



UNIVERSIDAD DE CHILE  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

**ESTUDIO ANALITICO DE UNA CONEXIÓN VIGA COLUMNA USANDO  
ALEACIÓN SMA CuAlBe**

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

**SYLVAIN GARRAU**

Profesor Guía:

RICARDO HERRERA MARDONES

Miembros de la comisión:

MARÍA OFELIA MORONI YADLIN

JUAN FELIPE BELTRAN MORALES

Santiago de Chile

Enero 2008

---

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: SYLVAIN PIERRE GARRAU  
FECHA: 08/01/2008

PROF. GUIA: Sr. RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

## **“ESTUDIO ANALITICO DE UNA CONEXIÓN VIGA COLUMNA USANDO ALEACIÓN SMA CuAlBe”**

Se ha visto que después de ocurrido algunos eventos sísmicos, las uniones viga columna soldadas fallan, debido a fracturas en la soldadura ó a la deformación plástica de la unión. Surge así la posibilidad de examinar una alternativa a las uniones comunes viga columna, usando elementos disipadores en base a SMA.

Este estudio es de carácter teórico y tiene por meta reproducir los ensayos experimentales hechos por J.R. Sepúlveda en 2006. Estos ensayos involucraron una conexión viga columna de acero con 4 barras SMA de CuAlBe de 3 [mm] de diámetro y 182 [mm] de largo útil trabajando como disipadores de energía. Se impusieron giros a la conexión, según el protocolo del SAC del 97, a frecuencias de 0.25 [Hz] y 1 [Hz].

Para el desarrollo de este trabajo se determinó en un comienzo que sólo se utilizará el programa ANSYS, teniendo presente todas las limitaciones que esto conlleva.

Con el programa de elementos finitos ANSYS, se calibró un modelo que reprodujo el ensayo de una barra y luego se usó la geometría de la conexión, se le impusieron las mismas sollicitaciones para verificar el comportamiento de las barras y de la conexión en general.

El modelo de la conexión se comportó de manera similar a la conexión ensayada. De la comparación de los resultados se concluye que lo que produjo las mayores diferencias es la modelación de la curva tensión-deformación del material SMA.

La comparación teórica de la misma conexión con barras de acero muestra que la deformación remanente debida a la fluencia de las barras, hace que la viga tenga una resistencia al corte casi nula, lo que induce el colapso de la estructura. Aunque en el caso del acero la disipación de energía de la conexión es mayor, la solución de ocupar un material superelástico se recomienda por la ausencia de deformaciones remanentes.

**INDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1	..... CONSIDERACIONES GENERALES .....	10
1.2	..... OBJETIVOS.....	10
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>12</b>
2.1	..... ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA .....	12
2.1.1	Generalidades.....	12
2.1.2	Efecto de memoria de forma .....	13
2.1.3	Superelasticidad.....	14
2.2	..... ESTUDIOS DE CONEXIONES CON SMA. ....	15
2.2.1	Ocel et al. (2004) [4] .....	15
2.2.2	Abolmaali et al (2005) [10] .....	17
2.2.3	Sepúlveda (2006) [1] .....	18
2.2.4	Arellano (2002) [2] .....	22
<b>3</b>	<b>ESTUDIO PRELIMINAR.....</b>	<b>24</b>
3.1	..... MODELACIÓN DEL EDIFICIO .....	24
3.2	..... RESULTADOS .....	28
3.2.1	Periodos.....	28
3.2.2	Drift máximo .....	28
3.2.3	Deformaciones remanentes .....	29
3.2.4	Disipación de energía.....	29
3.2.5	Comentarios .....	30
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
4.1	..... OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	31
4.2	..... MODELO CON ELEMENTOS FINITOS.....	31
4.2.1	Geometría.....	31

4.2.2	Contactos.....	33
4.2.3	Malla-elementos.....	35
4.2.4	Condiciones de borde .....	37
4.3	SOLICITACIONES .....	38
4.3.1	Pretensión de los pernos.....	38
4.3.2	Ciclos de carga .....	39
4.4	MATERIALES .....	40
4.4.1	Aceros.....	40
4.4.2	CuAlBe .....	41
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS .....	47
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>48</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	48
5.2	ENSAYOS DE SEPÚLVEDA [1].....	48
5.2.1	Apoyos en el ensayo.....	48
5.2.2	Instrumentación.....	50
5.2.3	Comportamiento general de la conexión .....	50
5.2.4	Datos para la comparación.....	51
5.3	COMPORTAMIENTO GENERAL DEL MODELO.....	53
5.3.1	Pretensión de las barras.....	53
5.3.2	Apertura de la placa base .....	55
5.3.3	Contacto barras-bloque.....	55
5.3.4	Comportamiento de la viga.....	56
5.4	HISTÉRESIS DE LAS BARRAS.....	56
5.5	COMPARACIÓN DEL MODELO CON LOS ENSAYOS .....	60
5.5.1	Posibilidad de comparar.....	60
5.5.2	Histéresis de las barras .....	60
5.5.3	Curva Giro v/s Momento .....	62
5.5.4	Histéresis punta viga.....	63
5.5.5	Comentarios .....	65

5.6 .....	COMPARACIÓN CON LAS BARRAS DE ACERO .....	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
6.1 .....	CONCLUSIONES .....	73
6.2 .....	RECOMENDACIONES .....	74
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO: ALGORITMO ANSYS PARA EL MATERIAL SMA.....</b>	<b>79</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Transformación de fase martensítica en ausencia de tensiones [3] .....	13
Figura 2.2: Cambios cristalográficos y memoria de forma [4].....	14
Figura 2.3: Curva tensión deformación típica de un material con memoria de forma [3] .....	14
Figura 2.4: Curva tensión deformación típica de un material superelástico [3].....	15
Figura 2.5: Esquema de la conexión S2 ensayada por Ocel et al [4] .....	16
Figura 2.6: Histéresis de la conexión S1 antes (línea negra) y después (línea punteada) del tratamiento térmico [4] .....	16
Figura 2.7: Dispositivo experimental [10].....	17
Figura 2.8: Comparación pernos de acero y pernos SMA [10].....	18
Figura 2.9: Ensayo estático de una barra: curva de rotura [1].....	19
Figura 2.10: Ensayo dinámico de una barra: ciclos de histéresis [1] .....	19
Figura 2.11: Dispositivo experimental [15].....	20
Figura 2.12: Detalle de la conexión y del dispositivo de medición [15] .....	20
Figura 2.13: Ciclos de histéresis Momento-giro en la punta de la viga de la conexión [15] .....	21
Figura 2.14: Distribución de los disipadores de energía [2].....	23
Figura 3.1: Geometría del elemento tipo 02 [2] .....	25
Figura 3.2: Conexión tipo 04-2[5] .....	26
Figura 3.3: Conexión tipo 04-0 [5].....	27
Figura 3.4: Conexión tipo 04-1 [5].....	27
Figura 3.5: Envolventes del ángulo de drift máximo .....	28
Figura 3.6: Deformaciones remanentes (drift) .....	29
Figura 4.1: Vista general de la conexión .....	32
Figura 4.2: Cuerpo “Bloque de conexión” .....	33
Figura 4.3: Cuerpos de las barras .....	33
Figura 4.4: Comportamiento de contactos [7] .....	34
Figura 4.5: Geometría del elemento SOLID186 [11].....	35
Figura 4.6: Geometría del elemento SOLID187 [11].....	35
Figura 4.7: Vista general malla.....	36
Figura 4.8: Detalle malla barras .....	37

Figura 4.9: Pretensión de las barras.....	38
Figura 4.10: Material SMA de ANSYS [13].....	41
Figura 4.11: Ensayos de barras: estático y cíclicos .....	42
Figura 4.12: Calibración del modelo SMA .....	44
Figura 4.13: Comportamiento del material SMA de ANSYS .....	45
Figura 4.14: Rutina de implementación del CuAlBe .....	46
Figura 4.15: Ubicación de los probes .....	47
Figura 5.1: Mordazas, pieza triangular, bloque y perno de pretensión [15].....	49
Figura 5.2: Placa base, tope superior y agujero de la columna [15].....	49
Figura 5.3: Histéresis promedio barras inferiores – ensayo 8 [1].....	51
Figura 5.4: Histéresis promedio barras superiores – ensayo 8 [1].....	52
Figura 5.5: Histéresis Punta Viga – ensayo 8 [1] .....	52
Figura 5.6: Curva Giro v/s Momento – ensayo 8 [1].....	53
Figura 5.7: Vista de las tensiones – pretensión de las barras .....	54
Figura 5.8: Vista de las deformaciones – pretensión de las barras.....	54
Figura 5.9: Apertura de la placa base .....	55
Figura 5.10: Ciclo de fuerza en la punta de la viga .....	57
Figura 5.11: Comportamiento de la barra inferior.....	57
Figura 5.12: Comportamiento de la barra superior.....	58
Figura 5.13: Histéresis de las barras del modelo – giros de 0,375 a 3% .....	59
Figura 5.14: Histéresis de la punta de la viga – giros de 0,375 a 3% .....	59
Figura 5.15: Comparación – histéresis barras superiores .....	61
Figura 5.16: Comparación – histéresis barras inferiores .....	61
Figura 5.17: Comparación – curva giro v/s momento.....	63
Figura 5.18: Comparación – histéresis punta viga .....	64
Figura 5.19: Diferencia ensayo de barra y de conexión (8) – barras inferiores .....	65
Figura 5.20: Diferencia ensayo de barra y de conexión (8) – barras inferiores .....	66
Figura 5.21: Topes verticales entre la placa base y la columna .....	67
Figura 5.22: Concentración de tensiones en la placa base confinada.....	67
Figura 5.23: Comparación de resultados con el tipo de apoyo de la placa base .....	68
Figura 5.24: Curva tensión deformación del acero de las barras.....	69

Figura 5.25: Comportamiento comparativo de barras ..... 70  
Figura 5.26: Comportamiento comparativo de la conexión ..... 71



**INDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1: Características del caso 2 para una viga de tipo W33x141 .....	26
Tabla 3.2: Periodo fundamental según el caso .....	28
Tabla 3.3: Energía disipada por tipo de elemento [kN*m].....	29
Tabla 4.1: Características geométricas del modelo .....	32
Tabla 4.2: Características de la malla.....	36
Tabla 4.3: Secuencia de giros para el ensayo [1] .....	39
Tabla 4.4: Relación desplazamiento – fuerza en la punta de la viga.....	40
Tabla 4.5: Parámetros del material SMA .....	42
Tabla 4.6: Características del modelo elegido.....	43
Tabla 5.1: Desplazamientos en la punta de la viga.....	60
Tabla 5.2: Comparación de rigidez.....	64

# Capítulo 1

## 1 Introducción

### 1.1 Consideraciones generales

Frente a un evento sísmico de magnitud considerable, se ha constatado que las conexiones viga-columna pueden constituir puntos de falla en estructuras de acero. Este tipo de fallas, generalmente frágiles, podrían evitarse agregando sistemas de disipación de energía en las conexiones que son puntos de alta rigidez.

Por otra parte, las aleaciones con memoria de forma (*shape memory alloys* – SMA's) son materiales que tienen capacidad de deformarse y disipar una cantidad significativa de energía. Además, tienen la capacidad de volver a su forma original luego del calentamiento del material o de la supresión del esfuerzo externo. Por ese motivo, se está desarrollando un proyecto para aprovechar las propiedades de las SMA's en las conexiones viga-columna de acero.

### 1.2 Objetivos

#### - Objetivos generales:

El objetivo principal de la memoria es analizar numéricamente el comportamiento de una conexión viga-columna que incluye elementos fabricados con una aleación CuAlBe con memoria de forma (SMA), y compararla con el comportamiento de una conexión convencional.

**- Objetivos específicos:**

Se distinguen varios objetivos:

- Analizar ensayos de las barras SMA para obtener los datos numéricos necesarios para el estudio,
- Diseñar una conexión SMA y una conexión clásica ocupando el mismo estado de carga,
- Establecer el modelo numérico de la conexión,
- Calibrar el modelo de la conexión SMA con los resultados experimentales existentes,
- Analizar el comportamiento de ambas conexiones con los dos criterios siguientes: disipación de energía y deformación remanente.

# Capítulo 2

## 2 Antecedentes

### 2.1 Aleaciones con memoria de forma

#### 2.1.1 Generalidades

Las aleaciones con memoria de forma, o “Shape Memory Alloys” (SMA) son aleaciones que tienen varias propiedades únicas, como relaciones entre el módulo de Young y la temperatura, efecto de memoria de forma, capacidad de grandes deformaciones (hasta 8%) y gran amortiguamiento.

Tal comportamiento se debe a los cambios en las características cristalográficas que pueden ocurrir en la aleación. El cristal puede estar en fase martensítica o en fase austenítica. La fase austenítica, o fase  $\beta$ , tiene alta simetría. Es la fase estable a altas temperaturas y bajos niveles de tensión. Por otro lado, la fase martensítica, o fase  $\alpha$ , es asimétrica, y tiene hasta 24 variaciones distintas. Es usualmente la fase estable a bajas temperaturas y altos niveles de tensión. El comportamiento singular de los SMA's proviene del hecho de que las transformaciones entre ambas fases son posibles. De la fase  $\beta$  a la fase  $\alpha$ , es la transformación martensítica, y en el otro sentido, es la transformación martensítica inversa. Las transformaciones se pueden hacer por medio de carga/descarga y/o calentamiento/enfriamiento.

En ausencia de tensiones, la cantidad de material en fases  $\alpha$  y  $\beta$  depende de la temperatura ambiente. La figura 2.1 presenta el ciclo de temperaturas típico de un SMA. Se destacan cuatro temperaturas:  $M_s$  y  $M_f$ , temperatura de inicio y de fin de la transformación martensítica respectivamente; y  $A_s$  y  $A_f$ , temperatura de inicio y de fin de la transformación martensítica

inversa respectivamente. Entonces, calentando un material hecho de 100% de martensita, uno puede transformarlo en 100% de austenita, y viceversa.

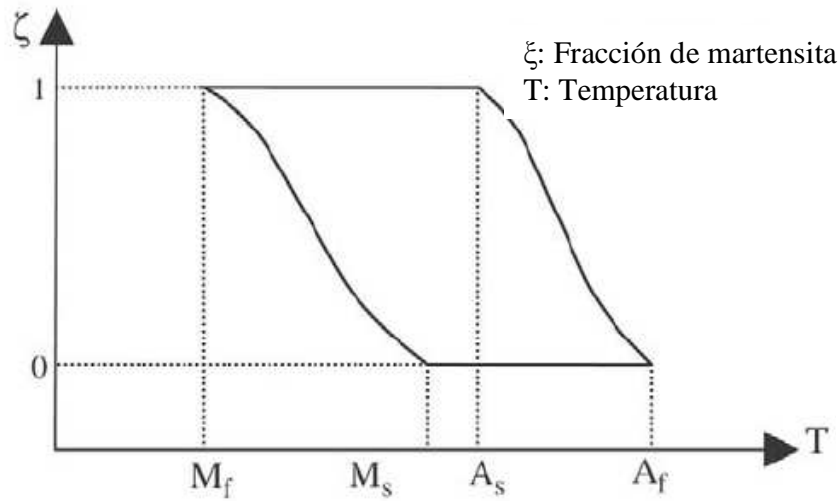


Figura 2.1: Transformación de fase martensítica en ausencia de tensiones [3]

### 2.1.2 Efecto de memoria de forma

El efecto de memoria de forma ocurre cuando el material está en fase martensítica, es decir cuando la temperatura ambiente está bajo  $M_f$ . En este caso, cuando se carga el material, el cristal de martensita se deforma elásticamente y luego plásticamente. Una gran deformación plástica es posible porque el cristal tiene la capacidad de “desacoplarse”: los defectos del cristal permiten a sus planos deslizar uno sobre el otro sin fallar (Figura 2.2). Al descargar el material, se nota una gran deformación remanente (Figura 2.3). Para constatar el efecto de memoria de forma, hay que calentar el material sobre la temperatura  $A_f$ , para que ocurra la transformación austenítica. Luego, al volver a una temperatura bajo  $M_f$ , los cristales de martensita vuelven a su forma original, y la pieza también.

