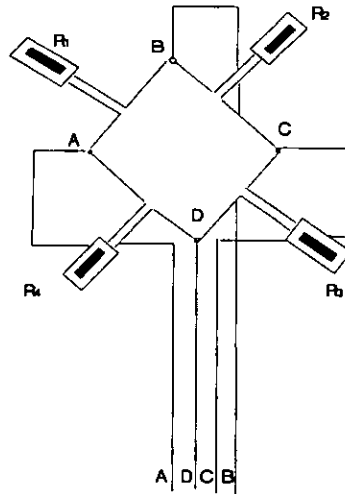


Fig. 4.20. Configuración exterior del puente con cuatro galgas activas

marca de calibración

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = R/kR_c$$

AC=alimentación

BD=señal



#### 4.5 PRINCIPIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Las marcas de calibración sirven para obtener las escalas de  $\epsilon$ , que es lo que la extensometría permite medir. En algunos casos especiales las marcas de calibración pueden servir para obtener las escalas directamente en esfuerzos o a veces hasta en fuerzas o momentos.

*Estado general de tensiones superficiales = galgas triples y tres puentes.*  
Las marcas de calibración permiten obtener  $\epsilon$ . A partir de  $\epsilon$  se calcula  $\sigma$ .

##### Direcciones principales conocidas.

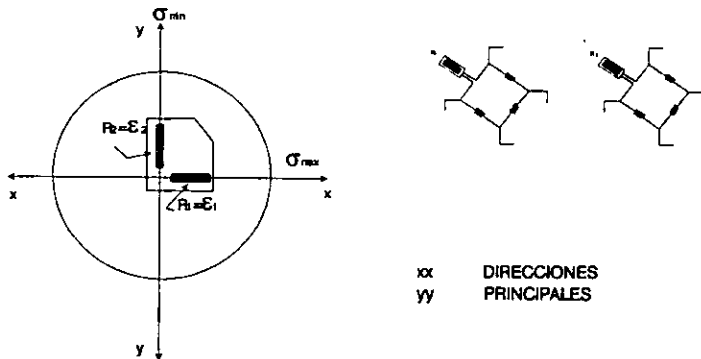
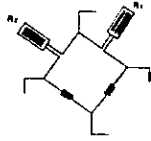


Fig. 4.22 Galga extensométrica en las direcciones principales

Para calcular  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$  hace falta utilizar GALGA DOBLE Y DOS PUENTES

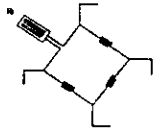
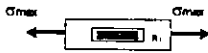
Para calcular  $\sigma_{\max}$  basta GALGA DOBLE Y UN PUENTE.



$$\sigma_{\max} = r / ((\sigma_1 - \sigma_2) / 2) = E \epsilon_1 - E \epsilon_2 / (2(1 + \mu)) E$$

$$\sigma_{\max} = (1/k) (R/R_c) * E / (1 + \mu)$$

## ESTADO LINEAL DE TENSIONES

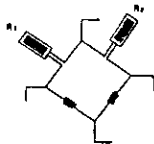


### GALGA SIMPLE Y UN PUENTE

$$\sigma_{\max} = E \epsilon_1$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max} / 2 = E \epsilon_1 / 2$$

} con  $(\epsilon_1)_{cal} = R/kR_c$



### GALGA DOBLE Y UN PUENTE

$$\sigma_{\max} = (E_1 - E_2) / (1 + \mu)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max} / 2$$

} con  $(\epsilon_1 - \epsilon_2)_{cal} = R/kR_c$

## CAPITULO 5. EL EQUIPO DE SIMULACION DINAMICA

**Sistemas elementales de control**

Cualquiera que sean, los elementos electrohidráulicos, electrodinámicos o aquellos que involucren un operador humano, constan de los elementos principales esquematizados en la figura 5.1.

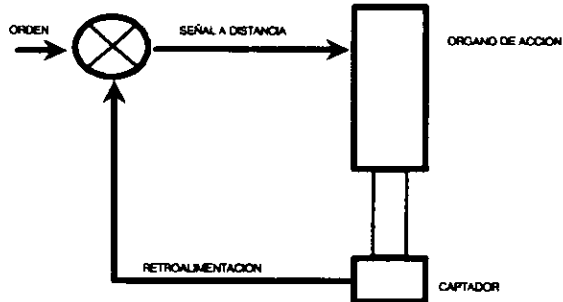


fig. 5.1 Esquema elemental de axionamiento de control.

Existen numerosas variantes de cada uno de los elementos de axionamiento; los elementos deducidos son definidos por el esquema de la figura 5.2

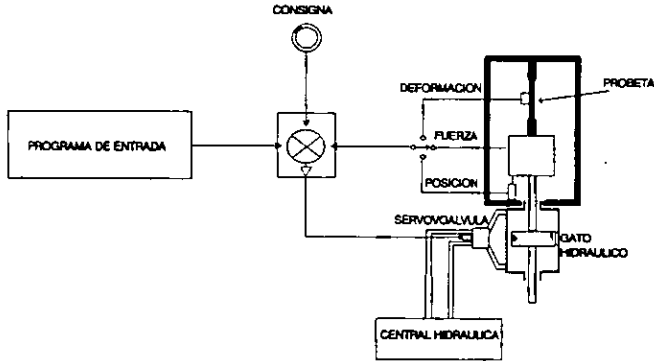


fig. 5.2 Esquema de un equipo de ensayo a tensión y compresión

De la figura 5.2; podemos observar que la orden de entrada es generada por un dispositivo programador del cual la señal puede haberse originado de un registro real de campo; la señal de retorno proveniente de un captador que genera una tensión de salida analógica o numérica, de magnitud proporcional al elemento que es controlado. Los parámetros medidos que son utilizados más frecuentemente son la fuerza, la posición o la deformación; que pueden servir como datos para el control.

La señal de desviación es generada y trazada por un equipo que se ocupa de regular el control en la prueba, esta maniobra abarca generalmente las funciones de alimentación y de conversión de la señal de regreso; el regulador de control, maneja en su señal una servo-valvula con 4 viás que distribuye el fluido a presión a un gato hidráulico.

## 5.1 EQUIPO PRINCIPAL DE UN SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control tiene tres propiedades: la fuerza, la precisión y que es programable; para conocer mejor estas propiedades debemos mencionar sus características principales.

## Fuerza

La fuerza es originada por una central hidráulica con capacidades de las unidades de la planta de 4 a 200 KW con caudales nominales de 12 a 620 litros por minuto a la presión de 210 bar, estos utilizan con mayor frecuencia en los sistemas de ensayos de materiales, caudales de hasta 120 l/min, de hecho, ya que las velocidades y las amplitudes son relativamente moderadas, las fuerzas están más bien elevadas. Los sistemas de ensayo de estructuras utilizan caudales de 12 a 620 l/m en razón de las velocidades elevadas con fuerzas promedio.

El fluido se distribuye bajo presión en un gato hidráulico por medio de una servovalvula de 4 vías según se ilustra en el esquema de la figura 5.3.

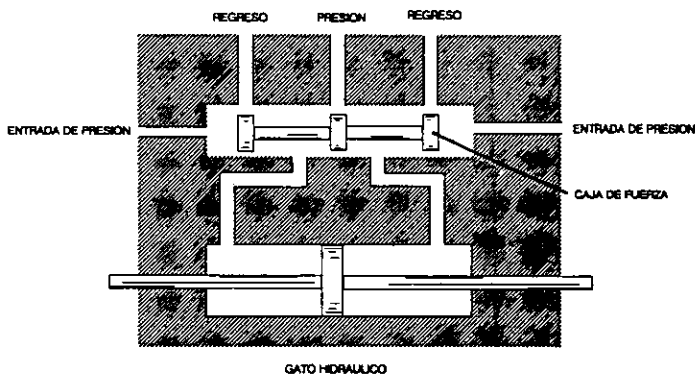


Fig. 5.3. Esquema de una servovalvula y de un gato hidráulico

Dos tipos de servovalvula son utilizados en las dos clases de sistemas, materiales y estructuras:

La servovalvula se monta directamente en el cuerpo de un gato hidráulico a la mayor presión posible, la gama de fuerzas de los gatos hidráulicos varía de 10 a 10,000 KN, los más pequeños pueden trabajar a velocidades de hasta 1000 m/min (15 m/s); para los ensayos de estructuras, los gatos hidraulicos portan generalmente a cada extremidad de las rotulas preliberadores evitando los esfuerzos transversales en las partes planas, las rótulas tienen un doble debatimiento angular permitiendo el desplazamiento del elemento de ensayo en dos direcciones y una recuperación de actuación permitiendo el cambio de tracción a compresión; con aplicaciones de fuerza de hasta 2500 KN.

Para las aplicaciones en los ensayos de materiales, el gato hidráulico es generalmente montado sobre un armazón de carga por su cara frontal; para ejemplificar esto, vemos que el gato hidráulico de la figura 5.4 está montado en la parte superior del armazón.

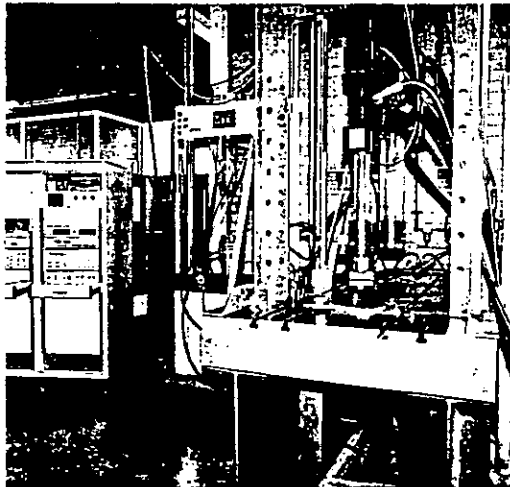


Figura 5.4. sistema de ensayos de materiales con un gato hidraulico fijo en la parte movil.

Los gatos hidráulicos lineales de 500 KN y más (hasta 10,000 KN) se integran frecuentemente en la parte inferior del armazón y también los gatos hidráulicos rotativos y los de motores hidráulicos pueden ser utilizados para los ensayos de materiales o los ensayos de estructuras; los órganos hidráulicos se construyen especialmente para satisfacer las exigencias de fatiga a varios millones de ciclos y el par de salida puede alcanzar 3500 m de N.

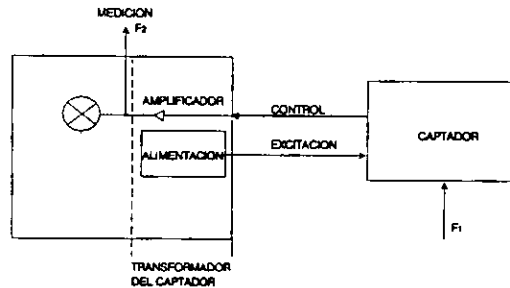
### **Precisión**

La precisión global en un sistema de control resulta de la suma de las precisiones de cada elemento donde los errores de medición y de comando pueden también sumarse, sin embargo, la precisión puede ser definida de dos maneras diferentes: precisión de medición y precisión de comando:

#### **Precisión de medición**

Generalmente, tomaremos en cuenta los siguientes tipos de precisiones de medición:

- la precisión de la fuente de alimentación del captador y del amplificador,
- la precisión de la salida de la medición. (ver figura 5.5).



$F_1 = \text{FUERZA VERDADERA}$   
 $F_2 = \text{FUERZA MEDIDA}$   
 $\text{PRECISION} = F_1 - F_2$

Fig. 5.5. Precisión de medición.

La precisión de medición es representada por la diferencia entre la fuerza aplicada al elemento de estudio y la lectura de la salida de medida, o sea  $F_1 - F_2$ . La precisión o linealidad del captador es generalmente inferior a 0,5% (frecuentemente 0,25%) de la escala patron, con la ayuda de circuitos amplificadores de escala, se puede disponer de cuatro escalas patron representando 100%, 50%, 20% y 10% de la amplitud de medida sin algún prescindir de la precisión. La alimentación de un captador y la puesta en forma de la señal de retorno son generalmente aseguradas por un transformador que agrupa las dos funciones y la precisión es normalmente superior a 0,25%.

### Precisión de comando

La precisión de comando es difícil de definir en términos generales, porque esta incluye a la vez la precisión de la medida y también de la curva de control (ver figura 5.6).



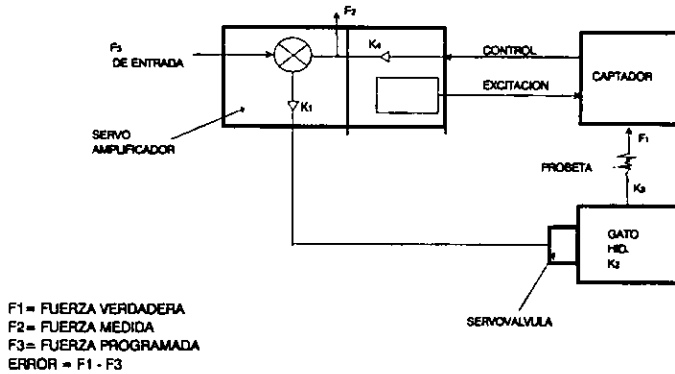


Fig. 5.6. Precisión de comando

La curva formada consta de al menos cuatro secciones donde cada una posee su propia característica.

Para analizar el efecto de la ganancia, estudiamos el controlador de fuerza de la figura 5.6.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  son las ganancias estáticas de cada uno de los componentes del sistema representado, para obtener la mejor precisión de comando, se debe realizar el producto de la mayor de las ganancias de cada elemento de manera que reduzca lo más posible la desviación entre  $F_3$  y  $F_1$ , ambos para conservar la estabilidad en el control.

$$G = K_1 K_2 K_3 K_4$$

donde  $G$  = producto de las ganancias

De esta ecuación, y suponiendo que la ganancia de cada elemento es relativamente constante durante un ensayo dado; se supone además que cada elemento es lineal dentro de la gama de frecuencias mientras se practica el ensayo. En los ensayos de órganos y de estructuras, la ganancia de la probeta puede variar sensiblemente con un cambio repentino de rigidez, esto ocurre, por ejemplo, durante un ensayo de la suspensión de un automóvil, cuando se fija al chasis una matriz de caucho ( $K_5$ ) (Figura 5.7), esta situación nos permite, modificar la ganancia para conservar la estabilidad en el control, para el caso donde  $K_5$  es máximo, un análisis complementario muestra que el error de fuerza

es entonces más importante cuando el ensayo se desarrolla dentro de la región donde la ganancia de la probeta es  $K_4$ .

