

UN MODELO EN SAP2000 PARA DISIPADORES
SUPERELÁSTICOS SMA-NITINOL. APLICACIÓN A
UN CASO DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN UN
PUENTE.

PROYECTO FIN DE CARRERA

Por

Yaiza Bolívar Muñoz

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Tutor

Alejandro E. Martínez Castro

Departamento de Mecánica de Estructuras ,

Universidad de Granada

Edificio Politécnico Fuentenueva, C/ Severo Ochoa s/n, CP 18002

Granada (España)

June 2013

© Copyright 2013
por
Yaiza Bolívar Muñoz

Resumen

El ingeniero civil es el encargado del diseño de las estructuras civiles. Al realizar una estructura debe verificar posteriormente que la estructura sea capaz de resistir tanto al estado último de cargas como al estado límite de servicio. Si la estructura no es apta para cualquiera de ambos estados, el ingeniero debe introducir una serie de modificaciones en ella. En este caso se pueden seguir tres caminos: i) rigidizar la estructura, ii) amortiguar mediante dispositivos, y iii) modificar la forma en que la carga se transmite a la estructura.

En este proyecto se va a tratar de abarcar el segundo camino: la amortiguación de la estructura. Se consigue con esto una estructura más segura y duradera. Hoy en día existe una amplia gama de elementos amortiguadores, también conocidos como dispositivos de control estructural. Se pueden encontrar desde un simple amortiguador metálico trabajando a fricción hasta otros más complejos que controlan la estructura en el tiempo. La finalidad del presente estudio es presentar un modelo que permita valorar la efectividad de la disipación en el entorno computacional de SAP2000.

El elemento de disipación propuesto está formado por barras de una aleación de Níquel y Titanio denominada comercialmente "nitinol". Esta aleación posee propiedades superelásticas con efecto memoria. Se engloba dentro de las denominadas Shape Memory Alloys, y posee cualidades óptimas para su uso en ingeniería civil. El proyecto comienza describiendo el comportamiento mecánico de dicho material, así como sus propiedades y sus componentes. Posteriormente, se realizará una modelación en SAP2000 del dispositivo y su comprobación. La modelación del dispositivo en SAP2000 es el principal objetivo del presente estudio. Disponer de un modelo de SMA en este programa puede resultar muy útil para futuras investigaciones en estructuras civiles y en edificación. Una vez definido y comprobado el dispositivo de , será situado en los estribos de un puente para cuantificar la modificación en la respuesta estructural que las barras de Nitinol provocan.

Agradecimientos

Son muchos los momentos que me gustaría mencionar en este apartado, y resumirlo me parece un poco difícil pero lo intentaré aunque, me quede algo en el tintero. Sentiros todos los que me rodeáis agradecidos porque formáis parte de mi vida y mi proyecto.

Agradecer en primer lugar a mis padres, mi hermano y mi abuela que siempre han confiado en mí, sobre todo en los momentos más difíciles y han saboreado mis éxitos como yo misma. Este apoyo incondicional y constante me ha servido para saber afrontar los problemas y ser constante para superarlos.

Por otro lado, mi más sincera gratitud a mi tutor Alejandro E. Martínez Castro, por su orientación, compromiso y entusiasmo aportados durante este tiempo, sin él, los objetivos marcados para este trabajo de investigación hubiesen sido difíciles de conseguir. Agradecerle también, su constante disponibilidad en todo momento que lo necesitaba, así como materiales y medios para llevarlo a su fin.

En último lugar, y no por ser menos importante, nunca olvidaré a mis tíos/as y mis amigos, que de manera satisfactoria han contribuido a que estos años de época universitaria queden en mí, guardadas en la “caja” de los momentos inolvidables. Siempre abierta para revivirlos y saber ver el lado bueno de la vida, con sus momentos negativos y positivos, los primeros haciéndote fuerte y los segundos para saborearlos de nuevo.

Dedicado a mi familia.

Índice general

Resumen	III
Agradecimientos	V
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Motivación y problemática existente.	1
1.1.2. Dispositivos de control estructural.	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodología	5
Capítulo 2. Shape Memory Alloys en Ingeniería civil.	7
2.1. Introducción	7
2.2. Efecto de memoria de forma y efecto de memoria elástica.	8
2.3. Transformación martensítica. Perspectiva microscópica.	9
2.4. Fase de transformación y energía de disipación asociada.	10
2.5. Investigaciones de las propiedades amortiguadoras de los SMA.	14
2.6. SMA comercializados para aplicaciones ingenieriles	15
2.7. Aplicaciones de SMA.	17
2.8. Dispositivos de control estructural.	18
2.9. Clasificación y aplicación de SMA en el control estructural	19
2.9.1. Clasificación de los SMA para el control estructural pasivo.	20
2.9.2. Clasificación de los SMA para el control estructural semi-activo.	25
2.9.3. Clasificación de los SMA para el control estructural activo.	25
2.9.4. SMA como dispositivos de rehabilitación de edificios históricos.	27
2.10. Coste.	29
Capítulo 3. Planteamiento del modelo	31
3.1. Introducción	31
3.2. Elementos Link	32
3.3. Modelo del dispositivo de aislamiento en SAP2000	34
3.3.1. Valores numéricos de los link.	35
3.3.2. Rama de carga y descarga. Comportamiento mecánico	38
3.3.3. Implementación del dispositivo a compresión	40

3.3.4.	Implementación del dispositivo completo.	42
3.3.5.	Ciclos de carga-descarga.	43
Capítulo 4.	Verificación del modelo	45
4.1.	Introducción	45
4.2.	Simulación realizada por Davide Fugazza	46
4.3.	Datos de entrada para la realización del ensayo de Fugazza en SAP2000.	48
4.3.1.	Definición de los dispositivos de SMA	48
4.3.2.	Definición del sistema lineal.	53
4.3.3.	Definición de la excitación	54
4.3.4.	Definición del periodo, T.	54
4.4.	Ensayo de Fugazza aplicado al sistema lineal.	55
4.5.	Ensayo de Fugazza aplicado al SMA.	57
4.6.	Resultados del ensayo de Fugazza.	59
Capítulo 5.	Implementación del dispositivo de SMA en los estribos de un puente.	61
5.1.	Introducción.	61
5.2.	Descripción del puente.	61
5.3.	Modelo bidimensional.	63
5.4.	Modelo tridimensional.	65
5.5.	Análisis modal.	67
5.5.1.	Modos de vibración	68
5.6.	Descripción de la acción sísmica.	70
5.6.1.	Espectro de diseño	70
5.6.2.	Acelerogramas usados para el análisis tiempo-historia	71
5.7.	Calibración del dispositivo	72
5.8.	Aplicación de la carga sísmica al puente.	74
5.9.	Aplicación de la carga sísmica al puente con SMA en estribos.	76
5.9.1.	SMA250	76
5.9.2.	SMA500	77
5.10.	Comparación y conclusiones.	78
Capítulo 6.	Conclusiones	85
Apéndice A.	El problema dinámico. Sísmica	87
A.1.	Introducción	87
A.1.1.	El problema dinámico	87
A.1.2.	La acción sísmica	88
A.1.3.	Acelerogramas artificiales compatibles con espectros de respuesta.	90
A.1.4.	Caracterización del terreno	92
A.1.5.	Aceleración sísmica horizontal de cálculo	93

A.2. Espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Componente horizontal . . .	94
A.2.1. Espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Componente vertical.	94
Apéndice B. Cálculos necesarios para la realización del ensayo de Fugazza	95
B.1. Implementación en SAP2000 del SMA 100-400	95
B.2. Implementación en SAP2000 del SMA 100-500	97
B.3. Implementación en SAP2000 del SMA 100-600	100
B.4. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-400	103
B.5. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-500	106
B.6. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-600	108

Índice de cuadros

2.1. Algunas aleaciones que muestran el efecto memoria de forma. Tomada de [28]	17
3.1. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE1.	37
3.2. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE2.	37
4.1. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE2. Tomada de [12]	46
4.2. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.	51
4.3. Valores usados para normalizar el periodo y el desplazamiento.	55
4.4. Valores de periodo y desplazamiento asociado en el sistema lineal	56
4.5. SMA 100-300	57
5.1. Datos para la definición del espectro de respuesta	70
B.1. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.	96
B.2. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.	99
B.3. Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.	102
B.4. SMA 100-400	103
B.5. SMA 100-500	106
B.6. SMA 100-600	108

Índice de figuras

2.1. Efecto memoria de forma elástica. Superelasticidad. A temperatura alta constante, el material tiene la capacidad de experimentar grandes deformaciones pero es capaz de recuperar su forma original. Tomada de [12].	8
2.2. Efecto memoria de forma. Al final del ciclo de carga-descarga (ABC), realizado a temperatura constante, el material presenta una deformación residual (AC), la cual puede ser recuperada mediante el ciclo térmico (CDA). Tomada de [12].	9
2.3. Transformación difusiva: mezcla de átomos, no hay correspondencia entre estado inicial y final. Transformación martensítica: existe correspondencia entre los átomos del estado inicial y final del proceso. Tomada de [3].	11
2.4. Transformación de Austenita a Martensita. Tomada de [3].	11
2.5. Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [35].	12
2.6. Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [17].	13
2.7. Tensión-Deformación a temperatura baja constante. Tomada de [35].	14
2.8. Relación tensión-deformación de SMA en fase martensita ($T < M_f$). Tomada de [35].	14
2.9. Representación de un sistema de control pasivo (a), activo (b) y semiactivo (c). Tomada de [32].	19
2.10. Modelo de aislamiento con SMA para puentes elevados de carretera. Tomada de [43].	21
2.11. Modelo de aislamiento con SMA para edificios. Tomada de [10].	22
2.12. Modelo de aislamiento con muelles de SMA. Tomada de [20].	23
2.13. Modelo de aislamiento con barras de SMA. Tomada de [7].	23
2.14. Modelo de aislamiento para un puente colgante. Tomada de [21].	24
2.15. Modelo de aislamiento para un puente simplemente apoyado. Tomada de [8].	24
2.16. Modelo de aislamiento para un puente simplemente apoyado. Tomada de [29]	25
2.17. Esquema del sistema dinámico usado. Tomada de [27]	26
2.18. Estructura y tirantes de SMA. Tomada de [33]	26
2.19. Basílica de San Francesco in Assisi. Tomada de internet	27
2.20. SMA usado en la rehabilitación de la Basílica de San Francesco in Assisi. Tomada de [12].	28
2.21. SMA usado en la rehabilitación de la Iglesia de San Giorgio. Tomada de [12].	28

2.22. Iglesia de San Giorgio, disposición de los cables de acero y SMA. Tomada de [12].	29
3.1. Configuración de Link propuesta por D.Cardone [8].	32
3.2. Configuración de Link propuesta en [14].	32
3.3. Link tipo Hook.	33
3.4. Link tipo Gap.	33
3.5. Link tipo Lin.	34
3.6. Configuración del dispositivo.	35
3.7. Comportamiento mecánico de un SMA. Tomada de [29].	36
3.8. Link tipo Hook.	36
3.9. Link tipo multilínea elástico.	37
3.10. Link tipo multilínea elástico.	37
3.11. Link tipo multilínea plástico.	38
3.12. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	39
3.13. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	39
3.14. Valores numéricos implementados en SAP2000 de los link	41
3.15. Rama de carga y descarga a compresión	42
3.16. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del dispositivo completo	43
3.17. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	44
4.1. Gráfica de Tensión-Deformación de SMA con incremento de la capacidad de disipación, propuesto por Fugazza en [12]	46
4.2. Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado. Tomada de [12].	47
4.3. Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento	49
4.4. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-300	51
4.5. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	52
4.6. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	52
4.7. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento	53
4.8. Sistema lineal. Masa-muelle	53
4.9. Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado.	56
4.10. Gráfica de desplazamiento-tiempo.	58
4.11. Gráfica de desplazamiento-Fuerza.	58
4.12. Gráfica de velocidad-desplazamiento	59
4.13. Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado.	60
5.1. Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].	62
5.2. Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].	62
5.3. Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].	62
5.4. Configuración del puente en 2D.	64
5.5. Mallado de la losa superior del puente. Cargas muertas.	65
5.6. Sección transversal en pilas y estribos.	66

5.7. Sección transversal en el centro de los vanos.	66
5.8. Vista del modelo de puente generado en SAP2000.	66
5.9. Vista del modelo de puente generado en SAP2000.	67
5.10. Primer modo de vibración, modo rotacional de vibración.	68
5.11. Segundo modo de vibración, modo transversal de vibración.	69
5.12. Tercer modo de vibración, modo longitudinal de vibración.	69
5.13. Cuarto modo de vibración, modo vertical de vibración.	70
5.14. Espectro de respuesta.	71
5.15. Registro sísmico El Centro.	72
5.16. Acelerograma compatible con espectro de respuesta.	73
5.17. SMA250.	74
5.18. SMA500.	74
5.19. Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta, sismo frecuente.	75
5.20. Desplazamientos bajo El Centro, sismo básico.	76
5.21. Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta en el modelo del puente con SMA250 implementado.	77
5.22. Desplazamientos bajo El Centro en el modelo del puente con SMA250.	78
5.23. Ciclos del SMA 250 cuando este está sometido al acelerograma compatible con espectro de respuesta.	79
5.24. Ciclos del SMA 250 cuando este está sometido a la excitación sísmica de El Centro.	80
5.25. Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta en el modelo del puente con SMA500 implementado.	80
5.26. Desplazamientos bajo El Centro en el modelo del puente con SMA500.	81
5.27. Ciclos del SMA 500 cuando este está sometido al acelerograma compatible con espectro de respuesta.	81
5.28. Ciclos del SMA 500 cuando este está sometido a la excitación sísmica de El Centro.	82
5.29. Desplazamientos bajo la excitación del acelerograma compatible con espectro de respuesta	82
5.30. Desplazamientos bajo la excitación del acelerograma compatible con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA500	83
5.31. Desplazamientos bajo la excitación de El Centro con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA250	83
5.32. Desplazamientos bajo la excitación de El Centro con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA500	84
A.1. Función intensidad. Tomada de [26]	92
B.1. Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].	95
B.2. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-400	97

B.3. Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].	97
B.4. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-500	100
B.5. Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].	100
B.6. Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-600	103
B.7. Gráfica de desplazamiento-tiempo.	104
B.8. Gráfica de desplazamiento-Fuerza.	104
B.9. Gráfica de velocidad-desplazamiento	105
B.10. Gráfica de desplazamiento-tiempo.	106
B.11. Gráfica de desplazamiento-Fuerza.	107
B.12. Gráfica de velocidad-desplazamiento	107
B.13. Gráfica de desplazamiento-tiempo.	108
B.14. Gráfica de desplazamiento-Fuerza.	109
B.15. Gráfica de velocidad-desplazamiento	109

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Introducción

1.1.1. Motivación y problemática existente.

El principal objetivo del análisis estructural es conocer el comportamiento de la estructura bajo diferentes cargas y obtener la información necesaria para su diseño. El análisis estructural puede ser clasificado de dos formas: análisis estático y análisis dinámico. El *análisis estático* es independiente del tiempo, mientras que el *análisis dinámico* considera las cargas dinámicas, que son aquellas en las que magnitud, dirección y posición varían en el tiempo. Las cargas dinámicas típicas en un puente pueden ser el viento, los vehículos en movimiento o el sismo.

La acción sísmica puede causar graves consecuencias en un puente. La peor de ellas sería el colapso de la estructura mientras los vehículos están circulando, ya que se producirían pérdidas de vidas humanas. También existen daños menos severos, pero no por ello menos importantes. El cierre del puente, incluso temporalmente, puede causar un tremendo impacto en la circulación, ya que el puente es un elemento de enlace.

Debido a los daños que la acción sísmica puede ocasionar en una estructura, esta debe ser tenida en cuenta, y debe realizarse un diseño efectivo de la estructura frente a acción sísmica. Para el estudio de la acción sísmica se debe tener en cuenta dos clases de sismos: el sismo último, que es aquel sismo de baja probabilidad de ocurrencia, que corresponde a un periodo de retorno de 500 años, y el sismo frecuente que es aquél sismo de alta probabilidad de ocurrencia, que corresponde a un periodo de retorno de 100 años. [11].

Teniendo en cuenta la definición de sismo último y sismo frecuente, el diseño de una estructura debe cumplir las siguientes condiciones:

- La estructura debe ser capaz de no colapsar frente al sismo último de cálculo, es decir, después de que ocurra un evento sísmico de estas características, el puente mantendrá

su configuración y una capacidad resistente residual suficiente para permitir el tráfico de emergencia, aunque los daños producidos podrán ser importantes en determinadas partes de la estructura.

- Durante la acción sísmica denominada sismo frecuente de cálculo, la estructura podrá tener daños menores y no será necesario acometer reparaciones inmediatas no restringir el tráfico sobre el puente.

En el cálculo de una estructura frente a la acción sísmica, se pueden seguir varios caminos, cada uno de ellos está relacionado con la forma de cómo se caracterice dicha acción. Las tres formas de caracterizar la acción sísmica son: mediante acelerogramas, mediante espectros elásticos de respuesta o mediante espectros de input de energía. La normativa sísmica española sugiere realizar el cálculo mediante espectros elásticos de respuesta, sin embargo, la forma más correcta de evaluar una estructura sometida a sismo es mediante acelerogramas, ya que de esta manera se realiza un análisis dinámico, es decir, se estudia la respuesta de la estructura en el tiempo. De esta forma se puede conocer la respuesta real, y dado que hoy en día, las bases de datos de registros sísmicos son cada vez más completas, esta opción es la más acertada; incluso si no se disponen de suficientes datos es posible generar acelerogramas compatibles. En el apéndice A se puede consultar la caracterización de la acción sísmica.

Controlar la respuesta estructural ante cargas dinámicas es y ha sido una necesidad para la seguridad de los usuarios de las estructuras. Frente a este problema, la primera opción sería rigidizar la estructura, sin embargo hoy en día el ingeniero trata de minimizar la masa estructural por razones económicas, con lo que la opción de rigidizar no es viable. Es, llegados a este punto cuando surge el concepto de control estructural. Los ingenieros civiles dedicados a la investigación están en la búsqueda constante de nuevos materiales y tecnologías que ayuden a controlar la estructura.

Actualmente y después de numerosos avances en investigación, existen diferentes alternativas para disminuir la vulnerabilidad estructural con el uso de dispositivos de control estructural, pero desafortunadamente son poco utilizadas en nuestro país debido al desconocimiento que se tiene sobre la técnica o por el alto coste que genera su implementación. Una de estas alternativas es el uso de materiales inteligentes, debido a que sus propiedades los hacen muy interesantes de cara a ser usados en el control estructural. En concreto, un tipo de material inteligente son las aleaciones con memoria de forma "SMA: Shape Memory alloys". Este material tiene unas propiedades peculiares que los hacen aptos para ser usados en el control estructural.

El SMA es una aleación metálica no lineal que tiene la habilidad de experimentar una gran deformación y posteriormente, mediante calor, recuperar su forma, por el denominado

efecto de “memoria de forma” (Shape-memory effect SME). También es capaz de recuperar una gran deformación durante los ciclos de carga-descarga a una temperatura constante, lo que es llamado efecto memoria de forma elástica (Superelasticidad). Ambas propiedades hacen al SMA un material muy apropiado para ser usado como un dispositivo de control estructural.

La motivación del presente documento recae principalmente en el estudio de un dispositivo de control estructural basado en aleaciones con memoria de forma (SMA). Se va a estudiar una estructura sometida a acción sísmica con dicho dispositivo. Para la realización del estudio se va a usar el software SAP2000 ya que este programa es una de las herramientas más empleadas en la evaluación de efectos dinámicos en proyecto de puentes, tanto para análisis lineal como no lineal. Se va a tratar de implementar las propiedades mecánicas del material SMA en SAP2000, lo cual incrementa la motivación del estudio, ya que disponer de este dispositivo en SAP2000 puede suponer un ahorro de tiempo importante en futuras investigaciones, y no sólo eso, sino que cualquier ingeniero civil resulta una herramienta muy útil, para poder calcular su estructura con dicho dispositivo y verificar cómo de favorable le es.

En este proyecto se plantea un modelo de SMA que permita analizar en SAP 2000 la modificación en la respuesta ocasionada por el dispositivo. Existen algunos estudios en los que se trata de implementar dicho dispositivo en SAP2000, por ejemplo [8], sin embargo los modelos que aparecen no son tan claros como para poder reproducirlos.

1.1.2. Dispositivos de control estructural.

Como ya se ha mencionado anteriormente, las cargas dinámicas y las vibraciones en las estructuras pueden ser controladas mediante el uso de dispositivos de control activo, semiactivo y pasivo. [32], [15], lo cual resulta muy útil para el control de la acción sísmica:

- **Sistemas de control pasivo.**

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos que reducen la respuesta dinámica por medios totalmente mecánicos. Los sistemas pasivos más comunes son los aisladores sísmicos, los disipadores de energía y los osciladores resonantes o también conocidos como sistemas inerciales acoplados.

- **Sistemas de control activo.**

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Las fuerzas de control son aplicadas mediante actuadores integrados a un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real.

- **Sistemas de control semiactivo.**

Los sistemas de control semiactivos no aplican fuerzas en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural. Tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de éstos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos.

Si tenemos en cuenta la clasificación anterior, el SMA también puede ser clasificado de igual modo, dado que, dicho material puede ser usado como dispositivo de control estructural pasivo, activo o semiactivo. Ésto ofrece una gran amplitud de líneas de investigación en ingeniería civil, de hecho muchas de ellas han sido, y están siendo llevadas a cabo, como se verá en el siguiente capítulo.

Las propiedades del SMA que lo hacen apto para su uso como dispositivo de control estructural son: [9].

- Capacidad de disipación de energía, reduciendo las aceleraciones y desplazamientos causados por la acción sísmica.
- El dispositivo tiene la capacidad de volver a su posición inicial una vez cesa el sismo, por lo tanto, no se requiere de recentrado de la estructura.
- Control de la fuerza en el dispositivo, por lo tanto, control de la fuerza que se transmite a la estructura.
- La rigidez inicial es elevada lo que limita el desplazamiento bajo sismos moderados.

Existen varias aleaciones que pueden ser consideradas como aleaciones de memoria de forma, sin embargo, la aleación de memoria de forma que tiene las mejores propiedades es el Nitinol. La aleación compuesta por Nitinol es la única que mantiene la propiedad de superelasticidad en el rango de temperaturas del campo de la ingeniería civil (la propiedad de superelasticidad es altamente sensible a la temperatura). Debido a las excelentes propiedades de SMA de Nitinol, es la aleación que se ha elegido para el modelo del dispositivo en este proyecto.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este proyecto son:

1. Diseño en SAP2000 de un elemento barra de Nitinol. Para ello se hará uso de los elementos link que SAP2000 tiene implementados. El objetivo será buscar la configuración de dichos link de forma que el resultado final se comporte de igual forma que el SMA.
2. Verificación del modelo. Para ello se va a hacer uso de los ensayos realizados por Davide Fugazza en su tesis [12]. Se plantearán los mismos ensayos en SAP2000 y se deberán obtener los mismos resultados que los obtenidos numéricamente por D.Fugazza.
3. Estudio dinámico de un puente simplemente apoyado, de tres vanos (23m-35m-23m) de 8 metros de altura de pilas. Se obtendrán los modos de vibración y la respuesta del puente bajo acción sísmica, para ello se generarán (en el programa SAP2000) dos modelos del puente; uno bidimensional y otro tridimensional.
4. Diseño del dispositivo apropiado para el puente propuesto, para su posterior implementación en los estribos del mismo.
5. Comparación de los resultados obtenidos en el puente con y sin dispositivo, evaluando así, la eficacia del dispositivo de aislamiento propuesto.

1.3. Metodología

La metodología será la siguiente:

1. Realización de una revisión del estado del arte de SMA. Dentro de las aleaciones, la revisión se centrará en las aplicaciones de Nitinol.
2. Revisión de modelos SMA para SAP2000.
3. Desarrollo del modelo del SMA en SAP2000 y posterior comprobación el diseño del mismo.
4. Generación de acelerogramas compatibles con espectro de respuesta con el programa Aceleros, cuyo objetivo es someter el puente a un acelerograma lo más realista posible.
5. Realización de los modelos bidimensional y tridimensional del puente en SAP 2000. Se realizará el análisis modal y el análisis sísmico tanto por espectro de respuesta, como un análisis tiempo-historia con acelerogramas.
6. Implementación del dispositivo de SMA en los estribos del puente para posteriormente realizar un análisis de la eficacia del mismo.
7. Obtención de las conclusiones del estudio realizado y propuesta de nuevas líneas de investigación.

CAPÍTULO 2

Shape Memory Alloys en Ingeniería civil.

2.1. Introducción

Los materiales inteligentes utilizados en ingeniería civil son aquellos que pueden ajustar automáticamente sus características en respuesta a perturbaciones externas. Los investigadores que actualmente están dedicados al estudio de dichos materiales, tienen como principal objetivo el desarrollo de los mismos para poder usar sus propiedades y ser integrados en las estructuras.

Un tipo de material inteligente es la aleación con memoria de forma (Shape Memory Alloys, SMA). El SMA es una aleación metálica no lineal que tiene la habilidad de experimentar una gran deformación y posteriormente, mediante calor, recuperar su forma, por el denominado efecto de “memoria de forma” (Shape-memory effect SME), y también es capaz de recuperar una gran deformación durante los ciclos de carga-descarga a una temperatura constante, efecto memoria de forma elástica (Superelasticidad). Ambos efectos se deben a un cambio de fase denominado transformación martensítica termoelástica.

SMA es un material con un gran potencial para la ingeniería civil, aunque ya está siendo utilizado en diversos campos de la ciencia, como el de la medicina o en la aeronáutica. Los esfuerzos de investigación en el campo de la ingeniería civil están siendo dirigidos al uso de SMAs para el control estructural, particularmente para el control estructural en el campo de la ingeniería sísmica, gracias a la gran capacidad de dicho material para someterse a altas deformaciones y posteriormente volver a su forma original. En posteriores apartados de este capítulo se expondrán los principios microscópicos y macroscópicos de la martensita, ya que esta es la base para la comprensión de las aleaciones con memoria de forma, seguidamente se analizarán dichos materiales bajo el punto de vista de la ingeniería civil, presentando sus principales usos en dicho campo.

2.2. Efecto de memoria de forma y efecto de memoria elástica.

Las aleaciones de memoria de forma (SMA) de Nitinol tienen dos propiedades únicas de dichas aleaciones: [35]

- Efecto memoria de forma elástica (Superelasticidad): son capaces de recuperar una gran deformación durante los ciclos de carga-descarga a una temperatura constante. Figura 2.1
- Efecto de memoria de forma (Shape-memory effect SME): habilidad de experimentar una gran deformación y posteriormente, mediante calor, recuperar su forma. Figura 2.2

Existen dos fases en los SMA: fase martensita y fase austenita. En la fase martensita la aleación es estable a bajas temperaturas y altas tensiones mientras que, en la fase austenita es estable a altas temperaturas y altas tensiones. Durante la fase austenita, el material es estable antes de la aplicación de la tensión σ . Durante la carga, la tensión inducida en la fase martensita se traduce en un incremento de deformación ϵ . A raíz de la fase martensita, el SMA comienza a experimentar un agudo incremento de rigidez, lo cual provoca un mecanismo de deformación típico de los SMA denominado *detwining*. Durante la descarga el material vuelve a la fase austenita a bajas tensiones, experimentando un comportamiento de superelasticidad.

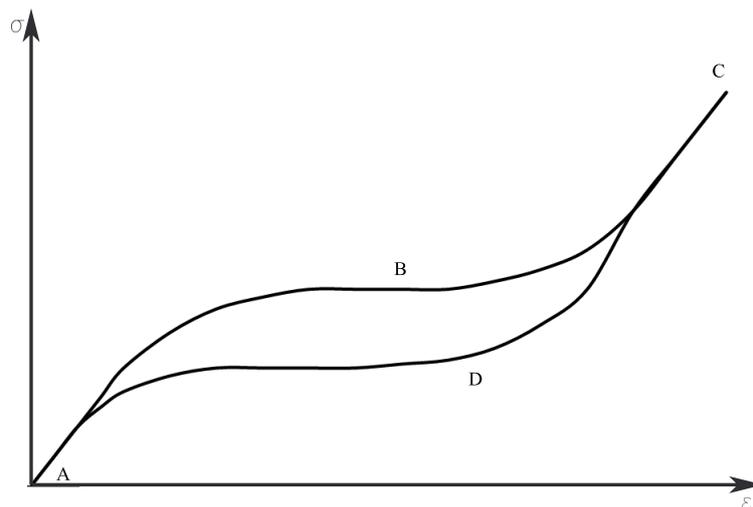


Figura 2.1: Efecto memoria de forma elástica. Superelasticidad. A temperatura alta constante, el material tiene la capacidad de experimentar grandes deformaciones pero es capaz de recuperar su forma original. Tomada de [12].

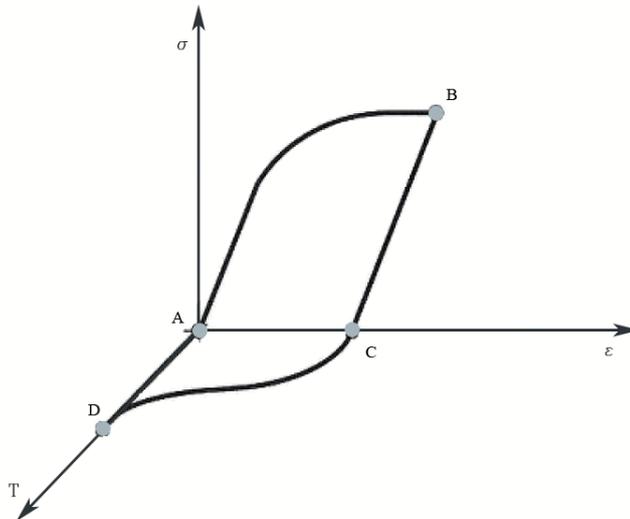


Figura 2.2: Efecto memoria de forma. Al final del ciclo de carga-descarga (ABC), realizado a temperatura constante, el material presenta una deformación residual (AC), la cual puede ser recuperada mediante el ciclo térmico (CDA). Tomada de [12].

La **superelasticidad** es una de las propiedades más atractivas de los SMA, sin embargo, para el uso de esta propiedad se debe ser extremadamente cuidadoso, [9]. Algunos aspectos en los que se debe tener cuidado son:

- El comportamiento mecánico del SMA tiene una gran dependencia de la composición de la aleación y del tratamiento termomecánico. [37], [24].
- La superelasticidad es altamente sensible a la temperatura. Todos los SMA poseen la propiedad de superelasticidad pero en un determinado rango de temperaturas. La única aleación que tiene la propiedad de superelasticidad en el rango de temperaturas de la ingeniería civil es la aleación compuesta de Nitinol. Por este motivo es la usada en este proyecto. [41], [42].
- Aunque la superelasticidad es un fenómeno isotérmico, esto no sucede así en los SMA debido al calor latente de transformación que se genera en el material. Cuando la deformación aumenta, el calentamiento llega a ser significativo, provocando un incremento de la temperatura. [34], [38].
- El comportamiento mecánico del SMA cambia cuando este está sometido a ciclos de deformación. [25], [36].

2.3. Transformación martensítica. Perspectiva microscópica.

Las transformaciones de estado de los sólidos son de dos tipos: de difusión y de desplazamiento:

- **Las transformaciones por difusión** son aquéllas en las que sólo se puede formar una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes. Se requiere un amplio rango de difusión porque la nueva fase es de diferente composición química que la matriz de la cual se forma. Dado que se requiere una migración atómica, la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura. Figura 2.3.
- **Las transformaciones por desplazamiento** no requieren un amplio rango de movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesaria una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la interfase entre las dos fases es tremendamente rápido, estando limitado sólo por la velocidad del sonido. Se suelen llamar transformaciones atérmicas, dado que la cantidad de nueva fase creada depende sólo de la temperatura y no de la cantidad de tiempo a esa temperatura.

Las transformaciones martensíticas son generalmente de este segundo tipo, y se forman enfriando desde una fase a alta temperatura llamada fase madre o austenita. Los términos de martensita y austenita originalmente se referían sólo a fase de aceros, sin embargo se ha extendido el término refiriéndose no sólo al material sino al tipo de transformación. Estas transformaciones se denominan de primer orden, en el sentido de que se libera calor en su formación, hay una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperatura en que coexisten austenita y martensita.

El material va adquiriendo la configuración de martensita conforme se va disminuyendo la temperatura. En la figura 2.4 se esquematiza la estructura austenita en el diagrama (a), y la progresión hacia una estructura totalmente martensita se reproduce de (b) a (d). A medida que la interfase avanza, cada capa de átomos se desplaza tan solo una pequeña distancia. Como resultado final de esos pequeños movimientos coordinados se obtiene la nueva estructura martensítica. La segunda parte de la transformación martensítica, cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma, y frecuentemente volumen, que la austenita circundante. La martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras que las aleaciones con memoria de forma básicamente tienen sólo cambio de forma.

2.4. Fase de transformación y energía de disipación asociada.

La composición de SMA depende del nivel de energía interna. Dada una temperatura, se requiere de una estructura cristalina para acomodarse al estado de mínima energía. Si se

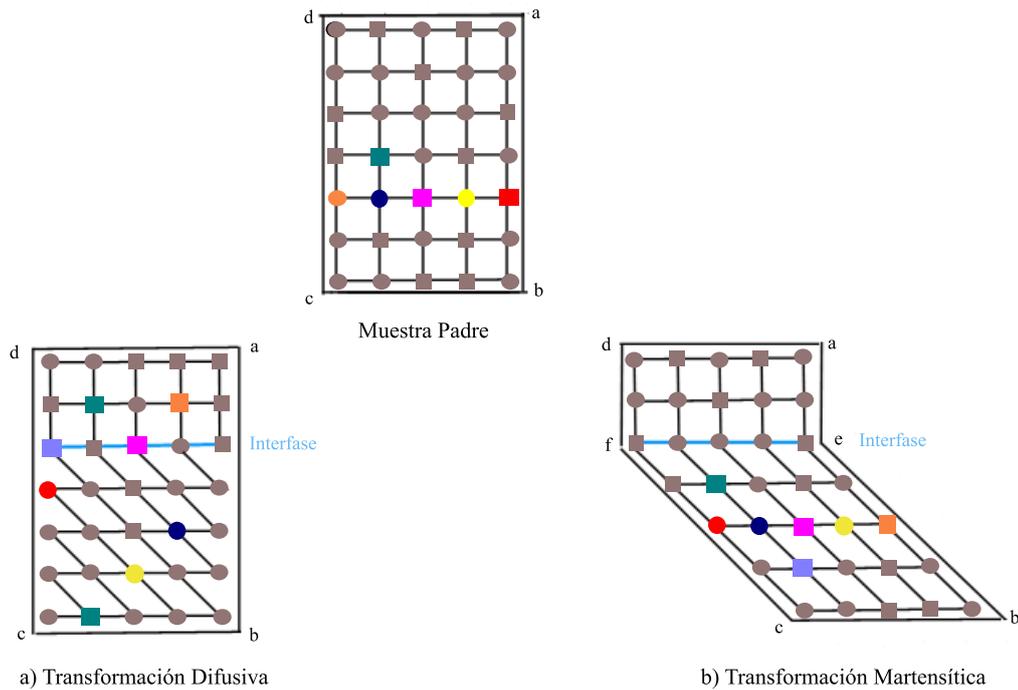


Figura 2.3: Transformación difusiva: mezcla de átomos, no hay correspondencia entre estado inicial y final. Transformación martensítica: existe correspondencia entre los átomos del estado inicial y final del proceso. Tomada de [3].