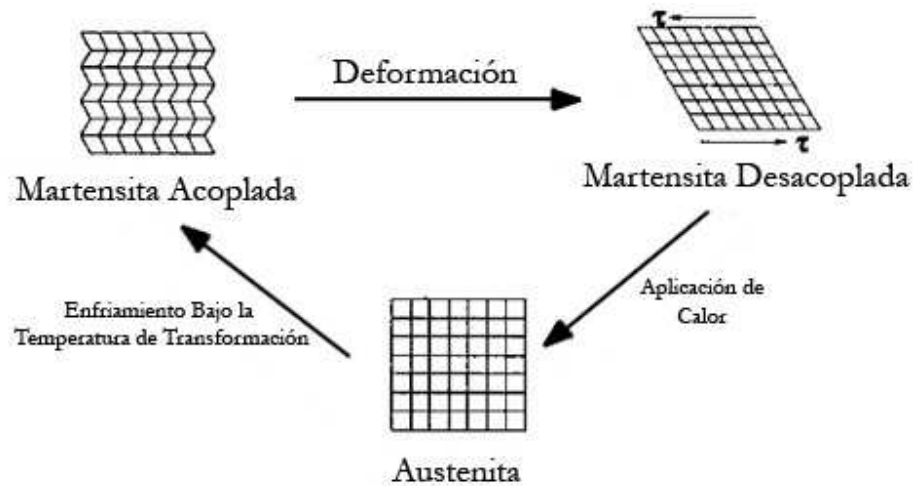


Figura 2.2: Cambios cristalográficos y memoria de forma [4]

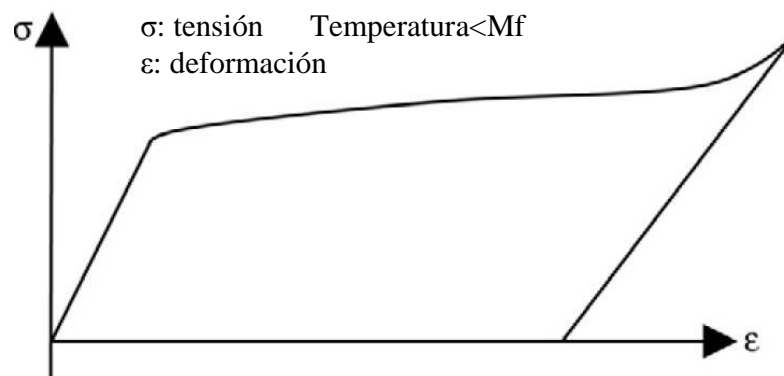


Figura 2.3: Curva tensión deformación típica de un material con memoria de forma [3]

### 2.1.3 Superelasticidad

La superelasticidad ocurre cuando un material está a una temperatura sobre  $A_f$ , es decir que se compone de 100% de austenita. Como la austenita es estable a bajos niveles de tensiones, al cargar el material se puede inducir una fase martensítica, más estable bajo tensiones altas. Una vez que toda la austenita se ha transformado, se puede lograr las mismas deformaciones que en el caso de la memoria de forma, por el comportamiento de la martensita bajo tensión. Al descargar, la martensita se transforma porque la austenita es más estable a esa temperatura. El material

vuelve a su forma inicial aun cuando logró grandes deformaciones y disipó energía. Este comportamiento se ilustra en la figura 2.4.

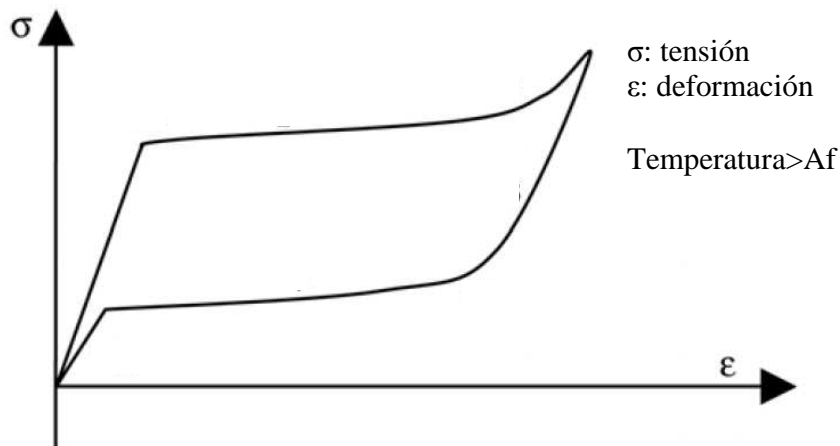


Figura 2.4: Curva tensión deformación típica de un material superelástico [3]

## 2.2 Estudios de conexiones con SMA.

### 2.2.1 Ocel et al. (2004) [4]

Ocel et al. (2004) estudiaron la factibilidad de conexiones usando SMA. En este caso, cuatro pernos de Nitinol (NiTi) de gran diámetro (35mm) conectaban las alas de una viga y de una columna (figura 2.5). La aleación estaba en su forma martensítica, por lo tanto se aprovechó el efecto de memoria de forma para disipar energía. El protocolo de carga del proyecto SAC fue ocupado y aplicado a la velocidad de 2 pulgadas por minuto. Se buscó el mejor tratamiento térmico para devolver a los pernos su forma original y se ensayó de nuevo la conexión después del tratamiento. Se puede destacar algunas conclusiones:

- Con un 4% de giro, la histéresis se mantuvo estable, sin degradación de la resistencia.
- No se observó fluencia ni en la columna ni en la viga.
- Los pernos no volvieron a su forma inicial después del tratamiento térmico. Se lograron recuperaciones de 76% y 54% de las deformaciones.

- Al ensayar la conexión después del tratamiento térmico, la histéresis fue la misma, y no se notó pérdidas de resistencia, rigidez o signos de fatiga. Un ejemplo de los resultados se puede apreciar en la figura 2.6.

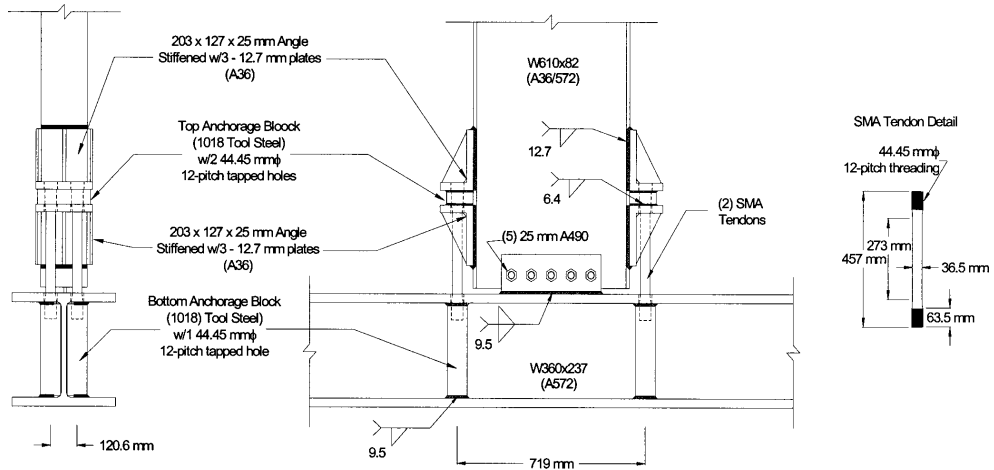


Figura 2.5: Esquema de la conexión S2 ensayada por Ocel et al [4]

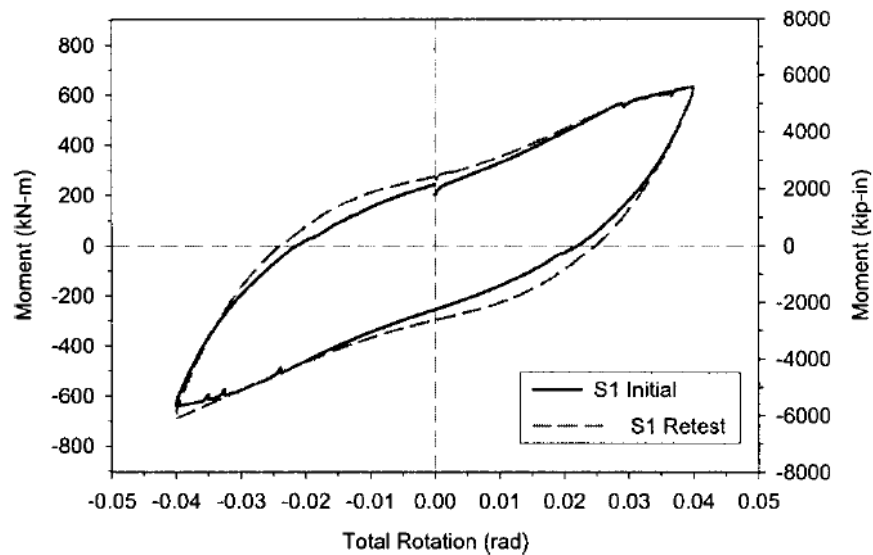


Figura 2.6: Histéresis de la conexión S1 antes (línea negra) y después (línea punteada) del tratamiento térmico [4]



### 2.2.2 *Abolmaali et al (2005) [10]*

El trabajo experimental que fue la base de esta publicación se desarrolló en dos fases. Primero se buscó el tratamiento térmico óptimo para lograr el efecto de superelasticidad, por lo cual se ensayaron pernos de Nitinol de varios diámetros. Se hicieron ensayos monotónicos y cíclicos. Se compararon temperaturas de tratamiento de 300 °C y 350 °C. Resultó que para un tratamiento a 300 °C, se encontró una tensión de transición más alta, y para un tratamiento a 350 °C, se encontró una tensión última más alta y una mejor disipación de energía. Por lo tanto, se eligió el tratamiento a 350 °C para la segunda fase de las experimentaciones.

La segunda fase de los experimentos consistió en ensayar conexiones con pernos de acero y de Nitinol y comparar la disipación de energía. La conexión se compone de dos perfiles T unidos por las alas con 4 pernos (figura 2.7). La secuencia de cargas cíclicas es la especificada por el SAC [12]. Los pernos fallaron en ambos casos al mismo nivel de tensiones, por acumulación de tensiones en el hilo. La energía disipada por la conexión con elementos superelásticos fue mayor a la conexión convencional. En la figura 2.8 se puede apreciar el área de los ciclos de histéresis, mayor en el caso de los pernos SMA.



*Figura 2.7: Dispositivo experimental [10]*

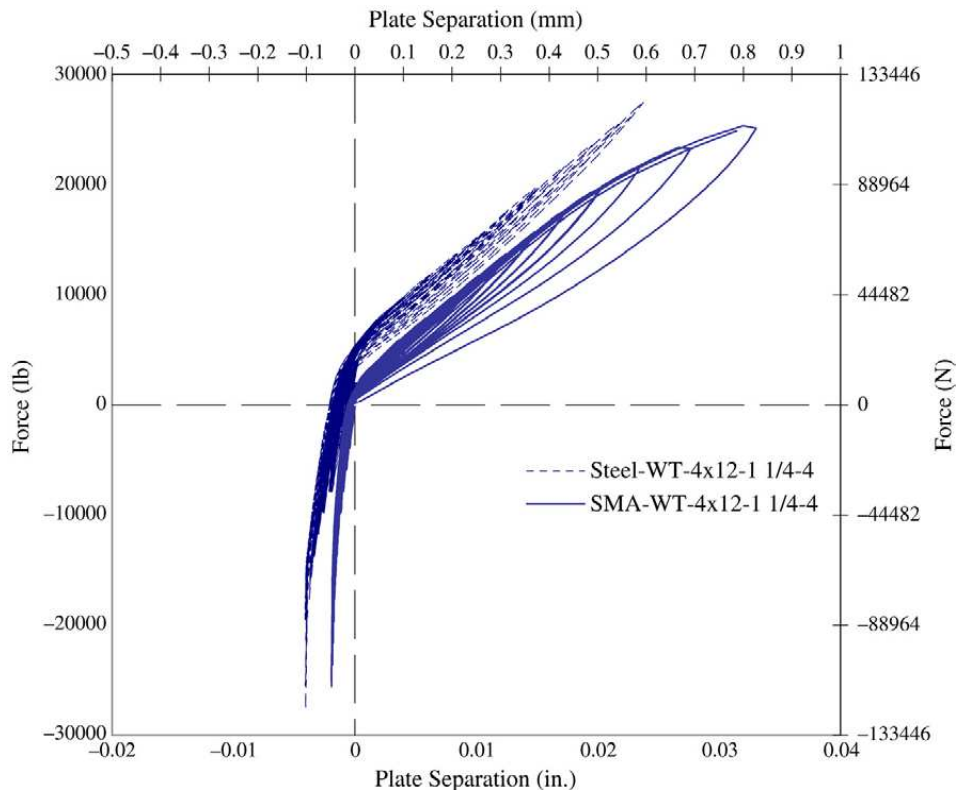


Figura 2.8: Comparación pernos de acero y pernos SMA [10]

### 2.2.3 Sepúlveda (2006) [1]

En primer lugar, se realizaron ensayos estáticos hasta la rotura y ensayos cíclicos de barras de 3mm de diámetro, y de composición química Cu- Al: 10,90% - Be: 0,615%. Se caracterizó la curva de rotura y se calculó valores del amortiguamiento y de la energía disipada.

- De los ensayos estáticos se obtuvieron las propiedades mecánicas: el módulo de elasticidad:  $697350 \text{ kgf/cm}^2$ , la tensión a la fluencia:  $1694 \text{ kgf/cm}^2$ , la deformación a la fluencia: 0,24%, la carga última: 349 kgf y la deformación a la falla: 8,1% (figura 2.9).
- Del ensayo cíclico, para una deformación de 2,6%, el amortiguamiento es de 6%, y la energía disipada de  $2,3 \text{ kgf/cm}^2$ , valores que aumentan a medida que aumenta la deformación (figura 2.10).

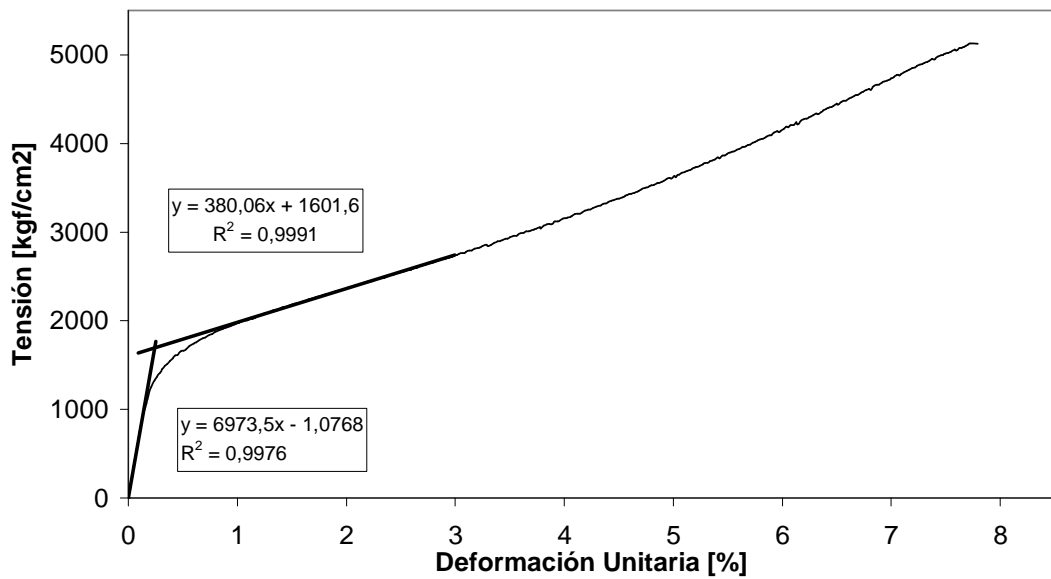


Figura 2.9: Ensayo estático de una barra: curva de rotura [1]

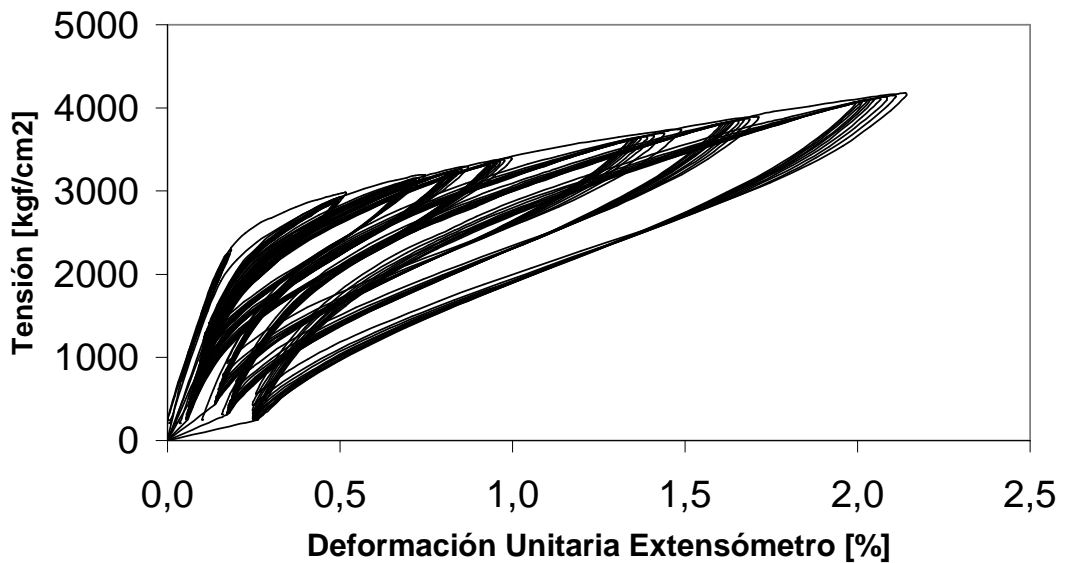


Figura 2.10: Ensayo dinámico de una barra: ciclos de histéresis [1]

Luego, el mismo tipo de barras, previamente tratadas para estar en fase austenítica, se usaron como disipadores en una conexión viga-columna. La geometría de la conexión es detallada más adelante, en el punto 4.2.1. Las figuras 2.11 y 2.12 representan el dispositivo de

ensayo. Se le impusieron desplazamientos verticales a la viga, a una distancia de 0,97m de la columna, según el protocolo de SAC [12]. Un ejemplo de resultado se ve en la figura 2.13.