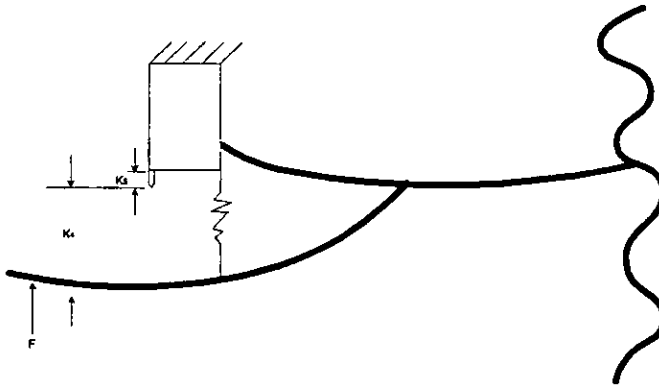


Fig. 5.7. Matriz de caucho ( $k_c$ ) unida ó fija a la suspensión de un automóvil.

En este ejemplo el control de fuerza funciona sin compensador de estabilización. De los descubrimientos recientes se permite poner en punto los circuitos auxiliares que hacen variar la ganancia de la probeta a modo de mejorar la precisión de comando.

### Programación

Como se mostró en la figura 5.2; el control puede aceptar sin importar cualquier dispositivo electrónico proporcionando a la salida una señal estática o dinámica, esta señal representará las condiciones de trabajo que se imponga a la probeta, esto significa que la señal de entrada al programa también corresponde al parámetro de retorno escogido y se puede hacer funcionar el sistema en diferentes tipos de comando según los programas deseados. Para la señal de regreso, se puede manejar las señales siguientes (y/o se tiene como medición):

**Fuerza:** se detecta por contracción de la libertad sobre la probeta o por un captador de fuerza.

**Posición:** se detecta por captación del desplazamiento.

**Deformación:** se detecta por medio de un extensómetro fijo directamente sobre la probeta.

## 5.2 SISTEMAS DE ENSAYOS DINAMICOS DE ORGANOS Y ESTRUCTURAS

Los sistemas de ensayos de estructuras constan de muchos de los elementos comunes a los sistemas de materiales; la diferencia principal entre estos dos tipos de sistemas consiste en la definición de la probeta, como se explicó anteriormente, los sistemas de ensayos de materiales sirven para probar los materiales de base usandolos bajo forma pre-determinada, mientras que los ensayos de órganos y de piezas se hacen sobre piezas finales o a escalas reducidas, y de formas geométricas definidas.

### SISTEMAS PARA LOS AUTOMOVILES

Los sistemas de ensayos de automóviles son los más desarrollados dentro de este tipo de investigaciones, pues, como ya se mencionó, originalmente se desarrollo el ensayo para condiciones de confort (eliminación de ruidos y eliminación de vibraciones), pero con el avance de la tecnología, se fue ampliando la aplicación del mismo y ahora se emplea para analizar la mayoría de los elementos estructurales del automóvil. A partir de 1960, la industria del automóvil comienza a adquirir los equipos de ensayos y control electrohidráulico para hacer ensayos en vehículos.

## Ensayos en vehículos completos

En 1964 se realizó un estudio profundo de la simulación de rodaje de un automóvil basado en la aptitud de un comando electrohidráulico para simular un perfil de ruta, este tipo de sistema no fue utilizado para hacer estudios de fatiga sino para los estudios de confort y ruido.

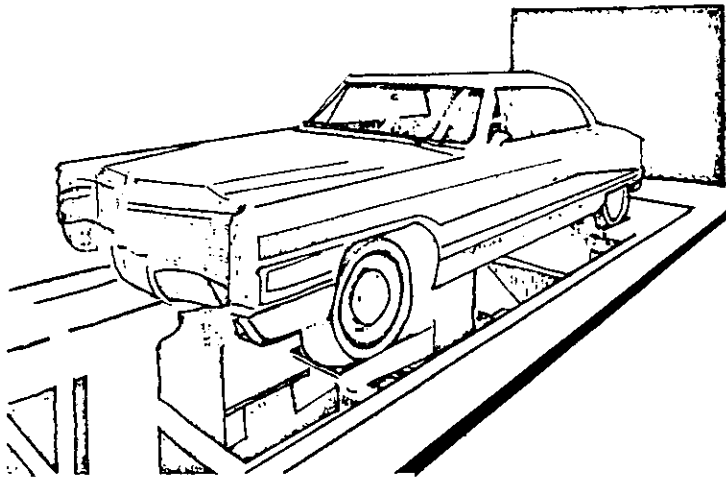


Fig. 5.8: primer sistema de simulación de rodaje.

Después de la instalación del primer sistema, cuatro sistemas como este son instalados en los Estados Unidos y otros se encontraban en proyecto de instalación en Japón y en Europa.

Las especificaciones de estos sistemas eran:

- Respuesta en frecuencias hasta de 300Hz
- Velocidad máxima 0,5 m/s.
- Fuerza máxima 20 a 30 KN (por cada gato hidráulico)

Las velocidades y las fuerzas máximas no son más elevadas porque todas las excitaciones se hacen através de los neumáticos. La banda pasante de 300 Hz permite simular el rodaje en pavimento hasta 240-320 Km/h.

Estos sistemas son generalmente programados a partir de un generador; las mediciones se hacen en diferentes puntos de la carrocería para determinar los efectos de resonancia por el ruido y la fatiga posibles, este tipo de ensayos proporcionan informaciones útiles en la función de transferencia simultánea neumático y suspensión.

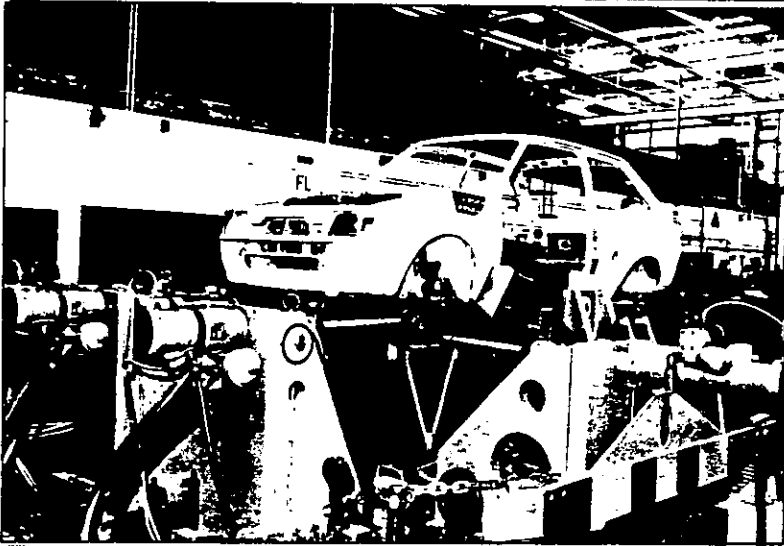


Fig. 5.9. Los más evolucionados sistemas simuladores de rodaje.

Estos tipos de sistemas destinados a estudios de ruidos y vibraciones se distinguen de otros sistemas de ensayos de vehículos destinados a estudios de resistencia por ciertas diferencias; para los estudios de resistencia, una excitación en fuerza es aplicada directamente a un chasis y eje de vehículos sin pasar por el neumático.

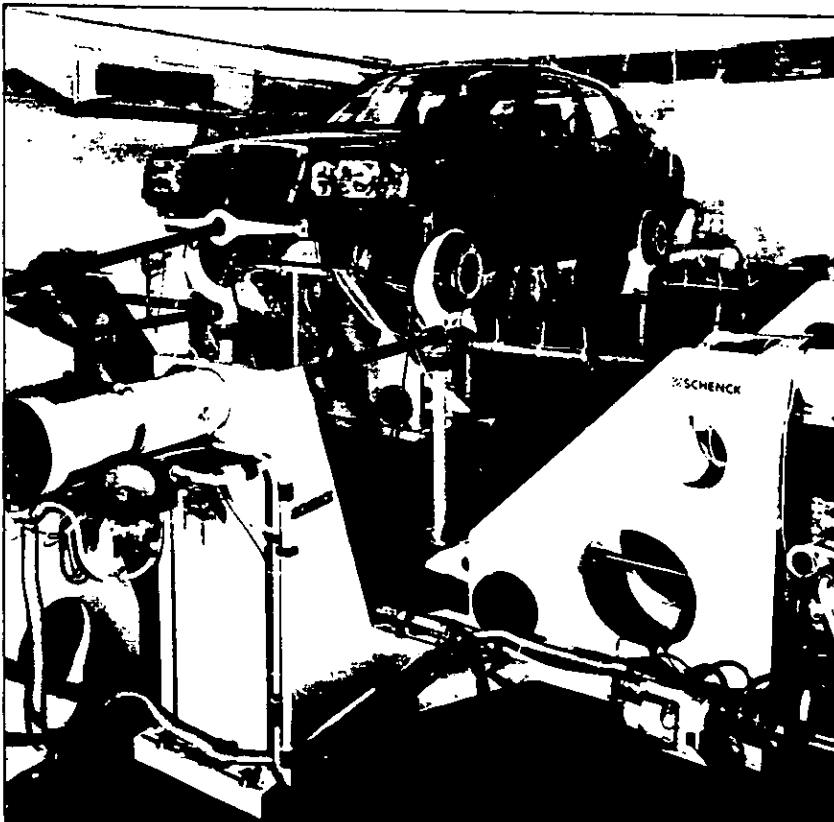


Fig. 5.10. ensayos de resistencia de un vehiculo completo.

Para la programación completa simulando el ensayo sobre la ruta, se realizan registros en banda magnetica de aceleraciones o de las aceleraciones libremente generadas por la ruta sobre los chasis o ejes; en realidad después los registros sirven de entrada de los programas de sistemas de ensayos.

Para obtener una correlación completa entre ensayos de laboratorio y ensayos de campo es necesario programar cinco variables independientes sobre los ensayos anteriores, estas entradas son definidas en la figura 5.11.

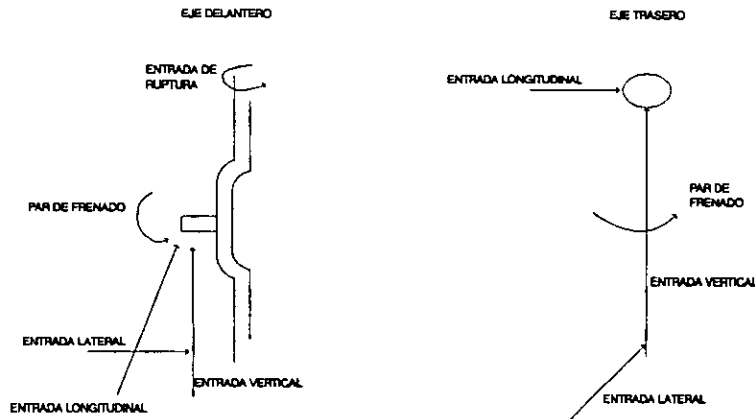


Fig. 5.11. Emplazamientos de ataque para la simulación de la resistencia de un vehículo completo.

Los problemas mecánicos de fijación en éste se resuelven con ciertas modificaciones y el número de entradas a este se reducen a 3 (ó 2) a cada rueda, las tres entradas son los desplazamientos verticales, las fuerzas en el desplazamiento longitudinal y las fuerzas en el desplazamiento vertical, una correlación satisfactoria se obtiene entre los ensayos de laboratorio al utilizar las tres entradas.

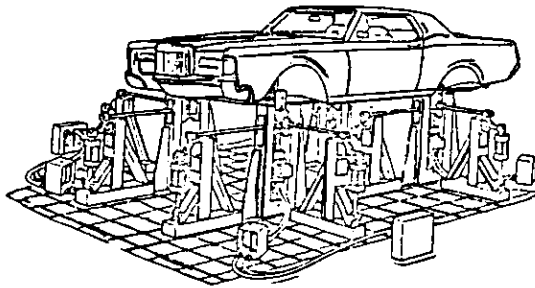


Fig. 5.12. simuladores de resistencia de vehículo completo.

El desplazador vertical del porta-nave en este y en los ensayos anteriores es accionado a partir de una señal de aceleración, en un ensayo, se pueden utilizar diferentes métodos de registro directo de desplazamientos o velocidades del vehículo; la aceleración se mide con la ayuda de un acelerómetro fijo directamente sobre el chasis, actuando en un plano vertical.

Las características de las señales de los circuitos integradores pueden ser semejantes a las señales continuas y se podrán presentar a muy baja frecuencia; la razón es que una señal de aceleración a baja frecuencia, y de débil nivel, producirá dos señales de desplazamiento extremadamente largas, los factores de baja frecuencia son limitados a 1 Hz aproximadamente por una



aceleración. Las exigencias a la entrada vertical son de 5 m/s para la velocidad y de 28 g para la cresta de aceleración; estos valores máximos se presentan normalmente a la frecuencia correcta de la suspensión del vehículo que es del orden de 10 Hz, la banda de frecuencias de excitaciones verticales de ruta vehicular va de 1 a 50 Hz.

La señal lateral captada se sitúa en un punto de contacto o radio de circulación de los neumáticos del vehículo, esta entrada se interpretará como un momento de flexión del chasis y representa los esfuerzos laterales, esta variable no es totalmente confiable ya que es muy difícil separar una carga lateral de una entrada vertical o longitudinal.

