



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE ENSAYO DE BARRAS  
CON CONTROL POR FUERZA Y DEFORMACIÓN.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PEDRO JUAN PARRA CAMILLA**

**PROFESOR GUIA:  
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RICARDO HERRERA MARDONES.  
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN**

**SANTIAGO DE CHILE  
Junio de 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: PEDRO PARRA CAMILLA  
FECHA: 31/06/2010

“Instalación y puesta en marcha de un sistema de ensayo de barras con control por fuerza y deformación”

El objetivo del presente trabajo es la instalación y puesta en marcha de un dispositivo de ensayo de barras bajo cargas cíclicas y deformación controlada en el Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El dispositivo consiste en un mecanismo que transforma el movimiento horizontal de la mesa de un grado de libertad instalada en el Laboratorio Experimental, en un movimiento vertical aplicado a una probeta metálica esbelta. Esta mesa se encuentra calibrada para aplicar movimientos sísmicos limitados a aceleraciones de 1 g, velocidades de 40 cm/seg, desplazamientos de  $\pm 20$ cm y frecuencias de hasta 12 Hz.

El trabajo comprende la revisión y verificación del diseño del dispositivo, la fabricación y montaje de éste, el desarrollo del sistema de control, para finalmente realizar la calibración y ensayo de probetas de Nitinol envejecidas a diferentes tiempos.

La capacidad del dispositivo permite ensayar barras metálicas de hasta 6 mm de diámetro, 35 cm de de largo<sup>1</sup>, 140 mm de desplazamiento a una frecuencia máxima de 12 Hz.

Los resultados obtenidos se comparan con los existentes en la literatura utilizando registros sinusoidales de 100 ciclos, 8% de deformación nominal a 0.1 Hz. Se logran similitudes en las curvas de histéresis, módulo de elasticidad, deformación remanente, tensión de transformación, y amortiguamiento equivalente. Además, se logran semejanzas en las variaciones de estas propiedades en función de la cantidad de ciclos, envejecimiento y entrenamiento previo.

Por otro lado, se analiza el comportamiento del material al ser sometido al registro sísmico del Terremoto de Llolleo de 1985, observando ciclos de histéresis de igual forma que en los ensayos sinusoidales.

---

<sup>1</sup> Depende del sistema de mordazas a utilizar.

# INDICE

<b>Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN</b> .....	8
1.1. Introducción general .....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Metodología.....	10
1.4. Alcances .....	11
<b>Capítulo 2 : ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	12
2.1. Introducción.....	12
2.2. Antecedentes generales de máquinas de ensayo.....	12
2.3. Antecedentes generales de la mesa vibradora existente .....	14
2.4. Antecedentes generales de propiedades mecánicas del Nitinol.....	15
<b>Capítulo 3 : ANÁLISIS ESTRUCTURAL</b> .....	20
3.1. Introducción.....	20
3.2. Modelo del dispositivo en SAP 2000 .....	22
3.2.1 Análisis del modelo con fuerza estática .....	23
3.2.1.1 Análisis de deformaciones.....	23
3.2.1.2 Análisis de esfuerzos .....	25
3.3 Análisis modal mediante SAP2000 .....	27
<b>Capítulo 4 : PROCESO DE FABRICACIÓN Y MONTAJE</b> .....	30
4.1. Introducción.....	30
4.2. Dispositivos de medición y ensaye.....	31
4.3. Proceso de montaje.....	36
4.4. Detalle de conexiones celda y mordaza.....	39
4.5. Cambios respecto del diseño original.....	40
<b>Capítulo 5 : SISTEMA DE CONTROL Y TOMA DE DATOS</b> .....	42
5.1. Introducción.....	42
5.2. Software de control.....	45
5.2.1. Estructura general .....	47
5.2.2. Procesamiento de datos .....	49
5.2.2.1 Controlador PID .....	49
5.2.2.1 Ajuste para deformaciones remanentes .....	50
5.3. Sistema de fijación .....	53

<b>Capítulo 6 : ENSAYOS EXPERIMENTALES</b> .....	54
6.1. Introducción.....	54
6.2. Ensayos estáticos.....	55
6.3. Ensayos de probetas de Nitinol previamente utilizadas .....	57
6.4. Ensayos de probetas de Nitinol finales.....	65
6.4.1 Registros sinusoidales .....	65
6.4.2 Registro sísmico: Terremoto de Lolloo, 1985 .....	79
<b>Capítulo 7 : DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	81
<b>BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS</b> .....	84
<b>ANEXO A: PLANO GENERAL DE FABRICACIÓN Y RUTINA DE CONTROL</b> .....	85
<b>ANEXO B: MEMORIAS DE CÁLCULO</b> .....	86
<b>ANEXO C: INSTRUCCIONES DE USO Y RUTINA DE PROCESAMIENTO</b> .....	121

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Mesa vibradora .....	14
Figura 2-2: Propiedades mecánicas Nitinol.....	16
Figura 2-3: Curva tensión-deformación de materiales con memoria de forma para distintas temperaturas (Duering et al., 1990).....	16
Figura 2-4: Envejecimiento del Nitinol (Torra, 2009) .....	18
Figura 2-5: Respuesta isothermal de alambres de Nitinol (Churchill et al., 2009) .....	18
Figura 3-1: Esquema general de funcionamiento.....	20
Figura 3-2: Modelo en SAP 2000.....	22
Figura 3-3: Análisis de deformaciones.....	24
Figura 3-4: Notación.....	25
Figura 3-5: Formas modales.....	27
Figura 3-6: Análisis modal .....	29
Figura 4-1: Sistema de mordazas.....	31
Figura 4-2: Celda de carga.....	32
Figura 4-3: Extensómetro MTS.....	33
Figura 4-4: Potenciómetro .....	33
Figura 4-5: Dispositivo de seguridad de montaje.....	34
Figura 4-6: Preparación de superficies de contacto.....	36
Figura 4-7: Instalación de placa de acero (inferior) .....	37
Figura 4-8: Proceso de montaje (perfiles IPN 300).....	37
Figura 4-9: Proceso de ensamble en laboratorio .....	38
Figura 4-10: Esquema de conexiones.....	39
Figura 4-11: Conectores de acero SAE .....	39
Figura 4-12: UPN .....	40
Figura 5-1: Función de Haversine .....	43
Figura 5-2: Registro de desplazamiento .....	44
Figura 5-3: Sistema de control .....	45
Figura 5-4: Panel frontal.....	45
Figura 5-5: Sensores .....	47
Figura 5-6: Deformación para $\epsilon = 5\%$ , $f = 2\text{Hz}$ (2 ciclos).....	50
Figura 5-7: Ajuste de curva de desplazamientos .....	51
Figura 5-8: Esquema del sistema de fijación.....	53
Figura 6-1: Error porcentual.....	54
Figura 6-2: Ensayos estáticos .....	55
Figura 6-3: Ensayos preliminares 0.5 Hz, 20 ciclos, 4mm.....	57
Figura 6-4: Ensayos preliminares 0.5 Hz, 20 ciclos, 4mm.....	58
Figura 6-5: Ensayos preliminares 0.1 Hz, 100 ciclos, 8mm (probeta 13).....	59
Figura 6-6: Probeta "Nudo 1, B3" para registro de Llolleo al 75% (Olea, 2009) .....	61
Figura 6-7: Efecto de la deformación .....	62
Figura 6-8: "Nudo 4, B3" para registro de Llolleo al 75% (Olea, 2009).....	63
Figura 6-9: Efecto del entrenamiento .....	64
Figura 6-10: Histéresis ensayos finales .....	66
Figura 6-11: Módulo de elasticidad.....	67
Figura 6-12: Tensión de transformación .....	68

Figura 6-13: Deformación remanente.....	69
Figura 6-14: Energía disipada .....	70
Figura 6-15: Amortiguamiento equivalente .....	71
Figura 6-16: Ajuste de rectas representativas.....	72
Figura 6-17: Efecto del envejecimiento.....	74
Figura 6-18: Efecto del entrenamiento (Probeta 15) .....	75
Figura 6-19: Efecto del entrenamiento (Probeta 18) .....	77
Figura 6-20: Terremoto de Lolloo, 1985 .....	79
Figura 6-21: Histéresis probeta 22 .....	80
Figura 6-22: Histéresis probeta 23 .....	80
Figura C-0-1: Placa de fijación.....	122
Figura C-0-2: Conexión sensores .....	123
Figura C-0-3: Fijación mordaza superior .....	123
Figura C-0-4: Botón de seguridad .....	124

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1: Resumen Cotizaciones .....	13
Tabla 3-1: Esfuerzos de operación .....	23
Tabla 3-2: Verificación conexiones.....	26
Tabla 3-3: Deformaciones .....	26
Tabla 3-4: Análisis Modal .....	28
Tabla 4-1: Datos perfiles UPN .....	40
Tabla 4-2: Resultados perfiles UPN .....	40
Tabla 5-1: Tarjeta PCI – NI6036E .....	47
Tabla 6-1: Constantes de proporcionalidad sensores .....	54
Tabla 6-2: Factor de amplificación ensayos preliminares .....	60
Tabla 6-3: Probetas finales .....	65
Tabla 6-4: Probetas finales (resultados) .....	73

## **Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Introducción general**

Gran parte de las actividades de la ingeniería sísmica requieren del desarrollo simultáneo de modelos matemáticos y experiencias que permitan observar, medir y comparar los fenómenos en estudio. Debido a que existe una amplia gama de combinaciones posibles en las cuales una estructura (o elemento de una estructura) es sometida a acciones externas, el trabajo experimental requiere de ensayos bajo condiciones controladas.

El desarrollo de *disipadores sísmicos* capaces de atenuar los efectos provenientes de los movimientos del suelo es un área que ha logrado innovaciones en la forma de construir y proteger estructuras. Desde el punto de vista de la protección sísmica, uno de los materiales más estudiados para la construcción y refuerzo de estructuras es la aleación formada por Níquel y Titanio, más comúnmente llamada *Nitinol* (acrónimo de Ni-Ti Naval Ordnance Laboratory). Si bien existe vasta literatura al respecto, el ensayo de este material en Chile es más bien reciente.

Investigadores de la Universidad de Chile han publicado en los últimos años resultados de trabajos de investigación relacionados con el estudio de barras de Nitinol. Sin embargo, en dicho lugar se carece de una máquina de ensayo debido a su alto costo, por lo cual los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

Para fomentar el estudio de éste y otros materiales, la existencia de un dispositivo de ensayo de barras bajo cargas cíclicas en la universidad se torna una necesidad. Así, se aborda el problema de la instalación y puesta en marcha de un dispositivo de ensayo, como una manera de facilitar el desarrollo de esta área de estudio en la universidad.



En el Laboratorio Experimental de Estructuras de la Universidad de Chile actualmente existe una mesa vibradora unidireccional controlada por desplazamiento. Adosado a ésta, se diseñó una máquina que transforma el movimiento horizontal de la mesa en uno vertical y con el cual se pueden ensayar probetas bajo carga axial dinámica.

## **1.2. Objetivos**

### **Objetivos generales**

- Instalar y poner en marcha un dispositivo de ensayo de barras bajo cargas cíclicas a deformación controlada.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento de barras de Nitinol bajo cargas cíclicas a baja frecuencia.
- Evaluar el efecto del envejecimiento en las propiedades mecánicas del material.
- Conocer la influencia del entrenamiento previo en el material.

### 1.3. Metodología

Las actividades consideradas para el desarrollo de los objetivos son las siguientes:

- i. Revisión del diseño y verificación estructural del dispositivo de ensayo.
- ii. Inspección y control de calidad de fabricación. La fabricación del dispositivo de ensayo de barras estuvo a cargo de una maestranza.
- iii. Inspección y control de calidad del montaje. El montaje lo realizó el fabricante en el Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.
- iv. Desarrollo del sistema de control. A pesar de que el sistema de control de la mesa vibradora de un grado de libertad se encuentra calibrado, la inclusión de un nuevo dispositivo acoplado puede generar distorsiones no deseadas en el sistema de control con relación al dispositivo de ensayo de la probeta. Además, los desplazamientos necesarios son bastante menores a los impuestos en ensayos en la mesa vibradora.
- v. Ensayo de barras. Para poder garantizar el buen funcionamiento del dispositivo de ensayo, es necesario efectuar pruebas con materiales conocidos previamente. Luego, se ensayó barras de Nitinol envejecidas durante distintos lapsos de tiempo.
- vi. Comparación de resultados con los publicados en la literatura existente. De esta forma se validan los ensayos realizados y, por ende, el funcionamiento del dispositivo.

## 1.4. Alcances

Los alcances generales de este trabajo son:

- 1.- Control de calidad en procesos de fabricación y montaje de la máquina.
- 2.- Determinación de los rangos de funcionamiento de la máquina.
- 3.- Calibración de los parámetros de control.
- 4.- Ensayo de probetas de Nitinol bajo deformación y fuerza controladas.

Los alcances de cada capítulo son:

En el capítulo 2 se describen los antecedentes generales introductorios respecto de propiedades básicas del Nitinol, máquinas de ensayo similares, mesa vibradora existente y metodologías de medición.

En el capítulo 3 se describe el análisis estructural de la máquina de ensayo y la medición experimental de parámetros de chequeo tanto dinámicos como estáticos. Este capítulo tiene por objetivo determinar los rangos reales de funcionamiento de la máquina de ensayo.

En el capítulo 4 se describe el proceso de fabricación y montaje, cambios respecto del diseño inicial y análisis de su incidencia en el funcionamiento de la máquina. Además, se describen las partes de la máquina de ensayo así como los equipos de medición involucrados en el ensayo de probetas.

En el capítulo 5 se describe la metodología utilizada en la calibración del sistema de control. Se muestran los resultados obtenidos antes y después de la calibración.

En el capítulo 6 se describe el proceso de toma de datos en ensayos de barras de Nitinol y el análisis de los mismos. Finalmente se comparan los resultados obtenidos con los existentes en la literatura.

En el capítulo 7 se comentan los resultados obtenidos en cada etapa del trabajo. Se incluyen además recomendaciones para futuros ensayos.

## **Capítulo 2 : ANTECEDENTES GENERALES**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se presentan antecedentes generales del trabajo y se hace referencia explícita a la bibliografía utilizada en el proceso de interiorización sobre el tema.

Dado que la máquina de ensayo hace uso de una mesa vibradora existente, se describen los antecedentes generales de la misma.

### **2.2. Antecedentes generales de máquinas de ensayo**

Interiorizarse en máquinas de ensayo dinámicas es un paso inicial para comprender el funcionamiento de las mismas y las características de las que las diferentes empresas fabricantes ofrecen en el mercado.

Las características básicas de una máquina de ensayo dinámica son la frecuencia máxima de ensayo y la fuerza capaz de transmitir a la probeta.

Diversas empresas manufacturan este tipo de equipos. Se consultaron los catálogos de empresas tales como MTS System Corporation ([www.mts.com](http://www.mts.com)), J. T. M. Technology Co., Ltd. (<http://jtm.machinery.com.tw>), EXIMTEC Ltda. ([www.eximtecl.cl](http://www.eximtecl.cl)), TEST RESOURCES ([www.testresources.com](http://www.testresources.com)).

La mayoría de las máquinas disponibles en el mercado constan de sistemas de control capaces de detectar automáticamente fallas de tipo frágil con el fin de proteger al sistema computacional y a la celda de carga. Además, admiten probetas planas y redondas de diversos materiales. Las celdas de carga típicas tienen precisiones del orden del  $\pm 1\%$ .

Para ilustrar mejor las opciones que ofrece el mercado, se muestra a continuación un resumen de las cotizaciones realizadas en las empresas ya mencionadas<sup>2</sup>.

**Tabla 2-1: Resumen Cotizaciones**

Fabricación	modelo	Vel <sub>max</sub> [mm/s]	F <sub>max</sub> [kN]	Carrera <sub>max</sub> [mm]	Costo [US]
J.T.M. Technology Co., Ltd.	JTM-S510	5	50	1400	23700
EXIMTEC Ltda.	SV 409.226	200	50	100	60000
MTS System Corporation	370.10	150	100	880	90000
TEST RESOURCES	800LE3	125	6	810	50000

Luego de recibir estas cotizaciones, se concluye que la alternativa de diseñar una máquina de ensayo que utilice el movimiento unidireccional de la mesa vibradora existente representa, al menos, un ahorro del orden de un 70% respecto de la alternativa de comprar una máquina manufacturada en el extranjero.

En Chile actualmente existen máquinas de ensayo con similares características en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y en la Universidad Técnico Federico Santa María.

---

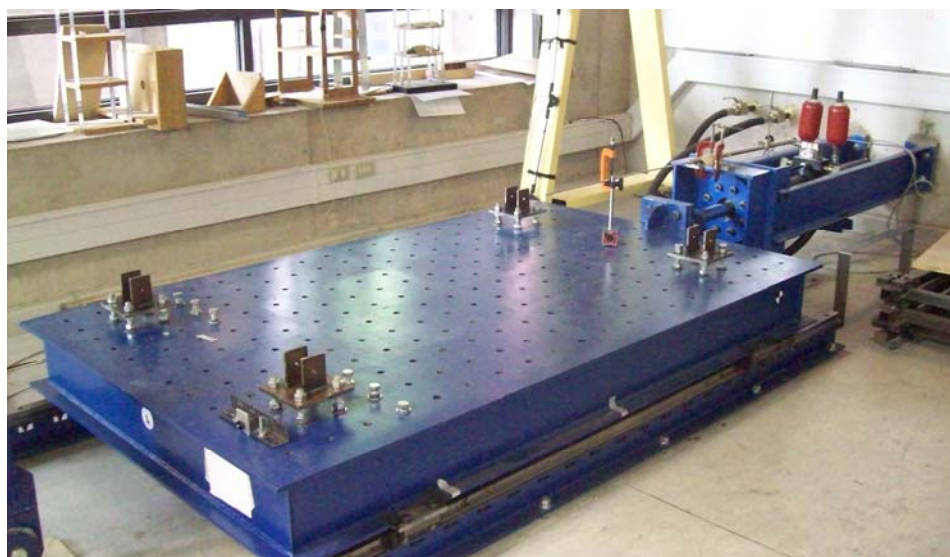
<sup>2</sup> Las cifras mostradas corresponden a valores aproximados.

### 2.3. Antecedentes generales de la mesa vibradora existente

La mesa vibradora del Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile data del año 2008 y consiste en una mesa vibradora unidireccional de 210 cm x 130 cm con 3 ton de capacidad. Consiste principalmente en un sistema óleo-hidráulico capaz de reproducir movimientos sísmicos limitados a aceleraciones de 1 g, velocidades de 40 cm/seg y desplazamientos de  $\pm 20$  cm. Su rango de frecuencias va desde cero a 12 Hz (Barrientos, 2008).

El sistema óleo-hidráulico de la mesa vibradora consiste en una bomba de aceite conectada a actuadores de doble efecto, los que regulados por el sistema de control, logran movimientos de gran precisión. Esto último requiere que el sistema de control se encuentre calibrado para la mesa, entendiéndose por ello al conjunto de todos los componentes de la mesa (motor trifásico, bombas óleo-hidráulica primaria y secundaria, filtros de aceite (2), acumuladores (3), intercambiador de calor, servo-actuador, válvulas, tuberías, estructuras de vibradora soporte y conexiones).

La mesa vibradora ha sido utilizada sin inconvenientes durante aproximadamente un año. Sin embargo, debido a una falla en la válvula dinámica, la precisión del sistema de control ha sufrido variaciones menores. Estas variaciones son aún bajas para justificar una nueva calibración de la mesa. Además, la frecuencia requerida para el ensayo de barras queda dentro del rango en el cual la mesa funciona con mayor precisión. La frecuencia de ensayo se fijó inicialmente en 1 Hz.



**Figura 2-1: Mesa vibradora**

## 2.4. Antecedentes generales de propiedades mecánicas del Nitinol

Durante los últimos veinte años se han publicado numerosos trabajos relativos al estudio de las propiedades mecánicas de materiales con memoria de forma. Entre estos materiales, uno de los más populares es la aleación formada por Níquel y Titanio denominada *Nitinol*. Su composición química consta de 55% Níquel y 45% Titanio (DesRoches, Delemont ,2002).

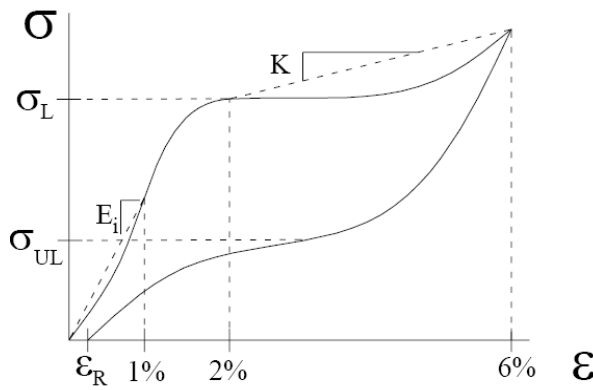
El desarrollo del Nitinol data de 1960 y en la actualidad ha sido utilizado en el campo de la medicina (expansores arteriales, cables ortodóncicos), ingeniería (antenas de teléfonos celulares, aspas de helicópteros, alas de aviones, válvulas termostáticas) y otros. Sin embargo, sus aplicaciones en el campo de la ingeniería sísmica aún son recientes.

Su importancia en ingeniería sísmica radica en que bajo cargas en las que se alcanza el rango no lineal de deformaciones, el material sufre modificaciones en su estructura interna. Este proceso consume parte de la energía aplicada al material, lo que se traduce en deformación remanente que acumula el material cada vez que se repite dicho evento. Adicionalmente, el Nitinol tiene la particularidad de recuperar su estado de deformación inicial mediante procesos térmicos (*efecto memoria de forma*) o bien mediante la descarga de su estado tensional en condiciones de temperatura controlada (*efecto de superelasticidad*).

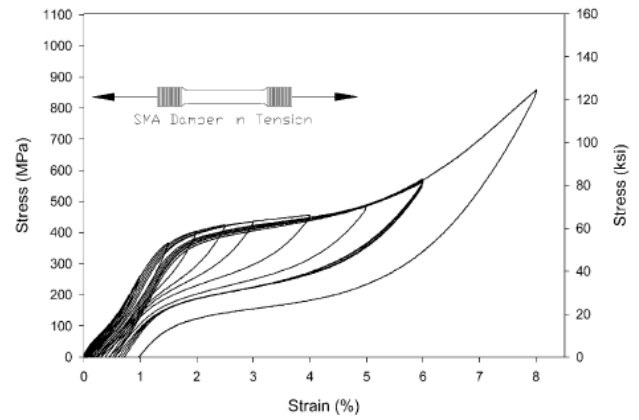
Algunas propiedades adicionales del Nitinol son: Gran endurecimiento para deformaciones superiores al 6%, resistencia a la corrosión similar al acero inoxidable, mayor tensión y deformación de fluencia y rotura que el acero tradicional.

Las exigencias dinámicas (principalmente sismos y otros fenómenos impuestos por el entorno) a las que se ven enfrentados diversos elementos estructurales son, sin duda, cíclicas. Ello convierte a los materiales con memoria de forma en materiales susceptibles de ser utilizados en sistemas pasivos de disipación de energía.

Dentro de las aplicaciones del Nitinol en ingeniería sísmica destacan los dispositivos pasivos de disipación de energía tales como refuerzos de estructuras enrejadas, elementos de disipación en puentes, conexiones en estructuras de acero, etc.



(a) Curva esfuerzo-deformación (Barbero, 2004)



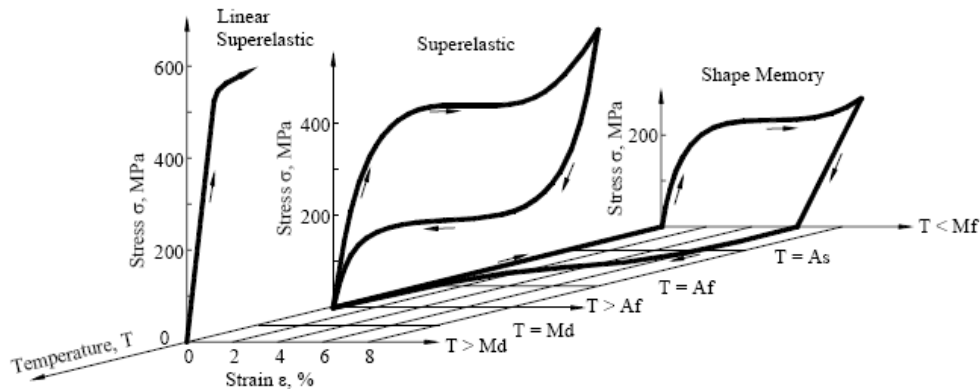
(b) Comportamiento cíclico típico observado (DesRoches, Delemont, 2002)

**Figura 2-2: Propiedades mecánicas Nitinol**

Como se muestra en la Figura 2-2(a), la curva tensión – deformación del Nitinol posee principalmente tres zonas:

- Zona de comportamiento elástico.
- Plateau de fluencia de carga y descarga.
- Zona de endurecimiento del material.

El comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma depende de la temperatura a la que se encuentren (Duering et al., 1990). Así, las moléculas que componen el material se ordenan de forma distinta dando paso a dos fases: *martensita* y *austenita*. Si bien no es objeto de este trabajo describir a nivel microscópico los materiales con memoria de forma, la Figura 2-3 resume su comportamiento en función de la temperatura.



**Figura 2-3: Curva tensión-deformación de materiales con memoria de forma para distintas temperaturas (Duering et al., 1990)**



De acuerdo a Barbero (2004), se definen las siguientes propiedades (ver Figura 2-2):

- Módulo de elasticidad inicial :  $E_i$

Corresponde a la pendiente del tramo inicial para una deformación de hasta un 1%. Dentro de esta zona la austenita se deforma elásticamente. Su valor se determina por medio de un ensayo monotónico a tracción.

- Esfuerzo de transformación :  $\sigma_L$

Corresponde al punto en que se inicia la transformación de austenita en martensita.

- Esfuerzo de transformación inversa :  $\sigma_{UL}$

Corresponde al punto en que se inicia la transformación de martensita en austenita.

- Deformación remanente :  $\varepsilon_R$

Corresponde a la deformación remanente del material debido al ciclo carga-descarga.

- Amortiguamiento viscoso equivalente :  $\xi_{EQ}$

Sea  $E_d$  el área comprendida dentro de la curva tensión deformación para un ciclo carga descarga y  $E_s$  el área comprendida bajo la línea recta que une el punto de partida con el esfuerzo máximo del gráfico carga – deformación, el amortiguamiento viscoso equivalente se calcula como (Chopra, 2001):

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{4\pi \cdot E_s}$$

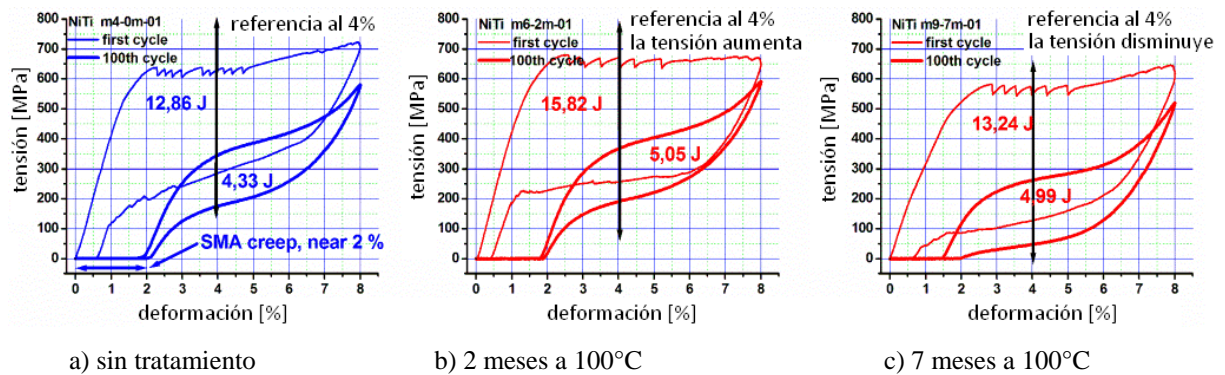
- Pendiente del plateau :  $K$

Corresponde a la pendiente del segundo tramo lineal del ciclo. En esta etapa se mantiene la transformación de austenita a martensita.