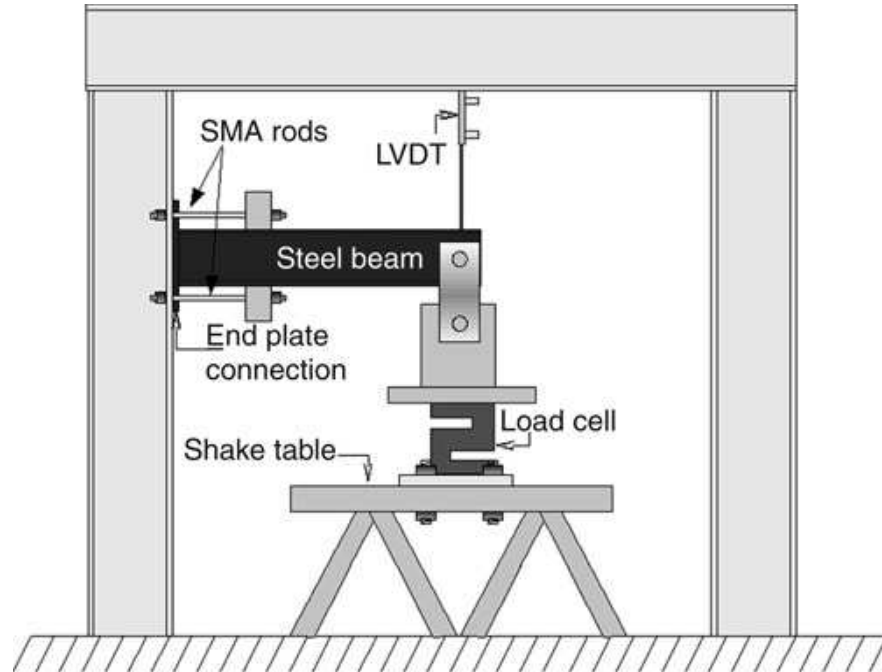


Figura 2.11: Dispositivo experimental [15]

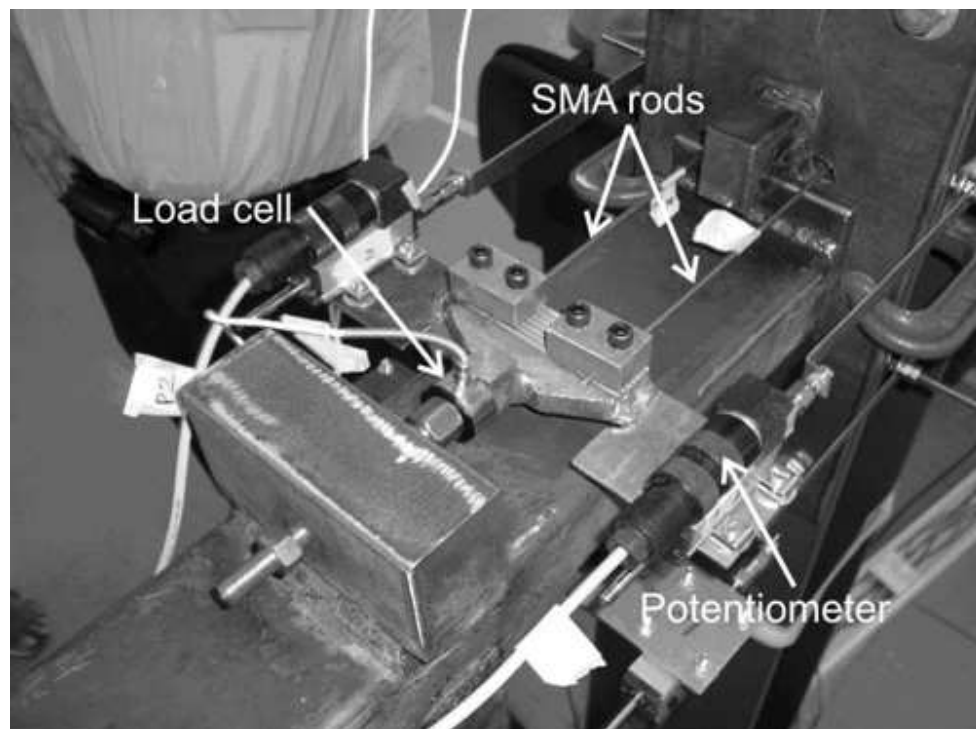


Figura 2.12: Detalle de la conexión y del dispositivo de medición [15]

Las conclusiones principales son las siguientes:

- El comportamiento de las barras en la conexión fue similar al de las barras en los ensayos a tracción.
- La conexión mostró un comportamiento estable, sin degradación de resistencia, y no se notaron daños en la viga ni en la columna.
- Luego de los ensayos, las barras no mostraron ningún daño aparente, quedando con deformaciones remanentes despreciables.

Se concluyó que “los disipadores de energía, en base a barras SMA CuAlBe, tienen una gran capacidad de disipar energía en una conexión viga columna, por lo que se recomienda su uso para proteger las conexiones viga columna de estructuras de acero de los daños de posibles eventos sísmicos”.

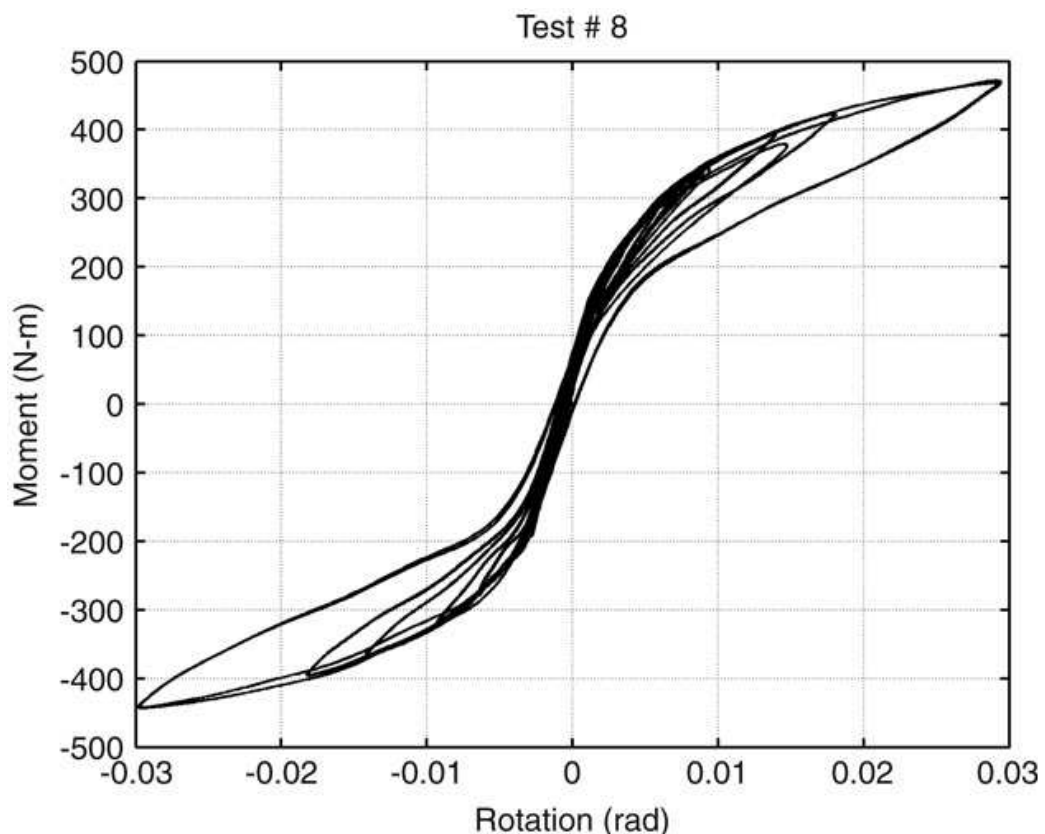


Figura 2.13: Ciclos de histéresis Momento-giro en la punta de la viga de la conexión [15]

### 2.2.4 Arellano (2002) [2]

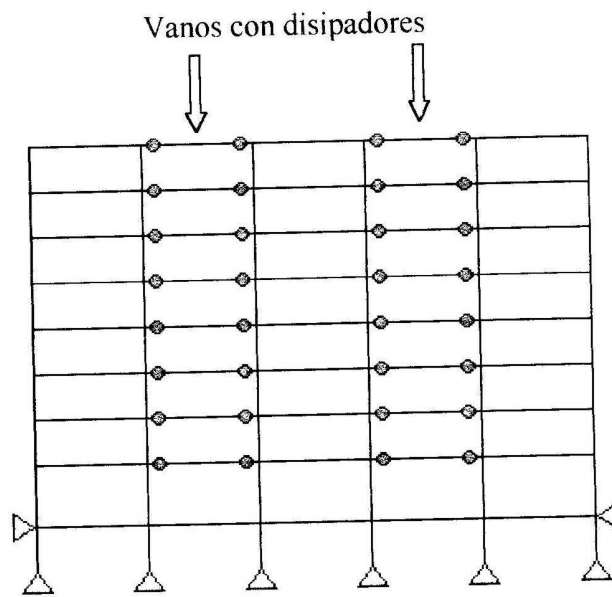
Este trabajo cuantificó el aporte de usar disipadores de energía en las uniones viga-columna de marcos de acero. El edificio particularmente estudiado tenía nueve pisos, un subterráneo y cinco vanos y estaba ubicado en Los Ángeles, California (figura 2.14).

Se utilizó el programa DRAIN-2DX, que permite modelar los materiales y efectuar el análisis no lineal de la estructura. Se estudiaron tres modelos del edificio:

- M1: estructura sin disipadores
- M1a: estructura con disipadores en todos los vanos
- M1b: estructura con disipadores en dos vanos

Se estudió el comportamiento de cada modelo frente a cuatro registros del terremoto de Northridge (17 de enero de 1994): Rinaldi 228 y 318, Sylmar y Northridge. Se comparó la respuesta de cinco variables: corte basal, corte por piso, deriva de entrepiso, *drift* de techo, y disipación de energía. Las conclusiones principales fueron las siguientes:

- Los disipadores diseñados con barras de SMA resultaron muy flexibles. Por lo tanto, el modelo M1a, con disipadores en todas las vigas se comportó de manera muy flexible, y las deformaciones entre pisos quedaron fuera de lo aceptable.
- Al flexibilizar la estructura se aumenta el período fundamental de vibración del edificio. Se notó entonces una reducción de los esfuerzos de corte, mayor en el modelo M1a que en el modelo M1b.
- En el modelo M1b, la disipación de energía de los disipadores no resultó muy significativa: los elementos principales (vigas y columnas) disipan entre 75% y 95% de la energía total, lo que es parecido al comportamiento del modelo M1 (sin disipadores).



*Figura 2.14: Distribución de los disipadores de energía [2]*

## Capítulo 3

### 3 Estudio preliminar

#### 3.1 Modelación del edificio

El estudio preliminar consistió en determinar el efecto en la respuesta de incluir disipadores en un marco de acero, para lo cual se modificó las propiedades de las barras SMA ocupadas por Arellano [2] por las obtenidas por Sepúlveda [1]. Se analizó cuatro casos distintos, comparando la energía disipada, las deformaciones remanentes y el drift máximo.

El modelo de la estructura (vigas y columnas) no fue cambiado. Se ocuparon elementos inelásticos simples, de tipo 02 en el programa DRAIN-2DX (figura 3.1). Las vigas, elásticas, tienen rótulas plásticas en sus extremos y opcionalmente conexiones excéntricas para representar la dimensión de la unión con la columna.

El registro ocupado fue el de Rinaldi, componente horizontal 228, registrado para el terremoto de Northridge, California, del 17 de enero 1994 ( $M_w=6,7$ ).



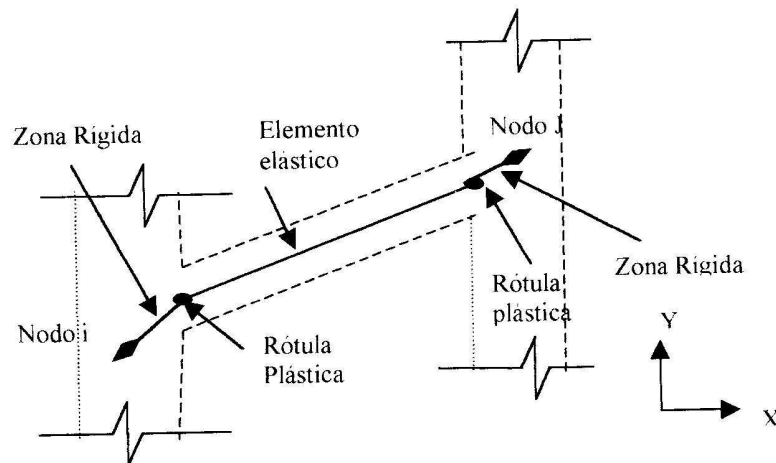


Figura 3.1: Geometría del elemento tipo 02 [2]

La estructura modelada tenía nueve pisos, un subterráneo y cinco vanos. Las conexiones con elementos SMA se ubican como lo muestra la figura 2.14.

El cambio que se hizo al modelo original fue en la modelación de las conexiones con disipación de energía. Primero se cambiaron los valores de la curva tensión-deformación del modelo del material, ingresando los valores obtenidos con los ensayos de las barras de CuAlBe (figura 2.9). Luego, se hicieron distintos estudios, cambiando el modelo de las conexiones, lo que se presenta a continuación.

#### - Caso 1: sin material SMA:

Este caso corresponde al modelo M1 descrito más arriba: estructura de acero, con conexiones rígidas sin disipadores.

#### - Caso 2: con conexiones SMA tipo 04-2: “Inelastic unloading with gap”

Este caso corresponde al modelo de las conexiones del trabajo de Arellano [2], pero con propiedades adaptadas a los resultados de los ensayos de Sepúlveda [1]. El material de la conexión es de tipo superelástico (figura 3.2).

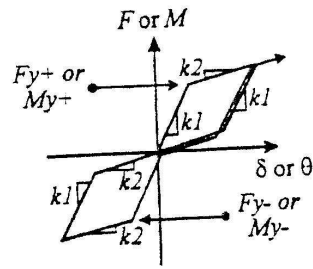


Figura 3.2: Conexión tipo 04-2[5]

Tabla 3.1: Características del caso 2 para una viga de tipo W33x141

k1	1884451864,2 [kgf.cm]
k2	376890372,8 [kgf.cm]
My+ y My-	2381345,3 [kgf.cm]

Estos valores se obtienen con las formulas siguientes:

$$k_1 = E.A. \frac{h^2}{2.L}$$

$$k_2 = 0,2.k_1$$

$$M_y = \sigma_y . A.h$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad del material (en [kgf/cm<sup>2</sup>])

A: Área total de la sección de las barras (16,62 [cm<sup>2</sup>])

h: Distancia entre las barras (84,6 [cm] para el W33x141)

L: Largo de las barras (22 [cm])

$\sigma_y$ : Tensión de fluencia del material (en [kgf/cm<sup>2</sup>])

En el caso de Arellano, se ocupó un valor del módulo de elasticidad de 700000 [kgf/cm<sup>2</sup>] y una tensión de fluencia de 1000 [kgf/cm<sup>2</sup>]. Se reemplazaron estos valores para el estudio preliminar con datos provenientes de los ensayos de Sepúlveda: modilo de elasticidad de 697350 [kgf/cm<sup>2</sup>], y tensión de fluencia de 1694 [kgf/cm<sup>2</sup>].

### - Caso 3: con conexiones de tipo 04-0: “Inelastic unloading”

Lo que se quiso estudiar en este caso es el efecto del cambio de rango en el registro. En efecto, la estructura en el caso 2 es mucho más flexible que la del caso 1. Por lo tanto, su periodo fundamental es más alto, así que el rango del registro que influye en la estructura no es el mismo. El caso 3 representaría una conexión de acero, pero sin cambiar el periodo fundamental de la estructura, facilitando las comparaciones. En este caso, la conexión es más débil que los elementos principales, por lo tanto, la rótula plástica va a producirse en la conexión. Se ocuparon los mismos valores de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $M_{y+}$  y  $M_{y-}$  que en el caso 2. El elemento tipo 04-0 representa la histéresis típica del acero (figura 3.3).