Un método satisfactorio para el registro de datos sobre el eje transversal es el de la medición de la aceleración; para esto necesitamos colocar el acelerómetro en un plano transversal. Para el eje trasero, es posible medir las señales de esfuerzo a partir de galgas de deformación montados sobre la caja del diferencial; las galgas de deformación pegadas en los puntos de medición son utilizadas para tomar la señal de deformación del cuerpo en estudio.



Fig. 5.13. Vista aérea del eje trasero.

Una vez tomadas las señales de entrada de los tres ejes (vertical, lateral y longitudinal) se registran directamente sobre una banda magnética y las relaciones de fase entre los parámetros son registrados correctamente para alimentar el programa del ensayo del vehículo.

Ahora, la selección de combinaciones de gatos hidráulicos y servovalvulas es importante en el sistema para tener la larga banda pasante necesaria para su funcionamiento, la relación entre entradas de fases verticales y horizontales son cuidadosamente mantenidos para respetar los esfuerzos horizontales que corresponden al desplazamiento vertical. Para reunir todas estas condiciones, se debe poner a punto las servovalvulas especiales de gran rapidez y los circuitos de compensación de interacción entre gatos hidráulicos verticales y horizontales.

Para lograr capacidades de caudales en los gatos hidráulicos de 800 litros/min a 10 Hz sobre la entrada vertical con una capacidad mínima de 80 litros/min a 30-40 Hz se utilizan las servovalvulas de alta conformación que pueden tener buena fidelidad a niveles de amplitud extremos y a gran velocidad. Existen también elementos adicionales como es el caso de los circuitos compensadores de interacción que son necesarios para corregir la geometría entre el vehículo y el montaje del ensayo, esta es particularmente importante cuando los gatos hidráulicos laterales funcionan en posición de mando; en la ausencia de compensación proporcionada por estos circuitos, las sobrecargas severas que son creadas en el elemento de ensayo no son más impactantes que la entrada de desplazamiento originadas por la descompensación, la selección de los parámetros de los rendimientos de las servo-valvulas y la compensación de la interacción son solo una parte de los numerosos puntos a abordar en la concepción de un sistema de ensayos de resistencia de un vehículo completo; analizar el vehículo al laboratorio para la simulación de resistencia aporta numerosas ventajas sobre los ensayos encaminados a la condición de que los controladores electrohidráulicos tienen estudios exactos para la meta propuesta:

- 1) Evaluación y registro de vehículos y prototipos de elementos de vehículos.

2) Reproducción exacta de condiciones para comparaciones y evaluación de nuevos diseños o de modificaciones.

3) Independencia de los resultados de ensayos por reporte de factores humanos: conductor.

4) Liberación de las condiciones climáticas.

### 5.2.1 Sistemas de ensayos controlados por computadora

Para los ensayos de materiales o los ensayos de estructuras, los sistemas de ensayos que se manejan por computadora constituyen un útil complemento para acrecentar las capacidades y la utilidad de los sistemas electrohidráulicos, los progresos recientes en el dominio de pequeños calculos numericos y en las tecnicas de programación hace del computador un compuesto extremadamente útil y rentable de un sistema de ensayos.



Fig. 5.14: Sistema de ensayos controlados por computadora.

En efecto para el manejo de sistemas electrohidráulicos, la computadora se utiliza en los últimos tiempos, los acontecimientos cambian continuamente y la computadora puede ser utilizada totalmente en el sistema de ensayos (o varios) para asumir las tareas de decisión en tiempos reales. Durante las primeras aplicaciones, las computadoras no servían más que para la función elemental de adquisición de datos y conformándose con solo hacer trabajar la computadora para las funciones siguientes:

1. Generación de señales y de funciones
2. Adquisición de datos
3. Tratamiento de datos
4. Conducción en tiempos reales (decisiones)

La computadora es capaz de generar numerosas formas de tensiones: Curvas arbitrarias, tensiones aleatorias, funciones periódicas. Como generador de tensiones, la computadora puede reemplazar varios generadores de funciones especializadas; el cambio de programa es efectuado aisladamente por modificación del software en lugar de una modificación costosa de circuitos eléctricos, la computadora es entonces un generador universal de tensiones.

La computadora realiza así la adquisición de datos y la adquisición de datos se realiza normalmente con la ayuda de varios aparatos de medición o de registro: voltímetros, tablas xy, voltímetros numéricos, voltímetros o computadores de crestas, la computadora puede hacer más que captar los datos: puede mostrar una base predeterminada, en función del tiempo, es decir, en función de la amplitud; este método de muestreo reduce considerablemente los tiempos y la cantidad de base de registro.

Después de obtener los datos, la computadora puede realizar las conversiones necesarias, generalmente hay un modo para convertir los datos en unidades de cálculo y de efectuar los cálculos como los de la contracción verdadera o el coeficiente  $K_{1C}$  en el caso de la mecánica de la ruptura.

Una de las mayores ventajas del ensayo a conducción automática es que la computadora puede tomar las decisiones en tiempo real, esto significa que la

computadora puede generar o modificar un orden pendiente cuando un acontecimiento está todavía presente; de un sistema clásico, en el paso de comunicación entre la variable de mando y el generador del programa. El regulador de control no puede aceptar la señal del programa y tener que seguir esta entrada; dentro de numerosos casos, la probeta rige sobre las características que la banda controla impidiendo al sistema seguir exactamente el programa.

Dos de las funciones de la computadora son: generación de tensiones y adquisición de datos, que le permiten "formar la curva" sobre la entrada del programa, esta característica destinada a la computadora lo faculta para decidir y modificar el desarrollo del ensayo en función de los resultados.

Entre las tareas encomendadas a la computadora encontramos:

1) Pausa de cero: la señal de mando es mantenida en el nivel de cresta en un ciclo determinado para permitir a tiempo igualar el orden de la señal de retorno;

2) Comando en parámetro indirecto: este sistema es utilizado para controlar la deformación verdadera o la deformación plástica en lugar de la deformación normal.

3) Comando en parámetro complejo: manejo de un ensayo donde la variable es el producto de la fuerza y la deformación.

4) Ensayo multiforme sobre la misma probeta: preciclaje y ensayo de tracción como de los ensayos mecánicos de ruptura.

5) Determinación de los puntos críticos de un ensayo: por ejemplo la vigilancia de desplazamiento de un ensayo con carga controlada; si el desplazamiento supera un valor predeterminado, la computadora puede manejar un sistema de una a otra función y funcionar a amplitud de carga mayor basada en detener el ensayo.

El calculador numérico es la parte central de la sección del computador de un sistema, los circuitos complementarios son necesarios para realizar el cálculo del sistema (interfaces) y para permitir la programación.

Estos circuitos complementarios a la computadora son los siguientes:

1) Convertidor analógico y multiplicador; la salida de este aparato es una señal analógica proporcional al parámetro de comando, esta señal será para programar el sistema.

2) Convertidor analógico-numérico y multiplexor; esta unidad convierte la señal de salida de captadores en números binarios;

3) El reloj programable es la base de los tiempos de la computadora y se determinarán las cadencias de comando y las de adquisición de datos.

4) El selector del control es utilizado por la computadora para seleccionar o cambiar el captador de retorno de control, en vía de ensayo, esta particularidad es más útil si las condiciones de trabajo cambian a cada ensayo y que el material de otro ensayo en parte en comando de desplazamiento y en parte de manejo de fuerza.

5) Los registros de estas sirven para la seguridad y para la comunicación lógica entre la computadora y el sistema.

6) La teleimpresión es el primer medio de comunicación entre el sistema y el operador, este último puede programar los parámetros de entrada e indicar las informaciones y la necesidad del desarrollo del ensayo.

La sección "computadora" de un sistema de ensayos se compone de dos partes principales: Hardware y software; la conducta para calcular en tiempos reales exige una entrada de programa de diferente tipo de esos dos programas de gestión o de cálculo científico.

*Los programas de ensayos físicos se comportan de la siguiente manera:*

1) Los compiladores sirven de auxiliares de una serie de desarrollos del programa, estos sirven para dos ordenes de lenguaje simple en lenguaje complejo de cálculo.

2) Los sistemas funcionales que son de rutinas comunes a cada programa, serán utilizados con una configuración particular de Hardware, esta comprende los cálculos de fuerza y de desplazamiento, la reserva y la recarga de datos.

3) Los programas de mantenimiento sirven para verificar las funciones de Hardware.

4) Los programas de aplicación que contienen una secuencia de etapas necesarias para realizar un ensayo determinado; el lenguaje debe ser particularmente independiente de la computadora y también del operador. Por ejemplo el operador puede intentar "medir la fuerza", el programa de aplicación se asegura que la señal de fuerza es bien leída y que la información es determinada al regreso.

*Así, las aplicaciones de computadores citadas:*

1) generación de señales aleatorias. La computadora genera dos tensiones según una elección de una distribución de probabilidad.

2) Programación por blocks. Este tipo de programas puede servir para simular un perfil de vuelo.

3) Comando de varias estaciones: Una sola computadora puede hacer cada una de sus cuatro funciones sobre dos o varios actuadores en el mismo tiempo.

El número máximo de actuadores pueden estar manejados por una sola computadora dependen de las exigencias de tiempo real de cada actuador.

Una solución suplementaria consiste en proveer una computadora central controlando otras computadoras responsables cada una de la conducción de uno solo o varios actuadores.

En la mayoría de las aplicaciones citadas, el sistema que se conduce por computadora ofrece a los laboratorios de ensayos varios servicios indirectos:

- 1) Facilidad de cambio de programa por simple cambio de "Software"
- 2) Rapidez de ejecución de ensayos incrementando la tasa de utilización de las maquinas.
- 3) Mayores precisión y fidelidad, gracias a la posibilidad de verificar el programa sobre su ejecución, además los programas pueden servir indefinidamente; una vez que el ensayo es comenzado, la computadora pretende utilizarse hasta el final.

La utilización de la computadora aumenta las posibilidades de aplicación de los sistemas de ensayos electrohidráulicos, numerosos ensayos complejos, difíciles o imposibles de ejecutar con las máquinas mecánicas, pueden ser realizados con un sistema conducido por computadora.



## CAPITULO 6. PRUEBAS DE SIMULACION DINAMICA

## 6.1 RECOMENDACIONES GENERALES PARA HACER PRUEBAS DE DINAMICA VEHICULAR Y DURABILIDAD

## 1. Establecer los objetivos de la prueba

La importancia de poner en claro los objetivos de la prueba es en términos de los resultados esperados de las prueba de durabilidad; el proceso para elaborar una prueba de durabilidad se enfoca principalmente en las partes críticas de una estructura para condiciones de fatiga real, el grado en el que el medio ambiente tiene influencia sobre el nivel de resultados que se obtienen en la prueba. Esto se ilustra en la fig. 6.1.

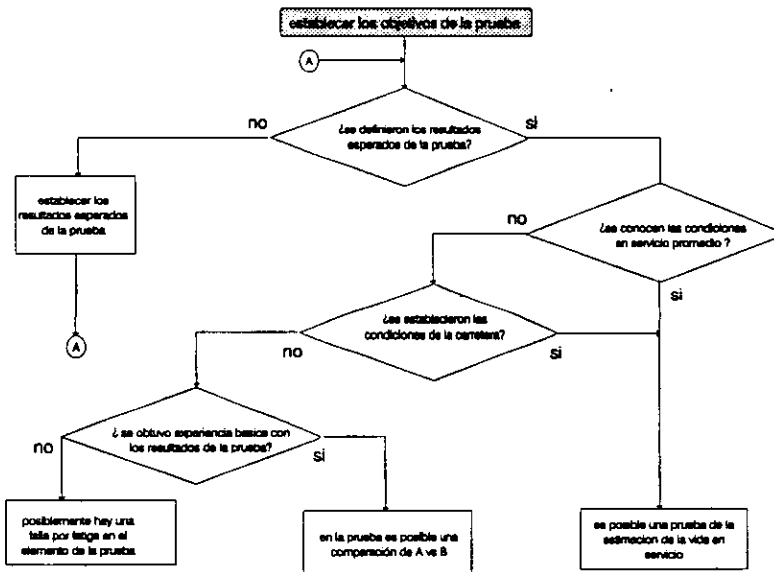


Figura 6.1 diagrama de flujo para establecer los objetivos de las pruebas de simulación.

Si el resultado de la prueba esperado es una estimación de qué partes fallarán mas probablemente, entonces se necesita poca información de las condiciones de fatiga real, el resultado mas completo de la prueba incluye una medición cuantitativa de la vida en servicio, es un requerimiento demasiado riguroso en el que es necesaria una descripción del avance total esperado de las condiciones en servicio, el parámetro de servicio real probablemente será un proceso con un rango alto, normalmente se aplica a este problema el esfuerzo significativo

Una solución práctica a este problema en el campo de la industria de vehiculos se encuentra estableciendo algunas pruebas estandar de carretera; la determinación de la vida en servicio aceptable se puede determinar en muchos casos a través de considerable experiencia; a menudo las pruebas del prototipo se establecen primero en carreteras públicas, y después se reproducen en los laboratorios de pruebas.

En el caso en que se establecen las pruebas estandar con el propósito de la evaluación de la duración en campo, se determinan en esta prueba las condiciones de fatiga para la evaluación de la durabilidad en el laboratorio, el análisis en el laboratorio de pruebas tendrá entonces la misma validéz para la vida en servicio como la prueba de campo correspondiente.

Cuando se tiene una experiencia considerable en los resultados de pruebas de durabilidad se debe hacer una prueba comparativa entre dos eventos "A" y "B"; existen parámetros cualitativos que emergerán en el objeto en sevicio sometido a prueba.

## **2. Definir el ejemplar de prueba**

El primer bloque de decisiones de la figura 6.2 es acerca del problema de si se conoce de antemano cuales son las partes estructurales críticas, si se conocen las partes críticas, estas se pueden probar individualmente en pruebas de un solo componente.