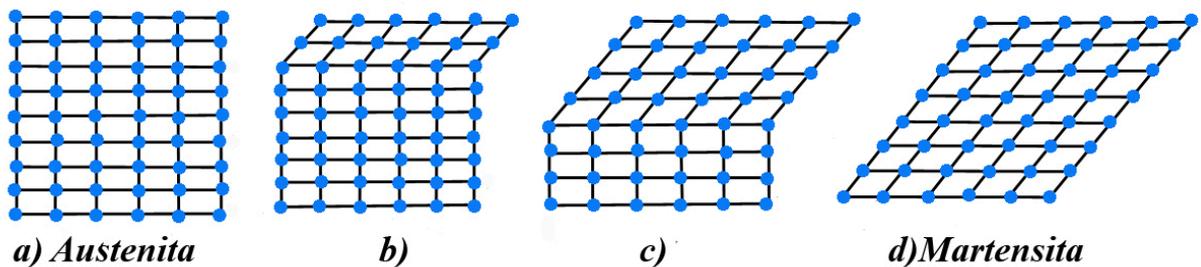


Figura 2.4: Transformación de Austenita a Martensita. Tomada de [3].

somete a una fuerza externa, las dos fases cristalinas pueden ser transformadas: la transformación martensítica y su transformación inversa. Desde un punto de vista termomecánico, la temperatura y tensión externa juegan un papel importante en el mecanismo de transformación. Por lo tanto, hay dos tipos de transformaciones martensíticas: la transformación inducida por la temperatura que provoca el SME y la transformación inducida por la tensión que se traduce en la superelasticidad. La figura 2.5 muestra una gráfica típica de temperatura inducida a tensión libre durante la transformación martensítica y su transformación inversa bajo un ciclo de excitación de temperatura. Cuatro temperaturas de transición caracterizan el ciclo de transformación: temperatura de inicio de martensita (M_s), temperatura final de

martensita (M_f), temperatura de inicio de austenita (A_s) y temperatura final de austenita (A_f). Estas temperaturas críticas identifican el comienzo y el final de cada fase.

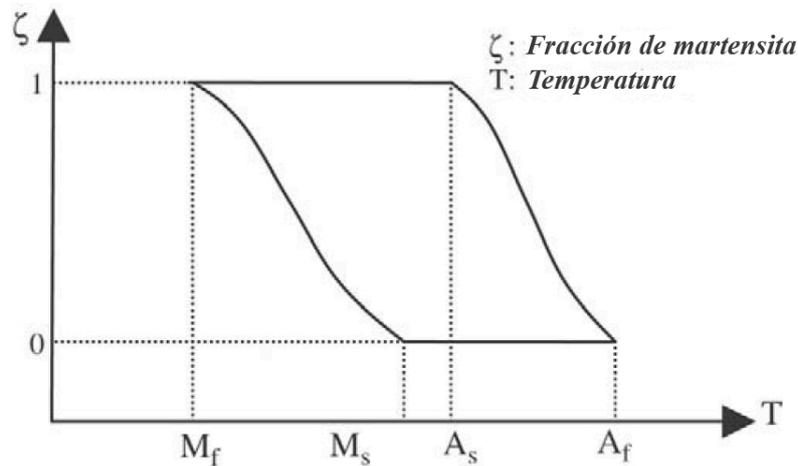


Figura 2.5: Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [35].

En ausencia de calentamiento o enfriamiento, el SMA está a temperatura ambiente. Esta temperatura define el estado de fase en el cual el SMA es estable sin cambios de fase dependientes de la temperatura. Para aplicaciones en el exterior se puede asumir un rango de temperaturas de -20, en invierno extremo, y 60 bajo radiación solar extrema, en verano. Teniendo en cuenta dicho rango de temperaturas en la figura 2.6 se puede observar el comportamiento típico del material. Las variables usadas en dicha gráfica son las mismas que las definidas en la gráfica anterior.

En la figura 2.7 Se muestra la gráfica típica de tensión-deformación de un SMA a temperatura baja constante ($T < M_f$). Cuando el SMA, en fase martensita, está sujeto a tensión, (y una vez se supera la deformación elástica), se produce un aumento de la deformación a una tensión casi constante. Tras la descarga, sólo se recupera la deformación elástica. La deformación residual inducida por la reorientación martensita sólo pueden ser recuperados por la transformación de fase inversa por calentamiento (SME). Si la deformación excede el máximo valor que la martensita puede mantener a través de la martensita mecanismo de reorientación, la deformación plástica permanente se lleva a cabo. Por lo tanto, para el uso práctico, la tensión aplicada debería no exceder este valor máximo para evitar una deformación plástica permanente. La curva de la figura 2.8 exhibe el fenómeno de histéresis, es decir, la energía liberada durante la descarga es significativamente menor que la energía de entrada durante la carga. El área encerrada por la curva de histéresis es proporcional a la disipación de energía y por lo tanto a la capacidad de amortiguación.[35]

Se muestra en la figura 2.8 los ciclos de tensión-deformación de un SMA superelástico, es decir cuando ha experimentado una transformación inducida por la tensión al SMA a

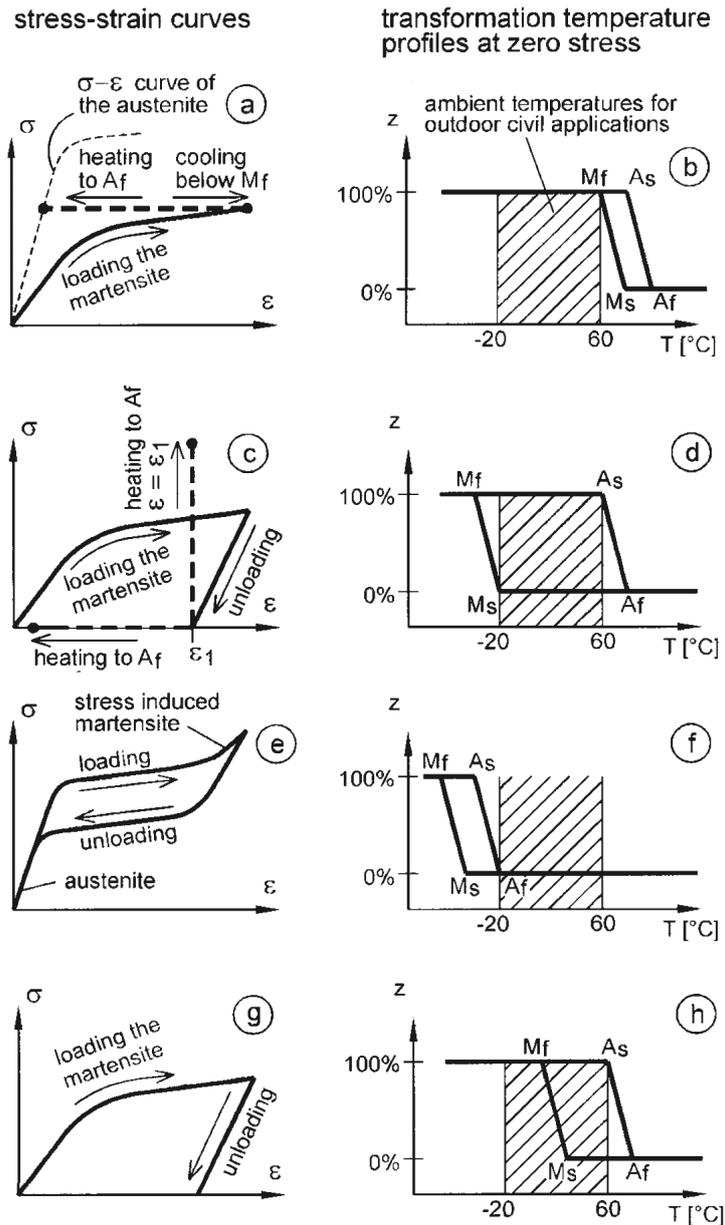


Figura 2.6: Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [17].

temperatura constante ($>A_f$). Los cuatro segmentos del ciclo de tensión-deformación (segmentos 1, 2, 3 y 4 se muestran en la figura 2.7) corresponden a las composiciones de fase diferentes del SMA. Antes de que la tensión alcance un valor crítico σ_{ms} , el SMA se comporta elásticamente (correspondiente al Segmento 1). En el segmento 2, cuando la tensión se incrementa, la transformación de la martensita se lleva a cabo y los resultados se convierten en una gran deformación con un pequeño aumento de la tensión. De esta forma podemos ver que existen cuatro valores característicos de la tensión que indican el comienzo y final de la transformación. Los avances en investigación han llegado a la conclusión de que las tensiones críticas dependen de la temperatura, y la temperatura en el proceso de

descarga determina la deformación residual. Debido a la histéresis de tensión-deformación, que se identifica con la diferencia de la tensión de la carga y descarga, **el área encerrada por el ciclo representa la energía disipada a través del ciclo de carga-descarga.**

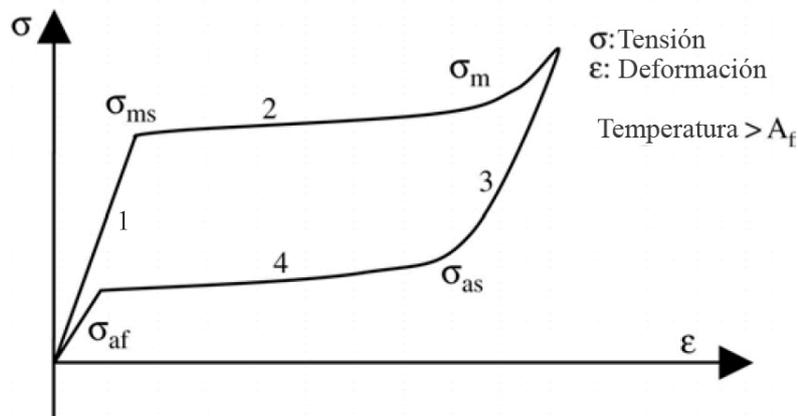


Figura 2.7: Tensión-Deformación a temperatura baja constante. Tomada de [35].

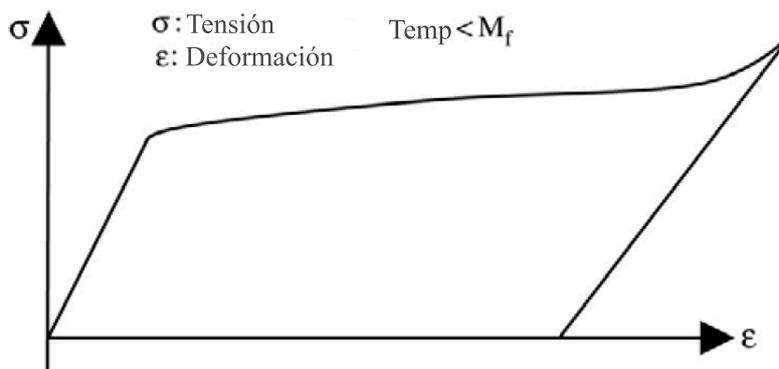


Figura 2.8: Relación tensión-deformación de SMA en fase martensita ($T < M_f$). Tomada de [35].

2.5. Investigaciones de las propiedades amortiguadoras de los SMA.

La capacidad de amortiguación es considerada como una propiedad del material importante y útil, ya que es una propiedad determinante para el control estructural. El uso de SMA para el control estructural se basa en la capacidad de dicho material para disipar energía cuando la estructura está sometida a cargas dinámicas, el SMA tiene capacidad amortiguadora gracias a sus dos propiedades fundamentales, el SME y la superelasticidad. El movimiento de las partículas al pasar de austenita a martensita, también contribuye considerablemente al aumento de la capacidad amortiguadora.

Dolce y Cardone [9] investigaron los SMA de Nitinol sujetos a tensión de carga donde la conclusión más relevante fue la dependencia de la capacidad de amortiguación con la temperatura, la frecuencia de carga y el número de ciclos de carga. Concluyeron también que el comportamiento mecánico de los alambres es útil para la aplicación sísmica. Piedboeuf y Gauvin aportaron al estudio la influencia del ambiente de temperatura en la capacidad de amortiguamiento de los alambres de Nitinol, el cual puede ser despreciable. Gandhi y Wolons [13] propusieron el uso de un módulo complejo para caracterizar la capacidad amortiguadora de los alambres SMA. Un cable de SMA demuestra su capacidad amortiguadora, no solo bajo tensiones, sino también en ciclos de flexión.

Debido a las numerosas influencias en el comportamiento del SMA (situación térmica, amplitud de carga, amplitud de desplazamiento, número de ciclos y geometría) no es fácil obtener un valor de capacidad amortiguadora. La siguiente fórmula puede ser usada para calcular una aproximación de dicha capacidad amortiguadora.

$$SDC = \frac{\Delta W}{W} \quad (2.1)$$

Donde ΔW es la energía disipada, y W la energía aplicada durante la carga.[40]

Debido a la importancia de la determinación de la cantidad de energía disipada, los esfuerzos actuales en investigación están enfocados hacia la predicción de la energía de disipación en los alambres SMA bajo ciclos de carga. Los resultados numéricos muestran que la energía de disipación es directamente proporcional al diámetro del alambre, a más diámetro de SMA, más energía disipada.

2.6. SMA comercializados para aplicaciones ingenieriles

Existen varias aleaciones que pueden ser consideradas como aleaciones de memoria de forma, sin embargo las que han sido comercializados para aplicaciones ingenieriles son: [12]

Aleaciones Níquel-titanio. NiTiNol

Nitinol¹ muestran una alta estabilidad a aplicaciones cíclicas de cargas, poseen una alta resistividad eléctrica y una buena resistencia a la corrosión. Estos SMA tienen un coste muy

¹Con frecuencia, las aleaciones de níquel titanio son conocidas con el nombre de nitinol, *Ni* y *Ti*, son los símbolos atómicos de los componentes de la aleación y *Nol*, las siglas del laboratorio que descubrió dicha aleación (Naval Ordnance Laboratory)

elevado, sin embargo son los más usados debido a sus excelentes propiedades mecánicas. En la explotación comercial de esta aleación, con el objetivo de mejorar las propiedades, un tercer metal suele ser añadido a la aleación. En particular, suele añadirse una cantidad extra de níquel, entorno al 1 %.

Aleaciones de cobre

La aleación Cobre-Zinc-Aluminio (CuZnAl) fue la primera en comercializarse como SMA, la principal ventaja es su coste reducido, ya que es un proceso metalúrgico convencional, posteriormente se comercializó la aleación Cobre-Aluminio-Níquel (CuAlNi). Con dicha aleación las propiedades mecánicas son mejores, pero no lo suficientemente buenas como las aleaciones de níquel y titanio.

Aleaciones de hierro-manganeso-silicio

Las aleaciones Fe-Mn-Si-X pertenecen al grupo de SMA con base de hierro, que también son conocidos como aceros con memoria de forma. El efecto de memoria de forma de Fe-Mn-Si se detectó en 1982 por Sato et al. [19]. Desde este momento ha sido un material muy atractivo para científicos e ingenieros civiles. Sin embargo, hasta hoy en día, sólo es adecuado para la utilización del efecto memoria de forma en un solo sentido.

La red cristalina del Fe-Mn-Si, es una red cúbica centrada en la fase austenita mientras que en la fase martensita se trata de una red hexagonal. Aunque la red cristalina de Fe-Mn-Si exhibe un comportamiento no termoelástico, es posible llevar a cabo la transformación a fase martensítica mediante la aplicación de una tensión. Esta tensión es necesaria para recuperar las deformaciones.

Durante los últimos años, las aleaciones de Fe-Mn-Si se han estado investigando, se ha seguido una línea de investigación encaminada a mejorar el efecto memoria de forma. Con la adición de hasta un 10 % de cromo y níquel se consigue mejorar las propiedades. También se estudió la adición de Al, C, Co, Cu, N, Nb, NbC, V, VN y ZrC han sido investigados también para mejorar el efecto memoria de forma.

Existen otras aleaciones a base de hierro que muestran un, casi perfecto, efecto memoria de forma, tabla 2.1. La mayoría de ellos son no termoelásticos. Sin embargo, la aleación de Fe-Ni-Co-Ti muestra una transformación termoelástica y puede tener una tensión de recuperación hasta 1,000 MPa . Esta aleación es altamente resistente a la corrosión. También superelasticidad y dos sentidos de efecto de memoria de forma son posibles.

Aleación	Composición atómica	Transformación
Cu-Al-Ni	28-29Al, 3.0-4.5 Ni	TE=Termoelástico
Cu-Sn	15 Sn	TE=Termoelástico
Cu-Zn	38.5-41.5 Zn	TE=Termoelástico
Cu-Zn-X	(X=Si,Al,Ga,Sn) Poco X	TE
Fe-Cr-Ni-Mn-Si	9 Cr, 5 Ni, 14 Mn, 6 Si	No TE
Fe-Mn-Si	28-33 Mn, 4-6 Si	No TE
Fe-Ni-C	31 Ni, 0.4 C	No TE
Fe-Ni-Co-Ti	33 Ni, 10Co, 4 Ti	
Fe-Ni-Nb	31 Ni, 7 Nb	No TE
Mn-Cu	5-35 Cu	No TE
Ni-Al	36-38 Al	TE
Ni-Ti	49-51 Ni	TE
Ni-Ti-Cu	8-20 Cu	TE

Cuadro 2.1: Algunas aleaciones que muestran el efecto memoria de forma. Tomada de [28]

2.7. Aplicaciones de SMA.

El SMA posee unas propiedades únicas que no están presentes en otros materiales usados tradicionalmente en aplicaciones ingenieriles. Sus propiedades abren nuevas posibilidades para la introducción en el mercado de productos basados en sus características.

A continuación se enumeran diversas aplicaciones del material que gracias al comportamiento mecánico del SMA, pueden realizar funciones específicas en diversos campos de la ciencia. [1], [31], [39].

Mecanismos de encendido-apagado, actuadores

SMA son utilizados frecuentemente como mecanismos de encendido-apagado en circuitos de válvulas de refrigeración, sistemas de detención de fuegos y mecanismos de sujeción.

Debido al efecto de memoria de forma, SMA pueden funcionar como actuadores. Esto puede realizarse bien ejerciendo fuerzas sobre el estructura o mediante el cambio de la forma. El parámetro de control de los actuadores SMA es la temperatura.

SMA ofrecen ventajas importantes a la hora de trabajar como mecanismos de encendido-apagado como por ejemplo: simplicidad, seguridad y pequeño tamaño. Sin embargo, poseen una serie de desventajas debido a las restricciones de los ciclos de calentamiento enfriamiento.

Material inteligente

En los helicópteros es usual encontrar materiales inteligentes en el eje de rotación de las hélices ya que estos ayudan a la atenuación de las vibraciones y el ruido. También pueden ser usados en las propias hélices, consiguiendo una mejor adaptación bajo la carga de viento.

Dispositivos médicos

En el mercado médico y biotecnología existen una serie de dispositivos de SMA que usan la propiedad de superelasticidad. . Los más importantes son los arcos-guia médicos, stents y dispositivos ortodóncicos.

El *arco-guia medico* es un arco largo y fino que se pasa dentro del cuerpo humano a través de una apertura natural o de una pequeña incisión. Sirve como guía para una introducción segura de algunos dispositivos terapéuticos y diagnósticos. El uso de aleaciones superelásticas pueden reducir las complicaciones de los pacientes sin lesiones.

Stent es una palabra técnica que indica microestructura autoexpansiva, que ha sido ampliamente investigada para el tratamiento de órganos vacíos o sistemas de conductos. El stent fue inicialmente estirado para alcanzar un perfil pequeño, con la facilidad de una inserción segura y atraumática del dispositivo en el cuerpo. Después de haber llegado al sistema, el stent se autoexpande y amplía dos veces su diámetro comprimido y ejerce una fuerza constante radial sobre la pared del vaso.

Durante el *tratamiento ortodóncico*, los movimientos de los dientes se obtienen de procesos de remodelación ósea, resultantes de fuerzas aplicadas a la dentición. Tales fuerzas por lo general son creadas por la elasticidad de los arcos de ortodoncia que permiten almacenar energía para ser liberada a la dentición a sí misma durante un periodo de tiempo.

Aplicaciones basadas en la alta capacidad de amortiguación de los SMA.

Existen investigaciones basadas en ensayos numéricos y experimentación que muestran la capacidad de SMA para ser usados como dispositivos de protección sísmica. Esta aplicación es la que va a ser usada en este proyecto, y por tanto, será más desarrollada en posteriores apartados.

2.8. Dispositivos de control estructural.

En las estructuras, las cargas dinámicas y vibraciones pueden ser controladas mediante el uso de dispositivos de control activo, semiactivo y pasivo. [32], [15].

- **Sistemas de control pasivo.**

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos que reducen la respuesta dinámica por medios totalmente mecánicos. Los sistemas pasivos más comunes son los aisladores sísmicos, los disipadores de energía y los osciladores resonantes o también conocidos como sistemas inerciales acoplados.

- **Sistemas de control activo.**

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Las fuerzas de control son aplicadas mediante actuadores integrados a un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real.

- **Sistemas de control semiactivo.**

Los sistemas de control semiactivos no aplican fuerzas en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural, es decir, tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos.

En la figura 2.9, podemos observar una representación de un sistema de control pasivo (a), activo (b) y semiactivo (c).

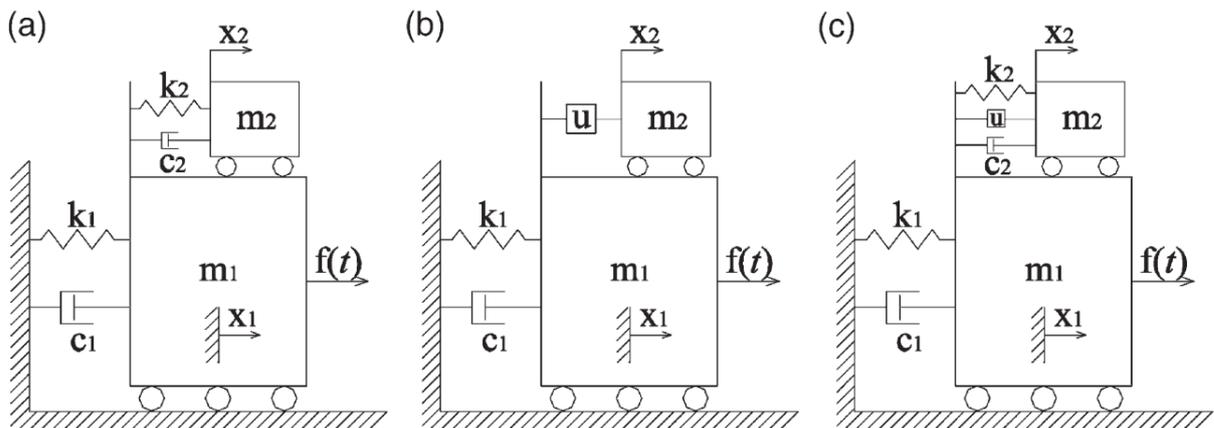


Figura 2.9: Representación de un sistema de control pasivo (a), activo (b) y semiactivo (c). Tomada de [32].

2.9. Clasificación y aplicación de SMA en el control estructural

Si tenemos en cuenta la clasificación anterior, el uso de SMA puede ser clasificado también en las mismas categorías: control estructural pasivo, sincronización de la frecuencia

(semi-activo), y control estructural activo, sin embargo, antes de pasar a enumerar los avances en este campo, debemos nombrar dos proyectos que han sido muy importantes para el estudio de dicho material usado como dispositivo de control estructural y en los próximos apartados se enumeraran los avances de dicho material usado como dispositivo de control estructural.

El proyecto MANSIDE [31] (Memory Alloys for New Seismic Isolation and Energy Dissipation Device 1995-1999) es uno de los dos más importantes proyectos de investigación sobre SMA en relación con la ingeniería civil hasta la fecha. El principal objetivo de dicho proyecto fue el estudio del comportamiento de dicho material así como tratar de realizar un modelo de estudio. Dispositivos de aislamiento sísmico y dispositivos de disipación de energía fueron desarrollados y testados en el laboratorio. En dicho proyecto se encontró que Ni-Ti era el material más adecuado para la amortiguación de las cargas sísmicas.

Casi al mismo tiempo, entre 1996 y 1999, se llevó a cabo el proyecto ISTECH [16] (Shape Memory Alloy Devices for Seismic Protection of Cultural Heritage Structures), que se centró en la desarrollo de equipos de SMA con comportamiento superelástico.

2.9.1. Clasificación de los SMA para el control estructural pasivo.

El control pasivo estructural utilizando SMA puede ser llevado a cabo gracias a la propiedad de amortiguación de dichos cables, reduciendo la respuesta y consecuentemente la deformación plástica de una estructura sujeta a un estado de cargas. **Los SMA pueden ser utilizados para este propósito a través de dos mecanismos: sistema de aislamiento en base y como dispositivo de disipación de energía.**

En un sistema de aislamiento en base, los SMA se instalan entre la estructura y el suelo formando un sistema no acoplado. Cuando se produce una excitación sísmica, la energía que se transfiere a la estructura es menor que sin estos dispositivos, de modo que el daño a la estructura es atenuada. Por otro lado, a través del mecanismo de disipación de energía, los SMA en fase martensita o austenia, integrados dentro de las estructuras absorben la energía de vibración basándose en la relación de los ciclos de histéresis de tensión-deformación.

Aunque los dos mecanismos están basados en la capacidad de amortiguamiento de los SMA, son diferentes en disposición y función. Un aislador SMA proporciona una variación a la rigidez de la estructura de acuerdo con los niveles de excitación, además de disipación de energía y la restauración después de la descarga. Por lo tanto, SMA superelásticos son apropiados como aisladores. Por otro lado, un elemento de disipación de energía SMA tiene como objetivo principal atenuar la respuesta dinámica de estructuras mediante la disipación de energía.

En general, para los equipos de SMA para el control de vibración pasiva, SMA en fase martensita tienen una mayor capacidad de amortiguación, sin embargo, se necesita calor externo para volver a su forma original (y será necesario un recentrado de la estructura). Por otro lado, SMA superelásticas tienen una menor capacidad de amortiguación, pero la estructura no debe ser recentrada gracias a la fuerza que hace que vuelva a su posición original.

SMA como mecanismos de aislamiento.

Los sistemas de aislamiento con SMA actualmente ya investigados son: barras de SMA para puentes de carreteras, cables de SMA con mecanismo de recentrado para edificios, resortes de SMA para el aislamiento y sistemas de aislamiento para múltiples grados de libertad.

Wilde et al.[43] investigaron un sistema de aislamiento con barras de SMA para puentes elevados de carretera. Figura 2.10. Se comparó el sistema de aislamiento con SMA con el sistema de aislamiento convencional, sometido a tres grados de excitación. Los resultados revelaron que el aislamiento con SMA proporcionaba variables de respuesta a la excitación así como una capacidad de amortiguamiento notable.

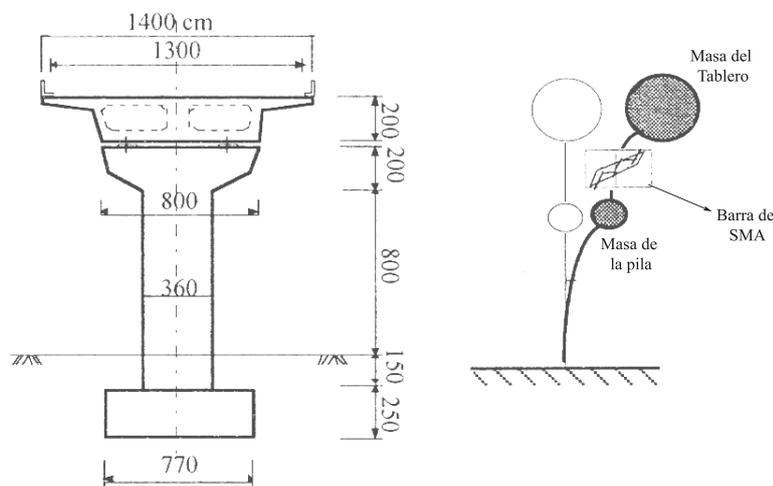


Figura 2.10: Modelo de aislamiento con SMA para puentes elevados de carretera. Tomada de [43].

Dolce et al. [10] desarrollaron y probaron a gran escala cables de Nitinol como aisladores en base sin el MANSIDE, proyecto que estudia la fiabilidad de los cables de Nitinol para aislamiento de vibraciones. El principio de funcionamiento se muestra en la figura 2.11. Un SMA superelástico se enrolla a través de tres soportes que están conectados a los tubos que, cuando el movimiento es recíproco entre la superestructura y el cimiento, el cable se

elonga y la vibración se ve disminuida gracias a la capacidad amortiguadora del SMA. El sistema de aislamiento puede cargarse hasta una fuerza máxima de 600 kN y soportar un desplazamiento de hasta 180 mm. El test fue realizado a un edificio real de 140 mm de desplazamiento inicial. Los test confirmaron que los SMA pueden ser usados como dispositivos de control estructural pasivo.

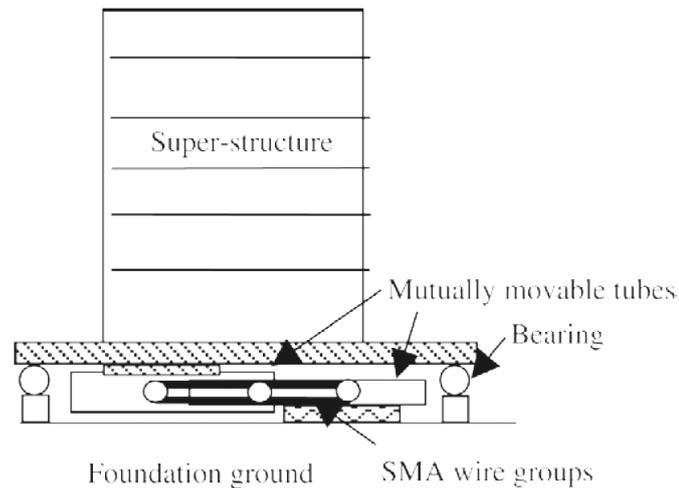


Figura 2.11: Modelo de aislamiento con SMA para edificios. Tomada de [10].

Khan and Lagoudas [20] realizaron un estudio analítico, usando SMA, para aislar un sistema de un grado de libertad de una excitación del suelo, la cual fue simulada por una mesa sísmica. El estudio reveló que la vibración depende del desplazamiento del SMA, porque, a pequeños desplazamientos no se dispara la tensión inducida durante la fase de transformación martensita. Además, el SMA produce el mejor aislamiento sólo cuando el sistema vibra cerca de la frecuencia de resonancia y bajo grandes niveles de carga. La figura 2.12 muestra un croquis del experimento realizado. Se demostró que el uso de SMA provoca un cambio significativo en la respuesta dinámica del sistema sobre todo porque se altera la frecuencia y amplitud en resonancia.

Corbi [7] propone el uso de SMA en la planta baja de un edificio de varias plantas (se muestra en la figura 2.13), para aislar la excitación de suelo. La simulación numérica muestra que el dispositivo de aislamiento SMA mejora significativamente la respuesta dinámica de la estructura así como también se ve reducido los trabajos de recentrado de la estructura.

Debería ponerse énfasis en que los dispositivos de aislamiento SMA han sido estudiados con una deformación nula después de la descarga. Sin embargo, para mejorar la capacidad amortiguadora de dichos dispositivos, pueden añadirse SMA en fase martensita ayudando así a que se disipe una mayor cantidad de energía.

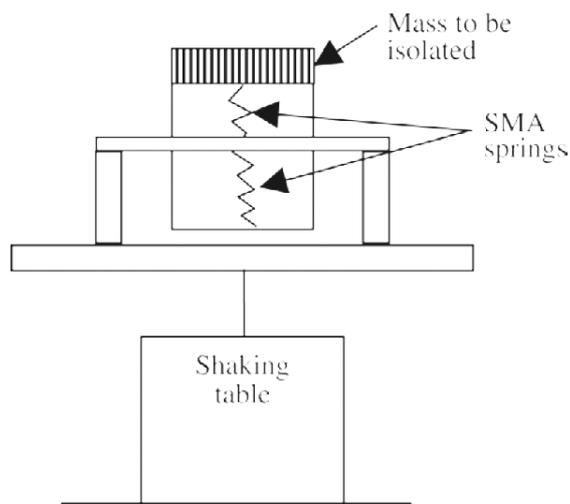


Figura 2.12: Modelo de aislamiento con muelles de SMA. Tomada de [20].

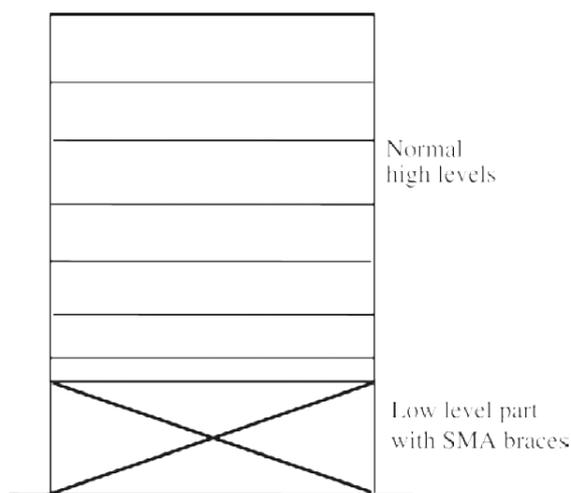


Figura 2.13: Modelo de aislamiento con barras de SMA. Tomada de [7].

SMA como dispositivo de disipación de energía.

Los dispositivos de energía de disipación de energía SMA han sido estudiados en estructuras “tipo pórticos”, en puentes atirantados o simplemente apoyados, como elementos de conexión de columnas y en adaptación de edificios históricos. En este apartado se van a nombrar los estudios realizados en puentes. SMA tanto superelásticos como en fase martensita se pueden utilizar como elementos de amortiguación para puentes.

Li et al. [21] estudiaron la mitigación de vibración de un cable de un puente atirantado mediante el uso de un cable de SMA como amortiguador, Figura 2.14. Las respuestas diná-

micas del cable SMA amortiguado fueron simulados, concluyendo que la propuesta de un SMA superelástico puede suprimir la vibración del cable.

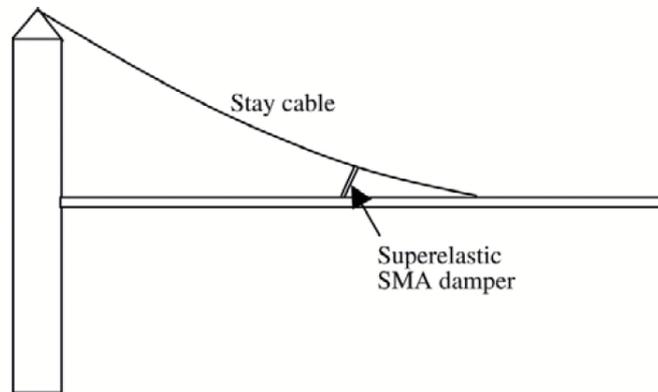


Figura 2.14: Modelo de aislamiento para un puente colgante. Tomada de [21].

DesRoches y Delémont [8] realizaron un estudio de una barra de SMA utilizada para el reforzamiento sísmico de un puente simplemente apoyado, los resultados demostraron que el limitador de SMA reducía la curvatura relativa en el pilar y proporcionó una amplia gama de deformación elástica en comparación con cables de acero convencionales. Además, el SMA limita la respuesta del tablero del puente bajo excitaciones sísmicas “near-field”. Figura 2.15.

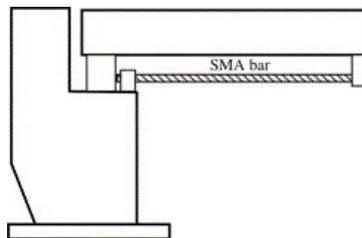


Figura 2.15: Modelo de aislamiento para un puente simplemente apoyado. Tomada de [8].

