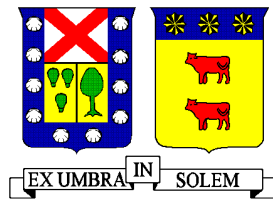


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO – CHILE



MEDICIÓN DE FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS EN OSCILACIONES DE
ESTRUCTURAS SIMPLES MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES

Memoria de titulación presentada por

EDUARDO ERNESTO OLMOS OLIVARES

Como requisito para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía

Rene Tobar Ramos

AGOSTO 2016

Resumen

En este trabajo se desarrolla un método para obtener fuerzas y desplazamientos mediante análisis de imágenes en ensayos dinámicos de estructuras simples, es decir, sistemas de masas concentradas cuyo movimiento queda asociado a un grado de libertad definido. De esta forma se puede caracterizar el comportamiento de la estructura por medio de la curva de histéresis que relaciona el corte basal y el desplazamiento relativo. El análisis de imágenes tiene como ventaja que no es invasivo, y la secuencia de video asociada permite ver el mecanismo de agrietamiento, modo de falla y vaciamiento de nudos.

Se estudia el caso de marcos con voladizos a escala 1:10 contruidos con micro-hormigón armado, ensayados en la mesa de simulación sísmica del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del Departamento de Obras Civiles. Los ensayos se filmaron con una cámara de alta velocidad determinando el corte basal a partir de la aceleración de la masa obtenida por doble derivación de los desplazamientos medidos del registro filmico.

Una dificultad que se encontró fue que la aceleración presenta variaciones súbitas debido a la complejidad del sistema dinámico de la masa concentrada. Se investigó en qué grado es este efecto relevante para las deformaciones y esfuerzos en los materiales componentes. Para esto se ensayó un par de marcos a escala 1:10 incorporando un sistema de medición de corte basal directo en cada columna que consistió en un apoyo con roce despreciable en la dirección horizontal conectado a una celda de carga que mide la reacción en esa dirección.

Los resultados de corte basal directo, comparados con los obtenidos por el análisis de imágenes, comprobaron que las variaciones súbitas de la aceleración no se traducen en desplazamientos que representen esfuerzos o deformaciones adicionales de consideración. Por lo mismo se estudian y aplican métodos matemáticos que sirvan para eliminar estos efectos que no son importantes para caracterizar el comportamiento de la estructura.

Abstract

A method to obtain forces and displacements through image analysis in dynamic tests of simple structures is developed. Using this technique the hysteresis loop, which characterizes the behavior of the structure, can be traced directly. Furthermore, image analysis is not invasive, and the associated video sequence allows examining directly the failure mode.

Reduced scale frames built with steel and micro-concrete were studied and tested at the shake table of the Laboratory of Seismic Engineering of the Civil Engineering Department. The tests were filmed with a high speed camera in order to obtain shear forces from the mass acceleration determined by double derivation of the measured displacements from the filmic record.

An unexpected difficulty was found when mass acceleration was calculated: besides of noise signal, sudden variations due to the complexity of the dynamical system. However, these variations were related only to negligible strains and stresses in the component materials because of the small displacements involved. Direct measurement of force, showed that sudded variations are not transmitted to the columns and they do not cause significant reaction forces nor bending moments. For this reason it was possible to apply mathematical methods to get rid of those effects and to clean acceleration register obtaining exacted and undistorted hysteresis curves.

Glosario

μ : Factor de ductilidad.

δ_y : Desplazamiento de fluencia.

δ_{max} : Desplazamiento máximo.

Δt : Paso que corresponde a la separación de los datos en el tiempo medido en segundos.

k : Rigidez.

ω_n : Frecuencia del movimiento sinusoidal de la serie i en $[rad/s]$.

ω_i : Frecuencia natural.

A_i : Amplitud del desplazamiento de la serie i en $[mm]$.

$a(t)$: Historia de aceleraciones (acelerograma).

a_i : Aceleración en el instante i .

B_i : Puntos de control. También conocidos como vértices de control.

d : Razón de amortiguamiento.

F_{corte} : Fuerza de corte basal.

g : Aceleración de gravedad.

IA : Intensidad de arias.

k : Grado de los polinomios que tienen por condición $k \leq n$.

m : Masa del sistema.

m_v : Masa de la viga.

m_b : Masa de la base.

m_{col} : Masa de columna.

m_{cil} : Masa conjunto de cilindros de acero.

$N_i^k(t)$: Función de base i -ésima de grado k .

$n + 1$: Número de puntos de control.

P_{DH} : Potencial destructivo horizontal.

PGA : Peaj ground aceleration

$P(u)$: B-Spline en función del parámetro u .

P_D : Potencial destructivo

$x_i(t)$: Desplazamiento correspondiente a la serie i .

t_f : Tiempo total del registro.

u : Variable paramétrica para definir la curva *B-Spline*.

$V_x(t)$: Corte basal en la dirección x en función del tiempo.

$V_{celda}(t)$: Fuerza entregada por la celda de carga.

v_0 : Cruces por cero.

v_i : Velocidad en el instante i .

x_i : Elemento i -ésimo del *vector de nodos* x .

x_{viga} : Desplazamiento absoluto de la viga obtenido por el análisis de imágenes.

x_i : Posición en el instante i .

$\ddot{x}_{basal}(t)$: Aceleración basal.

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XIII
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación del estudio.....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Esquema de presentación de la memoria.....	3
Capítulo 2: Ensayos dinámicos de estructuras a escala.....	5
2.1 Filosofía de los ensayos dinámicos de estructuras a escala.....	5
2.1.1 Curva de histéresis.....	6
2.2 Historia de la instrumentación de los ensayos.....	8
2.2.1 Medición de desplazamientos.....	8
2.2.2 Medición de fuerzas	9
2.2.3 Medición de fuerzas y desplazamientos por análisis de imágenes.....	10
2.3 Solicitaciones que se aplican en la mesa sísmica.....	11
2.3.1 Intensidades instrumentales analizadas	13
2.3.2 Resultados de intensidades instrumentales analizadas	14
2.3.3 Comentario de resultados	15
Capítulo 3: Fuerzas y desplazamientos por análisis de imágenes.....	17
3.1 Descripción del programa utilizado	17
3.1.1 Funcionamiento del programa	18
3.2 Método de <i>B-Spline</i>	21
3.2.1 Vector de nodos	22
3.2.2 Funciones de base	24
3.2.3 B-Splines	25
3.3 Preparación de los resultados para obtener la curva de histéresis	26

Capítulo 4: Ensayos anteriores revisitados con el método de análisis de imágenes	29
4.1 Resultados marco M5 A4800	29
4.1.1 Desplazamientos.....	30
4.1.2 Velocidad	30
4.1.3 Aceleración.....	32
4.1.4 Curva de histéresis.....	34
Capítulo 5: <i>Efecto serpenteo</i> en ensayos dinámicos	36
5.1 Diseño del ensayo	36
5.1.1 Consideraciones en los resultados	37
5.1.2 Cálculos previos	38
5.1.3 Solicitud.....	38
5.2 Resultados	39
5.2.1 Vibraciones libres sin masa suelta	40
5.2.2 Vibraciones libres con masa suelta	42
5.2.3 2.5Hz sin masa suelta	44
5.2.4 2.0Hz con masa suelta	46
5.3 Acerca de la medición de desplazamientos y fuerzas.....	48
5.3.1 Desplazamientos.....	48
5.3.2 Fuerzas.....	48
5.4 Análisis del <i>efecto serpenteo</i>	49
5.5 Origen del <i>efecto serpenteo</i> en marcos de micro-hormigón armado	52
Capítulo 6: Ensayos en plataforma de medición directa de corte basal ...	53
6.1 Diseño del ensayo	53
6.1.1 Sistema auxiliar de soporte de cargas.....	54
6.2 Especímenes.....	56
6.3 Instrumentación.....	59
6.3.1 Medición de corte basal	59

6.3.2	Medición de desplazamientos.....	59
6.4	Montaje.....	59
Capítulo 7: Resultados de ensayos dinámicos		62
7.1	Solicitaciones	62
7.2	Eliminación de efecto serpenteo.....	62
7.2.1	Corrección aplicada.....	63
7.3	Resultados Marco MET-01.....	64
7.3.1	Serie 1 MET-01: Vibraciones libres	64
7.3.2	Serie 2 MET-01: 5mm-5Hz	65
7.3.3	Serie 3 MET-01: 5mm-3Hz	66
7.3.4	Serie 4 MET-01: 5mm-2Hz	67
7.4	Resultados Marco HA-01.....	68
7.4.1	Serie 1 HA-01: Vibraciones libres	68
7.4.2	Serie 2 HA-01: 5mm-4Hz	69
7.4.3	Serie 3 HA-01: 10mm-2Hz	70
7.4.4	Serie 4 HA-01: 20mm-2Hz	71
7.5	Comentarios de resultados.....	71
Capítulo 8: Exploración de otros métodos para corrección de la curva de histéresis		73
8.1	Transformada de Wavelet	73
8.1.1	Aplicación de la Transformada de Wavelet para la eliminación del efecto serpenteo.....	74
8.2	Comparación de resultados.....	76
8.2.1	Resultado ensayo revisitado de espécimen M5-A4800 serie 30mm-3Hz.	76
8.2.2	Resultado ensayo marco MET-01	77
8.2.3	Resultado ensayo marco HA-01.....	78
8.3	Sobre los resultados	80
Conclusiones		81

9.1	Sobre análisis de imágenes.....	81
9.2	Sobre efecto serpenteo	82
9.3	Para futuros trabajos.....	82
	Referencias.....	84
	Anexos	86

Índice de figuras

Capítulo 1: Introducción

Figura 1-1 – Análisis dinámico aplicado a un marco de hormigón armado.	2
---	---

Capítulo 2: Ensayos dinámicos de estructuras a escala

Figura 2-1 – Curva de histéresis para medio ciclo.	6
Figura 2-2 – Curvas de histéresis que representan distintos comportamientos.	7
Figura 2-3 – Comportamiento de dos estructuras bajo la misma historia de carga.	7
Figura 2-4 – Variables en un ensayo dinámico de un marco a escala.	8
Figura 2-5 – Medición de desplazamientos con transductor LVDT.	8
Figura 2-6 – Medición de aceleración por acelerómetro.	9
Figura 2-7 – Transductores de fuerza.	10
Figura 2-8 – Cámara de alta velocidad NAC HShot Mega.	10
Figura 2-9 – Secuencia de cuadros obtenidos por la cámara de alta velocidad con su curva de histéresis adjunta.	11
Figura 2-10 – Solicitación de la serie i.	12

Capítulo 3: Fuerzas y desplazamientos por análisis de imágenes

Figura 3-1 – Ubicación de <i>targets</i> en la estructura	18
Figura 3-2 – Target al cual se realizó el seguimiento con el programa <i>Tracker</i>	19
Figura 3-3 – Menú y preferencias para el seguimiento del <i>target</i>	19
Figura 3-4 – Secuencia de búsqueda de la posición del target en un cuadro.	20
Figura 3-5 – <i>B-Spline</i> . En negro la curva <i>B-Spline</i> y en rojo los vértices de control.	21
Figura 3-6 – Vectores de nodos.	23
Figura 3-7 – Funciones de base evaluadas en un vector de nodos uniforme.	24
Figura 3-8 – Curva <i>B-Spline</i> con distintos grados.	25
Figura 3-9 – Desplazamientos relativos obtenidos de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de 10[mm]-4[Hz].	27
Figura 3-10 – Velocidad de la viga obtenida de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de 10[mm]-4[Hz]	27

Figura 3-11– Aceleración de la viga obtenida de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de 10[mm]-4[Hz].	28
Figura 3-12 – Procedimiento en la realización de la curva de histéresis.....	28
Capítulo 4: Ensayos anteriores revisitados con el método de análisis de imágenes	
Figura 4-1 – Desplazamiento basal del marco M5-A4800 obtenido por análisis de imágenes.....	30
Figura 4-2 – Desplazamiento relativo a la base del marco M5-A4800 por análisis de imágenes.....	30
Figura 4-3 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 obtenida directamente por el método de diferencia central.	31
Figura 4-4 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=25..	31
Figura 4-5 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=50..	31
Figura 4-6 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=100.	31
Figura 4-7 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=150.	32
Figura 4-8 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 obtenida directamente a partir de la velocidad sin suavizado.	32
Figura 4-9 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=25.	32
Figura 4-10 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=50.	33
Figura 4-11 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=100.	33
Figura 4-12 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con <i>B-Splines</i> grado k=150.	33
Figura 4-13 – Curva de histéresis del marco M5-A4800.	34
Capítulo 5: Efecto serpenteo en ensayos dinámicos	
Figura 5-1 – Ensayo de marco metálico para analizar el efecto de serpenteo.....	36
Figura 5-2 – Ensayo de marco metálico montado.....	37
Figura 5-3 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con LVDT.	40

Figura 5-4 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con análisis de imágenes.....	40
Figura 5-5 – Corte basal en vibraciones libres medido con celda de carga.....	40
Figura 5-6 – Corte basal en vibraciones libres medido con análisis de imágenes.....	40
Figura 5-7 – Deformación de columnas en vibraciones libres medido con <i>strain gages</i> . Marco sin masa adicional.....	41
Figura 5-8 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con LVDT. Marco con masa adicional.....	42
Figura 5-9 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco con masa adicional.....	42
Figura 5-10 – Corte basal en vibraciones libres medido con celda de carga. Marco con masa adicional.....	42
Figura 5-11 – Corte basal en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco con masa adicional.....	42
Figura 5-12 – Deformación en vibraciones libres medido con <i>strain-gages</i> . Marco con masa adicional.....	43
Figura 5-13 – Desplazamiento basal de 5mm-2.5Hz medido por LVDT y análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.....	44
Figura 5-14 – Desplazamiento relativo del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.....	44
Figura 5-15 – Corte basal del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido por celda de carga y con análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.....	44
Figura 5-16 – Deformación de las columnas del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido por <i>strain-gages</i> . Marco sin masa adicional.....	45
Figura 5-17 – Curva de histéresis del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz. Marco sin masa adicional.....	45
Figura 5-18 – Desplazamiento basal de 5mm-2.0Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.....	46
Figura 5-19 – Desplazamiento relativo del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.....	46
Figura 5-20 – Corte basal del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con celda de cara y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.....	46

Figura 5-21 – Deformación de las columnas del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con <i>strain-gages</i> . Marco con masa adicional.	47
Figura 5-22 – Curva de histéresis del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz. Marco con masa adicional.....	47
Figura 5-23 –Correlación entre mediciones realizadas con el LVDT y análisis de imágenes.....	48
Figura 5-24 – Efecto de serpenteo en marco metálico.....	51
Figura 5-25 – Dinámica de la masa concentrada sobre el marco de hormigón armado.	52

Capítulo 6: Ensayos en plataforma de medición directa de corte basal

Figura 6-1 – Base de medición.	53
Figura 6-2 – Vista frontal de la base de medición.	54
Figura 6-3 – Vista superior de la base de medición.	54
Figura 6-4 – Sistema auxiliar de soporte de cargas utilizado en el ensayo de marcos a escala [5].....	55
Figura 6-5 – Sistema de soporte de cargas apoyado en cables de acero.....	55
Figura 6-6 – Marco MET-01. Antes de ser ensayado.....	56
Figura 6-7 – Marco HA-01. Luego de ser ensayado.	56
Figura 6-8 – Marco MET-01. Medidas en milímetros.....	57
Figura 6-9 – Secciones transversales Marco MET-01.....	57
Figura 6-10 – Marco HA-01. Medidas en milímetros.	58
Figura 6-11 – Secciones transversales Marco HA-01.....	58
Figura 6-12 – Esquema de conexiones para la generación de la señal y adquisición de datos.....	59
Figura 6-13 – Sistema de soporte apoyado en cables de acero cargado con unidades de plomo.....	60
Figura 6-14 – Marco MET-01 montado.	60
Figura 6-15 – Marco HA-01 montado.	61

Capítulo 7: Resultados de ensayos dinámicos

Figura 7-1 – Corte basal del Marco HA-01 en la serie 4 obtenido por análisis de imágenes con <i>B-Spline</i> grado100.....	63
--	----

Figura 7-2 – Corte basal del Marco HA-01 en la serie 4 obtenido por celdas de carga.	63
Figura 7-3 – Curva de histéresis del Marco HA-01 de la serie 4.	63
Figura 7-4 – Corte basal en vibraciones libres de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.	64
Figura 7-5 – Corte basal en vibraciones libres de Marco MET-01 obtenido análisis de imágenes.	64
Figura 7-6 – Corte basal en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.	65
Figura 7-7 – Corte basal en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.	65
Figura 7-8 – Curva de histéresis en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01.	65
Figura 7-9 – Corte basal en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.	66
Figura 7-10 – Corte basal en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.	66
Figura 7-11 – Curva de histéresis en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01.	66
Figura 7-12 – Corte basal en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.	67
Figura 7-13 – Corte basal en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.	67
Figura 7-14 – Curva de histéresis en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01.	67
Figura 7-15 – Corte basal en vibraciones libres de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.	68
Figura 7-16 – Corte basal en vibraciones libres de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.	68
Figura 7-17 – Corte basal en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.	69
Figura 7-18 – Corte basal en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.	69
Figura 7-19 – Curva de histéresis en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01.	69

Figura 7-20 – Corte basal en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.....	70
Figura 7-21 – Corte basal en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.	70
Figura 7-22 – Curva de histéresis en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01.....	70
Figura 7-23 – Corte basal en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.....	71
Figura 7-24 – Corte basal en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.	71
Figura 7-25 – Curva de histéresis en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01.....	71
Capítulo 8: Exploración de otros métodos para corrección de la curva de histéresis	
Figura 8-1 – Descomposición de una señal [17].....	73
Figura 8-2 – Filtro de una señal S [17]	74
Figura 8-3 – Señal de fuerza descompuesta en un filtro de 5 niveles.....	75
Figura 8-4 – Nudo de marco M5-A4800 luego de la serie 30mm-3Hz.....	76
Figura 8-5 – Curva de histéresis de marco M5-A4800 serie 30mm-3Hz.....	76
Figura 8-6 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-5Hz.....	77
Figura 8-7 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-3Hz.....	77
Figura 8-8 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-2Hz.....	78
Figura 8-9 – Curva de histéresis marco HA-01 5mm-4Hz.....	78
Figura 8-10 – Curva de histéresis marco HA-01 10mm-2Hz	79
Figura 8-11 – Curva de histéresis marco HA-01 20mm-2Hz.....	79

Índice de tablas

Capítulo 2: Ensayos dinámicos de estructuras a escala

Tabla 2-1 – Factores de escala.....	5
Tabla 2-2 – Solicitaciones aplicadas a marcos.	12
Tabla 2-3 – Parámetros de cada serie para determinar movimiento basal es escala 1:10.	13
Tabla 2-4 – Parámetros del movimiento basal en escala real.	15
Tabla 2-5 – Resumen de intensidades determinadas para solicitaciones de los ensayos a escala real.....	15
Tabla 2-6 – Potencial Destructivo Horizontal de los últimos terremotos a la fecha [8].	15

Capítulo 4: Ensayos anteriores revisitados con el método de análisis de imágenes

Tabla 4-1 – Ciclos de cargas aplicados al espécimen M5 A4800.....	30
---	----

Capítulo 5: Efecto de serpenteo en ensayos dinámicos

Tabla 5-1 – Solicitaciones para marco metálico.....	38
---	----

Capítulo 7: Resultados de ensayos dinámicos

Tabla 7-1 – Serie de solicitaciones aplicadas a los especímenes.....	62
--	----

Capítulo 1

1 Introducción

El Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente de la UTFSM tiene bastante experiencia en el estudio de estructuras modeladas a escala reducida sometidas a sollicitación sísmica. La realización de los ensayos requiere la medición de fuerzas y desplazamientos con los que se dibuja la curva de histéresis que relaciona el corte basal y el desplazamiento relativo con respecto a la base y que caracteriza el comportamiento de la estructura.

En esta memoria se presenta el análisis de imágenes como método de medición de desplazamientos y variables relacionadas, como la velocidad y aceleración. De esta última se pueden obtener las fuerzas actuantes. Los desplazamientos se determinan desde la secuencia de video por medio de un programa que hace un seguimiento a los puntos de interés. Las fuerzas se determinan a partir de la aceleración que se obtiene por doble derivación de los desplazamientos. El análisis de imágenes tiene como ventaja que no es invasivo y la secuencia fílmica permite ver el mecanismo de agrietamiento, modo de falla y vaciamiento de nudos.

Específicamente, en esta memoria, se estudió el caso de marcos a escala 1:10, contruidos con micro-hormigón armado, ensayados en la mesa de simulación sísmica del laboratorio entre los años 2005 y 2015. Los marcos estudiados, son considerados sistemas dinámicos de estructuras simples, vale decir, pueden ser modelados como una masa concentrada cuyo movimiento se asocia a un grado de libertad definido.

1.1 Motivación del estudio

Una de las ventajas de los ensayos dinámicos, respecto a los ensayos *cuasi-estáticos*, es que consideran el efecto de la velocidad de deformación en el material [1] [2]. Los resultados de estos ensayos corresponden a la respuesta de la estructura que puede ser en términos del corte basal, aceleración o desplazamientos.

A la actualidad existe considerable avance en cuanto a las facilidades para la adquisición de registros fílmicos, tanto en cámaras de alta velocidad de alta resolución como en computadores capaces de procesar dicha información. Por lo anterior se hace lógico pensar en la obtención de los desplazamientos por medio de un método de análisis de imágenes, pues presenta una serie de ventajas con respecto a los instrumentos de medición que se han utilizado hasta ahora.

Obtener la fuerza por doble derivación de los desplazamientos no es un procedimiento simple, pues no entrega resultados en primera instancia legibles. Debido a la interferencia eléctrica, al proceso de digitalización, entre otros, estos presentan alta cantidad de ruido, que se acentúa a medida que la derivación aumenta de grado. Eliminando el ruido, se encuentran ciertas variaciones súbitas que intuitivamente no representan el comportamiento de la estructura como se muestra en la figura 1-1.

Dichas variaciones súbitas no son propias de la doble derivación, ya que se presentan también en datos obtenidos por acelerómetros, lo que revela que este efecto se presenta a nivel de la masa concentrada.

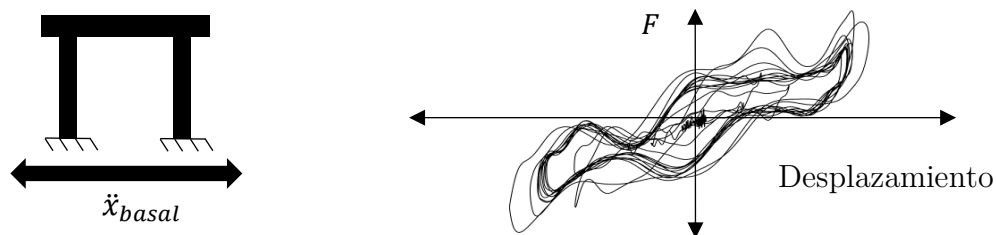


Figura 1-1 – Análisis dinámico aplicado a un marco de hormigón armado. En este ejemplo la sollicitación dinámica fue aplicada a la base del marco. Luego la respuesta está expresada en el gráfico fuerza-deformación.

En este trabajo se estudia la forma típica de las curvas de histéresis obtenidas por distintos métodos aplicando una serie de procedimientos matemáticos que permitan representar efectivamente el comportamiento de la estructura. Se busca la razón de las variaciones súbitas, la importancia que tienen para definir el comportamiento estructural ante eventos sísmicos y la forma de eliminarlas.

1.2 Objetivo

El objetivo del estudio es entonces establecer un procedimiento para obtener fuerzas y desplazamientos de los registros filmicos de una cámara de alta velocidad, el que se desarrolló en primera instancia a partir de registros de ensayos anteriores que fueron filmados con esa cámara. Luego se realizaron ensayos dinámicos de marcos a escala reducida las cuales fueron filmadas para aplicar el método de imágenes desarrollado y además incorporando un sistema de medición de corte basal directo en cada columna, para así comparar los resultados obtenidos con ambos métodos.

El objetivo de los ensayos dinámicos realizados fue determinar la causa de las variaciones súbitas y en qué grado son relevantes para la estructura. Se estableció si este efecto se traduce en esfuerzos y deformaciones en los materiales componentes y se presentaron métodos matemáticos que permitieron la extracción de resultados.

1.3 Esquema de presentación de la memoria

Esta memoria ha sido dividida en los siguientes capítulos:

En el Capítulo 2 se presenta la filosofía de la experimentación y los ensayos dinámicos. Se repasa el significado y utilidad de la curva de histéresis. Se determina la intensidad instrumental de las solicitaciones y se discute si éstas son representativas. Además se hace un compendio de la instrumentación utilizada y una descripción del método de análisis de imágenes aplicado a los problemas que se tratan en la memoria.

En el Capítulo 3 se describe el programa de análisis de imágenes utilizado, que cae en la categoría de *tracking*, y se desarrolla un método de suavizado que funciona como corrección a los datos obtenidos.

En el Capítulo 4 se aplica el método de análisis de imágenes, junto con su corrección, a filmaciones de ensayos de marcos realizados en años anteriores.

En el Capítulo 5 se muestran los resultados de un ensayo dinámico de un marco metálico cuyo objetivo es tener una primera aproximación del *efecto serpenteo* y la importancia que tiene para definir el comportamiento de una estructura

En el Capítulo 6 se realiza un diseño de un ensayo dinámico de manera de obtener el corte basal de forma directa para así compararlo al obtenido por el método del análisis de imágenes.

En el Capítulo 7 se muestran los resultados de los ensayos.

En el Capítulo 8 se exploran otros métodos para la corrección de resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en este trabajo.

Capítulo 2

2 Ensayos dinámicos de estructuras a escala

2.1 Filosofía de los ensayos dinámicos de estructuras a escala

De acuerdo a la teoría de modelos, en términos de factores de escala, hay solo tres variables físicas independientes y todas las demás quedan determinadas a partir de estas tres. En los casos que se tratan en este trabajo las variables independientes son longitud, aceleración y módulo de elasticidad. La tabla 2-1 muestra la relación de las variables con los factores de escala.

Tabla 2-1 – Factores de escala

Variable	Dimensión	Factor de escala
Longitud S_L	L	S_L
Tiempo S_T	T	$S_L^{1/2}$
Velocidad S_V	LT^{-1}	$S_L^{1/2}$
Aceleración S_A	LT^{-2}	1
Peso específico S_P	$FL^{-4}T^1$	S_E/S_L
Deformación S_ε	-	1
Esfuerzo S_σ	FL^{-2}	1
Módulo de elasticidad S_E	FL^{-2}	1
Fuerza S_F	F	S_L^2

En general los ensayos dinámicos realizados en este laboratorio están a escala de longitud 1:10. Es conveniente mantener la escala de la aceleración, ya que los modelos están expuestos a la aceleración de gravedad, la cual es prácticamente imposible de modificar. También conviene mantener la escala del módulo de elasticidad, por tanto la de los esfuerzos, ya que al usar en los modelos los materiales reales se obtienen las características no lineales de éstos. Dada estas condiciones, se produce un problema en la escala de peso específico, el cual se resuelve incorporando una cantidad de masa adicional distribuida lo que da origen al modelo utilizado en este laboratorio: *modelo de réplica con masa adicional artificial* [3] [4] [5].

2.1.1 Curva de histéresis

El objetivo de la obtención de curvas de histéresis fuerza-desplazamiento de una estructura o elemento de ésta, para una historia de sollicitación, es poder predecir el comportamiento para un evento sísmico futuro que en primera instancia se desconoce.

Según la forma que tiene la curva de histéresis se puede concluir el comportamiento estructural, por ejemplo, cuantificando la energía disipada en cada ciclo de carga. Ésta corresponde al área que encierra la curva como muestra la figura 2-1.

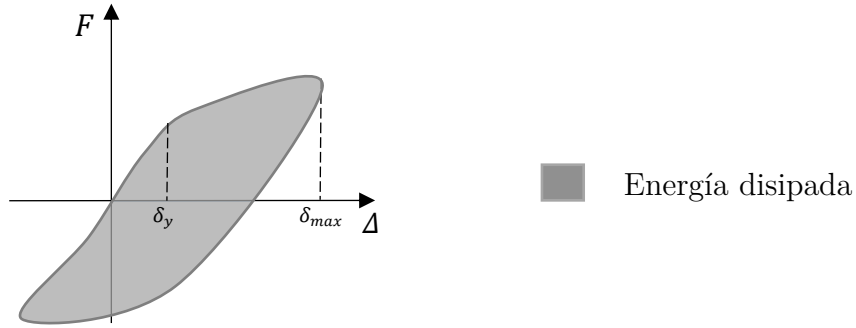


Figura 2-1 – Curva de histéresis para medio ciclo. Se puede ver gráficamente la energía disipada.

Un buen comportamiento acepta grandes deformaciones sin pérdida de resistencia. Para esto se cuantifica el *factor de ductilidad* que se expresa como:

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

En que δ_{max} es el desplazamiento máximo y δ_y el desplazamiento de fluencia. Se desprende que mientras mayor sea el *factor de ductilidad* μ mayor será la capacidad de disipación de energía en el rango no lineal.

En un material que tiene un comportamiento no lineal la rigidez varía de acuerdo a diferentes estados de carga, dependiendo de los ciclos aplicados. En general, se establece una rigidez para cada estado de deformación o una rigidez promedio. Junto con la rigidez se puede ver la resistencia de la estructura como la fuerza máxima en la gráfica como se muestra en la figura 2-2.

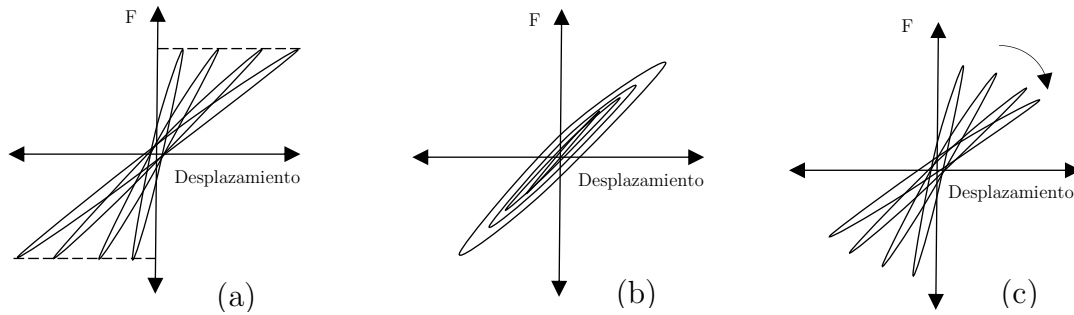


Figura 2-2 – Curvas de histéresis que representan distintos comportamientos. (a) Esta estructura presenta pérdida de rigidez no así de resistencia. (b) Es esta estructura existe pérdida de resistencia manteniendo su rigidez. (c) Existe pérdida de resistencia y rigidez.