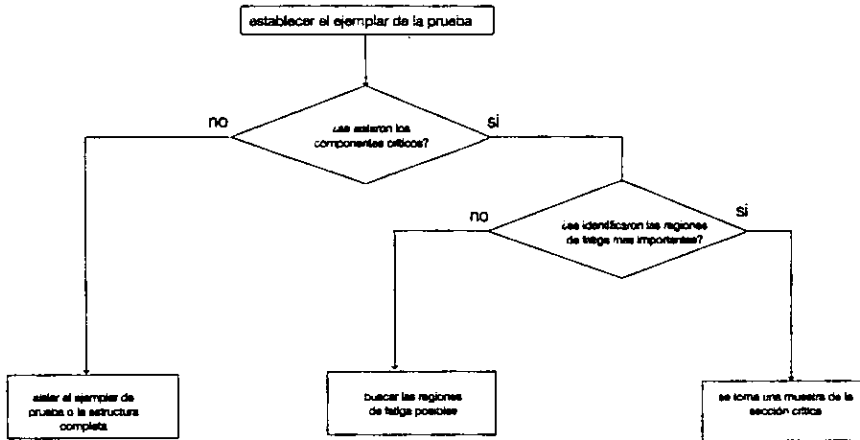


Figura 6.2. Diagrama de flujo para establecer el ejemplar de prueba

Si se puede estimar la vida útil y se determina también la parte crítica, entonces un elemento con estas características será propuesto como un ejemplar para prueba, este será el caso cuando la avería por fatiga se localiza en la parte crítica y de esta manera, una serie de ejemplos de pruebas de trabajo real satisfará los objetivos de la prueba en curso. Si no conociéramos las partes críticas, se someterán a una prueba estructural "completa" a la mayoría de las partes como sea posible; un ejemplo es un sistema para evaluar la durabilidad de la estructura de un vehículo que se sujetará a pruebas con datos similares como se muestra en la figura 6.1.

Si es dudosa la validez de las condiciones reales de fatiga para cualquier elemento, se debe instrumentar y monitorear el elemento en estudio durante la prueba, también se debe hacer una prueba más para cualquier parte aunque no se sujete a las condiciones de fatiga reales.

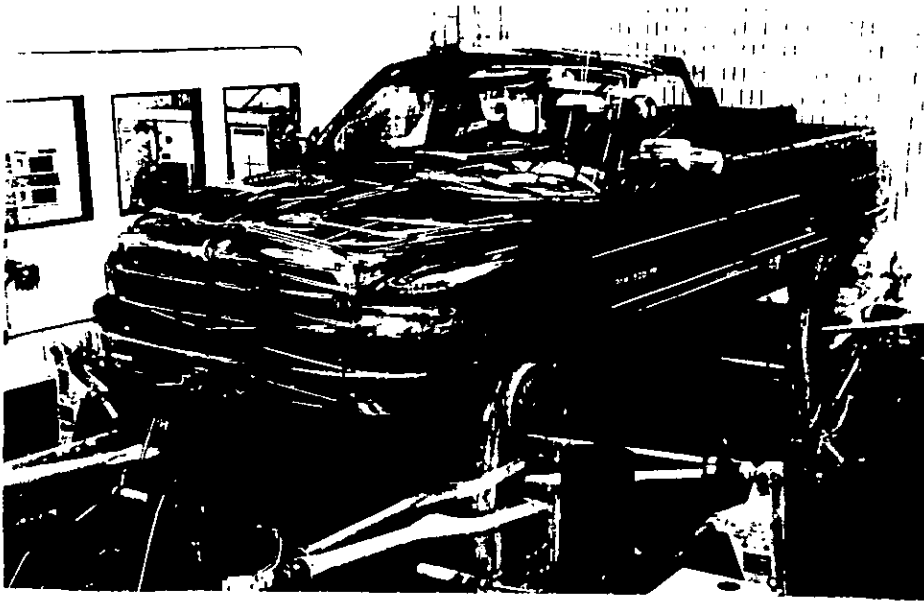


Figura 6.3. Simulación de un vehículo en servicio para pruebas de dinámica vehicular

### **3. Definir la entrada de los excitadores de las condiciones reales**

Una vez que se aísla el elemento en estudio, el siguiente paso es definir los puntos de excitación de las condiciones reales pero si el elemento de prueba es una subestructura, algunas de las entradas se consideran como fuerzas externas con respecto a la estructura completa, este es un parámetro donde es posible equipar el elemento de prueba con excitadores de forma que se encuentren lo más cerca posible a la carga que recibe en condiciones normales de trabajo, las consideraciones de restricción del ejemplar de prueba se asemejan mucho a las definiciones de las entradas del excitador, en esas mismas restricciones se aplican cargas al ejemplar de prueba tanto como sea posible.

Si se sabe que el vehículo no recibe cargas significativas a través de la suspensión en la dirección lateral relativa a la dirección vertical, entonces las partes de la suspensión también se verán en una situación de fatiga creada por las condiciones de trabajo real, esta situación puede tender a

generalizarse para autos largos donde no se aplican aceleraciones laterales especialmente cuando se cargan completamente; esta situación no se puede aplicar a autos pequeños que desarrollen alta aceleración en caminos empedrados.

En el caso de los autos, las condiciones horizontales se incluyen cuando se hacen las pruebas de fatiga para la suspensión, esto conduce a un cambio en las restricciones, en estas restricciones se reducirá la validez de la prueba en la carrocería.

Una posible alternativa será representar una prueba adicional para cada condición restringida, con la carrocería restringida, la parte siguiente del accesorio a probar es la suspensión y sus puntos de desgaste, en este caso, se pueden instalar en la suspensión la frecuencia muy baja o las cargas medias durante el punto crítico simultáneamente con cargas de alta frecuencia, el elemento se puede probar usando la suspensión como parte de los accesorios. Puesto que la fatiga del cuerpo es ocasionada principalmente por curvas y baches en el camino, las cargas medias son ampliamente insensitivas para frecuencias laterales bajas, esto se realiza generalmente cuando aumenta el número de partes críticas incluidas en una prueba, también aumenta la dificultad para llevar a cabo la simulación del ambiente real de fatiga en algunas partes.

Para el control de los excitadores se elegirá uno que sea consistente con las características del ejemplar de prueba y el sistema controlado, el sistema servo-control puede mantener las condiciones de fatiga durante la prueba con sensibilidad mínima para ciertas condiciones como la calibración, dirección o elemento deteriorado, las cargas internas se pueden controlar con control de cargas o esfuerzos y los movimiento del elemento de prueba se controlarán con el control de avance.

#### **4. Grabación de los datos de las pruebas de carretera**

Una vez que se determinan los puntos de registro para las condiciones de fatiga reales se hace una serie de cambios en cuanto a la grabación de los datos (incluyendo los transductores montados), grabando el sistema de prueba y el control del sistema de prueba, los datos grabados contendrán información suficiente para definir las entradas de la prueba para simular las condiciones reales de fatiga en todas las partes críticas incluidas en la prueba.

Los datos pueden hacer que los resultados se obtengan de diferentes maneras

1. Conocer de las condiciones de servicio.
2. Lecturas directas de las señales requeridas mientras que el elemento de prueba es sujeto a condiciones de servicio reales.
3. Mediciones de las respuestas del espécimen de prueba mientras el elemento de prueba se sujeta a condiciones ambientales reales.

El primer caso es el más deseable donde el dato es un ejemplo independiente, este método es frecuentemente muy difícil o impráctico. Por ejemplo, no se realizará para entradas con el vehículo en una posición muy horizontal del conocimiento de los ejecutores. El tercer caso es la facilidad de grabar los datos desde un punto de inspección, pero es necesario tener capacidad para controlar la prueba. Para el segundo caso será suficiente un servocontrol análogo.

Se debe recordar que estas son las entradas del elemento que se deben tomar en cuenta para la simulación, no basta con reproducir las señales de respuesta grabadas para asegurar una buena prueba, las respuestas obtenidas definen implícitamente los datos requeridos de una manera exacta, esto puede evaluarse calificando la señal de la sensibilidad de respuesta para las perturbaciones en la señal del excitador, se puede obtener resultados erróneos si la señal de la respuesta grabada tiene contenido significativo ocasionado por la vibración inducida a la máquina, además los excitadores del

eje generarán datos que reproducirán esta información en la señal resultante en cargas en el eje incorrectas.

Es claro que las lecturas de la respuesta serán sensitivas solo para las señales simuladas, el error puede evitarse si no se intenta simular eventos que no fueron generados en condiciones normales de servicio, por ejemplo, evitar la máxima aceleración lateral y la máxima aceleración frontal (frenado y tracción), eventos se pueden ejecutar en un simulador vertical acoplado.

### **5. Técnicas de recolección de datos**

Una pregunta típica respecto a la recolección de datos es ¿como y de qué manera se pueden resumir los datos?. Es deseable especialmente resumir la grabación de los datos por una puesta en servicio de un dispositivo grabado, técnicas establecidas normalmente involucran algunas consideraciones de distribuciones de amplitud o reduciendo los datos a una caracterización de la densidad del espectro.

Grabar solo los resultados de las distribuciones de amplitud repercute en una baja en los datos de frecuencia contenidas en la información general, esto es inaceptable si el elemento exhibe algunos efectos dinámicos tal como el amortiguamiento significativo o una frecuencia resonante en el rango de frecuencia de la operación de servicio; cuando se presentan efectos dinámicos en el elemento de prueba, las amplitudes de deformación cambiarán ocasionadas por un cambio incremental de la velocidad hasta que el programa se emplea en el sistema de prueba entonces la información se puede mantener tan rápido como se emplea el programa, esto conlleva a que si no se conocen los ejemplares de prueba dinámicos se puede acelerar la prueba de laboratorio.

Casi siempre se conoce la distribución de la amplitud en un trabajo de fatiga, puesto que afecta directamente al daño por fatiga; los datos se pueden caracterizar con densidades espectrales solo para propósitos del control de las pruebas cuando se sabe que la distribución de amplitud será Gaussiana de

los datos del elemento en estudio. Este no será el caso para movimientos de giro en un camino empedrado.

Otro requerimiento para la caracterización de la densidad espectral es el evento grabado que se puede obtener de un proceso fortuito estacionario. Tal simulación ocurre cuando se maneja a velocidad constante en un camino mixto, un cambio en la velocidad del vehículo o un cambio en las características del camino necesitará una nueva descripción de la densidad espectral, se pueden crear las distintas descripciones para caminos diferentes a distintas velocidades.

Todos los eventos que no satisfacen los requerimientos se guardarán como datos adicionales. Todos los eventos transitorios tales como cruces de ferrocarriles, baches, y eventos esporádicos se guardarán también como datos de servicio.

Es posible caracterizar el ambiente real de distribuciones de amplitud para un sistema de un solo canal cuando no se presentan efectos dinámicos en el elemento de prueba; si es necesario mantener una interrelación entre canales en un sistema múltiple de canales, se podrá hacer una grabación de datos de servicio completa.

## **6. Programación y control del sistema de pruebas**

El sistema de pruebas se programará con los datos de servicio, de este modo, alguna técnica usada para resumir los datos y para caracterizar los datos guardados para propósitos de controles de pruebas pueden servir también para la reconstrucción de los datos de servicio; se establecerá por un largo período de tiempo la reconstrucción de los datos de servicio de densidades espectrales con una distribución de amplitud Gaussiana.

Se desea que la técnica de reconstrucción se pueda implementar en una manera lineal durante la prueba de durabilidad, esto elimina la necesidad de programar repetitivamente un dato del servicio almacenado.



Acerca de la toma de decisiones para establecer la programación y métodos de control de las pruebas de simulación la primer pregunta es si el elemento de prueba exhibe variaciones dinámicas significativas, si no, la prueba puede continuar en un tiempo estimado. Si los datos del excitador se establecen de las señales de la respuesta grabadas que son remotas de las entradas, entonces se requiere la compensación en el control de la prueba además de que los datos implican impedancia mecánica lineal o no lineal o sobreacoplamiento; estas condiciones hacen un servo-control directo de respuestas de difícil medición, esta es una situación común cuando probamos un elemento complejo tal como un vehículo.

Se pueden controlar directamente algunos de los datos de servicio o representaciones de densidad espectral de las respuestas, se presenta dificultad en el caso de las respuestas medidas en términos de distribución de densidad.

Si se graban los datos de las entradas del elemento de prueba, entonces son posibles las reproducciones directas si el sistema de excitación dinámica es insignificante. De otro modo, se implementa la compensación para los excitadores dinámicos.

## **7. Realización de la prueba de monitoreo de durabilidad y análisis**

Análisis y monitoreo enlazan directamente los resultados deseados de la prueba; el monitoreo implica una observación en línea de la respuesta en el elemento de prueba para las condiciones generales de la prueba, puede ser tan simple como mantener el paso de tiempo o el número de acontecimientos en una secuencia, si el objetivo es someter algunas piezas a un ambiente de fatiga, entonces se puede realizar por monitoreo, como se mencionó anteriormente, esto es especialmente cierto si esta cuestión involucra a una parte crítica en particular y se monitorearán en adelante las distribuciones de amplitud, secciones de datos de servicio de eventos trascendentes y significantes y las densidades espectrales, es conveniente comparar los datos obtenidos durante la prueba en la primer o primeras respuestas como una medición con variación del tiempo de las condiciones de la prueba.

Si se graban las distribuciones de amplitud se deben analizar para saber si contienen estimaciones del coeficiente de fatiga del daño en el elemento de prueba, la correlación de las fallas por una fatiga en línea usualmente serán iguales. Si el monitoreo indica una desviación significativa de las condiciones originales de prueba se puede determinar si se necesitan los datos de entrada en la prueba, o si los cambios consisten en un envejecimiento del elemento de prueba, esto es un área compleja que se destina para otros estudios de laboratorio.

Un análisis final de los resultados puede ser simplemente una prueba fallida, una lista de partes fallantes con una descripción de los tipos de falla o una estimación de las fatigas comunes de la vida en servicio en horas o millas.