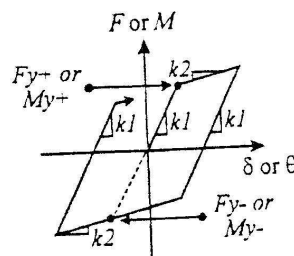


Figura 3.3: Conexión tipo 04-0 [5]

### - Caso 4: con conexiones de tipo 04-1: “Elastic unloading”

En este caso, uno quiere representar la flexibilidad de la conexión, imponiendo que la rótula plástica se produzca en la viga y no en la conexión. Se ocuparon los mismos valores de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $M_{y+}$  y  $M_{y-}$  que en el caso 2. El elemento ocupado tiene un comportamiento elástico pues se ocupó un valor de fluencia muy alto (figura 3.4).

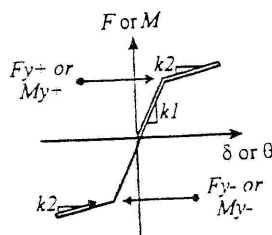


Figura 3.4: Conexión tipo 04-1 [5]

## 3.2 Resultados

### 3.2.1 Periodos

La tabla siguiente presenta los valores del periodo fundamental de la estructura, según los casos. Se nota que al usar disipadores se flexibiliza la estructura.

Tabla 3.2: Periodo fundamental según el caso

Caso	Periodo [seg]
1 - sin SMA	2.31
2 – con SMA de Arellano	2.70
2 – con SMA modificado	2.59
3 – <i>inelastic unloading</i>	2.59
4 – <i>elastic unloading</i>	2.59

### 3.2.2 Drift máximo

La figura 3.5 los valores extremos de la deriva de entrepiso para cada nivel. Esto representa los desplazamientos máximos de la estructura durante el sismo.

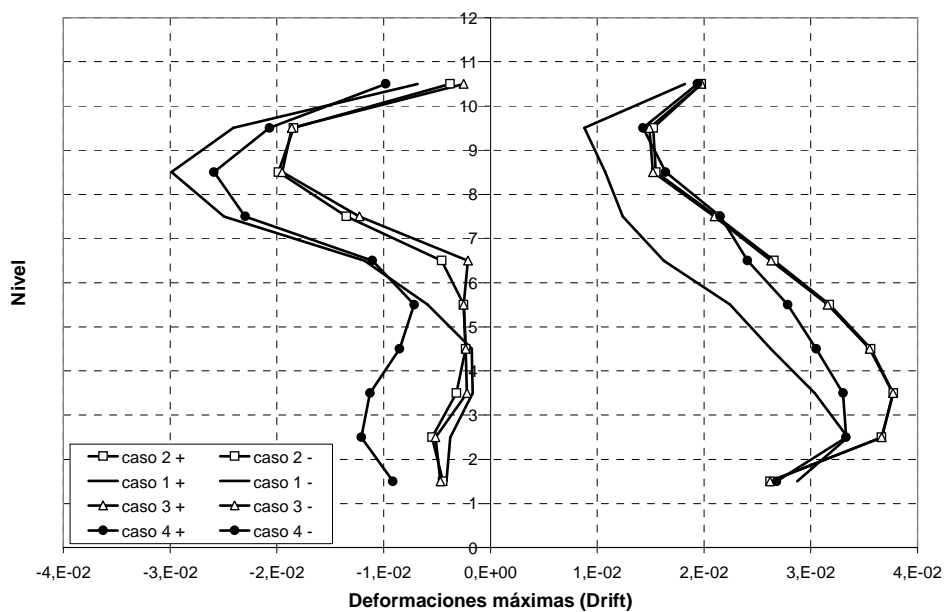


Figura 3.5: Envolventes del ángulo de drift máximo

### 3.2.3 Deformaciones remanentes

La figura 3.6 muestra las deformaciones remanentes de la estructura, o como queda deformada después del evento. Si estas deformaciones son importantes, el daño estructural puede ser tan grande que la estructura no puede ser reparada.

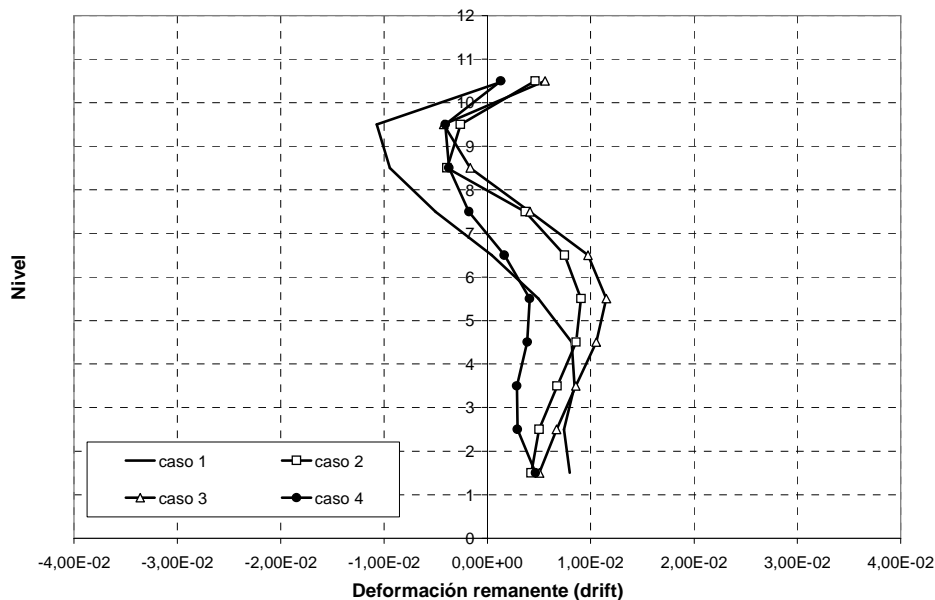


Figura 3.6: Deformaciones remanentes (drift)

### 3.2.4 Disipación de energía

La tabla 3.3 presenta los valores de disipación de energía en las conexiones según los casos. Este valor nos da información sobre la eficiencia del sistema de disipación.

Tabla 3.3: Energía disipada por tipo de elemento [kN\*m]

	Energía total disipada	En Vigas-columnas	%	En conexiones	%
<b>Caso 1 - Modelo sin SMA</b>	5873.00	5873.00	<b>100.00</b>	-	<b>0.00</b>
<b>Caso 2 - Modelo con SMA</b>	5201.00	4980.00	<b>95.75</b>	221.00	<b>4.25</b>
<b>Caso 3 - Modelo con SMA no elastico</b>	5699.00	4619.10	<b>81.05</b>	1079.80	<b>18.95</b>
<b>Caso 4 - Modelo con conexión elastica</b>	6023.00	5949.42	<b>98.78</b>	73.89	<b>1.23</b>

### ***3.2.5 Comentarios***

La estructura original es muy flexible, por lo tanto, al flexibilizar las conexiones, los desplazamientos se escapan del rango.

En todos los casos, los elementos principales de acero disipan la mayoría de la energía. El efecto de los disipadores en términos de deformaciones no se notó de manera significativa. Un estudio posterior se hizo, por Sepúlveda et al [15], para mejorar la calidad de las conclusiones que se pueden hacer con aquel modelo.

# Capítulo 4

## 4 Metodología

### 4.1 Objetivos del estudio

El estudio a continuación tiene como meta reproducir los resultados experimentales obtenidos por Sepúlveda [1]. Con dicho fin, se construyó un modelo con elementos finitos del programa ANSYS lo más parecido posible a la conexión ensayada. Esta parte presenta los diferentes puntos clave del modelo.

### 4.2 Modelo con elementos finitos

#### 4.2.1 Geometría

Sólo se modeló la viga y la conexión pues el programa permite modelar el contacto viga-columna sin necesariamente crear un elemento columna. Por simetría, se analizó solamente la mitad de la conexión, cortada según el plano de simetría vertical de la viga.

La conexión está constituida por una placa base, soldada a la viga y que se apoya en el ala de la columna. Las características geométricas de los componentes de la conexión están resumidas en la tabla 4.1. Los conectores son 4 barras de 3 [mm] de diámetro. Estas barras están empotradas en la columna (a 42 [mm] de la cara de la placa base) y se conectan con la viga a través de bloques soldados a las caras superior e inferior de la viga (figura 4.1). En el modelo, las barras de conexión, entre la columna y los bloques, están constituidas de una parte en material SMA y de otra parte de alta rigidez. Esa última parte representa las mordazas y el sistema de

pretensión de los ensayos de Sepúlveda [1], que se ubicaba entre las barras de SMA y los bloques. La longitud de la zona rígida corresponde a la distancia entre las mordazas y la tuerca de pretensión en la realidad.

Tabla 4.1: Características geométricas del modelo

Elemento	Geometría	Dimensiones [mm]
Viga	Cajón	100x50x4 y 970 de largo
Placa base	Paralelepípedo recto	100x100x8
Bloques	Paralelepípedo recto	50x50x22
Cabezas	Hexágono	$\Phi 10$ , esp.5
Barras	Cilindro	$\Phi 3$ SMA: 178 de largo Rígida: 140 de largo

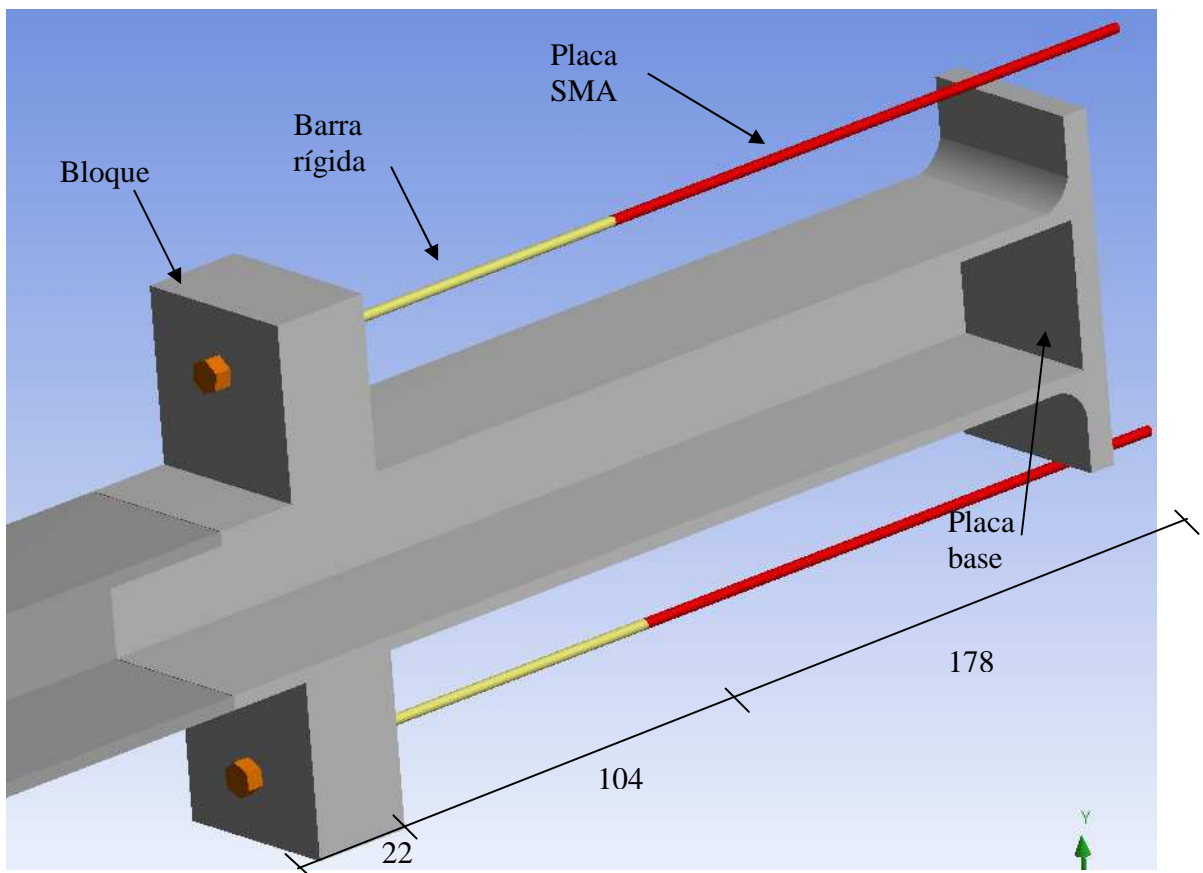


Figura 4.1: Vista general de la conexión



## 4.2.2 Contactos

El modelo se compone de 8 cuerpos: las 2 barras SMA, las 2 barras rígidas, las 2 cabezas, el bloque de conexión y la viga (ver figuras 4.2 y 4.3). Esta configuración se eligió por dos razones: por la presencia de varios materiales y para simplificar la construcción de la malla. Si dos cuerpos tienen un punto en común, ó si lo pueden tener a lo largo del estudio, hay que definir las condiciones de contacto entre aquellos dos cuerpos.

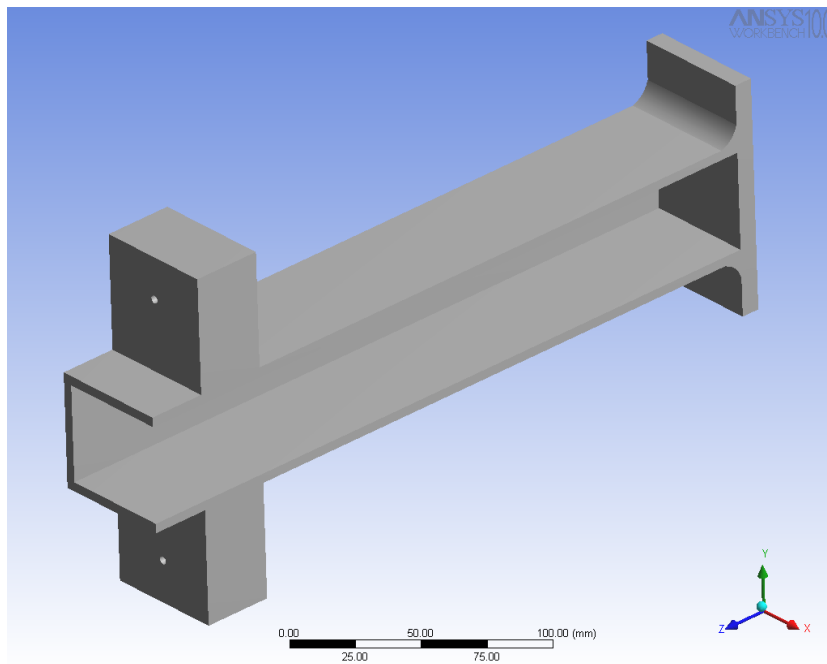


Figura 4.2: Cuerpo “Bloque de conexión”

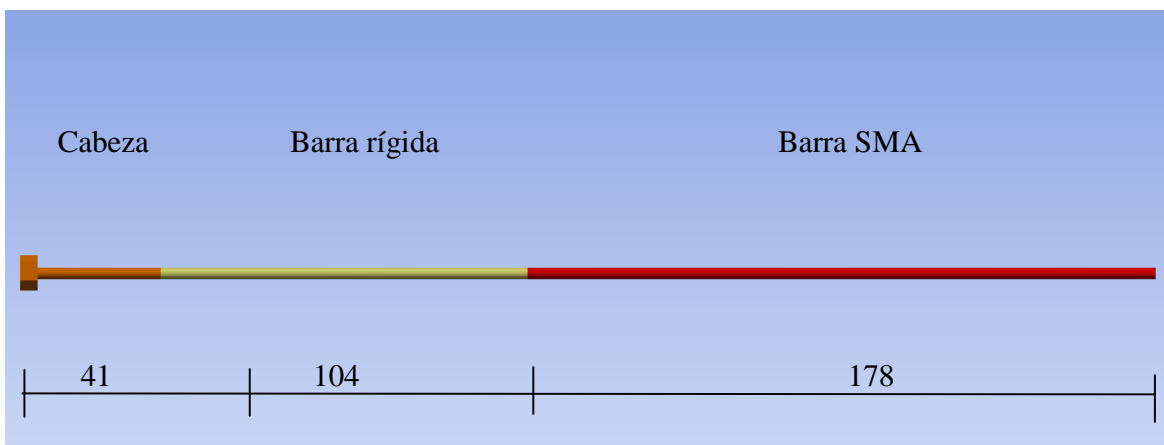


Figura 4.3: Cuerpos de las barras

Se modeló los bloques, la viga y la placa base como un solo cuerpo, de tal manera que no haya condiciones de contacto entre aquellos elementos. Esta simplificación ahorra tiempo de cálculo y se justifica por el hecho que el estudio se concentra en el comportamiento de las barras. Este conjunto es lo que se llamará a continuación “bloque de conexión”.

Todos los contactos se modelaron a través de pares de elementos CONTA174-TARGE170. Los elementos de tipo *contact* (CONTA174) no pueden penetrar a los elementos de tipo *target* (TARGE170). Para un comportamiento simétrico, se asignaron a las superficies de contacto ambas formulaciones, *contact* y *target* (figura 4.4).