Un ejemplo de dos comportamientos de estructuras reflejados en su curva de histéresis se puede ver en la figura 2-3, donde se ha aplicado la misma historia de aceleraciones (o fuerzas) a marcos con distinta clase de detallamiento. La figura 2-3 (a) muestra un comportamiento no deseado, pues mientras pasan los ciclos se produce una degradación de rigidez debido al daño que presenta la estructura. La disipación de energía es baja por lo angosto de los ciclos de histéresis, comparada con la figura 2-3 (b).

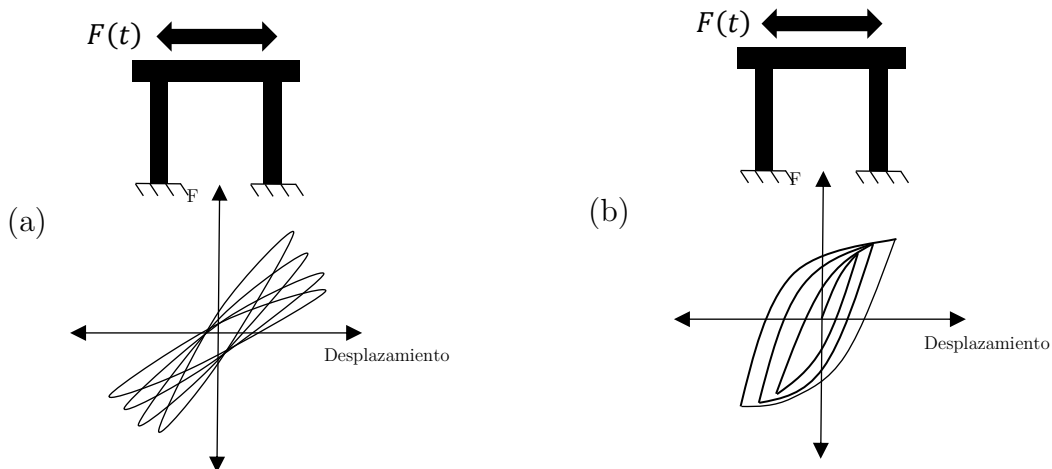


Figura 2-3 – Comportamiento de dos estructuras bajo la misma historia de carga. (a) Pérdida de rigidez de la estructura a medida que pasan los ciclos de carga. (b) Curva de histéresis estable sin pérdida de rigidez y con mayor disipación de energía.

En la figura 2-3 (b) se puede ver un comportamiento deseado, pues no existe pérdida de rigidez significativa a medida que pasan los ciclos. Además es una curva que cubre mayor área que el caso anterior, esto indica que existe una mayor disipación de energía.

2.2 Historia de la instrumentación de los ensayos

En los ensayos dinámicos de marcos en la mesa sísmica de la UTFSM, como los considerados en esta memoria, generalmente se mide: (1) el desplazamiento absoluto de la mesa, (2) el desplazamiento absoluto de la viga y (3) la fuerza de corte. Los desplazamientos relativos se determinan como la diferencia entre los desplazamientos absolutos de la viga y la mesa, mientras que el corte se mide por distintos instrumentos y procedimientos (figura 2-4). A continuación se dan más detalles al respecto.

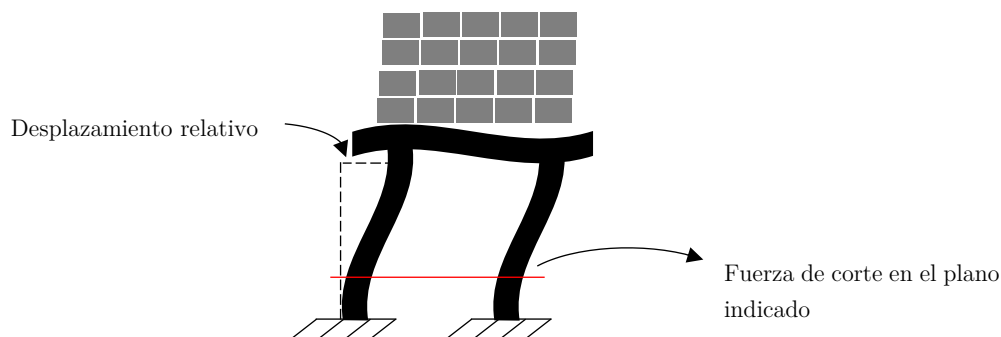


Figura 2-4 – Variables en un ensayo dinámico de un marco a escala.

2.2.1 Medición de desplazamientos

La medición de desplazamientos generalmente se realiza con transductores LVDT sin contacto cuya señal es acondicionada por un amplificador el que a su vez está conectado a un sistema de adquisición de datos. La disposición de los instrumentos se muestra en la figura 2-5.

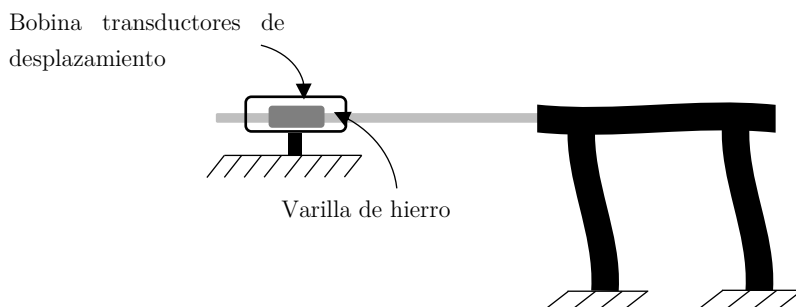


Figura 2-5 – Medición de desplazamientos con transductor LVDT.

2.2.2 Medición de fuerzas

La medición del corte basal de las estructuras que se ensayan en la mesa sísmica ha sido uno de los parámetros que ha presentado mayor dificultad, como ya se ha mencionado en la motivación del estudio.

Las mediciones de fuerza de corte pueden ser directas o indirectas. La primera se refiere a que la lectura del instrumento entrega de inmediato el valor de tal fuerza. Una medición indirecta indica que se mide otra variable y a partir de ésta se calcula la fuerza de corte.

Una manera indirecta de obtener la fuerza es mediante la instalación de un acelerómetro, así el corte basal se determina como el producto entre la aceleración medida y la masa asociada. El instrumento es ubicado de manera tal que entregue la aceleración de la masa concentrada como indica la figura 2-6.



Figura 2-6 – Medición de aceleración por acelerómetro.

Respecto a la medición directa de la fuerza, en este laboratorio se han diseñado y construido transductores de fuerza que miden directamente el corte basal como el que se muestra en la figura 2-7. Su funcionamiento se basa en la medición de deformaciones de una pieza ubicada en la base de los especímenes. A partir de estos datos se determina la fuerza de corte [6].

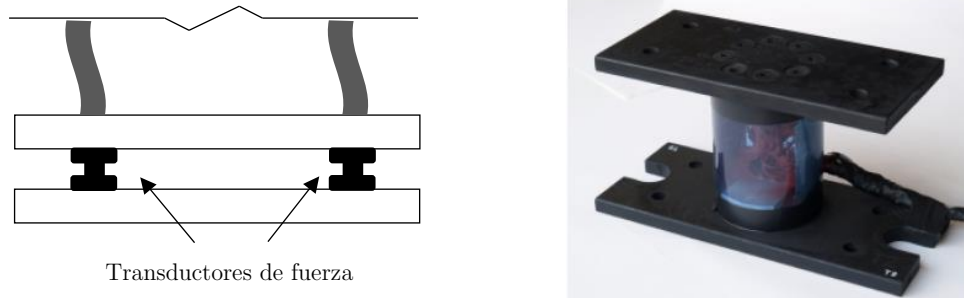


Figura 2-7 – Transductores de fuerza.

La desventaja de estos transductores, contruidos en el laboratorio, es el bajo rango de trabajo comparado con las fuerzas de corte que se desean medir y la dificultad de su operación [6].

Los resultados obtenidos desde los transductores en comparación con los acelerómetros indican que no existen diferencias significativas [3]. Para los ensayos siguientes se utilizaron acelerómetros como sistema de medición de corte, principalmente por la facilidad de implementación en comparación con los transductores de fuerza

2.2.3 Medición de fuerzas y desplazamientos por análisis de imágenes

Desde el año 2008, luego de la adquisición de la cámara de alta velocidad NAC HShot Mega (figura 2-8), se han filmado los ensayos con la idea de adquirir los datos mediante análisis de imágenes, sin embargo, hasta la fecha no se han ocupado las filmaciones de forma sistemática.



Figura 2-8 – Cámara de alta velocidad NAC HShot Mega.

El método de medición de desplazamientos basado en análisis de imágenes consiste en examinar un sector de la estructura cuyo movimiento debe encontrarse en un plano

perpendicular al que se filma. Aunque no es indispensable y el método puede trabajar sin éste, conviene instalar un *target* en el grado de libertad de interés para luego realizar el rastreo de éste sobre las imágenes filmadas mediante algún programa diseñado para este efecto.

La ventaja que tiene este sistema es que es poco invasivo ya no existe ningún elemento que podría causar alguna distorsión en el comportamiento del espécimen, pues no es necesario un contacto con la estructura.

Otra ventaja es que junto con la adquisición de datos se obtiene otro tipo de información relevante para el análisis, como lo es la filmación del modo de falla, propagación de la grieta, vaciamiento de nudos, entre otros. Con esto se puede, por ejemplo, superponer gráficos de respuesta de la estructura sobre el video, facilitando así un análisis más preciso sobre su comportamiento. En la figura 2-9 se muestra una secuencia de cuadros con su respectiva curva de histéresis.

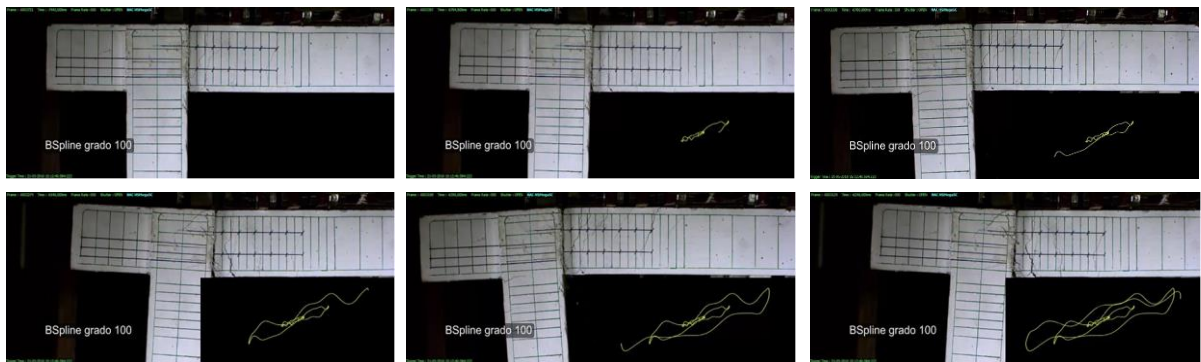


Figura 2-9 – Secuencia de cuadros obtenidos por la cámara de alta velocidad con su curva de histéresis adjunta.

Una de las razones de que este sistema no se ha masificado es por el estado del arte en que se encuentra el análisis de imágenes. En el capítulo 3 se realiza una descripción de la obtención de datos a partir de las imágenes, el programa utilizado y las eventuales correcciones.

2.3 Solicitaciones que se aplican en la mesa sísmica

El análisis se realiza a las solicitaciones aplicadas en los últimos ensayos de marcos realizados en la mesa sísmica del laboratorio [3] [4]. En éstos, las secuencias de carga

son muy parecidas. Todas constan de amplitudes de desplazamiento creciente y una frecuencia que disminuye, tratando de mantener el desplazamiento de la mesa y el de la estructura desfasados en 90° . De esta manera se producen grandes desplazamientos relativos entre la parte superior e inferior de las columnas, dañándose así rápidamente la estructura y con poco trabajo para la mesa.

Tabla 2-2 – Solicitaciones aplicadas a marcos.

Serie	Amplitud [mm]	Frecuencia [Hz]
1	5	5
2	10	4
3	20	3.5
4	30	3

Se establecieron solicitaciones simples para estandarizar los ensayos y así poder realizar comparaciones entre los resultados. Cada serie consiste en la amplitud y frecuencia señalada en la tabla 2-2 con un total de cinco ciclos como lo está señalado en la figura 2-10 [4]. Se caracterizó el desplazamiento de manera analítica como indica la ecuación (2-1).

$$x_i(t) = A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t) \quad (2-1)$$

En que:

$x_i(t)$: Desplazamiento correspondiente a la serie i .

A_i : Amplitud del desplazamiento de la serie i en [mm].

ω_i : Frecuencia del movimiento sinusoidal de la serie i en [rad/s]

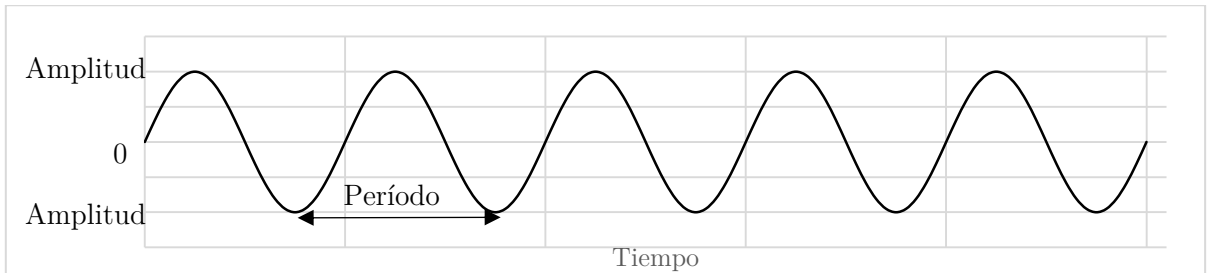


Figura 2-10 – Solicitación de la serie i .

Las intensidades instrumentales que se analizaron dependen de la aceleración. Ésta se obtuvo como la doble derivada del desplazamiento de la ecuación (2-1).

La tabla 2-3 muestra un resumen de las variables importantes para cada serie estudiada.

Tabla 2-3 – Parámetros de cada serie para determinar movimiento basal es escala 1:10.

Serie	Amplitud A_i [mm]	Frecuencia ω_i [rad/s]	t_f [s]	Cruces por cero v_o [s ⁻¹]
1	5	31.42	1.00	10
2	10	25.13	1.25	8
3	20	21.99	1.43	7
4	30	18.85	1.67	6

2.3.1 Intensidades instrumentales analizadas

Estas intensidades han servido para hacerse una idea qué nivel de destrucción esperar en los especímenes ensayados. Uno de los parámetros aplicados fue la *Intensidad de Arias IA* que se define según la ecuación (2-2) [7].

$$IA = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (2-2)$$

En que:

$a(t)$: Historia de aceleraciones (acelerograma).

t_f : Tiempo total del registro.

g : Aceleración de gravedad.

Otro parámetro estudiado es el *Factor de Potencial Destructivo P_D* que se expresa como indica la ecuación (2-3) [7] [8]. Este se basa en la acumulación de deformaciones no lineales de estructuras simples elastoplásticas de un grado de libertad asociado a la ductilidad global de estructuras consideradas en las normas. Además considera un proceso estocástico no estacionario de aceleración caracterizado por una intensidad de cruces por cero v_o .

$$P_D = \frac{\pi}{2 \cdot g} \frac{\int_0^{t_f} a^2(t) dt}{v_o} \quad (2-3)$$

En que:

$a(t)$: Historia de aceleraciones (acelerograma).

t_f : Tiempo total del registro.

g : Aceleración de gravedad.

v_0 : Cruces por cero.

El potencial destructivo también se puede expresar como el cuociente entre la *Intensidad de Arias* y los *cruces por cero* al cuadrado como señala la ecuación (2-4).

$$P_D = \frac{IA}{v_0^2} \quad (2-4)$$

Como se desprende de este análisis, el *Potencial Destructivo* P_D corresponde a una intensidad que se determina para una dirección, la que corresponde a la dirección de la medición del acelerograma. Para considerar los efectos que producen las ondas sísmicas en todas las direcciones en un plano horizontal se define el *Potencial Destructivo Horizontal* P_{DH} como indica la ecuación (2-5).

$$P_{DH} = P_{Dx} + P_{Dy} \quad (2-5)$$

Donde P_{Dx} y P_{Dy} corresponden a las mediciones de aceleraciones en una estación para dos direcciones horizontales ortogonales.

También son interesantes los valores de *Peak Ground Acceleration* PGA que consiste en las máximas aceleraciones obtenidas en los acelerogramas. Éstos se obtienen para cada serie de los casos analizados aquí [7].

2.3.2 Resultados de intensidades instrumentales analizadas

Para objeto de este estudio se determinaron las tres intensidades instrumentales aplicadas a las cuatro series de aceleraciones antes descritas de forma independiente. Para obtener las intensidades instrumentales se deben transformar a escala real las variables de la tabla 2-3, pues los datos están en escala 1:10. Los factores de escala de longitud, frecuencia y tiempo son: 10, 0.316 y 3.16 respectivamente [3] [4]. La tabla 2-4 muestra los parámetros de la sollicitación a escala real.

Tabla 2-4 – Parámetros del movimiento basal en escala real.

Serie	Amplitud A_i [mm]	Frecuencia ω_i [rad/s]	t_f [s]	Cruces por cero v_o [s ⁻¹]
1	50	9.94	3.16	3.16
2	100	7.95	3.95	2.53
3	200	6.95	4.52	2.21
4	300	5.96	5.28	1.90

Los resultados de las intensidades instrumentales analizadas se muestran en la tabla 2-5.

Tabla 2-5 – Resumen de intensidades determinadas para solicitaciones de los ensayos a escala real.

<i>Serie</i>	IA [g s]	P_D [cm s]	PGA [g]
1	0.63	61.66	0.50
2	1.30	197.33	0.64
3	3.45	690.96	0.99
4	4.90	1332.27	1.09

2.3.3 Comentario de resultados

La tabla 2-6 muestra los *Potenciales destructivos* de los terremotos más importantes de los últimos años con la finalidad de compararlos con los valores obtenidos de los modelos.

Tabla 2-6 – Potencial Destructivo Horizontal de los últimos terremotos a la fecha [7].

Terremotos, Estación	P_D [cm s]
Michoacan 1985, México, Tlahuac Bombas	321.78
Michoacan 1985, México, Estación SCT	193.42
El Maule 2010, Chile, Estación Constitución	110.98
Chile Central 1985, Estación Llolleo	28.76

De las tablas 2-5 y 2-6 se desprende que el *Potencial Destructivo* de las solicitaciones aplicadas aquí a los modelos es mayor que los registrados en los terremotos más destructivos medidos instrumentalmente.

Las probetas, luego de la *serie 2*, no presentaron fallas severas que comprometieran su estabilidad, a pesar de que los *Potenciales Destructivos* de esta serie son similares a los obtenidos en la Estación SCT en el terremoto de México de 1985. Esto se debe a que

los diseños realizados cumplen con los requisitos del ACI además de incorporar refuerzos especiales [4] [9]. De todas formas los movimientos de la *serie 2* está lejos de ser equivalente a un terremoto máximo creíble, pues para México 1985 se midió un P_D un 50% mayor en la estación Tlahuac Bombas.

Las probetas, luego de la *serie 3*, presentan un grado de destrucción que incluye vaciamiento de nudos, produciéndose una pérdida de resistencia de corte. En este caso ya se aprecian daños importantes que comprometen la estabilidad de la estructura lo cual está de acuerdo al P_D de la sollicitación.

Hacer un análisis similar para los PGA no es preciso ya que estos indican, en los registros reales, un valor instantáneo, mientras que en las series aplicadas se tienen *peaks* constantes que ocurren varias veces. A modo de comparación, en el terremoto 27F se midió una aceleración de $1.25[g]$ en la estación Hospital de Cauquenes [7].

Capítulo 3

3 Fuerzas y desplazamientos por análisis de imágenes

Para establecer los procedimientos descritos en este capítulo se estudiaron trabajos anteriores cuyos ensayos fueron filmados con la cámara de alta velocidad del laboratorio. En los marcos se pegaron *targets* estratégicamente dispuestos a los cuales se les realizó un seguimiento con un programa descrito más adelante.

Los *targets* corresponden a una combinación de figuras geométricas simples de colores óptimos que permiten al programa determinar el movimiento en forma precisa. Uno de los *targets* se fijó solidario a la mesa, para medir el movimiento basal y el otro se colocó sobre la viga del marco, donde se concentra la masa de la estructura. Obtenidos los desplazamientos de la mesa y la viga, fue posible calcular el desplazamiento relativo mediante simple diferencia. El corte basal se calculó por doble derivación numérica del desplazamiento absoluto de la viga multiplicando por la masa.

En este capítulo se da detalles sobre el método y del programa utilizado. Luego se presenta la teoría sobre el método de la *B-Spline* que se implementó para suavizar la curva de aceleración eliminando las distorsiones explicadas en la figura 1-1. Finalmente se muestran los procedimientos a seguir, que se han elaborado en esta memoria, para la obtención de las curvas de histéresis a partir del análisis de imágenes.

3.1 Descripción del programa utilizado

El programa utilizado para realizar el seguimiento de los *targets* se llama *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* y fue desarrollado en *Cambrillo College*, en Estados Unidos, con el fin de analizar movimientos en experimentos prácticos donde se puede aplicar el análisis de imágenes para la comparación entre los datos obtenidos con modelos analíticos ya conocidos. Este programa es de código abierto.

El análisis del video obtenido con la cámara de alta velocidad, la que esta vez se programó para grabar a 500 [fps] en HD 1280x512, consiste en el seguimiento de los *targets* cuadro por cuadro. La filmación se realiza en un plano perpendicular al espécimen como indica la figura 3-1.

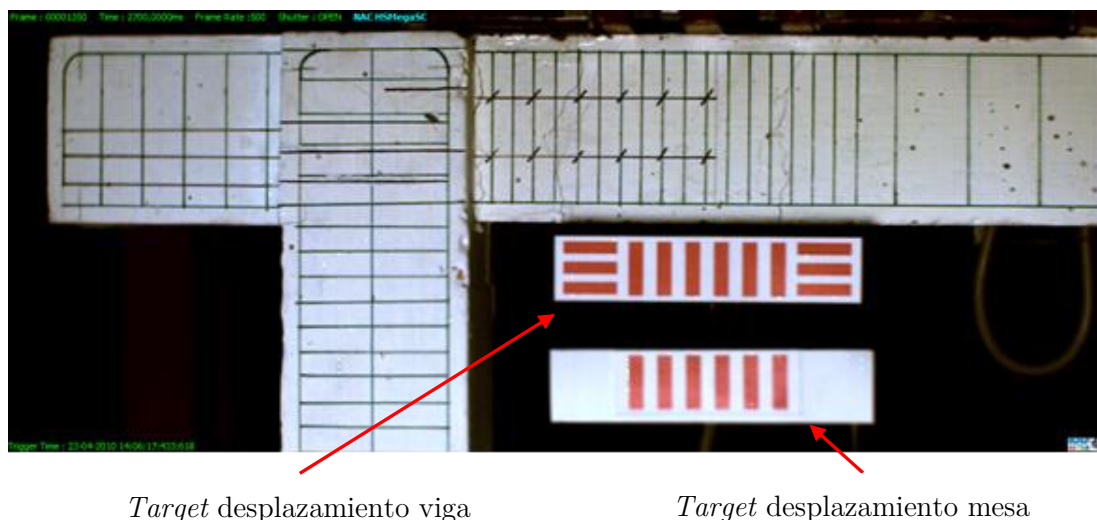


Figura 3-1 – Ubicación de *targets* en la estructura. El *target* superior está fijo a la viga donde se supone que está concentrada la masa total del sistema. El *target* inferior se mueve solidario a la base, fijo sobre una pequeña estructura que no alcanza a verse en la fotografía.

3.1.1 Funcionamiento del programa

El programa realiza el seguimiento de una plantilla de pixeles donde se encuentra el objeto de interés lo que se traduce en la elección de un área particular la cual es rastreada automáticamente (figura 3-2).

Establecida la plantilla, se define una zona donde se buscará el objeto de interés en el siguiente cuadro. Es dentro de esta zona donde se buscan coincidencias a las cuales se les asocia cierto puntaje, donde el mejor acierto es el que tiene mayor puntuación el que se basa en las diferencias RGB entre la plantilla y el grupo de pixeles que coincide, vale decir, mientras menor sea esta diferencia mayor será el puntaje de coincidencia. Determinado el mejor acierto, con los puntajes cercanos, el programa interpola las mejores coincidencias para así marcar la posición del *target*.

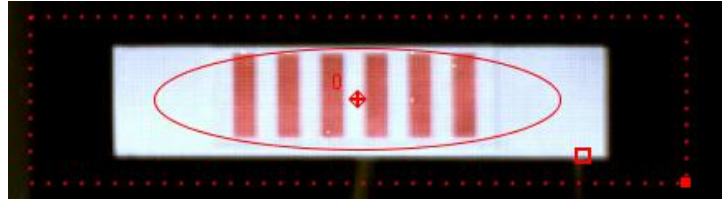


Figura 3-2 – Target al cual se realizó el seguimiento con el programa *Tracker*. La elipse interior corresponde a la plantilla que el programa buscará dentro del área de búsqueda (rectángulo punteado).

El puntaje de coincidencia mínimo es un valor de entrada y puede ser modificado de acuerdo a la precisión necesaria. Cuando no hay coincidencias que cumplan el puntaje de aceptación se puede hacer el seguimiento manual o cambiar este parámetro bajando su nivel. Otro dato de entrada es el *Evolution Rate* que corresponde al cambio de forma del *target* en el tiempo, que para este caso debe ser nulo. Este parámetro se puede modificar dentro de las preferencias de búsqueda. La figura 3-3 muestra las preferencias utilizadas.

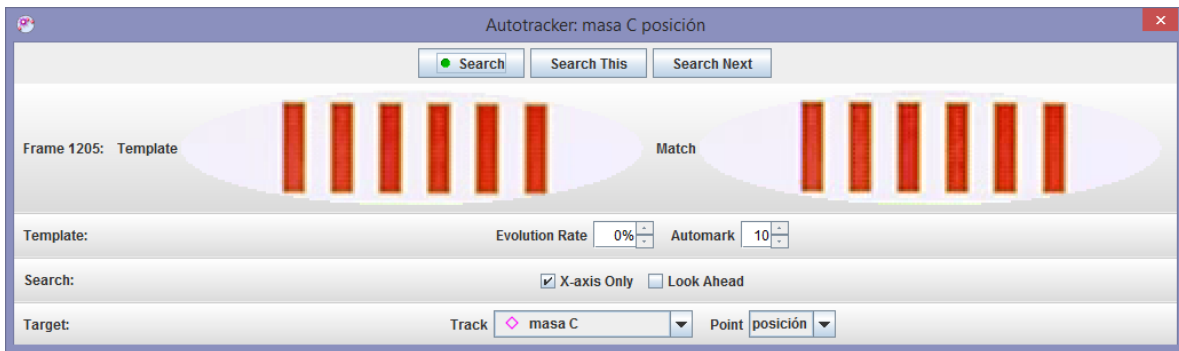


Figura 3-3 – Menú y preferencias para el seguimiento del *target*. Se puede ver el *Evolution Rate* de un 0% que es un valor bajo debido a la naturaleza del problema, ya que no hay un cambio de forma del *target*. El *Automark* tiene un valor de 10, es decir, es la opción más exigente para encontrar la coincidencia que determinará la posición del *target*.

La figura 3-4 muestra los pasos de búsqueda de manera esquemática. En (a) se presenta un *target* ubicado en la posición inicial del cuadro $i = 0$. En (b) se define la plantilla la cual encierra al *target*, el que se descompone en la unidad mínima (píxeles) y se encierra el área de búsqueda (línea segmentada roja). En (c) se muestra el *target* en el cuadro $i + 1$ sobre el área de búsqueda en la posición i . En (d), (e) y (f) se muestra el cuadro $i + 1$ y una matriz del tamaño de la plantilla en la posición j , $j + 1$ y $j + 2$ respectivamente. Este procedimiento se repite hasta completar el área de búsqueda.

En cada posición j de la plantilla se compara la matriz plantilla con la búsqueda obteniendo un puntaje de aceptación inversamente proporcional a la diferencia RGB. Se determina la posición del *target* en el cuadro i como el promedio de los mayores puntajes el cual se guarda si cumple con el puntaje de coincidencia mínimo definido anteriormente.

Cuando se ubica la matriz plantilla sobre la mejor coincidencia, la posición del área de búsqueda se actualiza como se muestra en (g). El procedimiento se repite para toda la secuencia de video [10].