## 6.2 PRUEBAS APLICADAS DE SIMULACION DINAMICA

### **Equipo de simulación dinámica**

El equipo de simulación dinámica se utiliza para reproducir las condiciones reales de operación de un vehículo sin que este se encuentre en movimiento, con la finalidad de estudiar el comportamiento real de los elementos que lo constituyen; suspensión, carrocería, etc. El funcionamiento de este equipo requiere que una de las computadoras que se utilizarán se alimente con las señales que reproducirán mecánicamente los actuadores, esto será equivalente a una condición en servicio de un vehículo; las condiciones en servicio que se presentaron en las pruebas de pista de carretera son las siguientes: torsión, dirección, empedrado y ondulado agudo, mismas que se determinaron en base a las características propias de la pista de prueba. Esta señal se obtuvo inicialmente por medio de acelerómetros instalados en los puntos de interés de un vehículo y operando en una pista o carretera dependiendo de la prueba efectuada. Se instala otra computadora para controlar y monitorear la señal real que se genera en el vehículo bajo prueba por medio de los acelerómetros instalados en este, la computadora de

entrada compara la señal alimentada a esta con la generada por el computador de salida y corrige al sistema para igualar las dos señales. Los actuadores responden a los estímulos eléctricos aplicados a ellos por la computadora de entrada.

Los equipos de simulación dinámica constan fundamentalmente de las siguientes partes:

- ocho actuadores servohidraulicos (4 marca MTS y 4 marca Gardner)
- dos computadoras para el control del sistema
- dos bombas de poder con una torre de enfriamiento.

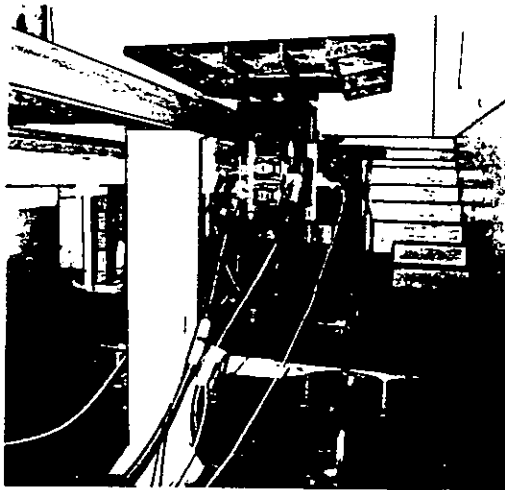


Figura 6.4: Actuador hidraulico.

## 6.2.1 REALIZACION DE PRUEBAS DE SIMULACION DINAMICA, PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Para realizar el estudio se piden ciertos datos de los vehículos a analizar y la empresa solicitante puede especificar las zonas de mayor interés o también se procederá de acuerdo a criterios de laboratorio aplicando las mediciones a algunas zonas como son: tubos, flechas, chasis, bastidor, ejes y en general a cualquier elemento que forme parte del vehículo; también es importante que se indique según sea el caso si la falla está asociada a los elementos de unión. Se especificará también las condiciones de trabajo normal, estas pueden variar de acuerdo a la característica de uso de cada vehículo; como ejemplo podemos mencionar algunas de estas condiciones de servicio:

- condiciones de carga
- condiciones de trabajo
- velocidad promedio
- lugares de operación (terracería, empedrado, etc.)

Además, el solicitante de la prueba, dentro de lo posible debe proporcionar información de las características físicas de los materiales empleados en la construcción del vehículo; esto se hace con el fin de optimizar tiempos y en caso que sea solicitado, proponer mejoras estructurales a elementos y componentes.

El estudio de laboratorio se realiza con un vehículo seleccionado aleatoriamente exceptuando el caso de un prototipo de prueba; el solicitante especifica las zonas donde el automóvil está fallando con el objetivo de que se efectúen las mediciones necesarias en estas zonas.

Una vez que se cuenta con la información general del vehículo se procede a hacer la programación de la prueba donde se estiman los tiempos para cada etapa de trabajo en los que se divide la prueba y el costo del proceso desde el inicio hasta el término donde se arrojan los resultados finales de cada prueba.

Durante la programación se divide el estudio en varias etapas que van desde la instrumentación hasta la emisión de un informe final, y de acuerdo al contrato establecido se proponen las soluciones necesarias.

A continuación se proporciona un seguimiento condensado por etapas para la ejecución de estas pruebas.

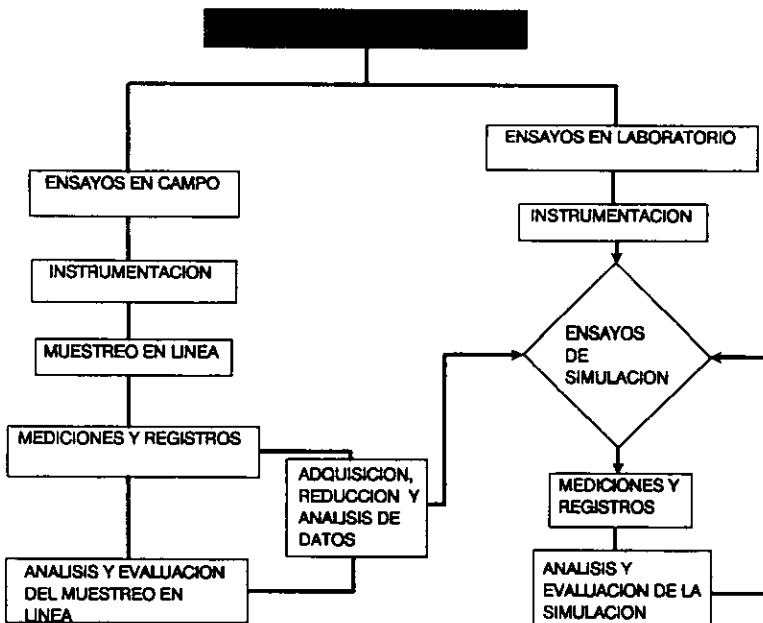


Figura 6.5. Seguimiento para la ejecución de ensayos de dinámica vehicular

### 6.2.1. Desarrollo de la prueba

#### **TRACTO CAMION**

Una empresa automotriz encontró que estaban teniendo reclamos por parte de los clientes en uno de sus modelos; el problema era que la vida en servicio de la cabina dormitorio de un tractocamion era relativamente corta en relación al tiempo de servicio estimado, para solucionar este problema solicitó al laboratorio de dinámica vehicular la obtención de las microdeformaciones en algunas zonas o puntos de dicha cabina dormitorio. Para que se realicen las pruebas necesarias, la empresa automovilística proporciona un vehículo con las características necesarias y también proporciona los datos referentes al vehículo (velocidad promedio, tonelaje, composición estructural, etc.). El estudio de fallas se hizo de acuerdo a un programa de actividades que se elaboró desde un principio.

#### **Programa de actividades**

El estudio de laboratorio que se realiza para obtener los parámetros de las microdeformaciones en la cabina se divide en seis etapas que constituyen la parte medular de la prueba solicitada.

El programa de actividades es el siguiente

# TRACTO CAMION

## PROGRAMA DE ACTIVIDADES

ETAPA	TIEMPO PROGRAMADO
INSTRUMENTACION	10 DIAS
PRUEBAS EN PISTA DE CARRETERA	05 DIAS
ANALISIS DE SEÑALES	10 DIAS
ADAPTACION DE EQUIPO PARA PRUEBAS DE SIMULACION	08 DIAS
PRUEBAS DE SIMULACION	15 DIAS
ANALISIS DE RESULTADOS Y EMISION DE INFORME	15 DIAS
TOTAL	63 DIAS

Figura 6.6. Programa de actividades para pruebas de simulación dinámica en la cabina dormitorio de un tractocamión

### ***Etapa de instrumentación***

En la etapa de instrumentación se analiza el vehículo para determinar las zonas y cantidad de transductores que se instalan, también se definen los tipos de pruebas a que serán sometidos; en este caso, se propuso que la compañía Ford Motor Company cuenta con una pista de pruebas que tiene las condiciones que se pueden considerar en diversos tipos de caminos para el desarrollo del ensayo, debido a que se diseñó para condiciones extremas de funcionamiento.

Así mismo se colocan equipos electrónicos de registro que durante la prueba van grabando información especial de vibraciones mecánicas para las pruebas de simulación posteriores. Durante la etapa de instrumentación, el laboratorio de dinámica vehicular propone puntos estratégicos de señalización

que registran todos los movimientos generados por el tractocamion y en forma particular, en la cabina dormitorio.

En el esquema siguiente se muestran los puntos de ubicación de los transductores.

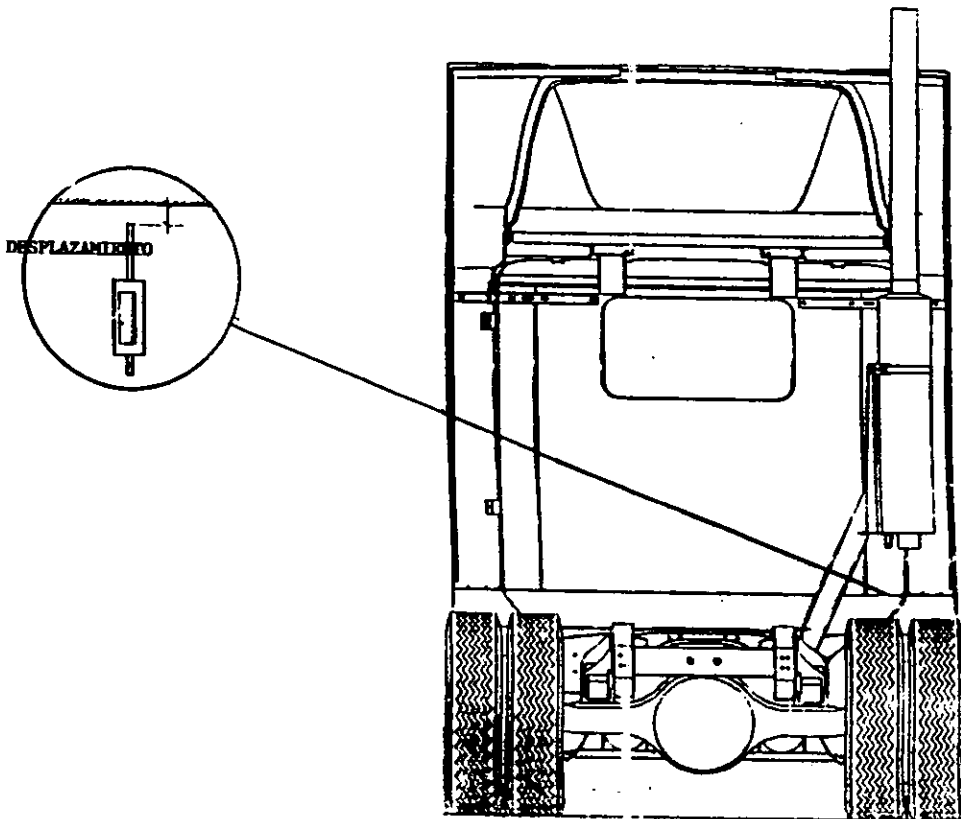


Figura 6.7. Ubicación de transductores de desplazamiento



### ***Etapa de pruebas en pista de carretera***

Para que existan señales confiables de las condiciones reales de trabajo, se denominó, como se señaló anteriormente que las pruebas en pista de carretera serán en la pista perteneciente a la empresa Ford Motor Company cuya ubicación está en la planta de Cuauhtitlán Izcalli y para complementar la prueba se seleccionaron las carreteras siguientes:

- autopista de cuota Tepexpan-Pirámides*
- autopista federal Lechería-Texcoco*

Ahora, la pista de pruebas Ford se divide en cuatro áreas que son las que representan las condiciones de servicio para el tracto-camion que son las siguientes:

1. TORSION EN CARROCERIA
2. PRUEBA DE DIRECCION
3. EMPEDRADO
4. ONDULADO AGUDO

Al realizar estas pruebas se registrarán las señales correspondientes de aceleración y desplazamiento para la simulación en el laboratorio, estas señales se monitorean en arreglos diferentes que permiten obtener un panorama general del comportamiento de la cabina en observación.

En la figura 6.8, se observa un esquema de la pista de pruebas perteneciente a la compañía Ford Motor Company y las cuatro áreas de prueba que representan el ensayo.

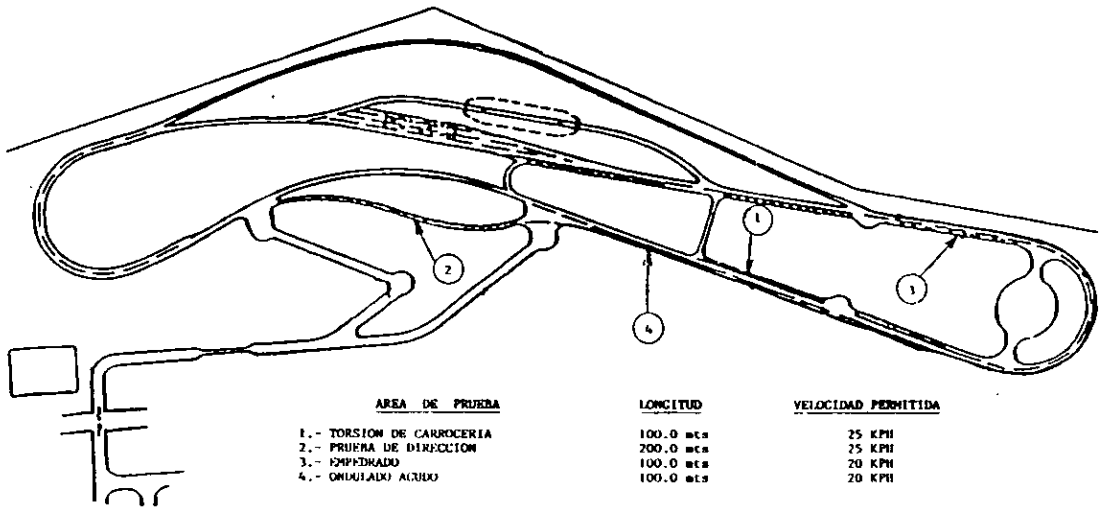


Fig 6.8. Pista de pruebas de la compañía automotriz Ford Motor Company

Se debe hacer incapié en que esta etapa de pruebas de pista se desarrolla en varias fases para poder ir afinando detalles que no se contemplan en la etapa de planeación; las fases son las siguientes:

a) Ensayo para ajuste y recalibración de las señales en las pistas de prueba; este ensayo se hace necesario ya que durante las pruebas de laboratorio se deben especificar las escalas requeridas de las lecturas a tomar y, por otra parte, el equipo debe mantenerse dentro de los límites de control.

b) Registro de las señales en la pista de pruebas que se requieren para la etapa de simulación. Con los instrumentos adecuadamente calibrados e instalados, se procede a llevar a cabo registrando en graficas todas las variaciones de movimiento, baches, curvas, pendientes, etc. durante el recorrido total.

c) Registro de las señales en carretera para conocer el comportamiento de la cabina dormitorio en condiciones de alta velocidad (superior a 50 km/h). Para complementar el ensayo, se somete el vehículo a velocidades mayores a las que se pueden alcanzar en la pista de pruebas Ford, teniendo como escenario pistas de carretera con carga vehicular normal. De la misma manera que en la pista de prueba, se toman los registros de vibración dinámica con los transductores instalados que constituyen los datos de entrada en la etapa de simulación.