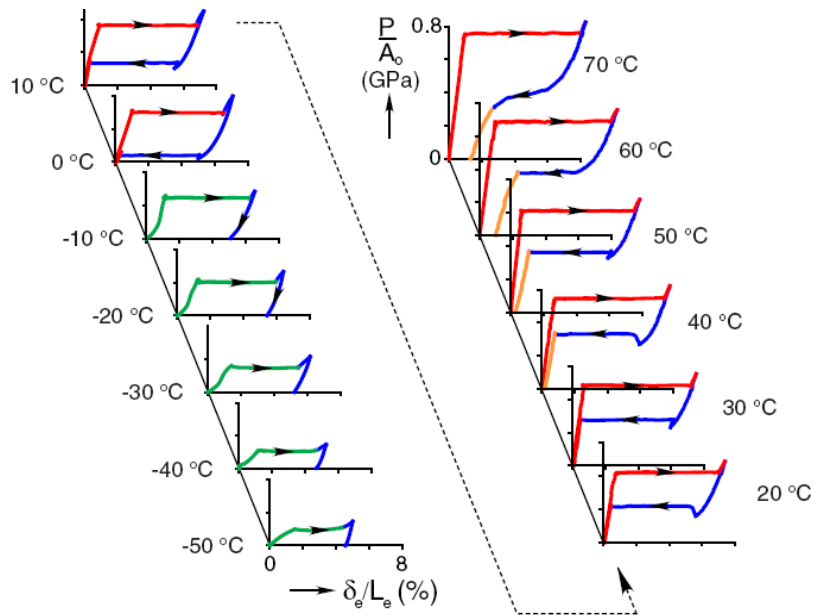
## Efecto del envejecimiento:

El *envejecimiento* consiste en un tratamiento térmico en el cual el material es sometido a altas temperaturas durante un cierto intervalo de tiempo.

Experimentalmente, se observa que existe una variación en el esfuerzo de transformación y en el esfuerzo de transformación inversa en función del tiempo de envejecimiento (Torra, 2009). Por otro lado, estudios de la respuesta isotermal de materiales con memoria de forma muestran que existe una dependencia entre la temperatura ambiente y la tensión de transformación y la tensión transformación inversa (Churchill et al., 2009).



**Figura 2-4: Envejecimiento del Nitinol (Torra, 2009)**



**Figura 2-5: Respuesta isotermal de alambres de Nitinol (Churchill et al., 2009)**

Estos resultados sugieren que para mejorar la eficiencia de disipadores basados en barras de Nitinol es posible envejecer las barras en función de la temperatura de operación. Así, a altas temperaturas es recomendable utilizar barras envejecidas durante más de 6 meses, mientras que para bajas temperaturas el envejecimiento no es necesario. Para lugares con oscilaciones térmicas pronunciadas, es recomendable utilizar modelos que combinen barras envejecidas y barras sin tratamiento térmico. Esto se basa en que la cantidad de energía disipada por el material es mayor cuando éste se encuentra en el rango no lineal de deformaciones.

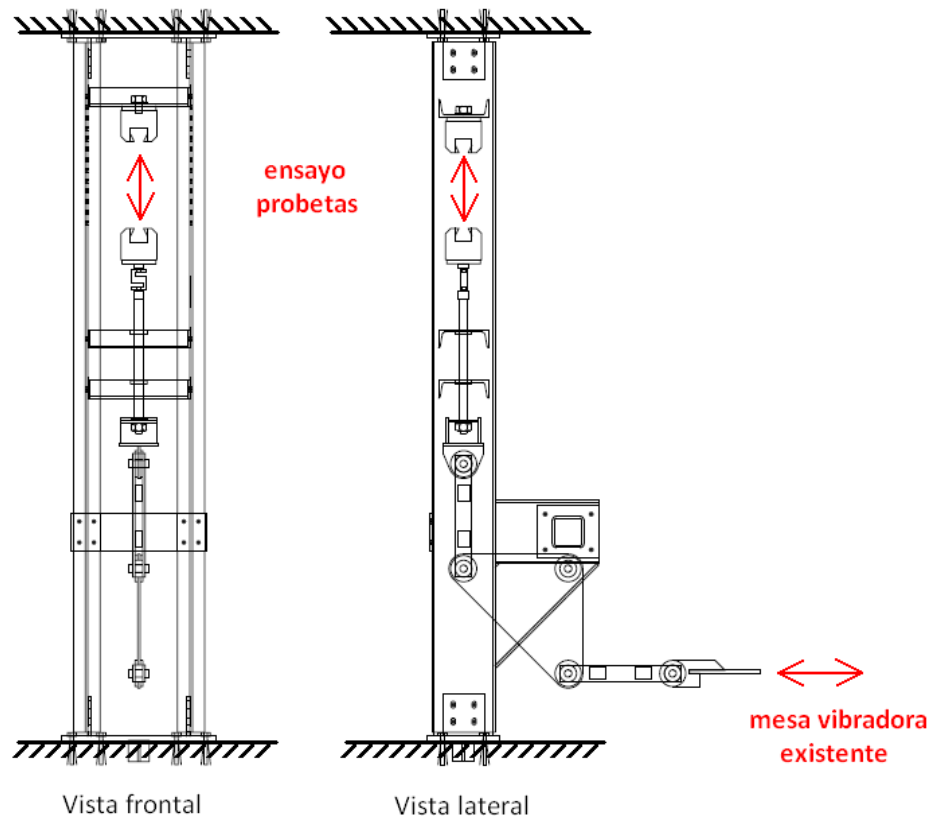
Estos resultados serán el punto de comparación de los obtenidos en este trabajo, pues los ensayos realizados se efectuaron con barras de Nitinol de idénticas características.

## Capítulo 3 : ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 3.1. Introducción

En este capítulo se resume el análisis estructural de la máquina de ensayo diseñada para 5 toneladas<sup>3</sup> por el profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, Mauricio Sarrazín Arellano. Además del análisis de capacidad de la máquina se chequean los valores de las deformaciones en condiciones de servicio.

El dispositivo propuesto consiste en un mecanismo tal que, al ser conectado a la mesa vibradora induce el movimiento vertical de las mordazas, con lo que finalmente, se logra el ensayo de probetas. Este movimiento se logra a través de dos perfiles metálicos tipo I, los que gracias a un sistema de bielas provocan el movimiento vertical de las mordazas. Un esquema general de funcionamiento se muestra a continuación:<sup>4</sup>



**Figura 3-1:** Esquema general de funcionamiento

<sup>3</sup> Si bien la mesa vibradora fue diseñada para trabajar con una fuerza máxima de 3 toneladas, la capacidad del gato hidráulico es de 5 toneladas.

<sup>4</sup> Una descripción más acabada del dispositivo se muestra en el Anexo A de este trabajo.

Mediante un modelo simplificado en SAP2000, se obtienen los parámetros dinámicos y estáticos de interés. Adicionalmente se chequean las conexiones soldadas y apernadas del dispositivo.

A continuación se presentan algunos datos generales respecto de los materiales utilizados:

- Los perfiles IPN y UPN son de acero A36.
- Los elementos conformados por placas son de acero SAE 1010
- Tanto el vástago como los pasadores de los rodamientos son de acero C45
- Los conectores para la celda de carga y mordazas son de acero SAE 4340.<sup>5</sup>
- Todas las conexiones apernadas se efectuaron con pernos grado 5 ( $F_u = 7 \text{ Ton/cm}^2$ ).
- Todas las conexiones soldadas se efectuaron con soldadura MIG 70S - 8
- Las propiedades mecánicas consideradas para el Nitinol son (Espinoza, 2007):

$E = 51.4GPa$  : Módulo de elasticidad

$\sigma_L = 519MPa$  : Esfuerzo de transformación

$\sigma_U = 1298MPa$  : Tensión máxima

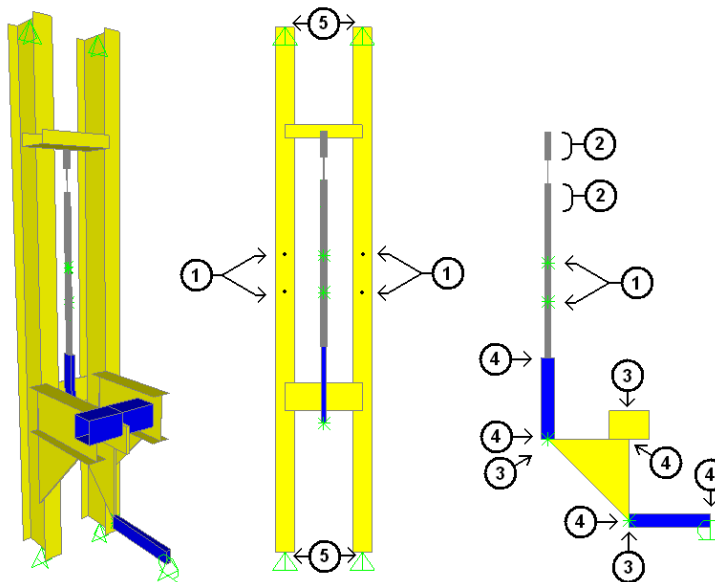
---

<sup>5</sup> Ver 4.4. Detalle de conexiones celda y mordaza

### 3.2. Modelo del dispositivo en SAP 2000<sup>6</sup>

Para obtener los esfuerzos y deformaciones del dispositivo, se utilizó un modelo tridimensional. A continuación se presenta una breve lista de supuestos utilizados en el modelo.<sup>7</sup>

1. Debido a la imposibilidad de modelar las perforaciones en los perfiles UPN que contienen los bujes, éstos no fueron considerados en el modelo. Para simular su existencia, se impusieron restricciones de traslación horizontal en el vástago y restricciones de traslación lateral entre los puntos de conexión de los perfiles IPN.
2. Las mordazas se modelaron como cuerpo rígido.
3. La placa triangular que conecta las dos bielas se encuentra impedida de deformarse fuera del plano. Además, la conexión entre las placas de acero que soportan el pasador y el perfil cuadrado 150x150x8 se consideró soldada.
4. En todas las conexiones con pasadores, se consideraron uniones rotuladas y áreas equivalentes en caso de la existencia de dos placas paralelas (bielas, conexión placa triangular – perfil 150x150x8).
5. Los perfiles IPN se encuentran conectados a la losa de reacción mediante apoyos simples.



**Figura 3-2: Modelo en SAP 2000**

<sup>6</sup> En el Anexo D de este informe se incluye la versión digital del modelo

<sup>7</sup> El esquema numerado es coincidente con el de la Figura 3-2.

### 3.2.1 Análisis del modelo con fuerza estática

#### 3.2.1.1 Análisis de deformaciones

Para estimar los esfuerzos de operación del sistema de ensayo, mediante el análisis estático de una probeta de Nitinol, se calculan primero las fuerzas que producen la rotura de la misma según las propiedades mecánicas citadas en la sección 3.1. Introducción

Se distinguen dos sectores en donde las deformaciones son de interés:<sup>8</sup>

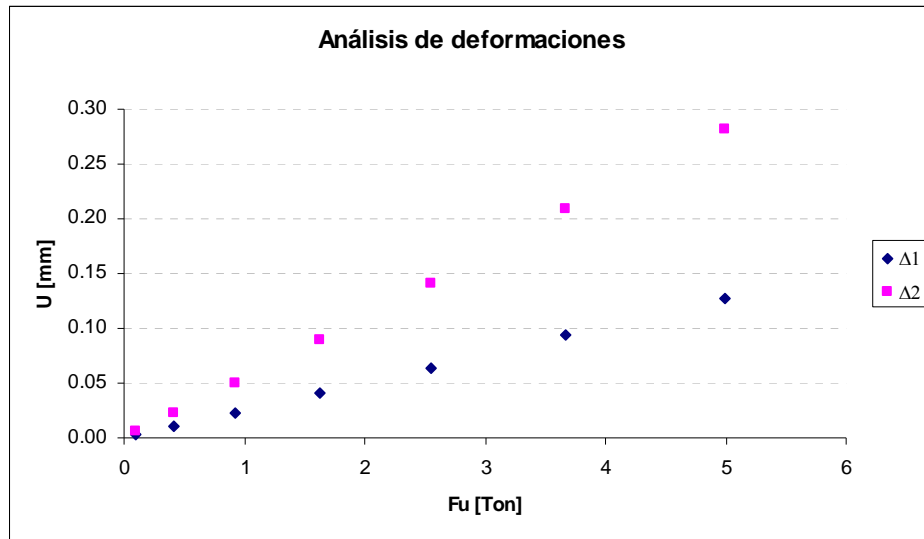
- $\Delta_1$ : Corresponde al desplazamiento vertical de la parte superior de la probeta por efecto de la deformación del dispositivo para la tensión de rotura, según su diámetro.
- $\Delta_2$ : Corresponde al desplazamiento lateral de los perfiles IPN por efecto de la deformación del dispositivo para la tensión de rotura de la probeta, según su diámetro.

**Tabla 3-1: Esfuerzos de operación**

diámetro mm	Área cm <sub>2</sub>	F <sub>L</sub> Ton	F <sub>U</sub> Ton	$\Delta_1$ U <sub>3</sub> mm	$\Delta_2$ U <sub>1</sub> mm
1	0.0079	<b>0.0</b>	<b>0.1</b>	0.0025	0.0056
2	0.0314	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	0.0101	0.0225
3	0.0707	<b>0.4</b>	<b>0.9</b>	0.0228	0.0507
4	0.1257	<b>0.7</b>	<b>1.6</b>	0.0405	0.0901
5	0.1963	<b>1.0</b>	<b>2.5</b>	0.0633	0.1408
6	0.2827	<b>1.5</b>	<b>3.7</b>	0.0937	0.2084
7	0.3848	<b>2.0</b>	<b>5.0</b>	0.1266	0.2816

---

<sup>8</sup> Si bien el dispositivo de ensayo admite una longitud de probeta variable, para dichos efectos se consideró que la probeta posee un largo de 10 cm, valor estimado como la longitud efectiva según las probetas disponibles.



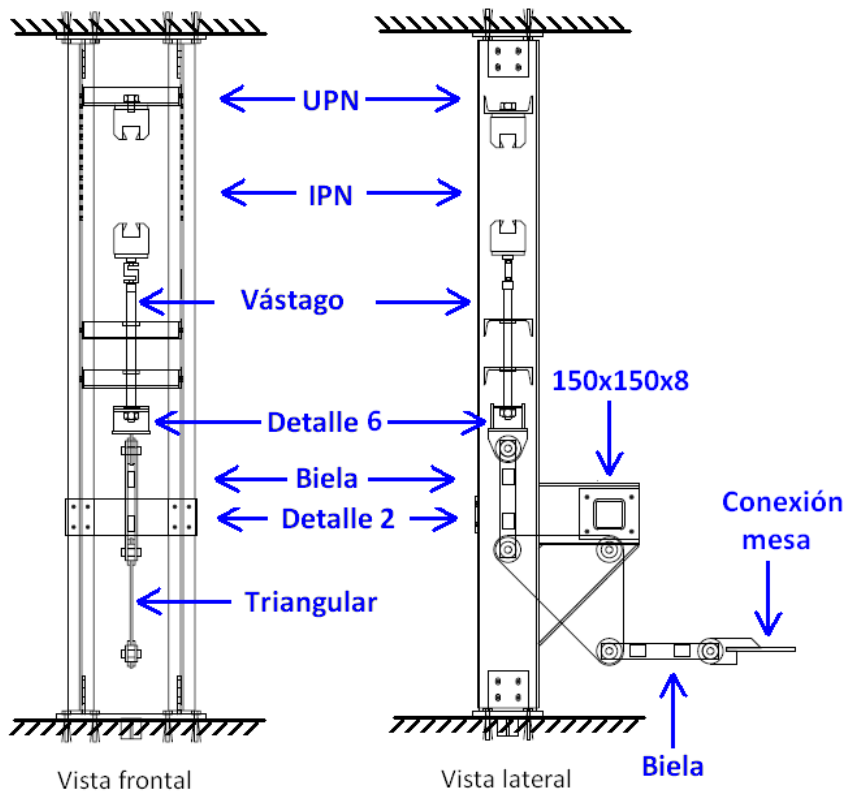
**Figura 3-3: Análisis de deformaciones**

Para la carga última de 5 toneladas (que es la capacidad del gato hidráulico y la carga de rotura para una probeta de Nitinol de 7 mm de diámetro) la deformación vertical es de 0.13 mm, mientras que la deformación lateral es de 0.28 mm. Para una probeta de 10 cm de largo este nivel de deformación consiste en el 0.13% y el 0.28% respectivamente, lo cual se encuentra dentro de un nivel aceptable de deformaciones (un orden de magnitud más abajo que la deformación máxima de trabajo, estimada en 8%).



### 3.2.1.2 Análisis de esfuerzos

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la verificación de las conexiones tanto apernadas como soldadas de la máquina, cuyo detalle se encuentra en el Anexo B. La notación a utilizar de aquí en adelante es:



**Figura 3-4: Notación**

En la Tabla 3-2 se resumen los factores de utilización de los elementos mencionados en la Figura 3-4 para una fuerza de 5 toneladas aplicada por el gato hidráulico. Las hipótesis de cálculo son las mencionadas en la sección 3.1. Introducción

Por otro lado, el desplazamiento vertical del perfil UPN ( $\Delta_1$ ) y el desplazamiento de los perfiles IPN dentro del plano de aplicación de la carga ( $\Delta_2$ ) calculados bajo las mismas hipótesis detalladas en el Anexo B se resumen en la Tabla 3-3. Sólo se consideraron los puntos de interés citados anteriormente.

**Tabla 3-2: Verificación conexiones\***

Elemento	FU [%]
UPN	31.5
IPN	7.6
Vástago	20.4
Detalle 2	37.4
Detalle 6	16%
Biela	74.6
Triangular	17.9
150x150x8	56.0
Conexión mesa	37.4

**Tabla 3-3: Deformaciones**

$\Delta_1$ [mm]	0.06
$\Delta_2$ [mm]	0.42

Existen discrepancias entre estos valores y los obtenidos con el análisis en SAP 2000. Esto se debe a las condiciones de apoyo consideradas en el análisis de deformaciones para el perfil UPN superior y a las consideraciones de diseño detalladas en el Anexo B, que demuestran ser muy conservadoras en el modelo de cantilever utilizado. Aún bajo estas discrepancias, se mantienen un orden de magnitud más bajo que la deformación de trabajo detallada en la sección 3.2.1.1.

---

\* Ver Anexo B.

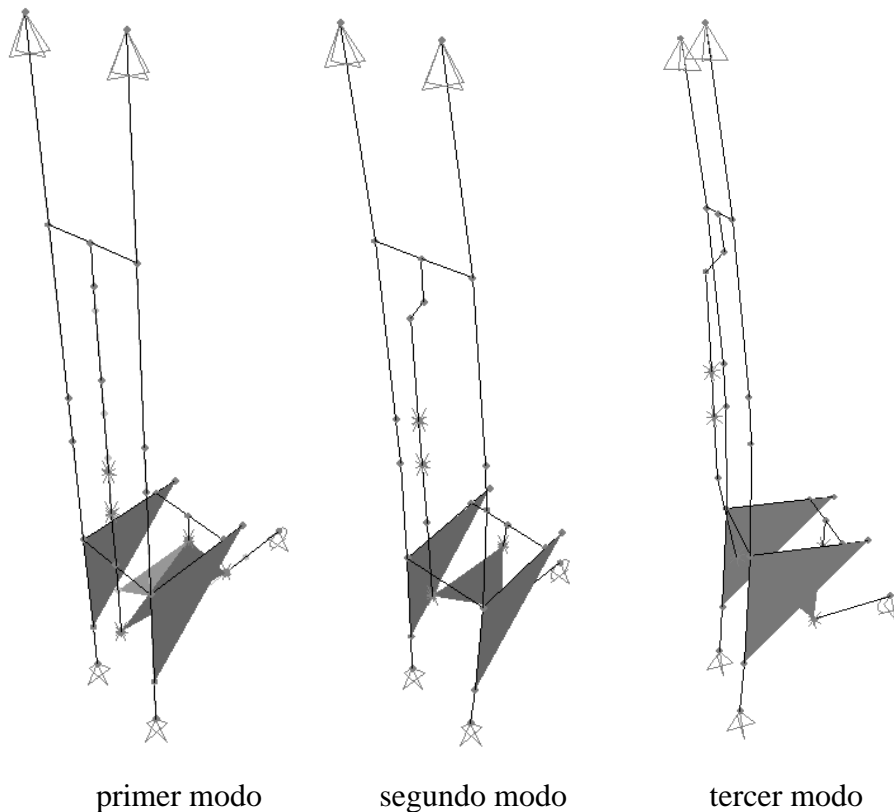
### 3.3 Análisis modal mediante SAP2000

Este análisis corresponde a una extensión del modelo en SAP2000 presentado anteriormente y consiste en determinar las frecuencias naturales de oscilación del sistema de ensayo de manera de evitar problemas de resonancia.

Debido a que el dispositivo permite ensayar probetas de distinto material, espesor y largo, el análisis que se presenta a continuación, se limita a las siguientes combinaciones:

- Probetas de Nitinol, según 3.1. Introducción
- Diámetro de la probeta: 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mm.
- Largo de la probeta<sup>9</sup>: 5, 10, 15, 20, 30 y 50 cm.

Luego de analizar los resultados, se observa que para todas las combinaciones el primer modo corresponde al movimiento de la máquina tal como si la mesa vibradora se estuviese moviendo (es decir, ensayando axialmente a la probeta) mientras que los modos segundo y tercero son traslaciones conjuntas de los perfiles IPN.



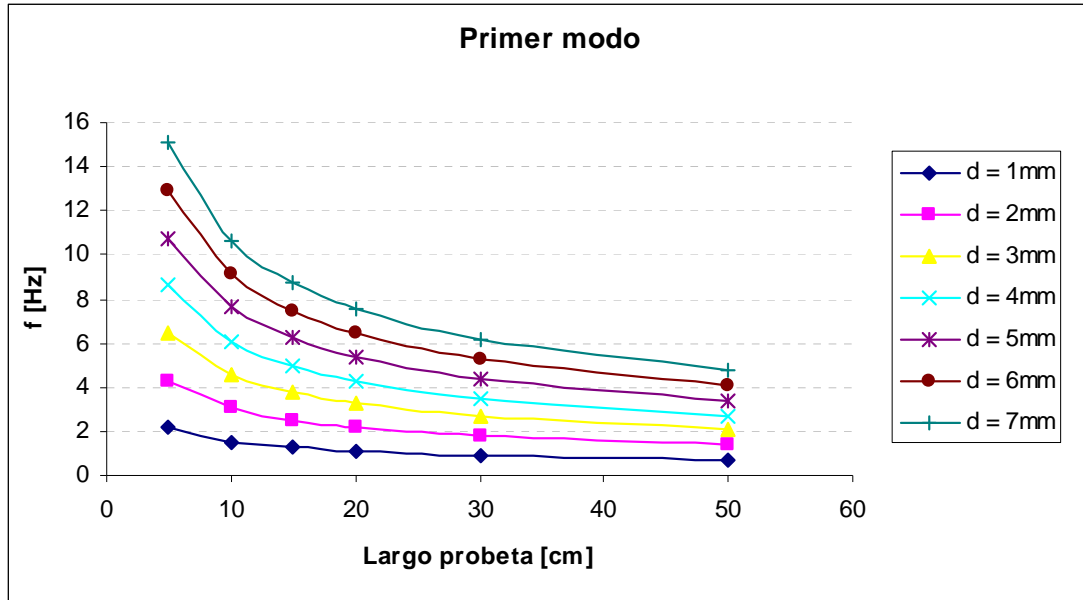
**Figura 3-5: Formas modales**

<sup>9</sup> Corresponde a la distancia libre entre las mordazas

Las variaciones en las frecuencias naturales producto de las distintas probetas se detallan en la siguiente la tabla:

**Tabla 3-4: Análisis Modal**

d [mm]	L [cm]	f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>2</sub> [Hz]	f <sub>3</sub> [Hz]
1	5	2.2	34.8	67.7
	10	1.5	35.6	67.9
	15	1.2	36.4	68.1
	20	1.1	37.1	68.3
	30	0.9	37.9	68.6
	50	0.7	37.6	68.9
2	5	4.3	34.8	67.7
	10	3.0	35.6	67.9
	15	2.5	36.4	68.1
	20	2.2	37.1	68.3
	30	1.8	37.9	68.6
	50	1.4	37.6	68.9
3	5	6.5	34.8	67.7
	10	4.6	35.6	67.9
	15	3.7	36.4	68.1
	20	3.2	37.1	68.3
	30	2.6	37.9	68.6
	50	2.0	37.6	68.9
4	5	8.6	34.8	67.7
	10	6.1	35.6	67.9
	15	5.0	36.4	68.1
	20	4.3	37.1	68.3
	30	3.5	37.9	68.6
	50	2.7	37.6	68.9
5	5	10.8	34.8	67.7
	10	7.6	35.6	67.9
	15	6.2	36.4	68.1
	20	5.4	37.1	68.3
	30	4.4	37.9	68.6
	50	3.4	37.6	68.9
6	5	12.9	34.8	67.7
	10	9.1	35.6	67.9
	15	7.5	36.4	68.1
	20	6.5	37.1	68.3
	30	5.3	37.9	68.6
	50	4.1	37.6	68.8
7	5	15.1	34.8	67.7
	10	10.7	35.6	67.9
	15	8.7	36.4	68.1
	20	7.5	37.1	68.3
	30	6.2	37.6	68.8
	50	4.8	37.6	68.8



**Figura 3-6: Análisis modal**

De la Figura 3-6 es posible estimar rápidamente la frecuencia natural del dispositivo en función de las propiedades geométricas de la probeta. Para los ensayos realizados en este trabajo, las frecuencias de interés se encuentran lejos de la frecuencia natural del dispositivo, por lo que este efecto no fue considerado.

## **Capítulo 4 : PROCESO DE FABRICACIÓN Y MONTAJE**

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se describe el proceso de fabricación y montaje. Para facilitar su comprensión, se describen inicialmente las partes de la máquina y los equipos de medición y control involucrados.

Debido a diversos factores tales como la metodología constructiva y algunos cambios y mejoras propuestos por la empresa manufacturera, ciertas partes y conexiones difieren respecto del diseño original. A modo de registro de esta etapa del proyecto, se hace una descripción cronológica detallada de dichos cambios y comentarios acerca de su repercusión en el comportamiento final de la máquina.

Finalmente se describe brevemente el proceso de montaje y sus resultados.