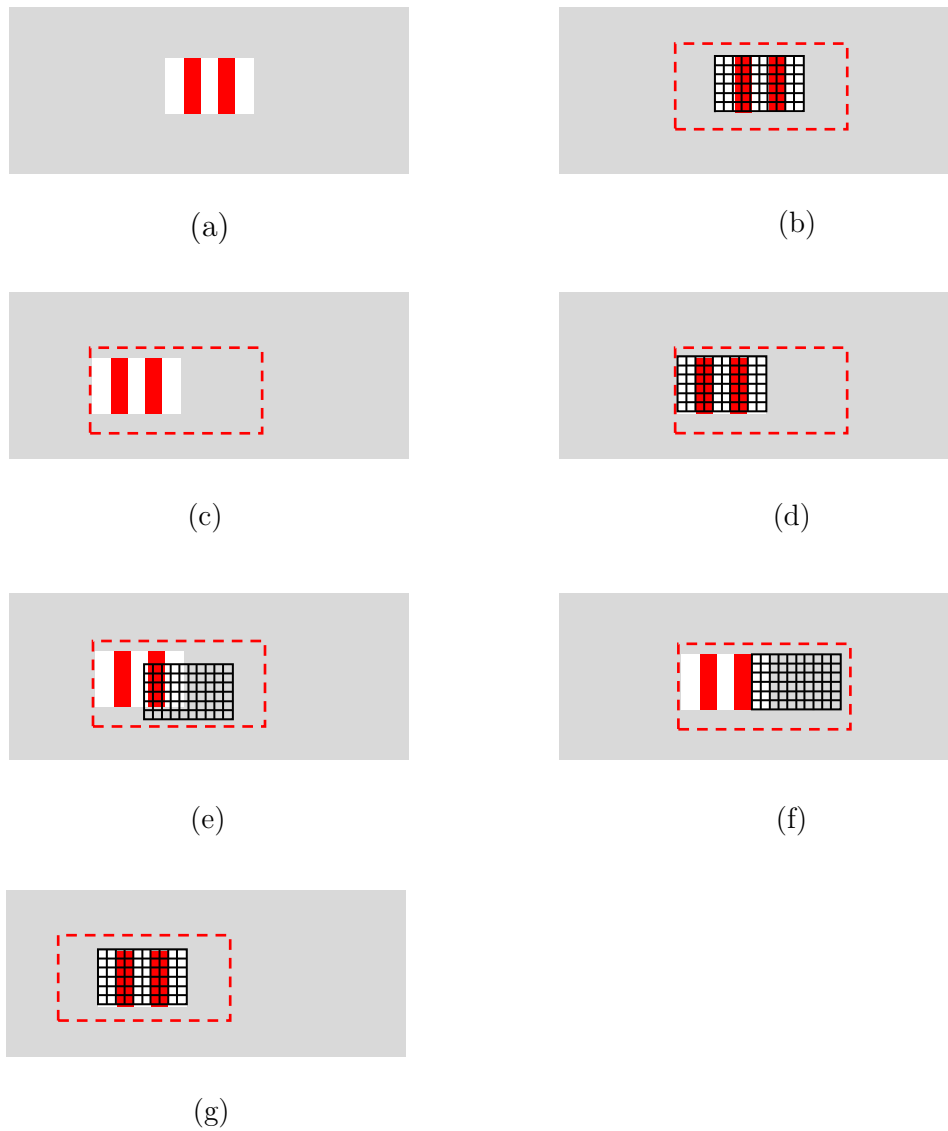


Figura 3-4 – Secuencia de búsqueda de la posición del target en un cuadro.

3.2 Método de *B-Spline*

Para eliminar el ruido y cualquier otra perturbación que no represente el comportamiento de los especímenes, se debe aplicar algún método de suavizado. En esta sección se entregan los antecedentes teóricos para la implementación de la curva *B-Spline* para la eliminación de perturbaciones no deseadas.

Una *B-Spline* es una serie de funciones polinómicas sumadas, que tienen asociada un cierto grado. El resultado corresponde a una curva que se ve afectada a ciertos puntos, denominados *vértices de control*, que actúan como un *imán* atrayendo a la curva de interpolación. Este tipo de curva, en comparación a otras funciones polinómicas, tiene la característica que no presentan oscilaciones entre los puntos interpolantes. Esto último se conoce como *efecto Runge* que indica que mientras más alto sea el grado del polinomio, mayor será el error debido a las oscilaciones entre puntos [11].

Al tratarse de funciones polinómicas por partes, se tiene la ventaja que no se necesitan todos los datos para su implementación. Los métodos que se basan en la descomposición de frecuencias no tienen esta propiedad, pues el análisis se realiza a la serie completa de datos. Lo anterior se hace importante si se quiere desarrollar un método que arroje resultados en tiempo real o levemente desfasados.

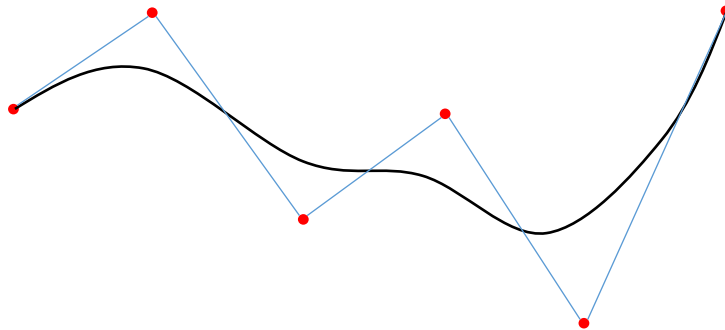


Figura 3-5 – *B-Spline*. En negro la curva *B-Spline* y en rojo los vértices de control. Estos últimos actúan como “imán” atrayendo a la curva.

Para implementar numéricamente una curva *B-Spline* existen en la bibliografía diversos métodos cuyos resultados varían en fluidez y estabilidad. En esta memoria se

ha utilizado el método conocido como la *fórmula de Cox-Boor*. La *B-Spline* se expresa como una función paramétrica como indica la ecuación (3-1) [12].

$$P(u) = \sum_{i=0}^n B_i \cdot N_i^k(u) \text{ para } x_k \leq u < x_{n+1} \quad (3-1)$$

En que:

$P(u)$: *B-Spline* en función del parámetro u .

B_i : puntos de control. También conocidos como vértices de control.

x_i : elemento i -ésimo del *vector de nodos* x .

$N_i^k(t)$: función de base i -ésima de grado k .

k : grado de los polinomios que tienen por condición $k \leq n$.

$n + 1$: número de puntos de control.

Se hace necesario precisar algunos conceptos básicos asociados a la terminología utilizada para la definición de la *B-Spline*.

3.2.1 Vector de nodos

Corresponde a un vector que sirve de apoyo para generar las funciones de base de acuerdo al resultado esperado. Existen diversos tipos de vectores de nodo que se utilizan para generar una *B-Spline* que cumpla con ciertas condiciones en su geometría.

Un vector de nodo se define como:

$$x = \{x_0, x_1, \dots, x_{n+k+1}\}$$

Donde se debe cumplir que $x_i \leq x_{i+1}$.

En esta memoria se explican sólo los aspectos fundamentales de los llamados *vectores de nodos uniformes* y los *vectores de nodos campled* que son los aplicables al problema que se pretende resolver. Existen otros tipos de vectores de nodos en la bibliografía donde se puede profundizar con respecto a ese tema [12].

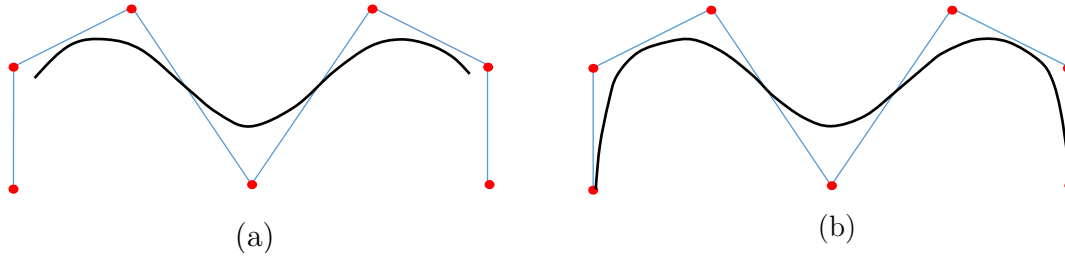


Figura 3-6 – Vectores de nodos. (a) Muestra una *B-Spline* generada por un vector de nodo uniforme mientras que (b) corresponde a un vector de nodos *clamped*. En este último la curva comienza y termina en el primer y último vértice de control respectivamente.

En la figura 3-6 se puede ver una *B-Spline*, del mismo grado, aplicada a la misma serie de vértices de control, con distintos vectores de nodo. El vector de nodos uniforme muestra una curva que no está agarrada a ningún punto, mientras que el segundo caso muestra una curva con un *vector de nodos clamped*. Este último caso se hace útil para cuando se tiene la certeza de que la primera o última medición pasa por dicho punto.

Un vector de nodos uniforme x se define en general del siguiente modo:

$$x_i = x_{i-1} + 1$$

En estricto rigor no es necesario que cada punto del nodo esté separado en una unidad, sin embargo, por simplicidad se utiliza este valor ya que se está tratando en otra variable, distinta a los vértice de control. Un ejemplo de este tipo, para $n = 5$ y $k = 3$ es:

$$x = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

Para obtener un *vector clamped* se suele utilizar la siguiente convención:

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq i \leq k \\ i - k & \text{para } k + 1 \leq i \leq n \\ n - k + 1 & \text{para } n + 1 \leq i \leq n + k + 1 \end{cases}$$

Para para $n = 5$ y $k = 3$, el *vector de nodo clamped* sería:

$$x = \{0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 3, 3, 3\}$$

Ambos vectores, *uniformes* y *clamped*, poseen el mismo tamaño. La diferencia está en los elementos, pues en los *uniformes* se trata de una serie consecutiva sin repetición, y

en los *camples*, en una serie donde los valores se repiten dependiendo del grado del polinomio a utilizar [12].

3.2.2 Funciones de base

Uno de los métodos más estables para establecer las funciones de base es la *fórmula de Cox-Boor* en que las funciones bases se definen como muestran las ecuaciones (3-2) y (3-3) [12].

$$N_i^0(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3-2)$$

$$N_i^k(u) = \frac{(u-x_i) \cdot N_i^{r-1}(u)}{x_{i+r}-x_i} + \frac{(x_{i+r+1}-u) \cdot N_{i+1}^{r-1}(u)}{x_{i+r+1}-x_{i+1}} \quad r \geq 1 \quad (3-3)$$

Para poder aplicar estas funciones es necesario establecer la convención $\frac{0}{0} = 0$.

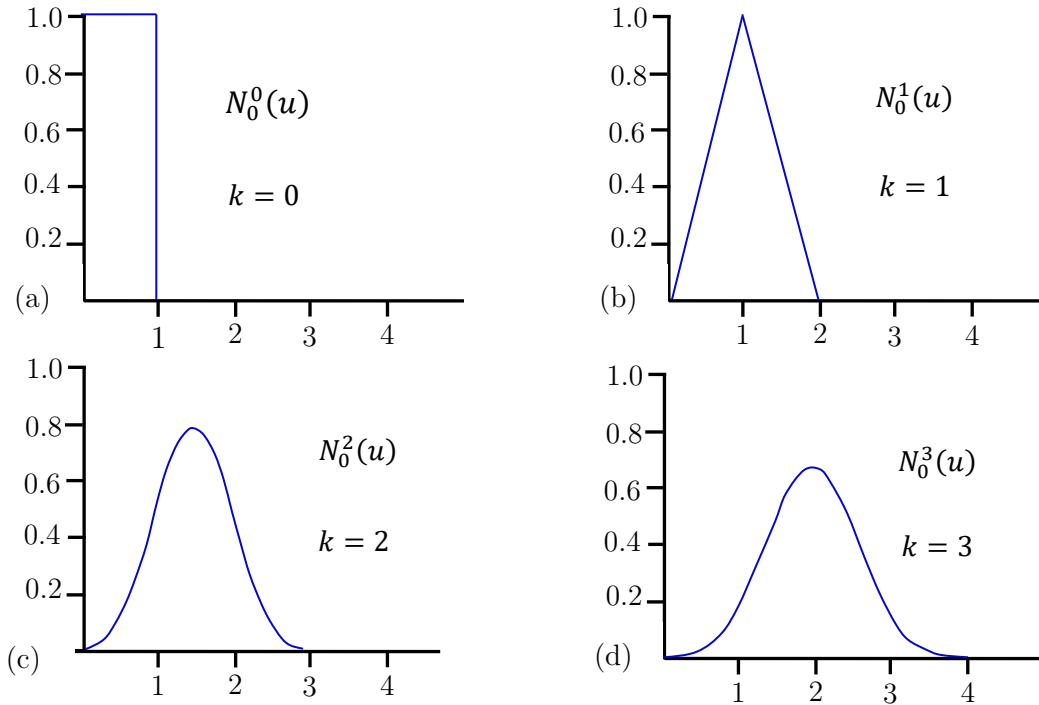


Figura 3-7 – Funciones de base evaluadas en un vector de nodos uniforme. Se puede ver que están acotadas, vale decir, poseen un valor distinto de 0 para un intervalo finito, mientras que para el resto se anulan.

La figura 3-7 muestra para $i = 0$ las diferentes funciones de base para distintos k con el vector nodo $x = \{0,1,2, \dots\}$.

Para el caso particular de *vectores uniformes* se tienen las mismas funciones de base desplazadas. Esto representa una ventaja en el cálculo ya que se pueden obtener resultados más rápido.

3.2.3 B-Splines

Definidas ya los vectores de nodo y las funciones de base es posible determinar la curva *B-Spline* como lo dice su definición $P(u)$ para el intervalo $x_k \leq u < x_{n+1}$ de la curva paramétrica.

Los puntos de control B_i se deben evaluar en su forma (x_i, y_i) donde x_i e y_i corresponden a las coordenadas rectangulares de los puntos de control en el plano. Esto da como resultado a $P(u)$ como una ecuación paramétrica que depende solamente del parámetro u .

Para tratar el nivel de suavidad se varía el grado k de la curva. Se tiene que a mayor grado mayor será la suavidad.

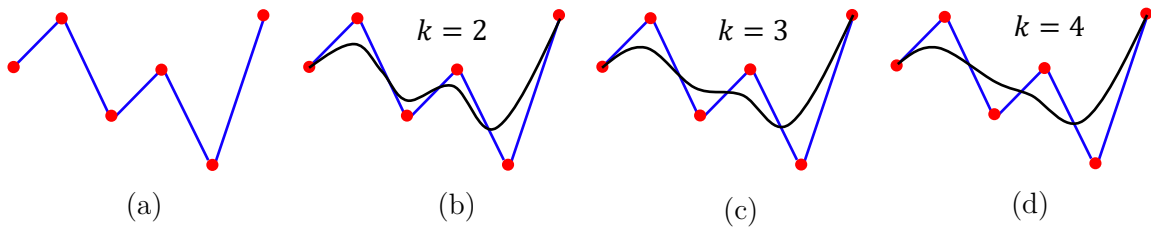


Figura 3-8 – Curva *B-Spline* con distintos grados. (a) Vértices de control, (b) *B-Spline* grado 2, (b) *B-Spline* grado 3, (c) *B-Spline* grado 4.

En la figura 3-8 se puede ver una curva *B-Spline* de tipo *camped*, donde a medida que aumenta el grado k , el nivel de suavidad lo hace también. La curva se separa de los puntos de control.

Definido el parámetro que se utiliza para suavizar las curvas es necesario establecer hasta qué punto es necesario hacerlo. Los procedimientos para dar con el criterio se explicarán en los siguientes capítulos.

3.3 Preparación de los resultados para obtener la curva de histéresis

El desplazamiento relativo se determina como la diferencia entre el desplazamiento de la viga y el de la mesa. Estos últimos obtenidos directamente del programa utilizado.

Para determinar la fuerza se utiliza la ecuación (3-4).

$$F_{corte} = m \cdot \frac{d^2}{dt^2}(x_{viga}) \quad (3-4)$$

Donde:

F_{corte} : fuerza de corte basal.

m : masa del sistema.

x_{viga} : desplazamiento absoluto de la viga obtenido por el análisis de imágenes.

Para determinar la aceleración se utiliza fórmula de diferencia central de orden $O\Delta t^2$, donde la velocidad queda dada por la ecuación (3-5).

$$v_i = \frac{x_{i-1} - x_{i+1}}{2 \cdot \Delta t} \quad (3-5)$$

En que:

v_i : Velocidad en el instante i .

x_i : Posición en el instante i .

Δt : Paso que corresponde a la separación de los datos en el tiempo medido en segundos.

Para la aceleración se utilizó la relación aceleración/velocidad:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (3-6)$$

Así la aceleración resulta como muestra la ecuación (3-7).

$$a_i = \frac{v_{i-1} - v_{i+1}}{2 \cdot \Delta t} \quad (3-7)$$

En que:

a_i : Aceleración en el instante i .

v_i : Velocidad en el instante i .

Δt : Paso que corresponde a la separación de los datos en el tiempo medido en segundos.

Para aplicar el suavizado a las curvas hay tres opciones: (1) suavizar el desplazamiento y luego derivar hasta obtener la aceleración, (2) suavizar la curva velocidad y luego derivar para obtener la aceleración ó (3) suavizar directamente la aceleración.

Gráficamente la pendiente del desplazamiento corresponde a la velocidad y la curvatura a la aceleración. Si se aplica un nivel de suavizado al desplazamiento no se podrá ver a simple vista pequeños cambios de curvatura los que pueden implicar grandes aceleraciones y resultados erróneos. Por lo tanto la manera en que se procede al suavizado es aplicando un cierto grado k de *B-Splines* a la velocidad donde se puedan inspeccionar cambios de pendientes que estén dentro de un rango razonable.

Los resultados de desplazamientos obtenidos por análisis de imágenes no presentan mayor problema. La figura 3-9 muestra los desplazamientos relativos del marco M5-A5250 sometido a 10mm-4Hz donde se ve que los resultados no muestran ningún tipo de distorsión.

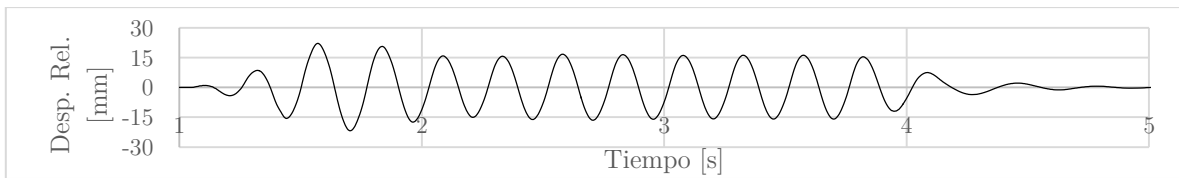


Figura 3-9 –Desplazamientos relativos obtenidos de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de 10[mm]-4[Hz]. Desplazamiento en [mm] y tiempo [s].

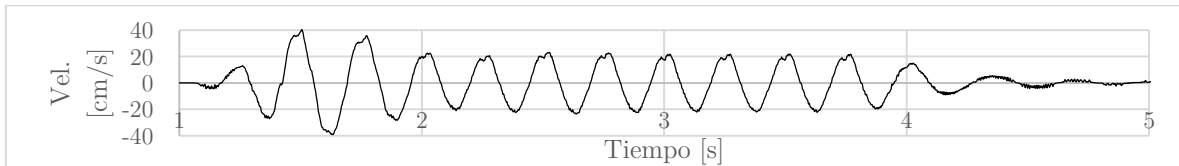


Figura 3-10 – Velocidad de la viga obtenida de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de 10[mm]-4[Hz]. Velocidad en [cm/s] y tiempo [s].

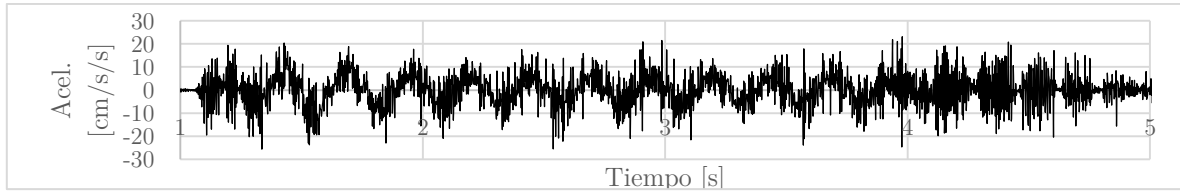


Figura 3-11– Aceleración de la viga obtenida de la Serie 1, Marco M5-A4800 [2] sometida a un movimiento basal de $10[\text{mm}]\cdot 4[\text{Hz}]$. Aceleración en $[\text{cm}/\text{s}^2]$ y tiempo $[\text{s}]$.

Para calcular la aceleración se aplica el método de diferencia central al desplazamiento y luego a la velocidad. Como muestra la figura 3-11, existe ruido que no permite realizar un análisis adecuado sobre el comportamiento del marco y que intuitivamente no representa la aceleración absoluta del sistema. Esto indica que es necesario aplicar algún método de suavizado.

El origen de esta forma puede estar relacionado con vibraciones mecánicas, complejidad del sistema o directamente a la sensibilidad que tiene el método de derivación.

La figura 3-12 muestra los procedimientos resumidos para obtener la curva de histéresis por medio del método de análisis de imágenes.

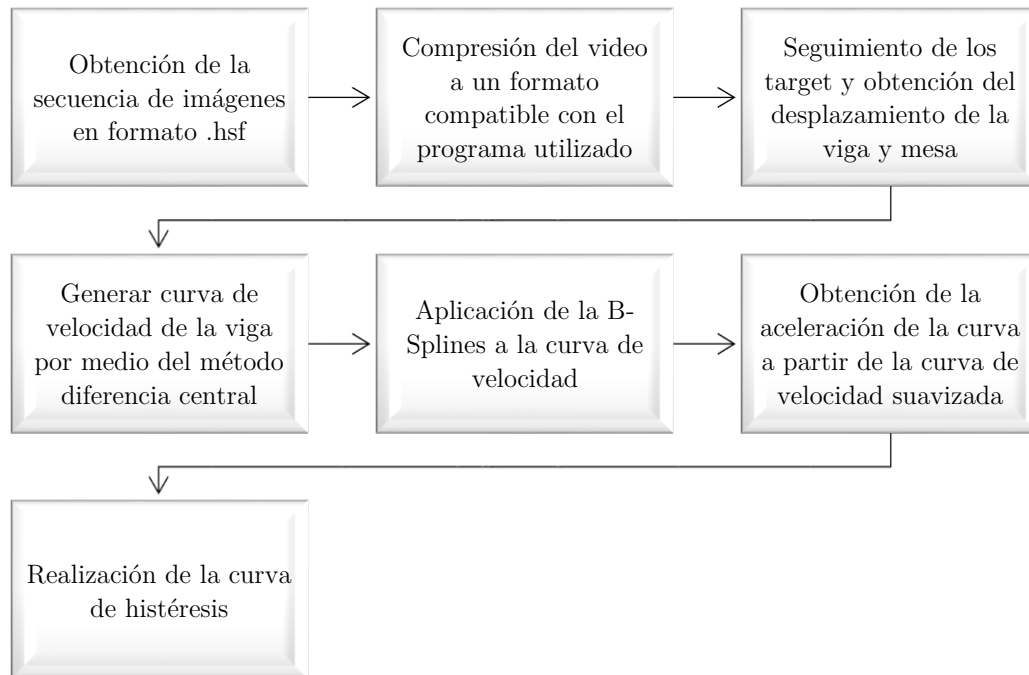


Figura 3-12 – Procedimiento en la realización de la curva de histéresis.

Capítulo 4

4 Ensayos anteriores revisitados con el método de análisis de imágenes

Antes de esta memoria, los registros obtenidos de la cámara de alta velocidad se han utilizado sólo para la verificación de la información obtenida con la instrumentación tradicional, la cual nunca se dejó de colocar.

Las curvas de histéresis obtenidas en los ensayos dinámicos de marcos a escala tienen una forma característica que aparece distorsionada como la que se mostró en la figura 1-1. En trabajos anteriores, estas distorsiones aparecen atenuadas por distintos métodos como: (1) uso de acelerómetro con filtro integrado, (2) eliminación de frecuencias por descomposición de *Fourier*, (3) promedio móvil cada cierta cantidad de datos (4) análisis de *Wavelet*, entre otros. Sin embargo, no se ha cuantificado el suavizado para que la curva represente realmente el comportamiento del espécimen.

En este capítulo se obtiene la curva de histéresis de marcos ensayados en memorias anteriores, utilizando el método de análisis de imágenes descrito en el capítulo anterior, donde se aplicaron varios grados de *B-Splines*. Se analizarán dos especímenes, denominados M5-A4800 y M1012-A5250 [9] [13]. Los resultados corresponden a la velocidad y aceleración de la viga y su respectiva curva de histéresis, éstas con diferentes niveles de suavidad. Para estandarizar los resultados se muestran las curvas con *B-Splines* grado 25, 50, 100 y 150.

Dada la extensión que resultaría mostrar los resultados de todos los ciclos de carga a los cuales se sometieron los especímenes, se muestran las gráficas de uno solo. En el Anexo B se pueden ver los resultados de la serie completa del marco M1012-A5250.

4.1 Resultados marco M5 A4800

Este marco fue ensayado con los ciclos de cargas mostrados en la tabla 4-1. Los resultados que se analizan a continuación corresponden a la cuarta serie: 30mm 3Hz.

Los gráficos que se presentan son: desplazamientos basal y relativo, velocidad y aceleración de la viga, curva de histéresis con distintos grados de *B-Spline*.

Tabla 4-1 – Ciclos de cargas aplicados al espécimen M5 A4800.

Input M5 A4800 CR	
Amplitud [mm]	Frecuencia [Hz]
5	5
10	4
20	3.5
30	3

4.1.1 Desplazamientos

Las figuras 4-1 y 4-2 muestran que los desplazamientos de la base y relativos a la base.

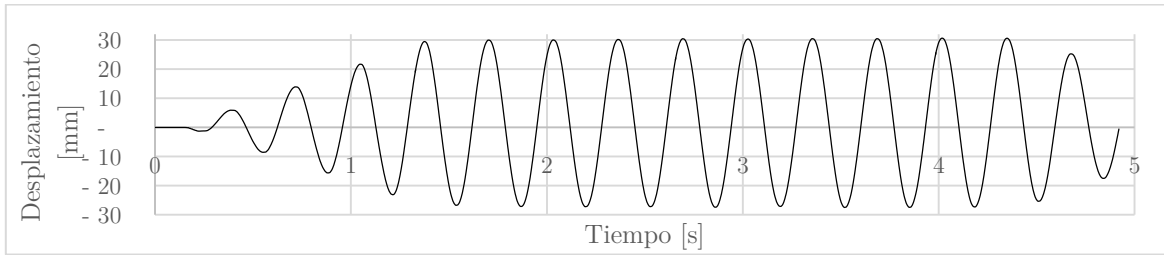


Figura 4-1 – Desplazamiento basal del marco M5-A4800 obtenido por análisis de imágenes.

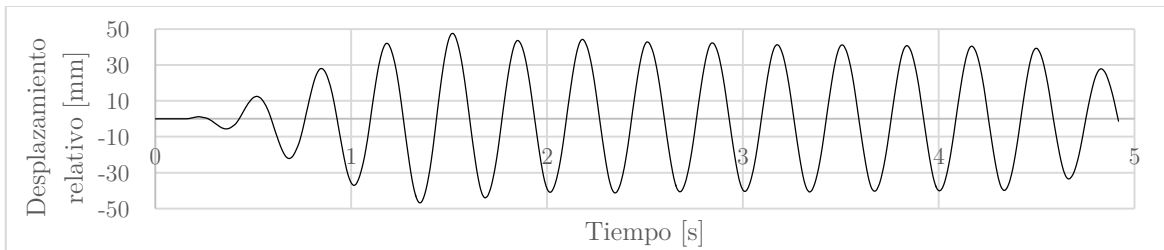


Figura 4-2 – Desplazamiento relativo a la base del marco M5-A4800 por análisis de imágenes.

De la figuras 4-1 se puede ver que los desplazamientos basales son levemente menores a los valores nominales.

4.1.2 Velocidad

Por las razones que se mencionaron en el capítulo anterior las curvas *B-Splines* se aplican a los resultados de velocidad. En la figura 4-3 se ven los resultados directamente calculados por el método de diferencia central a partir del desplazamiento

de la viga. Luego las figuras 4-4, 4-5, 4-6 y 4-7 muestran la velocidad con distintos niveles de *B-Splines*.

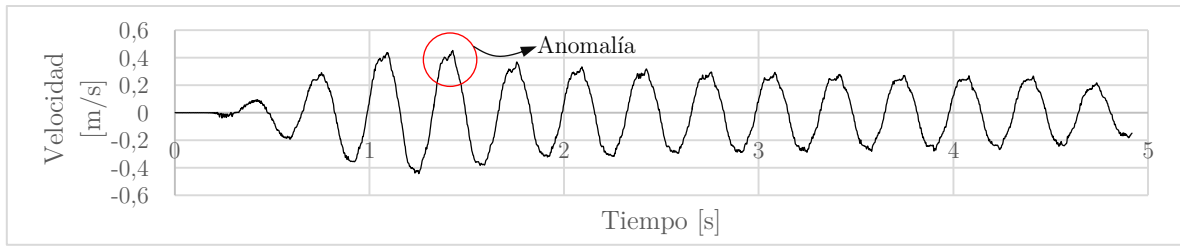


Figura 4-3 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 obtenida directamente por el método de diferencia central.

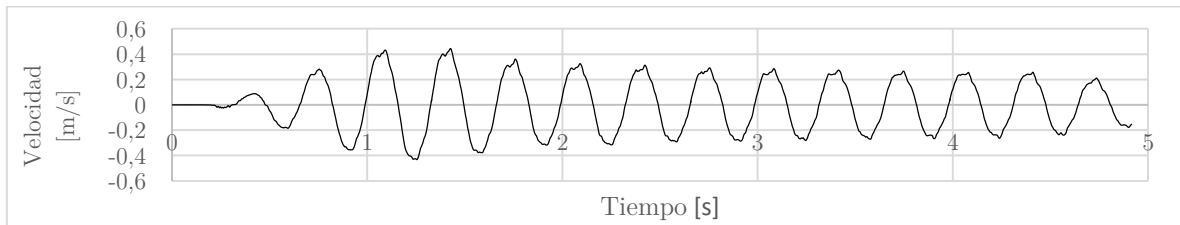


Figura 4-4 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado k=25.

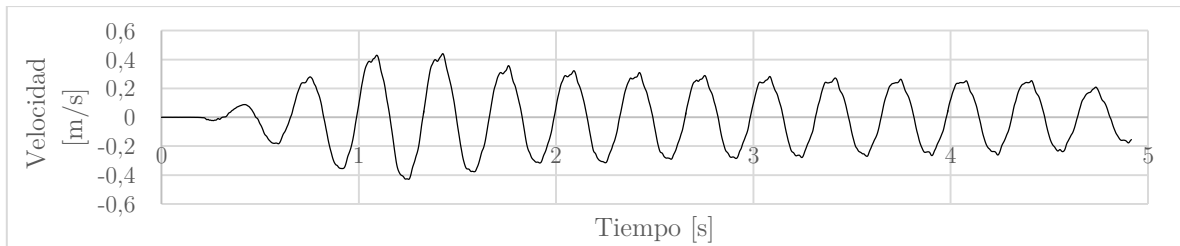


Figura 4-5 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado k=50.