Posteriormente DesRoches et al. [29] realizó un estudio de un puente de cuatro vanos simplemente apoyados, con cables de SMA conectando el tablero con el estribo. Los resultados del estudio mostraron que los cables de SMA reducen significativamente el desplazamiento (entre un 57 y 69 %) cuando el puente está sometido a una carga sísmica. Dicho estudio fue realizado mediante un modelo de elementos finitos y mediante test experimentales.

Casciati et al. [4] estudiaron la aplicación de una barra de SMA en fase martensita de Nitinol para su uso como dispositivo de protección sísmica de puentes. Se utilizó un modelo de elementos finitos para analizar tanto estática como dinámicamente la respuesta de los dispositivos bajo sismos altos.

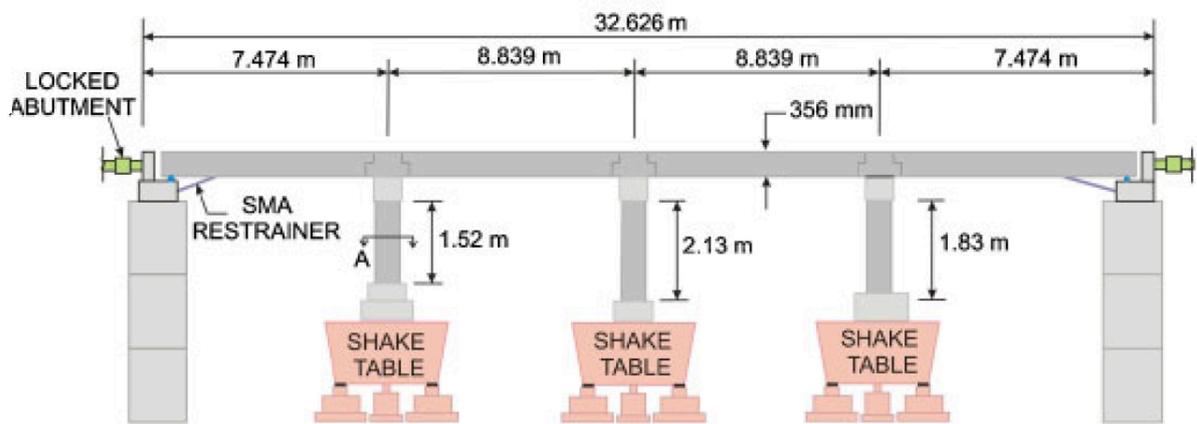


Figura 2.16: Modelo de aislamiento para un puente simplemente apoyado. Tomada de [29]

2.9.2. Clasificación de los SMA para el control estructural semi-activo.

Para una estructura vibrante en su frecuencia de resonancia, la vibración puede ser reducida mediante la regulación activa de la frecuencia de resonancia de la estructura. Tras el calentamiento, el SMA instalado o embebido en la estructuras aumentará la rigidez de la estructura de modo que la frecuencia natural de las estructuras se puede ajustar activamente. Al sintonizar la frecuencia activa con la frecuencia de resonancia el control de las estructuras se puede lograr. Este es el principio básico para el control de la vibración estructural semi-activo.

Por ejemplo, McGavin y Guerin [23] realizaron el estudio del control estructural de una estructura de acero bajo fuerzas sísmicas mediante el uso de cables de nitinol en tiempo real.

2.9.3. Clasificación de los SMA para el control estructural activo.

El sistema de control activo se basa en dispositivos que tienen la capacidad de modificar la respuesta dinámica de la estructura. Debido al efecto memoria de forma, los SMA pueden ser usados como dispositivos de control estructural activo, ya que puede aplicarse la activación repetida de la memoria de forma y volver al estado inicial. Esta condición se aplica también en múltiples ciclos de calentamiento para activar la memoria de forma.

Nae et al. propusieron en [27] el control de la curva tensión-deformación de alambres delgados de SMA bajo vibraciones de hasta 5 Hercios. Presentan los resultados para un sistema estructural en el que los cables de SMA se utilizan para suprimir la vibración de una viga en voladizo mediante el control de la temperatura del alambre usando una corriente eléctrica. Este control aumenta el área del ciclo de histéresis obteniendo así un aumento de

la capacidad de amortiguación. En el sistema utilizado (figura 2.17) se aplica un flujo de aire para la refrigeración, controlando la temperatura de los alambres de SMA. Los resultados muestran que las características del SMA pueden ser variadas activamente, controlando así la vibración de la estructura.

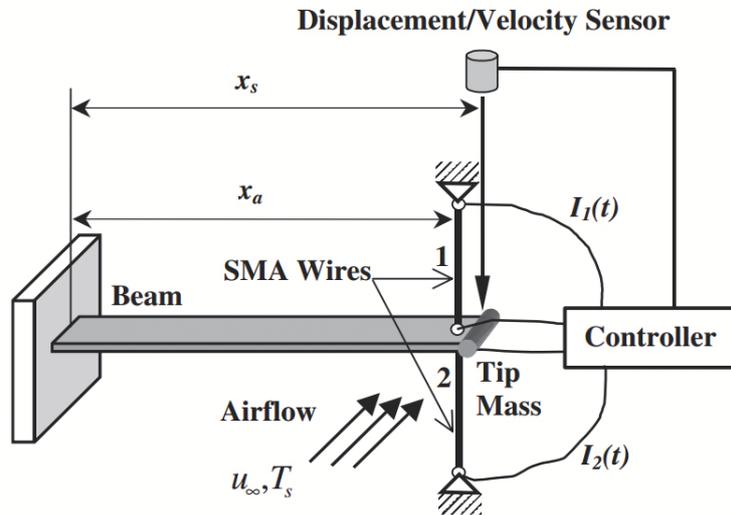


Figura 2.17: Esquema del sistema dinámico usado. Tomada de [27]

Shahin et al. [33] presentaron un modelo para un edificio de varios pisos, en la base del edificio se sitúan dos diagonales metálicas de SMA, con el objetivo de reducir su vibración. El cable opuesto a la dirección del movimiento de la masa del piso superior es calentado, de forma que sus propiedades termoelásticas se ven incrementadas. Mediante el control del cable de SMA se produce un factor de reducción de 7% en el desplazamiento. En este estudio se muestra como el SMA puede trabajar de forma activa para el aumento de la capacidad amortiguadora. (Figura 2.18)

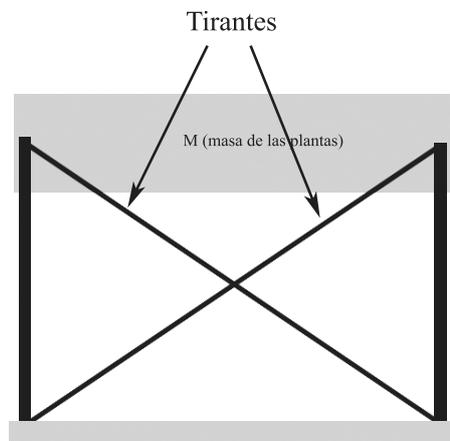


Figura 2.18: Estructura y tirantes de SMA. Tomada de [33]

2.9.4. SMA como dispositivos de rehabilitación de edificios históricos.

Los SMA también han sido usados como dispositivos de rehabilitación de edificios históricos cuando estos han estado sometidos a sismos. Los ejemplos más significativos de rehabilitación mediante el uso de SMA son el caso de la Basílica de San Francesco in Assisi y la Iglesia de San Giorgio, a continuación se detallan las actuaciones llevadas a cabo en ambos edificios. [22], [12],[17].

Basílica de San Francesco in Assisi

En 1997, la Basílica de San Francesco in Assisi, Italia (figura 2.19), fue dañada al estar sometida al sismo Umbria-Marche. Para su restauración se han usado dispositivos de SMA instalados en el techo de la basílica (figura 2.20). Los dispositivos están diseñados para soportar fuerzas tanto a tracción, como a compresión. Los dispositivos de SMA allí instalados han demostrado su eficiencia frente a fuerzas horizontales bajas. Cuando el edificio está sometido a este tipo de fuerzas, los dispositivos de SMA son rígidos, permitiendo desplazamientos pequeños. Sin embargo, frente a fuerzas horizontales altas, como un sismo, su rigidez disminuye controlando el desplazamiento de los muros de mampostería, reduciendo así el riesgo de colapso del edificio.



Figura 2.19: Basílica de San Francesco in Assisi. Tomada de internet

Iglesia de San Giorgio

La iglesia de San Giorgio en Trignano, Italia es del siglo XIV, está hecha de mampostería y resultó gravemente dañada durante el terremoto de Modena y Reggio Emilia en 1996.

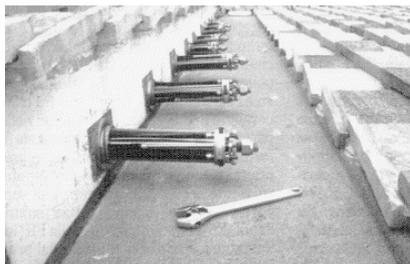


Figura 2.20: SMA usado en la rehabilitación de la Basílica de San Francesco in Assisi. Tomada de [12].

La torre mide 18.5 metros de altura y la base de la estructura es cuadrada de 3 metros de lado. Está rodeada de tres edificios de 11 metros de altura. Los muros de mampostería son de 0.42 m de espesor en las esquinas y de 0.3 metros en la parte central. La iglesia, tiene 4 ventanas grandes que están cerradas con ladrillo de espesor delgado. Esta es la sección más débil y por tanto la más afectada durante el sismo.

Después del sismo la iglesia fue restaurada usando SMA. Para su restauración se han usado cuatro barras de acero pretensado en serie con dispositivos de SMA situados en las esquinas del edificio. Los SMA constan de 60 cables de 1 mm de diámetro y 300 mm de longitud, están anclados a la parte superior del edificio, pretendiendo con ello la mitigación de las fuerzas aplicadas a los muros.



Figura 2.21: SMA usado en la rehabilitación de la Iglesia de San Giorgio. Tomada de [12].

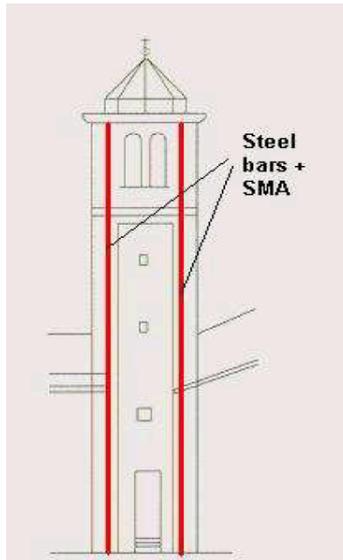


Figura 2.22: Iglesia de San Giorgio, disposición de los cables de acero y SMA. Tomada de [12].

2.10. Coste.

En ingeniería civil el uso de SMA para el control de la estructura, requiere de una gran cantidad de material si se compara con la necesaria para usos médicos. Dado que el componente más caro de los SMA es el nitinol, las aleaciones de SMA que no contienen dicho material son las más usadas en ingeniería civil. Aunque las propiedades de estos SMA no son tan buenas como las de los SMA compuestos por nitinol, el factor economía juega un papel importante a la hora de elegir dispositivo. Los SMA de “bajo coste” son los Fe-Mn-Si-X.

Si se echa un vistazo a los precios de los productos básicos de las aleaciones de nitinol frente a las aleaciones de Fe-Mn-Si-X, se observa rápidamente como los componente Ni y Ti son de 8 a 12 veces más caros que el Fe, Mn, Si, Cr. Esto significa que el costo de un sistema a base de hierro podría ser sólo una pequeña fracción de un sistema de Ni-Ti de alto rendimiento. Lo que es cierto es que las aleaciones de Ni-Ti muestran un muy buen efecto memoria de forma, pero el alto costo del material impide su utilización.

Sin embargo, el uso de aleaciones de níquel , titanio y un tercer material, Ni-Ti-X, puede presentar una solución económica viable.

CAPÍTULO 3

Planteamiento del modelo

3.1. Introducción

El programa SAP2000 ha sido desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, INC. en Berkeley, California, EEUU. Se presenta en varias versiones (Standard, Plus y Advanced). Desde hace más de 30 años ha estado en continuo desarrollo, para brindarle al ingeniero una herramienta confiable, sofisticada y fácil de usar sobre la base de una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño estructural a la vanguardia a nivel mundial.

Para los análisis realizados en este proyecto se ha usado SAP2000 versión 15, en dicho programa se puede modelar y analizar una estructura tridimensional sin problema, además de contar con la opción de aplicar varios tipos de análisis (estático, modal, tiempo-historia, etc.). También es posible incluir en él modelos de los dispositivos de control estructural de forma bastante sencilla, ya que SAP2000 trae incorporado los elementos Link, con los cuales es posible modelar los dispositivos de control estructural tanto de aislamiento como de disipación de energía. Por todos estos motivos, SAP2000 es el principal software utilizado para la realización de este proyecto dado que cubre todas las necesidades.

Existen dos artículos en la literatura científica dónde se modela el comportamiento mecánico del SMA en SAP2000, [8] y [14]. Sin embargo, a la hora de reproducir estos modelos en SAP2000 estas configuraciones propuestas, no se reproduce el comportamiento mecánico del SMA. Aunque esto suceda, sí debe decirse que dichas configuraciones han servido como inspiración para encontrar la configuración que se va a desarrollar en este capítulo

En el artículo [8] D.Cardone et al. propone una combinación de cuatro link. Se sitúan en paralelo tres link (GAP, PlasticWen y Multilineal Elástico), y esta combinación a su vez

está en serie con un link tipo GAP. Se puede observar en la figura 3.1.Y, en el artículo [14] el comportamiento del SMA ha sido modelado a través de una combinación en paralelo de dos link Multilineal Elástico y un elemento plástico, que están en serie con un link tipo Hook. Se puede observar en la figura 3.2.

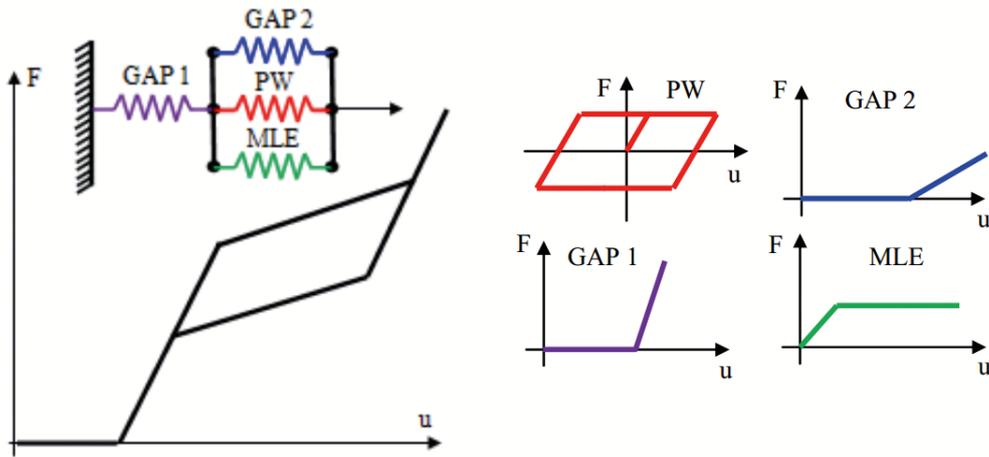


Figura 3.1: Configuración de Link propuesta por D.Cardone [8].

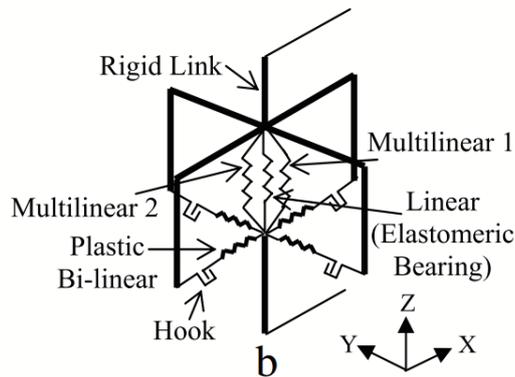


Figura 3.2: Configuración de Link propuesta en [14].

A continuación se detallan los elementos Link usados para la modelización del dispositivo y posteriormente la combinación usada para conseguir el comportamiento mecánico del SMA.

3.2. Elementos Link

Para poder definir e incluir el dispositivo de aislamiento es necesario conocer los elementos Link que posee SAP2000:

- Linear
- Multi-linear Elastic
- Multi-linear Plastic
- Gaps
- Hooks
- Dampers
- Friction Isolators
- Rubber Isolators
- T/C Isolators
- Frequency-dependent Springs
- Frequency-dependent Dampers

Los utilizados para poder generar el comportamiento mecánico del SMA son: multilinear elástico, multilinear plástico, gaps y hook, que son en los que nos centraremos en adelante.

1. LINK TIPO HOOK.

El funcionamiento del Link tipo Hook consiste en que se deja libre el desplazamiento hasta un determinado valor fijado, de manera que una vez que la fuerza ejercida provoca dicho desplazamiento, el Link HOOK ya no permite que siga desplazándose, 3.8. Dicho link es útil para cargas a tracción que coincide con la primera fase del diseño del dispositivo, pero posteriormente se implementará el dispositivo tanto a tracción como a compresión, será entonces cuando el Link tipo Gap será utilizado.



Figura 3.3: Link tipo Hook.

2. LINK TIPO GAP.

El link tipo GAP tiene el comportamiento opuesto al Hook; es decir, permite la compresión hasta un determinado valor, a partir del cual ya no podrá continuar su movimiento. Figura 3.4.

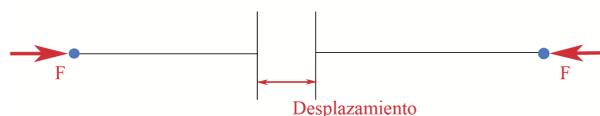


Figura 3.4: Link tipo Gap.

3. LINK TIPO LIN.

Este link no es más que un resorte al cual se le dará una rigidez y un amortiguamiento, quedando así perfectamente definido. Figura 3.5

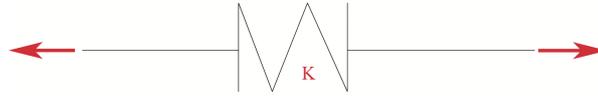


Figura 3.5: Link tipo Lin.

4. LINK TIPO MULTILINEAR ELÁSTICO (MLE).

El link MLE no es más que la combinación de dos o más link lineales. Este link consiste en un resorte que permite cambios de rigidez.

5. LINK TIPO MULTILINEAR PLÁSTICO (MLP).

Un link MLP es un link que inicialmente tiene un comportamiento elástico (del cual será necesario conocer su rigidez), pero en un determinado valor de desplazamiento (o de fuerza) el link pasa a tener un comportamiento plástico.

3.3. Modelo del dispositivo de aislamiento en SAP2000

Para poder reproducir el comportamiento mecánico del SMA se ha usado la configuración mostrada en la figura 3.6. Dicha configuración consiste en un Link HOOK en serie con un Link multilinear plástico (MLP). Ambos a su vez están en serie con dos Link del tipo multilinear elástico (MLE1 y MLE2); estos cuatro Link están a su vez en serie con un Link lineal (LIN1). Este último Link, del tipo lineal, está ahí situado con la única intención de ser útil para recoger la información en el nudo 1, ya que si le pedimos a SAP que muestre los resultados en el nudo 2, solamente mostrará los del Lin MLE1, y no el efecto del conjunto. El LIN1 tiene una rigidez elevada por lo que no influye en el resultado final, consiguiendo así en el nudo 1 la resultante de la configuración propuesta.

Los nodos están unidos gracias a la herramienta "joint constraints", con esta herramienta se pueden situar los nodos en diferentes posiciones en el espacio de SAP2000, pero se le asocian el mismo movimiento. Los nodos 6, 7 y 8, tienen asociado el mismo movimiento, pero gracias a esta herramienta se pueden situar en posiciones diferentes. Siendo así mucho más cómodo para el usuario.

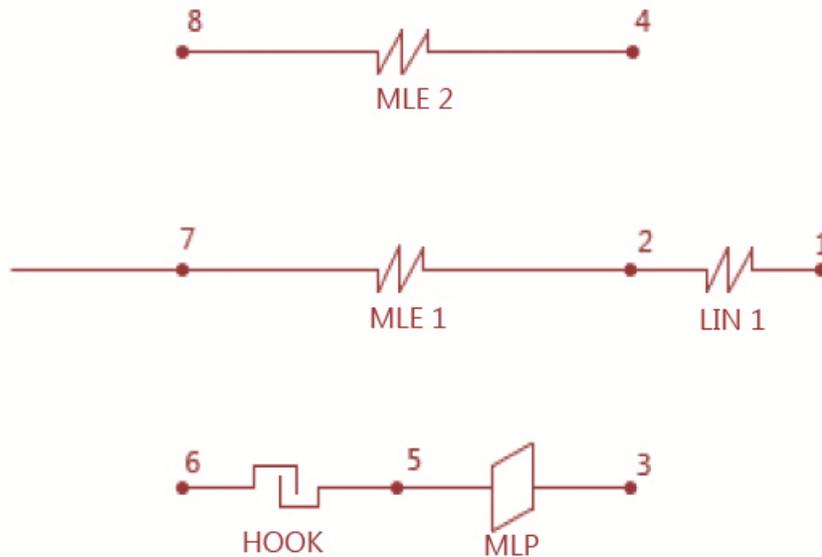


Figura 3.6: Configuración del dispositivo.

3.3.1. Valores numéricos de los link.

Si damos valores a los LINK y los implementamos en SAP2000, podremos observar el comportamiento del conjunto. Para introducir los LINK en SAP2000 es necesario hacerlo en función de las variables fuerza y desplazamiento, (y de este modo se ha llevado a cabo), aunque esto no supone ningún obstáculo ya que a partir del diagrama en $F-\delta$ podemos obtener directamente el de tensión-deformación.

En el capítulo anterior ha quedado definido el comportamiento mecánico típico de un SMA, el cual es de la forma que se muestra en la figura 3.7, por lo tanto nuestro objetivo será crear una configuración de muelles que se comporte de la forma más parecida a la original. La configuración que muestra la figura 3.6, es la que vamos a suponer que se comporta como la del SMA. Para la verificación de dicho modelo debemos dar valores para observar si verdaderamente se comporta de dicho modo. A continuación se exponen los valores que se le han dado a los link y posteriormente veremos si con ello se consigue el comportamiento deseado. En dicho modelo se han usado unidades de desplazamiento en milímetros y la fuerza en kiloNewton.

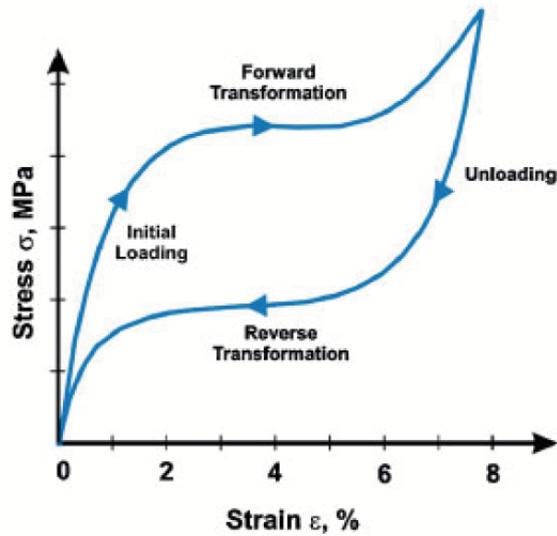


Figura 3.7: Comportamiento mecánico de un SMA. Tomada de [29].

- **Hook.** En SAP2000 es necesario fijar el desplazamiento máximo que permite dicho link y la rigidez, ($\delta = 2mm, K = 20000kN/mm$). Con estos datos, el comportamiento mecánico de este link sería el mostrado en la figura 3.8.

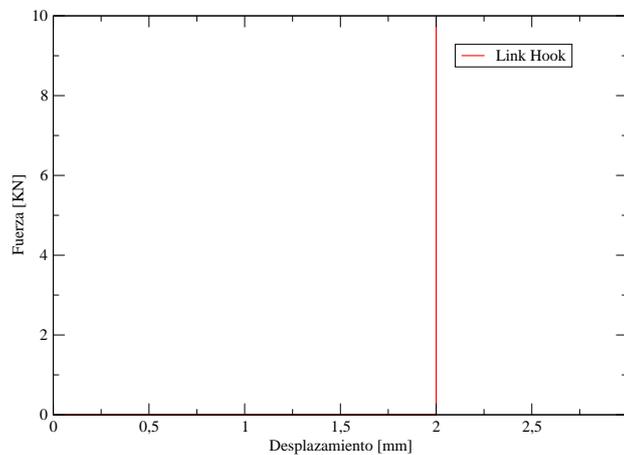


Figura 3.8: Link tipo Hook.

- **MLE1.** El link MLE1 consiste en una configuración elástica en la que en un primer intervalo tiene una pendiente de 10 y en la segunda (a partir de 2mm) pendiente de 2. En SAP es necesario introducir los valores de fuerza y desplazamiento. Los introducidos en este caso son los que se muestran en la tabla 3.1 y con estos datos, el comportamiento mecánico del Link resulta el que muestra la figura 3.9.

Fuerza [kN]	Desplazamiento [mm]
0	0
2	20
7	30

Cuadro 3.1: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE1.

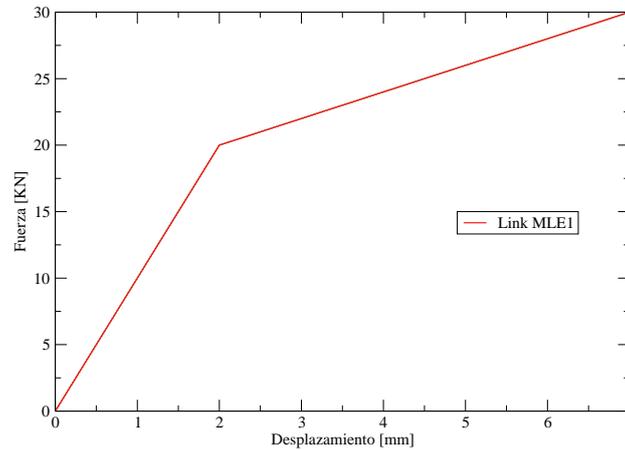


Figura 3.9: Link tipo multilíneo elástico.

- **MLE2.** Se le han dado los valores de la tabla 3.2, con ello en el primer intervalo tiene una pendiente nula y en el segundo el valor de la pendiente es 20. Figura 3.10

Fuerza [kN]	Desplazamiento [mm]
0	0
13	0
15	40

Cuadro 3.2: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE2.

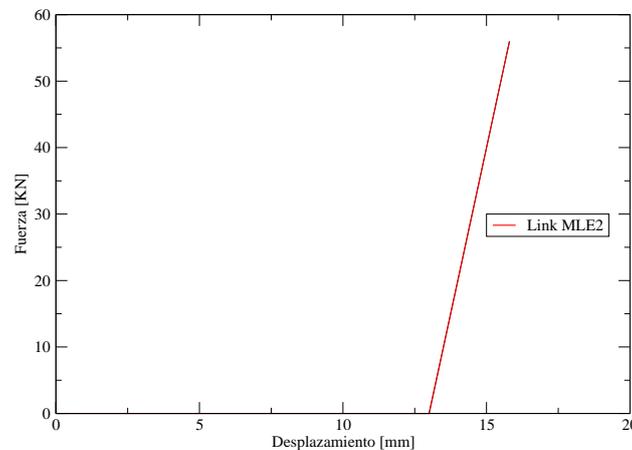


Figura 3.10: Link tipo multilíneo elástico.

- **MLP.** Como hemos visto en la definición de este tipo de link, se le va a exigir un comportamiento elástico hasta un determinado valor, en este caso 1.25 mm, con una pendiente de 8, a partir del dicho punto pasará a tener un comportamiento plástico. Figura 3.11

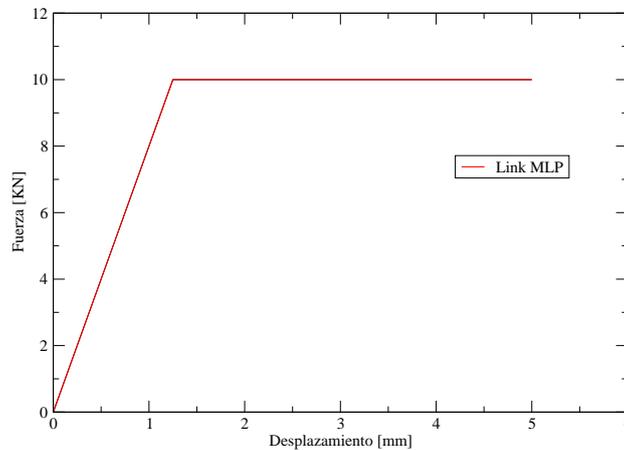


Figura 3.11: Link tipo multilínea plástico.

3.3.2. Rama de carga y descarga. Comportamiento mecánico

Una vez introducidos los valores numéricos en SAP2000, podemos solicitar que SAP2000 que nos muestre el comportamiento mecánico del conjunto, resultando lo que muestra la figura 3.12. En SAP2000 se ha realizado un análisis no lineal con control de desplazamiento. Se ha situado una fuerza en el nudo 1 (que se mostraba en la figura 3.6), que va aumentando su valor hasta 15 mm. Con este análisis podemos solicitar a SAP2000 que muestre en el nudo 1 la gráfica que relaciona la fuerza y el desplazamiento.

Vamos a ver el funcionamiento del dispositivo, teniendo en cuenta la configuración establecida y los resultados obtenidos, con lo que se va a hacer un análisis de la gráfica obtenida por tramos, y observaremos cómo está trabajando cada uno de los link.

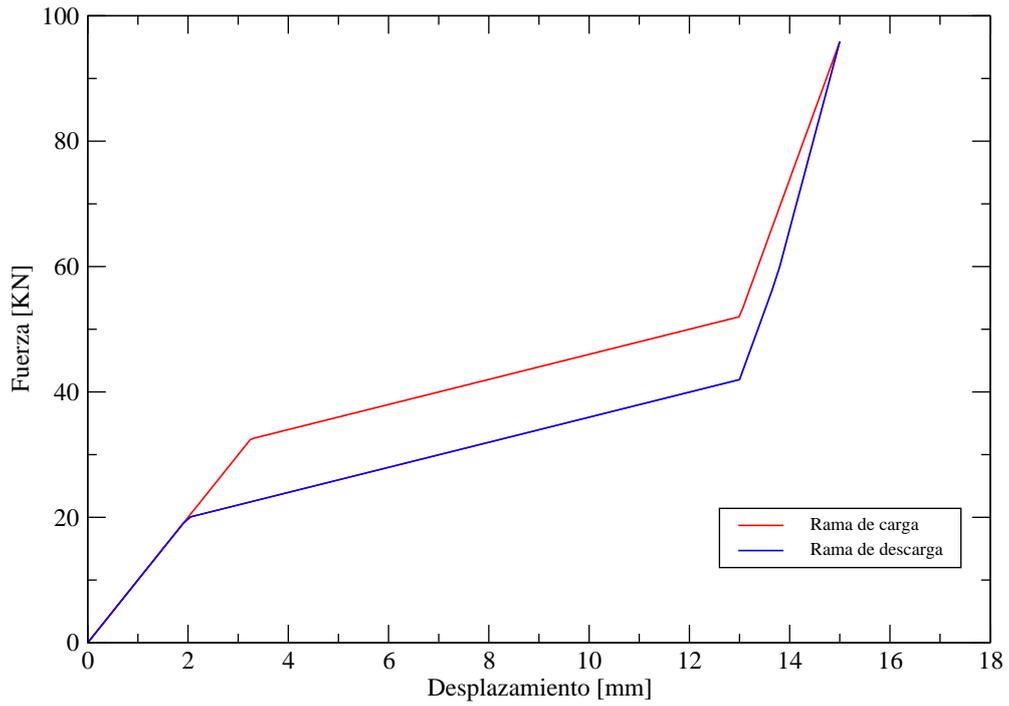


Figura 3.12: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

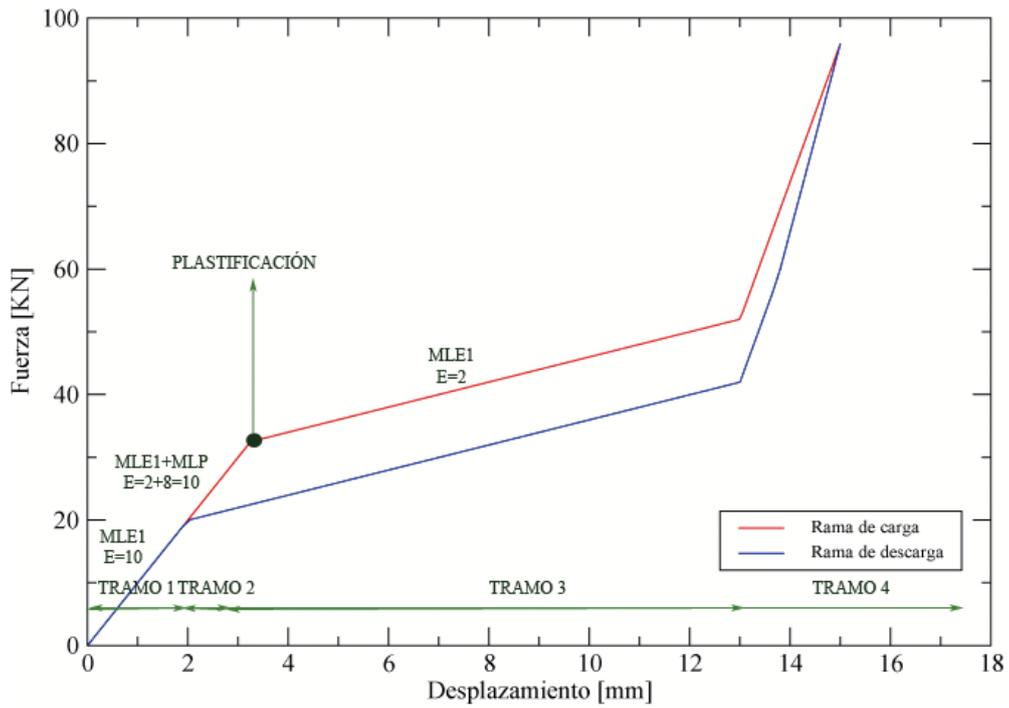


Figura 3.13: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

TRAMO 1. De 0 mm a 2 mm.

Si en el nudo 1 aplicamos una fuerza de tracción empezarían a trabajar los link MLE2, MLE1 en paralelo con Hook y MLP. Dado que Hook y MLP están en serie lo que sucede en esta rama es que, al permitir el link Hook el desplazamiento hasta el valor de 2 mm, el nudo MLP no estaría trabajando durante este tramo.

El nudo MLE2 está definido con pendiente nula hasta el valor de desplazamiento de 13 mm, por tanto dicho link no entra hasta dicho valor. Luego, durante este tramo los únicos link que están trabajando son MLE1 y Hook, y la pendiente de la configuración final debe ser la misma que la de MLE1 (10), ya que la de Hook en este caso es nula.

TRAMO 2. De 2 mm a 3.25 mm.

Durante este tramo el link HOOK ha llegado al máximo desplazamiento permitido, por lo que el link MLP comenzaría a trabajar, en este intervalo, con comportamiento elástico de pendiente 8. El link MLE1 durante este intervalo tiene una pendiente de 2. Dado que MLP y MLE1 están en serie podemos afirmar que la pendiente total será la suma de ambos ($2 + 8 = 10$), manteniendo la misma pendiente que en el tramo anterior, con lo que se consigue la linealidad del sistema.

TRAMO 3. De 3.25 a 13 mm.