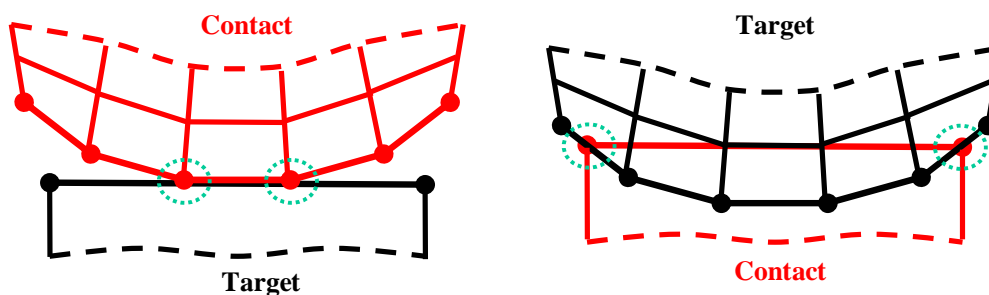


Figura 4.4: Comportamiento de contactos [7]

Una vez definida las superficies que constituyen el par *contact-target*, hay que definir el tipo de *contact* que ocurre en ese lugar.

El contacto entre barras y cabezas como entre el bloque de conexión y la viga se definió como *bonded*. No permite ningún desplazamiento relativo de un elemento con respecto al otro.

El contacto entre las cabezas de barras y el bloque de conexión, en el agujero, donde la barra se puede desplazar libremente en su eje, se definió como *frictionless*. Ese tipo de contacto es no lineal y permite que ambas superficies se separen, y se desplacen una con respecto a la otra sin fricción.

### 4.2.3 Malla-elementos

Los elementos usados para mallar la geometría son elementos volumétricos de tipo SOLID186 y SOLID187. Estos elementos son los generados por la malla automática de Workbench.

SOLID186 es un elemento tridimensional con tres grados de libertad por nodo (traslación según X, Y y Z). Permite formulación de materiales con plasticidad, endurecimiento, fluencia y capacidad de grandes deformaciones. Está compuesto por 20 nodos distribuidos según el esquema presentado en la figura 4.5. Además de su configuración base hexaédrica puede tener una configuración piramidal, prismática o tetrahédrica lo que le permite adaptarse a la geometría de la pieza. Este elemento se usó para modelar las barras.

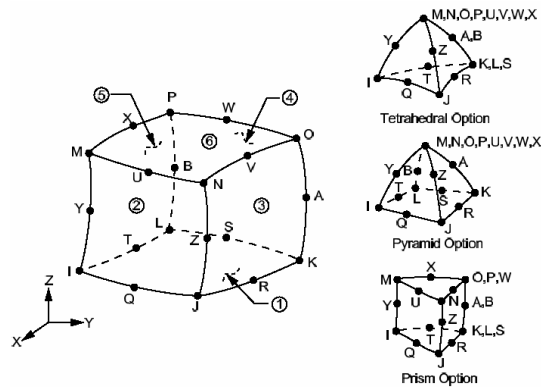


Figura 4.5: Geometría del elemento SOLID186 [11]

SOLID187 es un elemento similar en su comportamiento pero tetrahédrico y con 10 nodos (figura 4.6). Este elemento se usó para la modelación del grupo bloque-viga-placa propiamente tal.

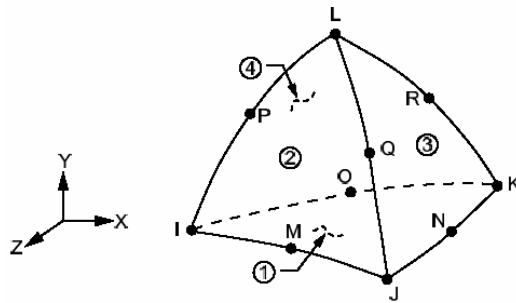
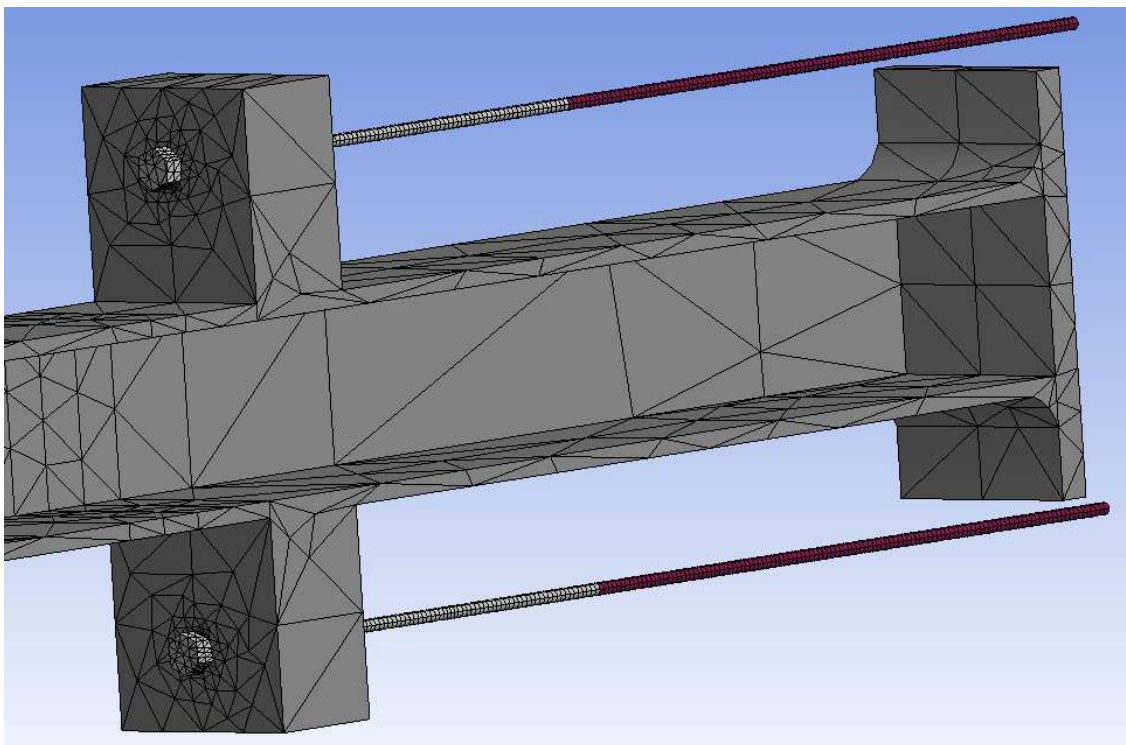


Figura 4.6: Geometría del elemento SOLID187 [11]

La generación de la malla se hizo con las herramientas del programa considerando los siguientes aspectos: la malla tenía que ser bastante fina en las zonas de contacto y en las barras, elementos principales del estudio. El tiempo de cálculo depende directamente del número de nodos del modelo, por lo tanto, la malla de las zonas de poco interés (viga y bloque) se hizo más gruesa y con elementos SOLID 187. La malla ocupada es la siguiente:

*Tabla 4.2: Características de la malla*

<b>Pieza</b>	<b>Nº Elementos</b>	<b>Nº Nodos</b>
Bloque de conexión	6789	10543
Viga	640	1428
Barras SMA	762	5618
Barras rígidas + cabezas	1881	6175
<b>Total</b>	<b>10072</b>	<b>23764</b>



*Figura 4.7: Vista general malla*

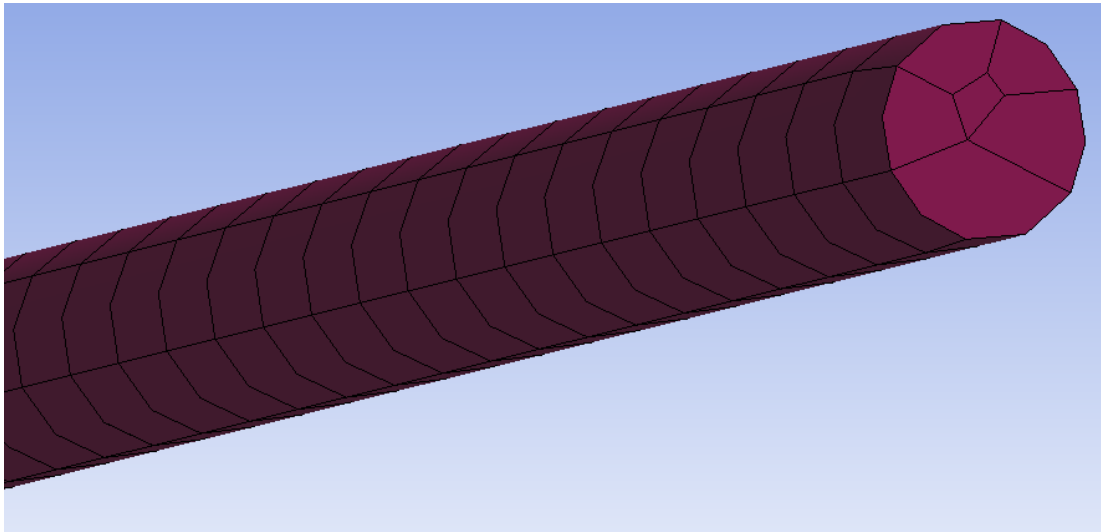


Figura 4.8: Detalle malla barras

#### 4.2.4 Condiciones de borde

Para representar el entorno del modelo (columna, otra mitad de la conexión), hay que definir las condiciones de borde de los elementos.

Las barras están empotradas en toda la sección del lado de la columna. Se ocupa un *fixed support*. Ese contacto lineal restringe todos los grados de libertad de cada nodo de la superficie.

El apoyo de la viga en la columna se modeló con sólo compresión: *compression only support*. Con ese apoyo no lineal, la placa puede despegarse de la columna, pero no puede moverse más allá de su plano original, del lado de la columna.

Para impedir el movimiento de cuerpo rígido al aplicar una fuerza vertical, se puso un apoyo simple en la dirección Y en la esquina superior de la placa base. Más adelante, se detalla porqué se eligió esta solución y no la de poner apoyos *compression only*. Al poner un apoyo simple que restringe el movimiento según Y de aquella línea, uno puede sólo imponer fuerza hacia arriba, lo que no es un problema porque se comprobó que el comportamiento del modelo es completamente simétrico.

El plano de simetría de la viga fue modelado como un apoyo deslizante en vertical: *sliding support*. Este tipo de condición de borde restringe los desplazamientos de los nodos perpendiculares.

## 4.3 Solicitaciones

### 4.3.1 Pretensión de los pernos

En los ensayos, se pretensaron los pernos por medio de una tuerca presente entre el bloque y las mordazas. Las dos barras de cada cara (inferior y superior), estaban predeformadas por la misma tuerca: en efecto, una pieza unía las dos mordazas y hacía el contacto con el bloque. La carga se midió en esa misma pieza y se dividió por dos para conocer la carga en una barra. El informe [1] reporta que la precarga era de 2000 [N] aproximadamente, por lo tanto, se pretensaron los pernos con una carga de 1000 [N] cada uno. Al agregar una carga de pretensión a un cuerpo cilíndrico, el programa agrega en la sección mediana un elemento PRETS179 al cual se aplica la carga. La pretensión se hace antes de todas las otras etapas de carga y queda bloqueada durante aquellas.

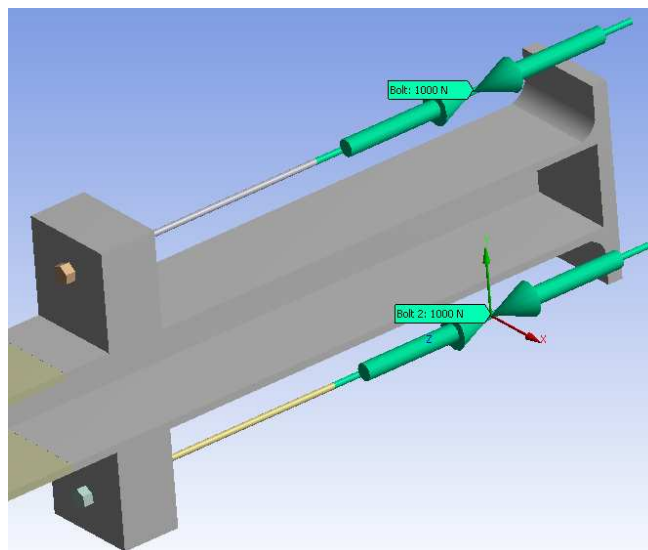


Figura 4.9: Pretensión de las barras

### 4.3.2 Ciclos de carga

La secuencia de cargas ocupada en [1] es la estipulada por el SAC en 1997 [12]. Para lograr el giro estipulado, se impone desplazamientos verticales a la punta de la viga de tal manera que cumplen la fórmula siguiente:

$$\theta = \frac{d}{L}$$

$\theta$ : giro

d: desplazamiento

L: largo total de la viga (970 [mm])

La tabla 4.3 resume los giros estipulados y los desplazamientos verticales correspondientes en la punta de la viga.

Tabla 4.3: Secuencia de giros para el ensayo [1]

N° Ciclos	Giro $\theta$ [%]	Desplazamiento d [mm]
6	0.375	4
6	0.500	5
6	0.750	7
4	1.0	10
2	1.5	15
2	2.0	19
2	3.0	29
2	4.0	39

El programa ANSYS hace la distinción entre aplicar un desplazamiento y aplicar una fuerza. Pero la pretensión de los pernos se aplica automáticamente como etapa previa si las etapas que siguen implican fuerzas. Por lo tanto, la única manera de poder pretensar las barras previamente a todo análisis, es de imponer una fuerza a la punta de la viga, lo que se pudo comprobar por medio del análisis. Para poder relacionar una fuerza con un desplazamiento,

relación que no es lineal, se impuso una fuerza gradual a la punta de la viga, y se registró el desplazamiento correspondiente. La relación se resume en la tabla 4.4. No se hizo el ciclo de 4% de giro pues no se hicieron experimentalmente.

<b>Desplazamiento [mm]</b>	<b>Fuerza [N]</b>
4	185
5	190
7	198
10	210
15	228
19	245
29	280

*Tabla 4.4: Relación desplazamiento – fuerza en la punta de la viga*

## 4.4 Materiales

### 4.4.1 Aceros

No se sabe qué tipo de acero se ocupó en la conexión ensayada. Por lo tanto, el modelo se hizo con acero A36: tensión de fluencia de 250 [MPa], tensión última de 460 [MPa] y módulo de elasticidad de 200000[MPa]. Esto no influyó en los resultados porque se comprobó que ninguna parte de la conexión fluyó a parte de las barras.

Para la parte rígida de las barras, se ocupó un acero de rigidez muy alta ( $2e7$  [MPa]), para que la mayoría de las deformaciones ocurra en los elementos superelásticos.



#### 4.4.2 CuAlBe

En la biblioteca de los materiales ANSYS, existe un material superelástico genérico, el material SMA (figura 4.10). El algoritmo que representa el comportamiento de ese material se encuentra en el manual de teoría de ANSYS [13], sección 4.6. Para que ese material represente bien el comportamiento de la aleación CuAlBe, uno necesita las 9 constantes siguientes (tabla 4.5):

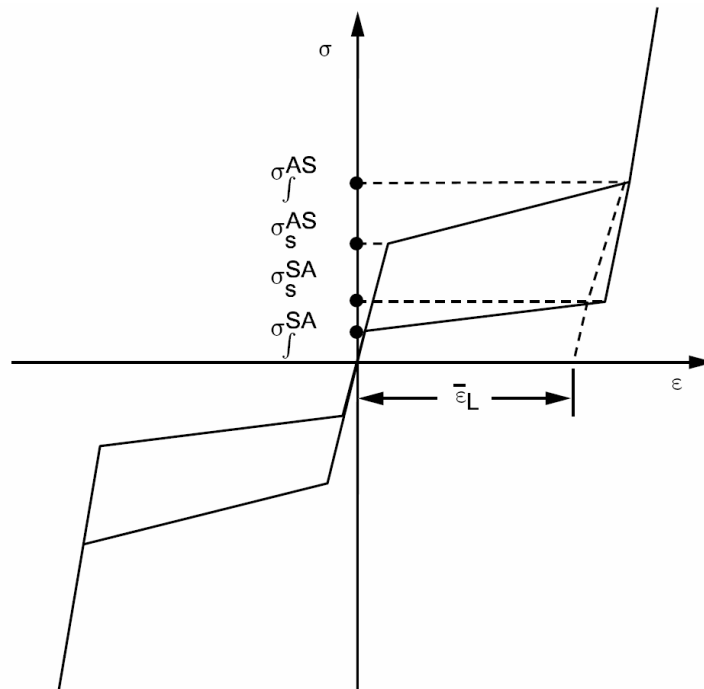


Figura 4.10: Material SMA de ANSYS [13]

Tabla 4.5: Parámetros del material SMA

Constante	Significación
$E_X$	Módulo de elasticidad de la fase austenítica
$\nu$	Coef. De Poisson de la fase austenítica
$Y_{MRT}$	Módulo de elasticidad de la fase martensítica
$\sigma_S^{AS}$	Tensión de inicio de la transformación martensítica
$\sigma_f^{AS}$	Tensión de fin de la transformación martensítica
$\sigma_S^{SA}$	Tensión de inicio de la transformación martensítica inversa
$\sigma_f^{SA}$	Tensión de fin de la transformación martensítica inversa
$\bar{\epsilon}_L$	Deformación residual máxima
$\alpha$	Parámetro midiendo la diferencia entre comportamientos a tensión y a compresión

Los resultados de los ensayos de barras de CuAlBe presentan diferencias bastante importantes según si el ensayo es estático o dinámico. La diferencia mayor está en los valores de  $E_X$  y  $\sigma_S^{AS}$  (figura 4.11). Se decidió ocupar los resultados de los ensayos cíclicos para definir las características del material CuAlBe porque el objetivo principal de la modelación es reproducir de la mejor manera los ensayos cíclicos que se hicieron con la conexión.