### ***Etapa de análisis de señales***

La etapa de análisis de señales es una tarea difícil, puesto que contamos con una gran cantidad de datos que debemos seleccionar adecuadamente para elaborar un análisis de calidad.

Como se dijo anteriormente, se sometio al tractocamión a varias pruebas para el registro de señales, ahora, no todos estos registros van a ser simulados dentro del laboratorio de dinámica vehicular; se hace un análisis detallado del

material con que contamos, desechar el que no sea significativo y reorganizar las señales de los transductores que ocuparemos en la etapa de simulación.

### ***Etapa de acondicionamiento del equipo para las pruebas de simulación***

Durante las pruebas para el registro de señales surgen observaciones especiales que se deben considerar para instalar el equipo de simulación; puede haber ciertos esfuerzos en zonas que no se tienen consideradas para instalar las galgas extensométricas. Por tal motivo y siguiendo la secuencia del trabajo se procede a instalar el equipo de pruebas de simulación.

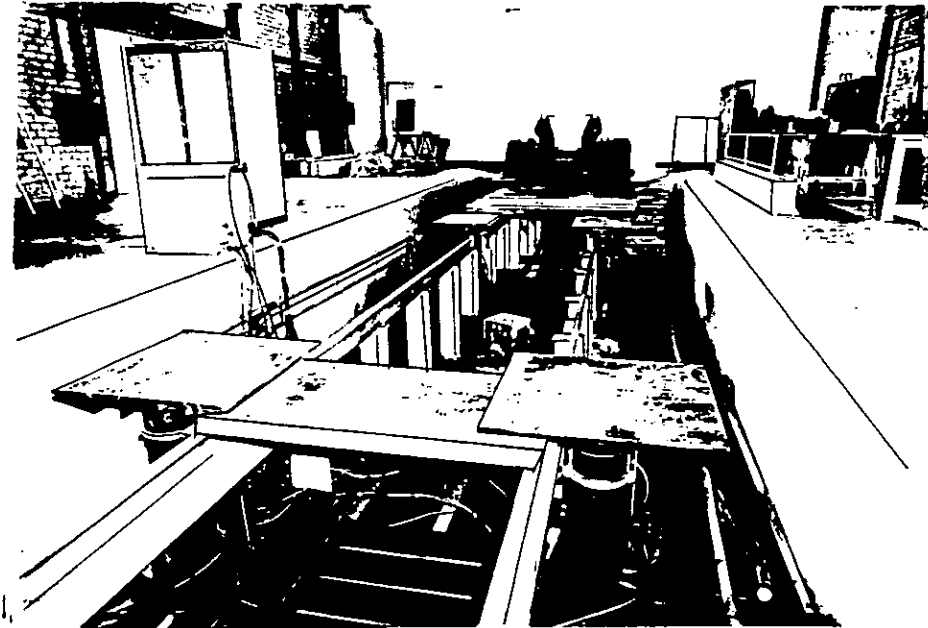


Figura 6.9. Vista panorámica del laboratorio de pruebas

En esta etapa se lleva el tractocamión al laboratorio de dinámica vehicular instalándolo sobre los actuadores hidráulicos, las llantas se fijaron firmemente

por medio de cadenas para evitar los desplazamientos laterales, también se colocan tirantes de inmovilización los cuales se enlistan a continuación:

- tirante de inmovilización lateral
- tirante de inmovilización frontal
- tirante de fijación posterior
- fijación de neumaticos delanteros
- fijación del doble eje trasero.

El detalle para la fijación se muestra en las figuras siguientes:

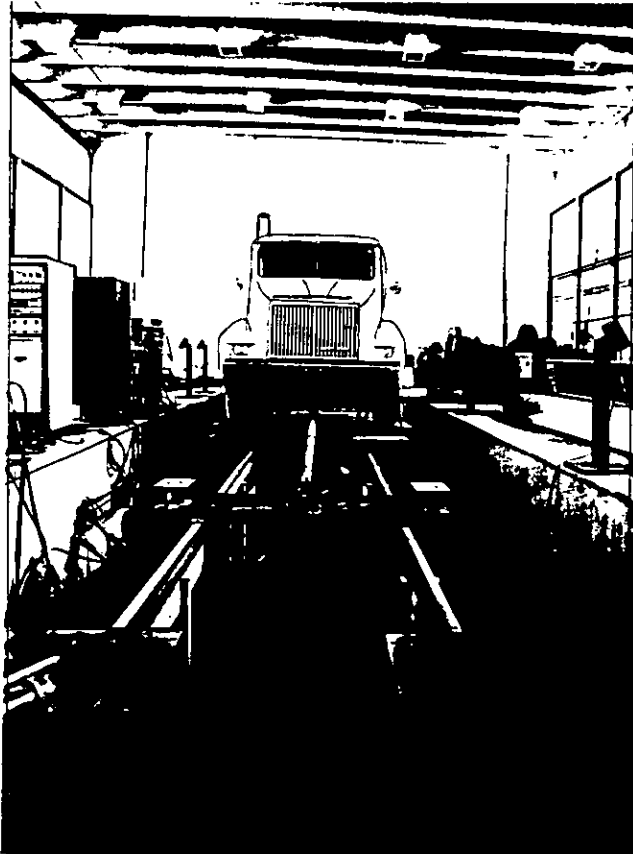


Figura 6.10. Vista general de la fijación frontal

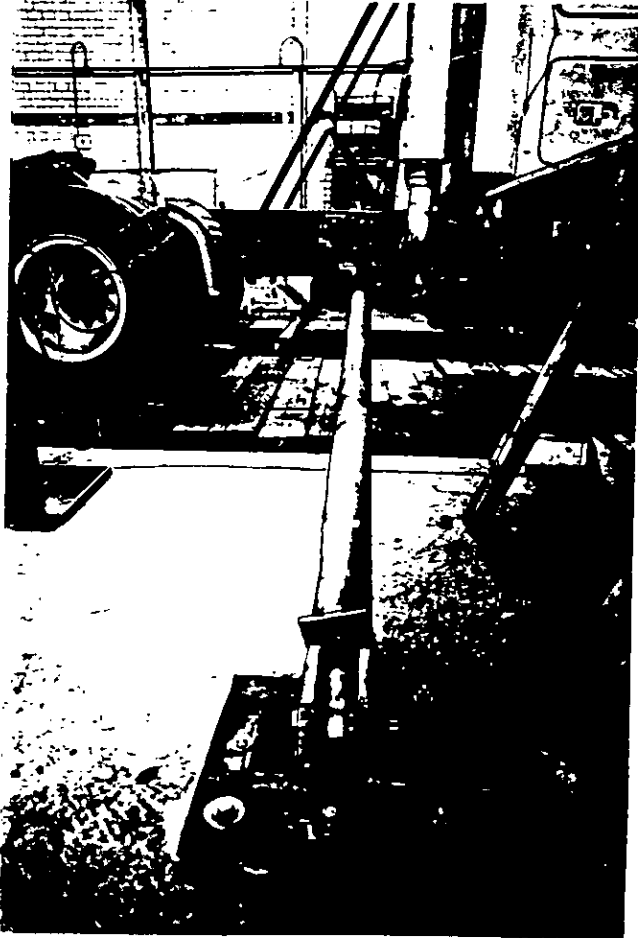


Figura 6.11. Tirante de inmovilización lateral

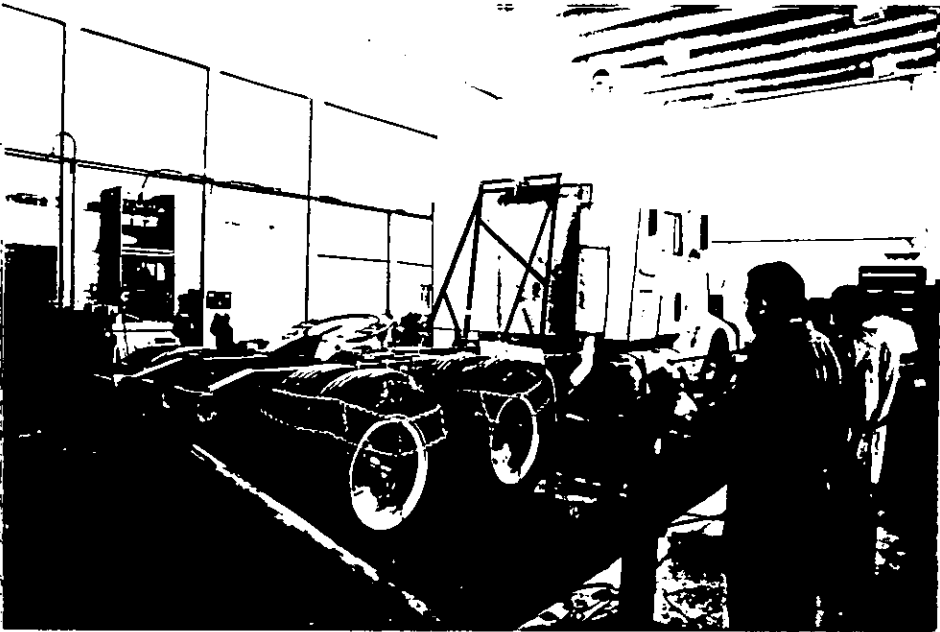


Figura 6.12. Vista de la fijación posterior para evitar el giro del chasis

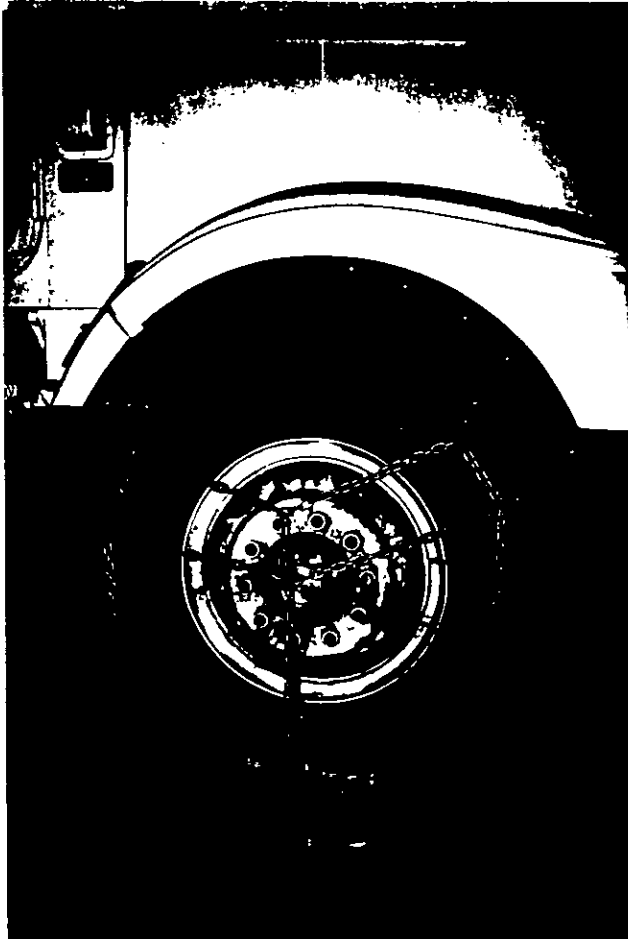


Figura 6.13. Fijación de los neumáticos delanteros



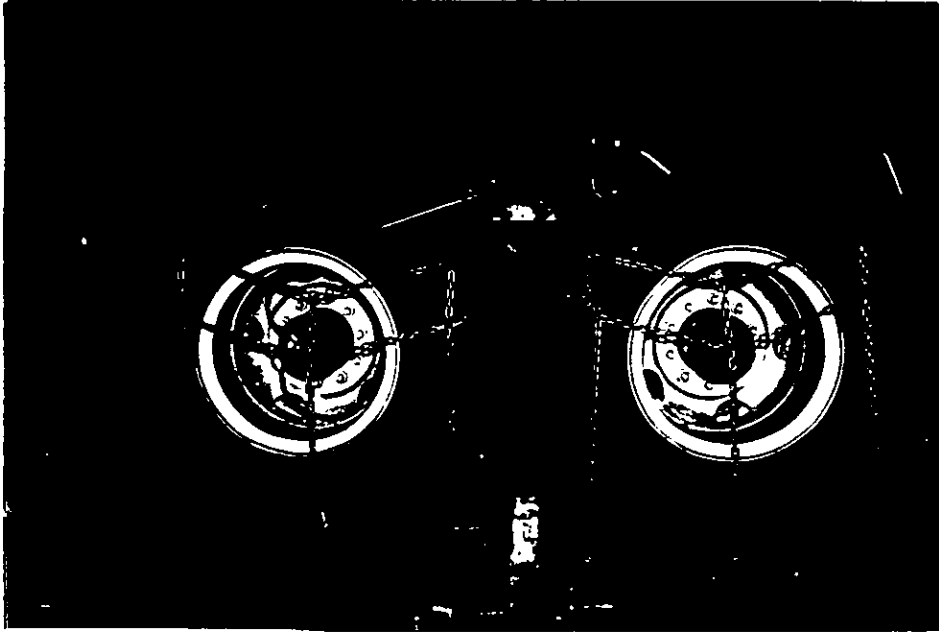


Figura 6.14. Vista lateral de la fijación del doble eje trasero

También se colocan galgas extensométricas que se instalan en los puntos de interés y en caso de ser especificado, en los puntos donde el fabricante indique falla.