## 4.2. Dispositivos de medición y ensaye

Las magnitudes de las fuerzas y los desplazamientos en el dispositivo quedan determinados por las características de la mesa vibradora. Así, las mordazas y los equipos de medición utilizados son:

### a) Sistema de mordazas:

Las mordazas (marca INSTRON, modelo 2743-402) permiten sujetar correctamente probetas planas de hasta 6 mm y probetas cilíndricas de menos de 6 mm de diámetro. Este último parámetro depende del tipo de mandíbula (marca INSTRON, modelo 2704-521). Para efectuar ensayos con probetas de mayor diámetro se deben cambiar las mandíbulas.<sup>10</sup>



**Figura 4-1: Sistema de mordazas**

Estas mordazas mecánicas son aptas para el ensayo de materiales en forma estática y/o a fatiga y tienen una capacidad de  $\pm 100$  kN para ensayos dinámicos (124 kN para ensayos estáticos). La fijación de las probetas se logra mediante una llave de torque.

Para más detalles acerca de las conexiones entre el sistema de mordazas y el resto de la máquina ver sección 4.4.

---

<sup>10</sup> Ver Anexo D.

**b) Celda de carga:**

Se utiliza una celda de carga con el fin de obtener registro de la fuerza a la que es sometida la probeta y además para controlar durante el ensayo que la probeta no entre en compresión.

Esta celda de carga “tipo S” (marca Revere, modelo 9363) se utiliza con el fin de tener un registro de la fuerza aplicada en la probeta. Esto se logra a través de un voltaje proporcional a la fuerza que ésta genera al sufrir tracción o compresión.



**Figura 4-2: Celda de carga**

La celda tiene una capacidad de 5000 kg y su precisión es de clase C3.<sup>11</sup> Por otro lado, las condiciones ambientales de operación de la celda son una temperatura comprendida entre los -10 y los 40°C, sin exposición a la humedad.

Para más detalles acerca de las conexiones entre el sistema de mordazas y el resto de la máquina ver sección 4.4.

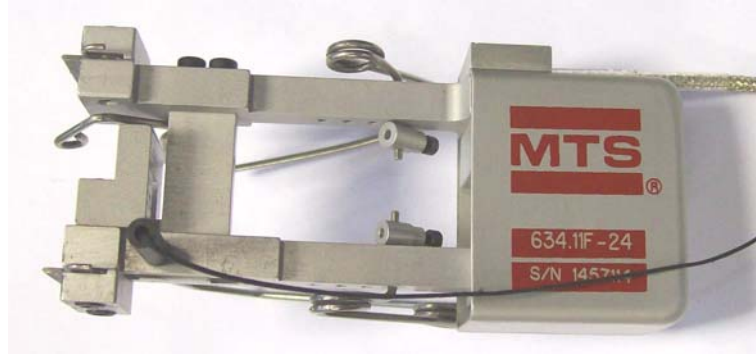
---

<sup>11</sup> Clasificación según OIML R-60



c) **Extensómetro:**

Se utilizó un extensómetro análogo MTS de 25 mm, con el cual fue posible medir con mayor precisión las deformaciones en las probetas ensayadas.



**Figura 4-3: Extensómetro MTS**

d) **Potenciómetro:**

Con este instrumento se miden los desplazamientos en el extremo inferior de la probeta. Se utilizaron potenciómetros análogos de 100 y 25 mm de carrera, con el fin de utilizar los primeros en la calibración inicial del dispositivo y los segundos en los ensayos finales debido a su mayor precisión en la toma de datos.

La Figura 4-4 muestra el sistema usado para la toma de datos mediante dos potenciómetros simultáneamente (En la figura, sólo se encuentra un potenciómetro instalado). Esto permite tomar como valor real el promedio de los valores obtenidos de manera independiente.



**Figura 4-4: Potenciómetro**

e) **Sistema de seguridad de montaje:**

Debido al peso propio que es necesario levantar para conectar el dispositivo de ensayo a la mesa vibradora (bielas, placa triangular, vástago, mordaza inferior)<sup>12</sup>, se incluyó un perfil metálico circular cortado longitudinalmente, con el fin de poder desconectar el artefacto de la mesa vibradora sin que éste lo golpee, generando daños.



**Figura 4-5: Dispositivo de seguridad de montaje**

---

<sup>12</sup> Más detalles en Figura 3-4.

Cabe destacar que si bien el trabajo comprende el ensayo de barras de Nitinol de 2.5 mm de diámetro, el diseño de la máquina (sistema estructural – mordazas – celda de carga) permite ensayos dinámicos de probetas de hasta 6 mm de diámetro y una carga máxima de 5 toneladas. Ésta última es una limitación de la mesa vibradora (Barrientos, 2008).

Luego, para la realización de ensayos con otras características, las modificaciones son las siguientes:

- Para ensayar probetas cilíndricas de más de 6 mm, se deben cambiar las muelas de las mordazas. Si las probetas son de más de 16 mm de diámetro, se debe cambiar el sistema completo de mordazas.<sup>13</sup>
- Para ensayar probetas de mayor o menor longitud, basta con modificar la posición ajustable de la mordaza superior.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> Ver Anexo D.

<sup>14</sup> Ver Anexo A.

### 4.3. Proceso de montaje

El proceso de montaje se resume en las siguientes etapas.

- a) Trazado de eje del dispositivo y sectores de perforación: Esta tarea se efectuó con la ayuda de un taquímetro, con el cual se lograron precisiones del orden de 1 mm.
- b) Preparación de superficies de contacto con placas de acero: Como se muestra en la Figura 4-6, se hizo una perforación de 12 cm de diámetro con el fin de proporcionar espacio suficiente para la llave de corte de la placa inferior.<sup>15</sup> Esto fue realizado con una máquina testiguera facilitada por IDIEM. Adicionalmente, se hicieron las perforaciones para los 8 pernos de anclaje para cada placa.

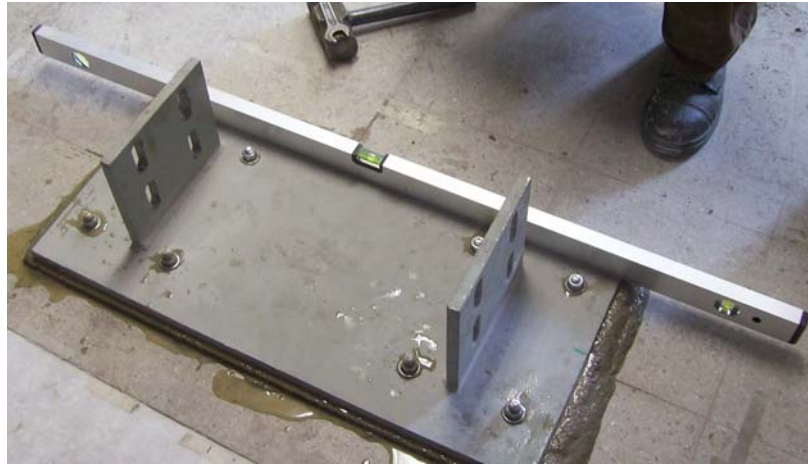


**Figura 4-6: Preparación de superficies de contacto**

- c) Montaje de placas de acero: Para asegurar una correcta adherencia entre la losa de reacción y el mortero de nivelación, se realizaron pequeñas perforaciones con un taladro. Debido al peso propio de las placas de acero (45 kg cada una app.) y a la fuerza producto del apriete de los pernos, se utilizó un marco de acero de 10 mm para asegurar un espesor uniforme de mortero de nivelación en toda la placa. Para el caso de la placa superior, se utilizó un sistema de levante con una gata, con lo cual se logró fijarla fácilmente. Finalmente se chequeó la nivelación de las placas con un nivel de mano.

---

<sup>15</sup> Más detalles en Anexo A



**Figura 4-7: Instalación de placa de acero (inferior)**

- d) Montaje de Perfiles IPN 300: Una vez fraguado el mortero de nivelación, se montaron los perfiles IPN con ayuda de un tecele. Fue una tarea difícil debido a que cada perfil tiene un peso aproximado de 220 kg, el tecele tenía una altura insuficiente y además se debió tener cuidado de no dañar la mesa vibradora contigua.



**Figura 4-8: Proceso de montaje (perfiles IPN 300)**

- e) Montaje del resto del dispositivo (sistema de bielas, vástago, etc.): Una vez montados los perfiles IPN se montaron diversas piezas de menor tamaño. En general, fue una tarea rápida, la cual culminó con la pintura del dispositivo.



**Figura 4-9: Proceso de ensamble en laboratorio**

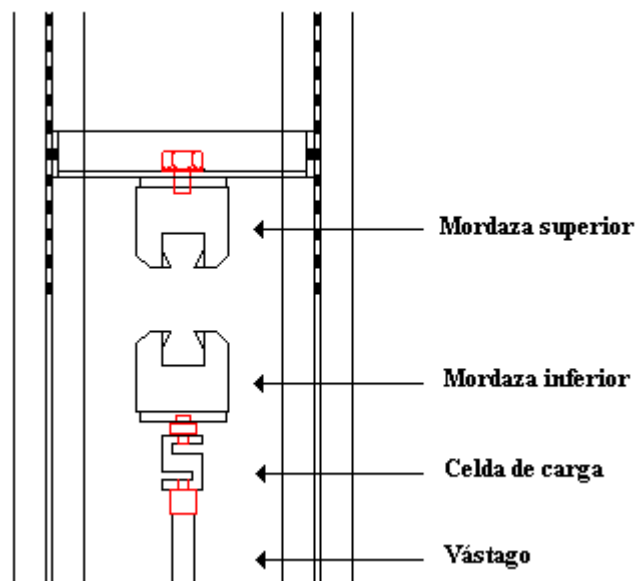
- f) Trabajos complementarios y adicionales: Debido a que el laboratorio tiene cielo falso, fue necesario removerlo para conectar la máquina a la losa superior. Se aprovechó de remover todo el cielo falso ubicado por sobre la mesa vibradora con el fin de permitir ensayos con modelos de mayor altura. Adicionalmente, se hizo una modificación en el tecele, la cual permitió aumentar su altura en poco más de 80 cm.



#### 4.4. Detalle de conexiones celda y mordaza

Las conexiones necesarias para conectar las mordazas y la celda de carga al dispositivo de ensayo quedan determinadas por el hilo del vástago y los hilos de la celda y las mordazas.

Los conectores se fabricaron en acero SAE 4340 (Cromo Níquel bonificado). El Níquel aumenta el límite de elasticidad del material y la resistencia a la tracción, mientras que el Cromo aumenta la dureza, la resistencia a la tracción, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión.



**Figura 4-10:** Esquema de conexiones

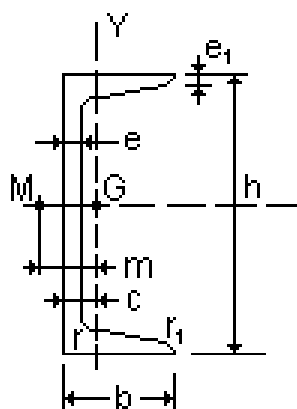


**Figura 4-11:** Conectores de acero SAE

## 4.5. Cambios respecto del diseño original<sup>16</sup>

A continuación se presentan los cambios efectuados respecto del diseño original. En el Anexo B se adjuntan las memorias de los cálculos realizados.

- a) Cambio de perfiles de acero UPN 260 por UPN 240: Debido a que tanto los perfiles UPN como los IPN son de ala inclinada, la distancia libre del alma del perfil I era menor a la estimada.



**Figura 4-12: UPN**

**Tabla 4-1: Datos perfiles UPN**

Propiedad	UPN 260	UPN 240
h [mm]	260	240
b [mm]	90	85
e [mm]	10	9.5
e <sub>1</sub> [mm]	14	13
A [mm <sup>2</sup> ]	48.3	42.3
I <sub>x</sub> [cm <sup>4</sup> ]	4820	3600
I <sub>x</sub> [cm <sup>4</sup> ]	317	248

Al disminuir la altura, el ancho y otras medidas del perfil según la Tabla 4-1, tanto la deformación vertical<sup>17</sup> como el factor de utilización a la flexión obtenidos son los siguientes:

**Tabla 4-2: Resultados perfiles UPN**

	UPN 260	UPN 240
FU	21.5 %	25.8 %
$\Delta_{5\_ton}$ [mm]	0.1124	0.1300

De la Tabla 4-2, se concluye que las variaciones respecto al diseño original no afectarán significativamente los resultados. Además, es importante señalar que este desplazamiento es

<sup>16</sup> Para entender esta sección, es necesario revisar previamente los planos del dispositivo (Anexo A).

<sup>17</sup> La deformación se obtuvo mediante el modelo en SAP 2000.



cuantificable mediante el uso de potenciómetros adicionales, para así poder calcular con mayor precisión los desplazamientos en los extremos de la probeta.

- b) Cambio de conexión apernada a perfil IPN: Nuevamente debido a la inclinación de las alas del perfil IPN, la placa de 65 cm x 18 cm x 12 mm (Ver detalle 2 en Anexo A) debió conectarse directamente al perfil I mediante huecos hilados en vez de la tuerca hexagonal inicialmente propuesta. Esta conexión fue realizada en el laboratorio y debido a una limitación del proceso constructivo, se efectuó con pernos de 5/8" en vez de los pernos de 3/4" inicialmente propuestos.
  
- c) Cambio en perfil cajón 150 x 150 x 8 (Ver sección H en Anexo A): Debido a problemas de abastecimiento de la empresa manufacturera, el perfil utilizado se obtuvo de plegar una plancha de acero de 8 mm de espesor. Este cambio no afecta el comportamiento del dispositivo.

## **Capítulo 5 : SISTEMA DE CONTROL Y TOMA DE DATOS**

### **5.1. Introducción**

En este capítulo se describe el sistema de control diseñado para el dispositivo así como también los equipos utilizados en la toma de datos.

El sistema de control coordina la acción del gato hidráulico que mueve la mesa vibradora de manera de producir en la probeta las sollicitaciones deseadas. Éstas tienen relación con características estáticas (fuerza, desplazamiento) y dinámicas posibles de reproducir por el sistema oleohidráulico de la mesa.

El sistema de control fue diseñado de manera de cumplir con las siguientes características:

- Detectar automáticamente la rotura de la probeta. Este requerimiento tiene por objetivo proteger al sistema oleohidráulico, computacional y a los sensores (celda de carga, extensómetro y potenciómetros) de movimientos bruscos que puedan dañar al dispositivo.
- Controlar el movimiento del dispositivo con un doble lazo. Debido a que las probetas a ensayar se pandean fácilmente y presentan deformaciones remanentes bajo cargas en el rango no lineal, para ensayos cíclicos no sólo es necesario controlar el desplazamiento máximo mediante desplazamiento sino que también mediante la medición de la fuerza de modo que la probeta nunca se comprima.
- Contar con una interfaz que permita seguir correctamente un protocolo seguro de manipulación de manera de proteger al dispositivo, la probeta y al usuario.

El registro de desplazamiento para el cual el sistema de control fue diseñado consta de la combinación secuencial de tres curvas.

La primera de ellas consiste en una *función rampa* capaz de pretensar la probeta. Se utiliza la función de Haversine debido a que es una curva aplanada en sus extremos con lo cual es posible obtener movimientos suaves tanto al principio como al final. Esta curva se encuentra definida por la siguiente ecuación:

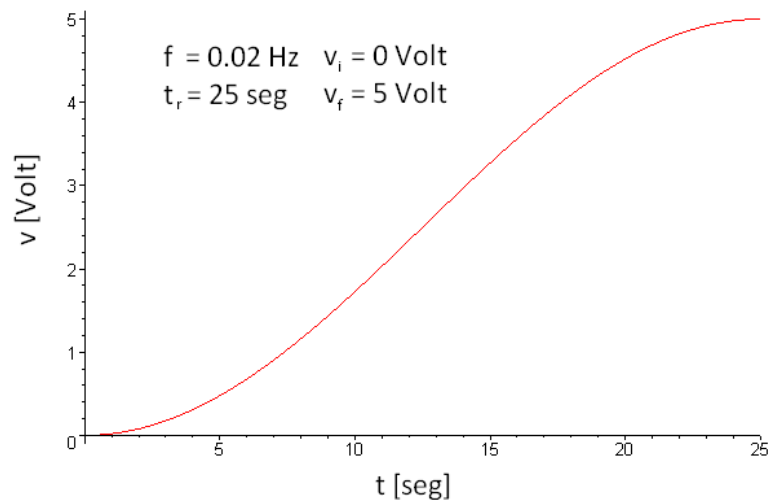
$$y(v_i, f, t, v_f) = (v_i - v_f) \cdot (1 - \text{Sen}^2(\pi \cdot f \cdot t)) + v_f$$

, donde:

$$f = \frac{1}{T} \quad T = 2 \cdot t_r \quad n = \frac{1}{2 \cdot f \cdot \Delta}$$

, con:

- y : Función de Haversine
- $v_i$  : Voltaje inicial [volt]
- $v_f$  : Voltaje final [volt]
- $t$  : Tiempo [s]
- $T$  : Periodo [s]
- $t_r$  : Tiempo de rampa [s]
- $n$  : Número de ciclos
- $\Delta$  : Tiempo de muestreo [s]

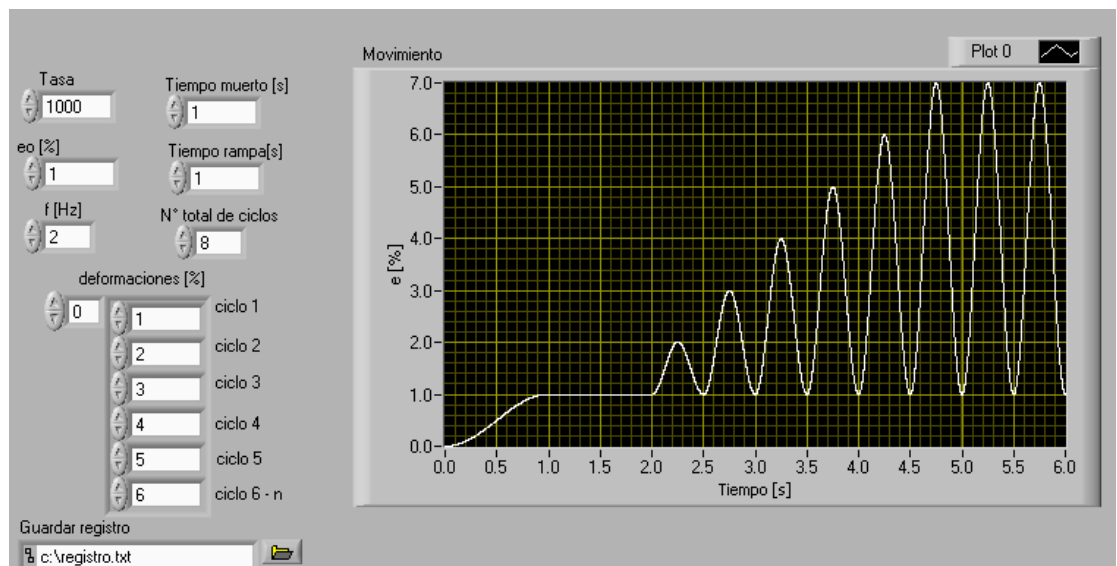


**Figura 5-1: Función de Haversine**

El valor de la pretensión obtenida luego de la rampa consiste en el nivel crítico de carga, es decir, el valor más bajo de carga al que puede ser sometida la probeta en el ensayo.

Luego de la función de Haversine, el registro de desplazamientos posee un “tiempo muerto” el cual consiste en una cantidad de tiempo ajustable en la cual es posible chequear los voltajes obtenidos a partir de los sensores, como por ejemplo, el esfuerzo de pretensión logrado mediante la rampa.

Finalmente, el registro de desplazamientos consta de una *curva de ciclado* que admite una frecuencia fija y amplitud variable para los 5 primeros ciclos, como se observa en la Figura 5-2.



**Figura 5-2: Registro de desplazamiento**

Teniendo en cuenta el trabajo realizado por Torra (2009) y otros trabajos en los que se han utilizado con éxito sistemas de fijación para probetas de Nitinol capaces de impedir esfuerzos de compresión, se diseñó un dispositivo similar con el fin de complementar la rutina computacional de control. Su funcionamiento se detalla en la sección 5.3.

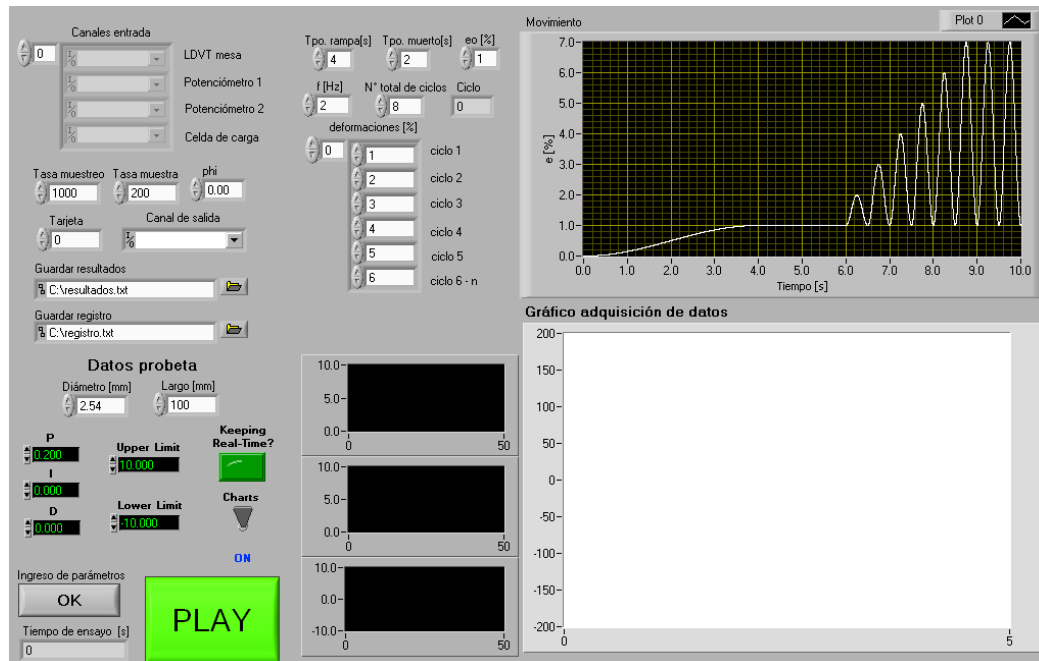
## 5.2. Software de control

El software utilizado para controlar por desplazamiento al gato hidráulico de la mesa vibradora es *LabVIEW* (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). La ventaja de este programa respecto de otros lenguajes de programación es que no se basa en códigos de línea sino que en un lenguaje gráfico en donde las operaciones a realizar se programan directamente realizando los diagramas de bloque.



**Figura 5-3: Sistema de control**

El panel frontal del sistema de control, se muestra en la siguiente figura:



**Figura 5-4: Panel frontal**

Los controladores del sistema son:

- Canales de entrada/salida: Sirve para seleccionar en qué canal de la tarjeta PCI se conectan las entradas/salidas análogas.
- Tasa de muestreo [muestras/s]: Es la tasa a la cual el computador toma datos de los sensores para efectuar el control del dispositivo de ensayo.
- Tasa de muestra [muestras/s]: Es la tasa a la cual el computador toma datos de los sensores y genera un registro de ellos.
- Datos probeta: Consiste en el largo y el diámetro de la probeta a utilizar.
- Subrutina de registro de desplazamientos: Consiste en la rutina detallada en 5.1.
- Controlador PID: Consiste en las constantes proporcional, integral y derivativa, además de los voltajes límites.
- Botón OK: Este controlador debe ser presionado cuando se hayan completado todos los valores de control necesarios para comenzar el ensayo.
- Botón PLAY: Este botón debe ser presionado cuando se tenga certeza de que se han ingresado correctamente los parámetros de ensayo, pues el registro de desplazamiento comienza a ejecutarse. En caso de emergencia, se debe presionar este botón para detener el ensayo.

Los indicadores de la rutina de control son los siguientes:

- Gráfico de adquisición de datos: Este gráfico muestra los voltajes obtenidos a través de los canales de entrada previamente configurados.
- Gráfico de estado del controlador PID: Consiste en el gráfico de la variable del proceso, su set point y la señal de salida del controlador.
- Indicador de tiempo real: Indica si el controlador PID es capaz de procesar los datos en tiempo real.
- Tiempo de ensayo: Consiste en el tiempo transcurrido desde que se presiona el botón PLAY.

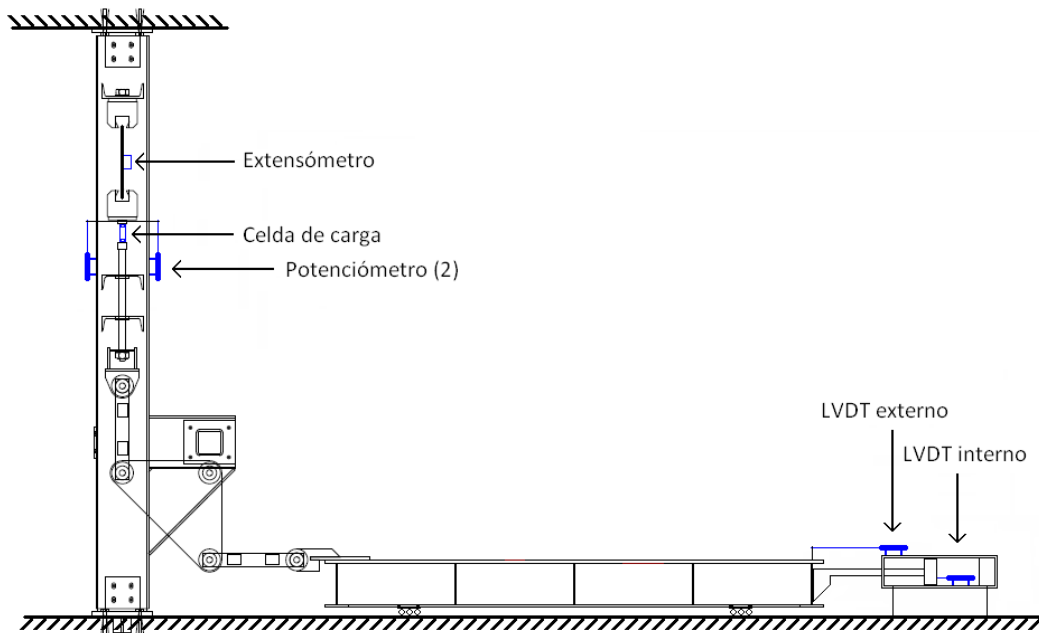
### 5.2.1. Estructura general

Tanto para la adquisición de datos como para el control del dispositivo, LabVIEW requiere de una tarjeta PCI (componente de interconexión periférico). En este caso, según lo expuesto en la sección 4.2. Dispositivos de medición y ensaye, todos los sensores involucrados son del tipo analógico. Para estos efectos, el hardware disponible es una tarjeta PCI modelo NI 6036E.

**Tabla 5-1: Tarjeta PCI – NI6036E**

Entradas analógicas	Número: 16 Resolución: 12 ó 16 bits Frecuencia de muestreo: 200 kS/s Rango de entrada: $\pm 0,5 - \pm 10$ V
Entradas digitales	Número: 8 Resolución: 2 ó 24 bits
Salidas analógicas	Número: 2 Resolución: 16 bits Frecuencia de muestreo: 10 kS/s Rango de salida: $\pm 10$ V
Triggers	Digital

La cantidad y disposición de los sensores en la máquina de ensayo se resume en la siguiente figura:<sup>18</sup>



**Figura 5-5: Sensores**

<sup>18</sup> Para más detalles, ver sección sección 4.2.