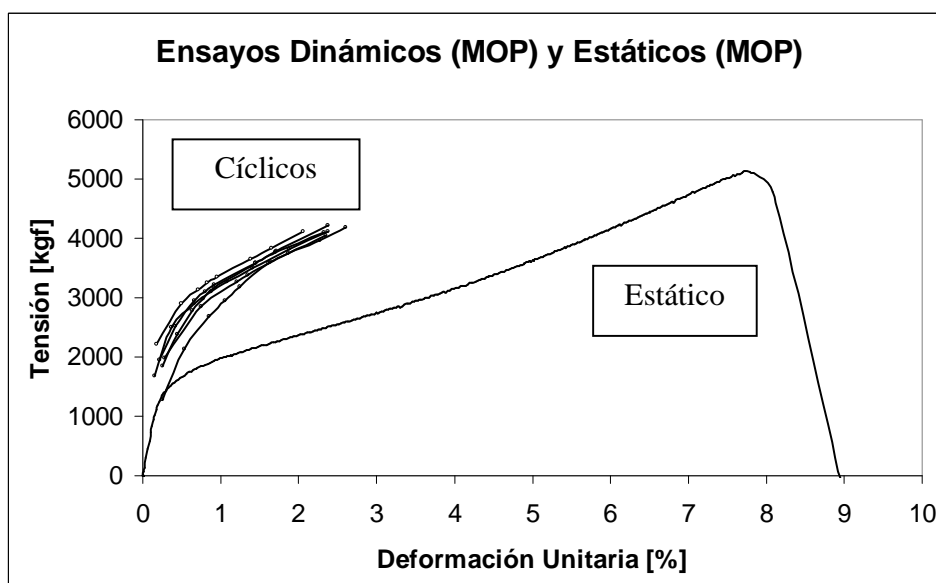


Figura 4.11: Ensayos de barras: estático y cíclicos

Entonces, se trató de tener una “bandera” en ANSYS la más cercana posible a los ciclos obtenidos de manera experimental. Los datos finalmente elegidos son los presentados en la tabla 4.6.

*Tabla 4.6: Características del modelo elegido*

<b>E_X</b>	90000 MPa
<b>NU</b>	0,3
<b>YMRT</b>	31074,93 MPa
$\sigma_S^{AS}$	250 MPa
$\sigma_F^{AS}$	510 MPa
$\sigma_S^{SA}$	249 MPa
$\sigma_F^{SA}$	50 MPa
$\bar{\epsilon}_L$	0,0269052 mm/mm
<b><math>\alpha</math></b>	0,00

La figura 4.12 muestra en línea gruesa el comportamiento del modelo numérico y superpuesto con los ensayos dinámicos de barras (línea delgada). La bandera entregada por ANSYS con los valores de la tabla 4.6 es la más cercana posible a las curvas experimentales.

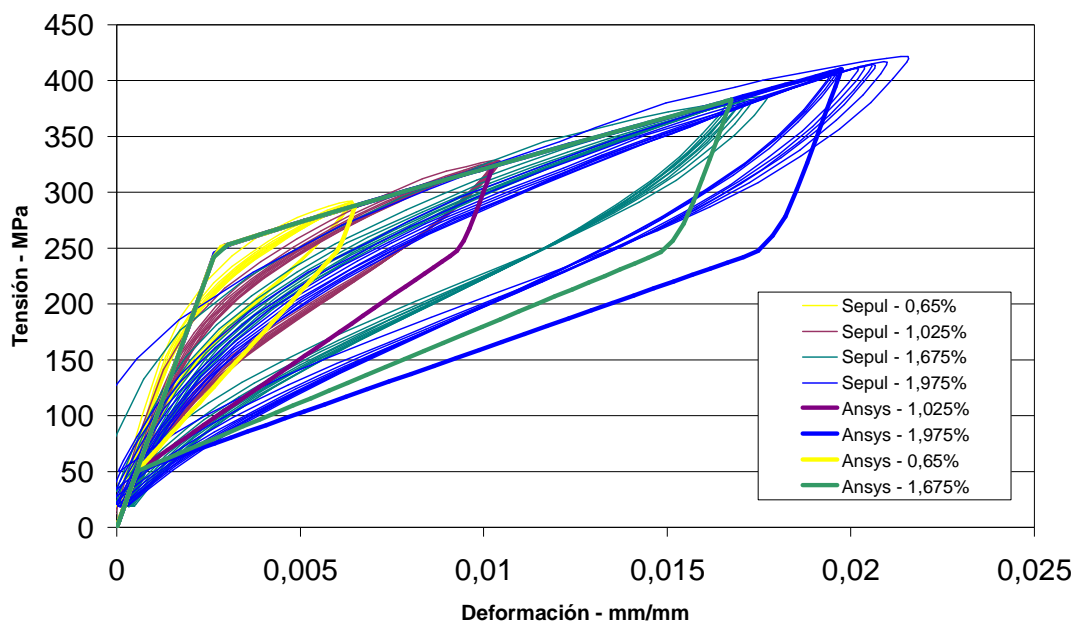


Figura 4.12: Calibración del modelo SMA

Se debe notar varios puntos para entender porqué se eligió este modelo. Antes de todo, el algoritmo del elemento SMA de ANSYS se desarrolló para materiales superelásticos con un comportamiento cercano al del Nitinol. La diferencia mayor que tiene el CuAlBe con el Nitinol es que la pendiente del segundo tramo de la bandera (entre  $\sigma_S^{AS}$  y  $\sigma_F^{AS}$ ) es bastante alta, lo que resulta que  $\sigma_S^{SA}$  es mayor que  $\sigma_S^{AS}$ . El algoritmo funciona de la manera siguiente: cuando crece la carga, el punto  $(\varepsilon, \sigma)$  sigue la curva de carga de la “bandera”. Una vez que cambia el signo de la velocidad de carga, la tensión baja con una pendiente igual a  $E_X$  hasta que la tensión sea igual a  $\sigma_S^{SA}$ , y luego cambia de pendiente para llegar al punto  $\sigma_F^{SA}$ . Con ese comportamiento del algoritmo, que no se cambiable, hubo que adaptar el modelo para poder reproducir los ensayos. En efecto, no se puede ocupar un valor de  $\sigma_S^{SA}$  mayor que  $\sigma_S^{AS}$ , porque, no se desarrolla la bandera y el modelo se vuelve inestable. Por lo tanto, la primera condición fue de imponer un valor de  $\sigma_S^{SA}$  menor a  $\sigma_S^{AS}$ . Luego, para que la curva de descarga fuera más cercana a la realidad, hubo que bajar el valor de  $\bar{\varepsilon}_L$  que inicialmente se acerca a 10%. Tales cambios no afectan de manera significativa el comportamiento del modelo para los análisis que se van a hacer: los ensayos experimentales muestran que la mayor deformación que ocurre en las barras se mantiene

bajo a 3%, lo que significa que en ningún caso ocurrirá la segunda elasticidad (100% martensita). La figura 4.13 representa el comportamiento del material SMA con varios niveles de deformación.

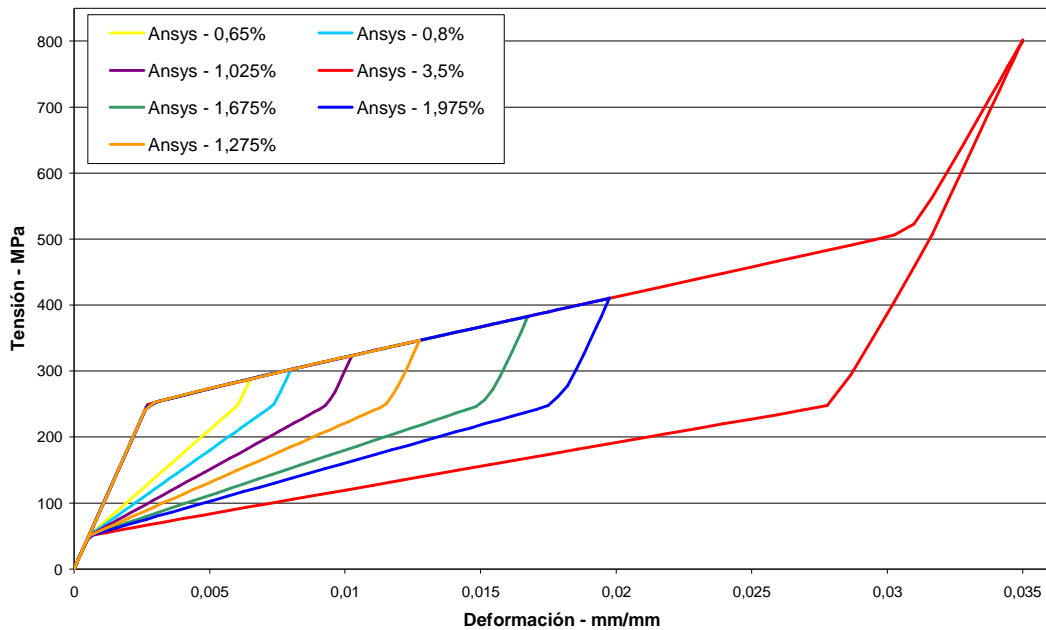


Figura 4.13: Comportamiento del material SMA de ANSYS

El programa ocupado es ANSYS Workbench, el cual es una interfaz simplificada de ANSYS. El material SMA genérico existe en la biblioteca de materiales de ANSYS, pero no está en la del Workbench. Para poder ocupar una propiedad de ANSYS en Workbench, hay que escribir una rutina (*Command Object*) que llama el programa ANSYS para pedirle datos específicos. Basándose en el trabajo de Barnett y Cunningham [14] se creó la rutina siguiente.

```

!Propiedades austenita elastica
E_A=90000
NU=0.3
!
!Propiedades ciclo
S_ASS=250
S_ASF=510
S_SAS=249
S_SAF=50
EPS_L=0.0269052
ALP=0.00
YMRT=31074.93
!
MP,EX,matid,E_A
MP,NUXY,matid,NU
! definir material 1 como sma con 1 temp
TB,SMA,matid
tbtemp,0
TBDATA,1,S_ASS,S_ASF,S_SAS,S_SAF,EPS_L,ALP
TBDATA,7,YMRT
tblist,all,matid

```

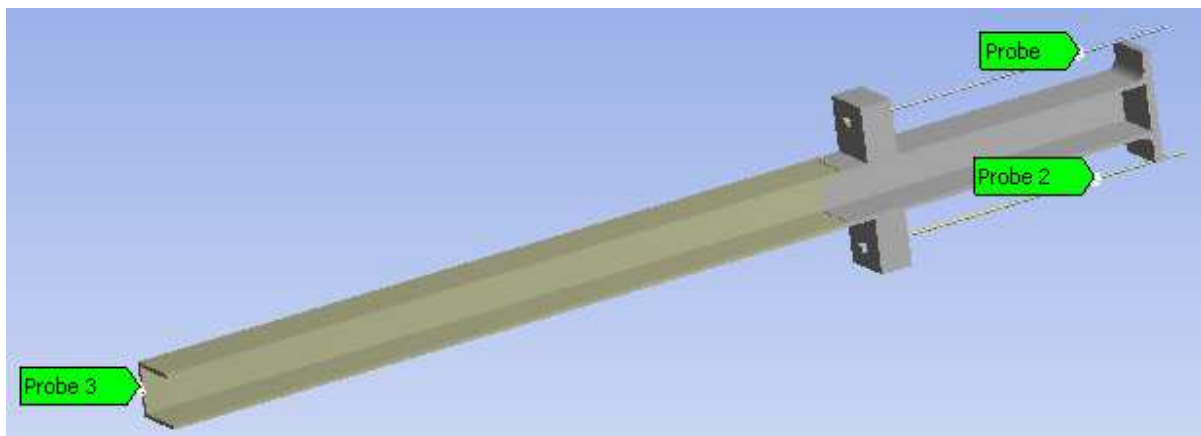
Figura 4.14: Rutina de implementación del CuAlBe

Esta rutina modifica las propiedades del material de las barras, llamado *matid*. Con el comando *TB,SMA*, se especifica que el material se define con una tabla de tipo SMA, y luego, con el comando *TBDATA* se precisa los datos de la tabla. El comando *TBTEMP* permite especificar las características de la “bandera” a diferentes temperaturas, pero en el caso que nos interesa, hay solamente una temperatura, que se puso a 0°C arbitrariamente.

## 4.5 Resultados obtenidos

Se quiere estudiar el comportamiento específico de las barras y el comportamiento global de la conexión. Por lo tanto, el modelo tiene que entregar datos sobre el comportamiento de ambas partes que sean comparables con lo que se midió en los ensayos de Sepúlveda [1].

Con el programa ANSYS Workbench, se puede poner un objeto de medición llamado *probe*. Este objeto puede medir la tensión en un punto y la deformación según cada dirección. Se pusieron objetos de ese tipo en el centro de cada barra y en el centro de la punta de la viga. La ubicación de las mediciones se puede ver en la figura 4.15.



*Figura 4.15: Ubicación de los probes*

En el centro de las barras, se midió la deformación según el eje Z, el eje de la barra, en [mm], y la tensión equivalente de Von Mises, en [MPa]. En la punta de la viga, se midió la deformación vertical, según el eje Y, en [mm]. Con todos estos valores, se pudo graficar la curva tensión v/s deformación en cada barra, la curva fuerza v/s deformación en la punta de la viga, y la curva giro v/s momento para la conexión.

# Capítulo 5

## 5 Resultados y análisis

### 5.1 Introducción

Este capítulo tiene por meta presentar los resultados del estudio numérico, compararlos con los resultados experimentales y proponer un análisis de las diferencias encontradas. En primer lugar, se presentan puntos de los ensayos que necesitan estar detallados para una mejor comprensión del análisis. Luego, se presentan los resultados del trabajo numérico y se compara resultados numéricos y experimentales. En la última parte, se hace la comparación de los estudios numéricos con barras superelásticas y barras de acero.

### 5.2 Ensayos de Sepúlveda [1]

En esta sección, se detalla más el ensayo de la conexión, destacando detalles que tendrán importancia al momento de interpretar las diferencias entre los ensayos físicos y el modelo teórico.

#### *5.2.1 Apoyos en el ensayo*

La geometría de la conexión es la misma que la del modelo, pero los contactos que se ocuparon en el modelo son idealizaciones de la realidad, lo que conviene detallar. Las figuras 5.1 y 5.2 son fotografías de detalles de la conexión ensayada. Del lado de la columna, están soldadas las mordazas que permiten fijar el extremo de las barras. Las barras traspasan el ala de la



columna por un agujero de gran diámetro con respecto a la barra. Del otro lado, la barra está afirmada por el mismo tipo de mordaza. Las mordazas de las dos barras superiores se juntan con una pieza triangular, de la cual sale el perno que hace el contacto con el bloque. Este perno, hilado, tiene una tuerca del otro lado del bloque, la cual sirve para pretensar las barras superiores. Un sistema idéntico se usó para las barras inferiores. Para evitar que se deslice la placa base sobre la columna, topes de acero se colocaron arriba y debajo de ella. De este último punto nacieron dificultades para modelar los apoyos de la placa base, lo que es detallado más adelante.