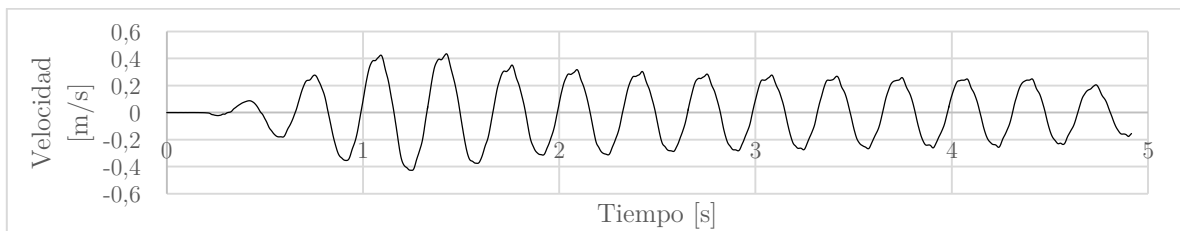


Figura 4-6 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado k=100.

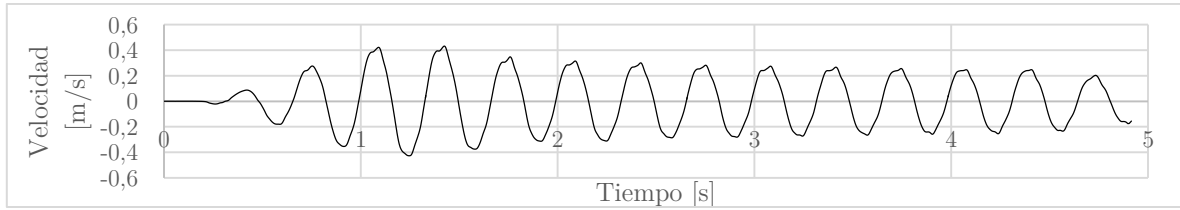


Figura 4-7 – Velocidad de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado $k=150$.

De los resultados de velocidad sin suavizado (figura 4-3) se ve cierta anomalía donde salen dos *peak* que se repite en todos los máximos. A medida que se aumenta el grado k de la *B-Splines* esta anomalía se ve atenuada.

4.1.3 Aceleración

Las figuras 4-9, 4-10, 4-11 y 4-12 muestran la aceleración obtenida a partir de la derivación de las curvas suavizadas asociadas a su respectivo grado k . Para poder comparar visualmente los resultados, la figura 4-8 muestra la aceleración determinada directamente de los datos de velocidad sin ningún tipo de suavizado.

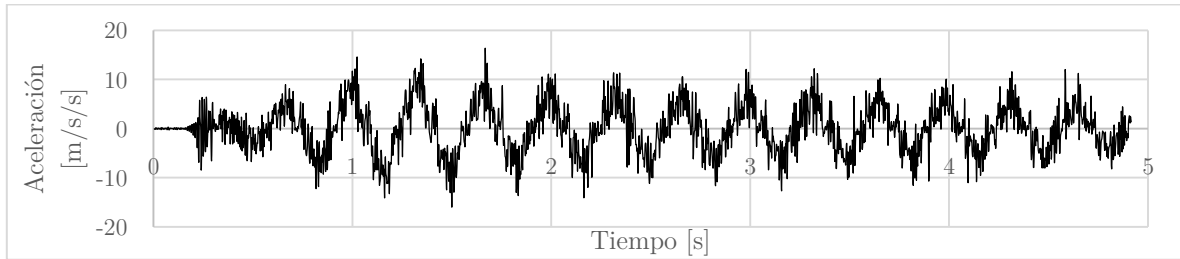


Figura 4-8 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 obtenida directamente a partir de la velocidad sin suavizado.

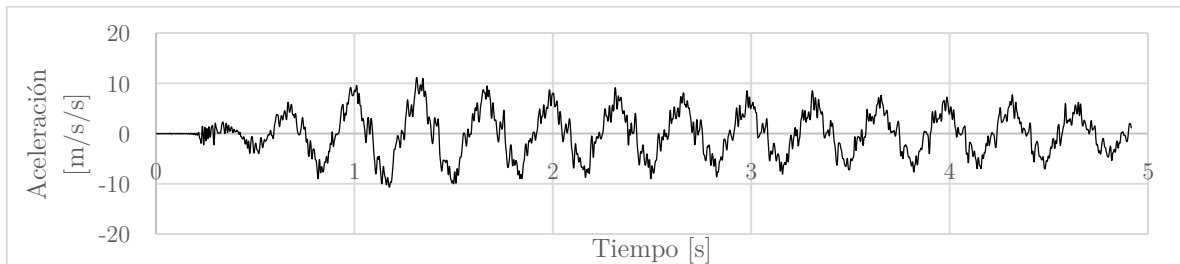


Figura 4-9 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado $k=25$.

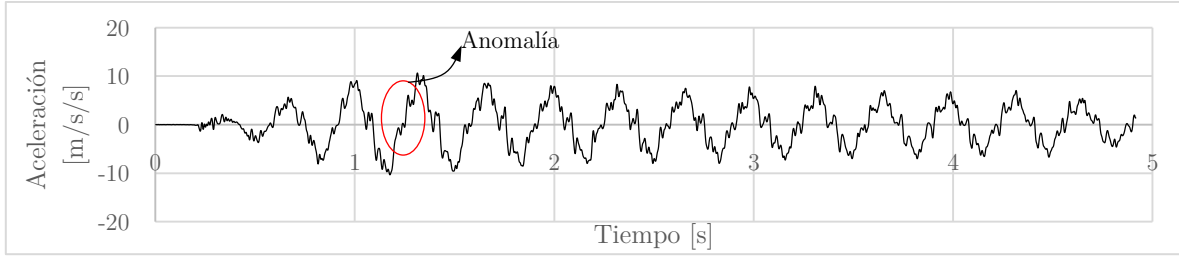


Figura 4-10 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado $k=50$.

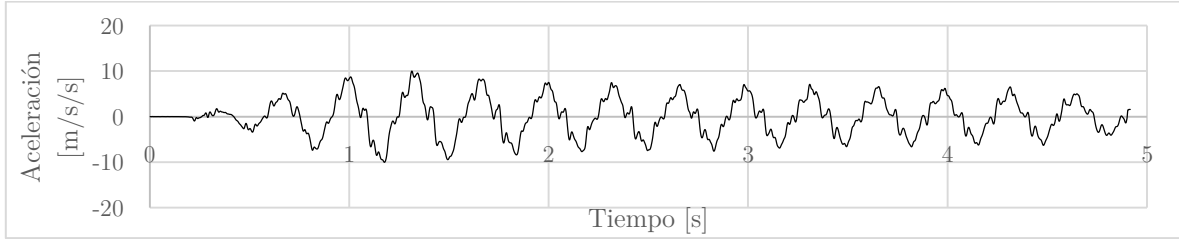


Figura 4-11 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado $k=100$.

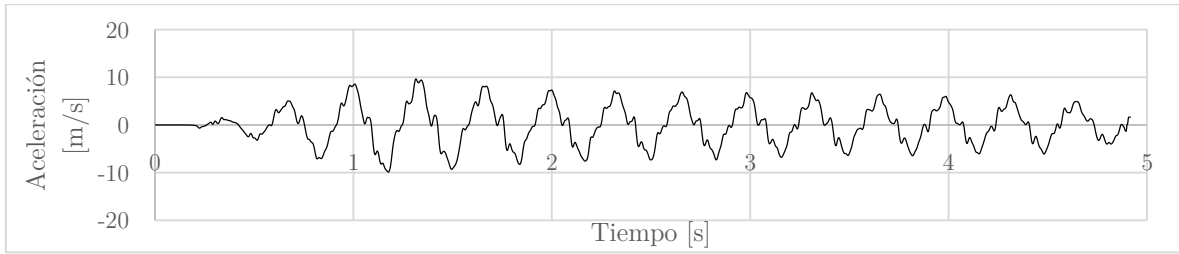


Figura 4-12 – Aceleración de la viga del marco M5-A4800 con *B-Splines* grado $k=150$.

Las curvas de aceleración muestran que las anomalías con forma de ondulación se acentúan en comparación a la curva de velocidad y se aminoran de acuerdo al aumento del grado de la *B-Splines* utilizado. Al igual que en la curva de velocidad, estas ondulaciones son de carácter cíclico.

4.1.4 Curva de histéresis

Para graficar la curva de histéresis se consideró una masa de $400[Kg]$.

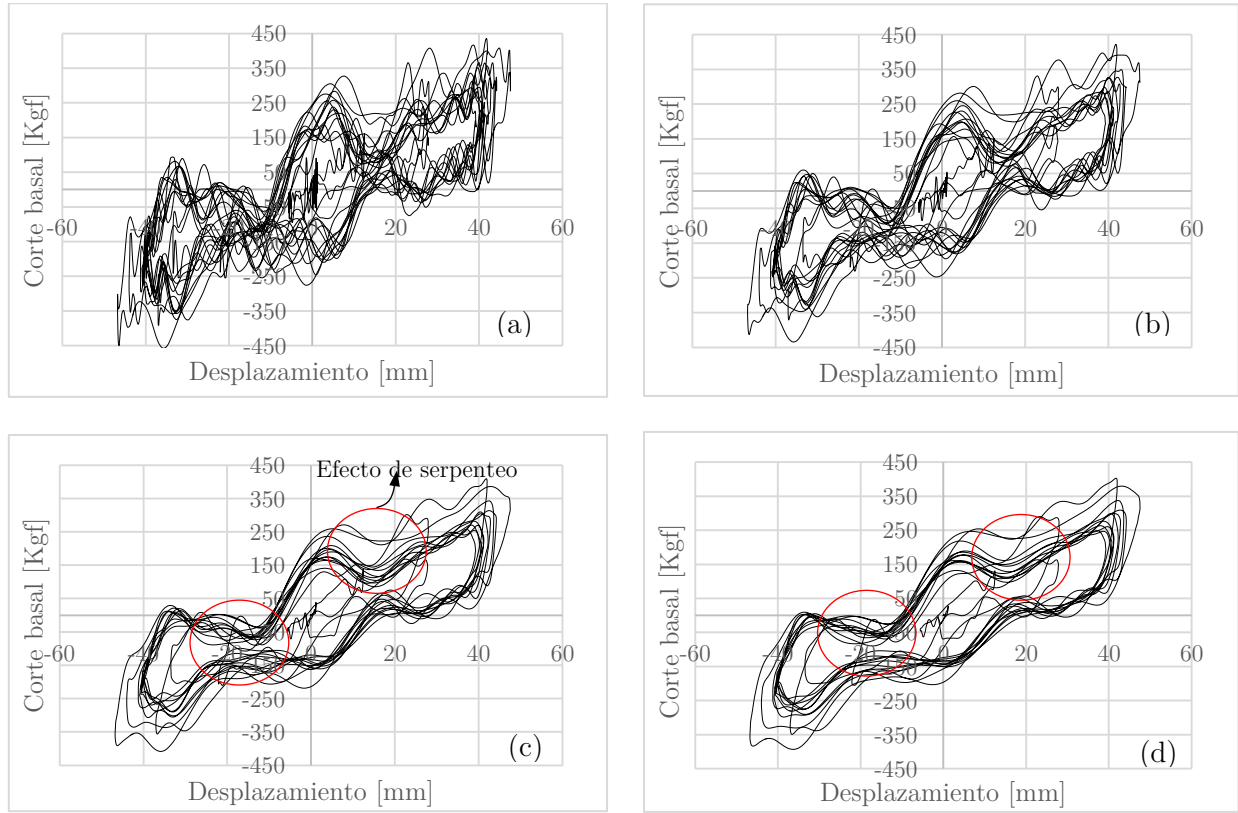


Figura 4-13 – Curva de histéresis del marco M5-A4800 (a) Grado $k=25$ (b) Grado $k=50$ (c) Grado $k=150$ (d) Grado $k=150$.

Los resultados que se muestran en la figura 4-13, en cuanto su forma, son típicos de los ensayos dinámicos de los marcos a escala. Aparecen variaciones súbitas en las curvas de aceleración que se repiten en las curvas de histéresis. Se puede ver que estas anomalías tienden a pasar por el mismo lugar, descartando un origen de tipo ruido debido a interferencia electromagnética.

Otra eventual razón por el que podría aparecer este efecto es por el mecanismo de disipación de energía a través del agrietamiento del hormigón y la interacción fluencia-deslizamiento del acero. Sin embargo, revisando las referencias donde se han publicado resultados sobre nudos similares a los de los marcos analizados en esta memoria este efecto no aparece [2]. Se descarta que sea producto del método de suavizado pues estos resultados se obtienen de manera directa del actuador de mesa.

Las sospechas apuntan a la dinámica del sistema debido a su configuración, esto es, la masa del lastre sobre la estructura que se dispone para hacer el modelo equivalente a la realidad. En el siguiente capítulo se profundiza más sobre las razones de este efecto y su importancia para establecer el comportamiento de la estructura.

Capítulo 5

5 *Efecto serpenteo* en ensayos dinámicos

El efecto que se llama aquí *serpenteo* corresponde a las variaciones súbitas en la aceleración que presenta la masa concentrada. Para obtener una primera aproximación sobre el origen de este efecto, se indujo éste mediante masas sueltas en un marco metálico que fue ensayado en la mesa sísmica.

5.1 Diseño del ensayo

Se diseñó un sistema que midiera el corte basal de manera directa por medio de un montaje sin roce, disponiendo de una celda de carga en la base de la estructura. Además se instalaron *strain-gages* en las columnas para obtener la componente elástica de la fuerza. Los desplazamientos relativos se midieron con un LVDT colocado en una pequeña estructura apoyada sobre la mesa sísmica. Además se usó una cámara de alta velocidad para obtener los desplazamientos, e indirectamente fuerzas, por análisis de imágenes. En la figuras 5-1 y 5-2 se muestra un esquema y montaje del ensayo respectivamente.

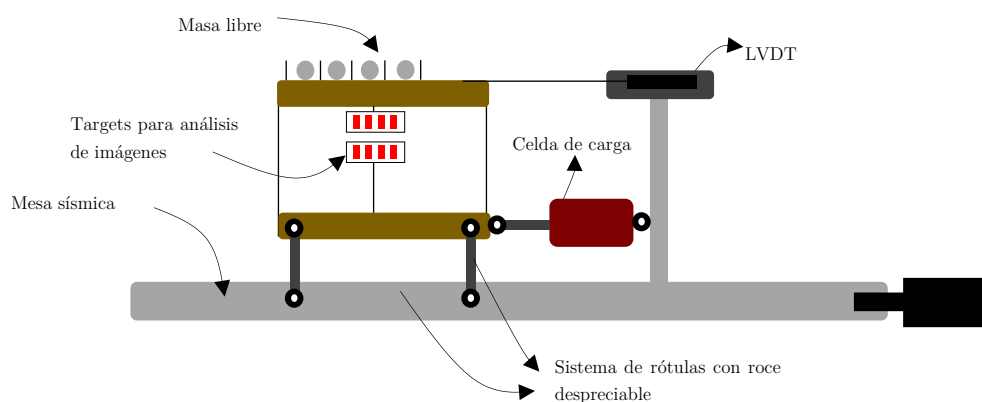


Figura 5-1 – Ensayo de marco metálico para analizar el efecto de serpenteo.



Figura 5-2 – Ensayo de marco metálico montado.

El diseño contempla cilindros de acero sueltos que se colocan sobre la viga para inducir pequeños impactos.

Las masas de los elementos son:

Masa de la viga: $m_v = 1.54[kg]$

Masa de la base: $m_b = 2.62[kg]$

Masa de columna: $m_{col} = 0.13[kg]$

Masa conjunto de cilindros de acero: $m_{cil} = 0.7[kg]$

De este experimento se obtuvo: (1) desplazamiento de la mesa sísmica con LVDT integrado (2) desplazamiento relativo con LVDT colocado sobre la mesa (3) corte basal directo con celda de carga y (4) deformación de las columnas con *strain-gages*.

5.1.1 Consideraciones en los resultados

A la fuerza obtenida por la celda de carga se le debe restar los efectos inerciales de la masa de la base de la estructura m_b . De esta forma, el corte basal de la estructura queda dado por:

$$V_x(t) = V_{celda}(t) - (m_b + m_{col}) \ddot{x}_{basal}(t)$$

En que:

$V_x(t)$: corte de las columnas en la dirección x en función del tiempo.

$V_{celda}(t)$: fuerza entregada por la celda de carga.

$\ddot{x}_{basal}(t)$: aceleración basal.

Esta ecuación considera el 50% de la masa de cada columna.

5.1.2 Cálculos previos

Para elegir las sollicitaciones con las cuales se realizó el ensayo, se efectuó una prueba de vibraciones libres al espécimen sin la masa adicional. El objetivo fue determinar la rigidez y frecuencia natural.

Se utilizó el método de decremento logarítmico para la determinación de la razón de amortiguamiento d . Se emplearon los datos obtenidos por análisis de imágenes para la determinación de los parámetros indicados.

De las vibraciones libres se determinó:

Razón de amortiguamiento: $d = 0.3\%$

Frecuencia natural: $\omega_n = 2.9 [Hz]$

Rigidez: $k = 549[N/m]$

A partir de estos resultados se eligieron las sollicitaciones.

5.1.3 Sollicitación

El ensayo consistió en la medición de vibraciones libres y los ciclos estables de un movimiento basal previamente definido. Ambas mediciones se realizaron con y sin la masa suelta adicional dada por los cilindros de acero (tabla 5-1).

Tabla 5-1 – Sollicitaciones para marco metálico.

Serie	Sollicitación
A.1	Vibraciones libres (sin cilindros)
B.1	Vibraciones libres (con cilindros)
A.2	Vibración forzada con movimiento de la base de 5mm-2.5 Hz (sin cilindros)
B.2	Vibración forzada con movimiento de la base de 5mm-2.0 Hz (con cilindros)

5.2 Resultados

Antes de presentar los resultados es necesario realizar algunas observaciones con respecto a los gráficos de los próximos apartados:

- Las mediciones realizadas por análisis de imágenes y por los instrumentos (LVDT, celda de carga y *strain-gages*) no están exactamente en el mismo *time-line*, pues la adquisición de datos se hace por separado. Esto es relevante para las vibraciones libres, ya que puede haber un leve desfase entre los tiempos del método de imágenes y los otros.
- En el caso de las vibraciones forzadas se muestran los casos en régimen estable. En las figuras se superpuso las mediciones de los instrumentos con el método de imágenes, pero pueden tener un ligero desfase.
- El corte basal, a partir de análisis de imágenes, se le aplicó el método de la curva *B-Spline* con grado $k = 400$ para eliminar el ruido electromagnético. Esto se hizo con el programa *Wolfram Mathematica*.

5.2.1 Vibraciones libres sin masa suelta

5.2.1.1 Desplazamiento relativo

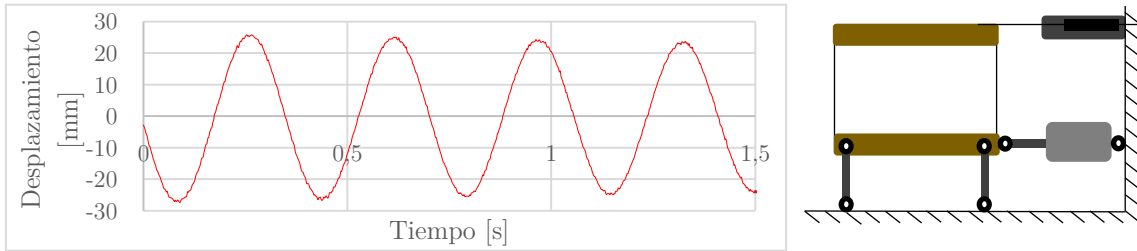


Figura 5-3 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con LVDT. Marco sin masa adicional.

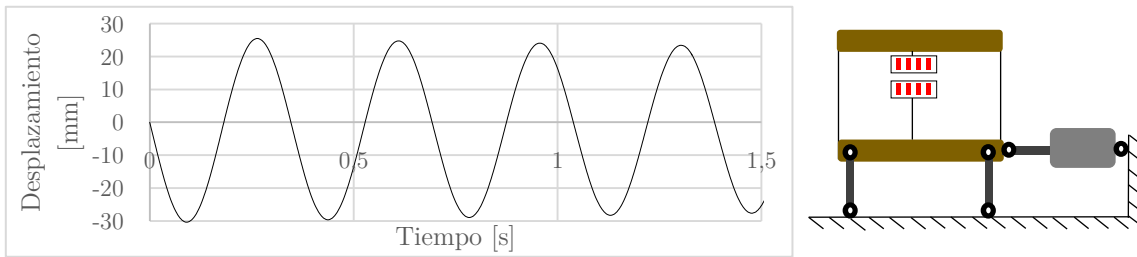


Figura 5-4 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.

5.2.1.2 Corte basal

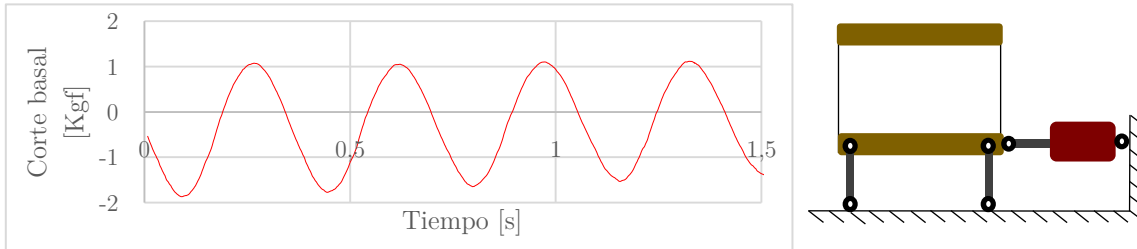


Figura 5-5 – Corte basal en vibraciones libres medido con celda de carga. Marco sin masa adicional.

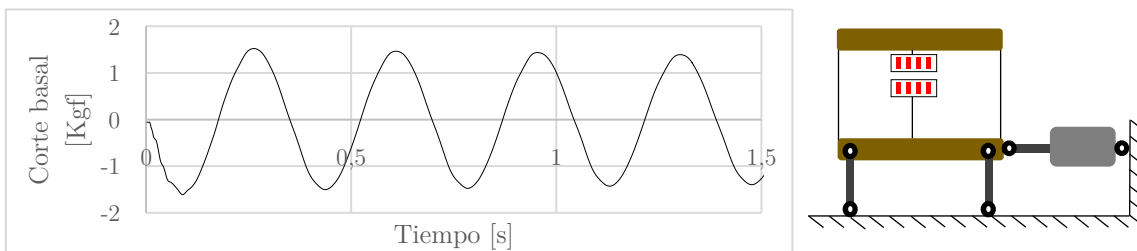


Figura 5-6 – Corte basal en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.

5.2.1.3 Deformación

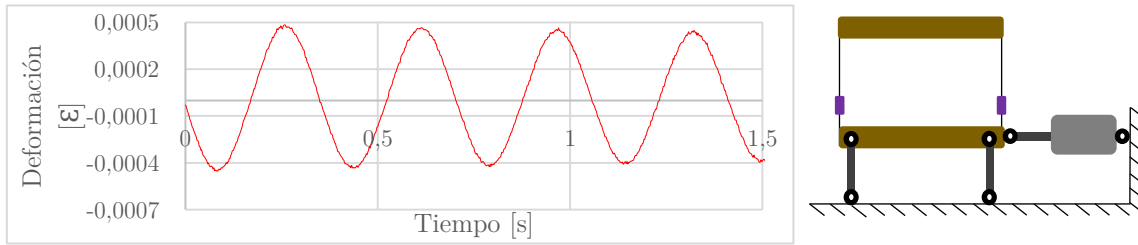


Figura 5-7 – Deformación de columnas en vibraciones libres medido con *strain gages*. Marco sin masa adicional.

5.2.2 Vibraciones libres con masa suelta

5.2.2.1 Desplazamiento relativo

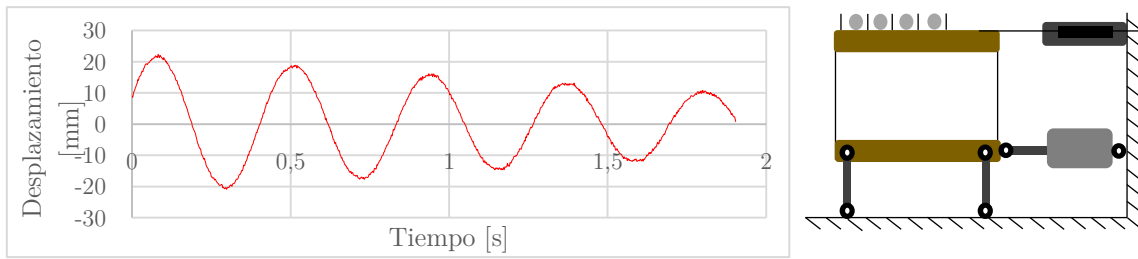


Figura 5-8 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con LVDT. Marco con masa adicional.

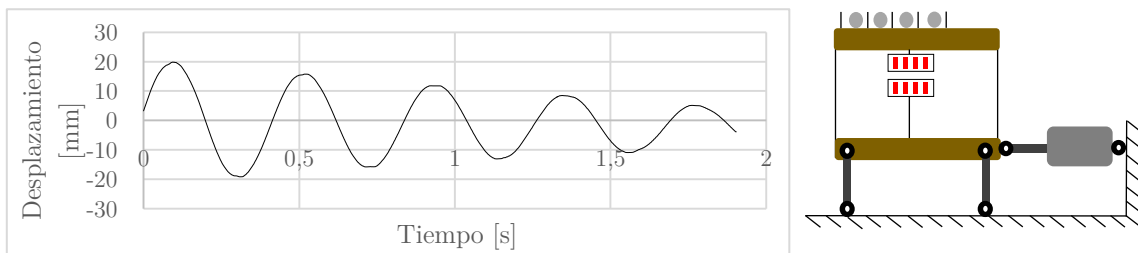


Figura 5-9 – Desplazamiento relativo en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco con masa adicional.

5.2.2.2 Corte basal

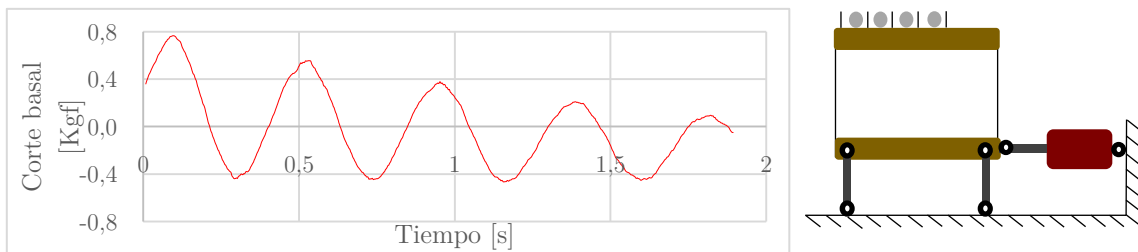


Figura 5-10 – Corte basal en vibraciones libres medido con celda de carga. Marco con masa adicional.

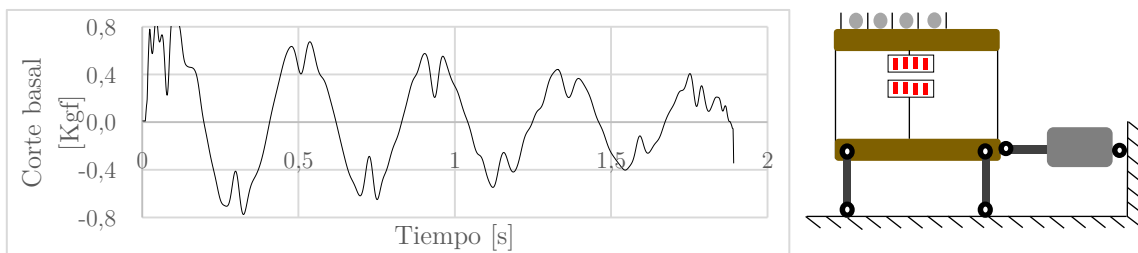


Figura 5-11 – Corte basal en vibraciones libres medido con análisis de imágenes. Marco con masa adicional.

En el corte basal obtenido desde la celda de carga (figura 5-10) se puede ver cierta anomalía en que el origen está “corrido”. Esto se debió a la fijación celda-marco la cual sufrió desplazamiento en el transcurso del experimento.

5.2.2.3 Deformación

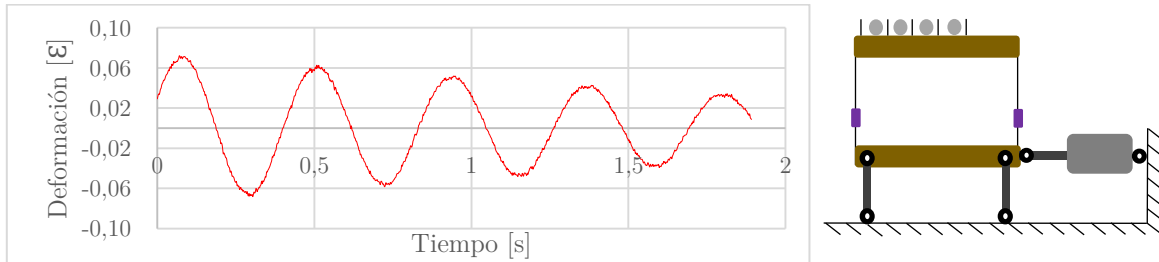


Figura 5-12 – Deformación en vibraciones libres medido con *strain-gages*. Marco con masa adicional.

5.2.3 2.5Hz sin masa suelta

5.2.3.1 Desplazamiento basal

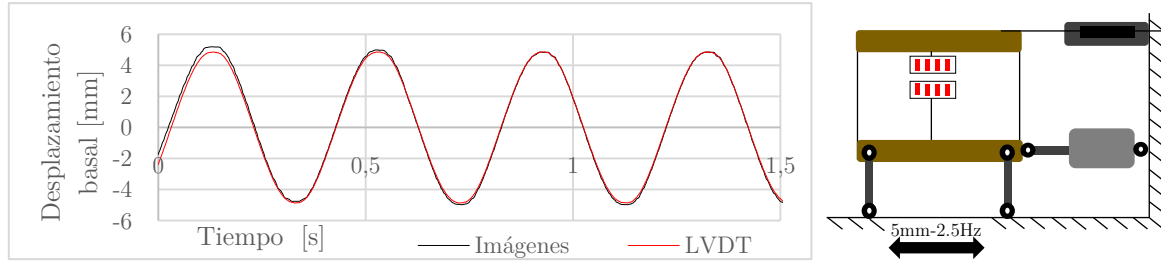


Figura 5-13 – Desplazamiento basal de 5mm-2.5Hz medido por LVDT y análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.