### Entradas análogas:

- LVDT interno: consiste en el dispositivo LVDT existente en el interior del pistón hidráulico. Este sensor es utilizado como variable de control, pues es la señal de entrada que informa de la posición del pistón (y por ende de la posición de la mordaza inferior respecto de la superior).
- LVDT externo: consiste en un sensor LVDT similar al interno, el cual puede ser utilizado en forma alternativa. Además, con una segunda señal de entrada es posible chequear la posición de la mesa a través de una segunda fuente.
- Extensómetro: Este sensor se ubica al centro de la probeta<sup>19</sup> con el fin de obtener un registro detallado de deformaciones en el sector central de la misma. Para diámetros de barra como los utilizados en este trabajo, Churchill et al. (2009) han mostrado que el extensómetro no siempre brinda información confiable pues en la mayoría de los casos, los esfuerzos de transformación no ocurren al centro de la barra sino en las vecindades de las fijaciones a las mordazas.
- Potenciómetro (2): Según se detalla en la sección 4.2, se utilizan dos potenciómetros con el fin de promediar los desplazamientos medidos para así obtener una medida más precisa. En el proceso de ensayos experimentales estos dispositivos son utilizados para la determinación del *factor de amplificación* del movimiento. Una vez calibrado el dispositivo, la señal obtenida de los potenciómetros consiste en el registro de desplazamientos impuesto a la probeta.

### Salidas análogas:

- Servo válvula: La única salida análoga del sistema de control consiste en el voltaje entregado a la servo válvula. Ésta genera un desplazamiento en el servo actuador permitiendo así el desplazamiento longitudinal de la mesa y por ende, de las mordazas.

---

<sup>19</sup> Al centro según distancia libre entre mordazas.



## 5.2.2. Procesamiento de datos

### 5.2.2.1 Controlador PID

Para controlar de manera precisa el movimiento del gato hidráulico, se incluye en el sistema de control, una subrutina PID (proporcional, integral, derivativo). Esta subrutina es capaz de corregir la señal de salida en función del error obtenido mediante el sensor LVDT.

El control proporcional consiste en una modificación de la señal de salida de modo que ésta se pondera por un factor proporcional al error medido. La parte integral permite corregir la señal de salida por un factor proporcional al error acumulado, mientras que la acción derivativa lo hace respecto de un factor proporcional a la velocidad de cambio del error. Sea  $e(t)$  el error de control y  $u(t)$  la variable de control, la expresión que combina estos tres efectos es (Ogata, 2003):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde,

$K_p$  : Constante proporcional

$T_i$  : Tiempo integral

$T_d$  : Tiempo derivativo

Las constantes integral y derivativa se calculan como sigue:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad : \text{ constante integral}$$

$$K_d = \frac{K_p}{T_d} \quad : \text{ constante derivativa}$$

Las constantes proporcional, integral y derivativa deben ser fijadas por el usuario y dependen del sistema a controlar y del tipo de movimiento deseado. Para ajustar inicialmente estos valores se utilizan las reglas de Ziegler-Nichols, las cuales consisten básicamente en dos métodos (Ogata, 2003):

1. Método de respuesta en lazo abierto a una señal escalón.
2. Método de respuesta en frecuencia.

### 5.2.2.1 Ajuste para deformaciones remanentes

Debido a que los ensayos previstos someten al material más allá del rango lineal de deformaciones, existen deformaciones remanentes, las cuales el dispositivo de ensayo debe ser capaz de detectar para así no comprimir la probeta, pues ésta se debilita al sufrir inestabilidad por pandeo.

Para abordar este requerimiento, se utiliza la siguiente notación:

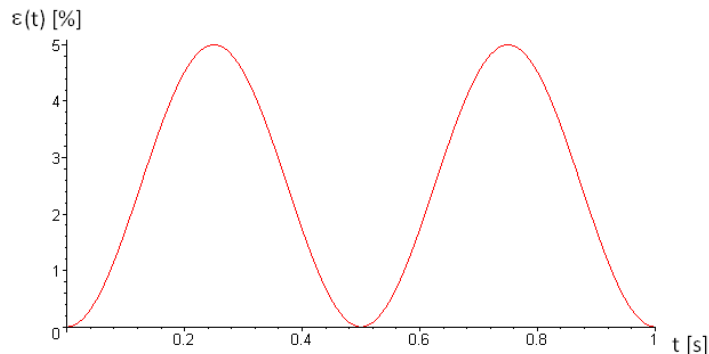
$\varepsilon_{oi}$  : Deformación máxima de la probeta para el ciclo  $i$  [%].

$f$  : Frecuencia [Hz]

$\omega$  : Frecuencia angular [rad/s] ( $\omega = 2\pi \cdot f$ )

$T$  : Periodo [s]

Así:  $\varepsilon_i(t) = \frac{\varepsilon_{oi}}{2} \left( 1 - \text{Sen} \left( \omega \cdot t + \frac{\pi}{2} \right) \right)$  para  $0 \leq t \leq T$  : Deformación ciclo  $i$ .



**Figura 5-6:** Deformación para  $\varepsilon = 5\%$ ,  $f = 2\text{Hz}$  (2 ciclos)

Se definen además las siguientes magnitudes:

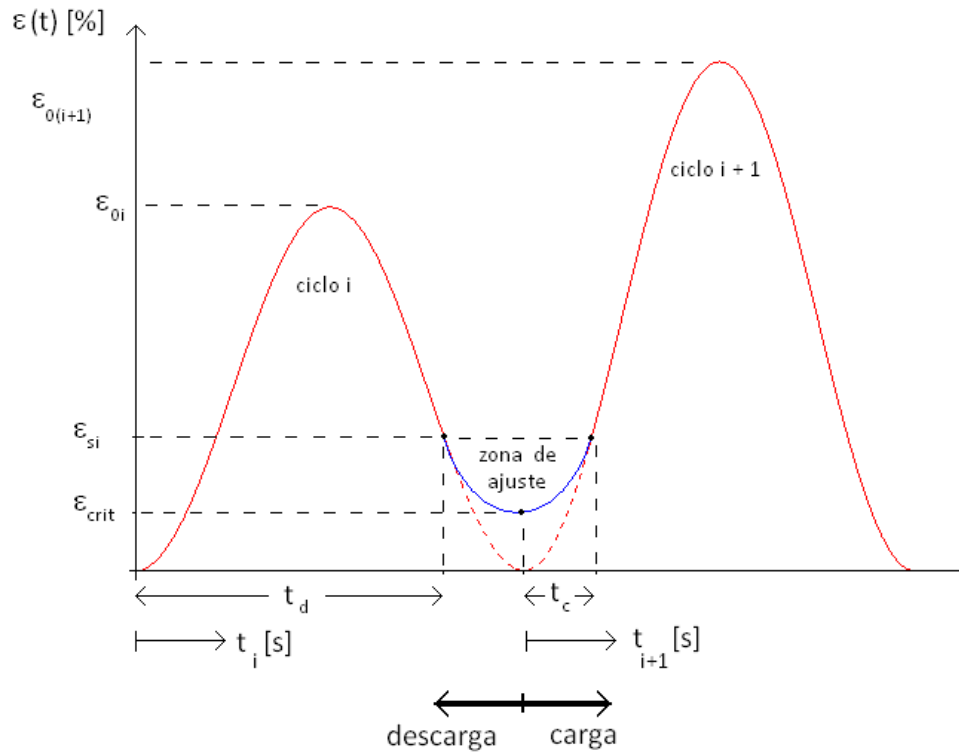
$F_{crit}$  : Carga crítica. Consiste en el nivel de carga que no puede ser sobrepasado (Fuerza de pretensión)

$\varepsilon_{crit}$  : Deformación para la cual se tiene una carga igual a  $F_{crit}$ .

$\varepsilon_{si}$  : Deformación para la cual comienza el ajuste de deformación.

$\phi$  : Factor de anticipación ( $\varepsilon_{si} = \phi \cdot \varepsilon_{ci}$ ) con  $\phi \in (0,1)$

Se utilizan dos polinomios de tercer grado, de manera que uno hace un ajuste para la *zona de descarga* y el otro para la *zona de carga*. Notar que según lo indicado en la sección 5.1. Introducción, los ciclos no necesariamente poseen igual amplitud de oscilación.



**Figura 5-7: Ajuste de curva de desplazamientos**

Sea un polinomio cúbico de la forma:  $y(t) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad a, b, c, d \in R$

y sea  $\dot{\varepsilon}_i(t) \equiv \frac{d\varepsilon(t)}{dy} = \frac{\omega\varepsilon_i}{2} \text{Sen}(\omega \cdot t)$

Al imponer condiciones de continuidad a las funciones  $\varepsilon_i(t)$  y  $\dot{\varepsilon}_i(t)$ , los valores de las constantes son:

Ajuste de carga:

$$a = \frac{f^2(f\dot{\varepsilon}_s t_d - 2f\varepsilon_s(1-\phi) - \dot{\varepsilon}_s)}{(ft_d - 1)(f^2 t_d^2 - 2ft_d + 1)}$$
$$b = \frac{-f(f^2 \dot{\varepsilon}_s t_d^2 - f(3f\varepsilon_s(1-\phi) - \dot{\varepsilon}_s)t_d - 3f\varepsilon_s(1-\phi) - 2\dot{\varepsilon}_s)}{(ft_d - 1)(f^2 t_d^2 - 2ft_d + 1)}$$
$$c = \frac{2f^2 \dot{\varepsilon}_s t_d^2 - f(6f\varepsilon_s(1-\phi) + \dot{\varepsilon}_s)t_d - \dot{\varepsilon}_s}{(ft_d - 1)(f^2 t_d^2 - 2ft_d + 1)}$$
$$d = \frac{f^3 \phi \varepsilon_s t_d^3 - f(3f\phi \varepsilon_s + \dot{\varepsilon}_s)t_d^2 + (3f\varepsilon_s + \dot{\varepsilon}_s)t_d - \varepsilon_s}{(ft_d - 1)(f^2 t_d^2 - 2ft_d + 1)}$$

Ajuste de descarga:

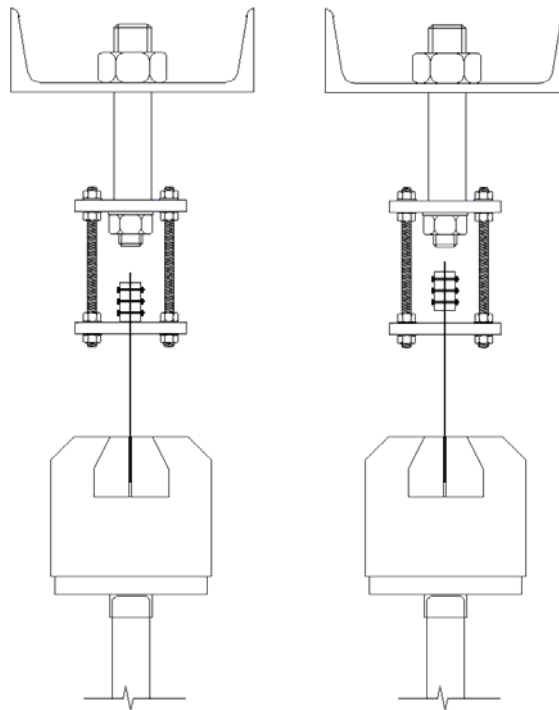
$$a = \frac{1}{t_c^2} \left( \dot{\varepsilon}_s - \frac{2\varepsilon_s(1-\phi)}{t_c} \right)$$
$$b = \frac{3\varepsilon_s(1-\phi)}{t_c^2} - \frac{\dot{\varepsilon}_s}{t_c}$$
$$c = 0$$
$$d = \phi \varepsilon_s$$

La solución de este sistema de ecuaciones se encuentra integrada en las subrutinas “ajuste\_carga.vi” y “ajuste\_descarga.vi”, adjuntos en el Anexo D.

### 5.3. Sistema de fijación

Un dispositivo complementario al sistema de control computacional consiste en un mecanismo capaz de impedir la compresión de las barras de Nitinol para evitar que se debiliten al ser pandeadas. Esto puede ocurrir debido a que bajo deformaciones fuera del rango lineal del material, éste conserva deformaciones remanentes, las cuales se acumulan en el caso de ensayos cíclicos.

El mecanismo consiste básicamente en una placa perforada en su centro, de manera de que la probeta sea capaz de deslizar libremente dentro de la perforación en caso de ser sometida a compresión. Este extremo de la probeta se fija con un dispositivo compuesto de dos piezas metálicas que rodean la probeta y aseguran que ésta no resbale.



**Figura 5-8: Esquema del sistema de fijación**

La ventaja de utilizar este dispositivo de manera complementaria al sistema de control computacional, es que elimina la necesidad de utilizar la señal de entrada de la celda de carga como variable de control. Así, el gato hidráulico de la mesa vibratoria queda controlado por desplazamiento.

Cabe hacer notar que para instalar este dispositivo en la máquina de ensayo es necesario desmontar la mordaza superior, pues éste se fija al perfil UPN superior.

## Capítulo 6 : ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 6.1. Introducción

Las probetas de Nitinol disponibles para los ensayos definitivos se limitan a siete, por lo que para conocer el comportamiento del dispositivo de ensaye y confeccionar un protocolo de uso, se ensayan alambres de acero de 2.1 mm y 6mm de diámetro. Además, se ensayaron probetas de Nitinol de 2.54 mm de diámetro utilizadas anteriormente (Olea, 2009).

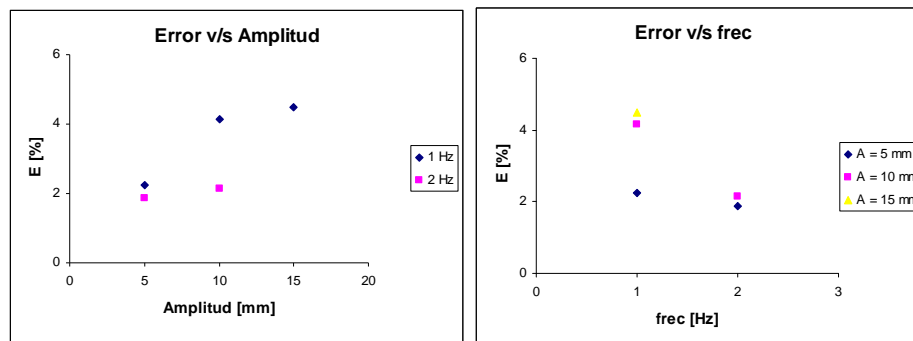
El proceso de puesta en marcha se inicia con la calibración de los sensores involucrados en los ensayos. A continuación se muestra una tabla resumen con las constantes de proporcionalidad de cada sensor utilizado:

**Tabla 6-1: Constantes de proporcionalidad sensores**

Sensor	Constante	Unidad
celda de carga	204.22	kgf/Volt
extensómetro	0.711061	mm/Volt
potenciómetro 100	5.8365	mm/Volt
potenciómetro 25	37.71092	mm/Volt
LVDT externo	63.479	mm/Volt

Para la celda de carga se utilizó la calibración de fábrica, la cual garantiza una precisión de  $\pm 0.5$  kgf, según los catálogos incluidos en el Anexo D. Por otro lado, la constante depende de la ganancia asignada al sensor.

Una vez calibrados los sensores, se realiza un estudio del error porcentual del desplazamiento nominal de la mesa vibradora respecto del desplazamiento real de un registro sinusoidal de desplazamientos. Los resultados se resumen en las siguientes figuras.



a) Error porcentual v/s amplitud

b) Error porcentual v/s frecuencia

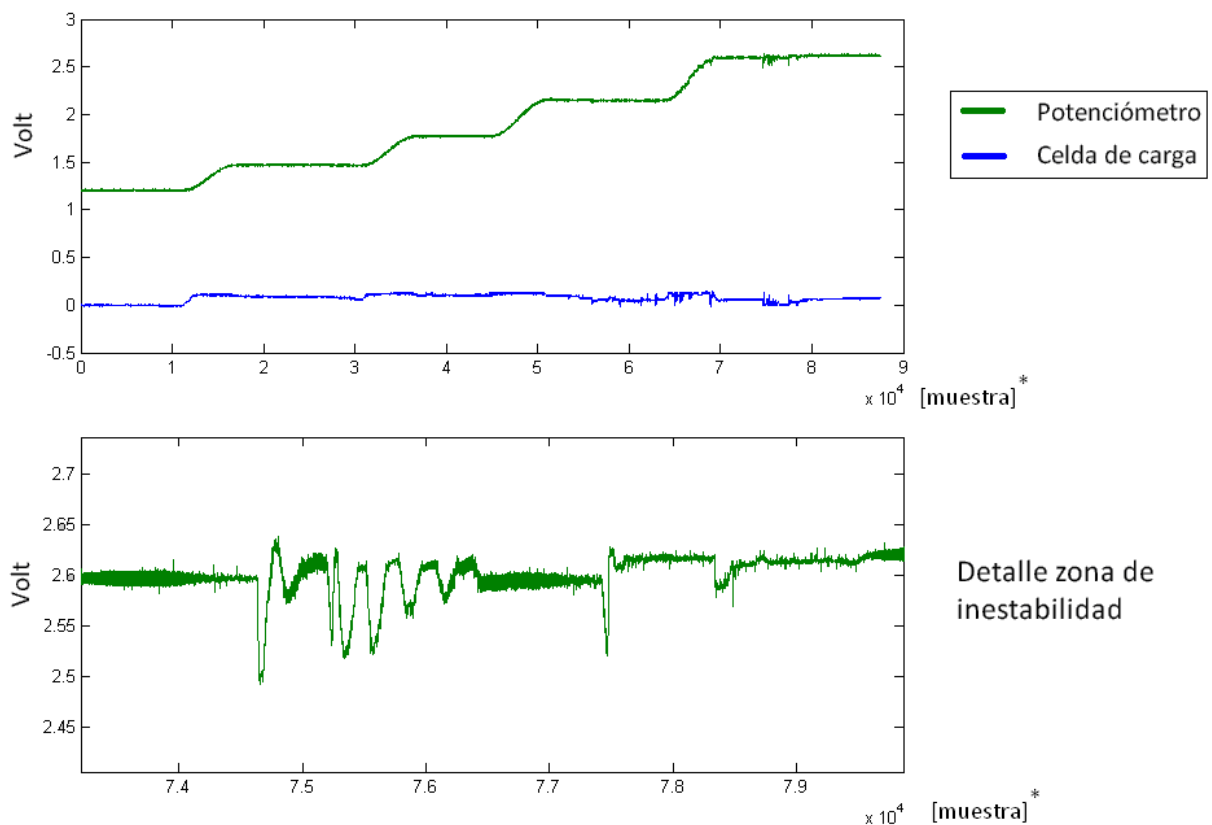
**Figura 6-1: Error porcentual**

En el Anexo C se presenta un protocolo de uso del dispositivo, el cual resume la forma de realizar ensayos experimentales en forma segura.

Los resultados de los ensayos experimentales fueron filtrados mediante un filtro de Butterworth. Para frecuencias del orden de 1 Hz, se observó que con un filtro pasa bajos a 3 Hz se logran importantes mejoras en los datos obtenidos directamente de los sensores. Todos los cálculos fueron realizados mediante el software *Matlab*.

## 6.2. Ensayos estáticos

Las primeras pruebas realizadas fueron ensayos estáticos, cuyo objetivo fue probar el sistema de mordazas y la celda de carga. Imponiendo sucesivos desplazamientos, los resultados típicamente obtenidos se muestran en la Figura 6-2.



**Figura 6-2: Ensayos estáticos**

\*: Los registros fueron obtenidos con una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo.

En la Figura 6-2, se observa que la mesa vibradora presenta inestabilidades, lo cual puede deberse al sistema de control interno o bien a una falla en la válvula dinámica. Este fenómeno se manifestó en la mayoría de los ensayos realizados, con la siguiente particularidad: la existencia de inestabilidades se acrecienta a medida que el aceite del sistema oleohidráulico se calienta producto del uso del dispositivo. Además, en la mayoría de los casos, las inestabilidades son mayores en movimientos de baja frecuencia y cuando la mesa vibradora se encuentra en reposo. Esto último se debe a que en dichos casos la válvula dinámica debe soportar toda la presión impuesta por el sistema oleohidráulico hasta iniciar el movimiento.<sup>20</sup> En la práctica se observó que la válvula se calienta luego de sucesivos ensayos, acrecentando las inestabilidades.

Las inestabilidades presentes en el sistema de control dificultaron la realización de ensayos experimentales que permitieran probar la rutina de control diseñada en Labview. Producto de esto, se optó por iniciar el proceso de puesta en marcha y ensayos experimentales utilizando el dispositivo de fijación descrito en la sección 5.3 de este informe. Si bien la utilización de este dispositivo permite excluir los efectos de la inestabilidad del sistema para movimientos de compresión<sup>21</sup>, sí afecta en todos los movimientos de esfuerzo axial de tracción.

---

<sup>20</sup> Para la fijación de la probeta y colocación del extensómetro se requiere que el sistema se encuentre presurizado (Ver Anexo C).

<sup>21</sup> El gato hidráulico se extiende, moviendo hacia adelante a la mesa vibradora.

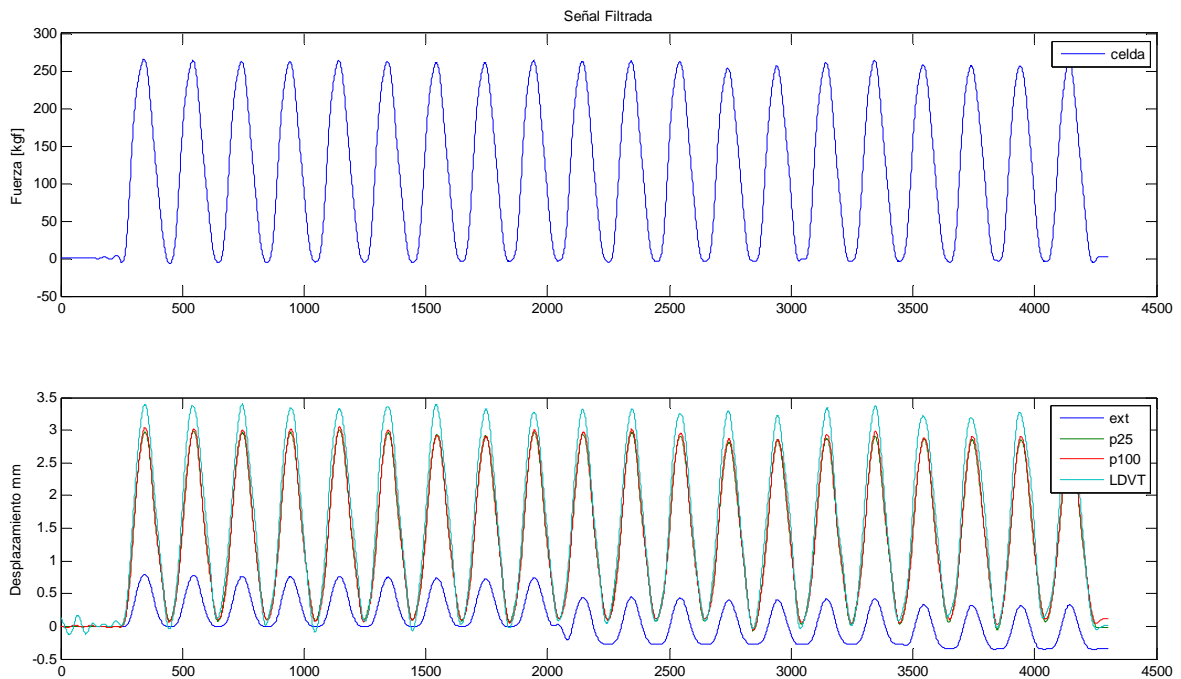


### 6.3. Ensayos de probetas de Nitinol previamente utilizadas

Estas probetas se utilizaron principalmente para:

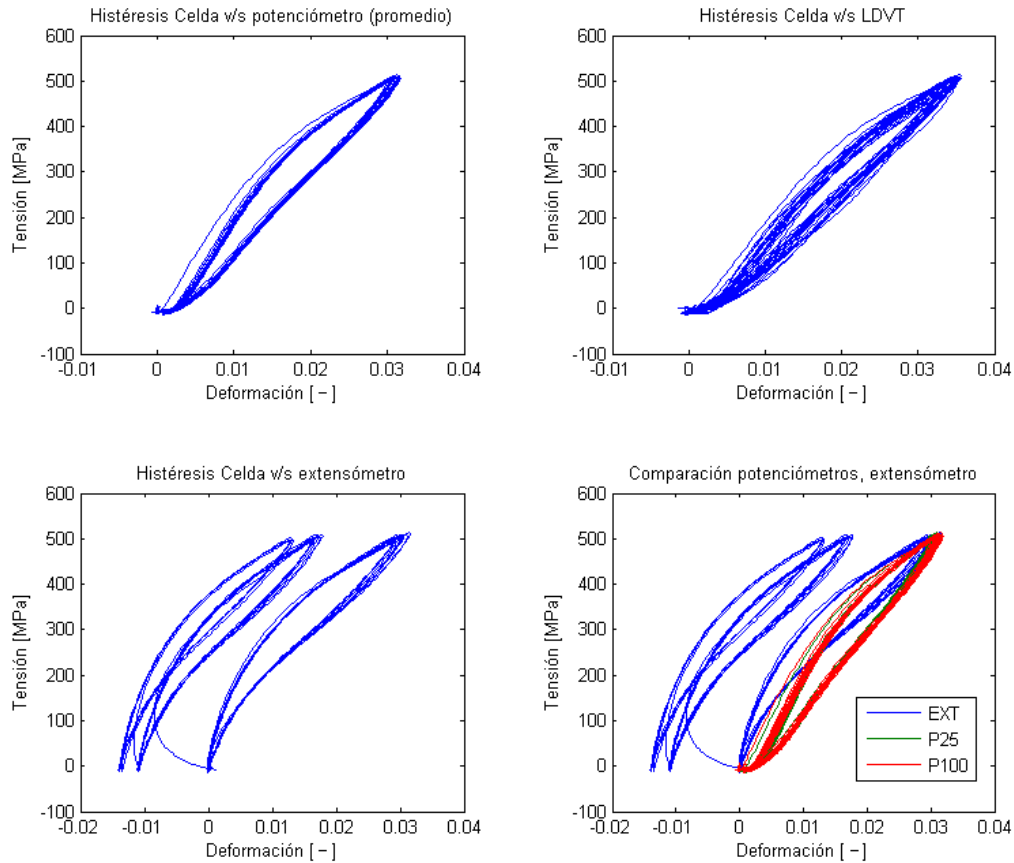
- conocer el factor de amplificación que existe entre el desplazamiento horizontal de la mesa y el movimiento vertical de la mordaza inferior.
- Incorporar el uso de un extensómetro, situado en el centro de la probeta.
- Desarrollar una rutina de procesamiento de datos adecuada para escalar, filtrar, graficar y procesar los resultados experimentales de forma rápida y eficiente.<sup>22</sup>

Para estos propósitos se trabajó con registros sinusoidales de desplazamiento de amplitudes (pico a pico) entre los 2 y 9.5 mm y frecuencias 0.1, 0.5, 1 y 2 Hz.