El detalle para la colocación de las galgas se muestra en la figura 6.15.

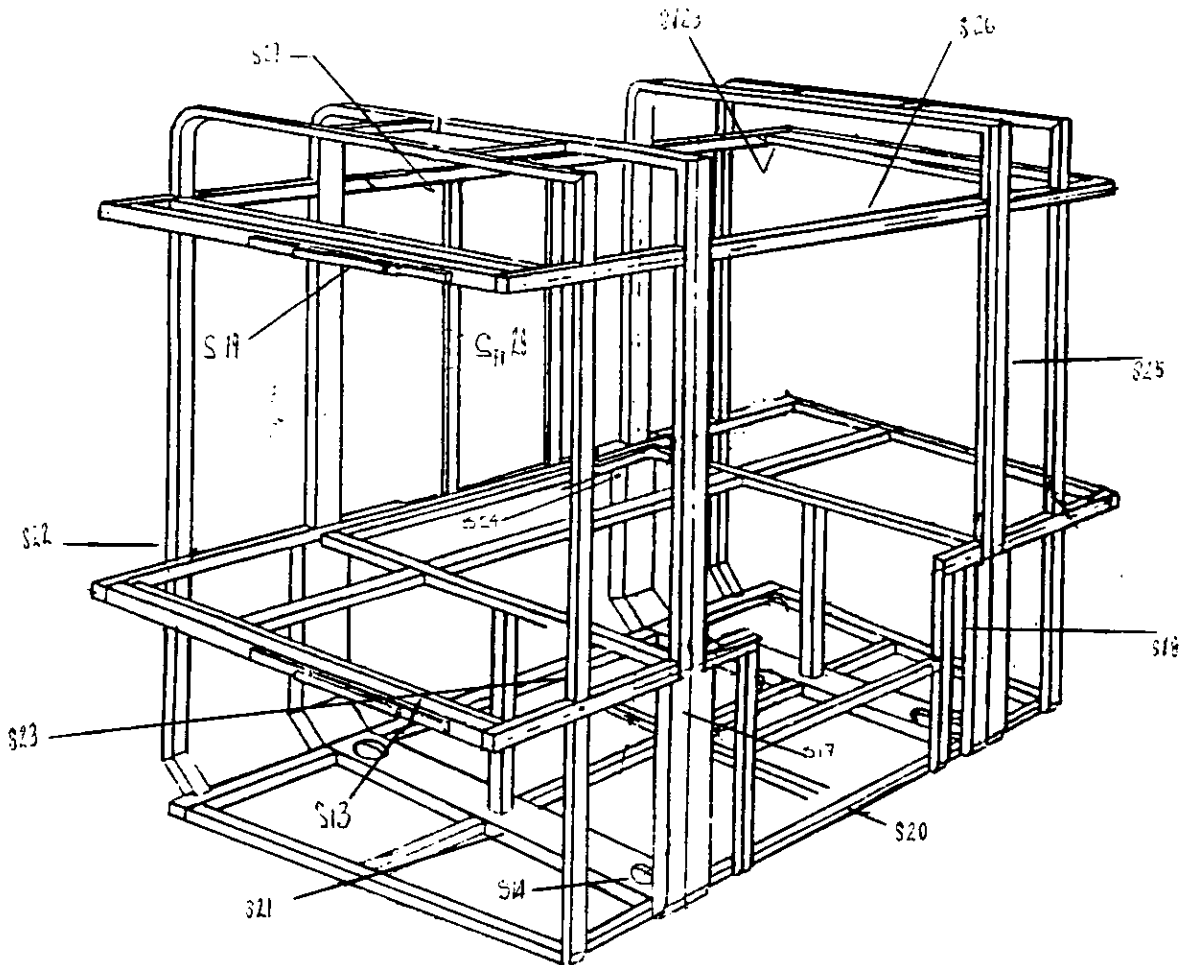


Figura 6.15. Puntos de colocación de las galgas extensométricas en la cabina dormitorio

A continuación enlistamos en una tabla los puntos que se propusieron para la instrumentación de la cabina dormitorio del tractocamión.

### PROPUESTA DE PUNTOS Y ZONAS A INSTRUMENTAR PARA LA MEDICION DE PARAMETROS.

#### ACELEROMETROS

A1, A2, A3, A4, A5, A6	Aceleración vertical en neumáticos
A 7	Aceleración triaxial en el piso de la cabina y al centro de la misma
A 8,A 9,A 10	Aceleración triaxial en la parte superior de la cabina
L-11	Desplazamiento longitudinal (cabeceo) de la cabina en la parte superior y al centro de la misma (longitudinal=sentido de avance).
L-9	Desplazamiento vertical de la cabina en una de las esquinas de la parte posterior

**ESTRUCTURA METALICA  
EXTENSOMETROS**

- S 13-16 Deformación adyacente en los cuatro soportes de fijación de la cabina, rosetas a 90°.
- S 17 Deformación en soporte vertical inferior, cara frontal del PTR, rosetas a 90°.
- S 18 Deformación en soporte vertical inferior, cara lateral del PTR, lineal.
- S 19 Deformación en elemento del anillo superior del costado derecho cara superior del PTR.
- S 20 Deformación en el centro del bastidor inferior, cara superior del PTR parte delantera de la cabina, roseta a 90°
- S 21 Deformación en el travesaño principal de la base lado derecho. roseta a 90°
- S 22 Deformación en soporte vertical de un costado cerca del bastidor-cama, cara frontal.
- S 23 Deformación en soporte vertical de un costado cerca del bastidor cama, cara lateral.
- S 24 Deformación en el soporte vertical principal parte superior cara lateral.
- S 25 Deformación en el soporte vertical principal parte superior cara frontal.

- |      |  |
|------|--|
| S 26 | Deformación en bastidor superior parte delantera de la cabina, cara inferior y al centro del elemento. |
| S 27 | Deformación en bastidor superior parte delantera de la cabina, cara frontal, elemento posterior.       |

**PANELES DE FIBRA DE VIDRIO  
EXTENSOMETROS F.V.**

- |        |  |
|--------|--|
| SFV 28 | Deformación en la fibra de vidrio del panel posterior zona central donde se carece de soporte estructural. |
| SFV 29 | Deformación en el deflector cercano a la placa frontal de compactación.                                    |
| V 32   | Medición de velocidad del tractocamiión.   |

Para mencionar el complemento de la instrumentación del equipo se conectan y calibran los aparatos para proceder a las pruebas de simulación; estos son:

- Equipo computacional
- Osciloscopios
- Fuente de energía
- Compresores
- Actuadores hidraulicos

***Etapa de pruebas de simulación***

La etapa de simulación es la más importante de este proceso de laboratorio, consiste en una primera fase donde se hace una prueba inicial haciendo que el tractocamiión actúe de acuerdo a los datos registrados dentro

de una computadora de referencia y registrándolos en otra computadora que compara las dos señales de desplazamiento y si existe alguna desviación del elemento actuador, corrige hasta desarrollar movimientos vibratorios correctos, esto se muestra en la figura 6.16.

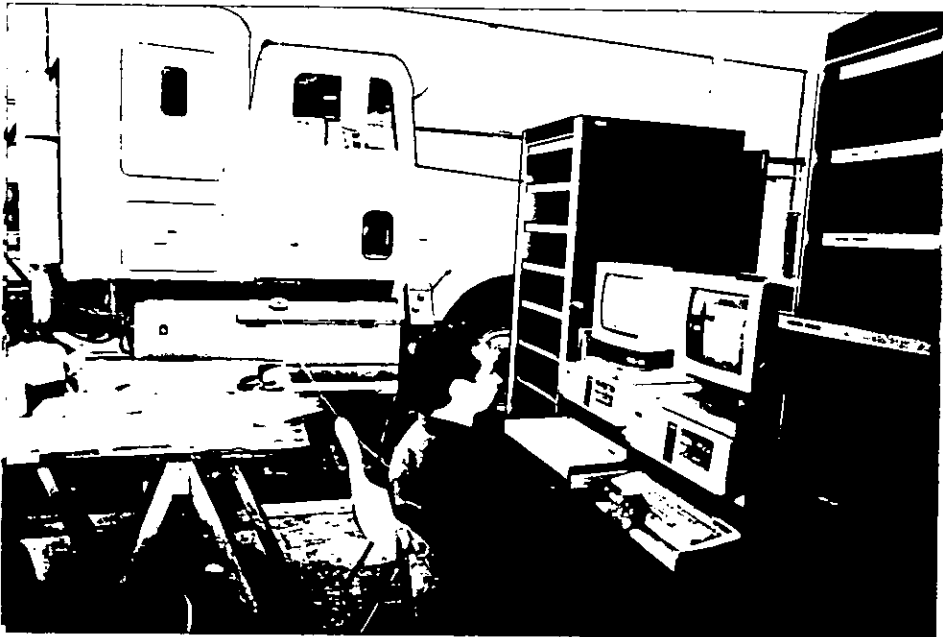
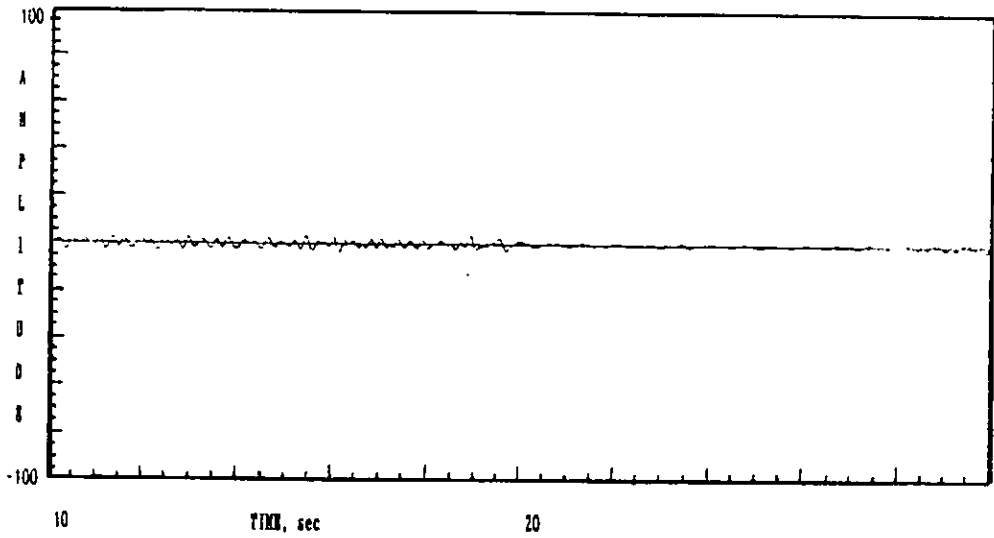
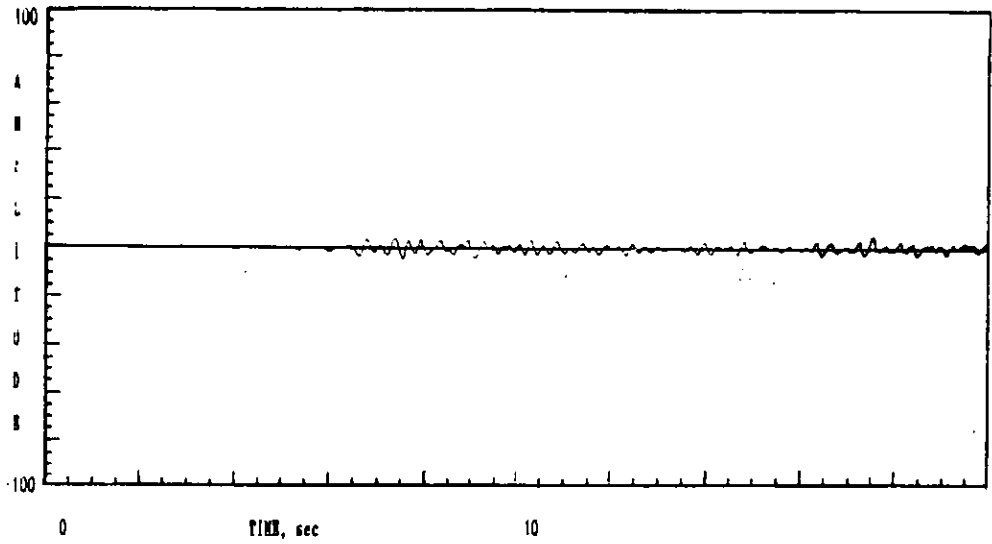


Figura 6.16. Control digital del simulador dinámico para la adecuación de campo a señales de laboratorio.

Una vez que se concluye esta primera fase, y tomando las medidas pertinentes de seguridad se procede a la prueba completa donde registraremos los esfuerzos, de acuerdo a las cuatro áreas de prueba que recordaremos a continuación

- Torsión de carrocería
- Pruebas de dirección
- Pruebas de empedrado
- Ondulado agudo

La etapa de simulación arroja resultados graficos de desplazamiento que se muestran en las figuras 6.17, 6.18 y 6.19. Los datos que arroja la prueba se revisan en la etapa de análisis de resultados y emisión de informe.