Cuando el dispositivo adquiere el desplazamiento de 3.25 mm se produce la plastificación del link MLP, así ya sólo está aportando el comportamiento lineal el link MLE1, con pendiente 2.

TRAMO 4. A partir de 13 mm

Cuando el desplazamiento toma el valor de 13 mm, el link MLE2 entra a trabajar con pendiente 20, y puesto que está en serie con MLE1 y MLP, la pendiente del tramo final es de 22.

3.3.3. Implementación del dispositivo a compresión

Hasta ahora en el planteamiento de la configuración y verificación del modelo de dispositivo, sólo ha sido tenido en cuenta fuerzas a tracción, sin embargo, dado que el objetivo final es implementar dicho dispositivo en los estribos de un puente, será necesario tener el dispositivo en funcionamiento tanto a tracción como a compresión.

En el comienzo de este capítulo se explicó el comportamiento del link tipo GAP, que SAP2000 permite implementar. Es ahora cuando dicho link pasa a tener un papel fundamental para poder conseguir el comportamiento mecánico deseado. Dicho link permite el desplazamiento hasta llegar a un determinado valor, cuando éste está sometido a compresión; es decir, sería el comportamiento análogo al link Hook. El link Hook es útil a tracción mientras que el GAP lo es a compresión.

Contando con este tipo de link es relativamente sencillo implementar el dispositivo completo, ya que el resto de link basta con darle valores de desplazamiento y fuerza negativas, es decir, sería darle los valores simétricos respecto del origen de coordenadas. Antes de mostrar el dispositivo completo se va a mostrar la configuración a compresión y, posteriormente, se mostrará el dispositivo completo.

Dado que en la implementación del dispositivo bajo esfuerzos de tracción ya supusimos unos valores numéricos, vamos a usar los mismos, es decir, los simétricos. Una vez se obtengan las dos ramas ya sólo faltaría comprobar que pueden funcionar a la vez.

Los valores que se han introducido en SAP2000 para los link usados son los que se muestran en la figura 3.14.

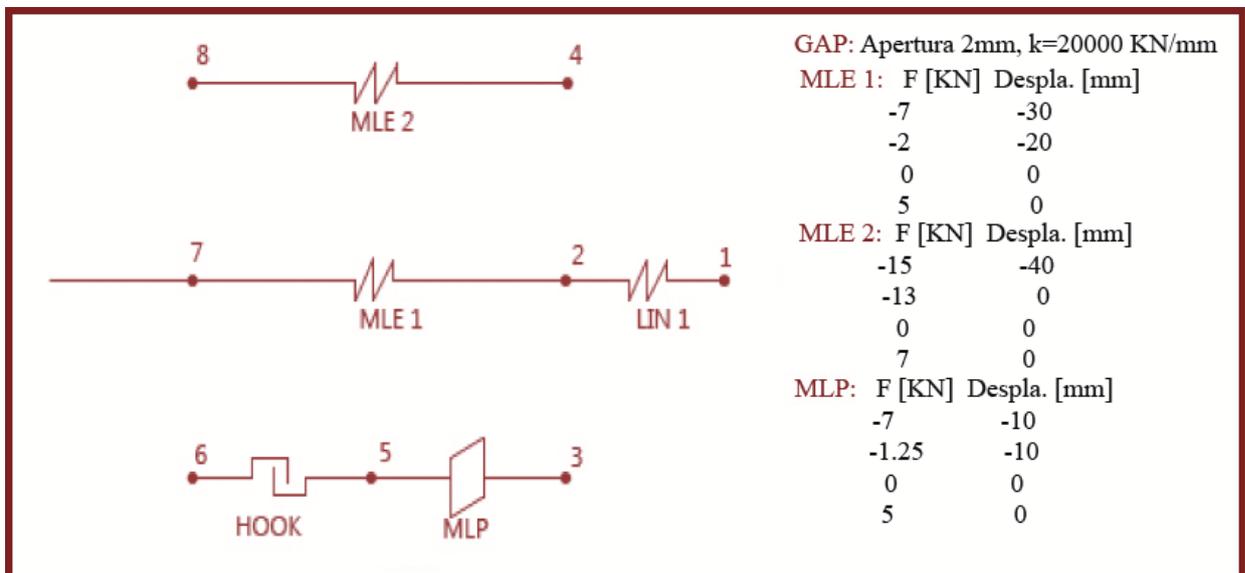


Figura 3.14: Valores numéricos implementados en SAP2000 de los link

Con estos datos obtenemos la rama de carga y la rama de descarga sometido a compresión, se muestra en la figura 3.15.

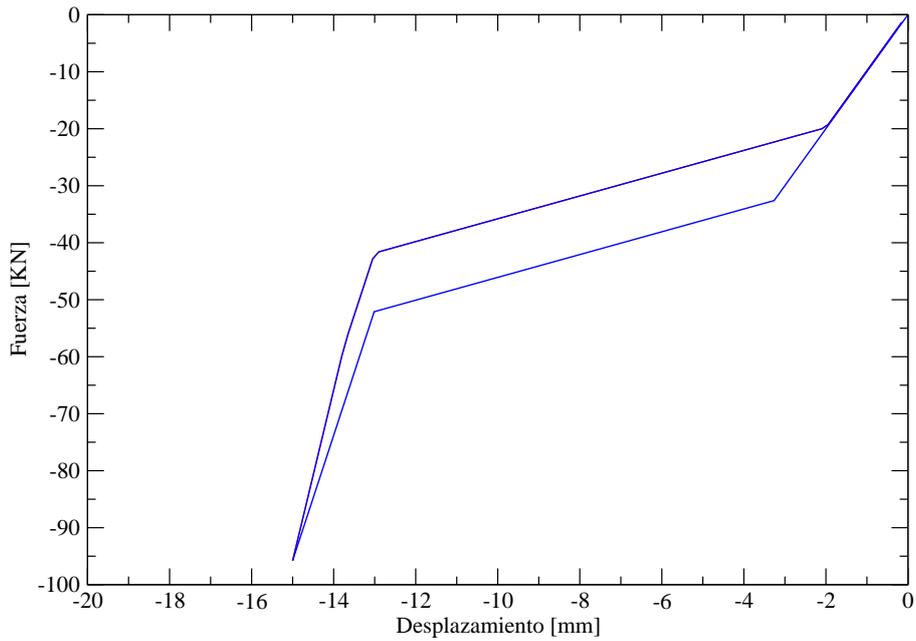


Figura 3.15: Rama de carga y descarga a compresión

3.3.4. Implementación del dispositivo completo.

En este punto del proyecto ya se disponen de todas las herramientas necesarias para la implementación definitiva del dispositivo, pues se ha definido el dispositivo a tracción y a compresión, y ambas se ha demostrado como gráficamente siguen el comportamiento mecánico del SMA. Uniendo ambas configuraciones (tracción y compresión) dispondríamos del dispositivo perfectamente definido; como lo que se desea es la superposición de ambos, bastará con colocarlos paralelamente y así conseguir la suma de ambos efectos. Se ha hecho en SAP2000 este ensayo, con lo que se ha conseguido tener un dispositivo que funciona tanto a tracción como a compresión. El comportamiento total del dispositivo se muestra en la figura 3.16

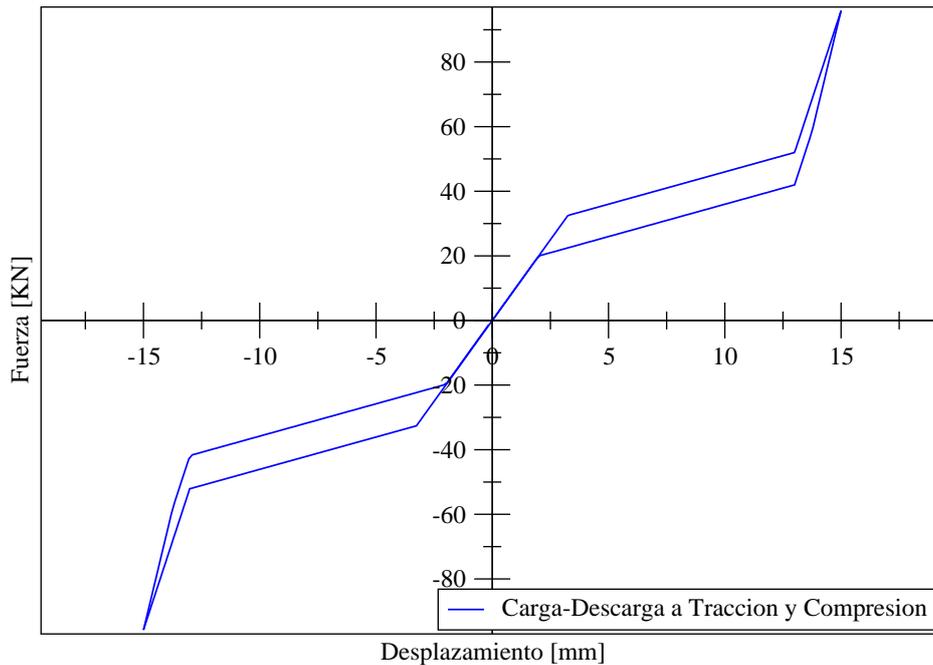


Figura 3.16: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del dispositivo completo

3.3.5. Ciclos de carga-descarga.

Una vez que disponemos del dispositivo completo implementado en SAP2000 se ha sometido a ciclos de carga-descarga para observar su correcto funcionamiento. Para realizar este tipo de análisis de carga-descarga en SAP2000 se usa un análisis “push over”. El análisis push over permite ir incrementando el valor de una fuerza hasta un valor determinado por el usuario, o bien hasta el colapso de la estructura. En nuestro caso de estudio, se ha elegido un control de desplazamiento, es decir va aumentando el valor de la fuerza hasta provocar el desplazamiento deseado. Este tipo de análisis es muy útil, sobre todo en este punto del proyecto en el que nuestro objetivo es ver si el dispositivo es capaz de realizar los ciclos de carga-descarga, pero aún no está preparado para someterlo a cargas cíclicas, que será el siguiente paso. Realizando este análisis al dispositivo en SAP2000 se obtiene la figura 3.17, en la cual se puede observar como el dispositivo realiza los ciclos de carga-descarga de forma correcta.

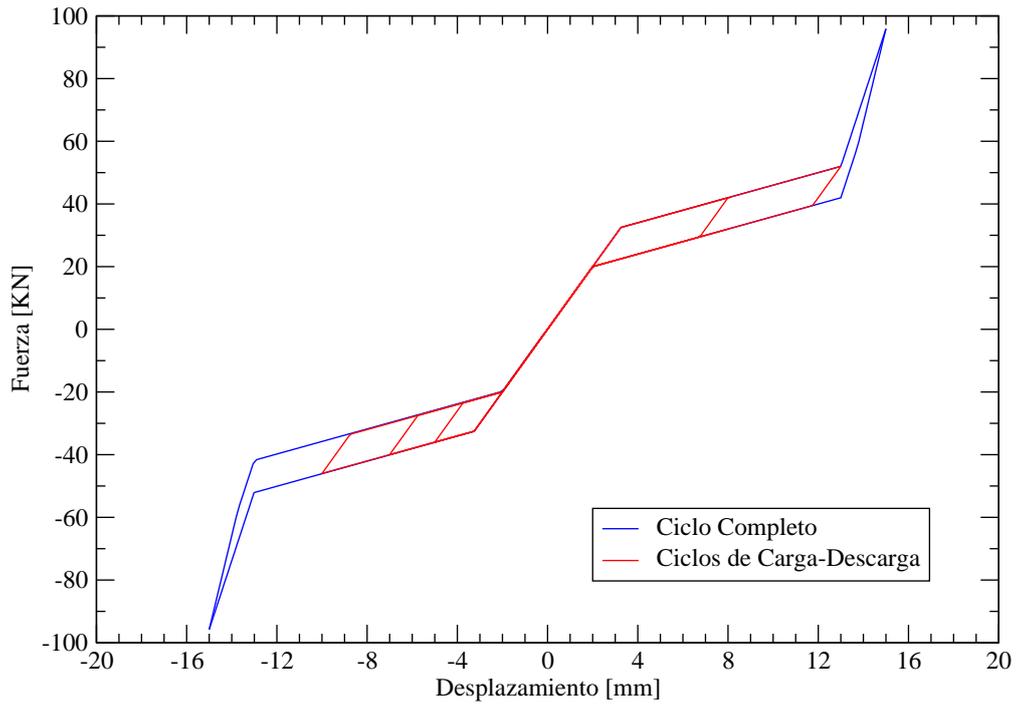


Figura 3.17: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

CAPÍTULO 4

Verificación del modelo

4.1. Introducción

En la tesis *“Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modeling and numerical simulation”* de Davide Fugazza [12], se realizan una serie de simulaciones numéricas de los SMA, en las que Fugazza es capaz de recrear el comportamiento mecánico de los SMA con simulaciones numéricas. Se analiza numéricamente el SMA bajo diferentes estados de cargas:

- Vibración libre
- Cargas puntuales con aumento progresivo de su valor.
- Cargas sinusoidales con diferentes frecuencias y amplitud fija.
- Cargas que combinan exponenciales con sinusoidales con diferente amplitud.
- Bajo el sismo El Centro escalado a diferentes picos de aceleración.

Dada la validez de este estudio, y llegados a este punto en el que tenemos el diseño del dispositivo de SMA en SAP2000, lo que se va a realizar es la verificación del dispositivo diseñado usando los resultados de Davide Fugazza. Se va a someter al dispositivo diseñado a las mismas simulaciones de esta tesis, y si obtenemos los mismos resultados se habrá verificado la eficacia del modelo. Para la verificación del modelo propuesto en este proyecto se va a usar el tercer ensayo realizado por Fugazza, es decir, se va a analizar el dispositivo bajo cargas sinusoidales.

4.2. Simulación realizada por Davide Fugazza

Fugazza propone la simulación numérica de cuatro modelos de SMA, son los definidos en la tabla 4.1, y en la imagen 4.1. Los 4 SMA tienen una longitud de 1000 mm y un diámetro de 1 mm.

Aleación	E [MPa]	σ_S^{AS} [MPa]	σ_f^{AS} [MPa]	σ_S^{SA} [MPa]	σ_f^{SA} [MPa]
SMA 100-300	70000	300	300	100	100
SMA 100-400	70000	400	400	100	100
SMA 100-500	70000	500	500	100	100
SMA 100-600	70000	600	600	100	100

Cuadro 4.1: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en el Link MLE2. Tomada de [12]

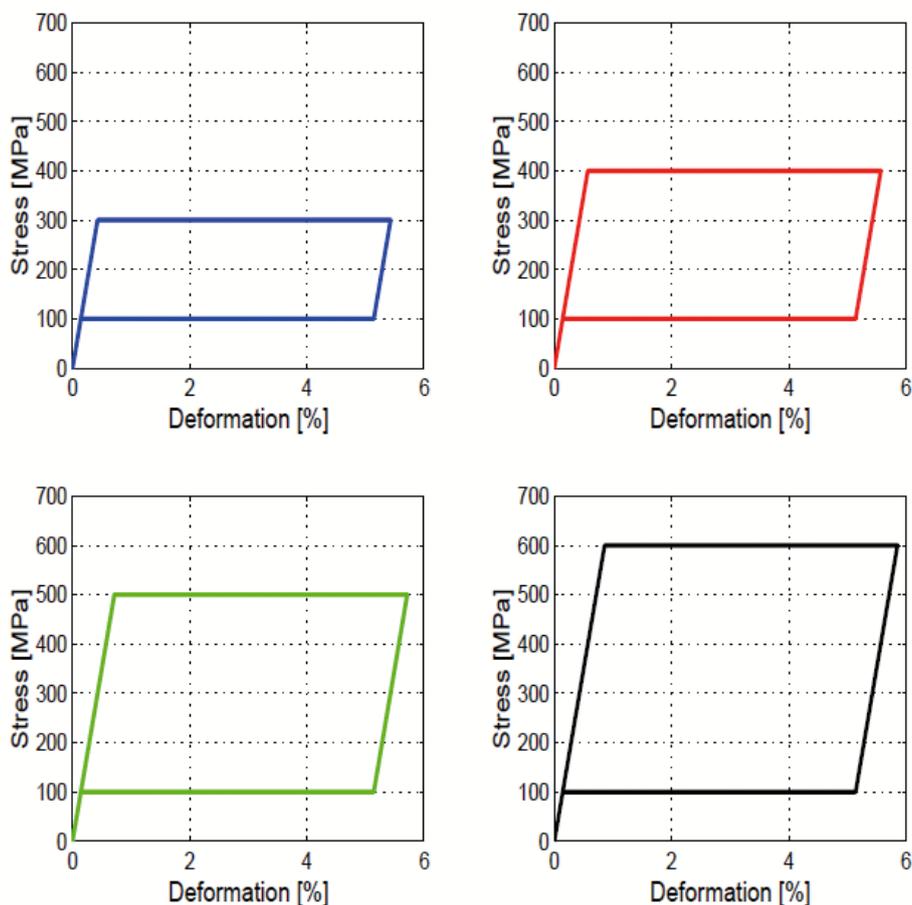


Figura 4.1: Gráfica de Tensión-Deformación de SMA con incremento de la capacidad de disipación, propuesto por Fugazza en [12]

Un sistema lineal y las cuatro configuraciones de SMA, tienen asociada una masa de 100 Kg y van a ser sometidas a cargas sinusoidales. Los cálculos son realizados en un intervalo

de tiempo de 0.1 a 2 segundos y la carga tiene una amplitud de 0.1g y un periodo variable. Ecuación 4.1.

$$F(t) = A \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.2)$$

Para mostrar los resultados de forma clara, Fugazza utiliza las variables de desplazamiento normalizado y periodo normalizado. Lo primero que realiza es el cálculo del sistema lineal del cual obtendrá un desplazamiento máximo para una periodo determinado (los valores máximos de desplazamiento se dan cuando el sistema está sometido a resonancia, es decir, la frecuencia del sistema coincide con la frecuencia de la excitación). Este periodo es el periodo natural del dispositivo.

Una vez obtenido el valor del periodo natural y sometido el sistema lineal a una excitación con el mismo periodo, se obteniendose el desplazamiento máximo que experimentará el dispositivo. Estos dos valores son los que van a ser utilizados para normalizar el resto de datos. Una vez resuelto el caso lineal se resolverán los cuatro casos de SMA y se normalizarán los valores. Todos estos datos son representados en la figura 4.2.

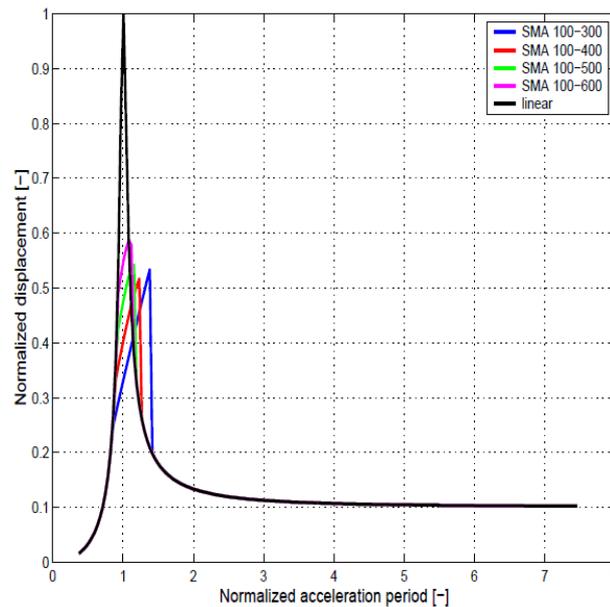


Figura 4.2: Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado. Tomada de [12].

Observando la gráfica 4.2 referente al desplazamiento normalizado se puede observar un cambio de la respuesta pico hacia la región de periodos más amplios. Esta característica está obviamente conectada a los ciclos de histéresis. El efecto mostrado en la gráfica es debido a la reducción de rigidez experimentada por el material durante la transformación de austenita a martensita dónde parece ser más suave. Como es esperado, cuanto más alta es la resistencia a la fuerza del material más pequeño es el cambio debido al incremento de rigidez. Una vez definida la simulación que Fugazza realiza en sus tesis, se va a proceder a realizar el mismo ensayo al SMA implementado en SAP2000 y se observará si la respuesta a las cargas sinusoidales son las mismas que las que obtiene Fugazza en su tesis, si esto sucede, quedará verificado el modelo propuesto.

4.3. Datos de entrada para la realización del ensayo de Fugazza en SAP2000.

Para poder realizar el ensayo de Fugazza con éxito en SAP2000, lo primero que debemos realizar es el diseño de los dispositivos (incluyendo el lineal) en variables usadas por SAP2000; posteriormente se define la carga. Una vez definidos estos dos pasos se procederá al análisis del dispositivo. Por tanto los pasos dados en este apartado van a ser los siguientes:

1. Definir los dispositivos de SMA.
2. Definir el sistema lineal.
3. Definir la carga.

4.3.1. Definición de los dispositivos de SMA

En el capítulo anterior ya se comentó que para introducir los Link en SAP2000 es necesario realizarlos con las variables de fuerza-desplazamiento y no en tensión-deformación, como propone Fugazza. Esto no supone un gran problema ya que disponemos de los utensilios necesarios para poner transformar un diagrama de tensión- deformación ($\sigma - \epsilon$) en uno de fuerza-desplazamiento ($F - \delta$).

Recordemos que los SMA tienen una longitud de 1000 mm y un diámetro de 1 mm.

$$F = \sigma A \tag{4.3}$$

$$A = \frac{\pi\phi^2}{4} \quad (4.4)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{E} \quad (4.5)$$

$$\epsilon = \frac{L}{\Delta L} \quad (4.6)$$

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} \quad (4.7)$$

SMA 100-300.

Se disponen de valores de tensión de 100 MPa y 300 MPa, y un incremento de deformación del 5%. Con estos valores se pueden calcular los valores de fuerza desplazamiento en los nudos 1, 2, 3 y 4, que muestra la figura 4.3.

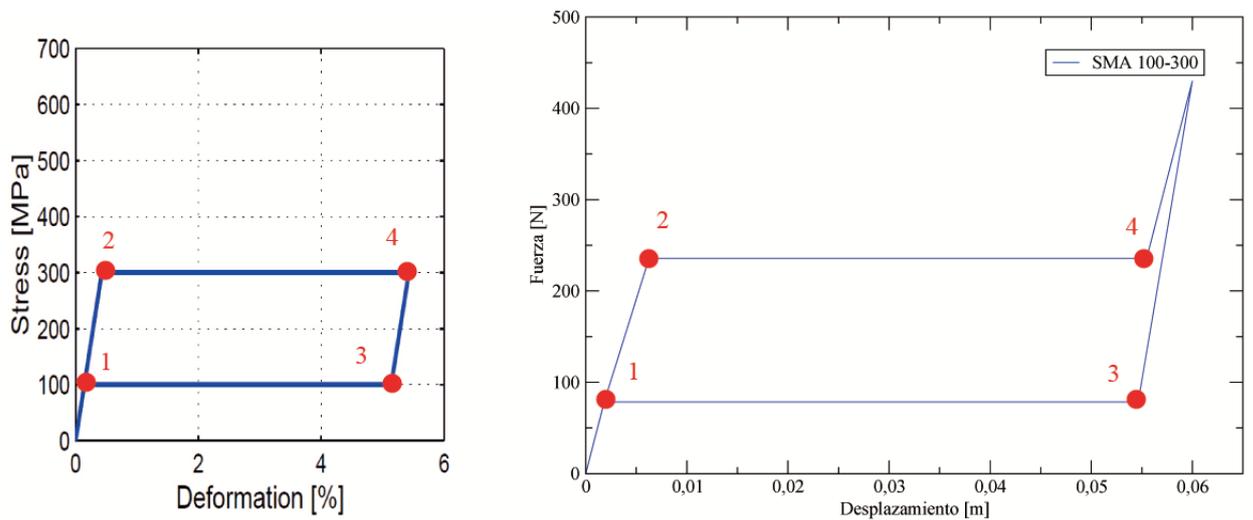


Figura 4.3: Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento

$$F_1(\sigma = 100MPa) = \sigma * A = 100 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 78,5N \quad (4.8)$$

$$F_1(\sigma = 300MPa) = \sigma * A = 300 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 235,5N \quad (4.9)$$

$$\delta_1(\sigma = 100MPa) = \frac{100}{70000} = \frac{1}{700}m = 0,0014m \quad (4.10)$$

$$\delta_2(\sigma = 300MPa) = \frac{300}{70000} = \frac{3}{700}m = 0,0043m \quad (4.11)$$

$$\Delta\epsilon = 5\% \longrightarrow \Delta L = \epsilon L = \frac{5}{100} * 1000 = 50mm = \frac{5}{100}m = 0,05m \quad (4.12)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_3 = \frac{1}{700} + \frac{5}{100} = \frac{36}{700}m = 0,0514m \quad (4.13)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_4 = \frac{3}{700} + \frac{5}{100} = \frac{38}{700}m = 0,0543m \quad (4.14)$$

$$\Delta\Delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{3}{700} - \frac{1}{700} = \frac{2}{700}m = 0,0029m \quad (4.15)$$

Así queda totalmente definido el diagrama de F- δ del SMA 100-300 (teniendo en cuenta el capítulo anterior se pasaría al diseño del dispositivo). Los valores de los link se pueden encontrar en la tabla 4.2

TRACCIÓN		COMPRESIÓN	
HOOK	Apertura=1/700m k=200000 N/m	GAP	Apertura=1/700m k=200000 N/m
MLE1 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.001 → 0 0 → 0 1/700 → 78,5 3/700 → 78,5	MLE1 (Compresión)	Fuer. → Despla. -3/700 → -78,5 -1/700 → -78,5 0 → 0 0.01 → 0
MLE2 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 38/700 → 0 41/700 → 235,5	MLE2 (Compresión)	Fuer. → Despla. -41/700 → -235,5 -38/700 → 0 0 → 0 0.01 → 0
MLP (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 2/700 → 157 36/700 → 157	MLP (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -157 -2/700 → -157 0 → 0 0.01 → 0

Cuadro 4.2: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.

Implementando en SAP2000 este dispositivo y realizando un análisis push over, podemos observar el comportamiento mecánico del dispositivo, el cual se muestra en la figura 4.4.

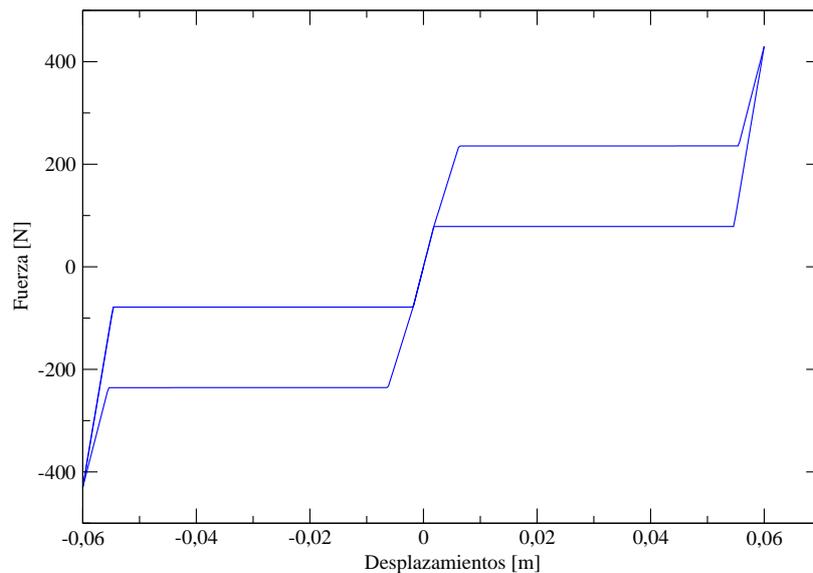


Figura 4.4: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-300

Ya ha quedado definido el SMA 100-300,)para el resto de dispositivos se realizaría el mismo procedimiento). A continuación se muestran las gráficas de fuerza-desplazamiento del resto de SMA sólo a tracción, aunque los cálculos quedan reflejados en el apéndice B, apartados B.1, B.2, B.3.

SMA 100-400, figura 4.5.

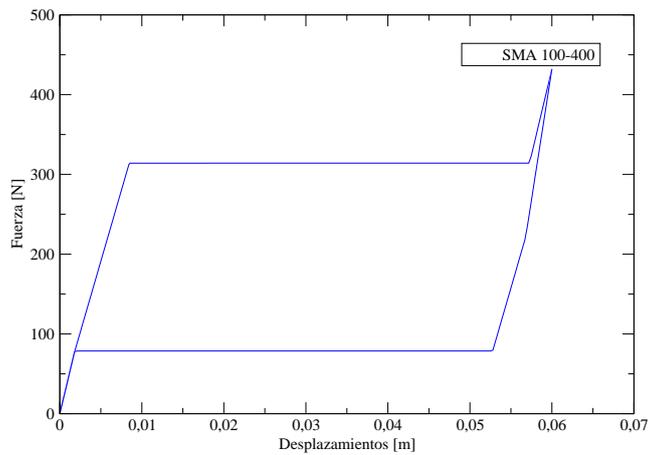


Figura 4.5: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

SMA 100-500, figura 4.6.

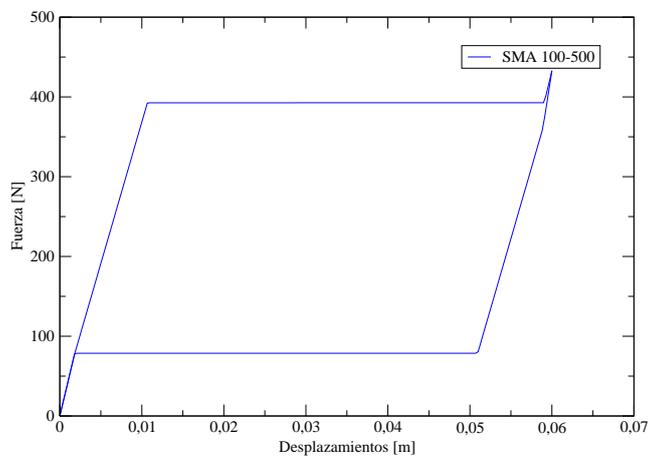


Figura 4.6: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

SMA 100-600, figura 4.7.

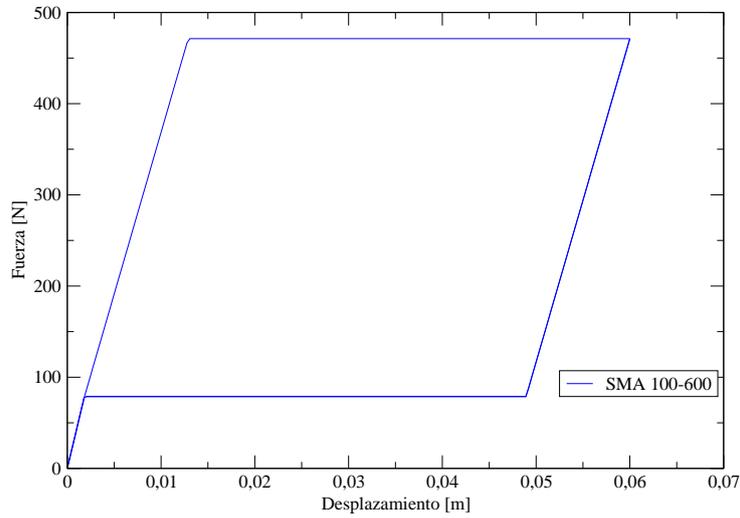


Figura 4.7: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento

4.3.2. Definición del sistema lineal.

El sistema lineal no es más que un sistema masa-muelle, la masa es de 100 kg (tal y como propone Fugazza) y la rigidez del muelle toma el valor que toman los SMA en su primera fase elástica.

$$K = \frac{78,5}{\frac{1}{700}} = 54950 \frac{N}{m} \quad (4.16)$$

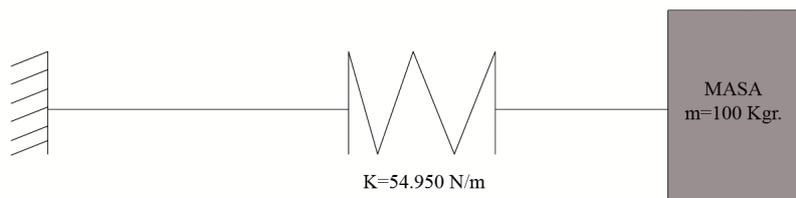


Figura 4.8: Sistema lineal. Masa-muelle

4.3.3. Definición de la excitación

La excitación consiste en una carga cíclica sinusoidal. Para definirla en SAP2000 es necesario hacerlo como una función del tipo Time-History, que permite definir una carga sinusoidal simplemente introduciendo su periodo y la amplitud de la función. Además esta función también permite definir el intervalo de tiempo del análisis.

El periodo, como bien define Fugazza, va ir variando, según el análisis que estemos realizando y en el que la amplitud tendrá valor 1. Fugazza propone una amplitud de 0.1g, y va a ser tenida en cuenta, pero no en la definición de la función Time-History, sino en la definición de la carga.

La carga será definida del tipo Time-Histroy y se implementa la excitación como una aceleración en la dirección U1 con un factor de escala 0.1g. Se realiza un análisis no lineal con amortiguamiento del 5% y se usa el método de Newmark para la integración en el tiempo.

$$F = A \operatorname{sen}(\omega t) \mapsto F = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4.17)$$

4.3.4. Definición del periodo, T.

En el sistema lineal es fácil conocer el valor del periodo natural del dispositivo masa-muelle planteado, ya que disponemos de toda la información necesaria para su cálculo.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4.18)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (4.19)$$

$$\frac{2\pi}{T_n} = \sqrt{\frac{K}{M}} \rightarrow T_n = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \rightarrow T_n = 2\pi\sqrt{\frac{100}{54950}} = 0,268 \text{segundos} \quad (4.20)$$

$T_n = 0,268\text{segundos}$ es el valor del periodo natural del sistema lineal, aunque también lo es de los cuatro dispositivos de SMA en su primera fase. Recordemos que la primera fase de los dispositivos de SMA tiene un comportamiento elástico de pendiente igual al dispositivo lineal.

El periodo va a tomar valores tanto inferiores como superiores al natural con el objetivo de encontrar aquel valor que provoca el máximo desplazamiento.

Obviamente, en el sistema lineal no hay duda de que el desplazamiento máximo será provocado por la excitación que tiene $T = T_n$ nuestro objetivo es buscar el valor de este T. El resto de dispositivos sí que va a cambiar.

La búsqueda del periodo natural de los diferentes dispositivos se va a realizar mediante iteraciones, es decir, se va a comenzar realizando un análisis con $T = 0,268\text{segundos}$ y posteriormente se va a ir variando obtener el deseado.

4.4. Ensayo de Fugazza aplicado al sistema lineal.

El primer ensayo a realizar en SAP2000 va a ser el dispositivo lineal, como ya ha sido enunciada su configuración y la excitación se va a proceder directamente al ensayo en sí.

Se implementa en SAP2000 un sistema masa-muelle de masa 100 kg y rigidez del muelle 54920 N/m¹. Este sistema es sometido a una excitación de $T = T_n = 0,268\text{segundos}$ con amplitud 0.1g. De la realización de este análisis se obtiene un desplazamiento máximo, tabla 4.3, para el periodo natural de la estructura.

$T_n = 0,268\text{segundos}$ produce un desplazamiento de $\delta_{max} = 0,038725m$
--

Cuadro 4.3: Valores usados para normalizar el periodo y el desplazamiento.

Estos dos valores son los usados para normalizar el resto de valores, ya que es el máximo desplazamiento del sistema lineal. En la gráfica 4.9 se muestra el desplazamiento en el intervalo de tiempo [0,2] segundos. Se puede observar cómo sigue el comportamiento típico del fenómeno de resonancia.