**Figura 6-3: Ensayos preliminares 0.5 Hz, 20 ciclos, 4mm.**

<sup>22</sup> Esta rutina se incluye en el Anexo C de este informe.

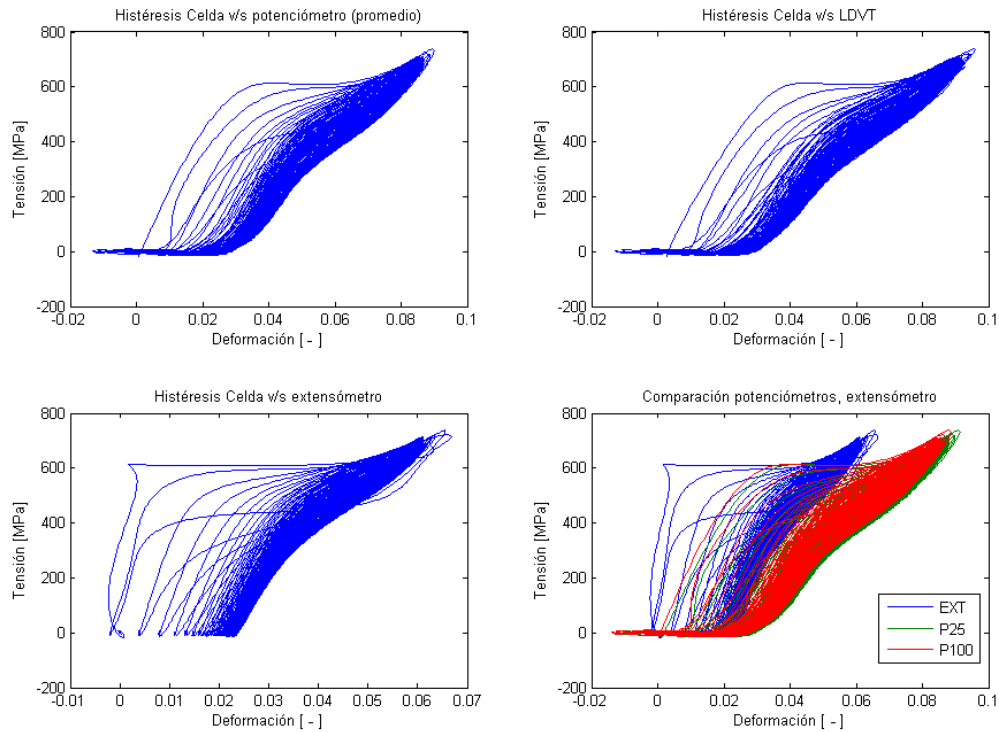


**Figura 6-4: Ensayos preliminares 0.5 Hz, 20 ciclos, 4mm.**

De los últimos dos gráficos presentados, es posible observar que:

- Ambos potenciómetros miden cantidades similares, pues sus gráficas se encuentran prácticamente superpuestas.
- El factor de amplificación es menor que uno, es decir, la mordaza inferior se mueve menos que la mesa vibradora. Si bien el factor de amplificación debiese ser cercano a 1, la biela que conecta la mesa vibradora con el dispositivo de ensaye no quedó horizontal debido a una diferencia de cota en la losa del laboratorio, lo cual incide en un menor factor de amplificación.
- El extensómetro resbala debido a que el diámetro de las probetas está en el límite de operación de éste. Se probó con fijaciones de goma especialmente diseñadas para estos efectos, sin embargo, se obtuvieron idénticos resultados. El inconveniente fue resuelto

bajando la frecuencia de ensaye a 0.1Hz y por medio de dos pequeñas muescas en la probeta, justo donde el extensómetro está en contacto con la probeta. Si bien esto genera concentración de tensiones, se fue cuidadoso de no alterar la probeta más allá de lo necesario. Como se observa en los siguientes gráficos, el resultado fue positivo.



**Figura 6-5: Ensayos preliminares 0.1 Hz, 100 ciclos, 8mm (probeta 13).**

De la Figura 6-5, es posible observar que:

- Se ha solucionado el problema del deslizamiento del extensómetro, sin embargo, a diferencia de la Figura 6-4, el extensómetro mide una menor cantidad de deformación. Esto se debe a que la distribución de deformaciones no es uniforme a lo largo de la probeta, concentrándose en los bordes de las mordazas (Churchill et al., 2009).
- Se reproduce correctamente el ciclo de histéresis del Nitinol. La tensión de transformación es del orden de 600 MPa, la deformación remanente es del orden del 2%, existe endurecimiento para deformaciones superiores al 6% y una baja en la tensión de transformación a medida que el material es sometido a esfuerzos repetidos en el tiempo.

### **Factor de amplificación:**

El factor de amplificación geométrico se obtiene del cociente entre los desplazamientos registrados por los potenciómetros (promedio) y los desplazamientos registrados por el LVDT. En la siguiente tabla se observa que esta cantidad depende del desplazamiento máximo requerido, pues a mayor desplazamiento existe un mayor giro de las bielas respecto del plano horizontal.

**Tabla 6-2: Factor de amplificación ensayos preliminares**

Probeta	$\Delta_{\max}$ mm	f Hz	ciclos	FA
12	4	1	20	0.8548
12	4	0.5	20	0.8547
12	4	0.5	20	0.8547
12	4	0.5	100	0.8672
13	4	0.5	100	0.8516
13	4	0.5	100	0.8560
13	9.5	0.5	100	0.9453
14	8	0.5	100	0.9698
14	8	0.1	100	0.9579
15	8	0.1	100	0.9592

Si bien estos factores no son iguales, para el rango de frecuencias analizado la única variable significativa es la deformación máxima, lo cual puede tener su origen en la inclinación de la biela inferior respecto de la horizontal, lo cual responde a un desnivel existente en el piso del laboratorio.

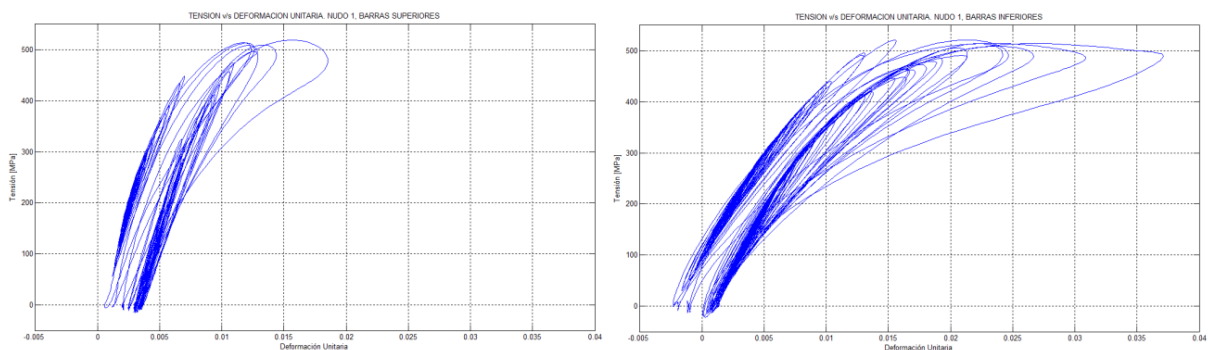
Dentro de este rango de frecuencias, el factor más importante parece ser la deformación máxima inducida a la probeta. Para los efectos de este trabajo, la deformación porcentual fue fijada en 8%, por lo que para probetas de longitud efectiva del orden de 96 mm (distancia efectiva entre mordazas), se traduce en 7.68 mm. Luego, imponiendo un desplazamiento nominal a la mesa vibradora de 8 mm, éste se ve minorado por el factor de amplificación resultando en 7.68 mm reales, cifra idéntica a la necesaria para generar un 8% de deformación. Esta es una casualidad numérica, y por tanto debe ser estudiado caso a caso. Para este caso particular, 8 mm nominales de deformación corresponden a 8% real.

Dada la variedad de frecuencias, número de ciclos y deformación aplicada a cada probeta, se presenta a continuación un análisis del efecto de estos factores en los resultados obtenidos. Los gráficos presentados fueron obtenidos mediante la rutina de análisis de datos, incluida en el Anexo C de este trabajo.

### **Efecto de la deformación:**

Este efecto será analizado con los resultados obtenidos para la probeta 13, pues fue la única probeta ensayada a distintas deformaciones.

Según la notación utilizada por Olea (2009) en su trabajo experimental, la probeta corresponde a la “Nudo 1, B3”. Ésta, fue sometida a una deformación máxima aproximada de 3.7%<sup>23</sup>, según se muestra en la siguiente figura. Por otro lado, se observa que el número de ciclos en los cuales la probeta fue llevada a deformaciones fuera del rango elástico fue bajo (del orden de 10).

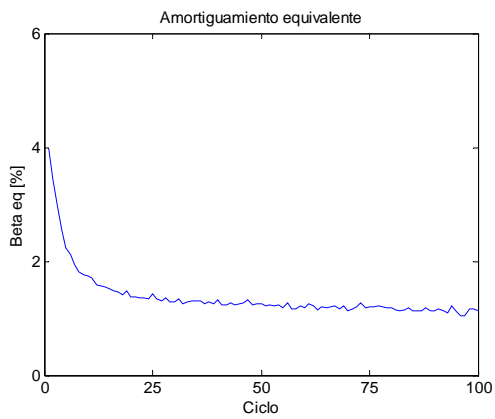
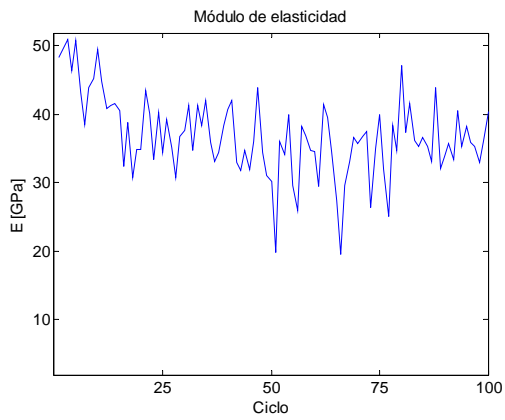
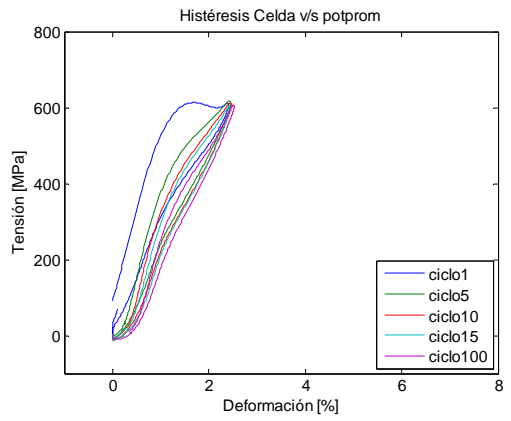


**Figura 6-6: Probeta "Nudo 1, B3" para registro de Lollole al 75% (Olea, 2009)**

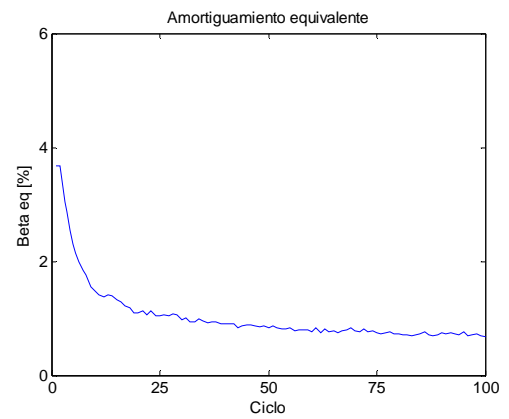
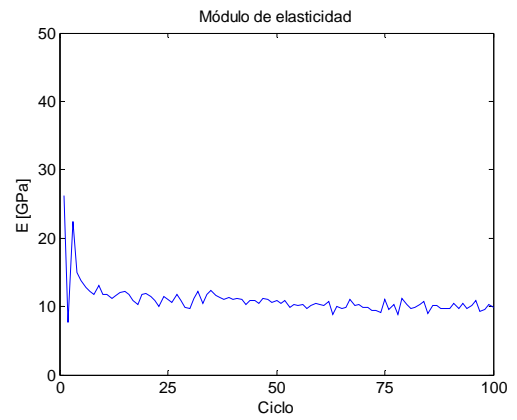
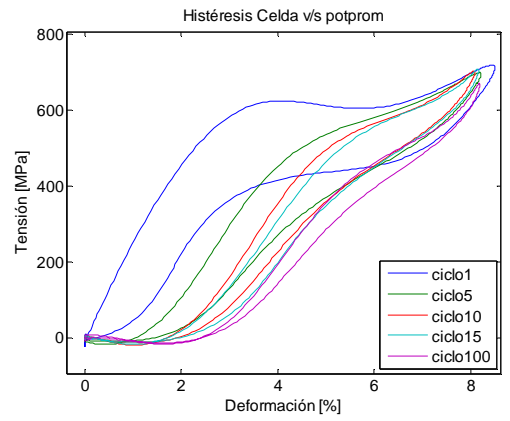
De la Figura 6-7, es posible observar que para deformaciones por debajo del 2%, el módulo de elasticidad conserva un valor estable. Al aumentar la deformación, éste sufre una caída importante luego de los primeros 10 ciclos (del segundo registro). Este resultado concuerda con los obtenidos por Espinoza (2007). Por otro lado, se observa que si bien el amortiguamiento equivalente para los primeros ciclos es similar, para los últimos 50 ciclos, su valor es menor para el ensayo de mayor deformación.

<sup>23</sup> Según la notación utilizada por Olea para marcar las probetas utilizadas, no es posible saber si la probeta fue montada en la parte superior o inferior de la conexión.

**Probeta 13: 100 ciclos, 4mm, 0.5 Hz**



**Probeta 13: 100 ciclos, 9.5mm, 0.5 Hz**

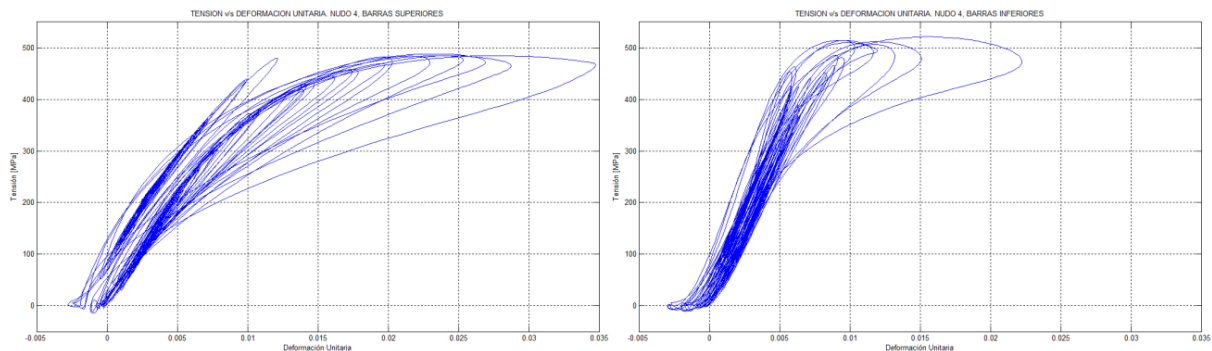


**Figura 6-7: Efecto de la deformación**

### **Efecto del entrenamiento y frecuencia:**

El siguiente análisis corresponde a la comparación de los resultados obtenidos al ensayar dos veces la misma probeta con una señal sinusoidal de 100 ciclos, una deformación nominal máxima de 8 mm y frecuencias de 0.5 y 0.1 Hz. Entre ambos ensayos, existe un lapso de 24 horas.

La probeta utilizada corresponde a la probeta “Nudo 4, B3” según la notación utilizada por Olea (2009). El informe de su trabajo experimental, documenta que esta probeta sufrió una deformación máxima del 3.5%.<sup>24</sup> Por otro lado, se observa que el número de ciclos en los cuales la probeta sólo fue llevada a deformaciones fuera del rango elástico fue bajo (del orden de 10).



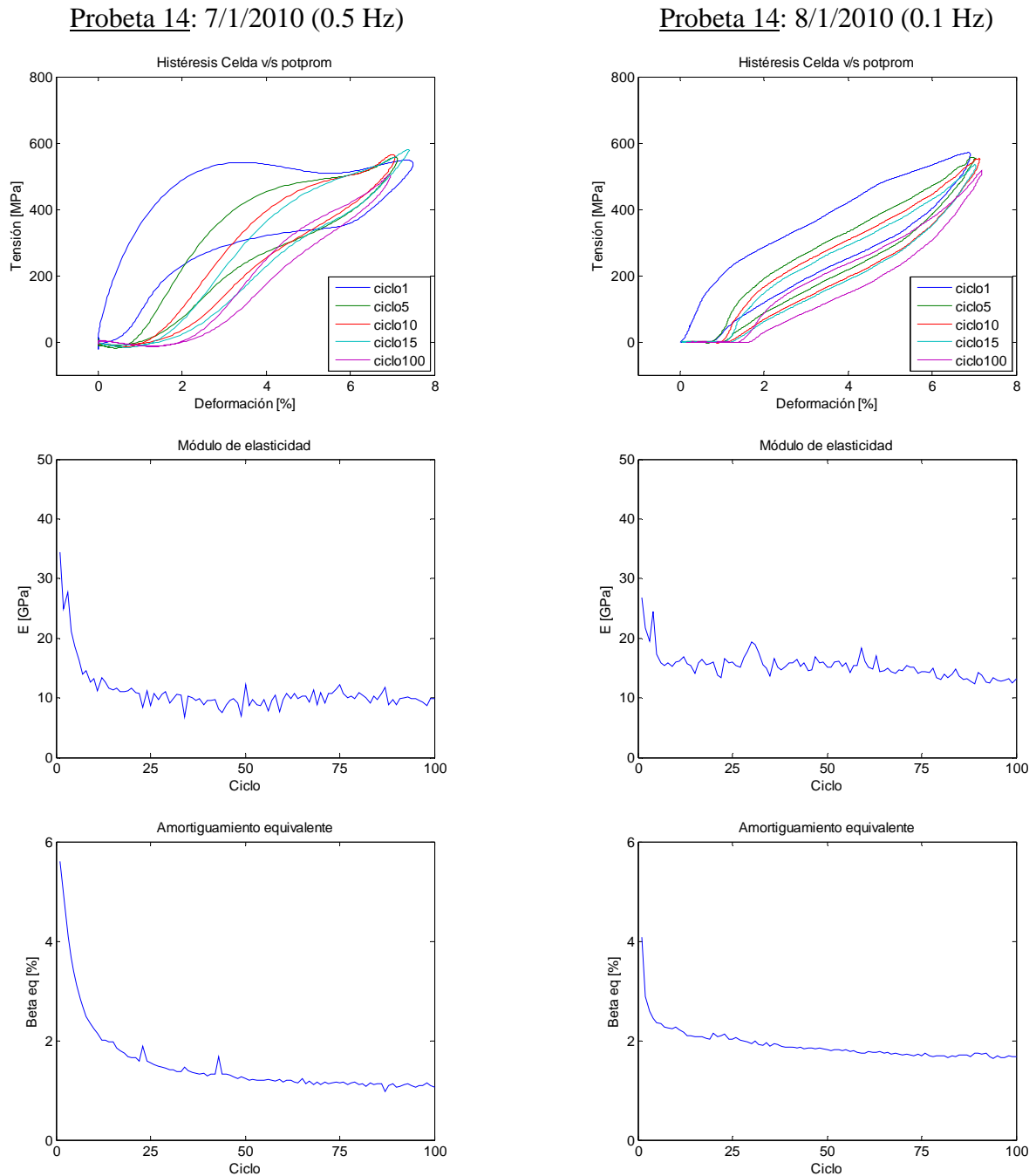
**Figura 6-8: "Nudo 4, B3" para registro de Lolloo al 75% (Olea, 2009)**

Del análisis de las curvas de la Figura 6-9, es posible observar que la tensión de transformación bordea los 500 MPa para el primer ciclo, al igual que en los ciclos de histéresis obtenidos por Olea (2009). Por otro lado el módulo de elasticidad del primer ciclo es del orden de 35 GPa, un poco más bajo que lo obtenido por Espinoza (2007), lo cual puede deberse a la cantidad de ensayos en los cuales dicha probeta fue utilizada.<sup>25</sup> El amortiguamiento equivalente tiene un comportamiento decreciente, estabilizándose en un valor cercano al 1.5% para más de 50 ciclos.

<sup>24</sup> Según la notación utilizada por Olea para marcar las probetas utilizadas, no es posible saber si la probeta fue montada en la parte superior o inferior de la conexión.

<sup>25</sup> En el trabajo de Olea, las probetas fueron sometidas a 7 ensayos en total.

Al ensayar nuevamente la probeta, pero esta vez a una frecuencia de 0.1 Hz, se observa que tanto el módulo de elasticidad como el amortiguamiento equivalente tienden a estabilizarse en valores mayores que en el primer ensayo, realizado a 0.5 Hz. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Espinoza (2007). Por otro lado, las curvas de histéresis del segundo ensayo se ven afectadas de manera importante por el entrenamiento previo.



**Figura 6-9: Efecto del entrenamiento**



## 6.4. Ensayos de probetas de Nitinol finales

### 6.4.1 Registros sinusoidales

De las 7 probetas de Nitinol existentes, 3 fueron envejecidas durante 1, 3 y 7 meses. Todas las probetas son de 2.45 mm de diámetro. Un resumen de las propiedades de cada probeta se muestra a continuación.

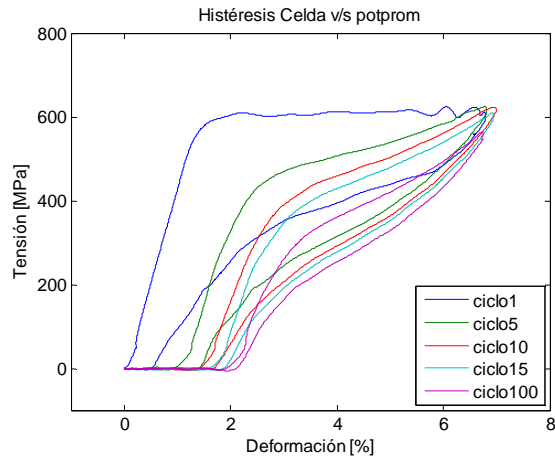
**Tabla 6-3: Probetas finales**

probeta	envejecimiento meses	Lo mm	f Hz	$\Delta_{\max}$ mm	ciclos	FA
15	0	96.6	0.1	8	100	0.9681
16	0	96.9	0.1	8	100	0.9746
17	0	96.3	0.1	8	100	0.9779
18	7	96.5	0.1	8	100	0.9765
19	3	96.5	0.1	8	100	0.9702
20	1	97.3	0.1	8	100	*

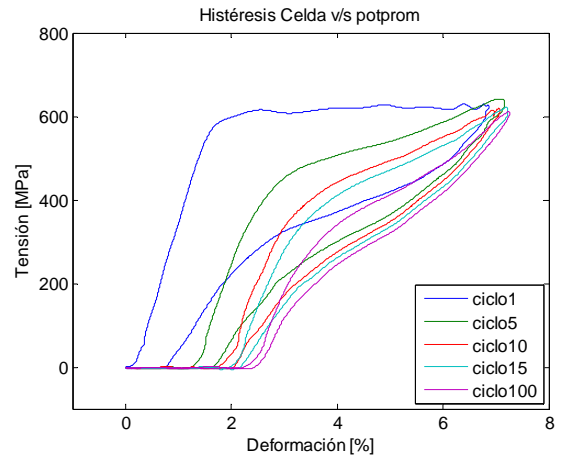
\*: En el ensayo de esta probeta se presentaron deslizamientos en la mordaza superior debidos a problemas de fijación, por lo que sus resultados no son considerados en este trabajo.

En las siguientes figuras, se muestra:

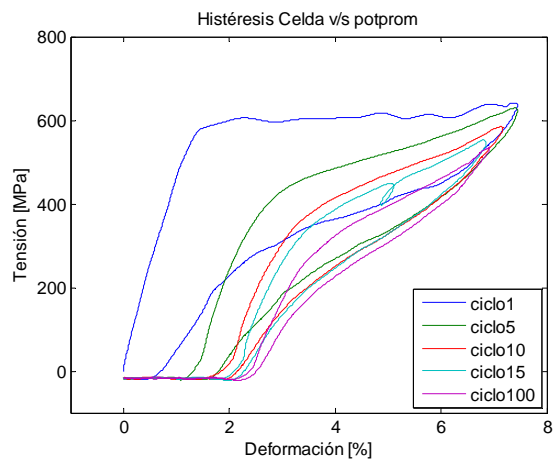
- Curvas de histéresis del material para los ciclos 1, 5 10, 15 y 100.
- Modulo de elasticidad por ciclo.
- Curvas de tensión de transformación por ciclo.
- Curvas de deformación remanente por ciclo.
- Curvas de energía por ciclo, con  $E_d$  y  $E_s$  según fueron definidos en la sección 2.4 de este trabajo.
- Curvas del amortiguamiento viscoso equivalente por ciclo.