5.2.3.2 Desplazamiento relativo

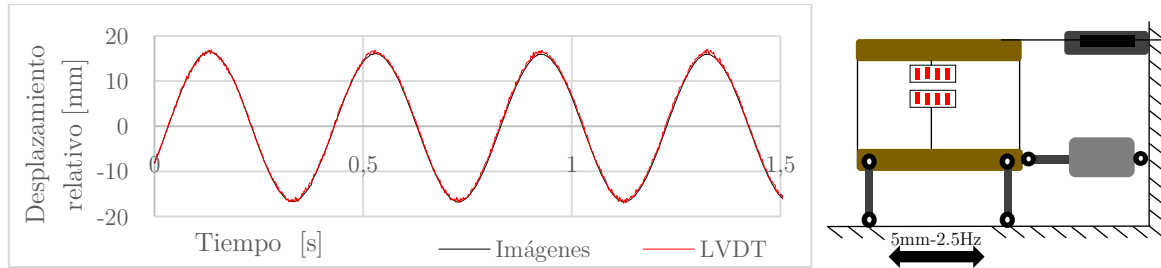


Figura 5-14 – Desplazamiento relativo del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.

5.2.3.3 Corte basal

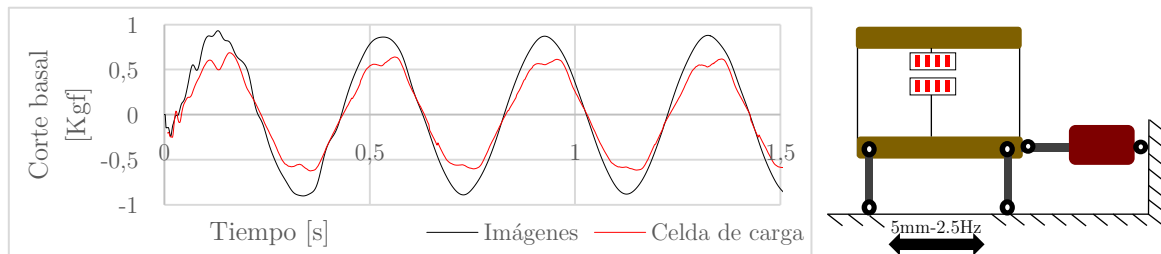


Figura 5-15 – Corte basal del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido por celda de carga y con análisis de imágenes. Marco sin masa adicional.

5.2.3.4 Deformación

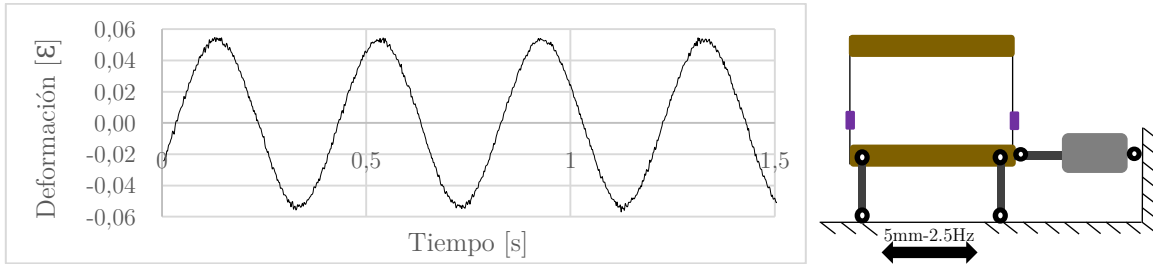


Figura 5-16 – Deformación de las columnas del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz medido por *strain-gages*. Marco sin masa adicional.

5.2.3.5 Curva de histéresis

La curva de histéresis de la figura 5-17 (a) muestra cierta anomalía en los extremos que se debió a un desplazamiento de la celda de carga por una mala fijación. Para la siguiente serie se corrigió este error. La figura 5-17 (b) muestra que la estructura está en el rango lineal elástico.

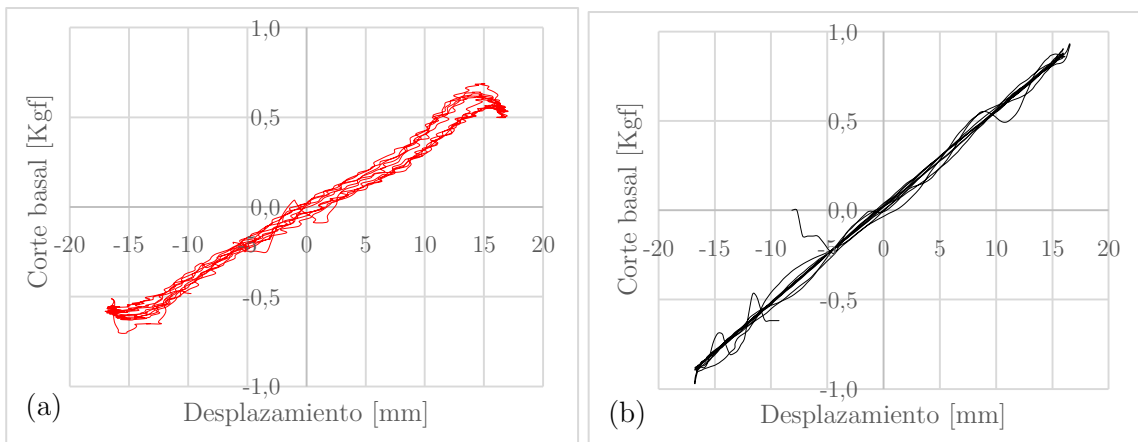


Figura 5-17 – Curva de histéresis del marco con movimiento basal de 5mm-2.5Hz. Marco sin masa adicional. (a) Medición con celda de carga (b) Medición con análisis de imágenes.

5.2.4 2.0Hz con masa suelta

5.2.4.1 Desplazamiento basal

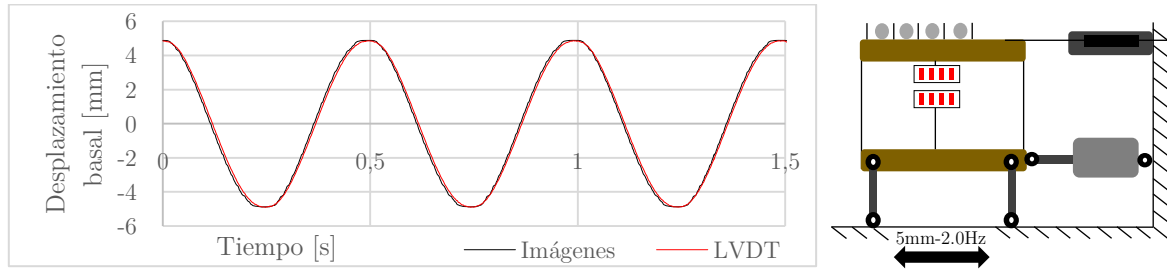


Figura 5-18 – Desplazamiento basal de 5mm-2.0Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.

5.2.4.2 Desplazamiento relativo

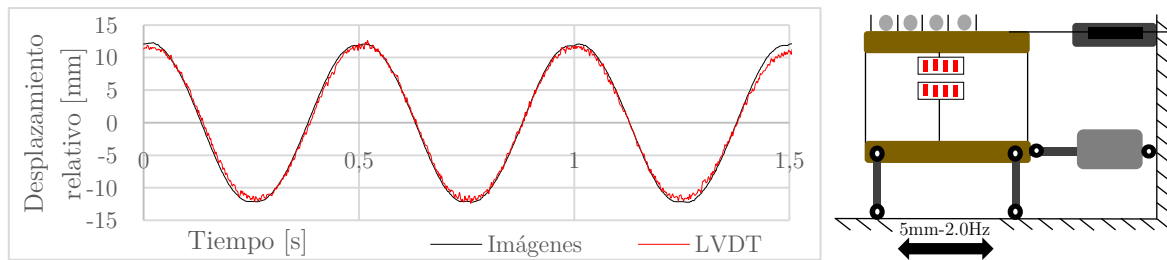


Figura 5-19 – Desplazamiento relativo del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con LVDT y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.

5.2.4.3 Corte basal

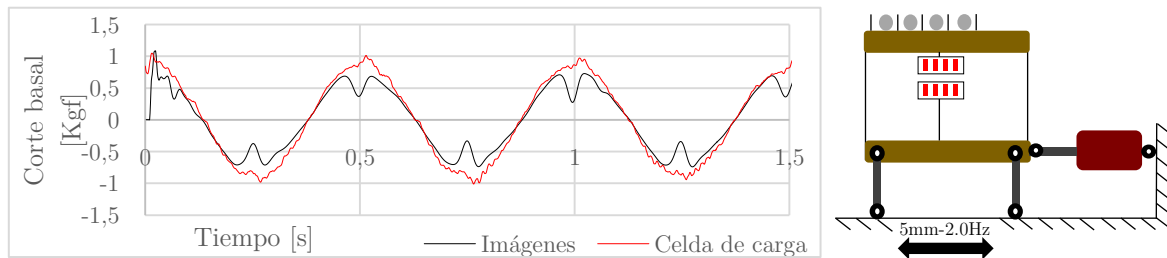


Figura 5-20 – Corte basal del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con celda de carga y análisis de imágenes. Marco con masa adicional.

5.2.4.4 Deformación

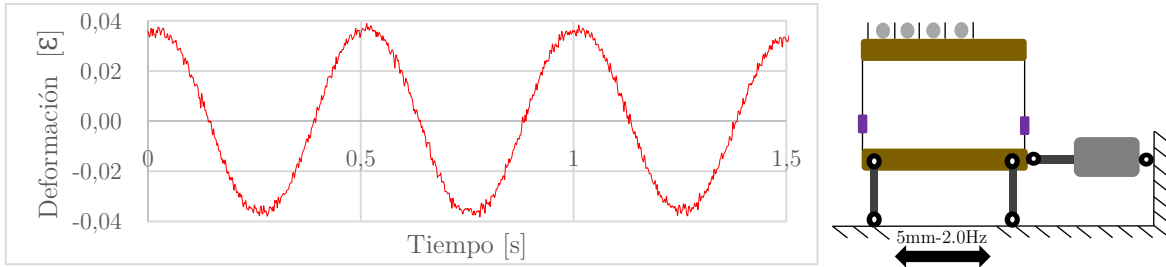


Figura 5-21 – Deformación de las columnas del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz medido con *strain-gages*. Marco con masa adicional.

5.2.4.5 Curva de histéresis

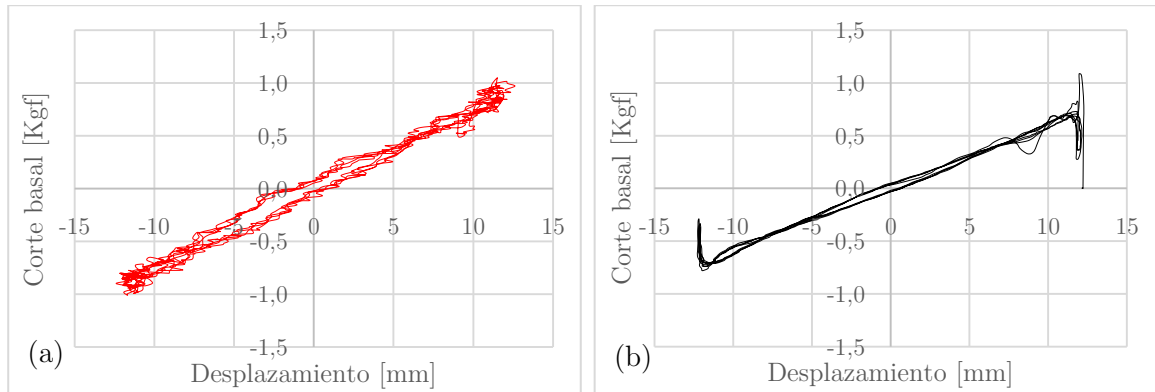


Figura 5-22 – Curva de histéresis del marco con movimiento basal de 5mm-2.0Hz. Marco con masa adicional. (a) Medición con celda de carga (b) Medición con análisis de imágenes.

La curva de histéresis de la figura 5-22 (a) no presenta alguna anomalía destacable. Se puede ver que hay ruido en la dirección horizontal debido a que los desplazamientos no han sido suavizados con ningún método. La figura 5-22 (b) presenta *efecto serpiente*, esto es, una variación súbita instantánea debido al impacto de los cilindros. En la siguiente sección se realiza un análisis comparativo.

5.3 Acerca de la medición de desplazamientos y fuerzas

5.3.1 Desplazamientos

Las figuras 5-13, 5-14, 5-18 y 5-19 comparan los desplazamientos obtenidos por LVDT y por análisis de imágenes. La figura 5-23 relaciona ambas fuentes de medición para los desplazamientos basales y relativos con su respectivo coeficiente de correlación R^2 .

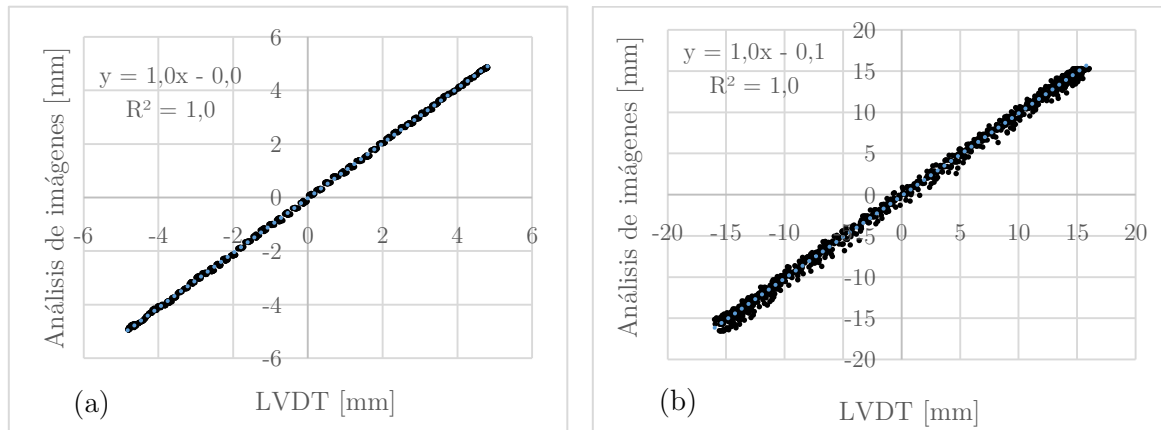


Figura 5-23 –Correlación entre mediciones realizadas con el LVDT y análisis de imágenes. (a) Desplazamiento basal (b) Desplazamiento relativo.

En la figura 5-23 (a) el coeficiente de correlación y la ecuación indican que ambas mediciones son coincidentes en su totalidad para el movimiento basal. La figura 5-23 (b) muestra un análisis similar para el desplazamiento relativo, sin embargo, el montaje del LVDT presentó vibraciones mecánicas lo que entrega resultados con más ruido.

5.3.2 Fuerzas

La serie correspondiente a vibraciones libres del espécimen, sin cilindros de acero, se puede ver que la medición de corte basal obtenida por análisis de imágenes y por la celda de carga tiene la misma forma sinusoidal como se indican las figuras 5-5 y 5-6. Estos resultados no presentaron ninguna anomalía debido al montaje.

Las vibraciones libres con las masas adicionales sobre la viga muestran variaciones súbitas en la aceleración (figura 5-11) y por consiguiente en el corte basal, similares a las obtenidas en los ensayos revisitados por análisis de imágenes presentados en el capítulo anterior. La fuerza de corte medida directamente no presenta tales variaciones como se ve en la figura 5-10. Lo anterior indica que los cambios drásticos de aceleración

no afectan a la respuesta de la estructura, por tanto, no son importantes para definir su comportamiento.

A partir de estos resultados se puede concluir que el corte basal medido directamente no es el mismo que el obtenido a partir de la aceleración de la masa concentrada. Este último presenta un efecto local debido al impacto de las masas sueltas, además del ruido intrínseco de las mediciones que se ve acentuado al momento de derivarlo a partir del desplazamiento.

Las figuras 5-7, 5-12, 5-16 y 5-21 muestran que la componente elástica de la fuerza no presenta en ningún caso *serpenteo*. Esto indica que dicho efecto no cambia en forma significativa las fuerzas en la estructura, por lo que parece lógico aplicar algún método que elimine tales variaciones.

5.4 Análisis del *efecto serpenteo*

Como muestran los resultados de este ensayo el *efecto serpenteo* se presenta cuando existen golpes sobre la estructura los cuales se reflejan en las variaciones súbitas de aceleración de la masa concentrada. En los resultados de la medición directa del corte basal este efecto prácticamente no existe.

Para explicar este fenómeno se presenta la ecuación de movimiento del marco para las vibraciones libres:

$$m_t \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (5-1)$$

Para el caso en que existen masas sueltas sobre la viga se debe agregar dicho efecto, el cual puede ser modelado como una fuerza $p(t)$ externa que cambia en función del tiempo:

$$m_t \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = p(t) \quad (5-2)$$

Definiendo el corte basal como [16]:

$$CB = c \dot{x}(t) + k x(t) \quad (5-3)$$

De esta ecuación se puede deducir que el corte basal también se puede escribir como:

$$CB = m_t \ddot{x}(t) \quad (5-4)$$

El corte basal mediante análisis de imágenes utiliza la ecuación (5-4). Sin embargo, en estricto rigor, al determinar la fuerza de corte mediante la relación fuerza aceleración, se está midiendo el corte basal más el efecto local de los golpes. Esto se puede ver despejando desde la ecuación (5-2):

$$CB = -m_t \ddot{x}(t) = p(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) \quad (5-5)$$

A los resultados obtenidos por análisis de imágenes se les debe aplicar cierta corrección que elimine el *efecto serpenteo* representado por la fuerza $p(t)$.

La figura 5-24 muestra esquemáticamente los instantes en que se produce el efecto de serpenteo para las vibraciones libres. El Anexo C muestra el video donde se puede ver este efecto en el espécimen ensayado.

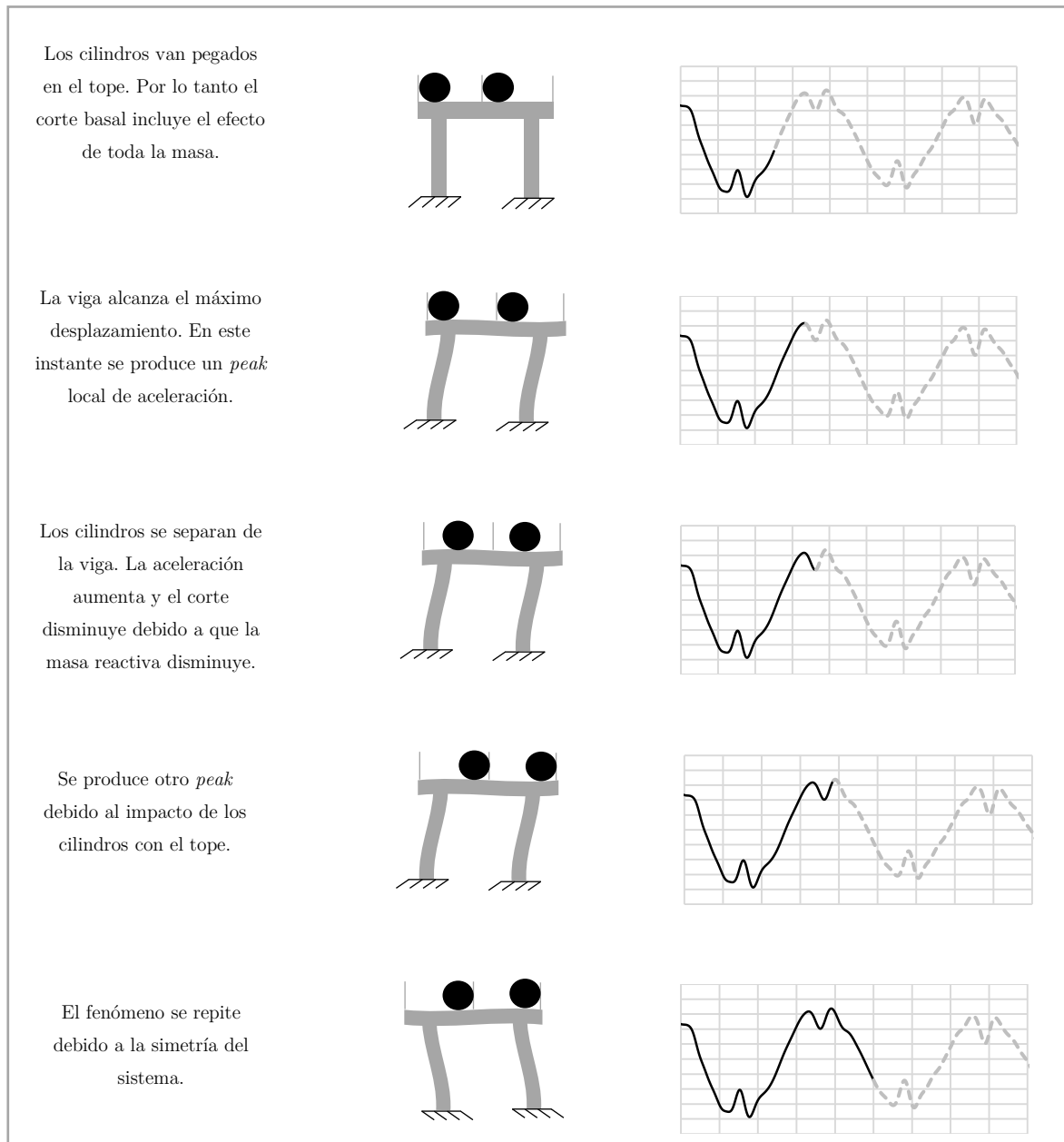


Figura 5-24 – Efecto de serpenteo en marco metálico. Las gráficas corresponden al corte basal para el instante indicado. Las proporciones de los elementos se han cambiado para mejor visualización.

5.5 Origen del *efecto serpenteo* en marcos de micro-hormigón armado

Luego de la explicación al *efecto serpenteo* en el marco metálico es necesario extender el análisis a los especímenes comúnmente ensayados en el laboratorio. Una de las características de estos ensayos es la gran masa con la que se debe cargar la estructura debido al *modelo de réplica con masa adicional artificial*.

Como se ha descrito, esta masa consiste en unidades de plomo que se disponen sobre la estructura. El *efecto serpenteo* se produce debido a los pequeños desplazamientos de estas masas, que al llegar a los extremos se traducen en impactos, que provocan anomalías en la curva de velocidad y aceleración.

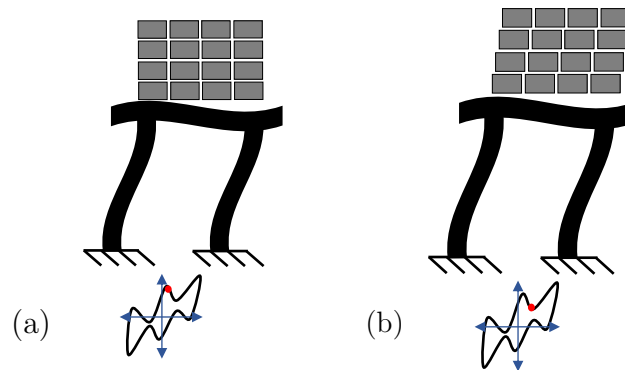


Figura 5-25 – Dinámica de la masa concentrada sobre el marco de hormigón armado.

La figura 5-25 muestra de forma exagerada los desplazamientos de los plomos, que debido a su gran masa, no necesitan de movimiento muy intenso para generar el *efecto serpenteo* observado en las curvas de histéresis de los ensayos revisitados en el capítulo anterior.

En el próximo capítulo se diseñará un ensayo que determine el corte basal de forma directa en un marco de micro-hormigón y de acero y así comparar los resultados obtenidos con el método de análisis de imágenes.

Capítulo 6

6 Ensayos en plataforma de medición directa de corte basal

En este capítulo se presenta el diseño de una base que permita obtener directamente el corte basal de un marco a escala 1:10, similar a los que se han ensayado anteriormente en el laboratorio. En la primera parte se presenta el diseño del ensayo, luego las características de los especímenes a ensayar y por último una descripción del montaje.

6.1 Diseño del ensayo

El diseño contempla la medición del corte basal para cada columna de forma independiente por medio de celdas de carga ubicadas en la base. Se dispuso la fundación de cada columna sobre un sistema con apoyos verticales rotulados que permiten el movimiento en la dirección de análisis (dirección x). Para la estabilidad en la dirección y se le agregó una restricción que no interfirió en la reacción que mide. Se implementó una pieza de acero que va apernada sobre el ala lateral de la viga de apoyo a la cual se le unen dos rótulas que brindan la estabilidad a la fundación. Las figuras 6-1, 6-2 y 6-3 muestra el diseño completo de la base sobre la cual se montará el espécimen.

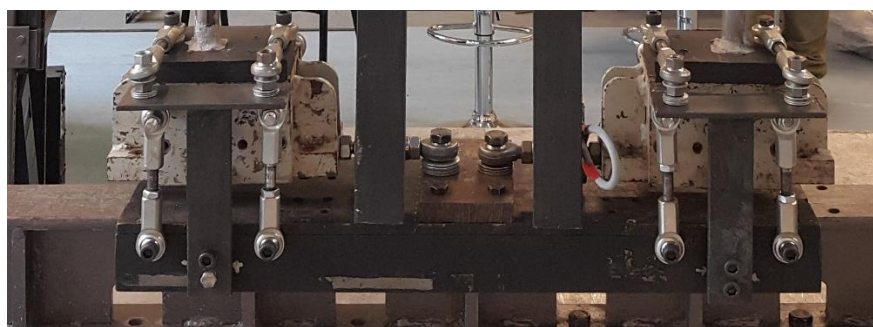


Figura 6-1 – Base de medición.

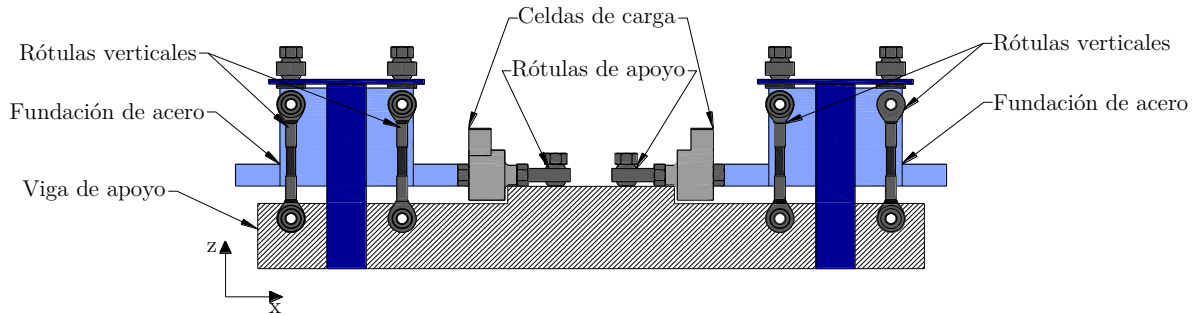


Figura 6-2 – Vista frontal de la base de medición.

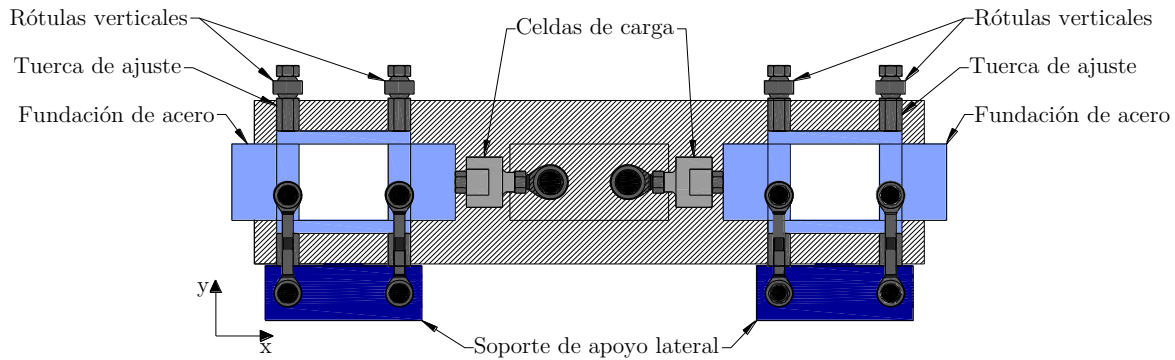


Figura 6-3 – Vista superior de la base de medición.

6.1.1 Sistema auxiliar de soporte de cargas

Para colocar la masa adicional necesaria para que el modelo sea representativo se había utilizado hasta ahora una estructura auxiliar que mantiene la carga en el plano del espécimen de manera de no intervenir significativamente su rigidez (figura 6-4). Uno de los problemas que presenta este soporte es la incertidumbre que existe en la fuerza de corte que adquieren las columnas de este sistema.

Para los ensayos desarrollados en esta memoria la masa de plomos se colgó en cables de acero como muestra la figura 6-5. De esta manera la masa reactiva horizontal será la misma dado que los cables, por su gran longitud, toman fuerzas de corte despreciables.

Sistema auxiliar de cargas
(Estructura pintada roja)

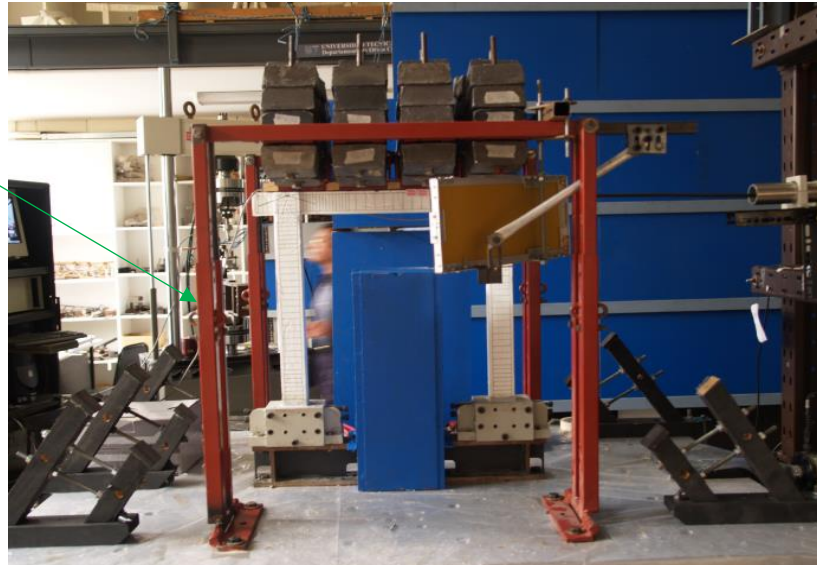


Figura 6-4 – Sistema auxiliar de soporte de cargas utilizado en el ensayo de marcos a escala [5], consiste en columnas rotuladas en sus extremos que van apoyadas sobre la mesa sísmica.