¹Todos los ensayos en SAP2000 han sido realizados en unidades del Sistema Internacional.

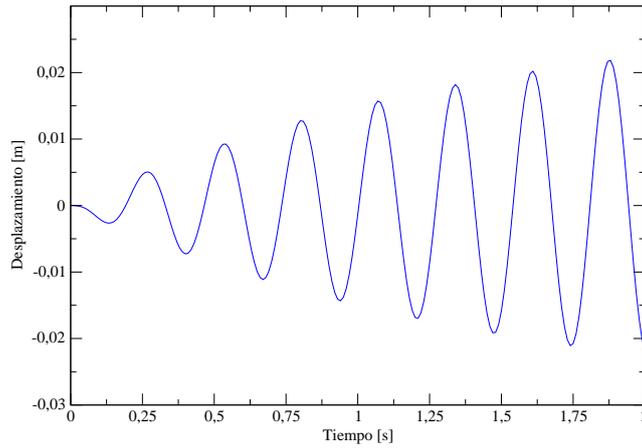


Figura 4.9: Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado.

Se continúan realizando una serie de análisis donde se varía el valor del periodo, obteniendo un valor de desplazamiento para cada uno de los periodos propuestos. Una vez obtenida la tabla de periodos-desplazamientos se procede a la normalización de estas variables, con los valores mostrados en la tabla 4.3. Todos los valores se pueden observar en la tabla 4.4.

Periodo	Desp. Máximo	Peri. Normalizado	D. Normalizado
0.01	0.000122	0.037313433	0.00315042
0.05	0.000394	0.186567164	0.010174306
0.1	0.001154	0.373134328	0.029799871
0.15	0.002744	0.559701493	0.070858618
0.2	0.004872	0.746268657	0.1258102
0.24	0.014583	0.895522388	0.376578438
0.268	0.038725	1	1
0.28	0.03425	1.044776119	0.884441575
0,3	0,014523	1,119402985	0,375029051
0,35	0,019865	1,305970149	0,512976114
0,355	0,020486	1,324626866	0,529012266
0,36	0,020774	1,343283582	0,536449322
0,365	0,02146	1,361940299	0,554163977
0,37	0,018245	1,380597015	0,471142673
0,4	0,010283	1,492537313	0,265539057
0,5	0,005975	1,865671642	0,154293092
0,8	0,003019	2,985074627	0,077959974
1	0,003017	3,731343284	0,077908328
1,5	0,002465	5,597014925	0,06365397
2	0,002337	7,462686567	0,060348612

Cuadro 4.4: Valores de periodo y desplazamiento asociado en el sistema lineal

4.5. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA.

En este apartado se van a mostrar los resultados de los análisis realizados al dispositivo SMA 100-300, dado que el procedimiento sería exactamente el mismo para el resto de dispositivos. Sin embargo, en el apéndice B quedan recogidos el resto de SMA (en los apartados B.4 , B.5 , B.6).

Al dispositivo SMA 100-300 se le sitúa una masa de 100 kg , y se le somete a diferentes análisis variando el periodo. Inicialmente se comenzará con el valor de 0.268 segundos (que es valor de referencia), posteriormente se va variando el periodo hasta encontrar el periodo natural de la configuración, el cual resultará el máximo desplazamiento En la tabla 4.5 se muestran los resultados de los diferentes análisis. En este caso, para un periodo de 0.44 segundos, se produce el máximo desplazamiento, y será este el periodo que provoca la resonancia del sistema. A continuación se muestran una serie de gráficas (obtenidas del ensayo del dispositivo con T=0.44 segundos) que muestran el comportamiento típico del fenómeno de resonancia.

Periodo	Desp. Máximo	Peri. Normalizado	D. Normalizado
0,01	0,000065	0,037313433	0,001678502
0,05	0,000377	0,186567164	0,009735313
0,1	0,000987	0,373134328	0,025487411
0,15	0,001736	0,559701493	0,044828922
0,2	0,003803	0,746268657	0,098205294
0,24	0,005991	0,895522388	0,15470626
0,268	0,007732	1	0,1996643
0,28	0,008488	1,044776119	0,21918657
0,3	0,009987	1,119402985	0,257895416
0,32	0,011247	1,194029851	0,29043253
0,35	0,012875	1,305970149	0,33247256
0,4	0,017283	1,492537313	0,446300839
0,41	0,017951	1,529850746	0,46355067
0,42	0,018197	1,567164179	0,4699031
0,44	0,02047	1,641791045	0,528599096
0,45	0,016782	1,679104478	0,43336346
0,5	0,005974	1,865671642	0,154267269
0,53	0,005518	1,97761194	0,14249193
0,55	0,005219	2,052238806	0,13477082
0,6	0,004408	2,23880597	0,113828276
1	0,003017	3,731343284	0,077908328
1,5	0,002465	5,597014925	0,06365397
2	0,002337	7,462686567	0,060348612

Cuadro 4.5: SMA 100-300

Gráfica de desplazamiento-tiempo. En resonancia, la amplitud de desplazamiento va aumentando conforme el tiempo aumenta 4.10.

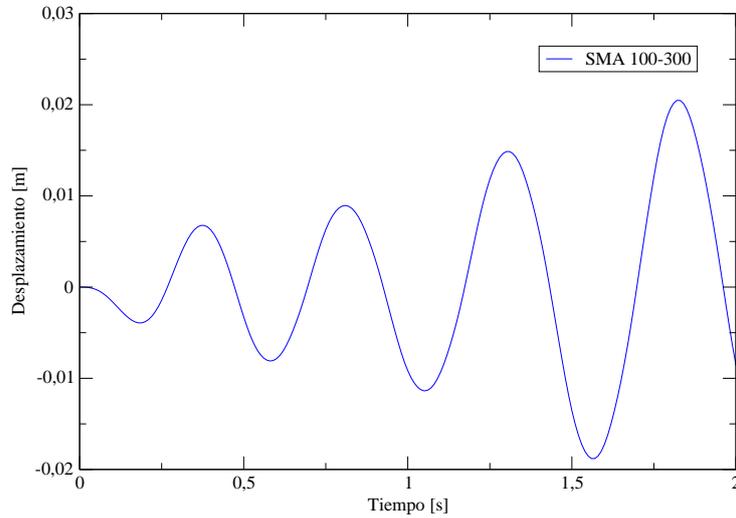


Figura 4.10: Gráfica de desplazamiento-tiempo.

Gráfica de desplazamiento-Fuerza 4.11, en esta gráfica se pueden observar los ciclos del dispositivo SMA 100-300, demostrando así, un diseño efectivo.

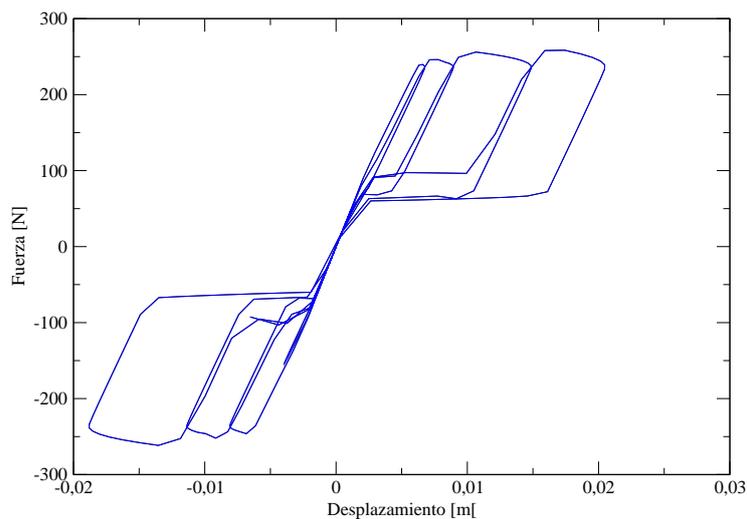


Figura 4.11: Gráfica de desplazamiento-Fuerza.

Gráfica de velocidad-desplazamiento 4.12. Inicialmente, el dispositivo parte del reposo (desplazamiento nulo) y una vez la excitación actúa, el dispositivo se queda oscilando entorno a ese punto. Dado que el dispositivo está en resonancia, cada vez será mayor el valor de la velocidad y del desplazamiento.

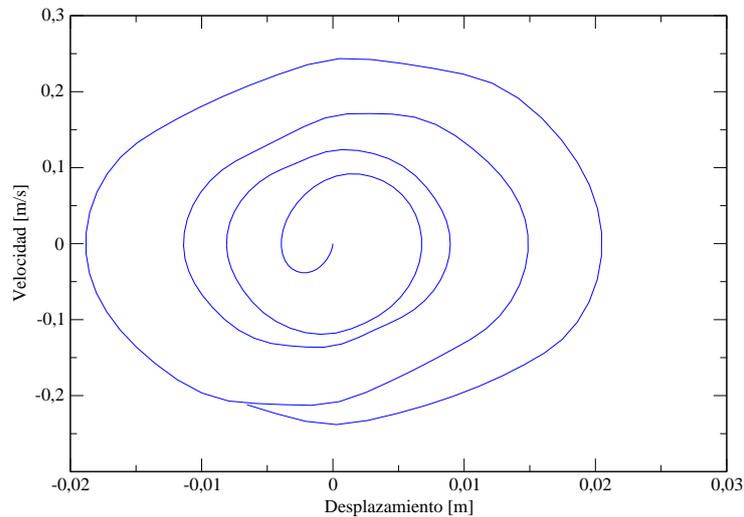


Figura 4.12: Gráfica de velocidad-desplazamiento

4.6. Resultados del ensayo de Fugazza.

Una vez realizados los ensayos a cada uno de los dispositivos, los resultados pueden mostrarse gráficamente representando el periodo normalizado frente al desplazamiento normalizado. Los resultados se muestran en la figura 4.13.

Con la verificación del ensayo de Fugazza queda demostrado que el modelo de SMA en SAP2000 es eficiente. Dicha aportación es importante ya que esto permite disponer de una configuración que simula el comportamiento del SMA en SAP2000. Disponer de un modelo de SMA en SAP2000 puede resultar muy útil para futuras investigaciones en estructuras civiles y en edificación. Ya que podría situarse directamente en la zona a aislar y estudiar directamente el comportamiento de la estructura con dicho dispositivo de aislamiento.

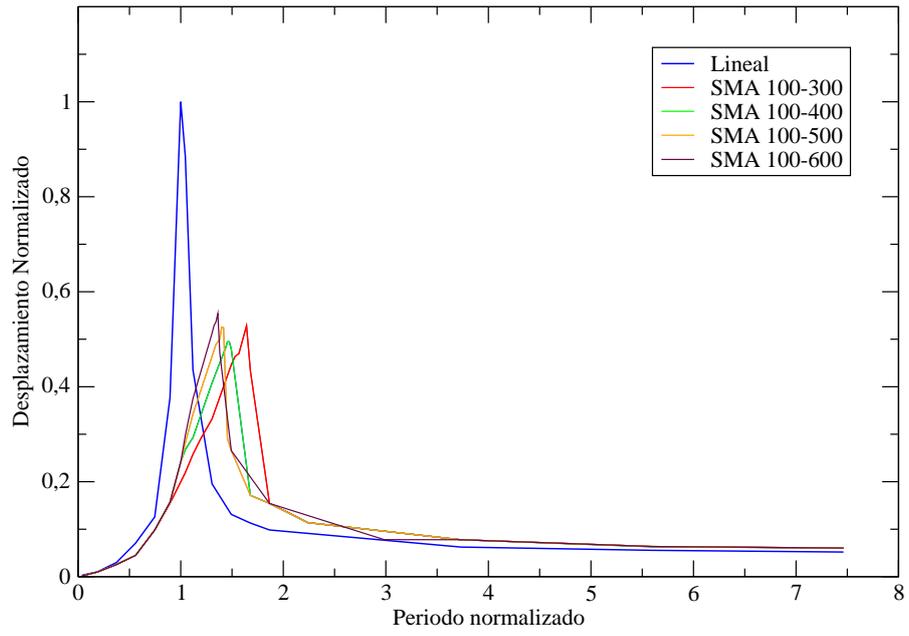


Figura 4.13: Gráfica de desplazamiento normalizado y periodo normalizado.

CAPÍTULO 5

Implementación del dispositivo de SMA en los estribos de un puente.

5.1. Introducción.

Una vez se ha verificado el dispositivo de SMA el siguiente paso consistirá en situarlo en los estribos de un puente, pudiendo así observar si dicho dispositivo provoca la mitigación de los efectos provocados por las excitaciones sísmicas.

El puente elegido para este estudio es el propuesto en el capítulo 8 del Eurocódigo 8 [44], ya que está perfectamente definido e incluso el análisis modal está realizado, por lo cual será usado para la verificación del modelo del puente realizado en SAP2000.

A lo largo de este capítulo se va a describir el puente, se explicarán los modelos, tanto bidimensional como tridimensional, realizados en SAP2000, posteriormente se realizará el análisis del puente tanto con dispositivo de SMA como si el, para así realizar una comparativa de los resultados obtenidos.

5.2. Descripción del puente.

El puente a modelar en este capítulo es un puente simplemente apoyado que consta de 3 vanos de 23.0m+35.0m+23.0m respectivamente, la longitud total es de 82.50m. el tablero consta de una sección de hormigón armado y las pilas son cilíndricas de diámetro 1.20m, la altura de pilas son de 8.0 m para la primera pila y 8.5m para la segunda. La cimentación de las pilas está hecha mediante pilotes. En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se pueden observar la sección longitudinal, la planta y la sección transversal del tablero y pila.

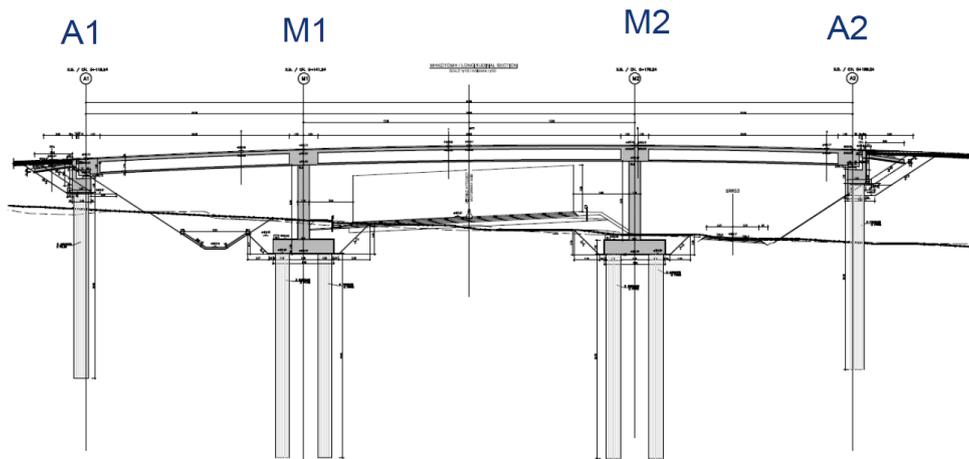


Figura 5.1: Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].

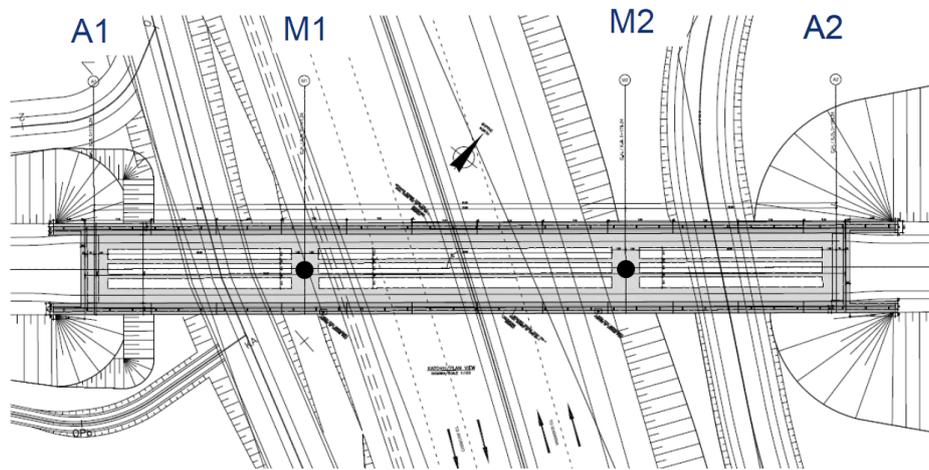


Figura 5.2: Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].

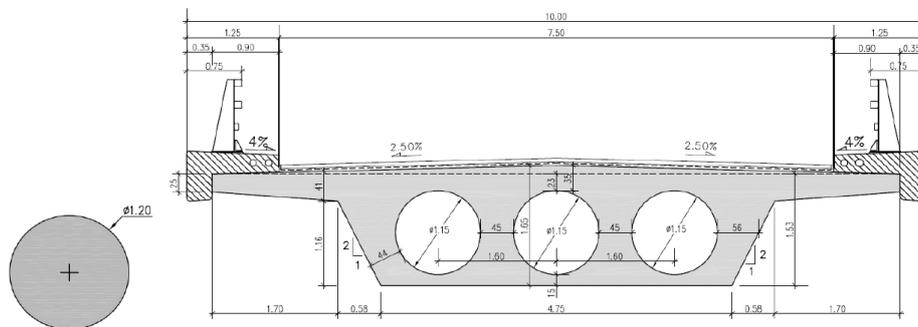


Figura 5.3: Fase de transformación martensita a tensión libre. Tomada de [44].

5.3. Modelo bidimensional.

El modelo bidimensional es un modelo muy simple realizado con la herramienta "Frame" que SAP2000 ofrece. Se han modelado los vanos y pilas con las longitudes y posteriormente se le han aplicado las cargas peso de cada una de las secciones, aunque la geometría de la sección transversal del tablero y la sección de las pilas se ha mantenido. En las pilas y estribos la sección del tablero es cerrada mientras que en el resto es abierta, por tanto, la carga peso de cada una de las secciones es diferente. A continuación, se describen los pesos de cada una de las secciones. El área de la sección vacía es de $6,89m^2$ y la sección llena es de $9,977m^2$.

Las cargas aplicadas en el tablero del puente bajo excitación sísmica son las siguientes:

1. Losa de hormigón (tablero):

$$q_G = (6,89m^2 \times 73,5m + 9,977m^2 \times 9m) \times (25kN/m^3) = 14903 kN \quad (5.1)$$

Si separamos las carga, sección completa y vacía:

$$q_{G1} = 9,977m \times 25kN/m^3 = 249,25 kN/m \rightarrow \text{Sec. llena.} \quad (5.2)$$

$$q_{G2} = 6,89m^2 \times 25kN/m^3 = 172,25 kN/m \rightarrow \text{Sec. vacía.} \quad (5.3)$$

2. Peso muerto:

El área de las barandillas es de $0,5 m^2$, el peso de las barreras de seguridad es de $0,70 kN/m$ y el espesor del pavimento es de $0.1m$ y ancho $7.5m$, por tanto:

$$q_{G3} = 2 \times 25kN/m^3 \times 0,5m^2 + 2 \times 0,70kN/m + 7,5m \times 23kN/m^3 \times 0,1 = 43,65 kN/m \quad (5.4)$$

3. Carga efectiva sísmica.

La carga efectiva sismica es un 20 % de la carga de tráfico distribuida uniformemente:

$$q_L = 45,2 \text{ kN/m} \longrightarrow q_{LE} = 0,20 \times 45,2 \text{ kN/m} = 9,04 \text{ kN/m} \quad (5.5)$$

4. Acción térmica.

La acción térmica consiste en un incremento de +52.5°C y u-45°C en relación a la temperatura de construcción $T_0 = 10^\circ\text{C}$.

Por tanto se ha planteado en SAP2000, un modelo en el cual en la longitud de sección llena tiene una fuerza distribuida de $249,25 \text{ kN/m} + 43,65 \text{ kN/m} + 9,04 \text{ kN/m} = 301,99 \text{ kN/m}$, y en la sección vacía $172,25 \text{ kN/m} + 43,65 \text{ kN/m} + 9,04 \text{ kN/m} = 224,99 \text{ kN/m}$. La configuración se puede observar en la figura 5.4.

El peso total del tablero será:

$$W_{total} = 14903 \text{ kN} + (43,65 \text{ kN/m} + 9,04) \times 82,50 \text{ m} = 19250,55 \text{ kN} \quad (5.6)$$

La masa total del tablero será:

$$M_{total} = \frac{19250,55 \text{ kN}}{9,81} = 1962,34 \text{ tn} \quad (5.7)$$

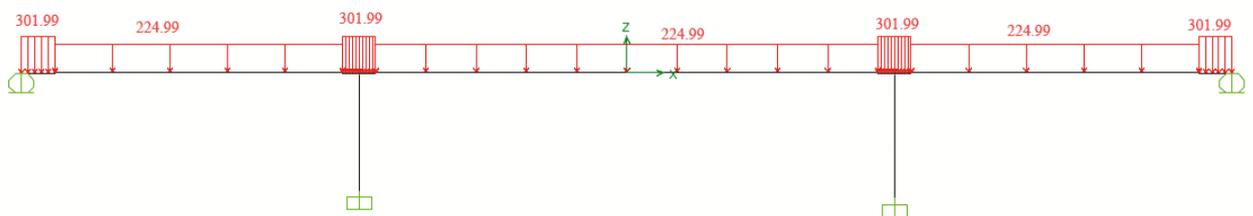


Figura 5.4: Configuración del puente en 2D.

5.4. Modelo tridimensional.

En el modelo tridimensional se va a hacer uso del elemento “shell”, este elemento permite modelizar placas. Con Shell podemos definir el pavimento de mezcla bituminosa así como las barandillas y las barreras de seguridad. La losa se ha mallado tal y como se muestra en la figura 5.5, en la zona de pilas y estribos (dónde la sección es completa) el mallado es diferente, esto es así para conseguir una división homogénea de la losa. En el resto se mantienen las mismas dimensiones que las mostradas en dicha figura.

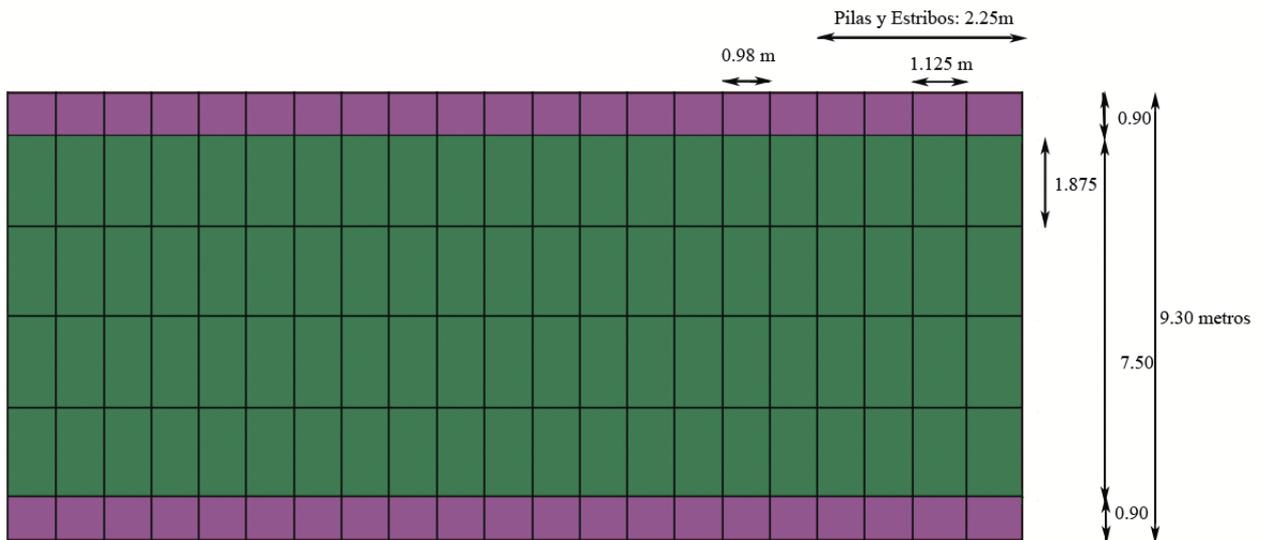


Figura 5.5: Mallado de la losa superior del puente. Cargas muertas.

La sección transversal de hormigón se ha introducido en SAP2000 gracias a la opción “section designer”, en esta sección del programa se puede introducir cualquier geometría, y siempre y cuando se le asigne previamente el material del cual está compuesto, todo quedará perfectamente definido. Las secciones introducidas de hormigón C30/37 son las que se muestran en la figura 5.6, 5.7. Para conseguir que SAP200 considere la unión entre la losa de hormigón y la sección de hormigón se han generado una serie de “joins constraints tipo body”, las cuales son útiles para indicar que losa y sección deben ser solidarias en su movimiento.

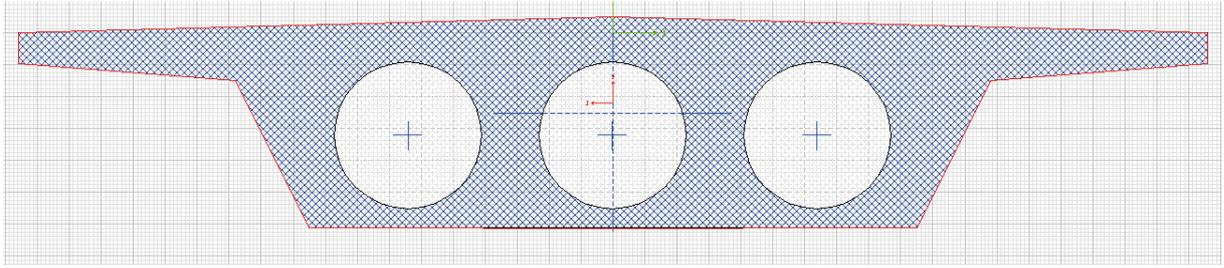


Figura 5.6: Sección transversal en pilas y estribos.

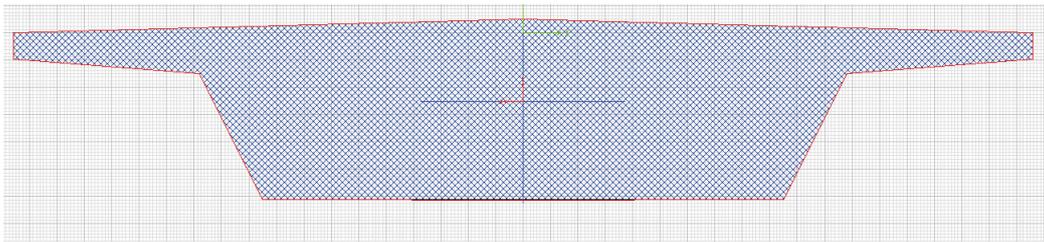


Figura 5.7: Sección transversal en el centro de los vanos.

Con todo esto, el modelo final queda tal y como se muestra en las siguiente figuras:

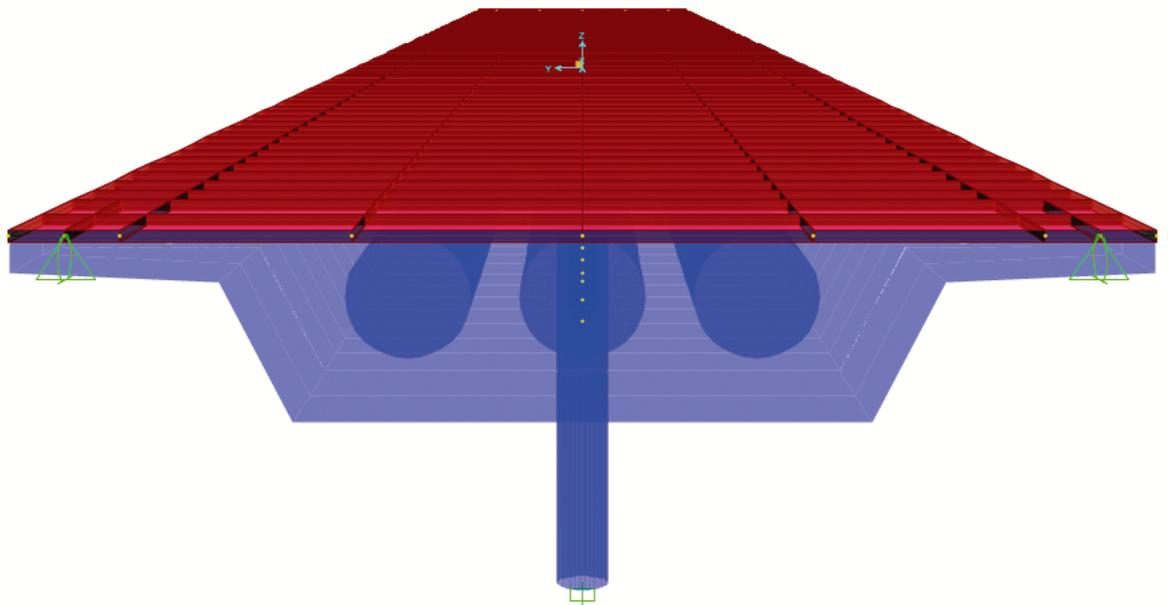


Figura 5.8: Vista del modelo de puente generado en SAP2000.



Figura 5.9: Vista del modelo de puente generado en SAP2000.

5.5. Análisis modal.

Como ya hemos visto en la ecuación 5.3, el peso total del tablero es de 19250.55 kN y la masa total del tablero de 1962.34 tn. Para conocer el periodo fundamental de la estructura necesitamos conocer la rigidez del sistema, ya que:

$$T = 2 * \pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (5.8)$$

Las pilas son cilíndricas de diámetro 1.20 metros, por lo tanto la rigidez del sistema será:

$$K_T = K_{PILA1} + K_{PILA2} = \frac{12EI}{(H_1)^3} + \frac{12EI}{(H_2)^3} \quad (5.9)$$

Sin embargo, tal y como indica el Eurocódigo 8, se asume un momento de inercia del 40 %, por tanto:

$$K_T = \frac{12EI_{0,4}}{(H_1)^3} + \frac{12EI_{0,4}}{(H_2)^3} \quad (5.10)$$

Sustituyendo valores:

$$K_T = \frac{12\ 33000 \left(\frac{\pi 1,2^4 0,4}{8^3}\right)}{(H_1)^3} + \frac{12\ 33000 \left(\frac{\pi 1,2^4 0,4}{8,5^3}\right)}{(H_1)^3} = 57,8\text{MN/m} \quad (5.11)$$

Resultando un periodo fundamental de:

$$T = 2 * \pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2 * \pi \sqrt{\frac{1962,34}{57800}} = 1,16 \text{ segundos.} \quad (5.12)$$

5.5.1. Modos de vibración

A partir del análisis modal, realizado en SAP2000, se obtienen los siguientes modos de vibración. A continuación se muestran los cuatro primeros modos de vibración.

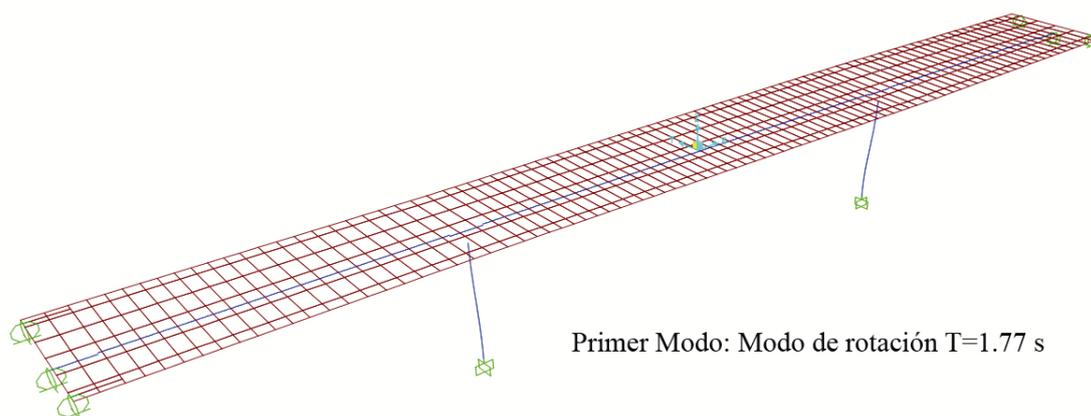


Figura 5.10: Primer modo de vibración, modo rotacional de vibración.

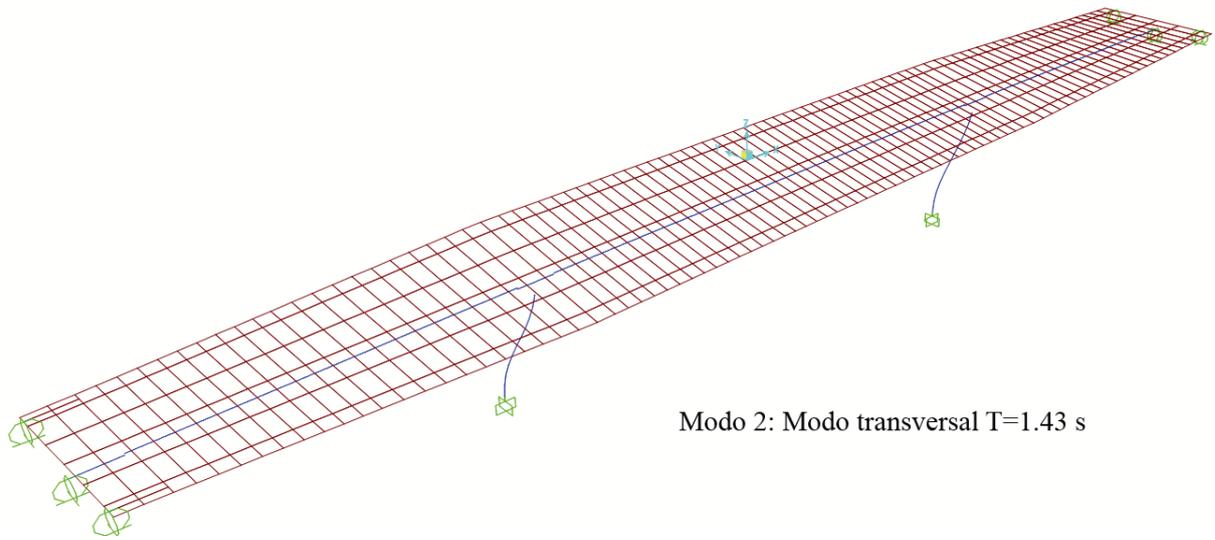


Figura 5.11: Segundo modo de vibración, modo transversal de vibración.

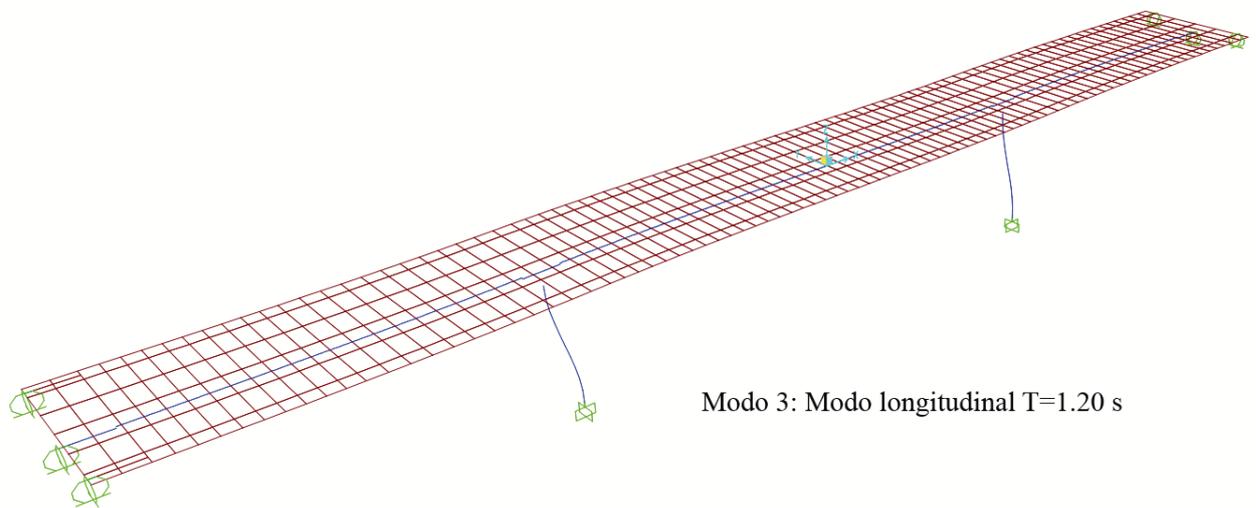


Figura 5.12: Tercer modo de vibración, modo longitudinal de vibración.