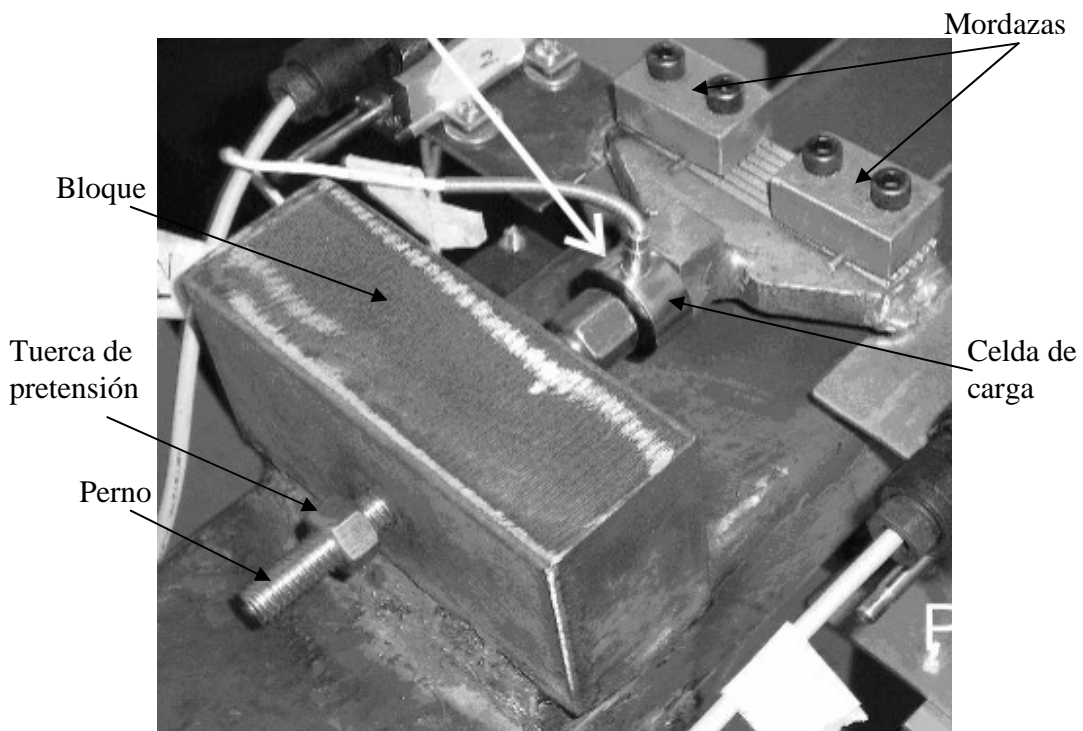


Figura 5.1: Mordazas, pieza triangular, bloque y perno de pretensión [15]

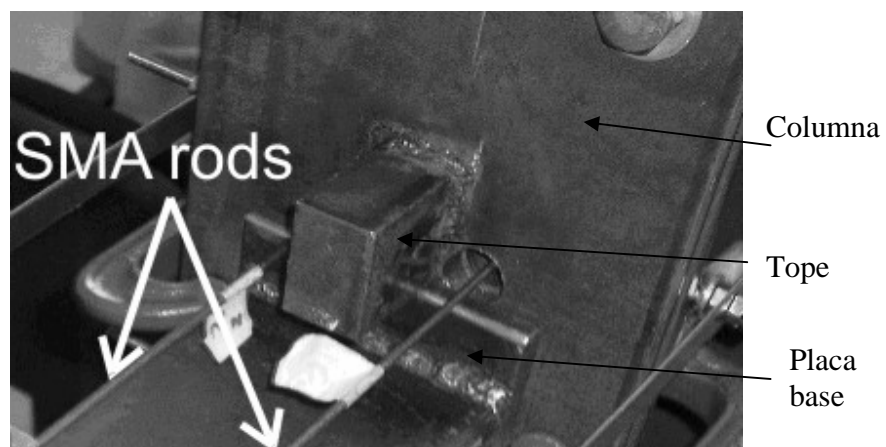


Figura 5.2: Placa base, tope superior y agujero de la columna [15]

### **5.2.2 Instrumentación**

En los ensayos cuyos resultados se ocuparon para comparar, la deformación total de cada barra fue medida con un potenciómetro. La carga en las barras se midió por medio de una celda de carga dispuesta sobre el perno entre el bloque y la pieza triangular que junta las mordazas, como lo muestra la figura 5.1. Por lo tanto, se consideró que cada barra soportaba la mitad de la carga medida. Las curvas de histéresis de las barras del ensayo presentadas más adelante (figuras 5.3 y 5.4) representan la tensión (mitad de la carga medida dividida por la sección de una barra) en función de la deformación (promedio entre las dos barras).

En la punta de la viga, un quinto potenciómetro midió la deformación vertical, y una celda de carga tipo Z midió la carga aplicada por la mesa.

### **5.2.3 Comportamiento general de la conexión**

Esta sección resume algunas observaciones que hizo Sepúlveda [1].

Se notó que la viga se flectaba en su zona menos rígida, que es entre la punta de la viga y el bloque de conexión. Esto significa que la viga no se comporta como un cuerpo infinitamente rígido, con lo que el giro que se induce en la conexión, debido al movimiento vertical en la punta de la viga, es menor al que se calculó en el programa de los ensayos (tabla 4.3).

Las tuercas que permiten a las barras tomar la compresión, ubicadas en los pernos de pretensión, se dejaron sueltas, por lo que no se observó que las barras se pandearan. En todo caso, con la pretensión aplicada a las barras, se logró que estas permanecieran siempre en tracción, manteniéndose la carga positiva para todos los ciclos impuestos.

No se observó ningún elemento de la conexión que fluyera, ni tampoco que alguna de las soldaduras sufriera fractura.

### 5.2.4 Datos para la comparación

De los 10 ensayos realizados con la conexión, el ensayo 8 se escogió para hacer la comparación, primero porque los ciclos entregados son bien estables y porque este ensayo es la base de las conclusiones de Sepúlveda [1]. A partir de los datos entregados por los instrumentos de medición, se dibujaron las curvas necesarias después de una filtración de las frecuencias altas, y de la rectificación del origen de los datos considerando la predeformación (las mediciones en los ensayos entregaban las deformaciones de las barras después de la pretensión). Entonces se tiene las figuras 5.3 a 5.6. El momento se obtiene multiplicando la fuerza impuesta a la punta de la viga por el largo de ella (970 [mm]), y el giro corresponde a la deformación de la barra dividida por la altura entre barras inferiores y barras superiores (110 [mm]).

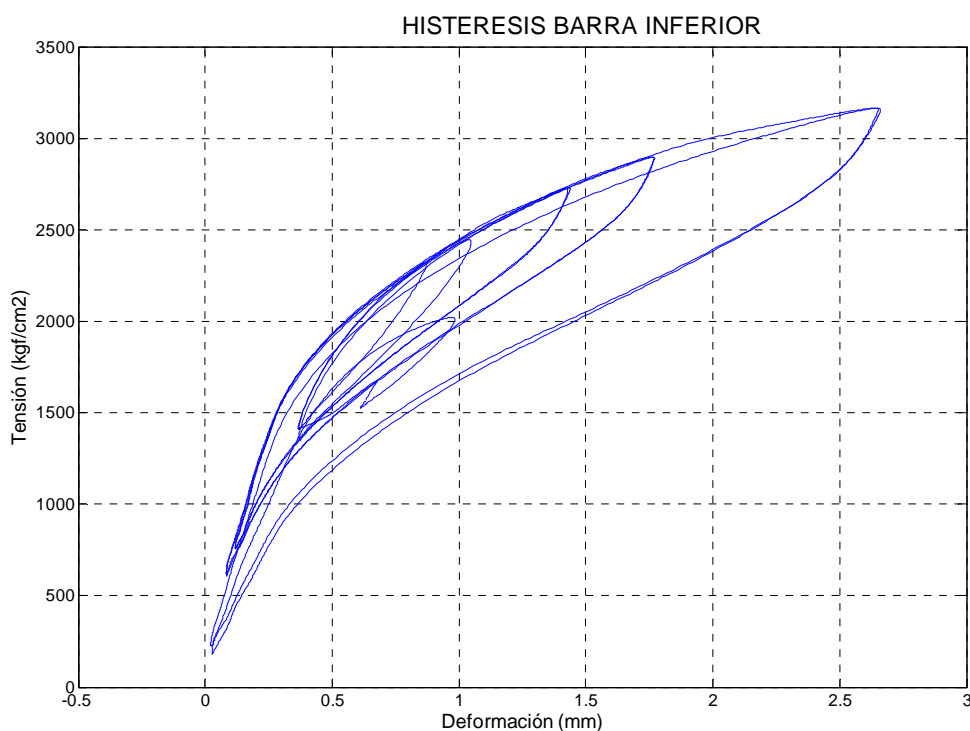
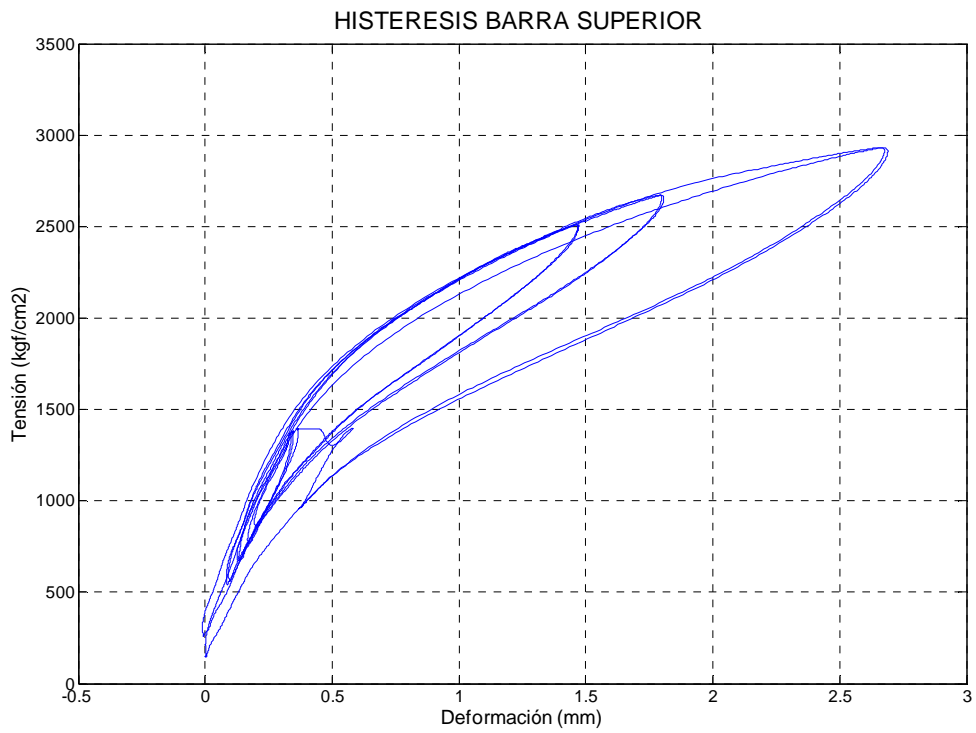
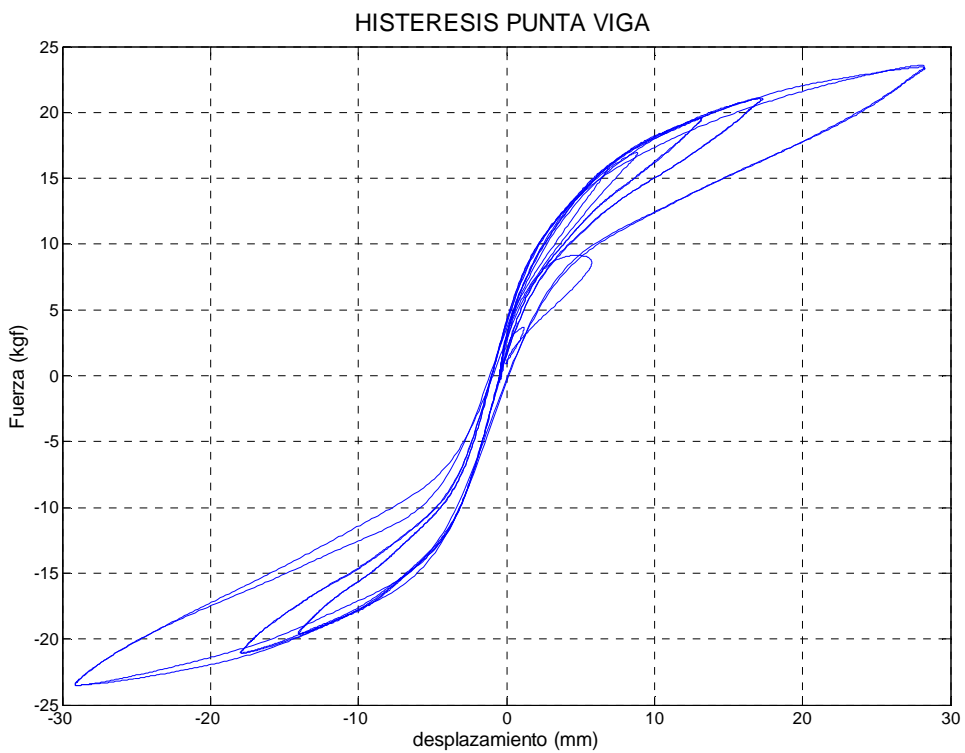


Figura 5.3: Histéresis promedio barras inferiores – ensayo 8 [1]



*Figura 5.4: Histéresis promedio barras superiores – ensayo 8 [1]*



*Figura 5.5: Histéresis Punta Viga – ensayo 8 [1]*

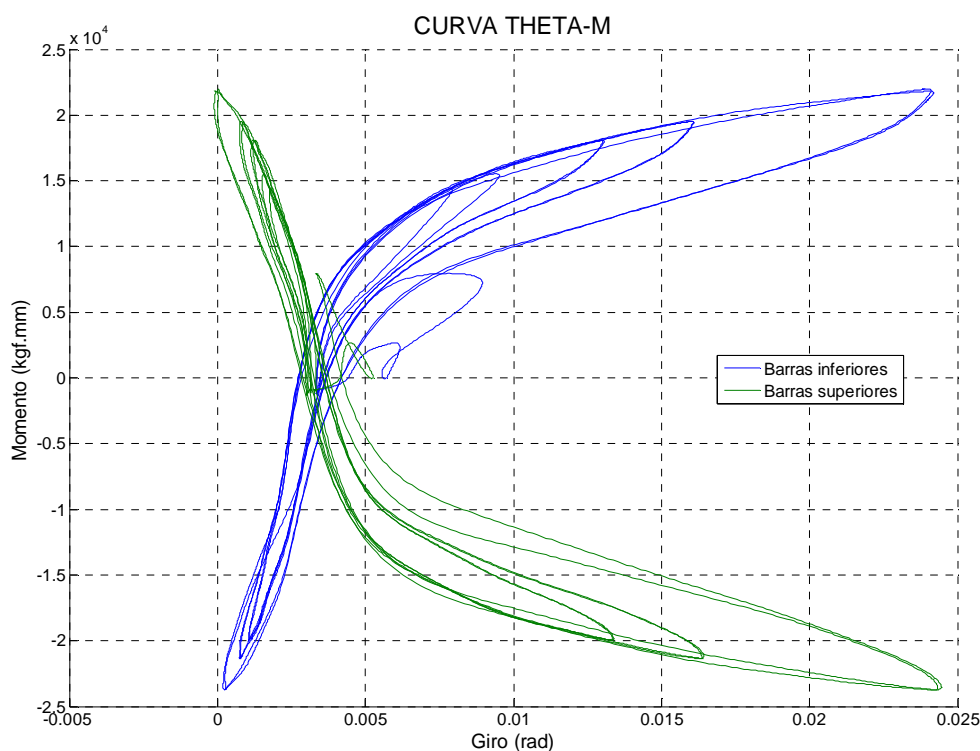


Figura 5.6: Curva Giro v/s Momento – ensayo 8 [1]

## 5.3 Comportamiento general del modelo

En esta sección, se presentan varios puntos generales de los resultados numéricos que pueden ser relacionados con observaciones experimentales.

### 5.3.1 Pretensión de las barras

Analizando el sistema después de la pretensión de las barras, se nota primero que la tensión en las barras es uniforme e igual a 141,95 [MPa], lo que corresponde a la carga de pretensión, 1000 [N] dividida por la sección de las barras, 7,06858 [mm<sup>2</sup>].  $1000/7.06858=141,47$ . Las figuras 5.7 y 5.8 muestran la vista entregada por ANSYS de las tensiones equivalentes y de las deformaciones después de la pretensión de las barras.