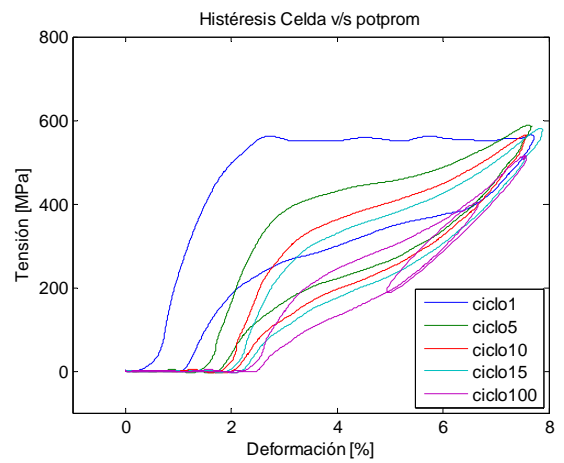
Probeta 15 (sin envejecer)



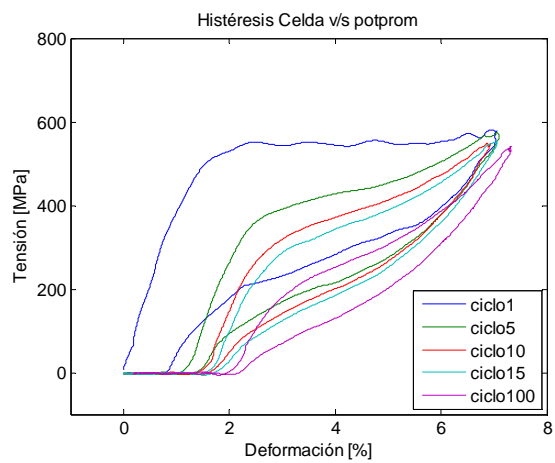
Probeta 16 (sin envejecer)



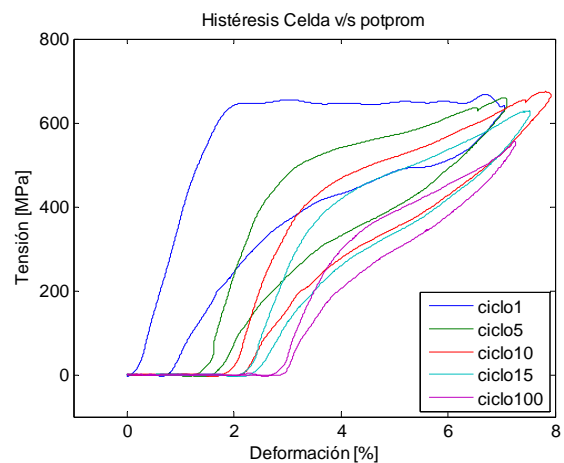
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)

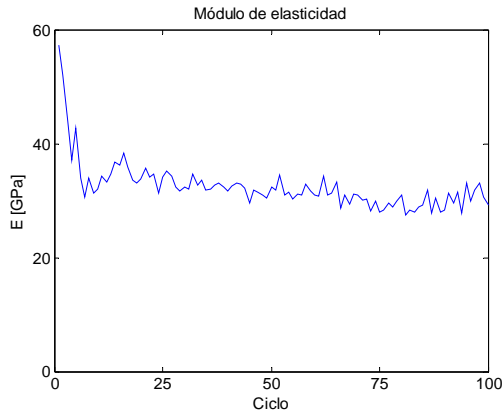


Probeta 19 (envejecida 3 meses)

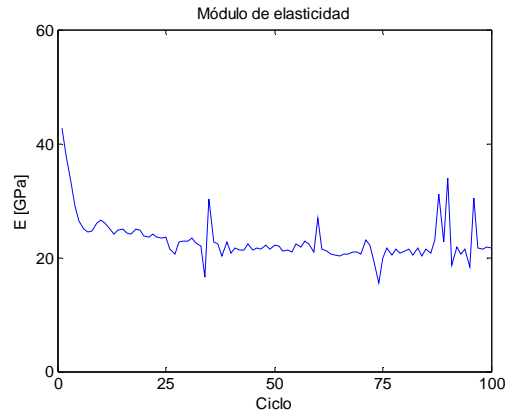


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

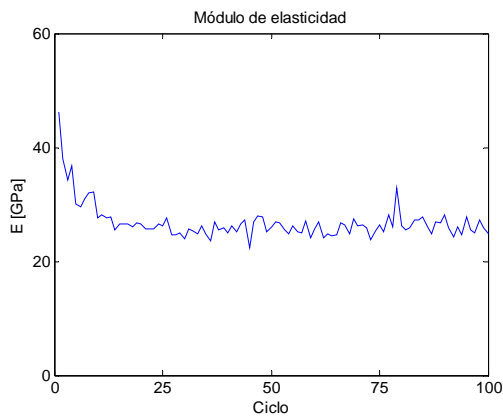
**Figura 6-10: Histéresis ensayos finales**



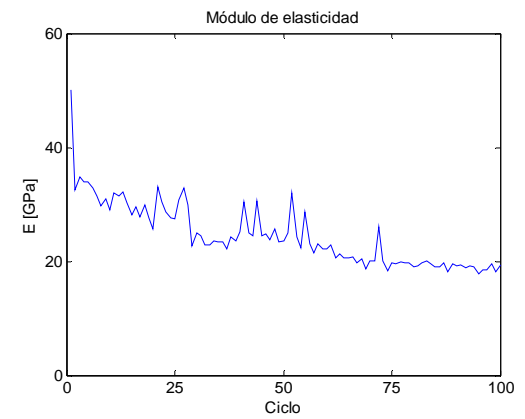
Probeta 15 (sin envejecer)



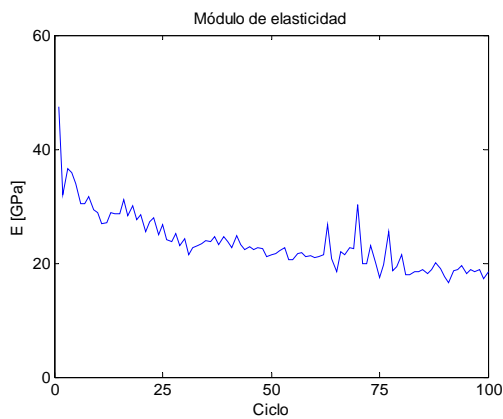
Probeta 16 (sin envejecer)



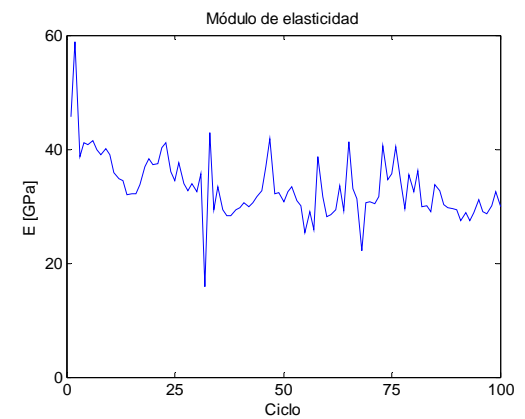
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)

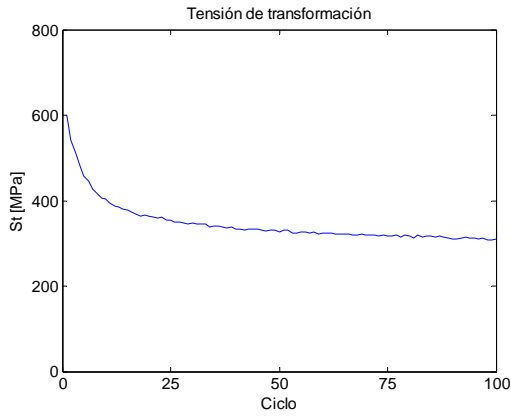


Probeta 19 (envejecida 3 meses)

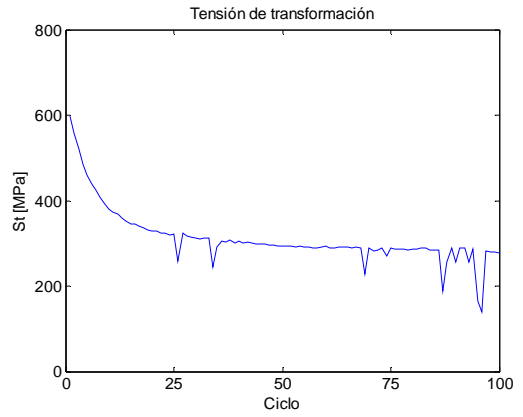


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

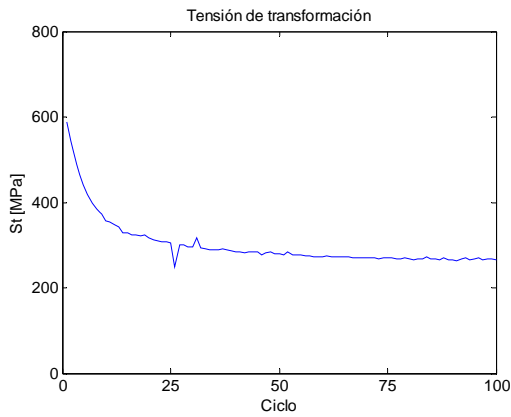
**Figura 6-11: Módulo de elasticidad**



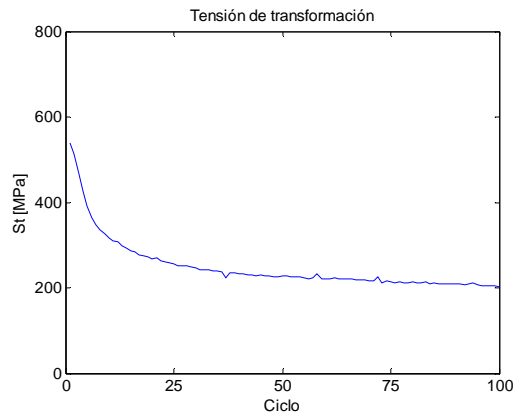
Probeta 15 (sin envejecer)



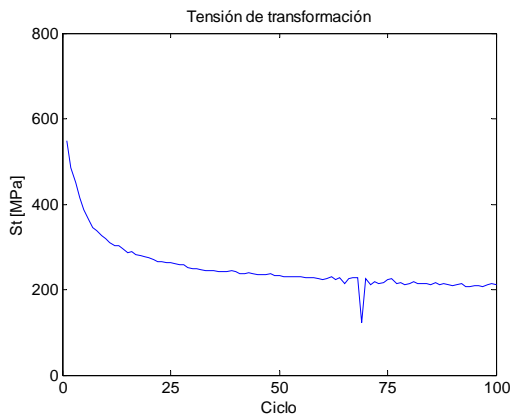
Probeta 16 (sin envejecer)



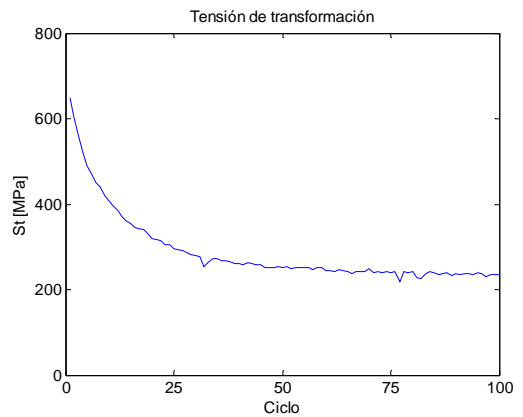
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)

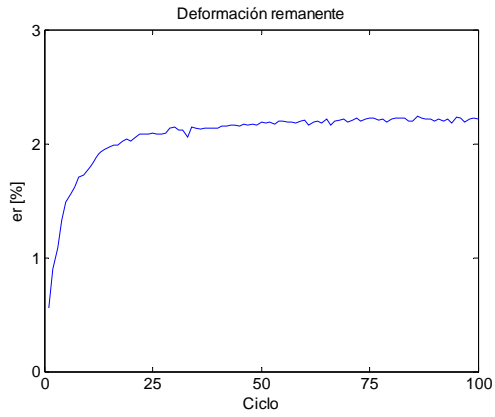


Probeta 19 (envejecida 3 meses)

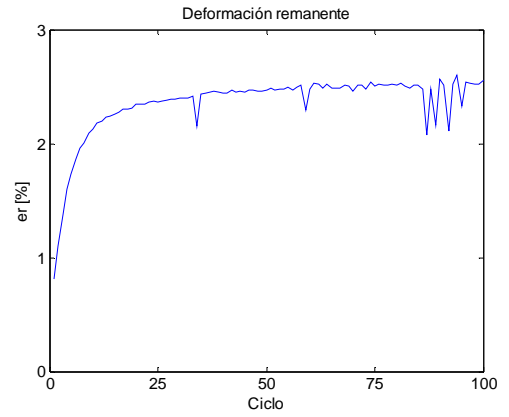


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

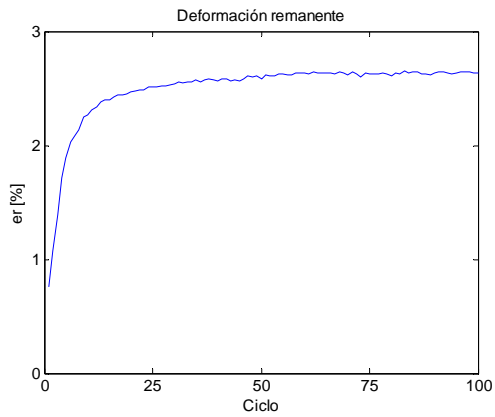
**Figura 6-12: Tensión de transformación**



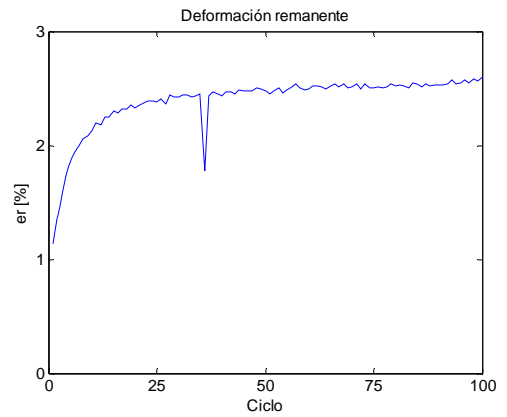
Probeta 15 (sin envejecer)



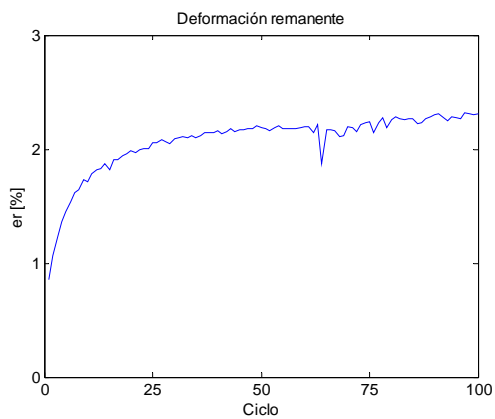
Probeta 16 (sin envejecer)



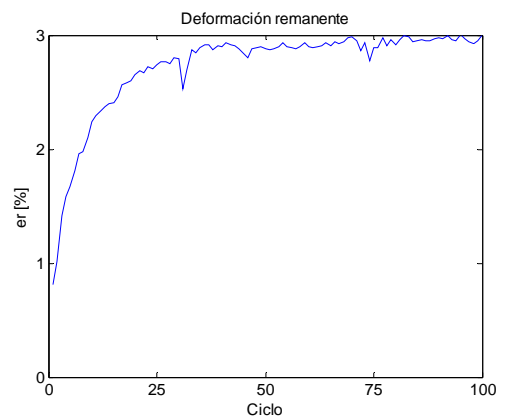
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)

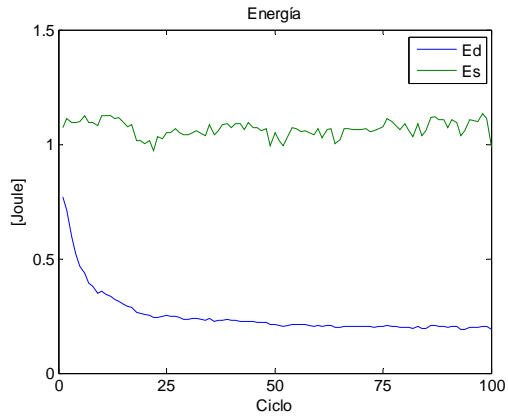


Probeta 19 (envejecida 3 meses)

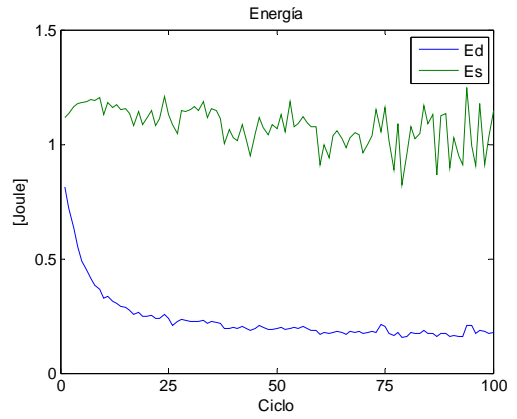


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

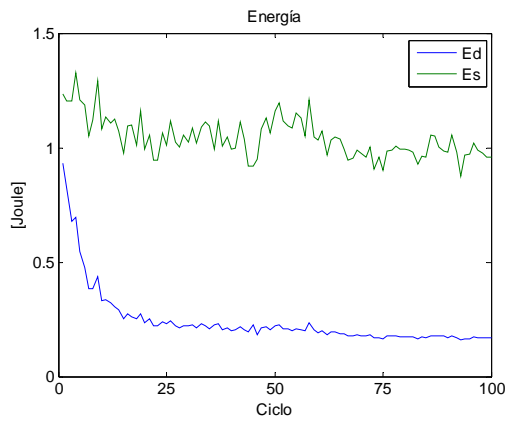
**Figura 6-13: Deformación remanente**



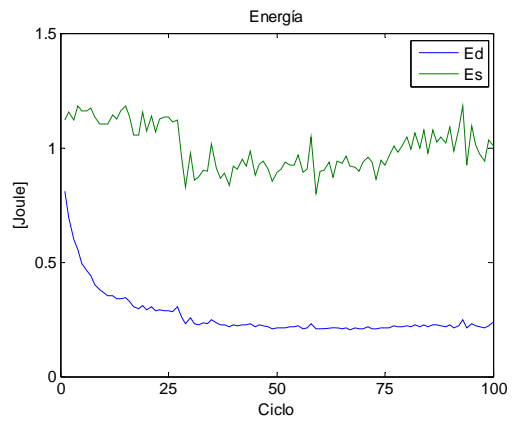
Probeta 15 (sin envejecer)



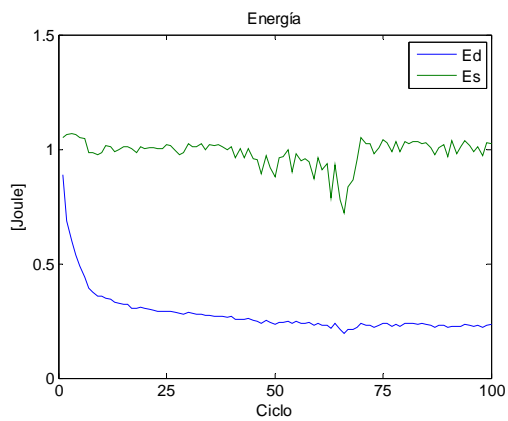
Probeta 16 (sin envejecer)



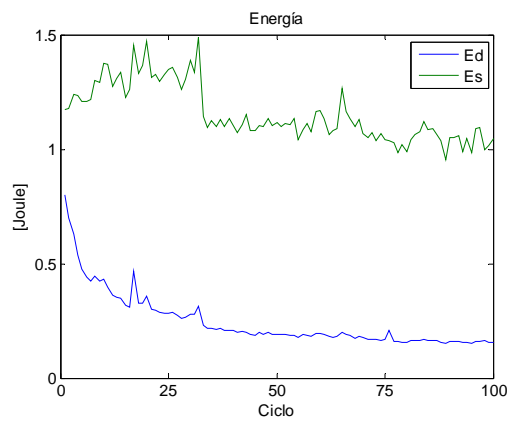
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)

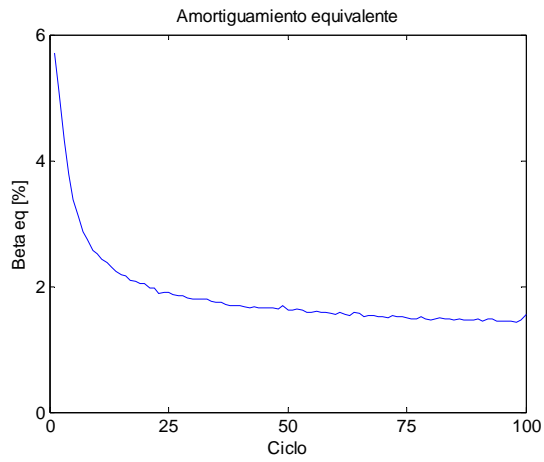


Probeta 19 (envejecida 3 meses)

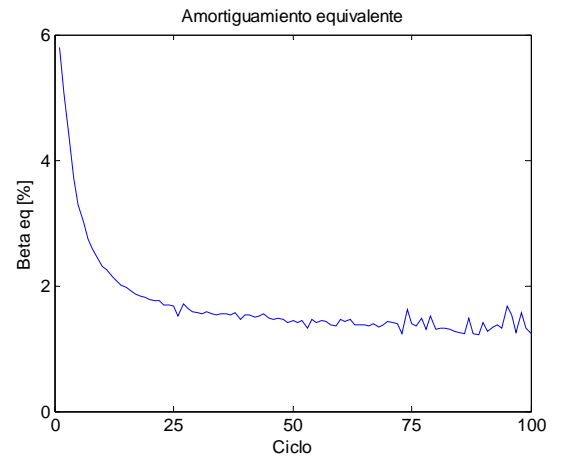


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

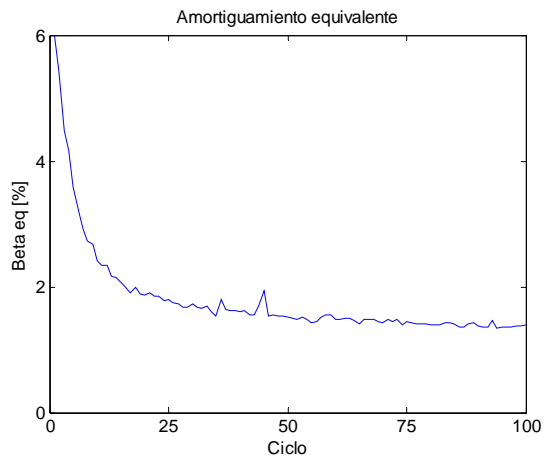
**Figura 6-14: Energía disipada**



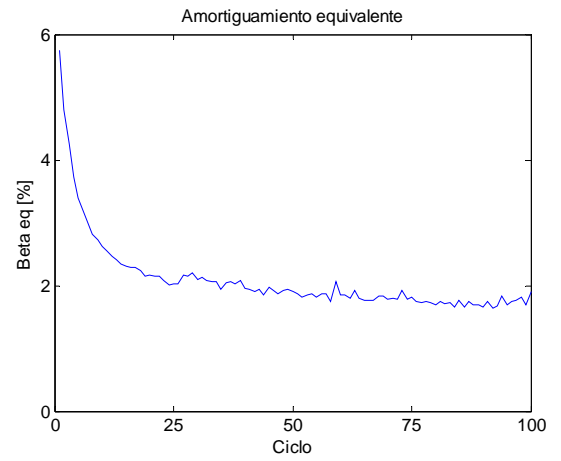
Probeta 15 (sin envejecer)



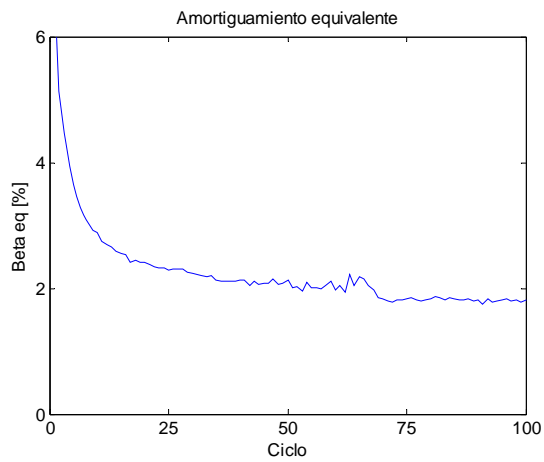
Probeta 16 (sin envejecer)



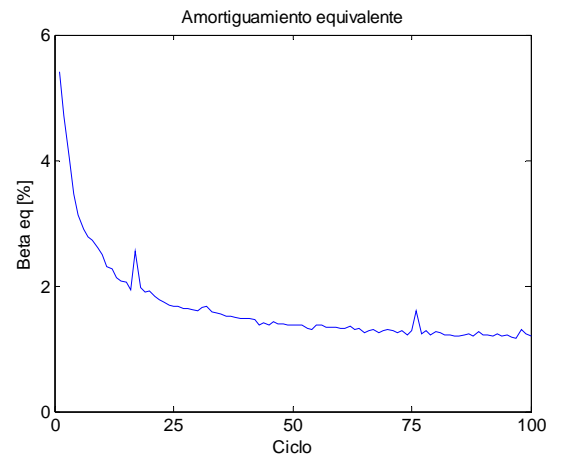
Probeta 17 (sin envejecer)



Probeta 18 (envejecida 7 meses)



Probeta 19 (envejecida 3 meses)

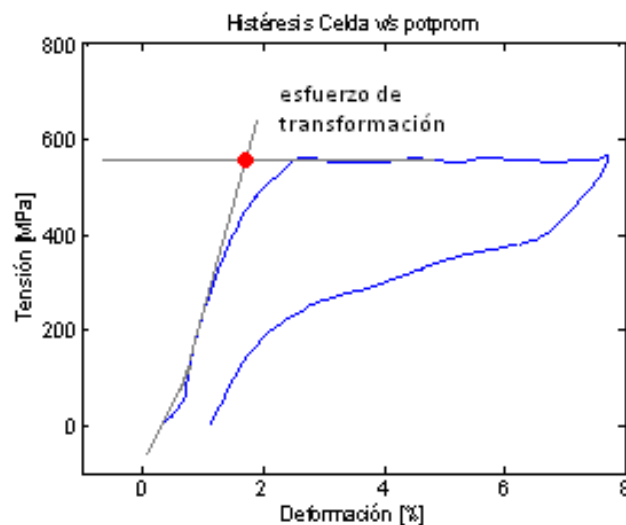


Probeta 20 (envejecida 1 mes)

**Figura 6-15: Amortiguamiento equivalente**

Para obtener las figuras recién mostradas, la rutina de procesamiento de datos, incluida en el Anexo C de este informe contempla las siguientes consideraciones:<sup>26</sup>

- El módulo de elasticidad se obtiene mediante un ajuste por mínimos cuadrados entre el 0.25% y 0.5% de la curva esfuerzo-deformación. Superponiendo la recta a la curva, se observa que la recta representa correctamente al tramo inicial de la curva (ver Figura 6-16). En dicho rango de deformaciones, la regresión lineal no se ve influenciada por las curvaturas iniciales y finales observadas en los ciclos de histéresis. Por otro lado, este rango de valores presenta un buen ajuste para el total de ciclos realizados.
- La tensión de transformación se calcula mediante la intersección de la recta del módulo de elasticidad y la recta definida por un ajuste de mínimos cuadrados entre el 3.5% y 5.0% de deformación. Este criterio también se obtiene de superponer dicha recta a la curva esfuerzo-deformación (ver Figura 6-16).



**Figura 6-16: Ajuste de rectas representativas**

<sup>26</sup> La rutina de procesamiento de datos posee una calibración de los algoritmos incluida explícitamente en su código, la cual demostró ser eficiente para los ensayos descritos, instrumentos y material utilizado, etc., por lo cual pueden presentarse variaciones bajo otras condiciones.



En la Tabla 6-4, se resumen las siguientes propiedades:

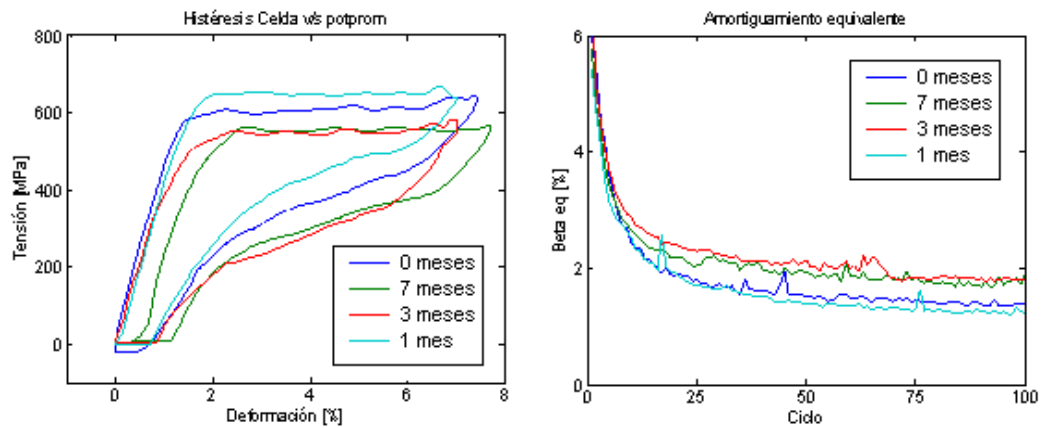
- $E_1$  : Módulo de elasticidad del primer ciclo.  
 $\xi_{eq\ 50-100}$  : Promedio del amortiguamiento viscoso equivalente entre el ciclo 50 y el 100.  
 $\epsilon_r\ 100$  : Deformación remanente del ciclo 100.  
 $\sigma_{t\ 1}$  : Tensión de transformación del primer ciclo.