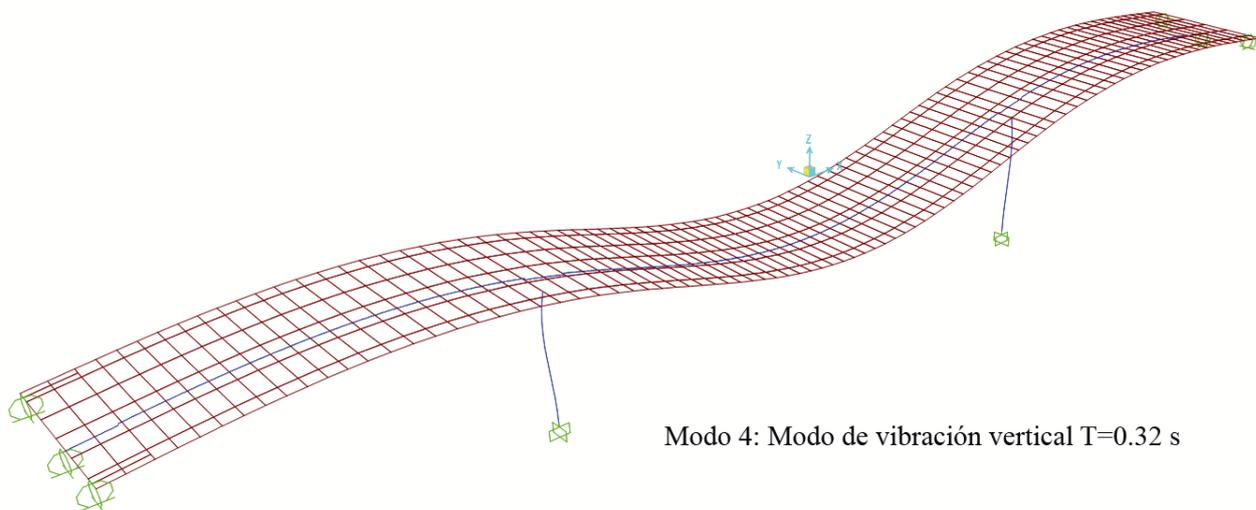


Figura 5.13: Cuarto modo de vibración, modo vertical de vibración.

5.6. Descripción de la acción sísmica.

5.6.1. Espectro de diseño

Para el cálculo de la respuesta de la estructura bajo acción sísmica, como primera opción, se puede usar el espectro de respuesta. Para el diseño del espectro de respuesta necesitamos los siguientes datos.

DATOS PARA EL DISEÑO DEL ESPECTRO DE RESPUESTA
Suelo tipo C
$T_B = 0,20 \text{ s}$
$T_C = 0,60 \text{ s}$
$T_D = 2,50 \text{ s}$
$S=1.15$
Zona sísmica Z1
$a_{gr} = 0,16g$
$\gamma_1 = 1,0$
$\beta = 0,20$

Cuadro 5.1: Datos para la definición del espectro de respuesta

La acción sísmica en la componente horizontal es $a_g = \gamma_1 a_{gR} = 1,0 0,16g = 0,16g$.

El espectro de respuesta se muestra en la figura 5.14.

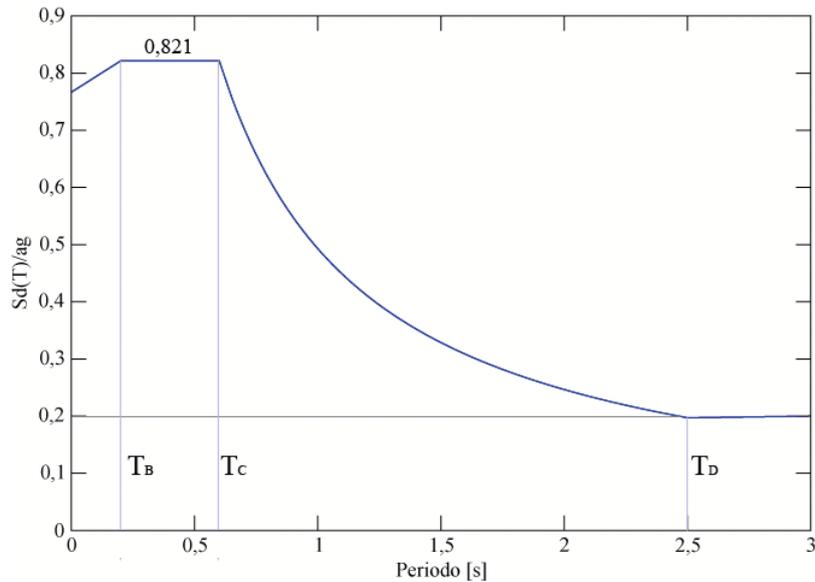


Figura 5.14: Espectro de respuesta.

Si introducimos este espectro de respuesta en SAP2000, podemos calcular la respuesta de la estructura bajo dicho espectro. Con este análisis obtenemos el desplazamiento máximo del tablero $\delta = 0,02412 \text{ m} = 24,12 \text{ mm}$, dato que será utilizado para el correcto diseño del dispositivo de SMA necesario para esta estructura.

5.6.2. Acelerogramas usados para el análisis tiempo-historia

Para el análisis tiempo-historia de la estructura se van a usar dos acelerogramas:

1. **Sismo "El Centro"**, acontecido en 1940 al sur de California en Imperial Valley. Tuvo una magnitud de 6.9 en la escala de Mercalli. El registro sísmico de este movimiento quedó perfectamente registrados, es por ello, que es usado en numerosos estudios. Es un referente en ingeniería sísmica. El registro se puede observar en la figura 5.15. El registro sísmico se puede encontrar en numerosas páginas de internet así como libros, por ejemplo en el libro "Dynamics of structures" [5] se puede encontrar el registro completo. El registro consta de 2687 puntos, con intervalo de tiempo de 0.02 segundos, por lo que, el registro completo dura 53.74 segundos.
2. **Acelerograma compatible con espectro de respuesta.** Se ha generado un registro sísmico a partir del espectro de respuesta con el programa "Aceleros". Se muestra en la figura 5.16.. Este registro consiste en 4000 puntos con un intervalo de tiempo de 0.005 segundos, por lo que, el registro total dura 20 segundos.

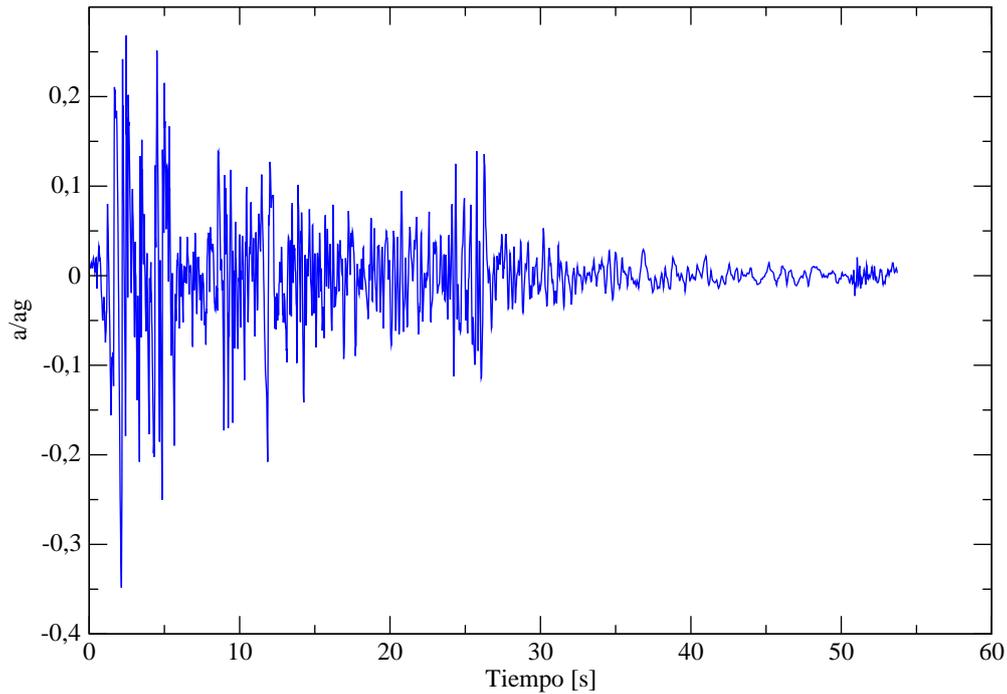


Figura 5.15: Registro sísmico El Centro.

Ambos acelerogramas están sin escalar. como se puede observar, el eje de ordenadas esta expresado como a/a_g . Si escalamos los acelerogramas, obtenemos el valor real de aceleración.

El sismo frecuente es aquel sismo que ocurre con una alta probabilidad, corresponde a un periodo de retorno de 100 años. Para representar este caso se va a usar el acelerograma compatible con espectro de respuesta escalado 0.16g. Se ha elegido este acelerograma ya que los sismos frecuentes son de menor duración.

El sismo básico es aquel sismo de baja probabilidad, que corresponde a un periodo de retorno de 500 años, por lo tanto para representar dicho sismo se ha elegido el acelerograma de El Centro escalado 0.32g.

5.7. Calibración del dispositivo

Se van a diseñar dos dispositivos de SMA, compuestos de nitinol, para el estudio de esta estructura. Para el diseño efectivo del dispositivo necesitamos dos datos, la rigidez del

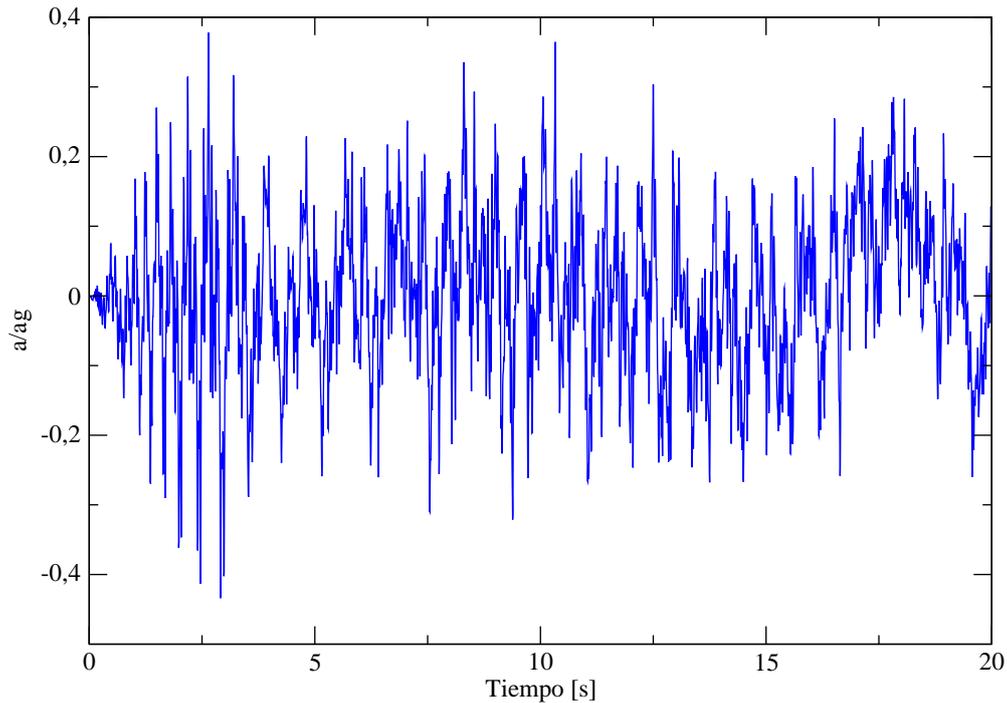


Figura 5.16: Acelerograma compatible con espectro de respuesta.

sistema y el desplazamiento máximo que obtuvimos en el cálculo de la estructura bajo el espectro de respuesta.

El dispositivo, en su fase inicial, debe comportarse de forma elástica para poder permitir los movimientos térmicos, por lo que la rigidez de esta primera fase debe ser la misma que la de la estructura.

Teniendo en cuenta el desplazamiento de 0.02414 metros, que es el desplazamiento del tablero bajo espectro de respuesta, se han diseñado dos SMA.

Un primer SMA en el que el link plástico no comienza a trabajar hasta que no se alcanza una fuerza de 50 kN, y que la plastificación se produce a 250 kN. Por lo que a partir de ahora se va a nombrar como SMA250. Se muestra en la figura 5.17.

Un segundo SMA en el que el link plástico no comienza a trabajar hasta que no se alcanza una fuerza de 100 kN, y que la plastificación se produce a 500 kN. Por lo que a partir de ahora se va a nombrar como SMA500. Se muestra en la figura 5.18.

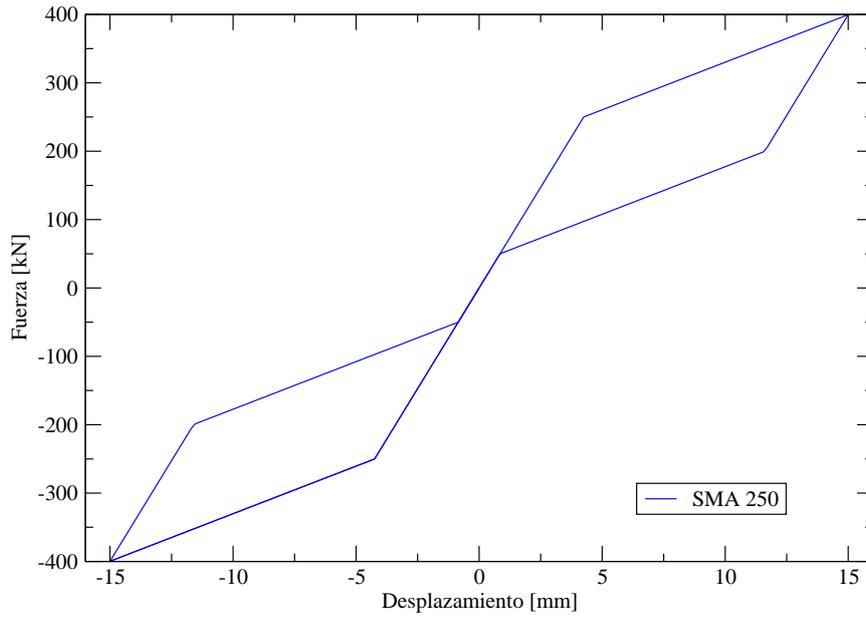


Figura 5.17: SMA250.

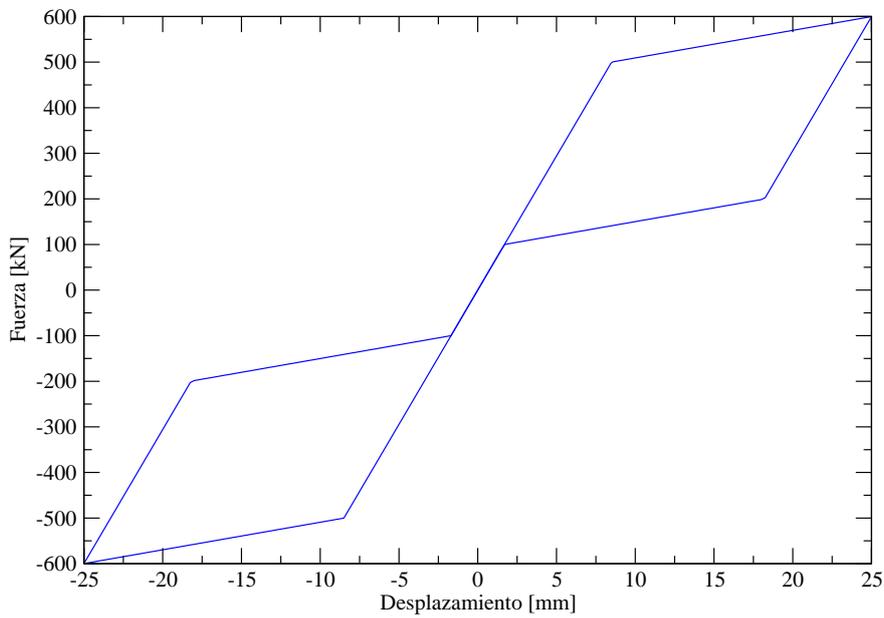


Figura 5.18: SMA500.

5.8. Aplicación de la carga sísmica al puente.

Para poder realizar un análisis tiempo-historia en SAP2000 es necesario introducir el registro de aceleraciones en el apartado "Define Time History Functions", en esta sección se

pueden introducir funciones desde un archivo independiente y así es como se va a realizar.

Una vez introducido los acelerogramas, se define el caso de carga, es aquí donde se escalan los registros. Se realiza un análisis no lineal de integración directa mediante el método de Newmark. Se introduce la función tiempo-historia como una aceleración en la dirección U1. Un factor de escala es de 0.16g se le aplicará al acelerograma compatible con espectro de respuesta para representar al sismo frecuente, y, un factor de escala de 0.32g se ha introducido al acelerograma de El Centro, representando así un sismo básico. Con este análisis podemos conocer el desplazamiento en cada instante de tiempo.

Se va a realizar el análisis del puente bajo el acelerograma de El Centro y el acelerograma compatible con espectro de respuesta. Una vez realizado el análisis, es posible obtener una gráfica de desplazamientos en SAP2000.

De esta forma obtenemos los desplazamientos en el extremo del tablero bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta (figura 5.19), así como bajo El Centro (Figura 5.20).

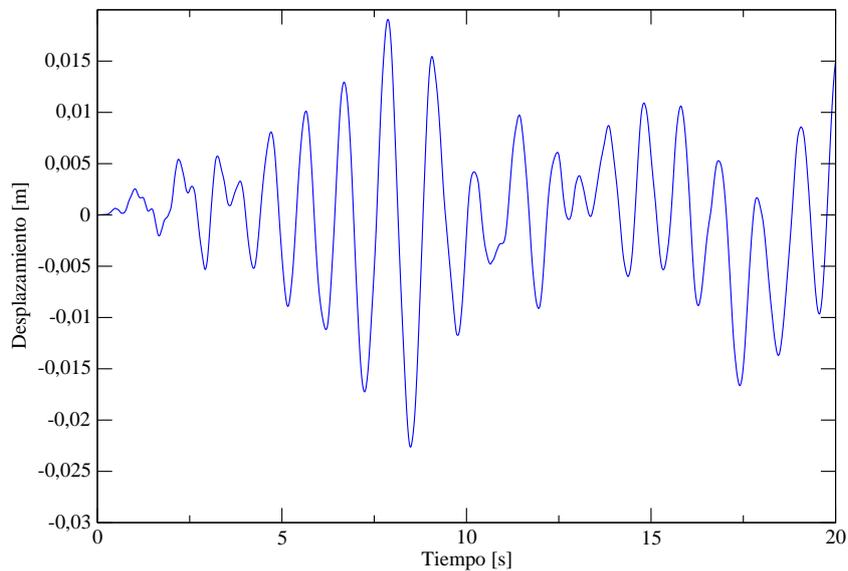


Figura 5.19: Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta, sismo frecuente.

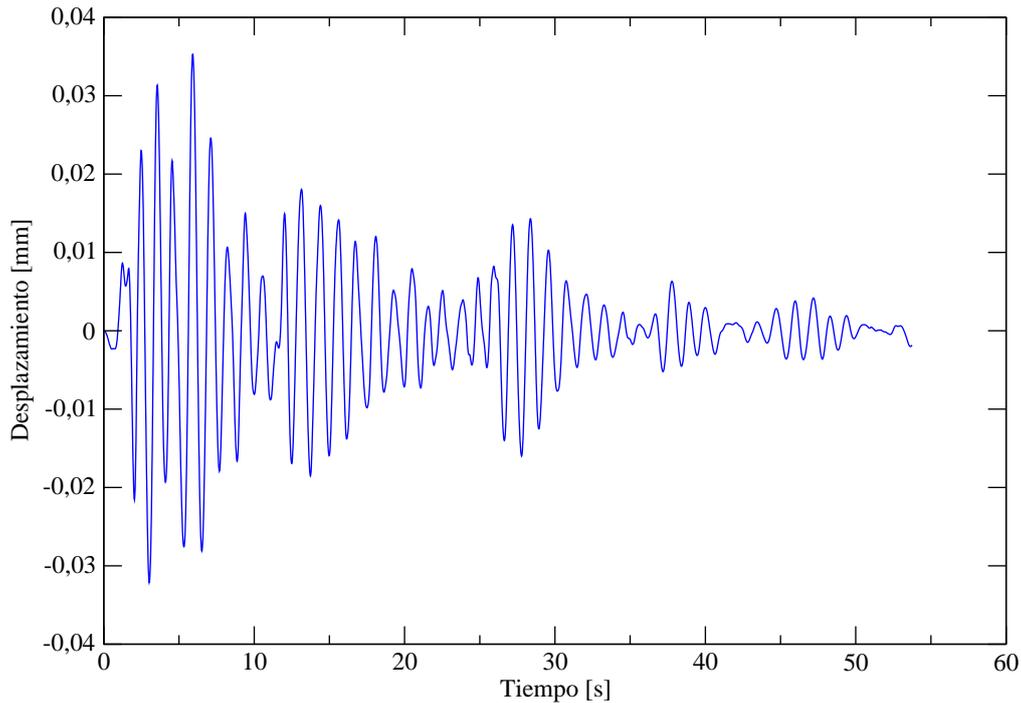


Figura 5.20: Desplazamientos bajo El Centro, sismo básico.

5.9. Aplicación de la carga sísmica al puente con SMA en estribos.

Si realizamos el mismo cálculo que en el apartado anterior al modelo del puente con el dispositivo de SMA implementado, podemos obtener la gráfica de desplazamientos en el extremo del tablero. A continuación se muestran dichas gráficas para el modelo del puente con el SMA250 implementado en estribos, y posteriormente, para el caso de SMA500.

5.9.1. SMA250

En el modelo del puente con el SMA250 implementado en los estribos, se producen los siguientes desplazamientos: en la gráfica 5.21, se pueden observar los desplazamientos en el extremo del tablero cuando este está sometido al acelerograma compatible con espectro de respuesta, y en la gráfica 5.22, cuando está sometido a El Centro.

A continuación se muestran cómo está trabajando el SMA250 bajo ambas excitaciones sísmicas.

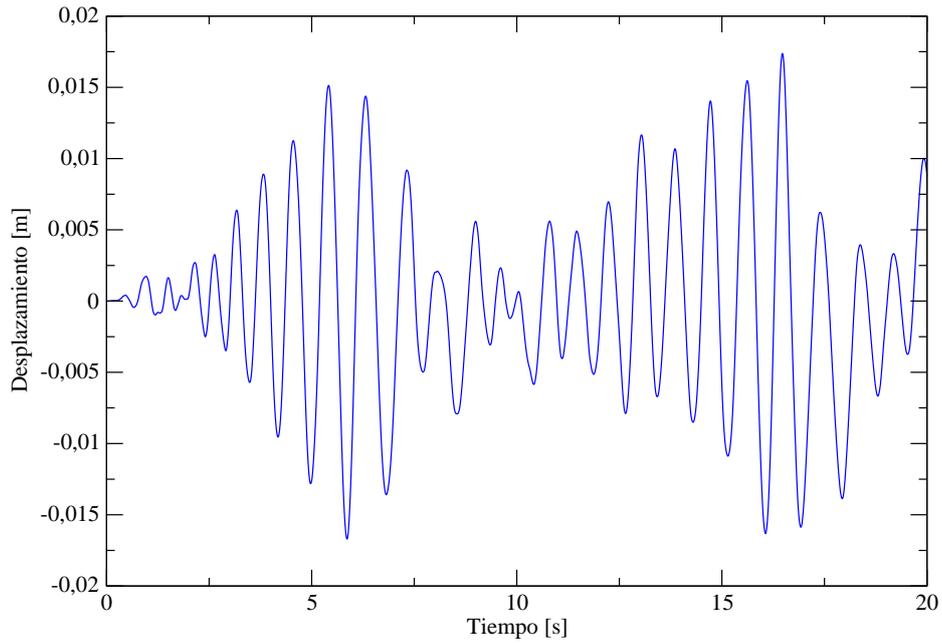


Figura 5.21: Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta en el modelo del puente con SMA250 implementado.

Si el dispositivo está sometido a un sismo frecuente el SMA trabaja dentro de sus ciclos y al final de la excitación se quedará en una posición desde la cual la siguiente excitación comenzará a actuar (figura 5.23). Sin embargo cuando el sismo es de mayores aceleraciones, el dispositivo si requerirá de un recentrado, mediante calor, tal y como se puede observar en la figura 5.24

5.9.2. SMA500

Realizando el mismo análisis al modelo del puente con SMA500 implementado en estribos, obtenemos los siguientes resultados.

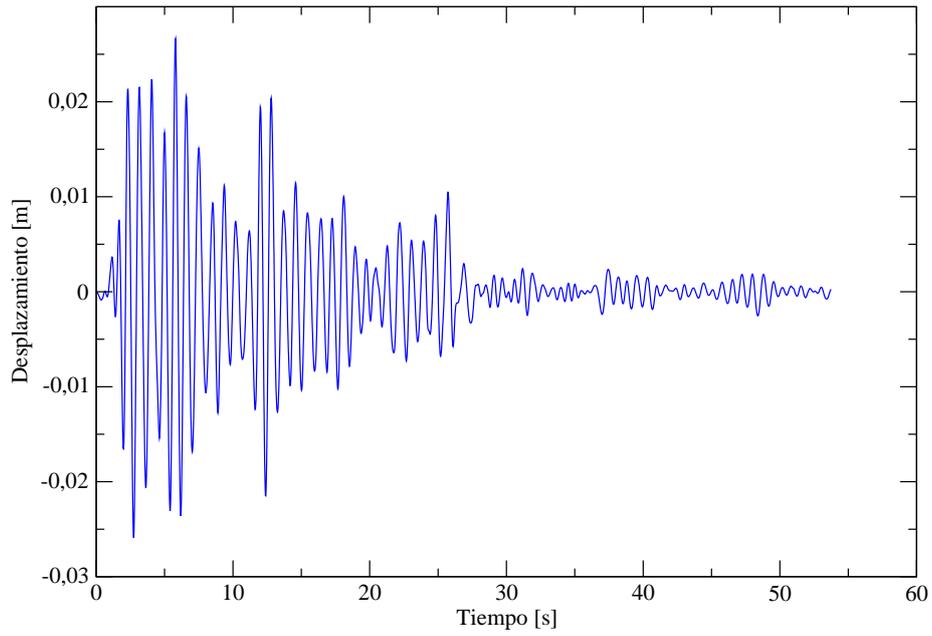


Figura 5.22: Desplazamientos bajo El Centro en el modelo del puente con SMA250.

5.10. Comparación y conclusiones.

A continuación se muestran una serie de gráficas en las que se superponen desplazamientos, para poder así comparar y ver el efecto de reducción de desplazamiento:

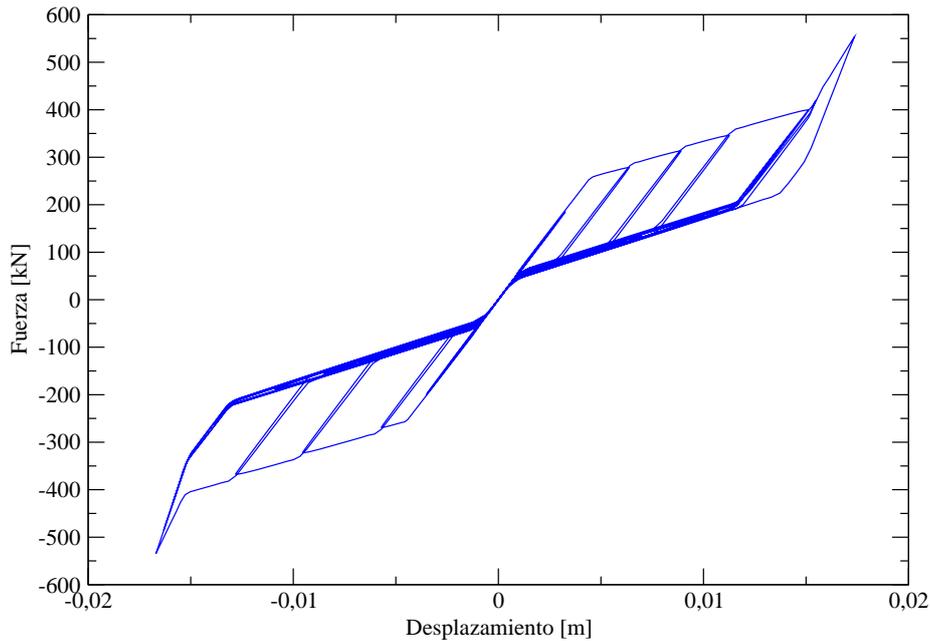


Figura 5.23: Ciclos del SMA 250 cuando este está sometido al acelerograma compatible con espectro de respuesta.

Si se le dota a la estructura propuesta de un dispositivo de SMA el desplazamiento que provoca una acción sísmica se ve mitigado.

A la vista de las gráficas se puede pensar que no merece la pena el uso de SMA, pues no se consigue una gran mitigación de los desplazamientos, pero el lector debe tener en cuenta que en este proyecto el SMA sólo ha sido implementado en estribos, y si se tienen en cuenta la unión pila-tablero y ahí se sitúan SMA la mitigación puede ser mucho mayor.

Además de reducir los desplazamientos, también se produce la homogeneización de la respuesta, lo cual es muy favorable para la unión en los estribos ya que se evita el denominado “martilleo” en la unión y el posible deslizamiento del tablero.

El recentrado del SMA solamente sería necesario tras el paso del sismo básico, pues si el dispositivo de SMA es de nitinol, bajo sucesivos sismos frecuentes, aunque el SMA no parta del origen, es capaz de continuar en el punto en el que quedó en la anterior excitación. Una buena línea de investigación para futuros estudios sobre el tema, sería cambiar el material de SMA, con esto se abarataría el coste del dispositivo aunque la manutención y recentrado del dispositivo debería ser bastante más cautelosa. Puede ser interesante un estudio económico del material y de la manutención, comparando SMA de nitinol, cobre o hierro-manganeso.

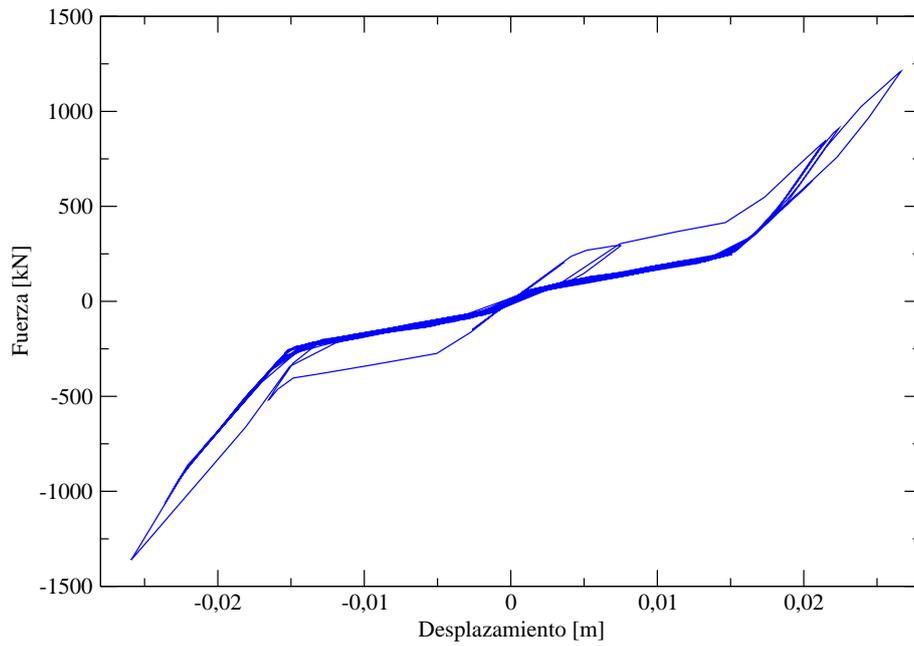


Figura 5.24: Ciclos del SMA 250 cuando este está sometido a la excitación sísmica de El Centro.

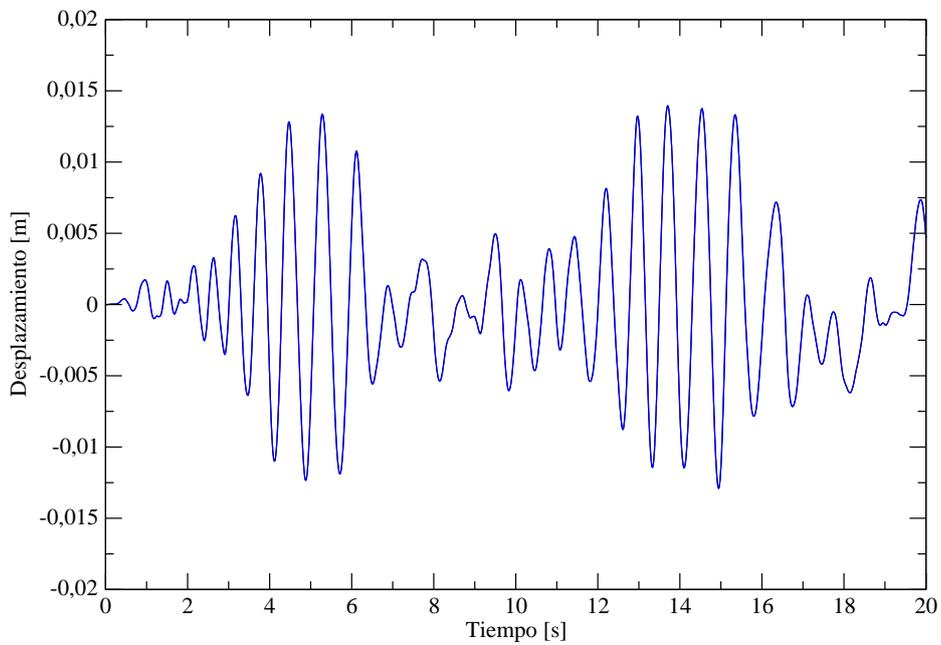


Figura 5.25: Desplazamientos bajo el acelerograma compatible con espectro de respuesta en el modelo del puente con SMA500 implementado.