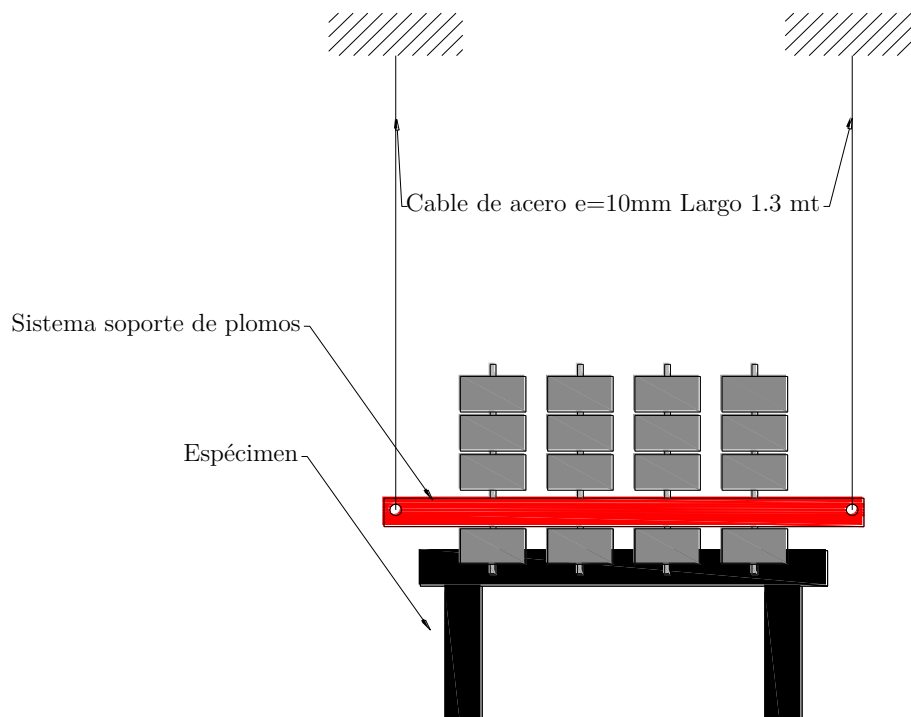


Figura 6-5 – Sistema de soporte de cargas apoyado en cables de acero.

6.2 Especímenes

Se ensayaron dos especímenes. El primero fue un marco de acero a escala 1:10 con el cual se deseaba detectar eventuales problemas en el sistema de medición o montaje (figura 6-6). Luego se ensayó un marco de micro-hormigón, similar a los estudiados en trabajos anteriores (figura 6-7).



Figura 6-6 – Marco MET-01. Antes de ser ensayado.

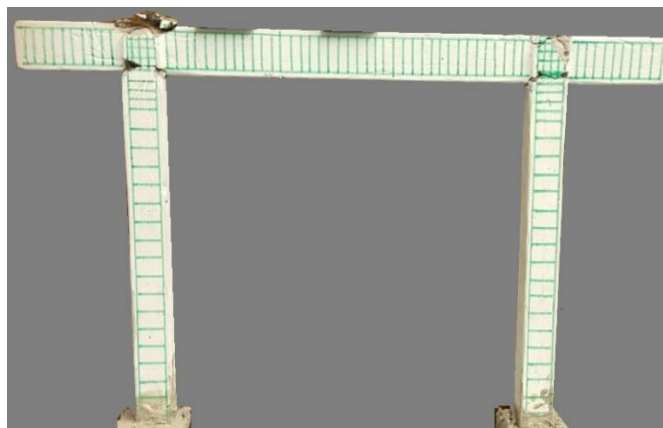


Figura 6-7 – Marco HA-01. Luego de ser ensayado.

Las figuras 6-8, 6-9, 6-10 y 6-11 muestran las elevaciones y detalles de los especímenes ensayados.

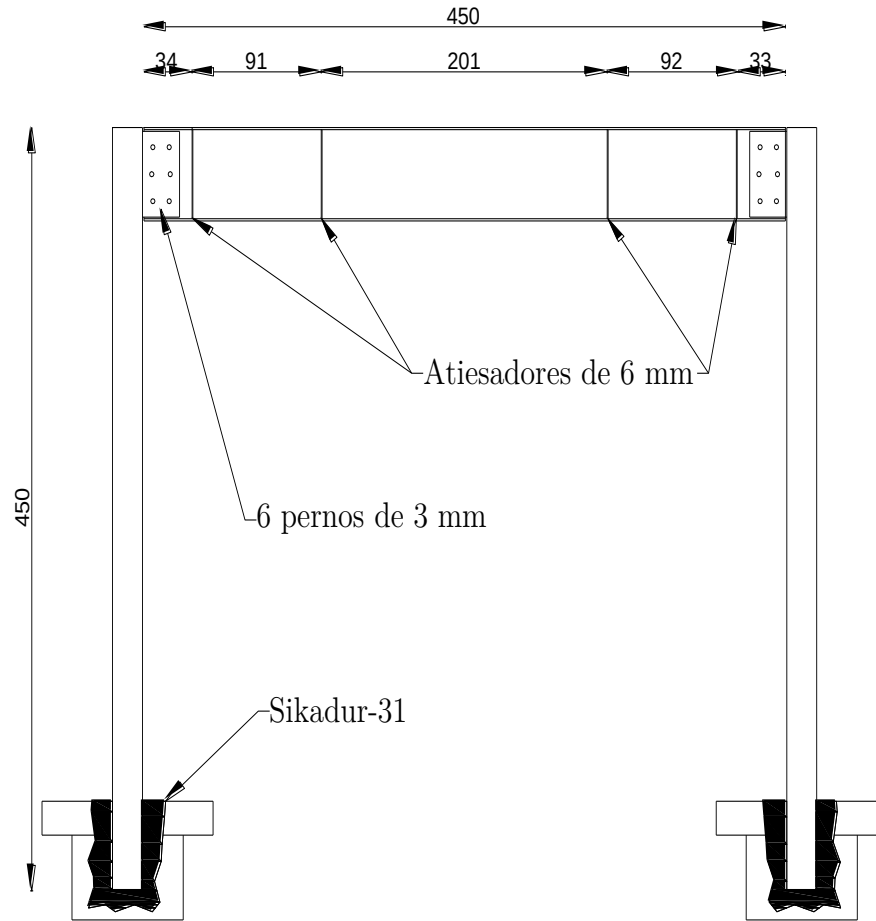


Figura 6-8 – Marco MET-01. Medidas en milímetros.

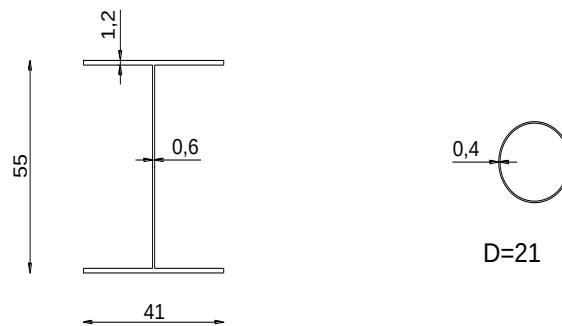


Figura 6-9 – Secciones transversales Marco MET-01. Medidas en milímetros.

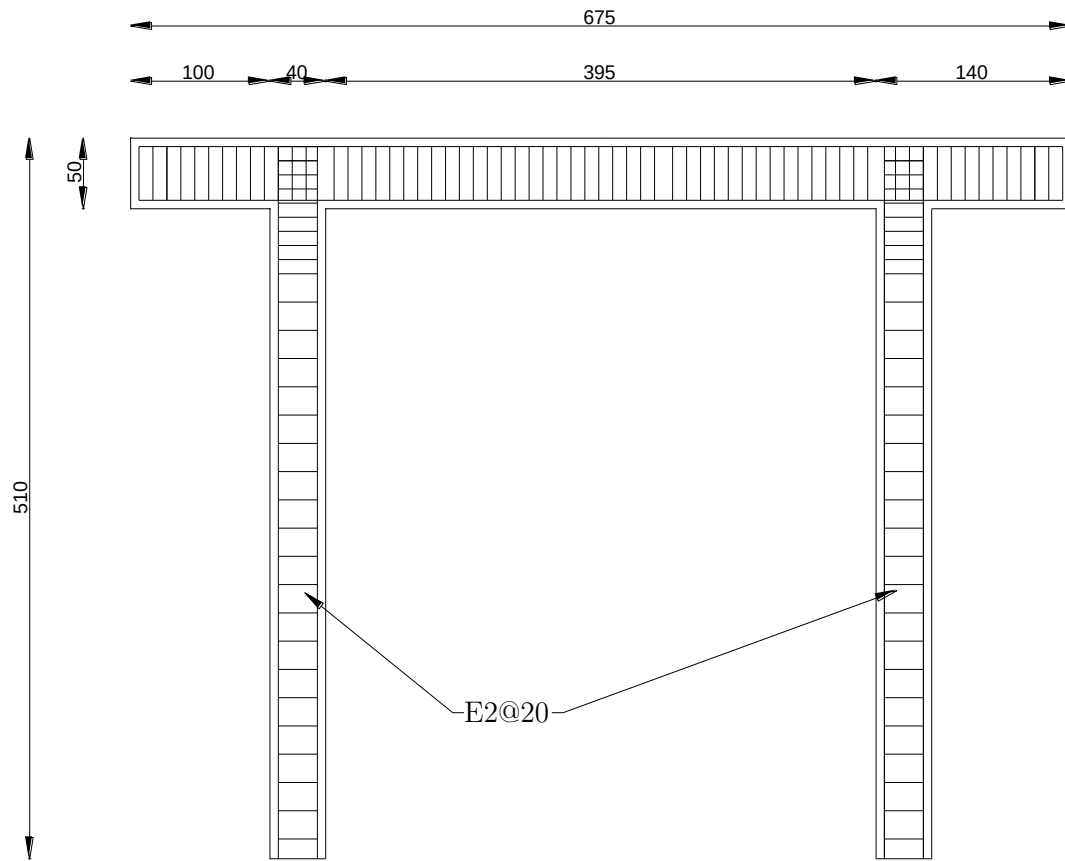


Figura 6-10 – Marco HA-01. Medidas en milímetros.

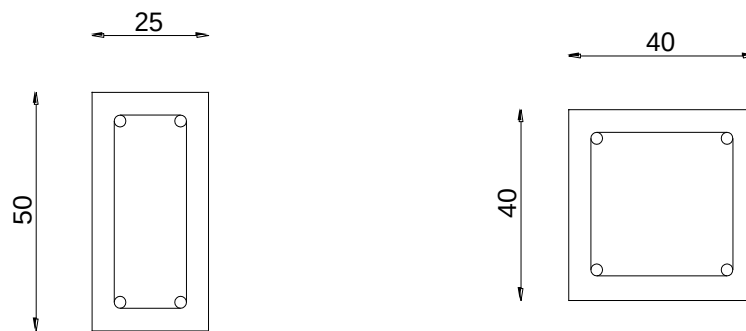


Figura 6-11 – Secciones transversales Marco HA-01. Medidas en milímetros.

6.3 Instrumentación

6.3.1 Medición de corte basal

El corte basal se midió directamente con las celdas de cargas ubicadas en la base del marco e indirectamente a partir de los desplazamientos determinados por análisis de imágenes.

6.3.2 Medición de desplazamientos

Los desplazamientos de la base se midieron con el transductor que existe dentro del actuador que mueve la mesa sísmica. Los desplazamientos absolutos de la masa se midieron mediante un LVDT ubicado a la altura de la viga.

Ambas cantidades también se obtuvieron por análisis de imágenes.

6.4 Montaje

La figura 6-12 indica el esquema de conexión para la generación de la solicitud y la adquisición de datos de los instrumentos anteriormente mencionados.

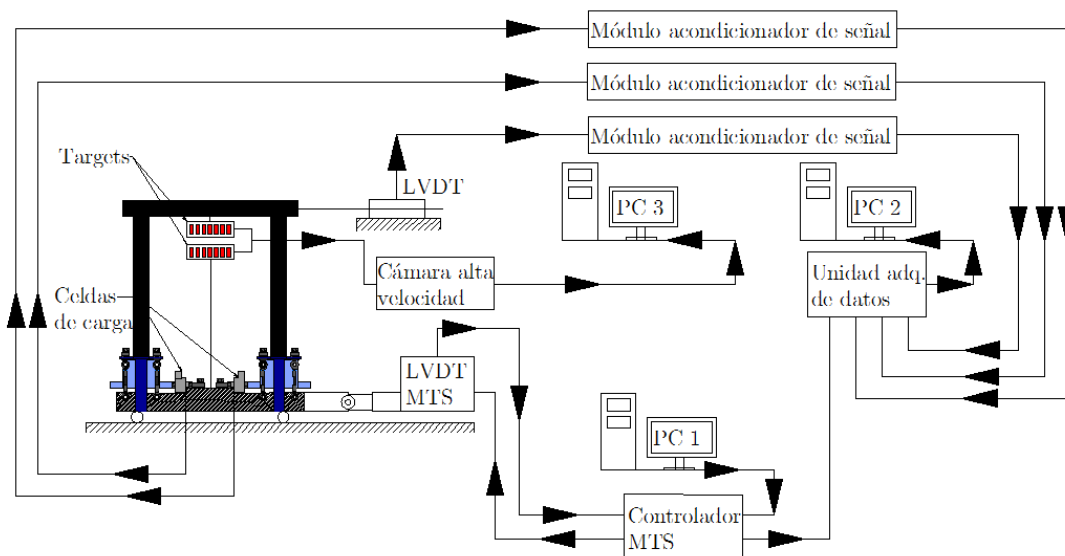


Figura 6-12 – Esquema de conexiones para la generación de la señal y adquisición de datos.

Los especímenes, de acero y hormigón, fueron cargados con 36 y 42 unidades de plomo respectivamente lo que, sumado al peso propio, da una masa de aproximadamente de 200[kg], considerando la masa del sistema de soporte como se indica en la figura 6-13.

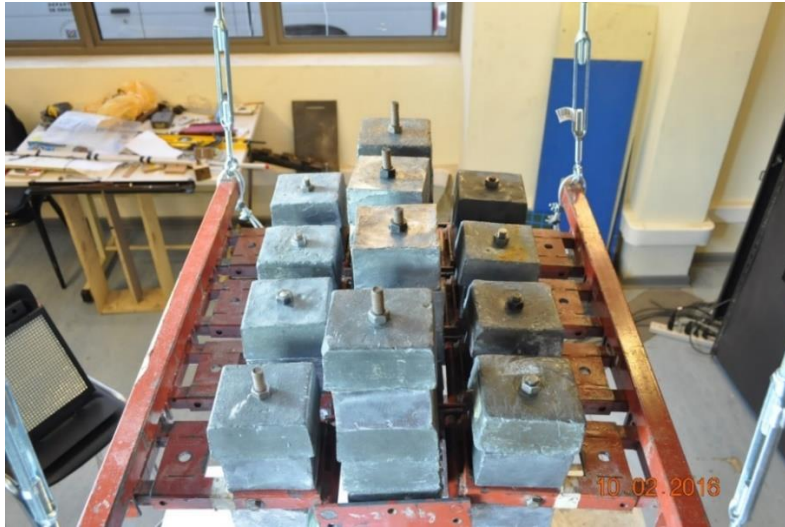


Figura 6-13 – Sistema de soporte apoyado en cables de acero cargado con unidades de plomo.

Para unir el sistema de medición basal a la mesa sísmica fue necesario instalar una viga de anclaje. Sobre las celdas se instaló una estructura de acero para así proteger las celdas de un eventual colapso del espécimen de prueba.

La figura 6-14 muestra el marco metálico montado listo para ser ensayado sobre el sistema basal de medición.

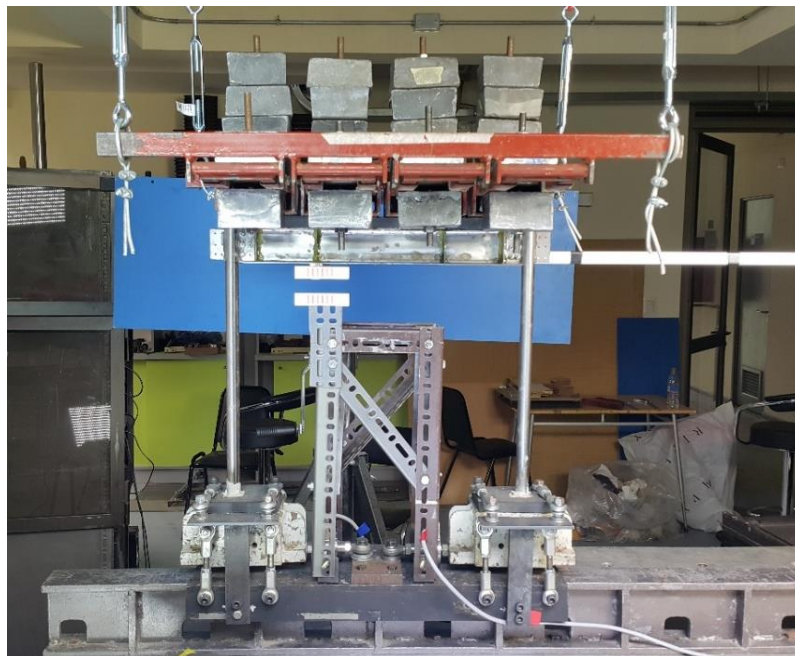


Figura 6-14 – Marco MET-01 montado.

Similar al ensayo del marco metálico, la figura 6-15 muestra el montaje del marco de hormigón armado. Se puede ver el LVDT que mide el desplazamiento absoluto y, en la pantalla del computador, una imagen capturada por la cámara de alta velocidad.

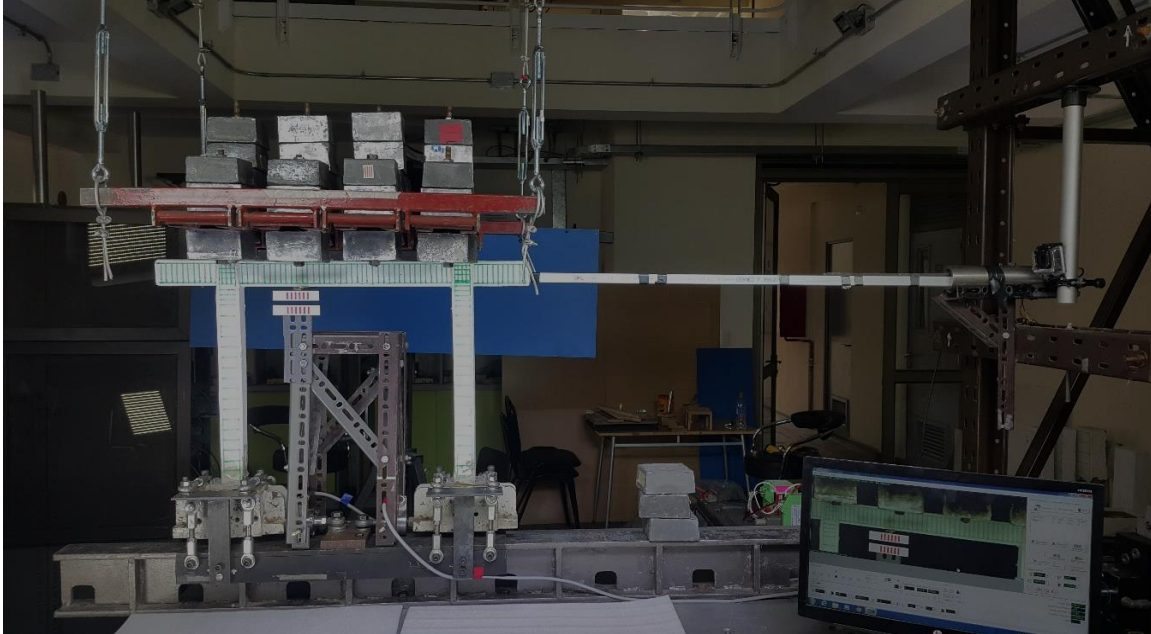


Figura 6-15 – Marco HA-01 montado.

Capítulo 7

7 Resultados de ensayos dinámicos

Se presentan aquí los resultados de los ensayos dinámicos realizados a los especímenes descritos en el capítulo anterior, en la forma de fuerza de corte basal en el tiempo y curva fuerza deformación, obtenidas por las celdas de carga y por análisis de imágenes.

Previamente se indican las sollicitaciones aplicadas y la corrección efectuada a los datos con el fin de eliminar el *efecto serpenteo*.

7.1 Sollicitaciones

Los especímenes antes detallados fueron ensayados con las series de la tabla 7-1 que tienen 25 ciclos cada una.

Tabla 7-1 – Serie de sollicitaciones aplicadas a los especímenes.

Marco MET-01		Marco HA-01	
Serie	Sollicitación	Serie	Sollicitación
1	Vibraciones libres	1	Vibraciones libres
2	5mm-5Hz	2	5mm-4Hz
3	5mm-3Hz	3	10mm-2Hz
4	5mm-2Hz	4	20mm-2Hz

7.2 Eliminación de efecto serpenteo

En los resultados obtenidos se hace presente el *efecto serpenteo*. La figura 7-1 muestra parte del corte basal medido en la serie 4 del marco HA-01 obtenido por el método de la *B-Spline* grado 100. Se pueden ver las irregularidades periódicas similares a las indicadas en el capítulo 5. La figura 7-2 muestra los mismos resultados pero obtenidos directamente por las celdas de carga. Como era de esperar, estos no presentan el *efecto serpenteo*, lo que reafirma la necesidad de establecer un método de eliminación de dichas variaciones súbitas.

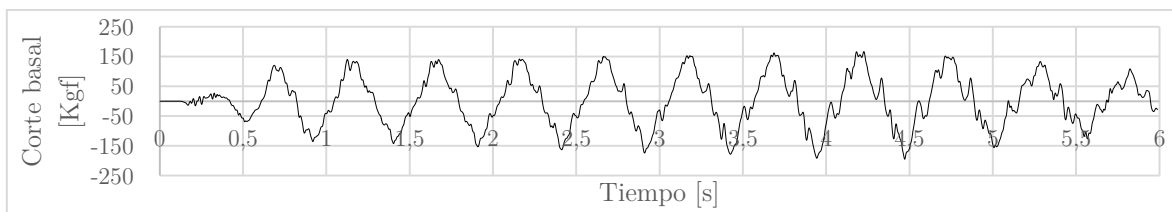


Figura 7-1 – Corte basal del Marco HA-01 en la serie 4 obtenido por análisis de imágenes con *B-Spline* grado100.

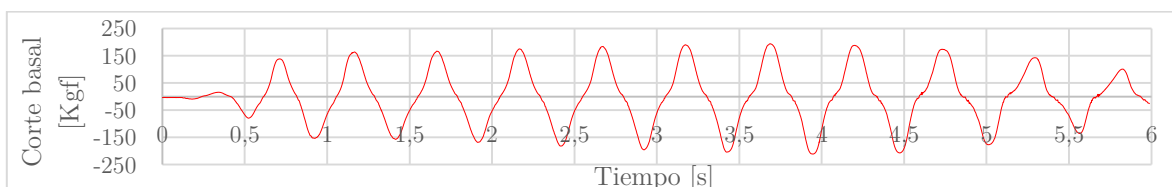


Figura 7-2 – Corte basal del Marco HA-01 en la serie 4 obtenido por celdas de carga.

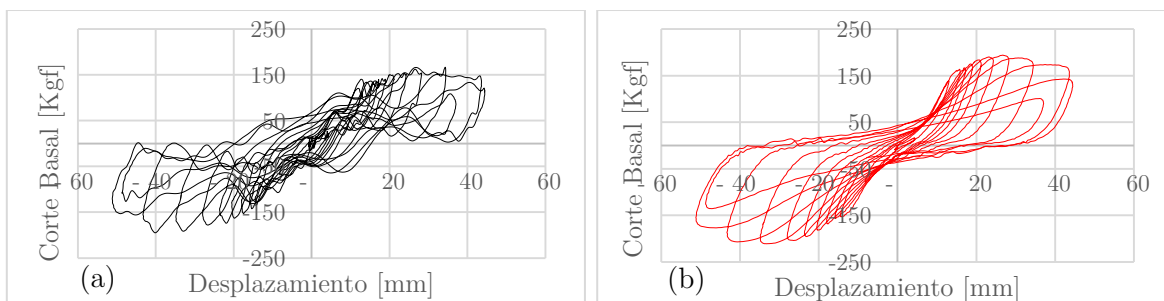


Figura 7-3 –Curva de histéresis del Marco HA-01 de la serie 4. (a) Análisis de imágenes con *B-Spline* grado 100. (b) Celda de carga.

La figura 7-3 muestra las curvas de histéresis construidas a partir del análisis de imágenes y las obtenidas por las celdas de carga respectivamente.

7.2.1 Corrección aplicada

Los resultados presentados están corregidos con el método de la *B-Spline* grado $k = 660$. Éste se ha obtenido probando con distintos grados k de *B-Spline* para suavizar el corte basal, medido con análisis de imágenes. Luego, cada uno de estos resultados, se comparó con los obtenidos con la celda de carga determinando el coeficiente de correlación R^2 entre ambas mediciones. De este procedimiento el máximo coeficiente de correlación se obtuvo para el grado $k = 660$. Esta propiedad se debe a la naturaleza de la *B-Spline*, lo cual presenta una ventaja ya que se cumple con el objetivo de poder generalizar la corrección por este método.

7.3 Resultados Marco MET-01

7.3.1 Serie 1 MET-01: Vibraciones libres

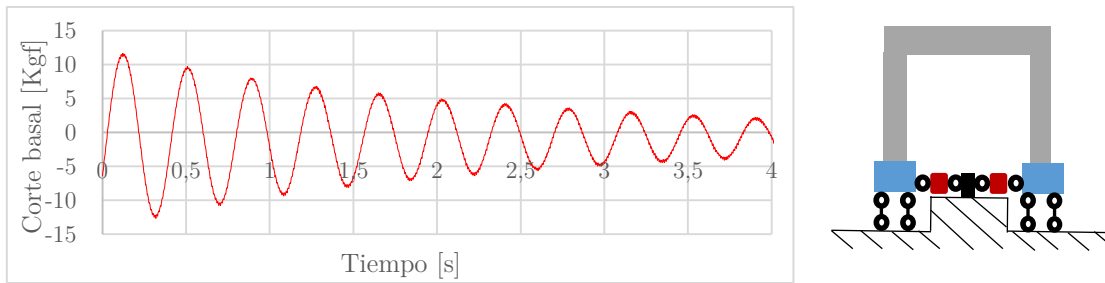


Figura 7-4 – Corte basal en vibraciones libres de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.

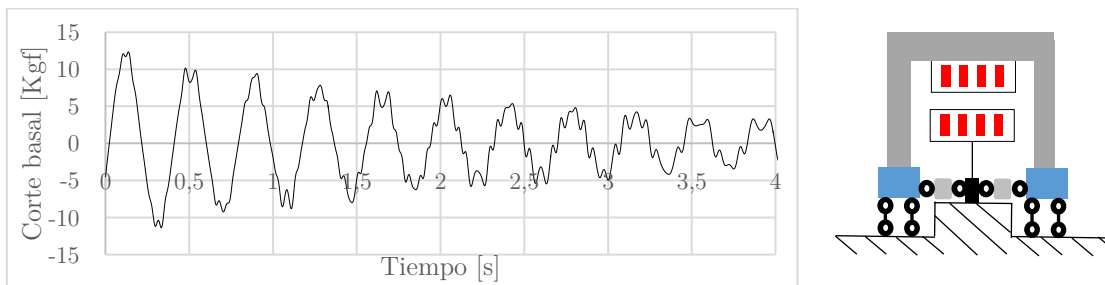


Figura 7-5 – Corte basal en vibraciones libres de Marco MET-01 obtenido análisis de imágenes.

7.3.2 Serie 2 MET-01: 5mm-5Hz

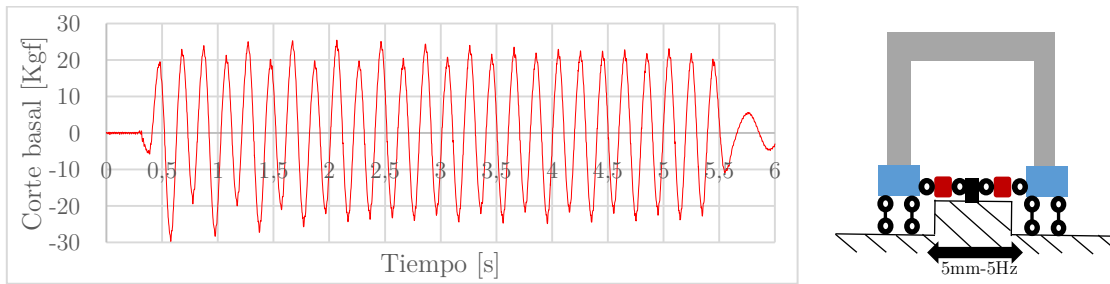


Figura 7-6 – Corte basal en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.