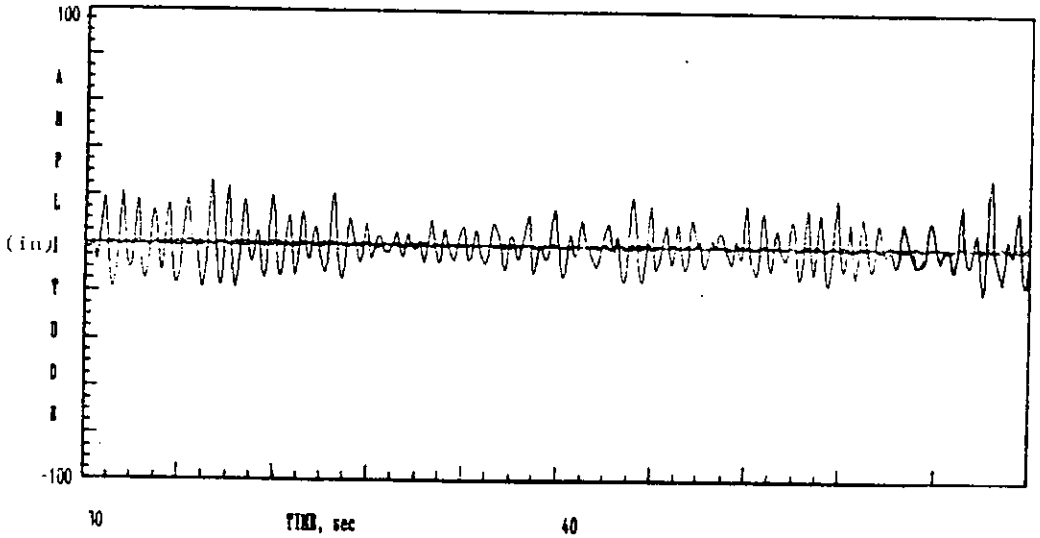
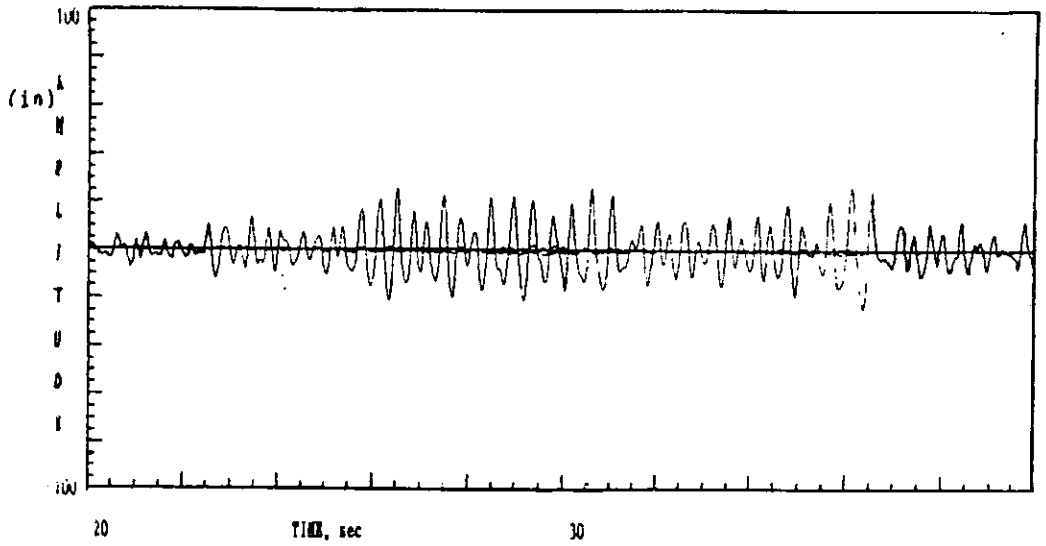
Evento: torsion

Duración: 11segundos

Elemento monitoreado: Neumático delantero izquierdo

Figura 6.17. Gráficas de señales de desplazamiento en pruebas de torsión



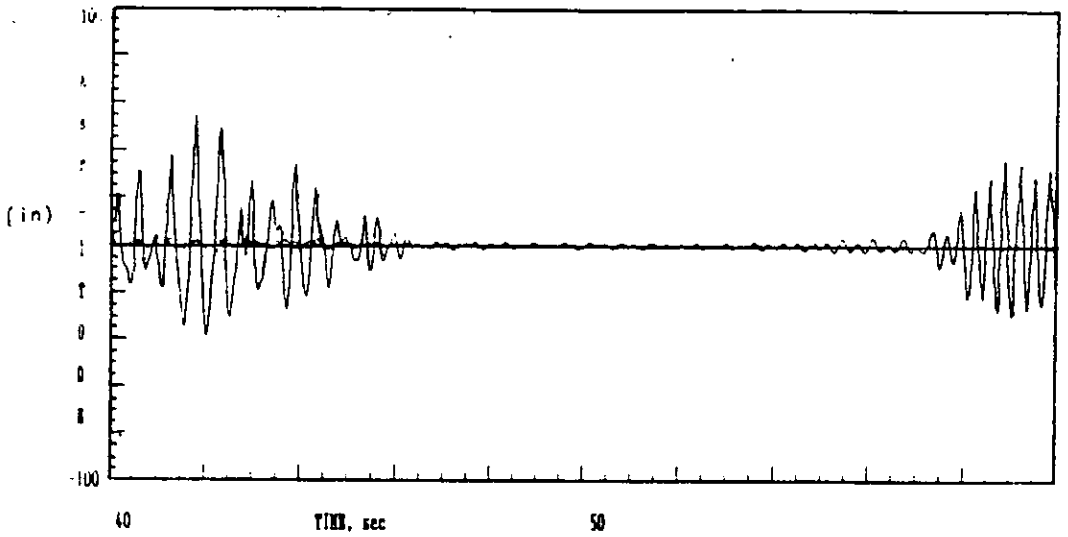


Evento: dirección

Duración: 23segundos

Elemento monitoreado: Neumático delantero izquierdo

Figura 6.18. Gráficas de señales de desplazamiento en pruebas de dirección.



Fin de dirección  
Inicio de empedrado

Figura 6.19. Gráficas de señales de desplazamiento evento: fin de dirección e inicio de empedrado

### ***Etapas de análisis de resultados y emisión de informe***

Finalmente se cuenta con los resultados gráficos de desplazamiento contra tiempo y ahora se procede a analizar las desviaciones más importantes en la gráfica de donde se desprenden muchas observaciones para el análisis y corrección; es importante decir que si el que solicita la prueba, no pide un análisis de los resultados, por que ellos cuenten con personal capacitado para ellos o por alguna razón en particular, el laboratorio de dinámica vehicular no realiza el análisis y se concreta a entregar los resultados gráficamente.

La prueba dinámica de laboratorio que se realizó a la cabina dormitorio del tacto-camión, arrojó resultados gráficos de las fisuras generadas en la estructura que se sometió a observación los resultados gráficos que se obtuvieron fueron los que se ilustran en las tabla de la figura 6.20. Los resultados de la prueba dinámica se entregaron a la empresa, concluyendo así el ensayo solicitado.

Por Último cabe mencionar que se debe elaborar un informe numérico narrativo de el procedimiento de las pruebas señalando las observaciones, fallas y propuestas que vinieran al caso.

PUNTO	DEFORMACION MAX. ( $\mu$ S)	REGISTRO	EVENTO
S 13 (L)	105	1	EMPEDRADO
S 13 (90°)	115	8	TERRACERIA
S 14 (L)	-50	19 A	DIRECCION
S 14 (90°)	22.5	20 A	DIRECCION
S 15 (L)	-54	7 Y 14 *	DIRECCION
S 15 (90°)	—	—	—
S 16 (L)	157.5	22	EMPEDRADO
S 16 (90°)	140	22	DIRECCION
S 17 (L)	-40	8 *	DIRECCION
S 17 (90°)	—	—	—
S 18	55	21 A	DIRECCION
S 19	50	17	DIRECCION
S 20 (L)	-60	10 *	DIRECCION
S 20 (90°)	—	—	—
S 21 (L)	20	10 *	DIRECCION
S 21 (90°)	—	—	—
S 22	20	12 *	DIRECCION
S 23	-12	12	DIRECCION
S 24	-55	5	ONDULADO DE
S 25	80	8	TERRACERIA
S 26	37.5	20 A	DIRECCION
S 27	-30	20 A	DIRECCION

Figura 6.20. Valores de deformación máxima encontrados en la cabina-dormitorio

## CONCLUSIONES

- Con los sistemas de inspección por medio de la simulación dinámica para el aseguramiento de la calidad, las empresas obtendrán un conocimiento más claro de las fallas en operación que sufren sus productos, y las repercusiones en la vida útil del mismo, además se podrán establecer mejoras ampliando ó disminuyendo los programas de mantenimiento con la finalidad de ofrecer un mejor servicio al consumidor.

- Implementar métodos ó inspecciones mediante pruebas del Laboratorio para que todo producto sea cual fuere su tamaño, función y servicio, tengan una garantía de calidad, los beneficios que se obtendrán son los siguientes:

a) *Economía*

Se diseñan los elementos a tamaño adecuado y se podrá garantizar un tiempo de vida útil, lo que se refleja en una disminución de gastos por materiales y por reclamos de clientes.

b) *diseños más apropiados a las funciones*

Se debe diseñar ó rediseñar en base a resultados de simulación en servicio, para que el elemento tenga las características adecuadas.

c) *Reducción de las fallas en el servicio*

Cuando se conoce la vida en servicio de un prototipo, es menos probable que fallen los elementos que lo integran.

d) *Prolongar la vida útil del equipo*

Si por medio del análisis de laboratorio se incrementa la calidad, entonces, el equipo analizado tendrá una vida en servicio mayor a la inicial.

-Debido a que diversos proveedores no tienen los medios o la infraestructura para la realización de pruebas de productos terminados es necesario que para asegurar la calidad de los productos, éstos se apoyen en laboratorios acreditados para la realización de pruebas de simulación dinámica.

-Es necesario remarcar que la calidad y la garantía de ésta debe basarse en el conocimiento por parte del proveedor de la materia prima así como de cuales son los procesos de manufactura que han tenido que realizarse y cual será la trayectoria que tomarán las piezas. Por tal motivo es necesario que se le pida al usuario las normas, especificaciones y uso del producto antes de iniciar una producción, evitando con ésto las fallas de mano de obra, equipo ó de material ya que éstos pueden alcanzar un nivel alto, si no nos esforzamos al máximo para alcanzar confiabilidad.

-Se obtiene la vida útil en servicio de elementos estructurales de los automóviles, elaborando un estudio de laboratorio donde se simulan las condiciones de servicio normal multiplicando los ciclos de repetición hasta llegar al punto de falla, para después calcular la vida útil; el número de ciclos corresponde a un tiempo de servicio, simulando que el elemento estuvo en operación un determinado número de años, y concluyendo qué efectos se generan en el sistema para la aceptación ó en su defecto rediseñar el mismo.

-Este tipo de ensayos debe ser considerado como básico, ya que proporcionan datos de aseguramiento de calidad, una herramienta indispensable de las empresas.

-Mediante la prueba de simulación dinámica, es posible mejorar los niveles de confort y de ruido, disminuyendo la fricción y desalineamiento de partes; eliminando así las molestas vibraciones en vehículos.

---

BIBLIOGRAFIA

1. Singiresu S. Rao. "Mechanical Vibrations". Editorial Addison-Wesley Publishing Company. E. E. U. U. 1990
2. Arbones Malisani Eduardo A. "Ingeniería de sistemas". Editorial Marcombo. Barcelona (España) 1991
3. Cyril M. Harris, Ph. D. "Manual para el control del ruido". Editorial Instituto de estudios de administración local.
4. Gerez Greiser Víctor, Grijalva López Manuel. "El enfoque de sistemas". Editorial limusa. México 1976
5. A. J. Durelli. "Aplicaciones del análisis de esfuerzos". Editorial Compañía Editorial Continental S. A. (CECSA). México 1968
6. Michael J. Pinches, John G. Ashby. "Power Hydraulics". Editorial Prentice Hall. Great Britain 1989
7. K. D. Zell. "Systemes Avances a Asservissement Electrohydraulique". M. T. S. Systems Corporation. Francia 1982
8. Hamilton H. Mabie, Fred W. Ocvirk. "Mecanismos y dinámica de maquinaria". Editorial Limusa. México 1981
9. S. N. Kozhevnikov, Y. I. Yesipenko, Y. M. Raskin. "Mecanismos". Editorial Gustavo Gil. Barcelona 1981



10. William Wolansky, Arthur Akers. Modern Hydraulics. Editorial Merrill Publishing Company. E. E. U. U. 1988
11. Egor P. Popov. "Introducción a la Mecánica de Sólidos". Editorial Limusa. México 1989
12. S. Timoshenko. "Resistencia de Materiales". Editorial Calpe S. A. Madrid 1976
13. Theodore Baumeister, Eugene A. Avallone, Theodore Baumeister III. "Marks Manual del Ingeniero Mecánico". Editorial Mc. Graw-Hill. México 1989
14. Giuseppe Biasutti. "Electricidad". Ed. Ulrico Hoepli. Milano (Italia) 1970
15. Manuel G. Berlanga Juárez. Ponencia: "El Aseguramiento para la Calidad del Servicio Mediante Pruebas de simulación Dinámica". X Congreso Nacional de Control de Calidad. México 1982
16. R. A. Lundo and K. H. Donaldson, jr. Boletín SAE: "Approaches to Vehicle Dynamics and Durability Testing". SAE Technical Paper Series. E. E. U. U. 1982
17. Boletín: "Explaining the Six Steps of Remote Parameter Control". M. T. S. Systems Corporation. E. E. U. U. 1996
18. Boletín: "Dynamic design Verification of a Prototype Rapid Transit Train using Modal analysis". Bruel & kjaer application notes. E. E. U. U. 1993