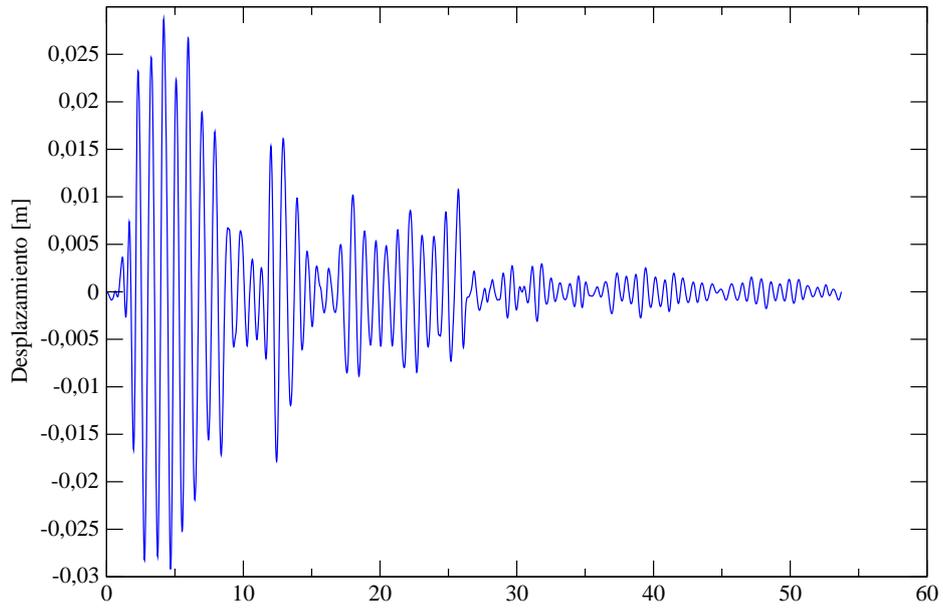


Figura 5.26: Desplazamientos bajo El Centro en el modelo del puente con SMA500.

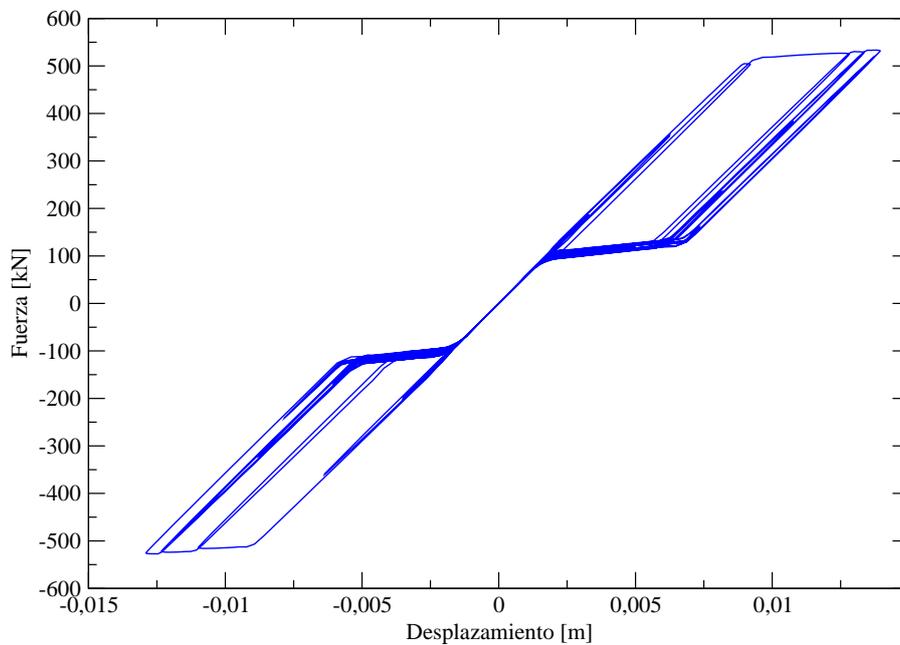


Figura 5.27: Ciclos del SMA 500 cuando este está sometido al acelerograma compatible con espectro de respuesta.

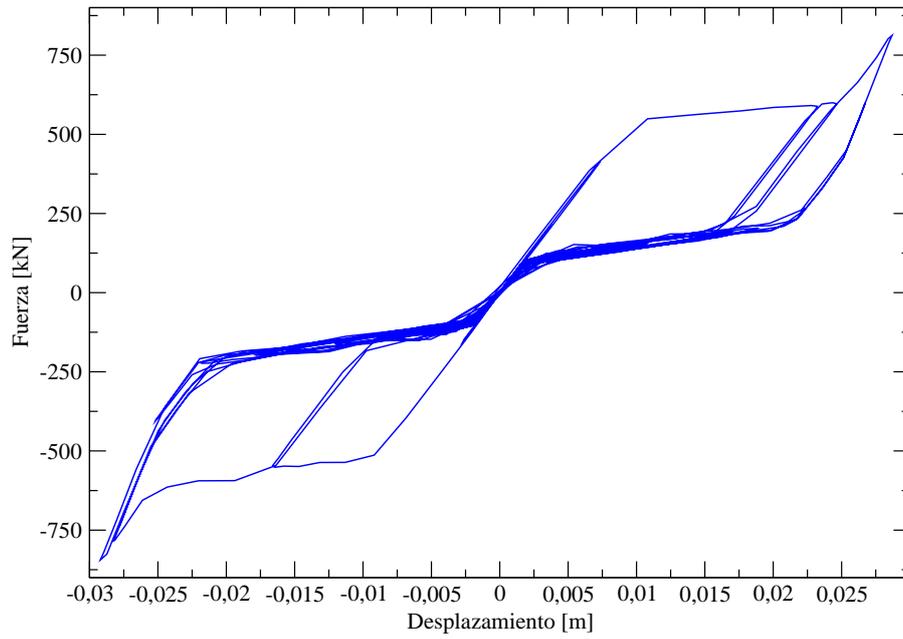


Figura 5.28: Ciclos del SMA 500 cuando este está sometido a la excitación sísmica de El Centro.

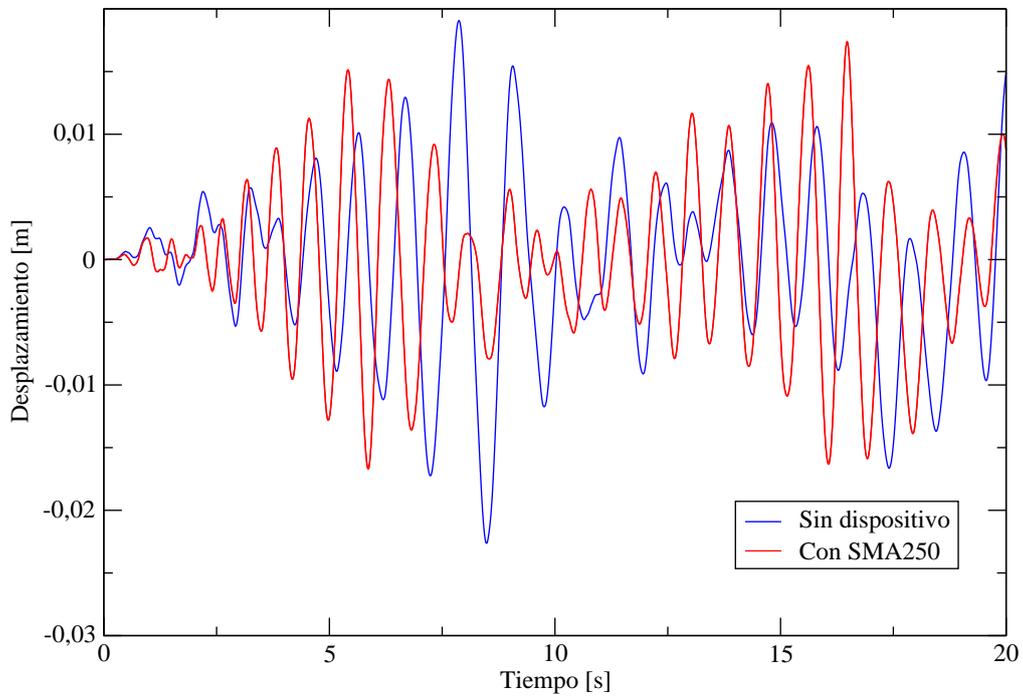


Figura 5.29: Desplazamientos bajo la excitación del acelerograma compatible con espectro de respuesta

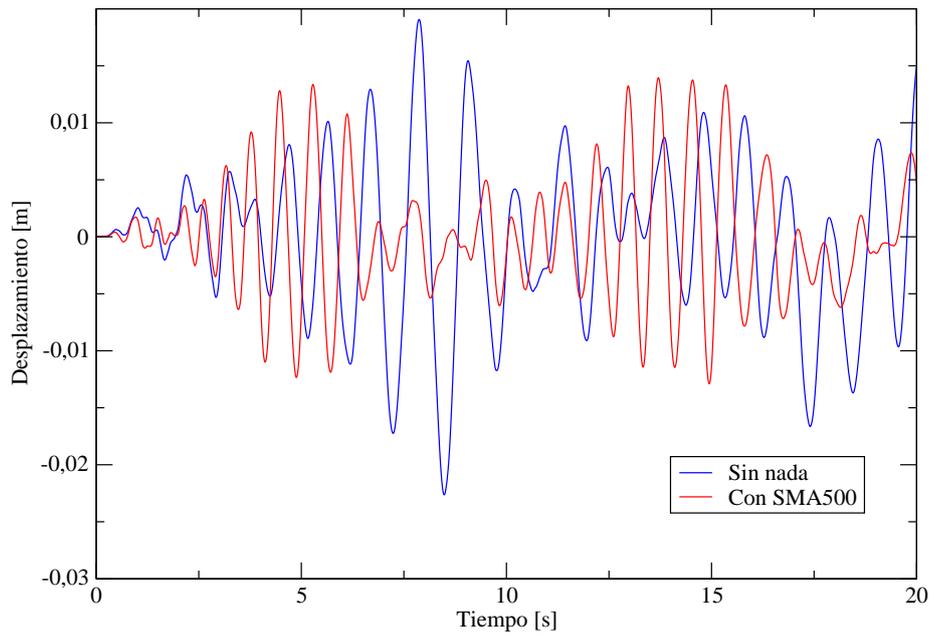


Figura 5.30: Desplazamientos bajo la excitación del acelerograma compatible con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA500

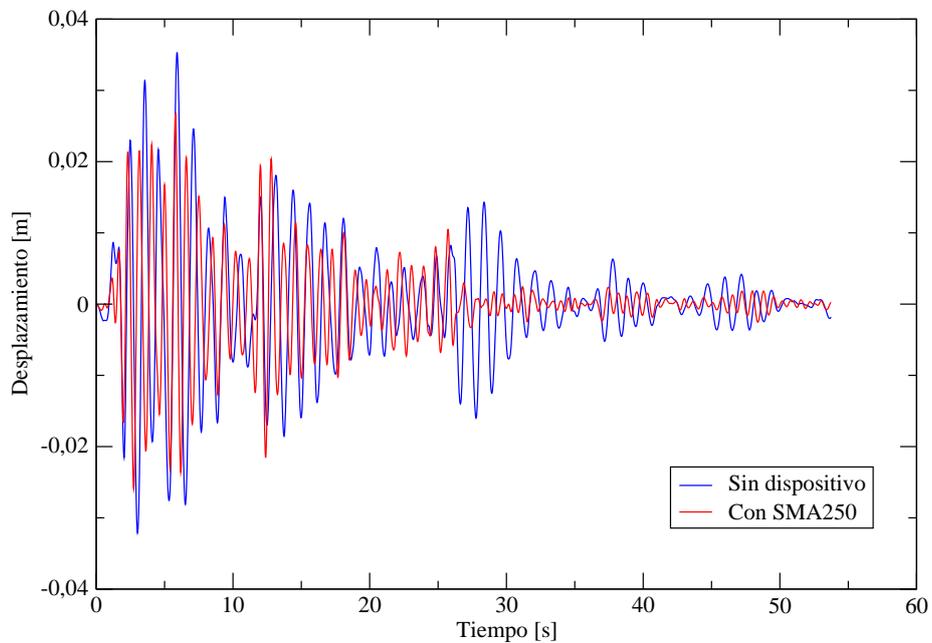


Figura 5.31: Desplazamientos bajo la excitación de El Centro con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA250

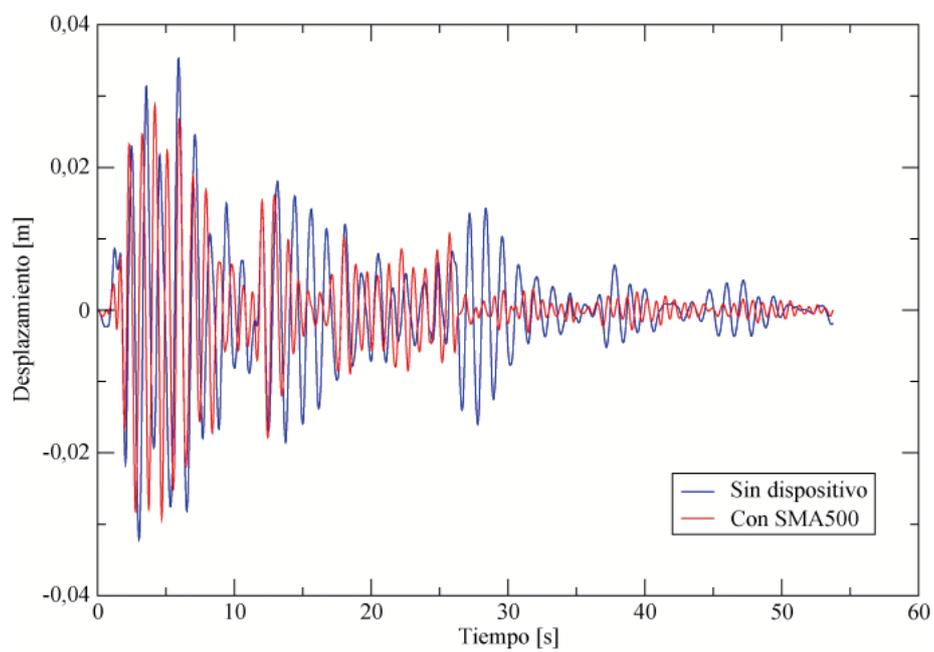


Figura 5.32: Desplazamientos bajo la excitación de El Centro con espectro de respuesta del modelo sin nada y el modelo con SMA500

CAPÍTULO 6

Conclusiones

El principal objetivo de este proyecto de investigación era la implementación de un dispositivo de SMA en el programa SAP2000 ya que esto supone un ahorro de tiempo importante para futuras investigaciones.

El programa elegido para la modelación del dispositivo ha sido SAP2000 porque este software es un referente hoy en día en el cálculo de estructuras. En este programa se disponen de los elementos link, lo cual es de gran ayuda para modelar el SMA. El programa también permite realizar el análisis tiempo-historia, que también ha sido de gran utilidad para poder realizar el cálculo dinámico de un puente bajo acción sísmica. Estas dos herramientas fueron determinantes para la elección de dicho programa.

El uso de SAP2000 ofrece grandes ventajas, sin embargo, también tiene algunos inconvenientes. La interfaz de SAP2000 es menos intuitiva que la de otros programas de cálculo estructural, lo que hace que los comienzos con este programa sea un camino más arduo. Además, he de mencionar que para otros programas existen numerosos manuales, pero no sucede así con SAP2000, manuales de SAP2000 usados: [30], [18]. Otro inconveniente que SAP2000 tiene en la reproducción de esta investigación es el tiempo empleado en los cálculos, para realizar un análisis tiempo-historia SAP2000 requiere de un tiempo, desde mi punto de vista, elevado, por ejemplo el análisis más duradero realizado duró aproximadamente 22 horas.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este proyecto de investigación son que, es posible modelar el comportamiento mecánico de un dispositivo de SMA en SAP2000 mediante la configuración adecuada de los elementos link. Por otro lado, se ha demostrado que si se sitúan dichos dispositivos en los estribos de un puente sometido a una excitación sísmica, los desplazamientos se van a ver mitigados.

A continuación se exponen posibles líneas de investigación futuras:

1. El modelo de SMA desarrollado en SAP2000 consiste en un SMA compuesto de Nitinol, ya que de este modo el comportamiento cíclico del SMA es duradero y perfectamente definido. Sin embargo, como ya se ha comentado, este material tiene un coste elevado. Existen otro tipo de SMA, por ejemplo los de cobre o hierro-manganeso, que en principio tienen el mismo comportamiento, pero en un número determinado de ciclos deben ser recentrados. Estos son bastante más económicos, pero la manutención es más cara. Sería interesante realizar un estudio económico de ambos SMA, teniendo en cuenta construcción y manutención.
2. Otra línea de investigación posible, sería estudiar el comportamiento de un puente de ferrocarril de alta velocidad con un SMA implementado, esto es interesante porque estos puentes tienen mucha masa en el tablero (debido al balasto). Con el uso del SMA se puede controlar los movimientos bajo el sismo, o incluso bajo el paso del tren.

APÉNDICE A

El problema dinámico. Sísmica

A.1. Introducción

A.1.1. *El problema dinámico*

EL principal objetivo del análisis estructural es conocer el comportamiento de la estructura bajo diferentes cargas y obtener la información necesaria para su diseño. El análisis estructural puede ser clasificado de dos formas, análisis estático y análisis dinámico. El *análisis estático* es independiente del tiempo mientras que el *análisis dinámico* considera las cargas dinámicas que son aquellas en las que magnitud, dirección y posición varían en el tiempo.

Ecuación del movimiento

La respuesta de una estructura depende de su masa, rigidez y amortiguamiento. La ecuación del movimiento de una estructura en vibración libre es la siguiente:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (\text{A.1})$$

Ecuación del movimiento bajo excitación sísmica:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (\text{A.2})$$

A.1.2. *La acción sísmica*

Las tres formas de caracterizar el terremoto a efectos de cálculo sismorresistente son:

- Mediante acelerogramas
- Mediante espectros elásticos de respuesta
- Mediante espectros de input de energía

Acelerogramas

Un acelerograma es un registro de aceleraciones del suelo en intervalos de tiempo determinados, dichas aceleraciones son medidas con un acelerógrafo el cual proporciona normalmente tres componentes traslacionales del movimiento del suelo, dos horizontales y una vertical: NS (Norte-Sur), EW (Este-Oeste) y UP (vertical). Las características más importantes de los acelerogramas son:

- La amplitud del acelerograma, que se puede caracterizar por el valor máximo de aceleración del suelo PGA (peak ground acceleration).
- El contenido de frecuencias.
- La duración.

A partir de PGA, mediante integración podemos obtener PGV (peak ground velocity) y PGD (peak ground displacement), la aceleración puede ser expresada en m/s^2 , sin embargo será expresada como un porcentaje de aceleración de la gravedad.

Conocido el acelerograma, la respuesta de la estructura frente al mismo se puede calcular con precisión mediante un cálculo dinámico directo.

Espectro elástico de respuesta

El cálculo dinámico directo nos da la respuesta exacta de un sistema sometido a una determinada excitación sísmica definida mediante acelerogramas. Para proyectar adecuadamente una estructura mediante cálculos dinámicos directos se requiere un gran esfuerzo de cálculo, por lo que solamente se justifica en estructuras singulares. Como segunda alternativa de cálculo está el método de espectro elástico de respuesta, el cual permite realizar el cálculo sísmico de forma mucho más sencilla. Los espectros elásticos de respuesta para una determinada región que se emplean en el método que lleva su nombre, representan la envolvente de los valores máximos de respuesta para un conjunto de sismos similares a los esperables en dicha región.

Al método de los espectros elásticos de respuesta se le llama también análisis modal espectral. El método de los espectros elásticos de respuesta utiliza el concepto del desacoplamiento modal del método de superposición modal, pero a diferencia de éste, lo que proporciona no es la respuesta exacta en cada instante del tiempo, sino una aproximación de la respuesta máxima. Más concretamente, en el análisis modal espectral lo que hace es, primero, obtener la respuesta máxima de la estructura en cada modo de vibración, y después combinar las respuestas máximas en cada modo de vibración mediante unas reglas aproximadas que permiten hacer una estimación de la respuesta máxima total.

La norma sísmica española NCSP-07 utiliza los métodos tradicionales de proyecto sismorresistente basados en la resistencia. En ella, la acción sísmica se caracteriza en términos de fuerzas mediante espectros elásticos de respuesta. Dichas fuerzas sísmicas de cálculo están reducidas en función de la ductilidad de la estructura. La NCSP-07 emplea el análisis modal espectral (o método de los espectros de respuesta) como método general de cálculo. Es importante señalar que la norma NCSP-07 está centrada fundamentalmente en la verificación de la seguridad, es decir, en la consideración de un estado límite último en el que la estructura sometida al terremoto más severo esperable en la zona con una probabilidad razonable (terremoto de proyecto) no colapsa, pero puede sufrir daños estructurales que la norma califica de "...más o menos importantes..." pero sí cuantificarlos. La norma NCSP-07 no considera de forma explícita y directa otros estados límites orientados al control del daño, aunque indica en su articulado que los tiene en cuenta de forma indirecta a través de la limitación del valor máximo del coeficiente de comportamiento por ductilidad. En el apartado A.1.4 se puede consultar la definición del espectro elástico de respuesta que propone dicha normativa.

Espectros de input de energía. Métodos basados en el concepto de la energía de Housner-Akiyama

El fundamento de los métodos de proyecto sismorresistente basados en el balance energético de Housner-Akiyama está en la ecuación de balance de energía: [6]

$$W_e + W_D + W_p = E \quad (\text{A.3})$$

Donde, el primer miembro representa la capacidad sismorresistente de la estructura, y el segundo miembro el efecto de carga del terremoto. La condición que establecen estos métodos para que la estructura sobreviva al terremoto es que el primer miembro sea mayor o igual que el segundo, es decir:

$$W_e + W_D + W_p \geq E \quad (\text{A.4})$$

Si lo que se persigue es que la estructura sobreviva al sismo manteniéndose dentro del dominio elástico, habrá que darle la resistencia necesaria para que sea capaz de almacenar momentáneamente mediante deformaciones elásticas una cantidad de energía W_e de valor :

$$W_e \geq (E - W_d) \quad (\text{A.5})$$

Si por el contrario, se permiten deformaciones plásticas en la estructura (es decir daños estructurales), para que ésta sobreviva al sismo deberá ser capaz de disipar una cantidad de energía W_p que dependerá de su resistencia lateral y cuyo valor debe cumplir :

$$W_p \geq E - W_d - W_e \quad (\text{A.6})$$

Las ecuaciones anteriores junto con otras relaciones sencillas entre energía plástica acumulada y energía plástica aparente que sirven para controlar los desplazamientos laterales de la estructura, forman un marco teórico en base al cual se pueden plantear las distintas estrategias de proyecto sismorresistente (convencionales y avanzadas). Este marco teórico es la base de los denominados métodos de proyecto sismorresistente basados en el balance energético de Housner Akiyama.

A.1.3. Acelerogramas artificiales compatibles con espectros de respuesta.

En un gran número de ocasiones no disponemos de acelerogramas naturales suficientes en la zona donde se pretende proyectar la estructura, una solución a este problema es construir los acelerogramas. [2], [26]. La mayoría de los métodos que generan acelerogramas compatibles con un espectro de respuesta prefijado, se basan en el hecho de que una función periódica, como la aceleración $\ddot{x}(t)$ que define la señal sísmica, se puede expandir en una serie de ondas sinusoidales como se observa en la siguiente ecuación A.7.

$$\ddot{x}(t) = \sum_{k=1}^n A_k \text{sen}(\omega_k t + \phi_k) \quad (\text{A.7})$$

Donde A_k es la amplitud, ω_k es la frecuencia angular, ϕ_k son los ángulos de fase de las k contribuciones sinusoidales.

Para poder simular el carácter transitorio de los movimientos sísmicos es necesario multiplicar la expresión anterior por una función dependiente del tiempo, ya que $\ddot{x}(t)$ no varían en el tiempo. Esta función se denomina función de intensidad envolvente, con lo que el movimiento final simulado viene dado por la ecuación A.8 :

$$\ddot{x}(t) = I(t) \sum_{k=1}^n A_k \text{sen}(\omega_k t + \phi_k) \quad (\text{A.8})$$

Para poder definir el movimiento descrito en la ecuación A.8 necesitamos definir A_k (amplitud) y $I(t)$ (función de densidad envolvente).

A_k está relacionado con la densidad espectral mediante la ecuación A.9:

$$G(\omega_k) \Delta\omega = \frac{A_k^2}{2} \quad (\text{A.9})$$

$I(t)$ es una función determinista obtenidas a partir de observaciones reales, son de tipo cajón, trapezoidal, exponencial y compuestas, figura A.1.

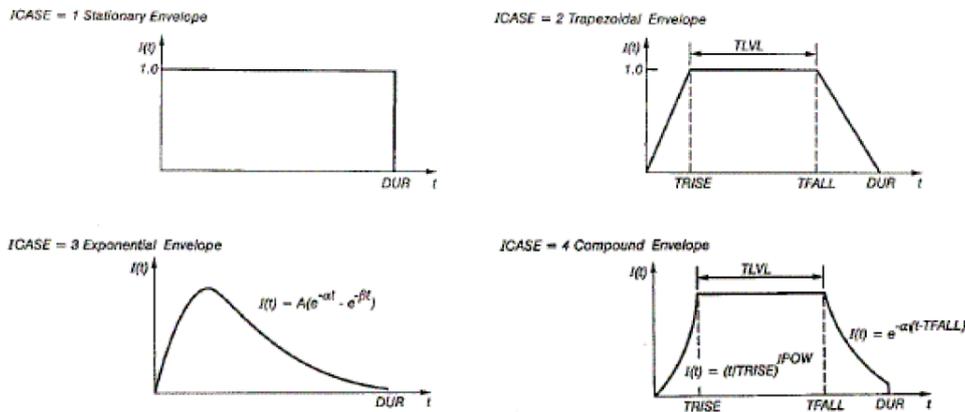


Figura A.1: Función intensidad. Tomada de [26]

Espectro de respuesta según la normativa española. [11]

A.1.4. Caracterización del terreno

Los movimientos del suelo provocados por un terremoto están influidos por el tipo de terreno. Por ello, es necesario llevar a cabo las investigaciones necesarias para identificar el tipo de terreno de acuerdo con las indicaciones recogidas a continuación. En la norma, los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- Terreno tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s > 750m/s$.
- Terreno tipo II: Roca muy fracturada, suelo granular denso o cohesivo duro. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 m/s \geq v_s > 400m/s$.
- Terreno tipo III: suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 m/s \geq v_s > 200m/s$.
- Terreno tipo IV: Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s \leq 200m/s$.

A cada uno de estos tipos de terreno se le asigna un valor del coeficiente C , coeficiente del terreno, que aparece en la tabla siguiente:

Tipo de terreno	Coefficiente C
I	1
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

A.1.5. Aceleración sísmica horizontal de cálculo

La aceleración sísmica horizontal de cálculo se define como: A.10.

$$a_c = S\rho a_b \quad (\text{A.10})$$

Donde a_b es la aceleración sísmica básica, ρ es el coeficiente adimensional de riesgo, y S el coeficiente de amplificación del terreno, el cual esta definido como:

- Para $\rho a_b \leq 0,1g$

$$S = \frac{C}{1,25} \quad (\text{A.11})$$

- Para $0,1g \leq \rho a_b \leq 0,4g$

$$S = \frac{C}{1,25} + 3,33\left(\rho \frac{a_b}{g} - 0,1\right)\left(1 - \frac{C}{1,25}\right) \quad (\text{A.12})$$

- Para $0,4g \leq \rho a_b$

$$S = 1,0 \quad (\text{A.13})$$

A.2. Espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Componente horizontal

El espectro de respuesta elástica representa la respuesta de una estructura de un grado de libertad cuando es su base se aplica un movimiento sísmico definido por una aceleración determinada. Esta respuesta depende del propio movimiento sísmico y del periodo propio y el amortiguamiento de la estructura.

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_A & \quad S_a(T) = [1 + \frac{T}{T_A}(2,5\nu - 1)]a_c \\
 T_A \leq T \leq T_B & \quad S_a(T) = 2,5\nu a_c \\
 T_B \leq T \leq T_C & \quad S_a(T) = 2,5\nu \frac{T_b}{T} a_c \\
 T_C \leq T & \quad S_a(T) = 2,5\nu \frac{T_b T_c}{T^2} a_c
 \end{aligned}$$

Donde a_c es la aceleración sísmica de cálculo, ν el factor corrector dependiente del amortiguamiento equivalente de la estructura, que puede obtenerse mediante la expresión A.14, válida para $\xi > 1$:

$$\nu = \left(\frac{5}{\xi}\right)^{(0,4)} \geq 0,55 \quad (\text{A.14})$$

ξ es el índice de amortiguamiento, en porcentaje, y T_A , T_B , T_C valores del periodo que delimitan el espectro. Estos valores dependen del tipo de sismo de cálculo y del tipo de terreno de cimentación del puente, se obtiene según la siguiente tabla:

Sismo último de cálculo	Sismo frecuente de cálculo, sismo de construcción
$T_A = KC/10$	$T_A = KC/20$
$T_B = KC/2,5$	$T_B = KC/5$
$T_C = K(2 + C)$	$T_C = K(1 + 0,5C)/20$

A.2.1. Espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Componente vertical.

A falta de estudios más detallados, el espectro correspondiente a la componente vertical podrá obtenerse simplificada a partir del horizontal multiplicado por un factor igual a 0,7.

APÉNDICE B

Cálculos necesarios para la realización del ensayo de Fugazza

B.1. Implementación en SAP2000 del SMA 100-400

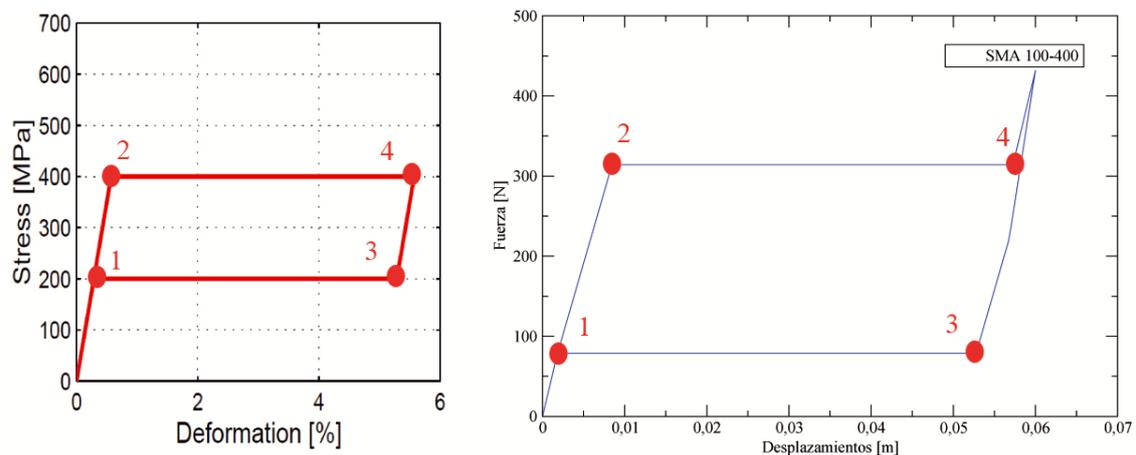


Figura B.1: Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].

$$F_1(\sigma = 100MPa) = \sigma * A = 100 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 78,5N \quad (B.1)$$

$$F_1(\sigma = 400MPa) = \sigma * A = 400 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 314N \quad (B.2)$$

$$\delta_1(\sigma = 100MPa) = \frac{100}{70000} = \frac{1}{700}m = 0,0014m \quad (B.3)$$

$$\delta_2(\sigma = 400MPa) = \frac{400}{70000} = \frac{4}{700}m = 0,0057m \quad (B.4)$$

$$\Delta\epsilon = 5\% \rightarrow \Delta L = \epsilon L = \frac{5}{100} * 1000 = 50mm = \frac{5}{100}m = 0,05m \quad (B.5)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \rightarrow \delta_3 = \frac{1}{700} + \frac{5}{100} = \frac{36}{700}m = 0,0514m \quad (B.6)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \rightarrow \delta_4 = \frac{4}{700} + \frac{5}{100} = \frac{39}{700}m = 0,0557m \quad (B.7)$$

$$\Delta\Delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{4}{700} - \frac{1}{700} = \frac{3}{700}m = 0,0043m \quad (B.8)$$

Así queda totalmente definido el diagrama de F- δ del SMA 100-400, los valores de los link se pueden encontrar en la tabla B.1

TRACCIÓN		COMPRESIÓN	
HOOK	Apertura=1/700m k=200000 N/m	GAP	Apertura=1/700m k=200000 N/m
MLE1 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.001 → 0 0 → 0 1/700 → 78,5 36/700 → 78,5	MLE1 (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -78,5 -1/700 → -78,5 0 → 0 0.01 → 0
MLE2 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 39/700 → 0 43/700 → 314	MLE2 (Compresión)	Fuer. → Despla. -43/700 → -314 -39/700 → 0 0 → 0 0.01 → 0
MLP (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 3/700 → 235,5 36/700 → 235,5	MLP (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -235,5 -3/700 → -235,5 0 → 0 0.01 → 0

Cuadro B.1: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.

Implementando en SAP2000 este dispositivo y realizando un análisis push over, podemos observar el comportamiento mecánico del dispositivo, el cual se muestra en la figura B.2.