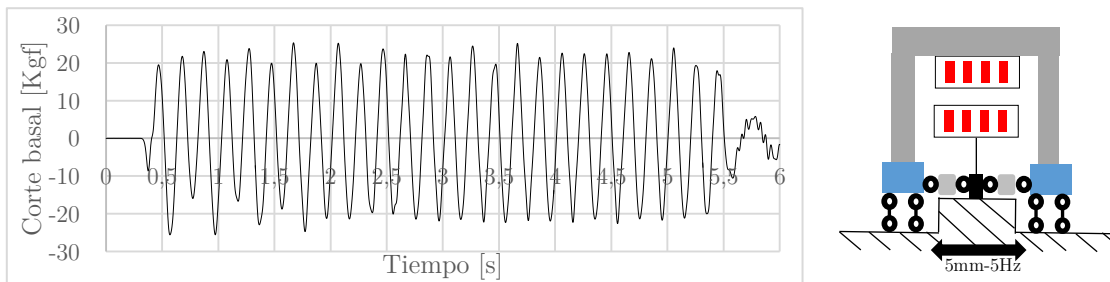


Figura 7-7 – Corte basal en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.

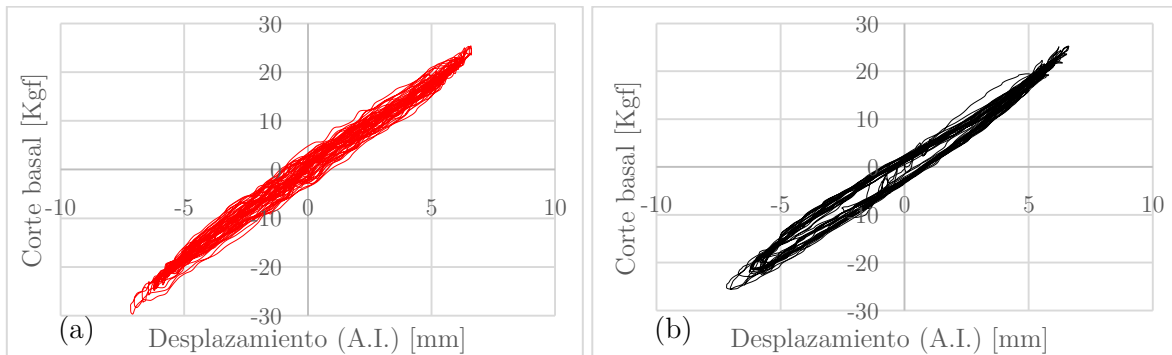


Figura 7-8 – Curva de histéresis en serie 5mm-5Hz de Marco MET-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

7.3.3 Serie 3 MET-01: 5mm-3Hz

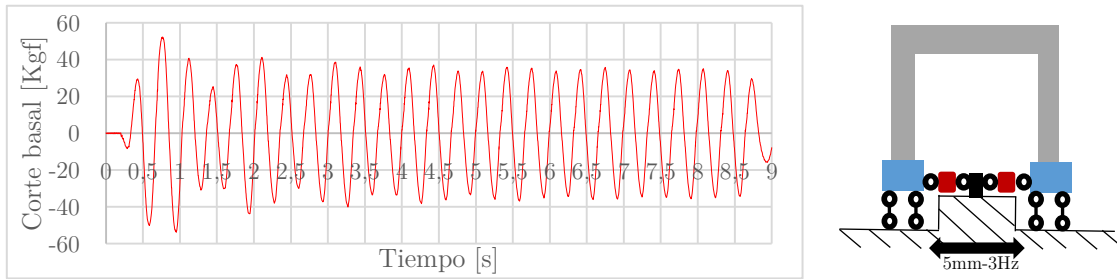


Figura 7-9 – Corte basal en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.

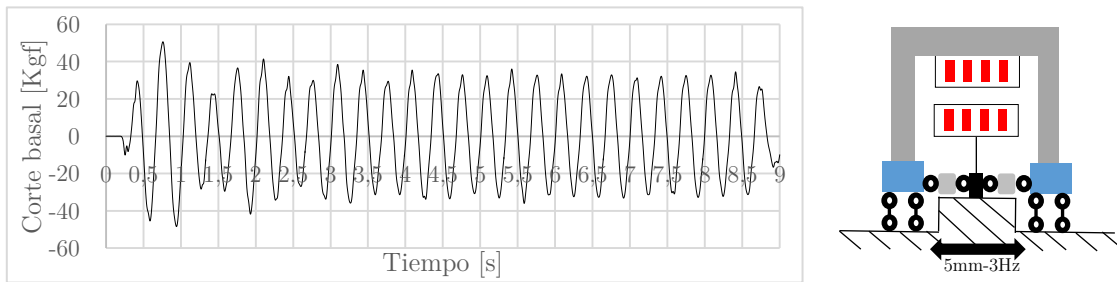


Figura 7-10 – Corte basal en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.

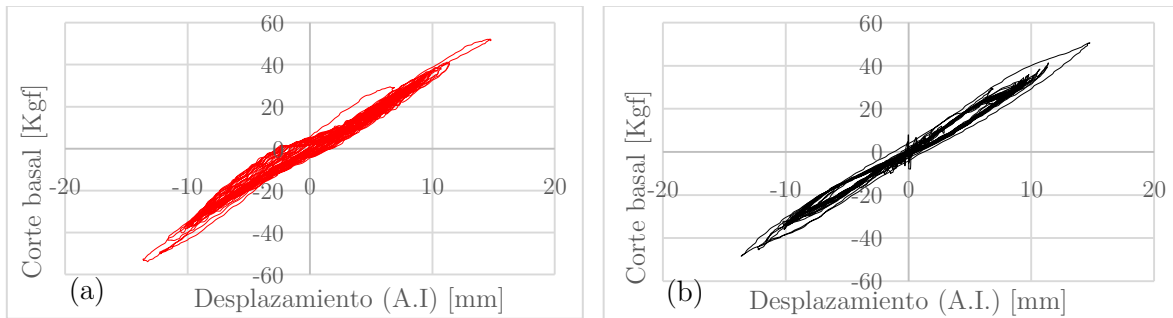


Figura 7-11 – Curva de histéresis en serie 5mm-3Hz de Marco MET-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

7.3.4 Serie 4 MET-01: 5mm-2Hz

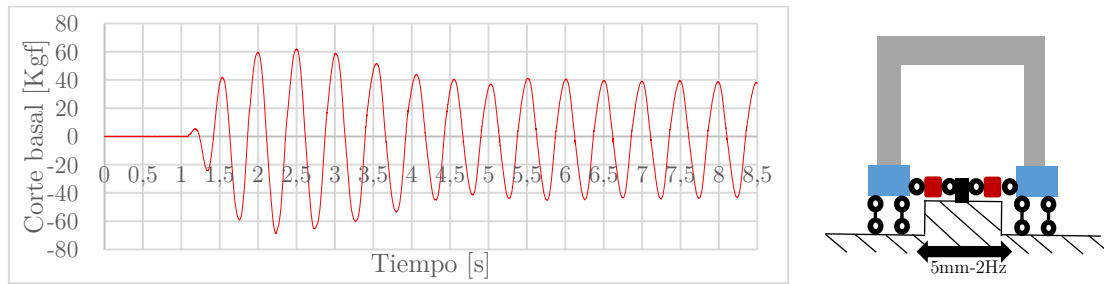


Figura 7-12 – Corte basal en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01 obtenido por celdas de carga.

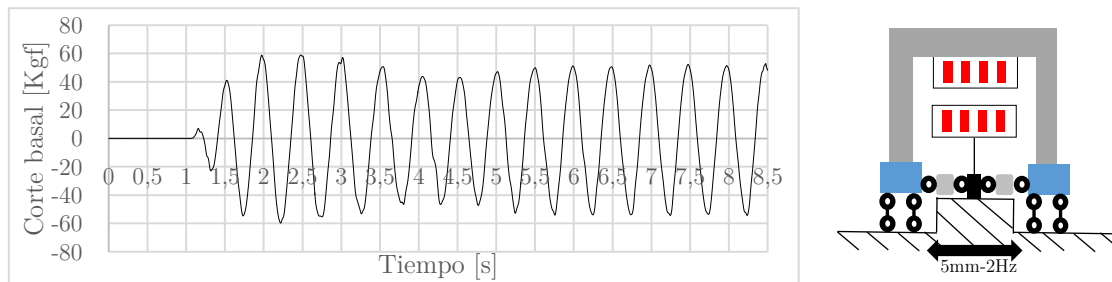


Figura 7-13 – Corte basal en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01 obtenido por análisis de imágenes.

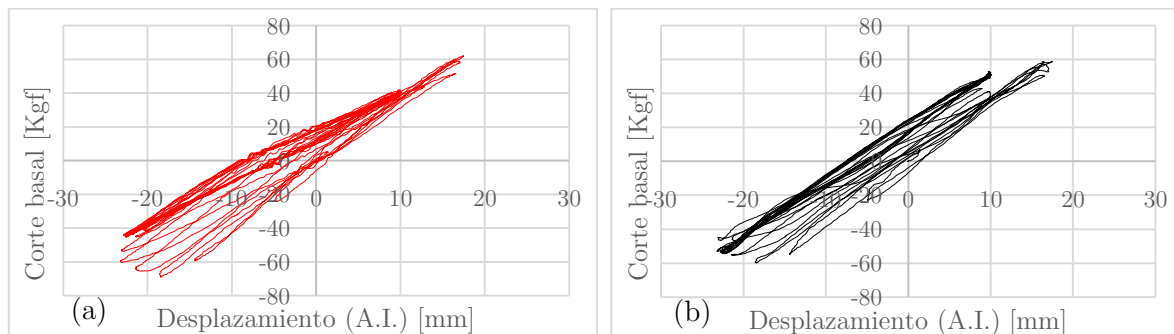


Figura 7-14 – Curva de histéresis en serie 5mm-2Hz de Marco MET-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

En esta serie se muestran la curva hasta $t = 8,5 [s]$ puesto que luego del colapso de la estructura ésta se salió de su plano, por lo tanto, no se pudo medir desplazamientos mediante las imágenes.

7.4 Resultados Marco HA-01

7.4.1 Serie 1 HA-01: Vibraciones libres

Las vibraciones libres se obtuvieron a partir del impulso inicial resultante cuando se conectó la presión de la mesa sísmica.

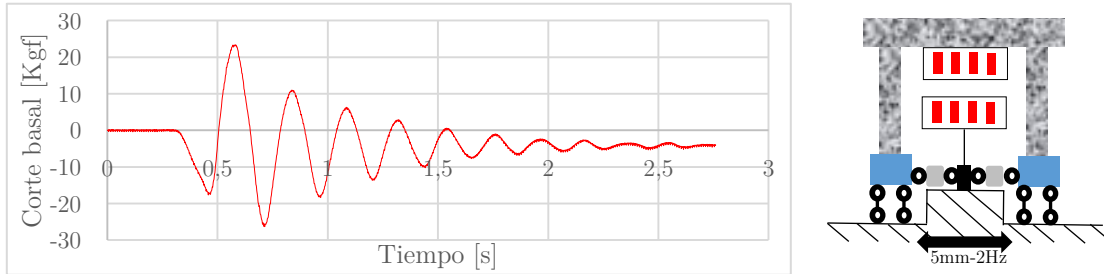


Figura 7-15 – Corte basal en vibraciones libres de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.

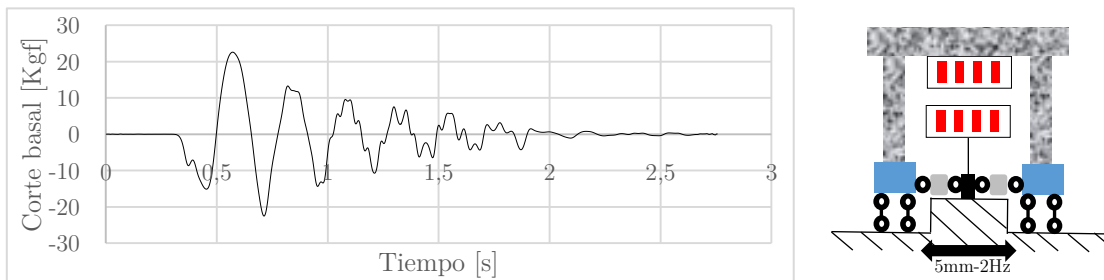


Figura 7-16 – Corte basal en vibraciones libres de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.

7.4.2 Serie 2 HA-01: 5mm-4Hz

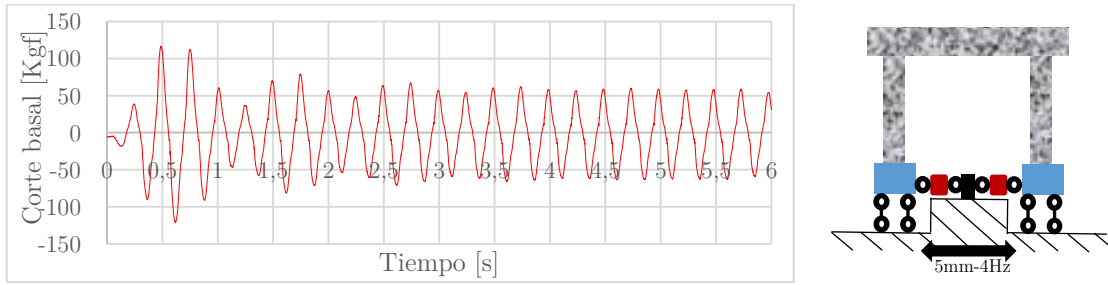


Figura 7-17 – Corte basal en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.

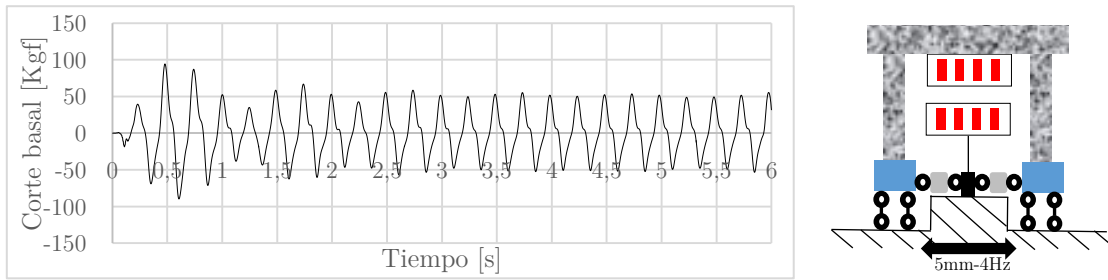


Figura 7-18 – Corte basal en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.

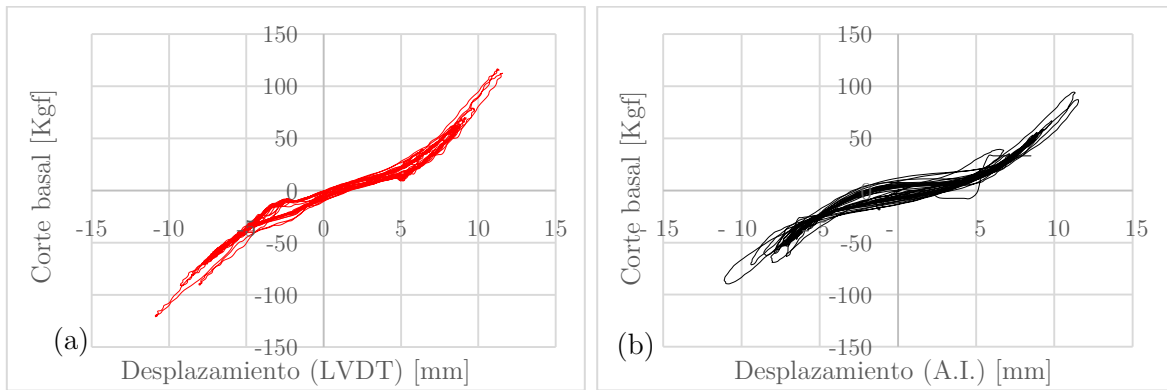


Figura 7-19 – Curva de histéresis en serie 5mm-4Hz de Marco HA-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

7.4.3 Serie 3 HA-01: 10mm-2Hz

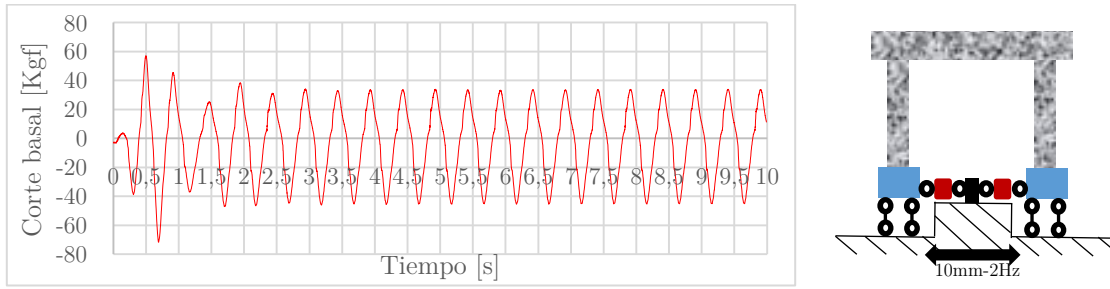


Figura 7-20 – Corte basal en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.

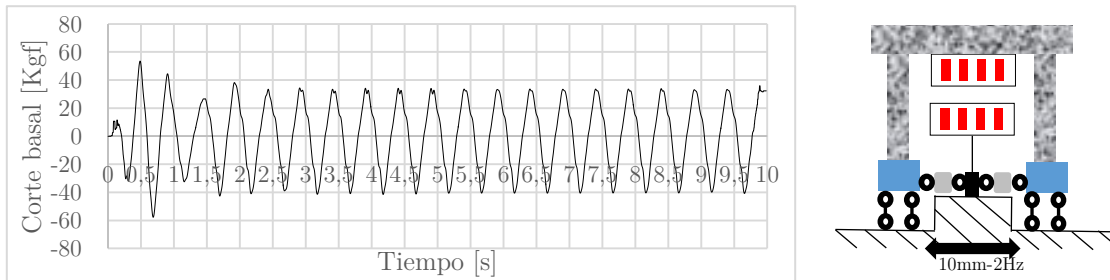


Figura 7-21 – Corte basal en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.

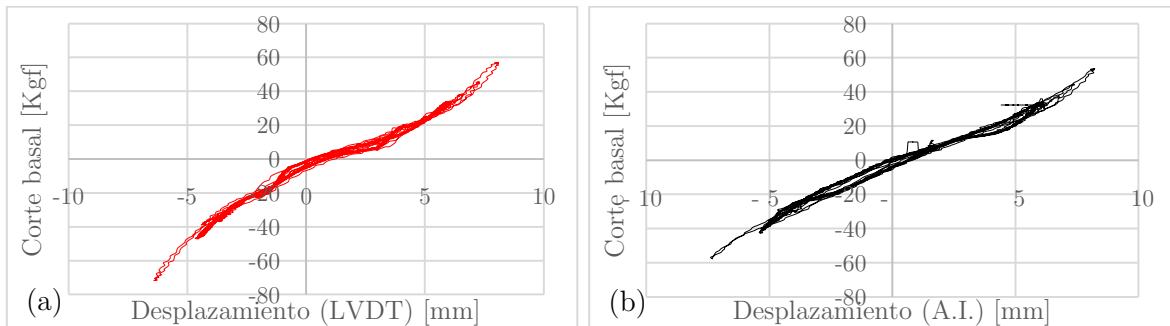


Figura 7-22 – Curva de histéresis en serie 10mm-2Hz de Marco HA-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

7.4.4 Serie 4 HA-01: 20mm-2Hz

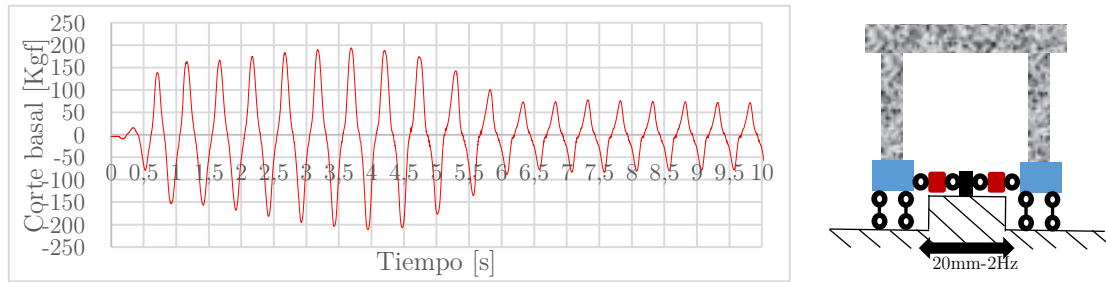


Figura 7-23 – Corte basal en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por celdas de carga.

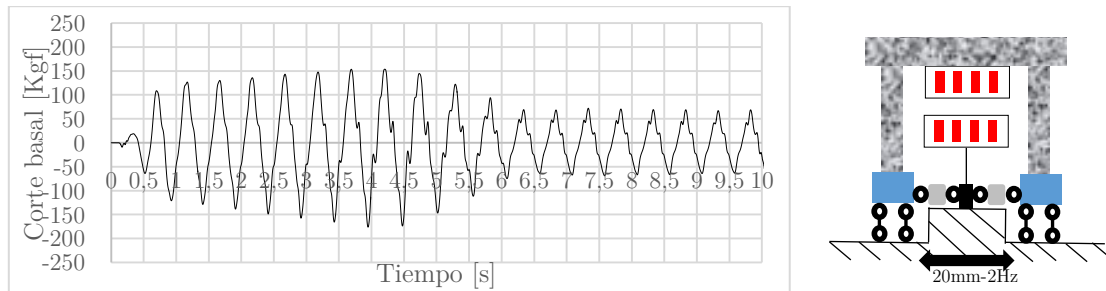


Figura 7-24 – Corte basal en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01 obtenido por análisis de imágenes.

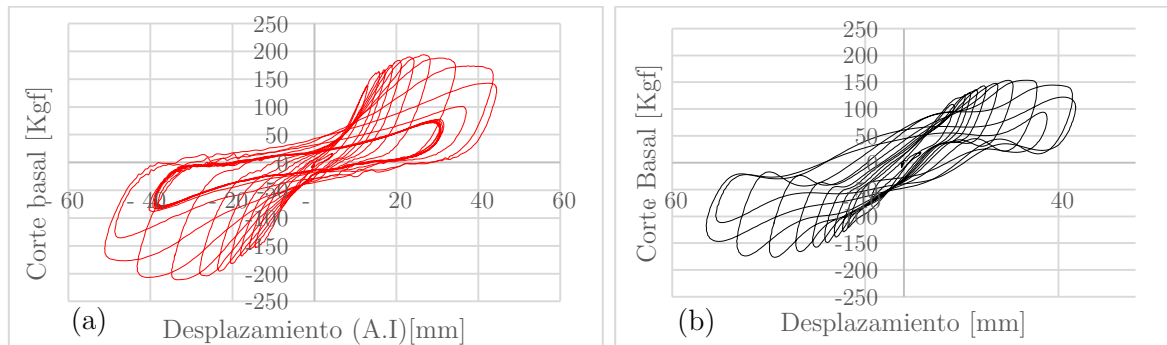


Figura 7-25 – Curva de histéresis en serie 20mm-2Hz de Marco HA-01. (a) Celdas de carga (b) Análisis de imágenes.

Esta serie corresponde a la presentada al inicio de este capítulo, figura 7-3. Para este caso no fue posible eliminar por completo el serpenteo como en las series anteriores.

En el siguiente apartado se comentan los resultados de todas las series.

7.5 Comentarios de resultados

Los desplazamientos absolutos medidos por el LVDT, para el Marco MET-01, tienen un error debido a problemas de sujeción del instrumento. Por esta razón las curvas de

histéresis se dibujaron de los resultados de la celda de carga con los desplazamientos por análisis de imágenes como indican las figuras 7-8, 7-11 y 7-14. Los *time-line* de ambas mediciones, al estar ligeramente desfasadas, producen una pequeña distorsión en los datos.

Los resultados de la serie 1, 2 y 3 del Marco HA-01 no tienen este problema, es decir, las curvas de histéresis a partir de las celdas de carga (figuras 7-19 (a) y 7-22 (a)) se realizaron con los desplazamientos del LVDT. Por otro lado, las curvas de histéresis de las figuras 7-19 (b), 7-22 (b) y 7-25 (b) fueron realizadas totalmente por análisis de imágenes. En la serie 4, junto con el marco, colapsó la instalación del LVDT, por lo que la curva de la figura 7-25 (a) fue realizada con los desplazamientos obtenidos por análisis de imágenes.

Las curvas de corte basal en el tiempo obtenidas por la celda de carga (figuras 7-4, 7-6, 7-9, 7-12, 7-15, 7-17, 7-20 y 7-23), comparadas a las realizadas por análisis de imágenes (figuras 7-5, 7-7, 7-10, 7-13, 7-16, 7-18, 7-21 y 7-24), muestran que el método de la curva *B-Spline* aplicado, elimina casi completamente el *efecto serpenteo*, salvo en los casos donde la magnitud de la fuerza es baja. Se obtienen formas similares lo que se refleja en el estudio de correlación entre ambas variables.

En el caso de las curvas de histéresis obtenidas los resultados son aceptables, sin embargo, no son absolutamente iguales. Si bien se pueden determinar las variables de rigidez media, el área de estas curvas en algunos casos no es equivalente, por lo que en un análisis de cuantificación de energía disipada, por ejemplo, no se obtendrán valores coincidentes.

El método de la curva *B-Spline* ha entregado resultados admisibles para una primera aproximación del comportamiento estructural del espécimen. En el siguiente capítulo se presenta una exploración a otros métodos que permitan eliminar el *efecto serpenteo*.

Capítulo 8

8 Exploración de otros métodos para corrección de la curva de histéresis

8.1 Transformada de Wavelet

Una forma de entender conceptualmente el análisis de *Wavelet* es comparándolo con el análisis de *Fourier*. Este último consiste en separar la señal en *componentes sinusoidales* de diferentes frecuencias y amplitudes, las cuales se presentan en el *espectro de Fourier*. Cuando el objetivo es filtrar dicha señal es posible ver intuitivamente las frecuencias menos relevantes y eliminarlas para así, con el procedimiento inverso, obtener dicha señal sin las perturbaciones indeseadas.

Así como en la *Transformada de Fourier* la señal se descompone en ondas sinusoidales, la *Transformada de Wavelet* descompone en ondas localizadas, que pueden tener formas diferentes a la senoide, que descienden rápidamente a cero y tienen un valor promedio nulo. Estas ondas se denominan *funciones madres*, y de acuerdo a la naturaleza de la señal a estudiar, existen funciones más apropiadas que otras para ser utilizadas en el análisis. La figura 8-1 muestra conceptualmente la descomposición de la misma señal bajo la transformada de *Fourier* y *Wavelet*.

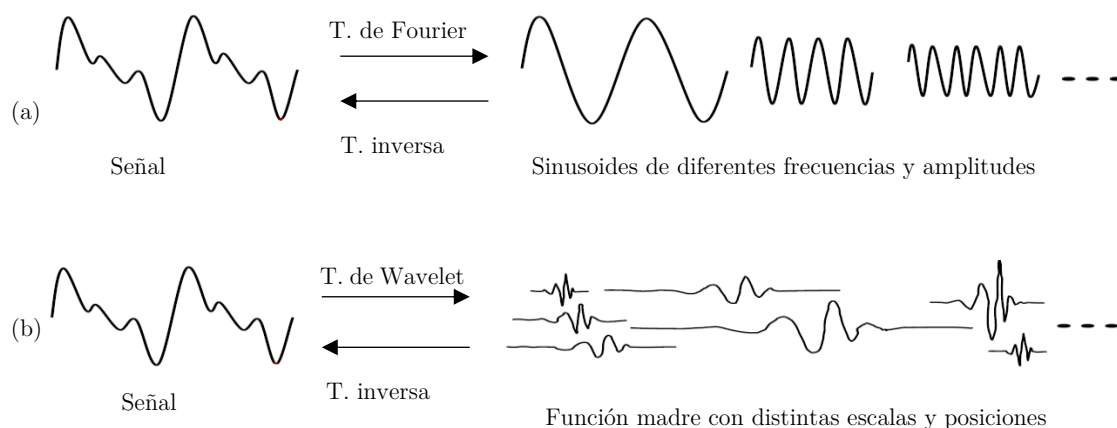


Figura 8-1 – Descomposición de una señal. (a) Transformada de Fourier (b) Transformada de Wavelet [14].

Para determinar qué *función madre* es la óptima para el análisis de una señal en particular no existe un procedimiento estándar, aparte de un paso de prueba y error.

El análisis de *Fourier* presenta una desventaja en señales intermitentes, esto es, si se tiene un pulso localizado en una señal, todo el espectro se verá afectado, mientras que en el análisis de *Wavelet* se sabrá en qué tiempo se produce tal discontinuidad.

Otra ventaja que presenta el análisis de *Wavelet* es que en varios casos proporciona un mejor ajuste a los datos con menos coeficientes que el análisis de *Fourier*, por lo mismo, es más rápido desde el punto de vista de su implementación numérica.

8.1.1 Aplicación de la Transformada de Wavelet para la eliminación del efecto serpenteo

El objetivo del análisis de *Wavelet* es poder utilizarlo como filtro a las señales de fuerzas obtenidas por análisis de imágenes. El principio se basa en la separación de la señal en las componentes de baja y alta frecuencia. Esta descomposición se puede realizar en distintos niveles dependiendo del número de datos que se disponga.

La figura 8-2 muestra esquemáticamente la descomposición de una señal S en distintos niveles. A corresponde a la salida de los pasa bajos, es decir, la frecuencia baja de la señal, mientras que D es la frecuencia alta. Más detalles sobre los niveles de filtro se encuentran en la referencia [15].

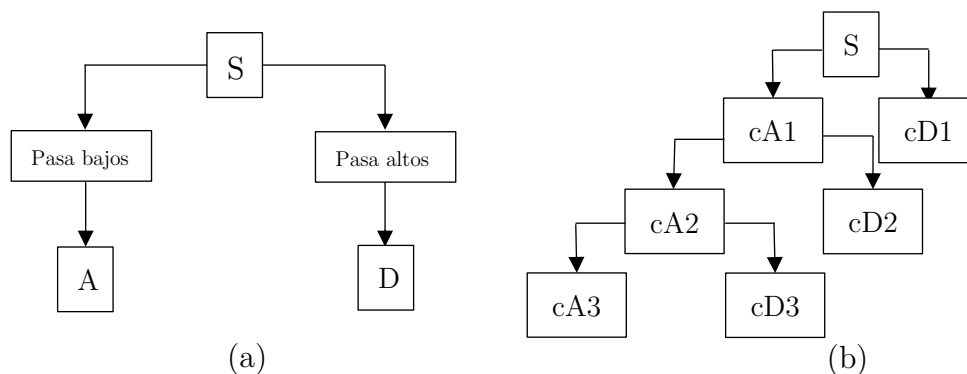


Figura 8-2 – Filtro de una señal S . (a) Filtro de un nivel. (b) Filtro de 3 niveles. [17]

La figura 8-3 muestra la descomposición de los resultados de la serie 4 (20mm-2Hz) del marco HA-01 presentado en esta memoria.