**Tabla 6-4: Probetas finales (resultados)**

Probeta	Envejecimiento meses	$E_1$ GPa	$\xi_{eq\ 50-100}$ %	$\sigma_{t\ 1}$ MPa	$\epsilon_r\ 100$ %
15	0	57.2	1.52	607.2	2.18
16	0	42.6	1.38	614.6	2.52
17	0	46.2	1.44	603.8	2.62
18	7	50.1	1.78	547.8	2.59
19	3	47.5	1.90	546.1	2.29
20	1	45.8	1.28	647.1	2.99

### **Efecto del envejecimiento:**

En la siguiente figura, se muestra el primer ciclo de histéresis para probetas envejecidas a distintos tiempos y la evolución del valor del amortiguamiento equivalente respecto del número de ciclos. Se observa un aumento en la tensión de transformación para un mes de tratamiento, sin embargo esta cantidad disminuye para las probetas envejecidas durante tres y siete meses. Para estas dos probetas, el amortiguamiento equivalente tiene un aumento aproximado del 0.6%.



**Figura 6-17: Efecto del envejecimiento**

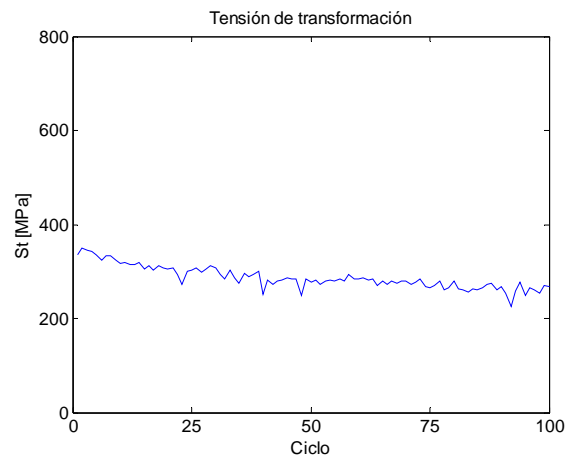
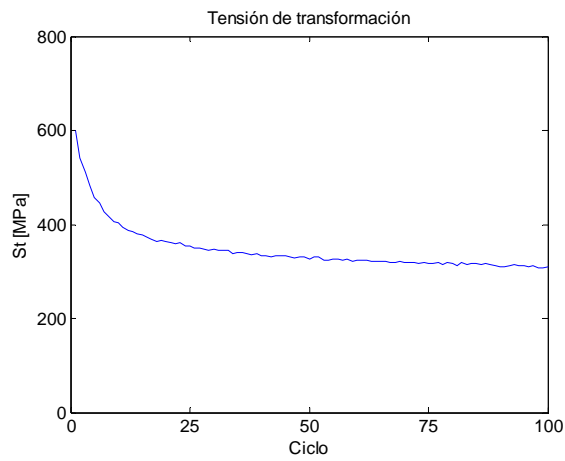
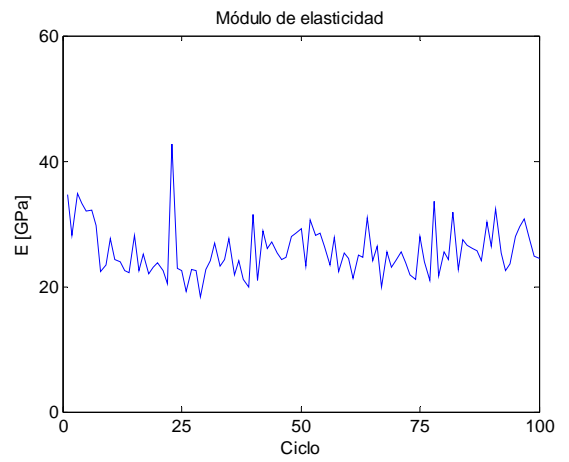
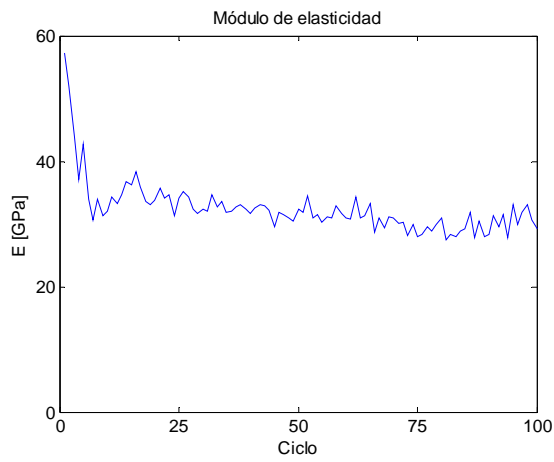
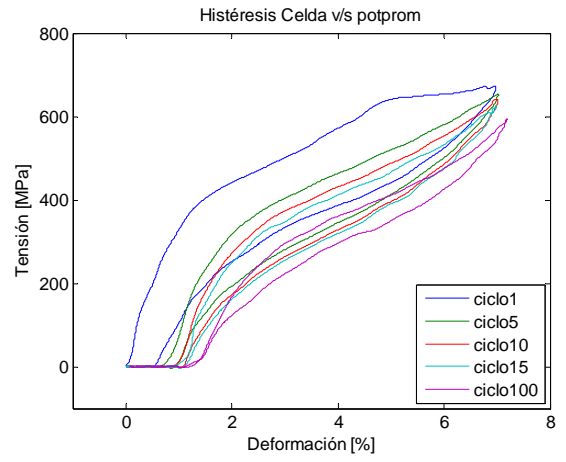
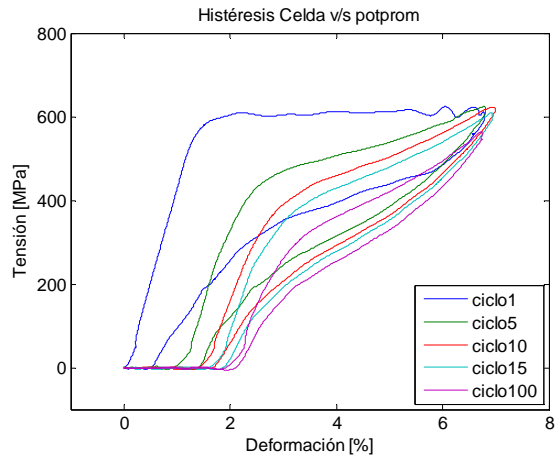
### **Efecto del entrenamiento:**

Las probetas 15 y 18 fueron ensayadas por segunda vez a las mismas sollicitaciones (señal sinusoidal de 100 ciclos, deformación nominal máxima de 8 mm a 0.1 Hz). Entre ambos ensayos existe un lapso de 4 meses.

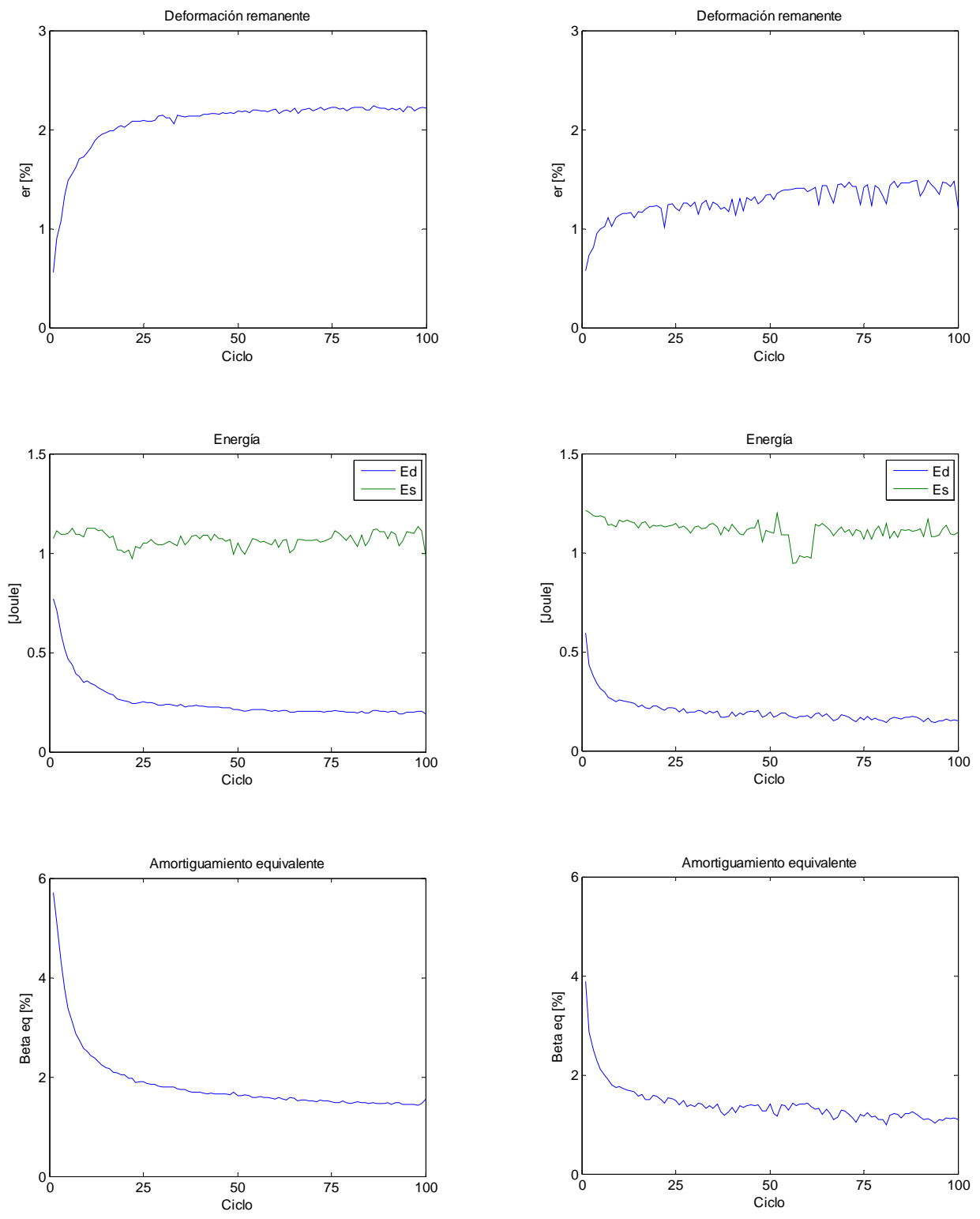
A continuación se comparan los resultados obtenidos en ambas probetas, mostrando en el lado derecho, las figuras del segundo ensayo.

En este caso, el primer ciclo de histéresis también resulta distinto a los siguientes. Sin embargo, los ciclos tienden rápidamente a asemejarse a los últimos ciclos del primer ensayo.

## Probeta 15

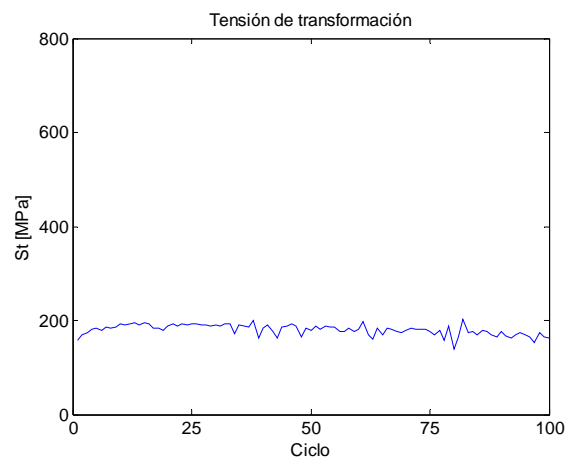
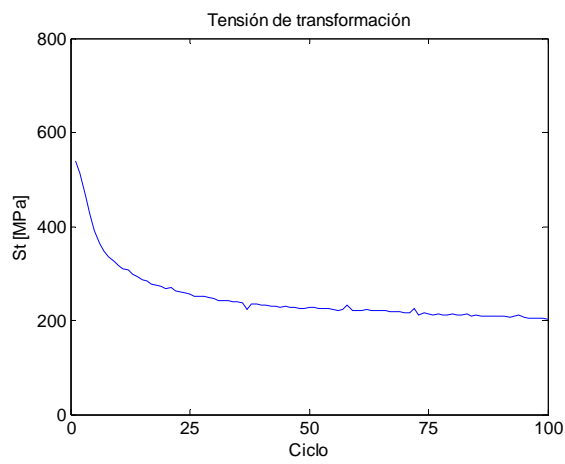
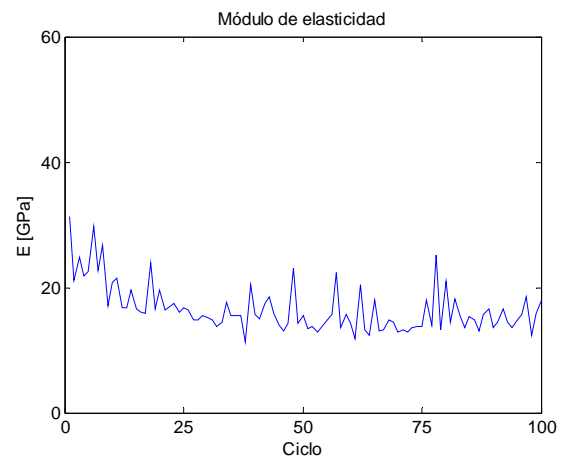
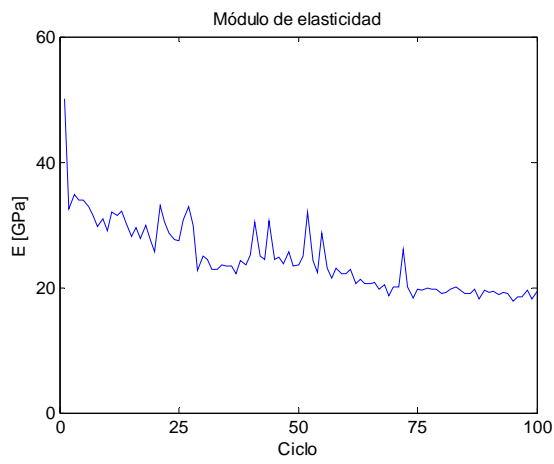
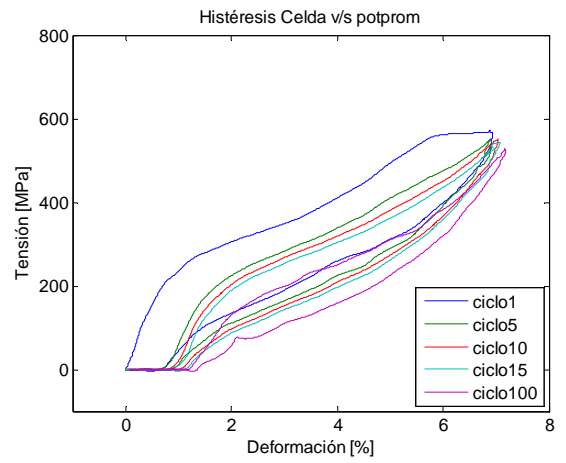
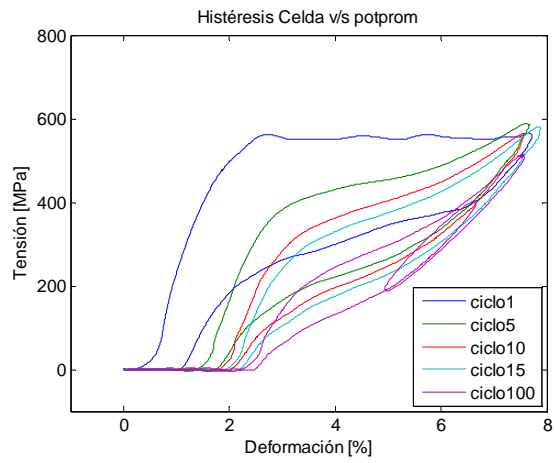


**Figura 6-18: Efecto del entrenamiento (Probeta 15)**

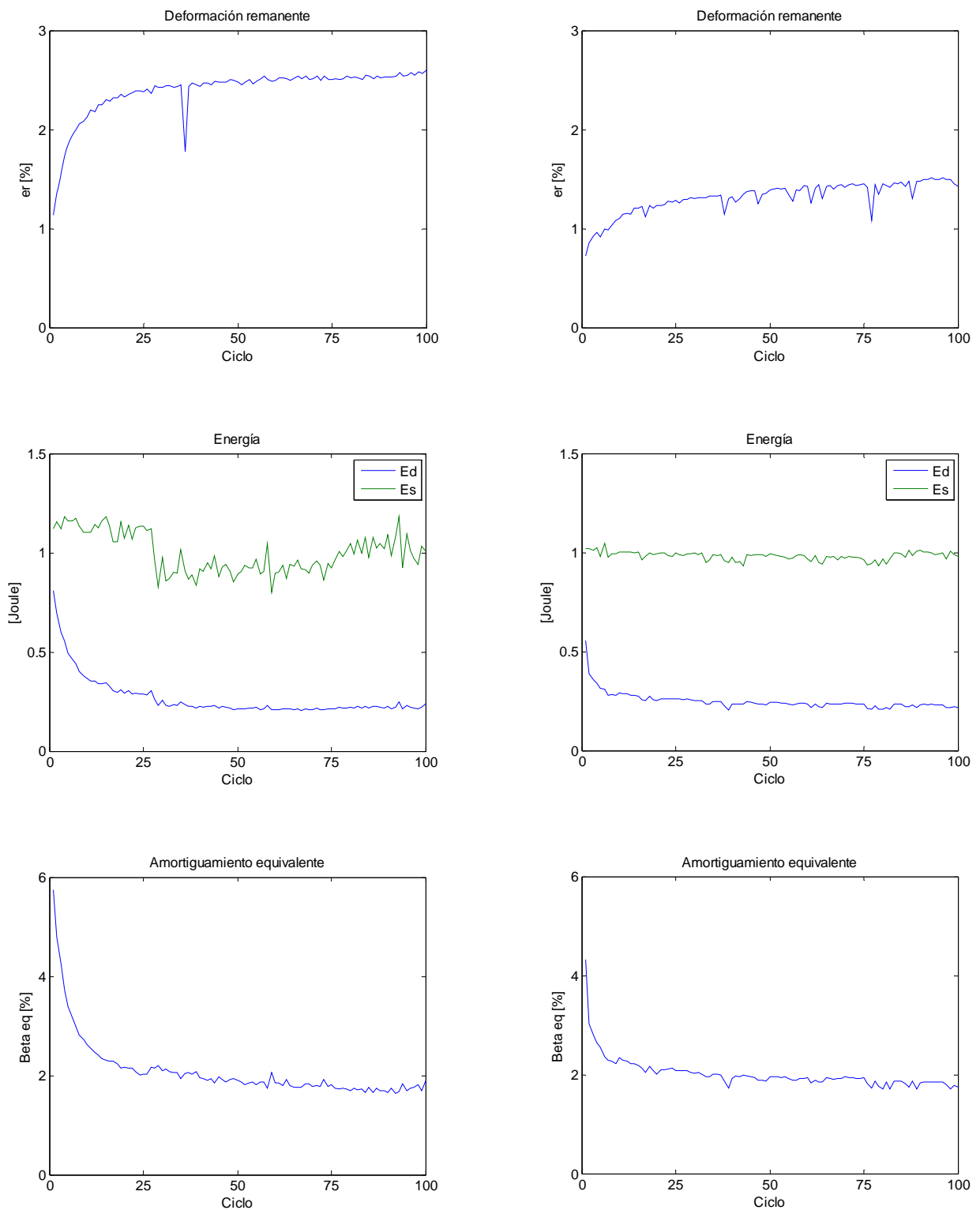


**Figura 6-18(continuación): Efecto del entrenamiento (Probeta 15)**

## Probeta 18



**Figura 6-19: Efecto del entrenamiento (Probeta 18)**

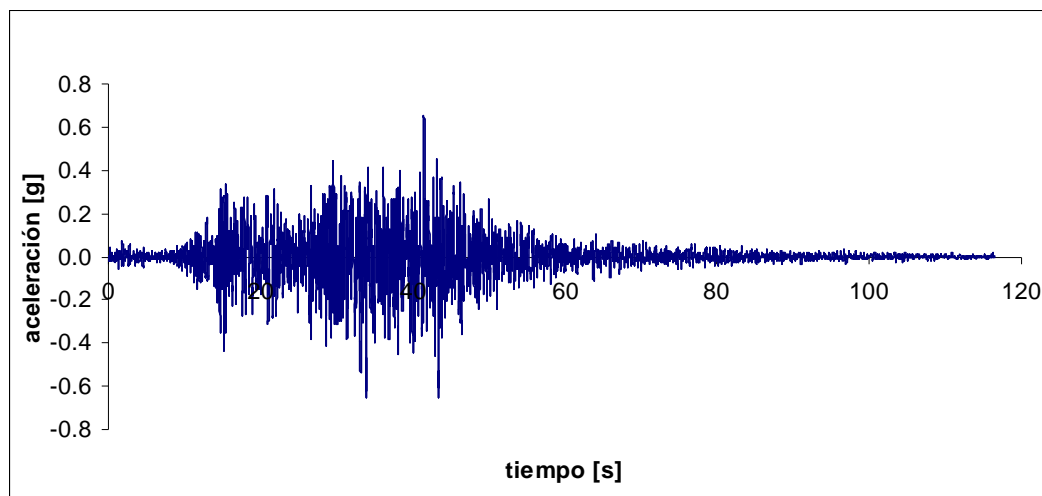


**Figura 6-19 (continuación): Efecto del entrenamiento (Probeta 18)**

## 6.4.2 Registro sísmico: Terremoto de Lolloe, 1985

Debido a los buenos resultados obtenidos en el punto anterior, la existencia de numerosas barras de Nitinol de idénticas características a las utilizadas en la sección 6.3 de este informe y la capacidad de la mesa vibradora, se realizaron dos ensayos con el registro del Terremoto de Lolloe. Este registro sísmico, provoca un desplazamiento máximo de 9.6 cm, por lo que, para lograr deformaciones porcentuales del 8% aproximadamente, debió utilizarse la doceava parte del registro de desplazamientos.

Si bien la respuesta de una estructura ante un movimiento sísmico no se asemeja a un registro sísmico (los modos con mayor participación son por lo general de periodos más altos), existen casos en los que ciertos elementos de una estructura pueden verse exigidos a movimientos variables de alta frecuencia, como por ejemplo, disipadores de energía en techumbres de estructuras con el fin de disminuir el daño causado por los huracanes (Saadat et al., 2009).

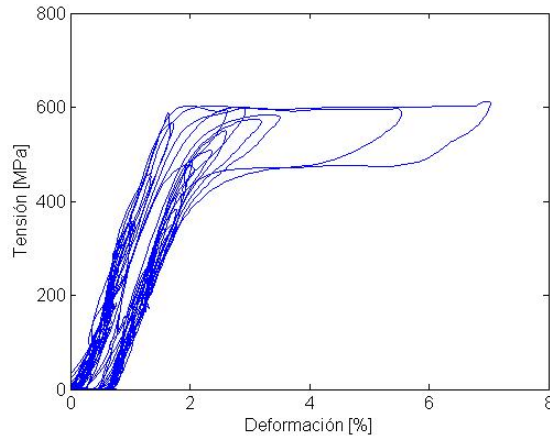


**Figura 6-20: Terremoto de Lolloe, 1985**

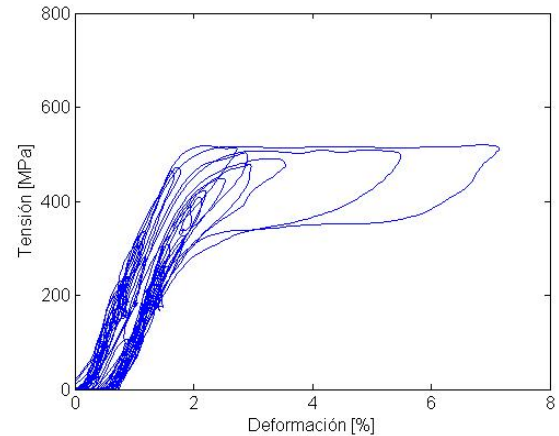
Notar que debido a la existencia del sistema de fijación descrito en la sección 5.3 de este trabajo, las probetas sólo recibieron esfuerzos de tracción, lo que corresponde a la mitad inferior del registro de Lolloe ilustrado en la Figura 6-20.

Por motivos de seguridad, en estos ensayos sólo se registraron deformaciones mediante el potenciómetro de 100 mm de carrera. El extensómetro tampoco fue utilizado.

Las probeta utilizadas para este ensayo han sido entrenadas previamente (Olea, 2009). Los resultados se muestran en las Figuras 6-21 y 6-22.



**Figura 6-21: Histéresis probeta 22**



**Figura 6-22: Histéresis probeta 23**

De los gráficos anteriores, es posible observar que:

- En ambos casos se observan ciclos de histéresis, lo cual significa que el material es capaz de disipar energía en registros sísmicos. Los ciclos en los cuales se disipa mayor energía son los ciclos con mayor deformación porcentual.
- La deformación máxima impuesta a las probetas fue de 7.0 mm lo que corresponde aproximadamente al 7.4% de deformación porcentual.
- El esfuerzo de transformación de la probeta 22 es mayor que la probeta 23. Esto sugiere que la probeta 22 está menos entrenada que la 23. Si bien no se tiene información acerca de la probeta 23, la probeta 22 fue entrenada en los ensayos de Olea (2009) a una deformación máxima del 1.6%.<sup>27</sup>
- En ambos casos, la cantidad de ciclos en los que la probeta es sometida a deformaciones de más de 2% es reducida, por lo cual no se alcanza a observar una degradación importante del módulo de elasticidad ni de la tensión de transformación

<sup>27</sup> La probeta 22 de este informe corresponde a la probeta “Nudo 2, B3” de la memoria de Olea, 2009.



## **Capítulo 7 : DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En el presente trabajo se revisó el diseño de un dispositivo de ensayo de barras metálicas descrito en el punto 3.1 de este informe, se montó y se puso en marcha.

Si bien el trabajo realizado incluye el desarrollo de una rutina de control cuyo objetivo es controlar el movimiento de la mesa vibradora por fuerza y deformación, las inestabilidades descritas en el Capítulo 6 imposibilitaron la prueba de esta rutina. Como una forma de evitar el pandeo de las probetas, se utilizó el sistema de fijación descrito en la sección 5.3. Este sistema funcionó correctamente, sin embargo, no actúa sobre los movimientos de tracción causados por la inestabilidad de la mesa. No obstante, se observó que para ensayos como los realizados en este trabajo su influencia es baja pues el dispositivo de ensayo logra ejecutar ensayos repetibles en el tiempo, afectando un número reducido de ciclos.