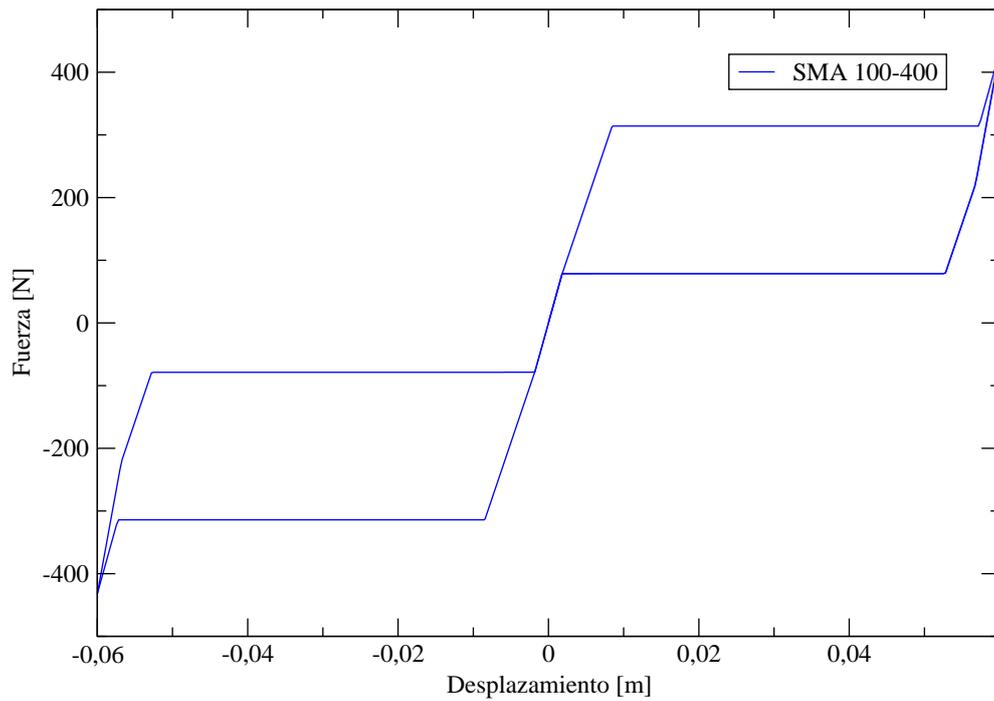


Figura B.2: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-400

B.2. Implementación en SAP2000 del SMA 100-500

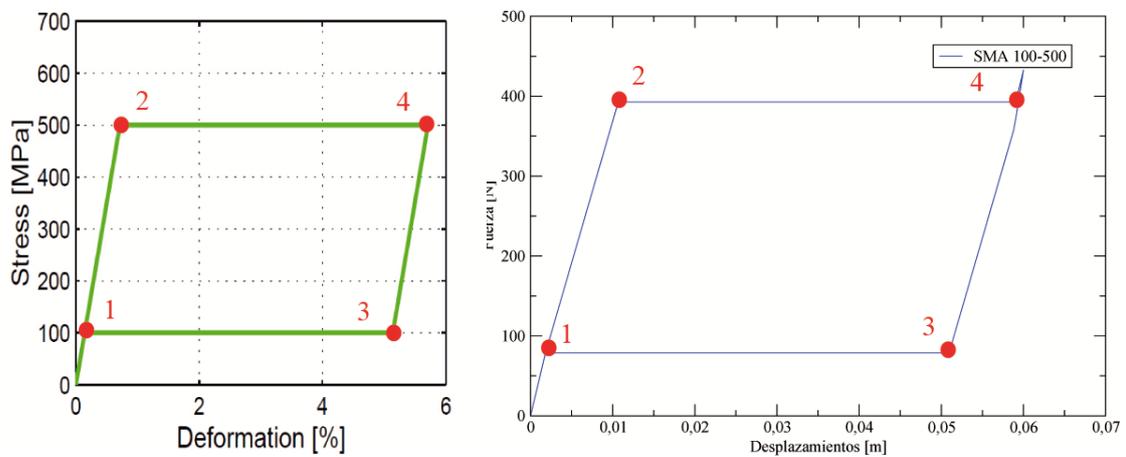


Figura B.3: Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].

$$F_1(\sigma = 100MPa) = \sigma * A = 100 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 78,5N \quad (B.9)$$

$$F_1(\sigma = 500MPa) = \sigma * A = 500 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 392,5N \quad (B.10)$$

$$\delta_1(\sigma = 100MPa) = \frac{100}{70000} = \frac{1}{700}m = 0,0014m \quad (B.11)$$

$$\delta_2(\sigma = 500MPa) = \frac{500}{70000} = \frac{5}{700}m = 0,0071m \quad (B.12)$$

$$\Delta\epsilon = 5\% \longrightarrow \Delta L = \epsilon L = \frac{5}{100} * 1000 = 50mm = \frac{5}{100}m = 0,05m \quad (B.13)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_3 = \frac{1}{700} + \frac{5}{100} = \frac{36}{700}m = 0,0514m \quad (B.14)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_4 = \frac{5}{700} + \frac{5}{100} = \frac{40}{700}m = 0,0571m \quad (B.15)$$

$$\Delta\Delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{5}{700} - \frac{1}{700} = \frac{4}{700}m = 0,0057m \quad (B.16)$$

Así queda totalmente definido el diagrama de F- δ del SMA 100-500, los valores de los link se pueden encontrar en la tabla B.2

TRACCIÓN		COMPRESIÓN	
HOOK	Apertura=1/700m k=200000 N/m	GAP	Apertura=1/700m k=200000 N/m
MLE1 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.001 → 0 0 → 0 1/700 → 78,5 36/700 → 78,5	MLE1 (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -78,5 -1/700 → -78,5 0 → 0 0.01 → 0
MLE2 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 40/700 → 0 45/700 → 392,5	MLE2 (Compresión)	Fuer. → Despla. -45/700 → -392,5 -40/700 → 0 0 → 0 0.01 → 0
MLP (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 4/700 → 314 36/700 → 314	MLP (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -314 -4/700 → -314 0 → 0 0.01 → 0

Cuadro B.2: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.

Implementando en SAP2000 este dispositivo y realizando un análisis push over, podemos observar el comportamiento mecánico del dispositivo, el cual se muestra en la figura B.4.

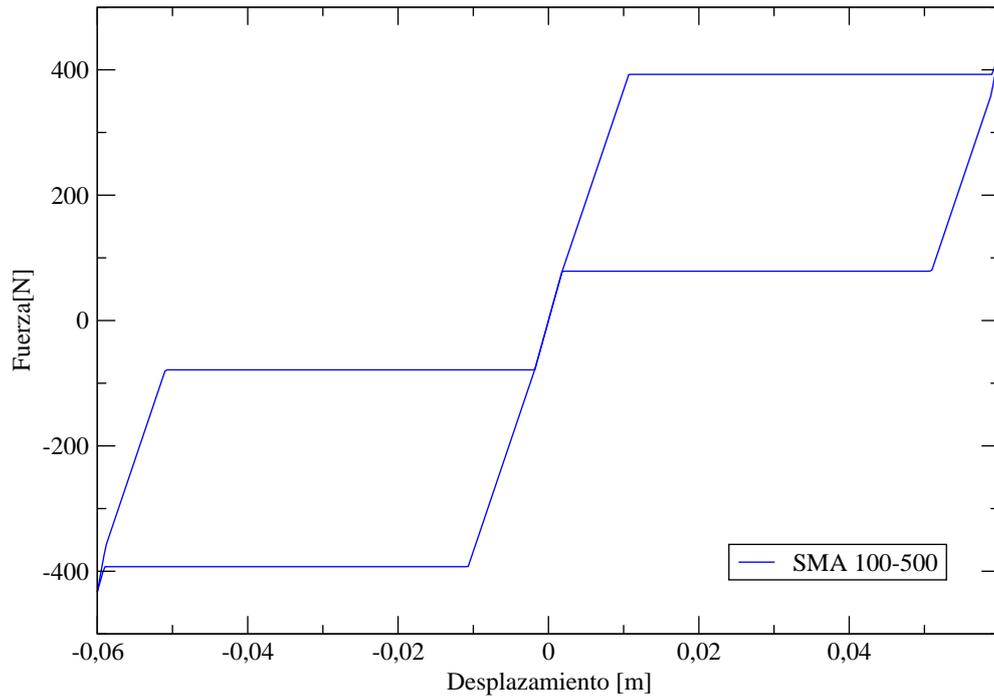


Figura B.4: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-500

B.3. Implementación en SAP2000 del SMA 100-600

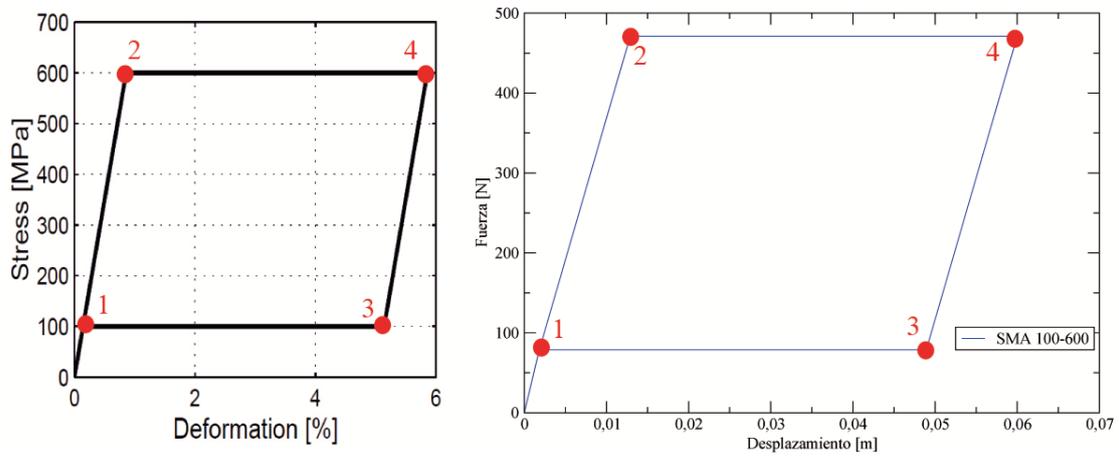


Figura B.5: Tensión-Deformación vs. Fuerza-Desplazamiento. Tomada de [12].

$$F_1(\sigma = 100MPa) = \sigma * A = 100 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 78,5N \quad (B.17)$$

$$F_1(\sigma = 600MPa) = \sigma * A = 600 * 10^6 \frac{(\pi 1 * 10^{-3})^2}{4} = 471N \quad (B.18)$$

$$\delta_1(\sigma = 100MPa) = \frac{100}{70000} = \frac{1}{700}m = 0,0014m \quad (B.19)$$

$$\delta_2(\sigma = 600MPa) = \frac{600}{70000} = \frac{6}{700}m = 0,0086m \quad (B.20)$$

$$\Delta\epsilon = 5\% \longrightarrow \Delta L = \epsilon L = \frac{5}{100} * 1000 = 50mm = \frac{5}{100}m = 0,05m \quad (B.21)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_3 = \frac{1}{700} + \frac{5}{100} = \frac{36}{700}m = 0,0514m \quad (B.22)$$

$$\Delta L = \frac{5}{100}m \longrightarrow \delta_4 = \frac{6}{700} + \frac{5}{100} = \frac{41}{700}m = 0,0586m \quad (B.23)$$

$$\Delta\Delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{6}{700} - \frac{1}{700} = \frac{5}{700}m = 0,0071m \quad (B.24)$$

Así queda totalmente definido el diagrama de F- δ del SMA 100-600, los valores de los link se pueden encontrar en la tabla B.3

TRACCIÓN		COMPRESIÓN	
HOOK	Apertura=1/700m k=200000 N/m	GAP	Apertura=1/700m k=200000 N/m
MLE1 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.001 → 0 0 → 0 1/700 → 78,5 36/700 → 78,5	MLE1 (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -78,5 -1/700 → -78,5 0 → 0 0.01 → 0
MLE2 (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 41/700 → 0 47/700 → 471	MLE2 (Compresión)	Fuer. → Despla. -47/700 → -471 -41/700 → 0 0 → 0 0.01 → 0
MLP (Tracción)	Fuer. → Despla. -0.01 → 0 0 → 0 5/700 → 392,5 36/700 → 392,5	MLP (Compresión)	Fuer. → Despla. -36/700 → -392,5 -5/700 → -392,5 0 → 0 0.01 → 0

Cuadro B.3: Valores de Fuerza y Desplazamiento introducidos en los link.

Implementando en SAP2000 este dispositivo y realizando un análisis push over, podemos observar el comportamiento mecánico del dispositivo, el cual se muestra en la figura B.6.

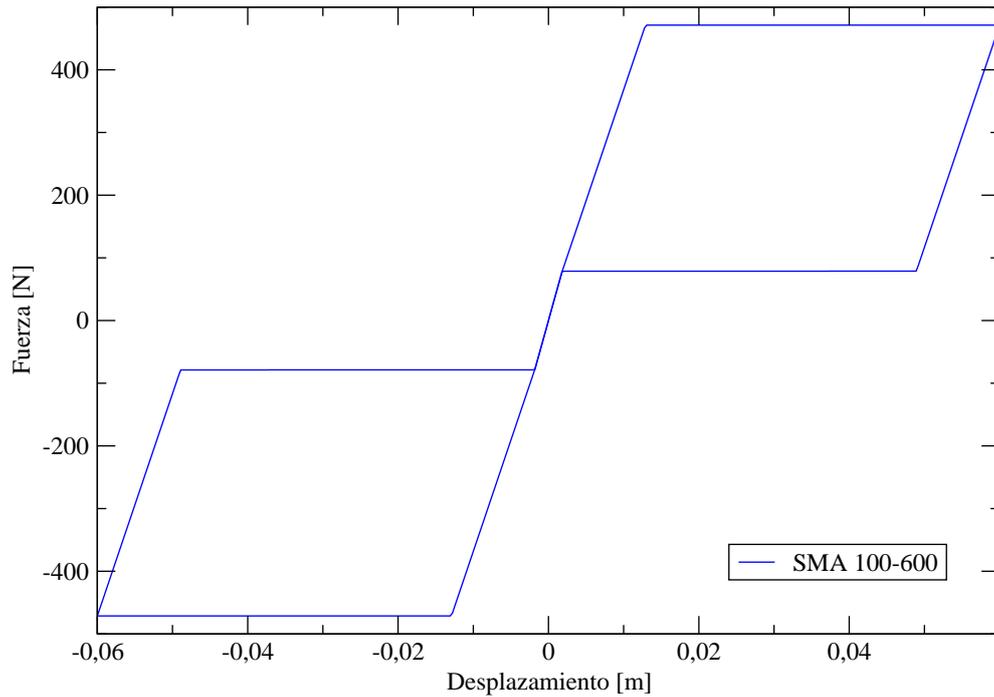


Figura B.6: Gráfica de Fuerza-Desplazamiento del SMA 100-600

B.4. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-400

Periodo	Desp. Máximo	Peri. Normalizado	D. Normalizado
0,01	0,000065	0,037313433	0,00167850
0,05	0,000377	0,186567164	0,00973531
0,1	0,000987	0,373134328	0,025487411
0,15	0,001736	0,559701493	0,044828922
0,2	0,003803	0,746268657	0,098205294
0,24	0,006076	0,895522388	0,156901227
0,268	0,009373	1	0,242040026
0,28	0,010371	1,044776119	0,267811491
0,3	0,011348	1,119402985	0,293040671
0,35	0,015815	1,305970149	0,408392511
0,385	0,018634	1,436567164	0,481187863
0,39	0,019155	1,455223881	0,494641704
0,395	0,019152	1,473880597	0,494564235
0,4	0,018554	1,492537313	0,479122014
0,45	0,006633	1,679104478	0,1712847
0,5	0,005975	1,865671642	0,154293092
0,6	0,004408	2,23880597	0,113828276
1	0,003017	3,731343284	0,077908328
1,5	0,002435	5,597014925	0,062879277
2	0,002337	7,462686567	0,060348612

Cuadro B.4: SMA 100-400

Gráfica de desplazamiento-tiempo. En resonancia, la amplitud de desplazamiento va aumentando conforme el tiempo aumenta B.7.

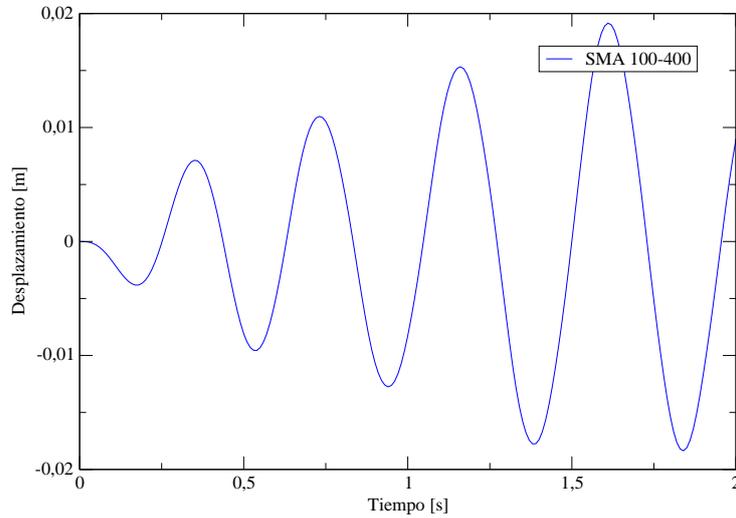


Figura B.7: Gráfica de desplazamiento-tiempo.

Gráfica de desplazamiento-Fuerza B.8, en esta gráfica se pueden observar los ciclos del dispositivo SMA 100-400, demostrando así, un diseño efectivo.

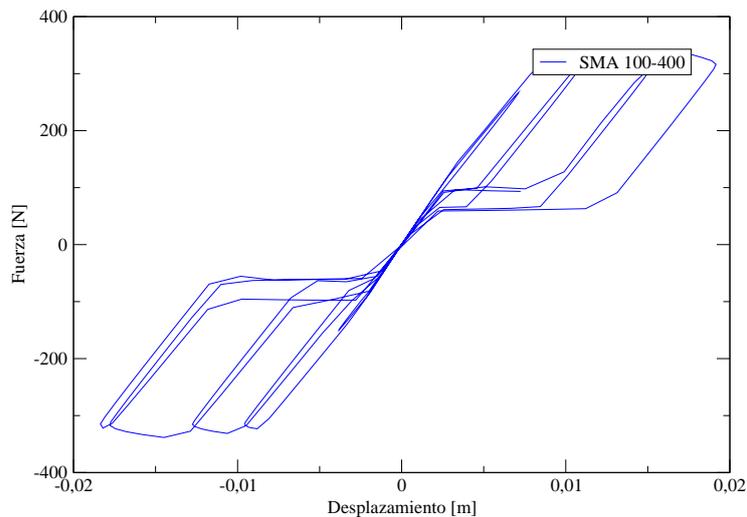


Figura B.8: Gráfica de desplazamiento-Fuerza.

Gráfica de velocidad-desplazamiento B.9. Inicialmente, el dispositivo parte del reposo (desplazamiento nulo) y una vez la excitación actúa, el dispositivo se queda oscilando entorno a ese punto y, dado que el dispositivo está en resonancia, cada vez será mayor el valor de la velocidad y del desplazamiento.

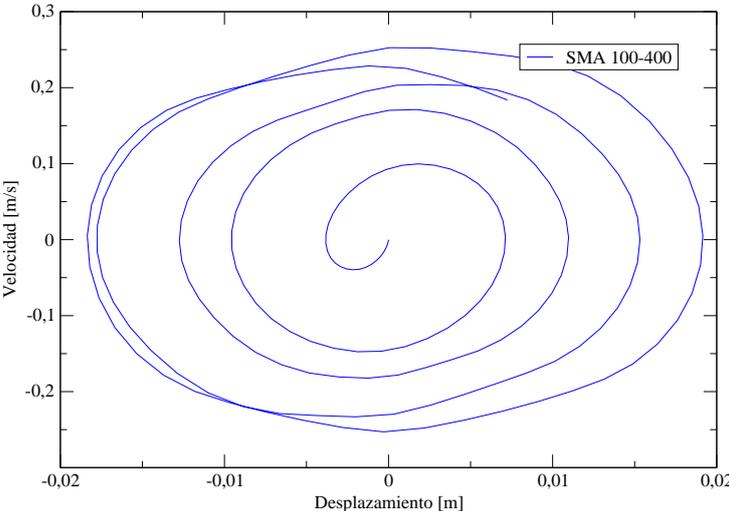


Figura B.9: Gráfica de velocidad-desplazamiento

B.5. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-500

Periodo	Desp. Máximo	Peri. Normalizado	D. Normalizado
0,01	0,000065	0,037313433	0,001678502
0,05	0,000377	0,186567164	0,009735313
0,1	0,000987	0,373134328	0,025487411
0,15	0,001736	0,559701493	0,044828922
0,2	0,003803	0,746268657	0,098205294
0,24	0,006076	0,895522388	0,156901227
0,268	0,009328	1	0,240877986
0,28	0,010911	1,044776119	0,281755972
0,3	0,013248	1,119402985	0,342104584
0,36	0,01893	1,343283582	0,488831504
0,37	0,019358	1,380597015	0,499883796
0,375	0,020347	1,399253731	0,525422853
0,38	0,020298	1,417910448	0,524157521
0,39	0,011262	1,455223881	0,290819884
0,4	0,010282	1,492537313	0,265513234
0,45	0,006632	1,679104478	0,171258877
0,5	0,005974	1,865671642	0,154267269
0,6	0,004408	2,23880597	0,113828276
1	0,003017	3,731343284	0,077908328
1,5	0,002465	5,597014925	0,06365397
2	0,002337	7,462686567	0,060348612

Cuadro B.5: SMA 100-500

Gráfica de desplazamiento-tiempo. En resonancia, la amplitud de desplazamiento va aumentando conforme el tiempo aumenta B.10.

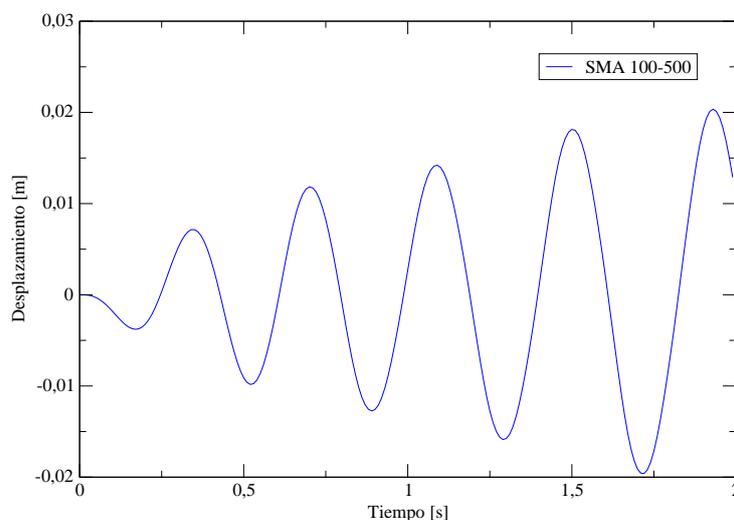


Figura B.10: Gráfica de desplazamiento-tiempo.

Gráfica de desplazamiento-Fuerza B.11, en esta gráfica se pueden observar los ciclos del dispositivo SMA 100-500, demostrando así, un diseño efectivo.

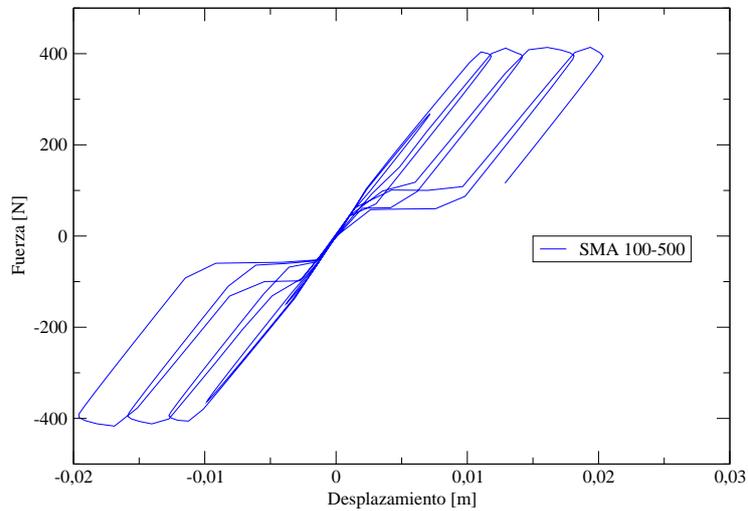


Figura B.11: Gráfica de desplazamiento-Fuerza.

Gráfica de velocidad-desplazamiento B.12. Inicialmente, el dispositivo parte del reposo (desplazamiento nulo) y una vez la excitación actúa, el dispositivo se queda oscilando entorno a ese punto y, dado que el dispositivo está en resonancia, cada vez será mayor el valor de la velocidad y del desplazamiento.

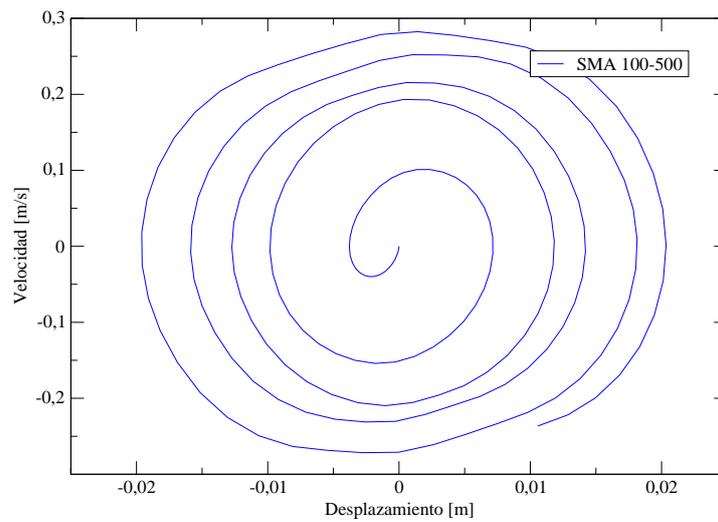


Figura B.12: Gráfica de velocidad-desplazamiento

B.6. Ensayo de Fugazza aplicado al SMA 100-600

Periodo	Desp. Máximo	Peri. Normalizado	D. Normalizado
0,01	0,000065	0,037313433	0,001678502
0,05	0,000377	0,186567164	0,009735313
0,1	0,000987	0,373134328	0,025487411
0,15	0,001736	0,559701493	0,044828922
0,2	0,003803	0,746268657	0,098205294
0,24	0,006076	0,895522388	0,156901227
0,268	0,009346	1	0,241342802
0,28	0,011534	1,044776119	0,29784377
0,3	0,014523	1,119402985	0,375029051
0,35	0,019865	1,305970149	0,512976114
0,355	0,020486	1,324626866	0,529012266
0,36	0,020774	1,343283582	0,536449322
0,365	0,02146	1,361940299	0,554163977
0,37	0,018245	1,380597015	0,471142673
0,4	0,010283	1,492537313	0,265539057
0,5	0,005975	1,865671642	0,154293092
0,8	0,003019	2,985074627	0,077959974
1	0,003017	3,731343284	0,077908328
1,5	0,002465	5,597014925	0,06365397
2	0,002337	7,462686567	0,060348612

Cuadro B.6: SMA 100-600

Gráfica de desplazamiento-tiempo. En resonancia, la amplitud de desplazamiento va aumentado conforme el tiempo aumenta B.13.

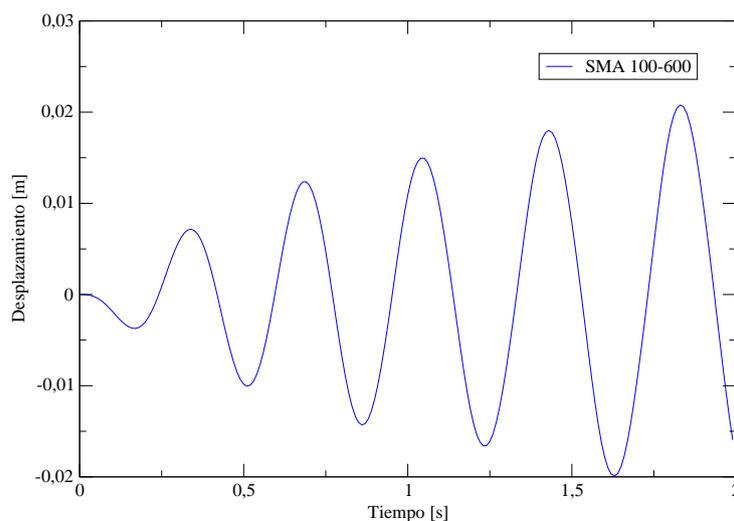


Figura B.13: Gráfica de desplazamiento-tiempo.

Gráfica de desplazamiento-Fuerza B.14, en esta gráfica se pueden observar los ciclos del dispositivo SMA 100-500, demostrando así, un diseño efectivo.

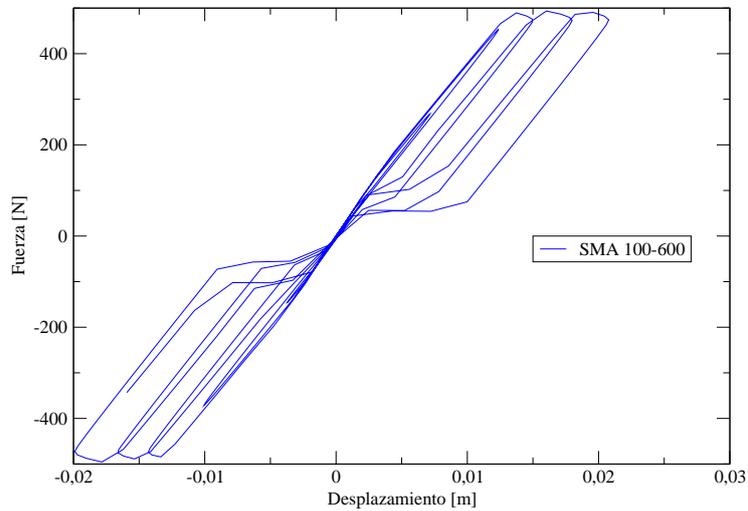


Figura B.14: Gráfica de desplazamiento-Fuerza.

Gráfica de velocidad-desplazamiento B.15. Inicialmente, el dispositivo parte del reposo (desplazamiento nulo) y una vez la excitación actúa, el dispositivo se queda oscilando entorno a ese punto y, dado que el dispositivo está en resonancia, cada vez será mayor el valor de la velocidad y del desplazamiento.

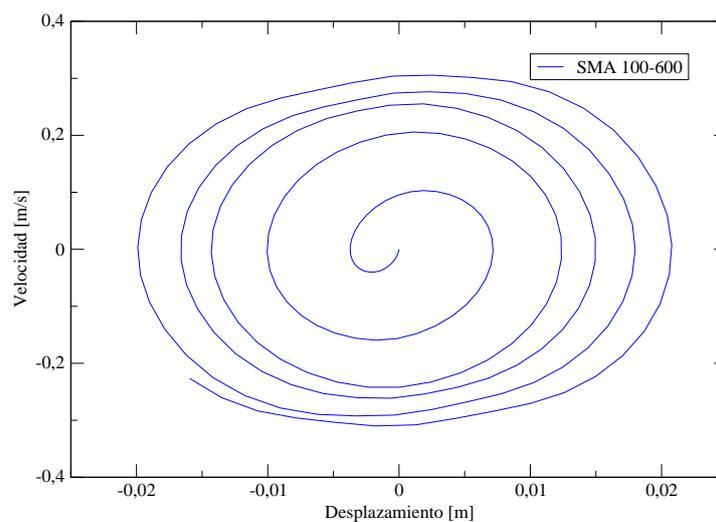


Figura B.15: Gráfica de velocidad-desplazamiento

Bibliografía

- [1] Ferdinando Auricchio, Robert L Taylor, and Jacob Lubliner. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 146(3):281–312, 1997.
- [2] Álex H Barbat, Jorge Eduardo Hurtado, and JA Canas. Simulación de acelerogramas compatibles con espectros de energía sísmica. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 12(1):73–92, 1996.
- [3] Andrés Cano Sánchez. Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones sma. 2010.
- [4] Fabio Casciati, Lucia Faravelli, and Lorenza Petrini. Energy dissipation in shape memory alloy devices. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13(6):433–442, 1998.
- [5] A.K. Chopra. *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, volume 2. Prentice Hall Saddle River, NY NY, 2001.
- [6] Amadeo Benavent Climent, Luis Gonzaga Pujades, and Francisco López. *Espectros de input de energía de aplicación en el proyecto sismorresistente de estructuras en regiones de sismicidad moderada*. 2001.
- [7] Ottavia Corbi. Shape memory alloys and their application in structural oscillations attenuation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(5):387–402, 2003.
- [8] R DesRoches and M Delemont. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*, 24(3):325–332, 2002.
- [9] Mauro Dolce and Donatello Cardone. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. austenite niti wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(11):2657–2677, 2001.
- [10] Mauro Dolce, Donatello Cardone, and Roberto Marnetto. Sma re-centering devices for seismic isolation of civil structures. In *Proceedings of SPIE*, volume 4330, pages 238–249, 2001.
- [11] Norma de la Construcción Sismorresistente Española. Real decreto 637/2007, de 18 de mayo, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: Puentes (ncsp-07). *Boletín Oficial del Estado*, 2003.

- [12] D. Fugazza. Shape-memory alloy devices for earthquake engineering: Mechanical properties, constitutive modeling and numerical simulations. *Master's Thesis, University of Pavia, Pavia, Italy*, 2003.
- [13] Farhan Gandhi and David Wolons. Characterization of the pseudoelastic damping behavior of shape memory alloy wires using complex modulus. *Smart Materials and structures*, 8(1):49, 1999.
- [14] Goutam Ghosh, Yogendra Singh, and Shashi Kant Thakkar. Seismic response of a continuous bridge with bearing protection devices. *Engineering Structures*, 33(4):1149–1156, 2011.
- [15] DANIEL GÓMEZ, JOHANNIO MARULANDA, and PETER THOMSON. Control systems for dynamic loading protection of civil structures. *DYNA*, 75(155):77–89, 2008.
- [16] ISTECH. Shape memory alloy devices for seismic protection of cultural heritage structures, 2000.
- [17] L Janke, C Czaderski, M Motavalli, and J Ruth. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*, 38(5):578–592, 2005.
- [18] José Ángel Jurado Albarracín-Martinón. *Ejemplos resueltos de cálculo de estructuras con el programa SAP 2000*. 2008.
- [19] S Kajiwara. Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in fe-based alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 273:67–88, 1999.
- [20] Mughees M Khan and Dimitris C Lagoudas. Modeling of shape memory alloy pseudoelastic spring elements using preisach model for passive vibration isolation. In *SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, pages 336–347. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [21] Hui Li, Min Liu, and Jinping Ou. Vibration mitigation of a stay cable with one shape memory alloy damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 11(1):21–36, 2004.
- [22] FM Mazzolani and A Mandara. Modern trends in the use of special metals for the improvement of historical and monumental structures. *Engineering Structures*, 24(7):843–856, 2002.
- [23] Gary L McGavin and Greg Guerin. Real-time seismic damping and frequency control of steel structures using nitinol wire. In *SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, pages 176–185. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [24] KN Melton. Ni–ti based shape memory alloys. *Butterworth-Heinemann, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys(UK)*, 1990,, pages 21–35, 1990.
- [25] S Miyazaki, T Imai, Y Igo, and K Otsuka. Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of ti-ni alloys. *Metallurgical transactions A*, 17(1):115–120, 1986.
- [26] Rosangel Moreno. Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal. aplicación a diversos escenarios sísmicos de barcelona. *UPC, Barcelona*, 2006.

- [27] Florin Andrei Nae, Tadashige Ikeda, and Yuji Matsuzaki. The active tuning of a shape memory alloy pseudoelastic property. *Smart materials and structures*, 13(3):503, 2004.
- [28] Kazuhiro Otsuka and Clarence Marvin Wayman. *Shape memory materials*. Cambridge University Press, 1999.
- [29] Jamie Ellen Padgett, Reginald DesRoches, and Russell Ehlinger. Experimental response modification of a four-span bridge retrofit with shape memory alloys. *Structural Control and Health Monitoring*, 17(6):694–708, 2010.
- [30] Mario Paz. *Structural dynamics: theory and computation*. Kluwer Academic Pub, 1997.
- [31] Brite Euram MANSIDE Project. Memory alloys for new seismic isolation and energy dissipation devices- final project workshop, 1999.
- [32] Francesco Ricciardelli, A David Pizzimenti, and Massimiliano Mattei. Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness. *Engineering structures*, 25(9):1199–1209, 2003.
- [33] Alu R Shahin, Peter H Meckl, and James D Jones. Modeling of sma tendons for active control of structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 8(1):51–70, 1997.
- [34] John A Shaw and Stelios Kyriakides. Thermomechanical aspects of niti. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43(8):1243–1281, 1995.
- [35] G. Song, N. Ma, and H.N. Li. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*, 28(9):1266–1274, 2006.
- [36] Bohumír Strnadel, S Ohashi, H Ohtsuka, T Ishihara, and S Miyazaki. Cyclic stress-strain characteristics of ti—, ni and ti—, ni—, cu shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 202(1):148–156, 1995.
- [37] Y Suzuki. Fabrication of shape memory alloys. *Shape Memory Materials*, 1998.
- [38] Hisaaki Tobushi, Yoshirou Shimeno, Takashi Hachisuka, and Kikuaki Tanaka. Influence of strain rate on superelastic properties of tini shape memory alloy. *Mechanics of Materials*, 30(2):141–150, 1998.
- [39] Jan Van Humbeeck. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 273:134–148, 1999.
- [40] Jan Van Humbeeck and Yan Liu. The high damping capacity of shape memory alloys. In *Shape Memory Implants*, pages 46–60. Springer, 2000.
- [41] CM Wayman. Transformation and mechanical behaviour of niti shape memory alloys. *Phase Transformations'87*, pages 16–22, 1987.
- [42] CM Wayman and TW Duerig. An introduction to martensite and shape memory. *Butterworth-Heinemann, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys(UK)*, 1990,, pages 3–20, 1990.
- [43] Krzysztof Wilde, Paolo Gardoni, and Yozo Fujino. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures*, 22(3):222–229, 2000.

- [44] P Crespo Y Bouassida, B Koliass. Bridge desing to eurocodes. worked examples. *Joint report JRC-ECCS, 2012.*