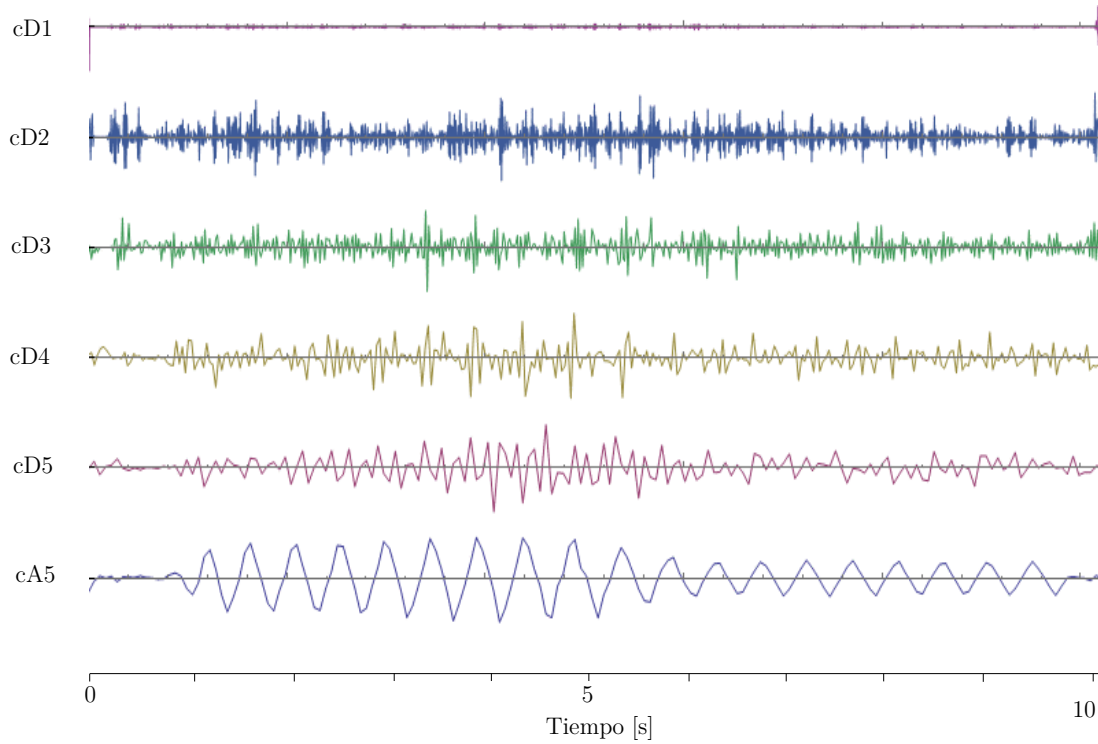


Figura 8-3 – Señal de fuerza descompuesta en un filtro de 5 niveles.

Se tiene entonces que los resultados obtenidos a partir del análisis de *Wavelet* dependen principalmente de la *función madre* y de los niveles de filtros utilizados. A continuación se presentan los resultados obtenidos por el análisis de *Wavelet* donde se utilizó como función madre la familia *Coiflets* de grado 3 con filtros de 4 ó 5 niveles dependiendo de cada caso. Este método se aplicó a la señal con un nivel de *B-Spline* grado 100.

8.2 Comparación de resultados

Se presentan los resultados por los distintos métodos indicados con distinto color:

Curvas color rojo: directamente con las celdas de carga.

Curvas color negro: análisis de imágenes con *B-Spline* grado 660.

Curvas color azul: análisis de imágenes con análisis de *Wavelet*.

8.2.1 Resultado ensayo revisitado de espécimen M5-A4800 serie 30mm-3Hz



Figura 8-4 – Nudo de marco M5-A4800 luego de la serie 30mm-3Hz.

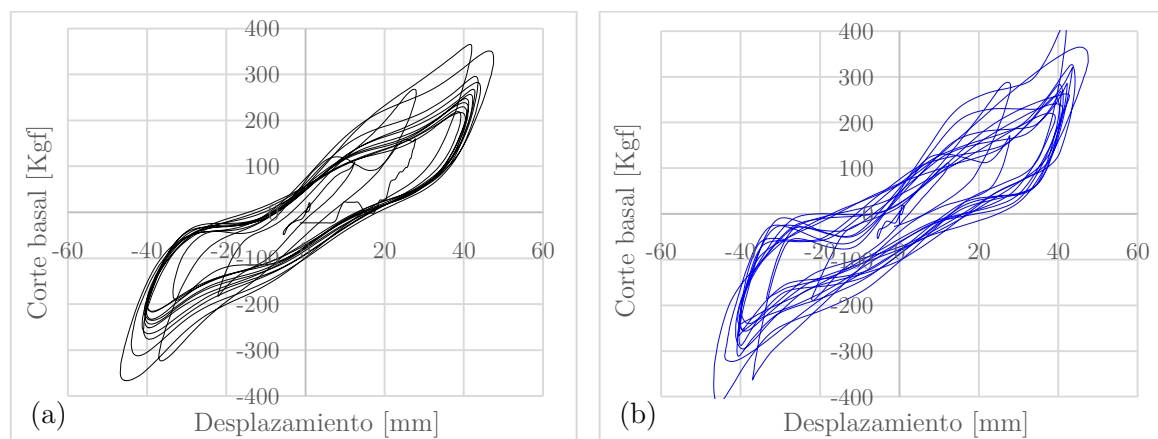


Figura 8-5 – Curva de histéresis de marco M5-A4800 serie 30mm-3Hz. (a) *B-Spline* 660. (b) Análisis de Wavelet, familia *Coiflets* grado 3 nivel 4.

8.2.2 Resultado ensayo marco MET-01

8.2.2.1 Serie 2 MET-01: 5mm-5Hz

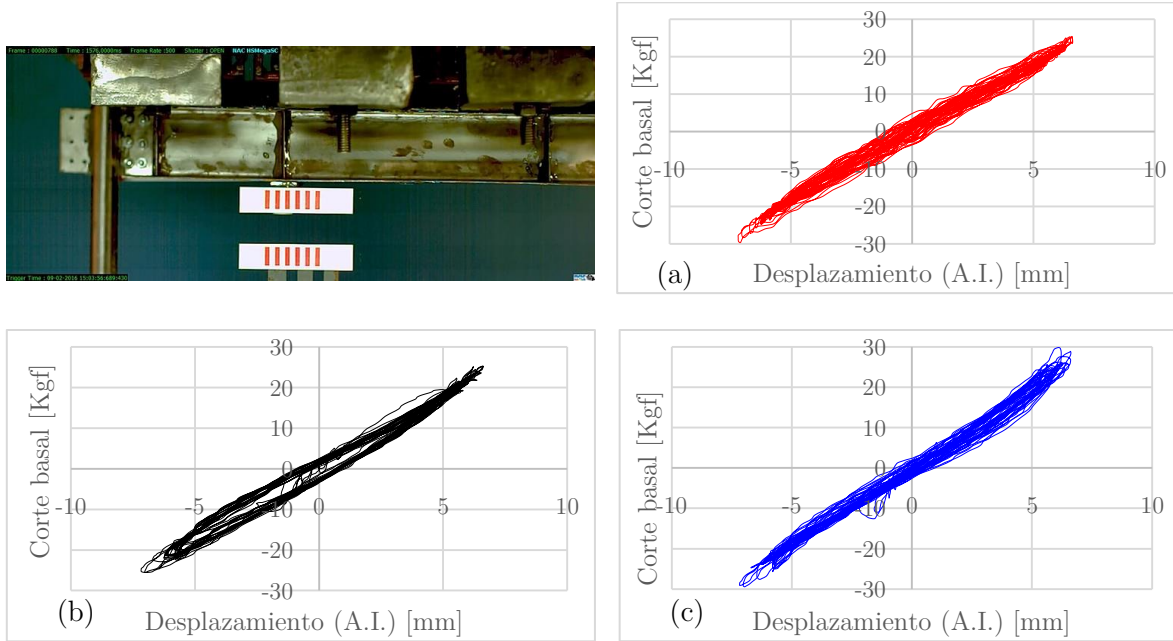


Figura 8-6 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-5Hz. (a) Celdas de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 4 niveles.

8.2.2.2 Serie 3 MET-01: 5mm-3Hz

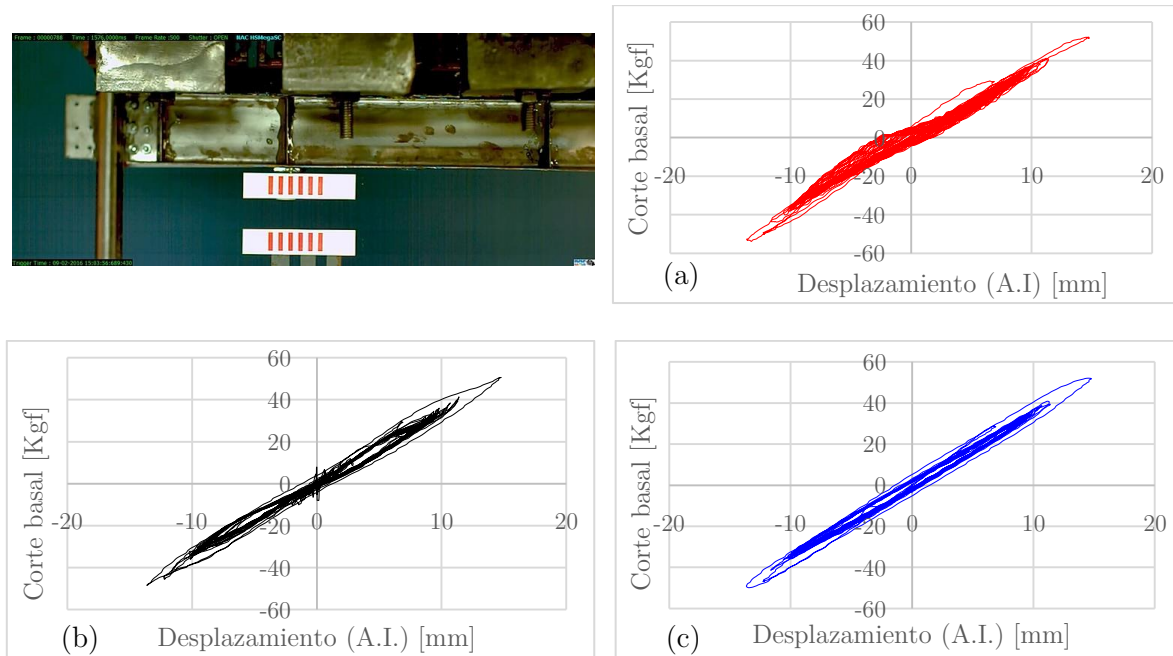


Figura 8-7 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-3Hz. (a) Celdas de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 5 niveles.

8.2.2.3 Serie 4 MET-01: 5mm-2Hz

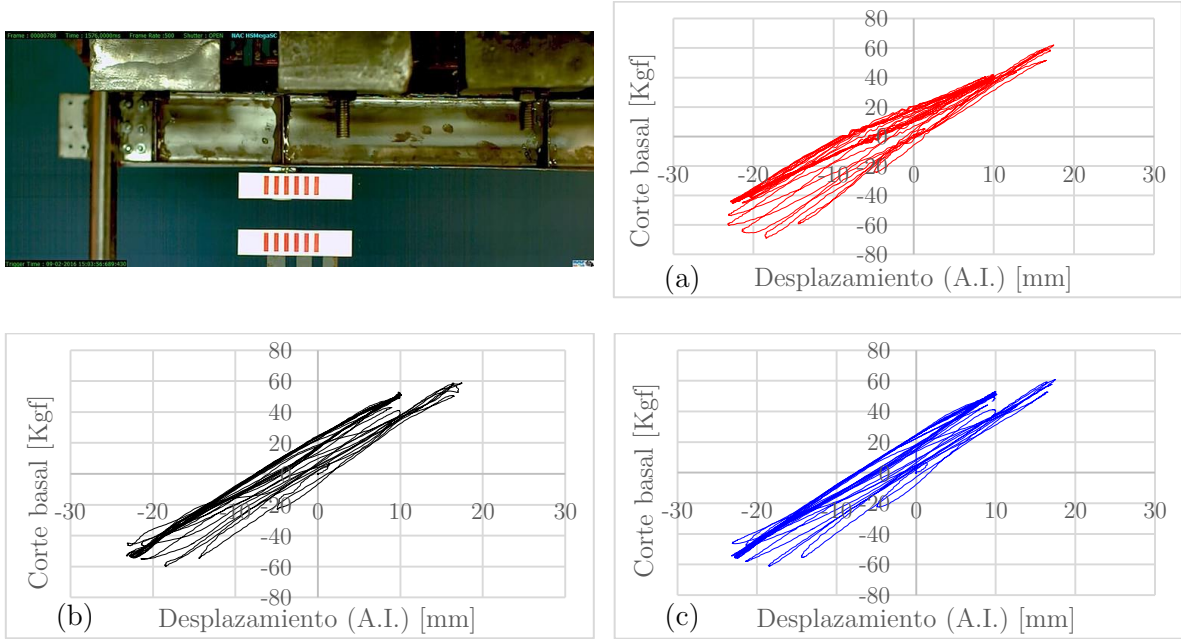


Figura 8-8 – Curva de histéresis marco MET-01 5mm-2Hz. (a) Celdas de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 5 niveles.

8.2.3 Resultado ensayo marco HA-01

8.2.3.1 Serie 2 HA-01: 5mm-4Hz

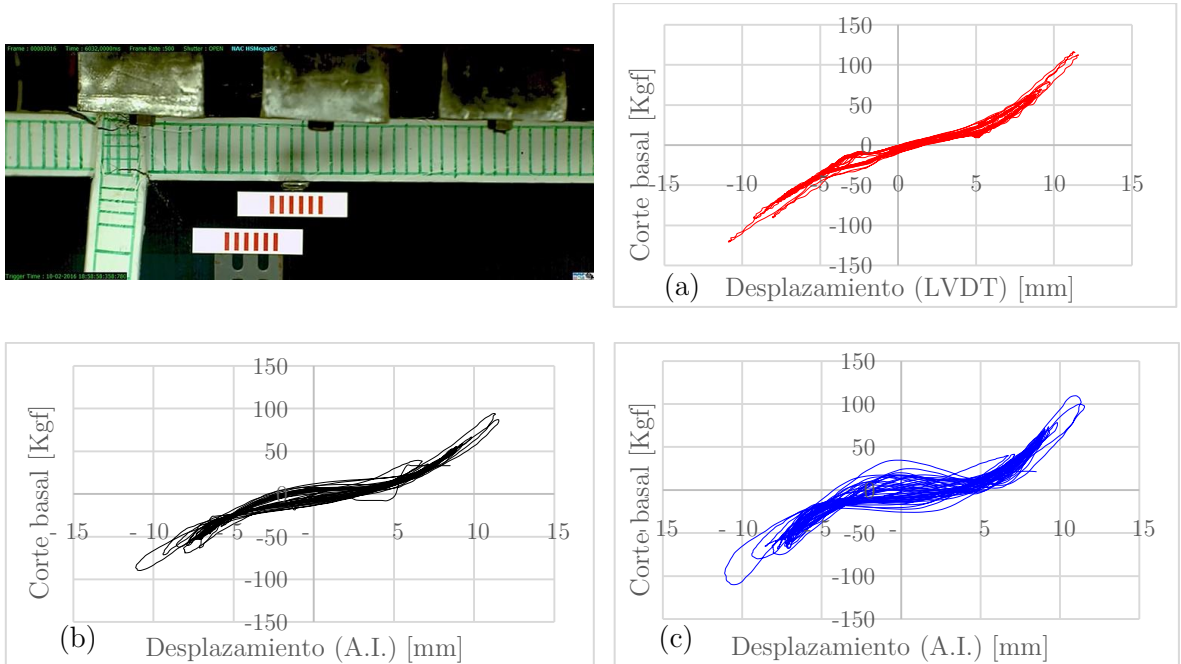


Figura 8-9 – Curva de histéresis marco HA-01 5mm-4Hz. (a) Celdas de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 4 niveles.

8.2.3.2 Serie 3 HA-01: 10mm-2Hz

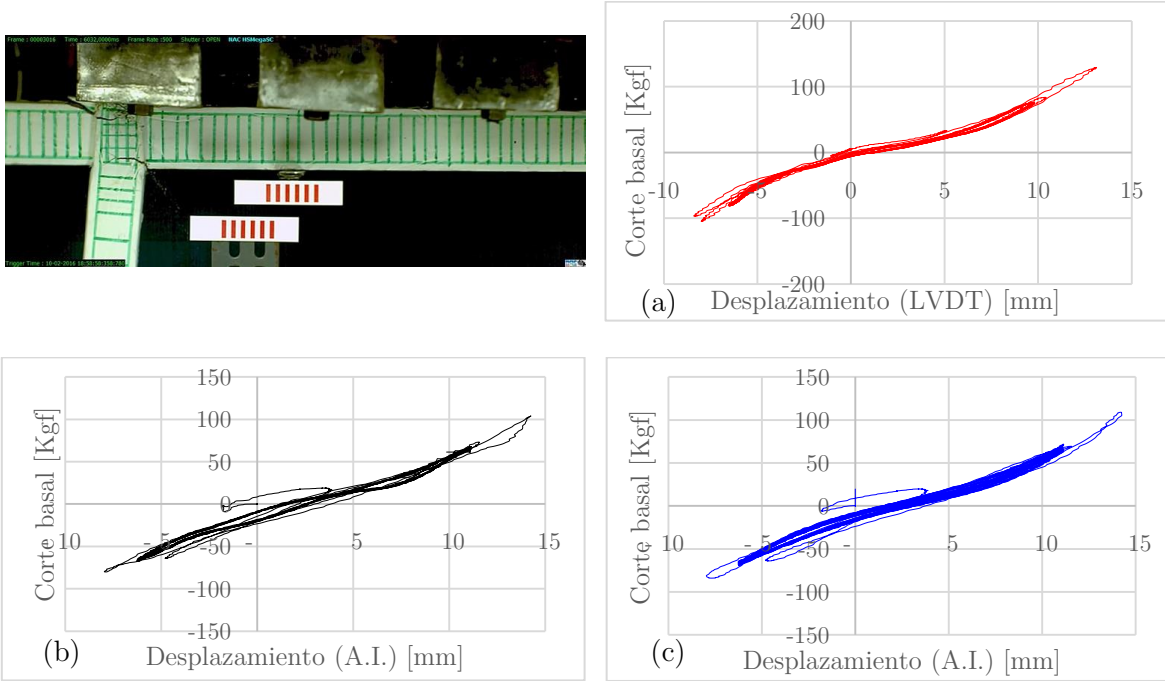


Figura 8-10 – Curva de histéresis marco HA-01 10mm-2Hz. (a) Celdas de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 5 niveles.

8.2.3.3 Serie 4 HA-01: 20mm-2Hz

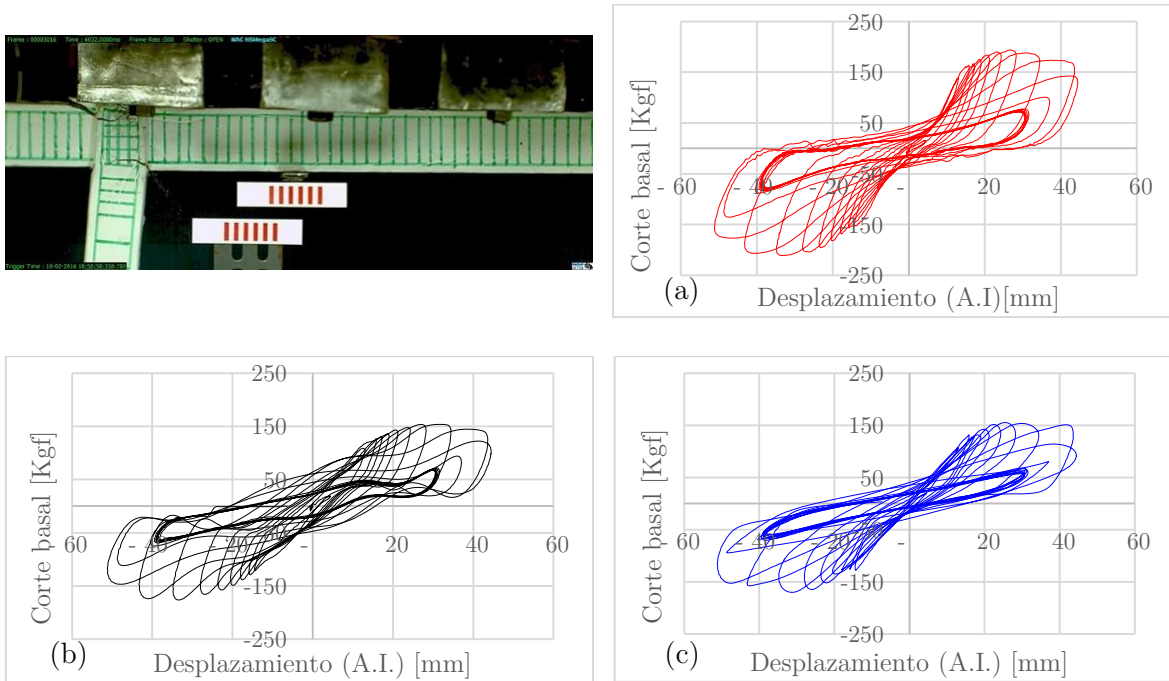


Figura 8-11 – Curva de histéresis marco HA-01 20mm-2Hz. (a) Celda de carga (b) *B-Spline* 660 (c) Wavelet con filtro de 5 niveles.

8.3 Sobre los resultados

Una de las desventajas que presentó el análisis de *Wavelet* para la realización de las curvas de histéresis es que no fue posible determinar un cierto nivel n de filtros para estandarizar el procedimiento. Para algunos casos, a medida que aumentaba la sollicitación, fue necesario pasar de un nivel 4 a un nivel 5, pues no se lograba el objetivo de llegar a la curva teórica (curva de las celdas de carga).

El método de la curva *B-Spline* funcionó mejor, ya que se comprueba que el grado $k = 660$ es el que se acerca más a los resultados obtenidos por las celdas de carga. Esto hace posible que en futuros experimentos se puede aplicar este método y se obtengan curvas que muestren el comportamiento de alguna estructura de forma confiable.

Si bien el análisis de *Wavelet* se aplicó a una señal que venía con cierto grado de *B-Spline*, los resultados no varían significativamente al aplicar este método a la señal sin suavizado previo. Esto se debe a que los pasa bajos del filtro pueden descomponer la señal aunque ésta venga con componentes de alta frecuencia.

Existe una infinidad de funciones madres las cuales se pueden aplicar para la eliminación del *efecto serpenteo*. Cada familia de funciones tiene sus propias variables, como grado y/u orden lo que hace que exista una infinidad de opciones para el suavizado de la respuesta de la estructura. En este capítulo se mostró sólo uno de los resultados posibles, elegido entre los que más se acercaban a la respuesta real de la estructura.

9 Conclusiones

Los dos ejes principales de esta memoria fueron establecer las bases sobre la medición de fuerzas y desplazamientos mediante análisis de imágenes y analizar la importancia del *efecto serpenteo* en los resultados de ensayos dinámicos de marcos a escala reducida. Para esto último fue necesario realizar un estudio sobre los aspectos teóricos de los ensayos dinámicos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente de la UTFSM.

9.1 Sobre análisis de imágenes

El uso de análisis de imágenes para la determinación de fuerzas es algo nuevo que no se aplica en forma sistemática para conocer el comportamiento de las estructuras. Por esto, la primera dificultad de este trabajo fue encontrar fuentes bibliográficas que trataran el problema.

Las correlaciones obtenidas en el capítulo 5, que comparan los desplazamientos obtenidos por los transductores tipo LVDT con los obtenidos por análisis de imágenes, indican que estas mediciones son suficientemente precisas. Por lo mismo se tiene que la aplicación de este método reemplaza los LVDT utilizados en el laboratorio para medir desplazamientos, siempre y cuando sea posible obtener las imágenes adecuadas.

Se demostró que una de las ventajas del análisis de imágenes es la información adicional que se puede adquirir con el registro fílmico, como lo es modo de falla, agrietamiento, vaciamiento, etc.

La medición de fuerzas y desplazamientos con un método de análisis de imágenes tiene diversas aplicaciones, como lo es el análisis del comportamiento dinámico de estructuras a las cuales resultaría muy difícil la instalación de instrumentos. En este trabajo la aplicación se limitó a estructuras simples, sin embargo, el método puede

expandirse a sistemas más complejos combinándolo con algún programa de análisis estructural.

9.2 Sobre efecto serpenteo

Se pudo comprobar que este efecto, que aparece en las curvas de histéresis y proviene de aceleraciones súbitas de la masa, no conlleva esfuerzos adicionales de consideración a nivel basal. Las curvas de corte basal que entregó la medición directa demuestran este hecho, ya que no tienen *serpenteo*. Por lo tanto para obtener curvas de histéresis razonables y realizar análisis correctos es necesario atenuar este efecto mediante alguna herramienta matemática.

En primera instancia se presentó la curva *B-Spline* como método de suavizado donde se mostró su base teórica y luego se aplicó a los distintos ensayos realizados. Se pudo eliminar el *efecto serpenteo* y compararlo con los resultados obtenidos directamente por las celdas de carga.

La ventaja que tiene la aplicación de la curva *B-Spline*, es su carácter local y que ocupa un pequeño conjunto de puntos vecinos para su realización. Esto se hace importante si se quiere implementar un método que obtenga la curva de histéresis a tiempo real, o ligeramente desfasado en el tiempo. Esta característica no la posee el análisis de *Fourier* o *Wavelet*, ya que necesita la totalidad de los datos para su realización. Otra ventaja radica en la estandarización que se logró, ya que en todas las series, de ambos especímenes, se utilizó el mismo el parámetro (grado k) para obtener los resultados más cercanos a los de las celdas de carga. Naturalmente, para estructuras distintas a las que se ensayaron en esta memoria, habría que realizar nuevamente un análisis similar para obtener el grado k correspondiente.

9.3 Para futuros trabajos

Para fines de investigación y docentes se hace preciso obtener resultados a tiempo real o lo más rápido posible. Los procedimientos de análisis de imágenes presentados en esta memoria involucran una gran cantidad de pasos desde que se realiza el ensayo hasta que se obtienen los resultados. Estos son: (1) obtención del video de la cámara,

(2) descarga de archivo, (3) compresión de archivo, (4) seguimiento mediante un programa, (5) derivación numérica y (6) atenuación de *serpenteo* para finalmente obtener las curvas. Para poder obtener los resultados rápidamente sería necesaria la adquisición de nuevo *hardware* y la creación de un *software* especializado.

Por ahora, una forma de acortar los procedimientos mencionados sería realizando directamente el seguimiento de los *targets* al archivo de salida de la cámara de alta velocidad (archivo *.hsf*). El formato de salida de estas cámaras no está normalizado, por lo tanto no será fácil conseguir un programa de seguimiento que resuelva el problema de forma eficaz.

Los métodos de suavizados aplicados en este trabajo consisten en la curva *B-Spline* y, en la última parte, el análisis de *Wavelet*. Hay muchas otras herramientas que se están estudiando en el ámbito del análisis de señales que se pueden emplear a este tipo de problemas. Un acercamiento a resultados más exactos podría estar en el estudio de nuevas *funciones madres* en el análisis de *Wavelet*, aplicación de nuevas *Splines* y en la combinación de distintos métodos.

10 Referencias

- [1] Leon, Robert T. “Considerations for the use of Quasi-Static Testing”.
- [2] Silva, B. (2014).”Vigas de hormigón armado con refuerzo al corte en 45° sometidas a cargas cíclicas”, Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [3] Schnaidt, C. (2005). “Estudio en mesa de simulación de terremotos de dos soluciones para el soporte de una plataforma de hormigón armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Área Estructuras, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [4] Aravena, S. (2010). “Estudio experimental de marcos de hormigón armado con voladizos sometidos a sollicitación sísmica”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [5] Tobar R. (2002). “Modelación a escala reducida de estructuras de hormigón armado sometidas a sismos”, VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmicas, UTFSM, Valparaíso, Chile.
- [6] Miranda, E. (2005) “Diseño y construcción de un transductor de fuerza axial, corte y momento para uso en modelos a escala reducida”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [7] Saragoni, R., Ruiz, S. (2012) “Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010”. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- [8] Araya, R, G.R. Saragoni (1984) “Earthquake accelerogram destructiveness potential factor”. World Conference on Earthquake Engineering. Proceedings of the Eight World Conference on Earthquake Engineering.

- [9] Levi, S. (2014). “Efecto del exceso de resistencia del acero de refuerzo en la respuesta sísmica de marcos de hormigón armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [10] Kenneth Dawson-Howe, “A practical introduction to computer vision with opencv” 1° Edición, Trinity College Dublin, Ireland.
- [11] Timothy Sauer, “Numerical Analysis” 2° Edición, George Mason University.
- [12] Paluszny – Prautzsch –Boehm, “Métodos de Bézier y B-Splines”
- [13] Cordova, V. (2011), “Problemas del exceso de resistencia del acero de refuerzo en el comportamiento de las estructuras de hormigón armado”, Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [14] L. Montejo, L. Suarez (2007) “Aplicaciones de la transformada de ondícula (Wavelet) en Ingeniería Estructural”. Mecánica Computacional, Vol. XXXVI.
- [15] S. Kouro, R. Musalem, “Tutorial Introductorio a la Teoría de Wavelet” www.elo.utfsm.cl/elo377/documentos/Wavelet.pdf.

11 Anexos

Los anexos contenidos en el DVD adjunto son los siguientes:

Anexo A: Ejemplo de *B-Spline*.

Anexo B: Resultados de ensayos anteriores revisitados con el método de análisis de imágenes.

Anexo C: Video de ensayo revisitado M5-A4800 y curva de histéresis.

Anexo D: Video de marco metálico con efecto de serpenteo inducido.

Anexo E: Video de marco HA-01 revisitado y curva de histéresis.