Los ensayos efectuados a probetas de Nitinol previamente utilizadas por Olea (2009) fueron de gran utilidad para evaluar el comportamiento del dispositivo y desarrollar una rutina eficiente de procesamiento de datos. Con estas probetas se analizó el efecto de la deformación, entrenamiento y frecuencia de ensayo. Respecto de esto, se observa que:

- El módulo de elasticidad presenta un valor estable para deformaciones por debajo del 2%, sector en donde la curva tensión deformación es lineal. A medida que aumenta la deformación, el módulo de elasticidad secante disminuye de manera importante durante los primeros 10 ciclos, para luego tender a un valor estable, el cual tiende a ser mayor para frecuencias menores. Para el primer ciclo, el módulo de elasticidad fue de 48.2 GPa promedio, lo cual es cercano a lo obtenido por Espinoza (2007).
- El amortiguamiento equivalente tiene un comportamiento que depende del número de ciclos, tendiendo a un valor estable para los últimos 50 ciclos, el cual es menor para ensayos de mayor deformación. Respecto de la influencia de la frecuencia de ensayo, el amortiguamiento equivalente tuvo un comportamiento decreciente al aumentar la frecuencia.<sup>28</sup> Para los ensayos finales, el amortiguamiento equivalente promedio entre los ciclos 50 y 100 fue de 1.55%.

---

<sup>28</sup> Según ensayos realizados a 0.1 y 0.5 Hz. Según Espinoza (2007), el amortiguamiento equivalente aumenta para valores entre 0.01 y 0.1 Hz, disminuyendo para frecuencias mayores a 0.1 Hz.

- Luego de 100 ciclos a tracción a un 8% de deformación y 0.1 Hz, el valor de la deformación remanente es de 2.5%. Entre un 0.5 y un 1% se produce en el primer ciclo. Estos valores son superiores a los obtenidos por McCormick et al. (2007), los que bordean el 0.4%, lo cual puede deberse a que al apretar la mordaza, ésta levanta la probeta, distorsionando la gráfica.<sup>29</sup>
- El efecto del entrenamiento es uno de los más influyentes en las capacidades del material. Al igual que en probetas vírgenes, los primeros ciclos son de “acomodación” del material, en donde la estructura interna se reacomoda. Sin embargo, el material rápidamente tiende a los valores estables obtenidos en su primer ensayo. Las curvas de histéresis varían fuertemente en probetas entrenadas previamente con deformaciones de más del 2%. Debido a que el área comprendida dentro de las curvas de histéresis disminuye a medida que la probeta es entrenada, sus capacidades de disipar energía también disminuyen con el entrenamiento.
- El efecto envejecimiento a 100°C depende del lapso de tiempo al cual haya sido tratado el material, pues se observó que para un mes de tratamiento la tensión de transformación aumentó, mientras que para 3 y 7 meses de tratamiento, se observó una baja en la tensión de transformación y una leve mejoría en el amortiguamiento equivalente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Torra (2009).

Aprovechando las capacidades del dispositivo de ensayo, se ensayaron dos probetas de Nitinol previamente entrenadas con el registro sísmico de Llolleo (1985) escalado a su doceava parte, la cual produce una deformación aproximada del 8%. Se logró observar ciclos de histéresis en los movimientos de mayor amplitud, lo cual indica que el material también es capaz de disipar energía en movimientos de alta frecuencia.

Las capacidades del dispositivo de ensayo son amplias, permitiendo una gran variedad de registros y un diámetro de probeta de hasta 6 mm. Luego, queda en manos de futuros trabajos experimentales aprovechar dichas capacidades para ahondar en el estudio del comportamiento del Nitinol y otros materiales de interés para la ingeniería estructural.

---

<sup>29</sup> El algoritmo para detectar el lugar del registro donde se mide la deformación remanente esta basado en el valor de la celda de carga (Más detalles en Anexo C).

## **Limitaciones del trabajo realizado:**

Las inestabilidades presentadas por el sistema oleohidráulico no distorsionaron de manera significativa los resultados obtenidos. Estas inestabilidades consistieron en movimientos de alta frecuencia, por lo que los registros obtenidos fueron filtrados para atenuar su influencia en los resultados. Sin embargo, el riesgo que estos movimientos pudieran dañar las probetas impidió la utilización del sistema de control diseñado para los ensayos.

Una magnitud física que no fue medida en los ensayos realizados es la temperatura. La evolución de los resultados obtenidos en función del número de ciclos sugiere que el material varía su comportamiento producto de la temperatura en la que se encuentre (Churchill, 2009).

## **Recomendaciones para trabajos futuros:**

Queda en manos de futuros trabajos aprovechar las capacidades del dispositivo de ensayo, en el cual se pueden utilizar probetas de distintas dimensiones. En estos casos, la rutina de procesamiento de datos debe ser calibrada en función del ensayo realizado.

Otro factor a mejorar es la fijación del extensómetro en la probeta. Esto tiene relación con el diámetro de la probeta, de modo que al utilizar probetas de mayor diámetro que las usadas en este trabajo no debiesen verse afectadas.<sup>30</sup> Por otro lado, el ensayo de probetas más largas permite la instalación de más de un extensómetro, con lo cual sería posible conocer la distribución de la deformación axial de la probeta a través de su largo.

---

<sup>30</sup> El diámetro de las probetas ensayadas se encuentra al límite de las capacidades de fijación del censor utilizado.

## **BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS**

1. Espinoza Castillo, Carolina Belén – “Caracterización de las propiedades superelásticas de barras de nitinol”. – Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2007.
2. Saavedra Fernández, Alvaro Alejandro – “Caracterización del comportamiento de una aleación de CuZnAl, en probetas laminadas”. – Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2007.
3. Barrientos Oliva, José Francisco – “Montaje, puesta en marcha y calibración de una mesa de vibrar de un grado de libertad”. – Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2008.
4. Barbero Bernal, Laura Isabel – “Cyclic Behavior of Superelastic Nickel-Titanium and Nickel-Titanium-Chromium Shape Memory Alloys”. – Memoria para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil. Georgia Institute of Technology 2004.
5. Jason McCormick, Jeff Tyber, Reginald DesRoches, Ken Gall; and Hans J. Maier – “Structural Engineering with NiTi. II: Mechanical Behavior and Scaling” – Journal of Engineering Mechanics 133(9), 1019-1029 (2007).
6. C.B. Churchill, J.A. Shaw, and M.A. Iadicola – “Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: part 2 – Fundamental isothermal responses” – Experimental Techniques 33(1), 51-62 (2009).
7. Ogata, K. – “Ingeniería de control moderna” Cuarta edición – Editorial Pearson Educación, 2003.
8. Torra Ferré, Vicenç – “Materiales y sistemas inteligentes: ensayos realistas de las Aleaciones con Memoria (AMF) en amortiguamiento de sistemas en estructura porticada, 2009.
9. Olea Guajardo, Manfred Antonio – “Ensayo en mesa vibradora de marco de acero con conexiones SMA”. – Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2009.

**ANEXO A:**

**PLANO GENERAL DE FABRICACIÓN Y RUTINA  
DE CONTROL**

**ANEXO B:**  
**MEMORIAS DE CÁLCULO**

**ANEXO C:**

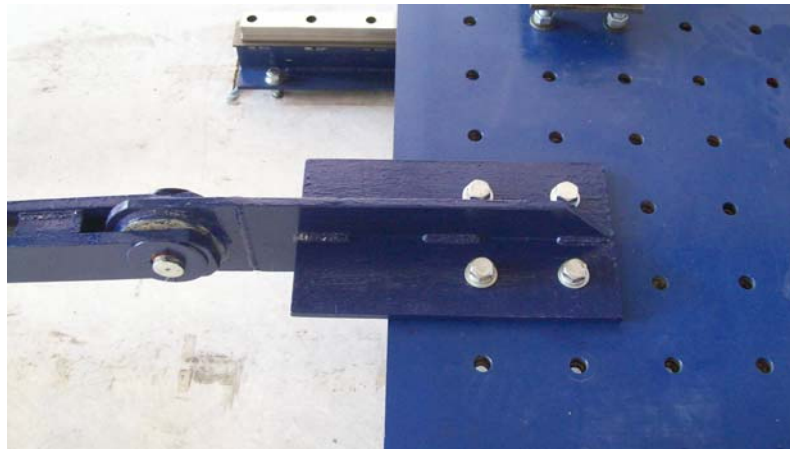
**INSTRUCCIONES DE USO Y RUTINA DE  
PROCESAMIENTO DE DATOS**

## Instrucciones de uso:

Las siguientes instrucciones consisten en una síntesis de los procedimientos utilizados en los ensayos experimentales, descritos en el Capítulo 6 de este trabajo. Sus fundamentos radican principalmente en garantizar la seguridad de las personas y equipos involucrados.

Antes de utilizar el dispositivo de ensayo, se deben realizar las siguientes actividades:

- Revisar que tanto los rieles de la mesa vibradora como los bujes existentes en los perfiles UPN inferiores estén engrasados. La falta de grasa en dichos sectores produce roce, lo cual se manifiesta mediante ruido metálico.
- Conectar el dispositivo de ensaye a la mesa vibradora. Para lograrlo, es necesario mover la mesa vibradora hasta que las perforaciones de la placa de fijación coincidan con las perforaciones de la mesa vibradora (ver Figura C-0-1). Esta distancia fue del orden de 1 mm. Luego, los pernos deben apretarse en forma cruzada.



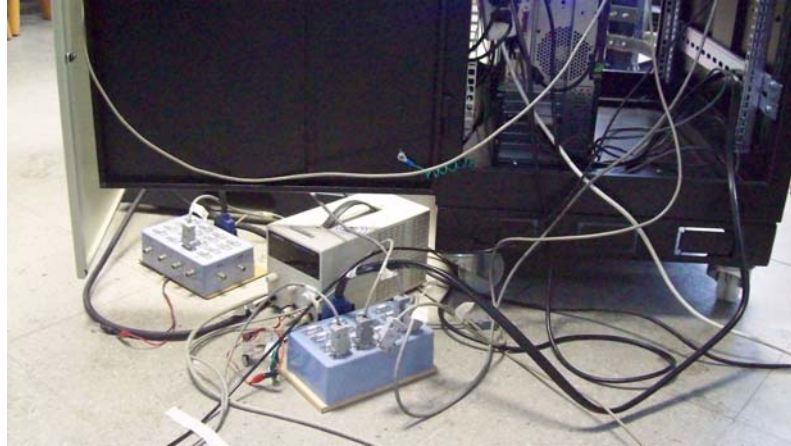
**Figura C-0-1: Placa de fijación**

- Remover el dispositivo de seguridad (ver Figura 4-5). Para lograr esto, es necesario mover la mesa vibradora hacia delante hasta que sea posible soltar el dispositivo (esta distancia fue típicamente de 4 mm), el cual se encuentra apretado debido al peso propio del sistema de bielas.
- Calibrar los sensores.
- Estudiar el factor de amplificación existente para las características del ensayo.



El procedimiento general para el ensaye de materiales es el siguiente:

- Conectar los sensores a la tarjeta de adquisición de datos (ver Figura C-0-2). Los potenciómetros deben ser excitados mediante una fuente de poder.



**Figura C-0-2: Conexión sensores**

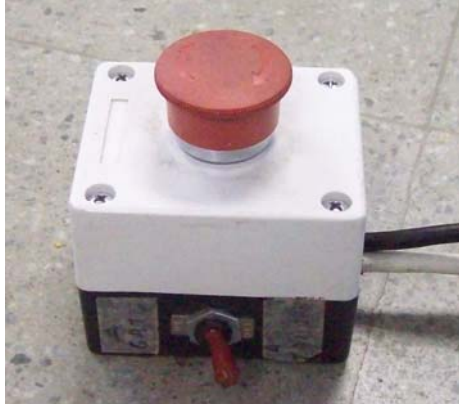
- Medir el largo inicial de la probeta (total).
- Fijar la probeta a la mordaza superior (ver Figura C-0-3). Se debe dar un apriete tal que la probeta no resbale. Para no doblar la probeta accidentalmente de utilizan prensas. Luego, motar este dispositivo en la máquina de ensaye, dejando suelta la mordaza inferior.



**Figura C-0-3: Fijación mordaza superior**

- Encender el sistema oleohidráulico y presurizar la válvula dinámica.

**Nota:** De aquí en adelante se debe tener máxima precaución en la manipulación del dispositivo, pues de presentar inestabilidades, la mordaza superior puede subir inesperadamente. Ante cualquier accidente, presionar inmediatamente el botón de seguridad de la mesa vibradora, el cual apaga el sistema oleohidráulico (ver Figura C-0-4).



**Figura C-0-4: Botón de seguridad**

- Fijar la probeta a la mordaza inferior. Para esto, se deben apretar los pernos en forma cruzada, de modo que se alcance el torque requerido por el fabricante (ver catálogo mordaza en el Anexo D). Para estos efectos, existe una llave de torque y un vástago con el cual es posible apretar sin que la mordaza gire.
- Medir la longitud efectiva de la probeta (distancia libre entre las probetas). Este valor es importante, pues es el utilizado para el cálculo de la deformación porcentual.
- Montar el extensómetro. Para los diámetros ensayados en este trabajo (2.46 mm) fue necesario hacer una pequeña muesca con una lima en la probeta, pues de otro modo el extensómetro resbaló. Una vez montado el extensómetro, sacar el seguro del mismo.
- Balancear la celda de carga y el extensómetro. Esto permite centrar la señal en 0 Volt.
- Iniciar la lectura de datos.
- Iniciar el movimiento de la mesa vibradora.
- Detener la lectura de datos.
- Soltar la mordaza inferior.
- Despresurizar la válvula dinámica y apagar el sistema oleohidráulico.
- Medir el largo (total) de la probeta

## Rutina de procesamiento de datos:

La siguiente rutina fue desarrollada para escalar, filtrar, graficar y procesar los datos obtenidos mediante una matriz de entrada de voltajes.

```
function [res]=resultados(A,xo,n,f,fc,t,Lo,c)
%
%[res]=resultados(A,xo,n,f,fc,t,Lo,c)
%
%A: Matriz de datos según convención canales
%xo: índice del registro donde comienza el movimiento
%n: numero de ciclos
%f: frecuencia [Hz]
%fc: frecuencia de corte
%t: tasa de muestreo
%xf: punto final para offset
%Lo: largo efectivo probeta MM
%c: Vector de ciclos a graficar (máximo 5)
%
%Canal 0: Celda de carga
%Canal 1: Extensómetro
%Canal 2: Potenciómetro 25
%Canal 3: Potenciómetro 100
%Canal 4: LDVT externo
%
close all;

g=9.80665;          %aceleración de gravedad
d=2.54;            %diámetro probeta MM
area=pi*d^2/4;    %area probeta MM2

%ESCALA REGISTRO

C=escala(A,area,g);

%FILTRO PASA BAJOS

[Y,X]=butter(10,fc/100);          %diseño de filtro pasa bajos con fc y 10
polos
Cf=filtfilt(Y,X,C);              %filtrado de señal

%x0:punto de término del registro
xf=xo+n*t/f;

%OFFSET

offset=mean(Cf(xo-4*t:xo,:));      %desde 4 segundos antes de iniciar
el movimiento

res=[Cf(:,1)-offset(1) Cf(:,2)-offset(2) Cf(:,3)-offset(3) Cf(:,4)-offset(4)
Cf(:,5)-offset(5) Cf(:,6)-offset(6)]; %quita el offset

pot=res(:,3:4);
```

```

ldvt=res(:,5);
corrimiento=(res(xo,3)+res(xo,4))/2;
potprom=(res(:,3)+res(:,4))/2-corrimiento; %Para que el primer ciclo parta
justo en e=0% y que los demás ciclos se reordenen con respecto a este

res=[res potprom];

%GRAFICA FILTRADA
subplot(2,1,1);
plot(res(:,1));
title('Señal Filtrada');
ylabel('Fuerza [kgf]'); % Etiqueta el eje vertical
legend('celda'); % Pune una leyenda

subplot(2,1,2);
plot(res(:,2:5));
ylabel('Desplazamiento mm'); % Etiqueta el eje vertical
legend('ext', 'p25', 'p100', 'LDVT'); % Pune una leyenda

%FACTOR DE AMPLIFICACIÓN
potmaxmin=maxmin(potprom,n,xo,f,t);
deltapot=potmaxmin(:,1)-potmaxmin(:,2);
ldvtmaxmin=maxmin(res(:,5),n,xo,f,t);
deltaldvt=ldvtmaxmin(:,1)-ldvtmaxmin(:,2);

FA=mean(deltapot./deltaldvt)

%PROPIEDADES POR CICLO
pol_coefsSt=zeros(n,2); %guarda constantes de recta tangente

integral=zeros(n,1); %guarda la integral energía de los ciclos de carga
maxJ=zeros(n,1); %guarda el máximo en el eje de las ordenadas
dx=dx(potprom)'/1000; %en metros
fdx=res(:,1).*dx; %en Joule

er=zeros(n,1); %guarda la deformación remanente por ciclo.

pol_coefsY=zeros(n,2); %guarda constantes de recta tangente

for i=1:n
i_i=xo+t*(i-1)/f; %indice de inicio del ciclo en el registro
i_f=xo+t*i/f; %indice de fin del ciclo en el registro

%DEFORMACIÓN REMANENTE
auxer=find(abs(res(i_i:i_f,6)-5)<2)+i_i-1; %resolución suficiente (ITERAR)
auxer=auxer(end);
er(i)=potprom(auxer)/Lo*100;

%MÓDULO DE YOUNG: Ajuste por mínimos cuadrados desde 0.25% al 0.5% de
%deformación

if i==1
xyoung_i=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-0.25)<0.05 & res(i_i:i_f,6)>0)+i_i-
1; %resolución suficiente para detectar los 100 ciclos (ITERAR)

```

```

xyoung_f=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-0.50)<0.05 & res(i_i:i_f,6)>10)+i_i-1; %resolución suficiente para detectar los 100 ciclos (ITERAR)
xyoung_i=xyoung_i(1);
xyoung_f=xyoung_f(1);
else
xyoung_i=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-er(i-1)-0.25)<0.05 & res(i_i:i_f,6)>0)+i_i-1; %resolución suficiente para detectar los 100 ciclos (ITERAR)
xyoung_f=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-er(i-1)-0.50)<0.05 & res(i_i:i_f,6)>10)+i_i-1; %resolución suficiente para detectar los 100 ciclos (ITERAR)
xyoung_i=xyoung_i(1);
xyoung_f=xyoung_f(1);
end

aux_x=potprom(xyoung_i:xyoung_f)/Lo;
pol_coefsY(i,:)=polyfit(aux_x,res(xyoung_i:xyoung_f,6),1);

%TENSIÓN DE TRANSFORMACIÓN: intersección recta de E con recta por ajuste por mínimos cuadrados entre el 3.5% y el 5% de deformación (ITERAR)

auxst1=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-3.5)<0.05)+i_i-1; %desde el 4%
auxst2=find(abs(potprom(i_i:i_f)/Lo*100-5.0)<0.05)+i_i-1; %hasta el 5%
xst_i=auxst1(1);
xst_f=auxst2(1);
aux_x=potprom(xst_i:xst_f)/Lo;
pol_coefsSt(i,:)=polyfit(aux_x,res(xst_i:xst_f,6),1);

%CÁLCULO DE AMORTIGUAMIENTO
auxJ=fdx(i_i:i_f); %en Joule
integral(i)=sum(fdx(i_i:i_f)); %Energía
disipada por ciclo
maxJ(i)=max(res(i_i:i_f,1)/1000.*potprom(i_i:i_f)); %en Joule

end

St=(pol_coefsSt(:,1).*pol_coefsY(:,2)-pol_coefsY(:,1).*pol_coefsSt(:,2))./(pol_coefsSt(:,1)-pol_coefsY(:,1)));

Ed=integral; %en Joule
Es=0.5*maxJ; %en Joule

%GRAFICAS HISTÉRESIS
figure;
subplot(2,2,1);
plot(potprom(xo:xf)/Lo*100,res(xo:xf,6));
axis([-1,8,-100,800]);
title('Histéresis Celda v/s potenciómetro (promedio)');
xlabel('Deformación [%]');
ylabel('Tensión [MPa]');

subplot(2,2,2);
plot(res(xo:xf,5)/Lo*100,res(xo:xf,6));
axis([-1,8,-100,800]);
title('Histéresis Celda v/s LDVT');
xlabel('Deformación [%]');
ylabel('Tensión [MPa]');

```

```

subplot(2,2,3);
plot(res(xo:xf,2)/25*100,res(xo:xf,6));
axis([-1,8,-100,700]);
title('Histéresis Celda v/s extensómetro');
xlabel('Deformación [%]');
ylabel('Tensión [MPa]');

subplot(2,2,4);
plot(res(xo:xf,2)/25*100,res(xo:xf,6),res(xo:xf,3)/Lo*100,res(xo:xf,6),res(xo:
xf,4)/Lo*100,res(xo:xf,6));
axis([-1,8,-100,800]);
title('Comparación potenciómetros, extensómetro');
xlabel('Deformación [%]');
ylabel('Tensión [MPa]');
legend('EXT', 'P25', 'P100');

```

```
%GRÁFICOS SEGÚN VECTOR "c"
```

```
%primero se elimina el corrimiento del cero de la mesa observado en algunos
%casos (la probeta nunca se pandea, por lo que esto es válido)
```

```

x1=negacero(potprom(xo+t*(c(1)-1)/f:xo+t*c(1)/f));
x2=negacero(potprom(xo+t*(c(2)-1)/f:xo+t*c(2)/f));
x3=negacero(potprom(xo+t*(c(3)-1)/f:xo+t*c(3)/f));
x4=negacero(potprom(xo+t*(c(4)-1)/f:xo+t*c(4)/f));
x5=negacero(potprom(xo+t*(c(5)-1)/f:xo+t*c(5)/f));

```

```

y1=res(xo+t*(c(1)-1)/f:xo+t*c(1)/f,6);
y2=res(xo+t*(c(2)-1)/f:xo+t*c(2)/f,6);
y3=res(xo+t*(c(3)-1)/f:xo+t*c(3)/f,6);
y4=res(xo+t*(c(4)-1)/f:xo+t*c(4)/f,6);
y5=res(xo+t*(c(5)-1)/f:xo+t*c(5)/f,6);

```

```

figure;
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5);

```

```

title('Histéresis Celda v/s potprom','FontSize',12);
axis([-1,8,-100,800]);
set(gca,'ytick',[0 200 400 600 800],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 2 4 6 8],'FontSize',12);
xlabel('Deformación [%]','FontSize',12);
ylabel('Tensión [MPa]','FontSize',12);
legend(strcat('ciclo',num2str(c(1))), strcat('ciclo ',num2str(c(2))),
strcat('ciclo ',num2str(c(3))), strcat('ciclo ',num2str(c(4))), strcat('ciclo
',num2str(c(5))), 'FontSize',12, 'Location', 'SouthEast');

```

```
%GRÁFICA DE LA RECTA PARA EL MÓDULO DE YOUNG
```

```

hold on;
xYoung = linspace(-1,8,xf-xo+1);
yYoung1 = pol_coefsY(c(1),1)*xYoung/100+pol_coefsY(c(1),2);
yYoung2 = pol_coefsY(c(2),1)*xYoung/100+pol_coefsY(c(2),2);
yYoung3 = pol_coefsY(c(3),1)*xYoung/100+pol_coefsY(c(3),2);
yYoung4 = pol_coefsY(c(4),1)*xYoung/100+pol_coefsY(c(4),2);
yYoung5 = pol_coefsY(c(5),1)*xYoung/100+pol_coefsY(c(5),2);

```

```

plot(xYoung,yYoung1,xYoung,yYoung2,xYoung,yYoung3,xYoung,yYoung4,xYoung,yYoung
5);

%GRÁFICA DE LA RECTA PARA LA TENSIÓN DE TRANSFORMACIÓN
hold on;
xSt = linspace(-1,8,xf-xo+1);
ySt1 = pol_coefsSt(c(1),1)*xSt/100+pol_coefsSt(c(1),2);
ySt2 = pol_coefsSt(c(2),1)*xSt/100+pol_coefsSt(c(2),2);
ySt3 = pol_coefsSt(c(3),1)*xSt/100+pol_coefsSt(c(3),2);
ySt4 = pol_coefsSt(c(4),1)*xSt/100+pol_coefsSt(c(4),2);
ySt5 = pol_coefsSt(c(5),1)*xSt/100+pol_coefsSt(c(5),2);
plot(xSt,ySt1,xSt,ySt2,xSt,ySt3,xSt,ySt4,xSt,ySt5);

%GRÁFICA DE ENERGÍAS
figure;
plot([Ed Es])
title('Energía','FontSize',12);
xlabel('Ciclo','FontSize',12);
ylabel('[Joule]','FontSize',12);
axis([0,100,0,1.5]);
set(gca,'ytick',[0 0.5 1.0 1.5],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 25 50 75 100],'FontSize',12);
legend('Ed', 'Es');

%GRÁFICA DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE
figure;
betaeq=Ed./(4*pi*Es)*100;
beta50_100=mean(betaeq(50:100))
plot(betaeq)
title('Amortiguamiento equivalente','FontSize',12);
xlabel('Ciclo','FontSize',12);
ylabel('Beta eq [%]','FontSize',12);
axis([0,100,0,6]);
set(gca,'ytick',[0 2 4 6],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 25 50 75 100],'FontSize',12);

%GRÁFICA DE MODULO DE ELASTICIDAD
figure;
plot(pol_coefsY(:,1)/1000) %en GPa
title('Módulo de elasticidad','FontSize',12);
xlabel('Ciclo','FontSize',12);
ylabel('E [GPa]','FontSize',12);
axis([0,100,0,60]);
set(gca,'ytick',[0 20 40 60],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 25 50 75 100],'FontSize',12);

%GRÁFICA DE TENSIÓN DE TRANSFORMACIÓN
figure;
plot(St)
title('Tensión de transformación','FontSize',12);
xlabel('Ciclo','FontSize',12);
ylabel('St [MPa]','FontSize',12);
axis([0,100,0,800]);
set(gca,'ytick',[0 200 400 600 800],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 25 50 75 100],'FontSize',12);

```

```

%GRÁFICA DE DEFORMACIÓN REMANENTE
figure;
plot(er)
title('Deformación remanente','FontSize',12);
xlabel('Ciclo','FontSize',12);
ylabel('er [%]','FontSize',12);
axis([0,100,0,3.0]);
set(gca,'ytick',[0 1.0 2.0 3.0],'FontSize',12);
set(gca,'xtick',[0 25 50 75 100],'FontSize',12);

%%Escala señal según curvas de calibración
function a=escala(reg,area,g)

a1=reg(:,1)*204.22;           % celda kgf (calobración de fábrica)
a2=reg(:,2)*0.711061;       % extensómetro MTS mm (calibración 12/01/2010)
a3=reg(:,3)*5.8365;         % potenciómetro25 mm (calibración 07/09/2009)
a4=reg(:,4)*37.71092;       % potenciómetro100 mm (calibración 06/01/2010)
a5=reg(:,5)*63.479;         % LDVT externo mm (calibración psm)
a6=reg(:,1)*204.22*g/area;   % celda MPa (según calibración de a1)

a=[a1 a2 a3 a4 a5 a6];

%%Devuelve una matriz de n x 2, correspondiente a la columna de máximos y
%%mínimos
function [B]=maxmin(A,n,xo,f,t);
paso=t/(2*f);
for i=1:n
    B(i,1)=max(A(xo+t*(i-1)/f:xo+t*i/f));
    B(i,2)=min(A(xo+t*(i-1)/f:xo+t*i/f));
    %B(i,3)=xo+t*(i-1)/f;
    %B(i,4)=xo+t*i/f;

end

%Lleva a cero todos los puntos que sean negativos
function pos=negacero(vector)
    for i=1:size(vector)
        pos(i)=max(0,vector(i));
    end

function [C]=dx(A)
C(size(A))=0;
for i=1:size(A)-1
    C(i)=A(i+1)-A(i);
end

```