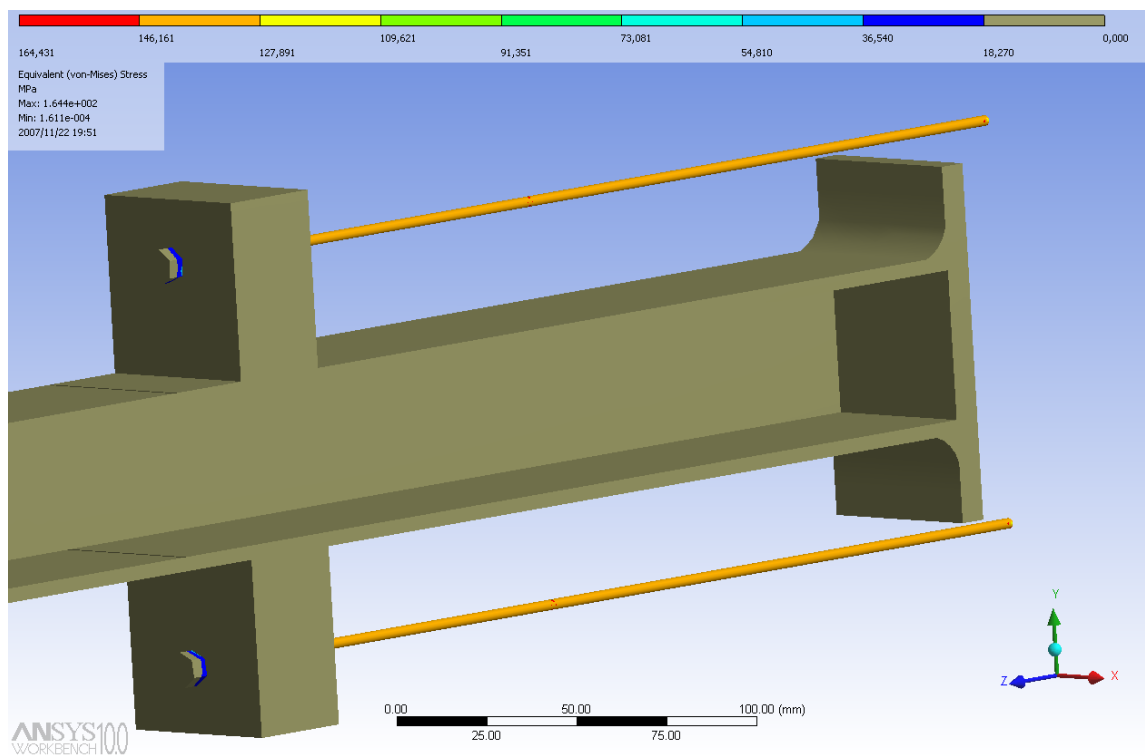


Figura 5.7: Vista de las tensiones – pretensión de las barras

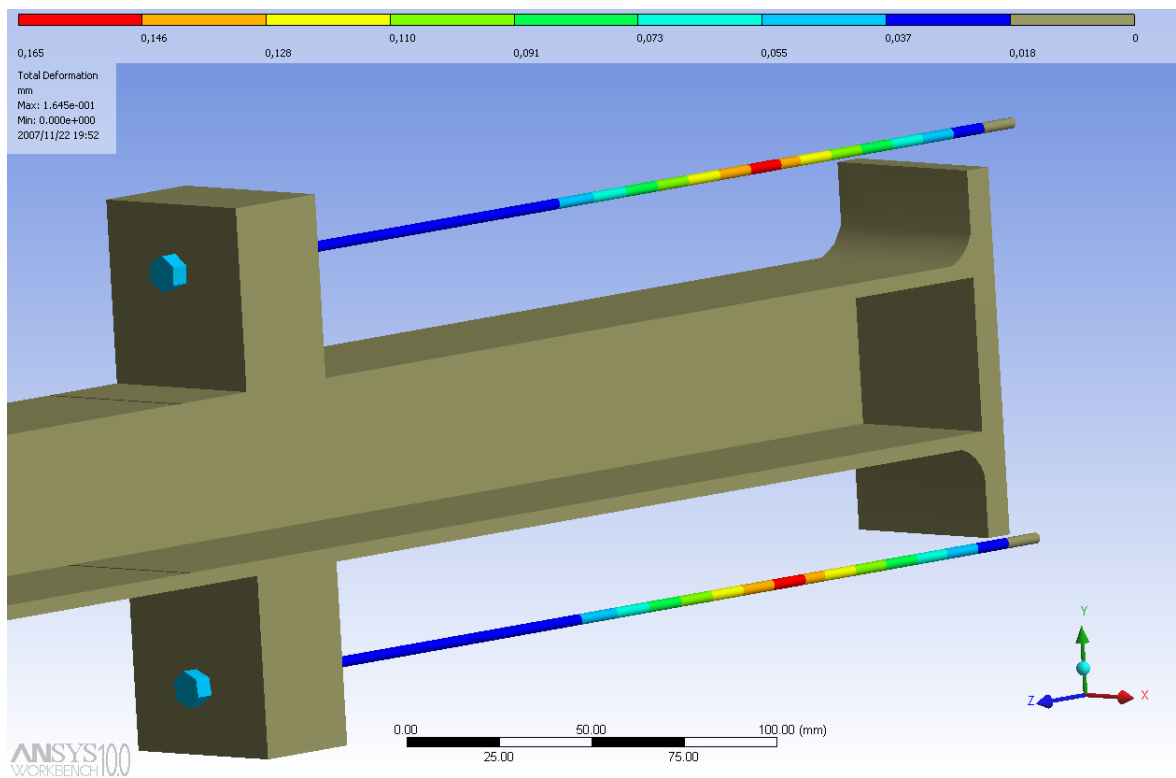


Figura 5.8: Vista de las deformaciones – pretensión de las barras

### 5.3.2 *Apertura de la placa base*

De la misma manera que se observó en los ensayos, en el modelo, la placa base se abre al aplicar una fuerza vertical en la punta de la viga. La compresión de la columna sobre la placa base se produce en la parte superior de ella cuando la fuerza es hacia arriba y viceversa. En la figura 5.9, se puede apreciar la deformación exagerada de la placa base con respecto a su posición original.

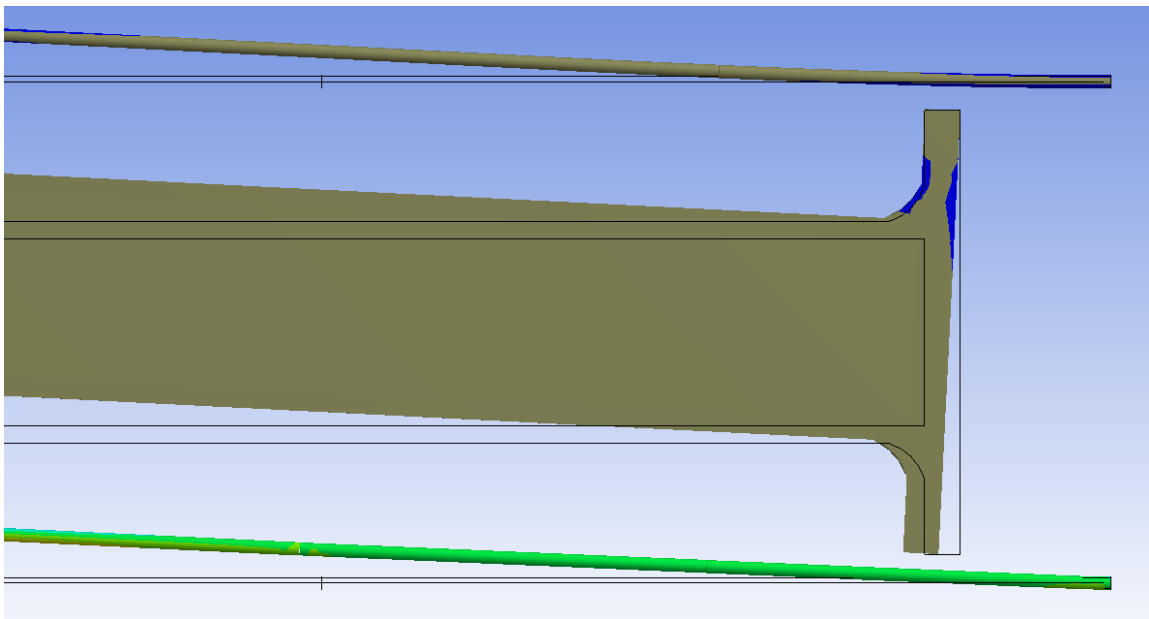


Figura 5.9: *Apertura de la placa base*

### 5.3.3 *Contacto barras-bloque*

Se notó que las barras nunca pierden toda su pretensión. En el ciclo de mayor fuerza, cuando el giro de la conexión alcanzó su máximo, quedó una fuerza de tracción de cerca de 40 [N] en el empotramiento de la barra no traccionada. Este dato coincide con el hecho que siempre se midió un esfuerzo de tracción en las barras a lo largo de los ensayos.

### ***5.3.4 Comportamiento de la viga***

En ningún momento del ensayo la tensión en la viga y el bloque de conexión sobrepasó la tensión de fluencia del acero, 250 [MPa].

## **5.4 Histéresis de las barras**

Para estudiar el comportamiento del modelo, se aplicaron ciclos de fuerza en la punta de la viga. Se comprobó que bastaba hacer solamente un ciclo porque la ausencia de deformaciones remanentes hacía que el segundo ciclo se superpusiera perfectamente con el primero. Las figuras 5.10 a 5.12 muestran el comportamiento de las barras superior e inferior durante una subida y una bajada de la punta de la viga. Los valores de fuerza y desplazamiento ocupadas para obtener las figuras 5.11 y 5.12 no son comparables con el ensayo pues en este caso se ocuparon condiciones de apoyo distintas de las definitivas.

El punto de inicio, marcado por el círculo azul, es el mismo para las dos barras pues están pretensadas con la misma fuerza. Cuando la punta de la viga sube, la histéresis de la barra inferior se desarrolla mientras la barra superior se descarga linealmente hasta tener tensión nula (tramo A-B-C). Cuando se termina la bajada es decir que la punta de la viga vuelve a su posición inicial (fin del tramo rojo), las barras han vuelto a su estado de deformación original. Luego, al bajar la punta de la viga, la barra superior desarrolla su ciclo de histéresis mientras la barra inferior se descarga (tramo C-D-E).



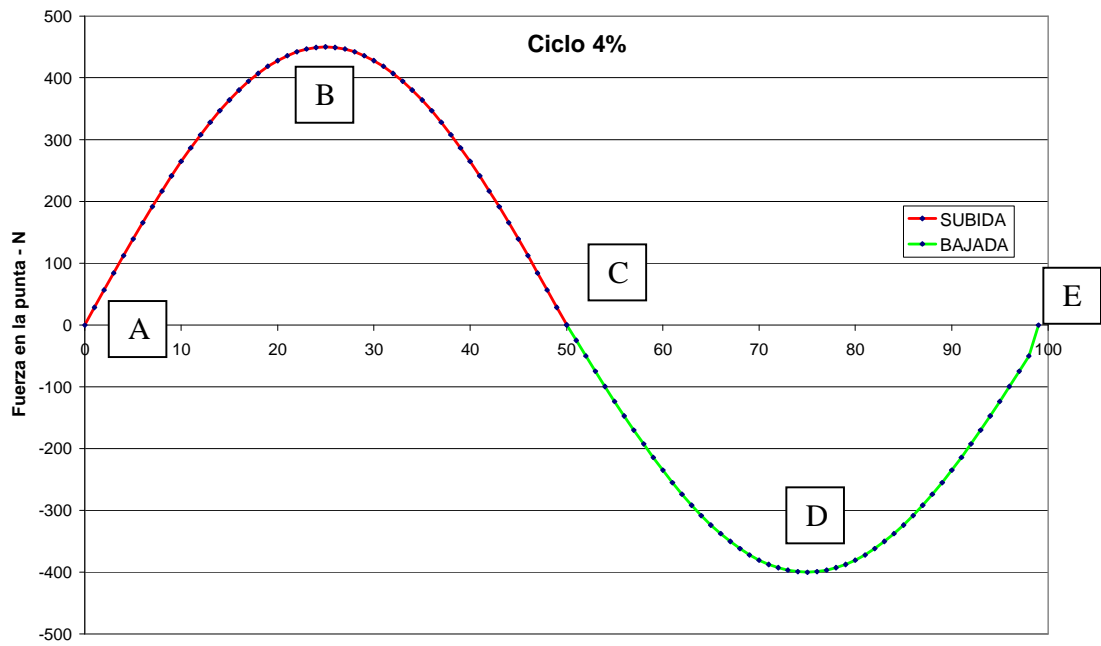


Figura 5.10: Ciclo de fuerza en la punta de la viga

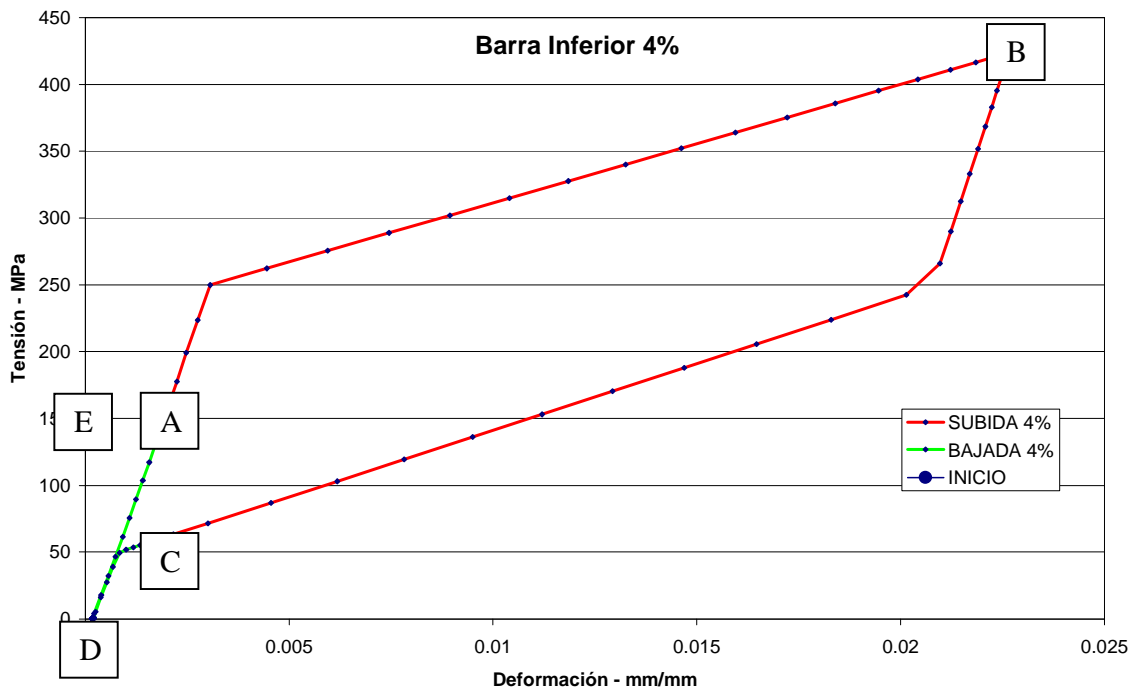


Figura 5.11: Comportamiento de la barra inferior

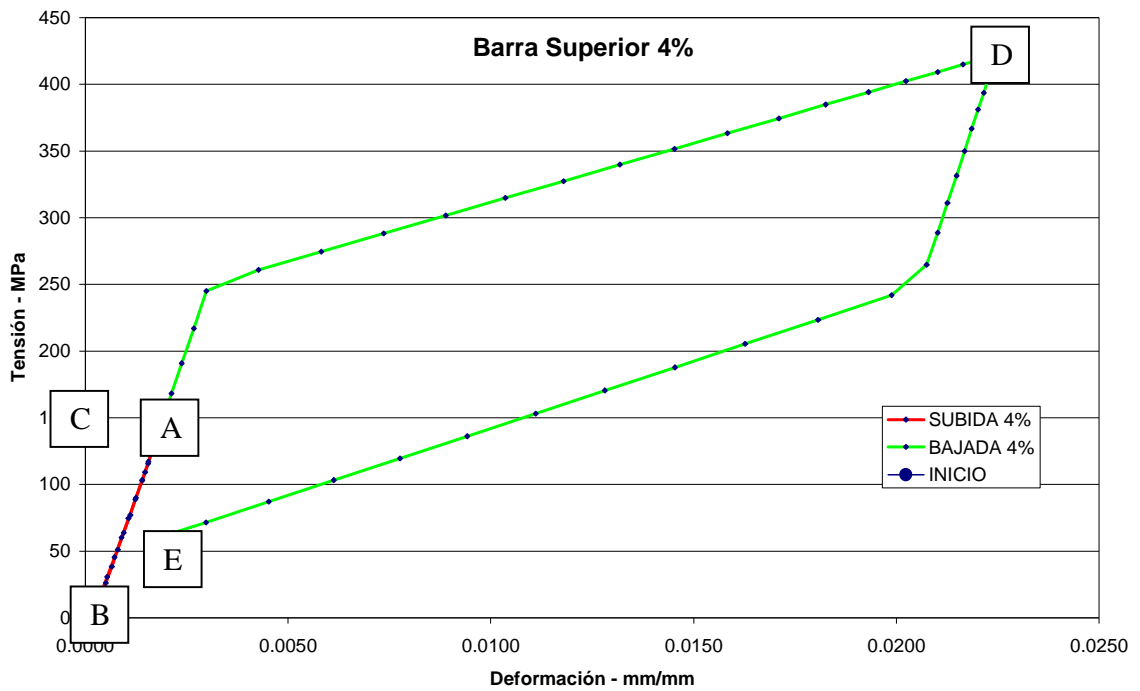


Figura 5.12: Comportamiento de la barra superior

En la figura 5.13 se presentan varios ciclos de histéresis de las barras del modelo. El comportamiento de las barras superiores e inferiores es simétrico, por lo que se dibujará a continuación solamente los ciclos para una barra. La figura 5.14 representa el comportamiento global de la conexión a través de la histéresis de la punta de la viga.

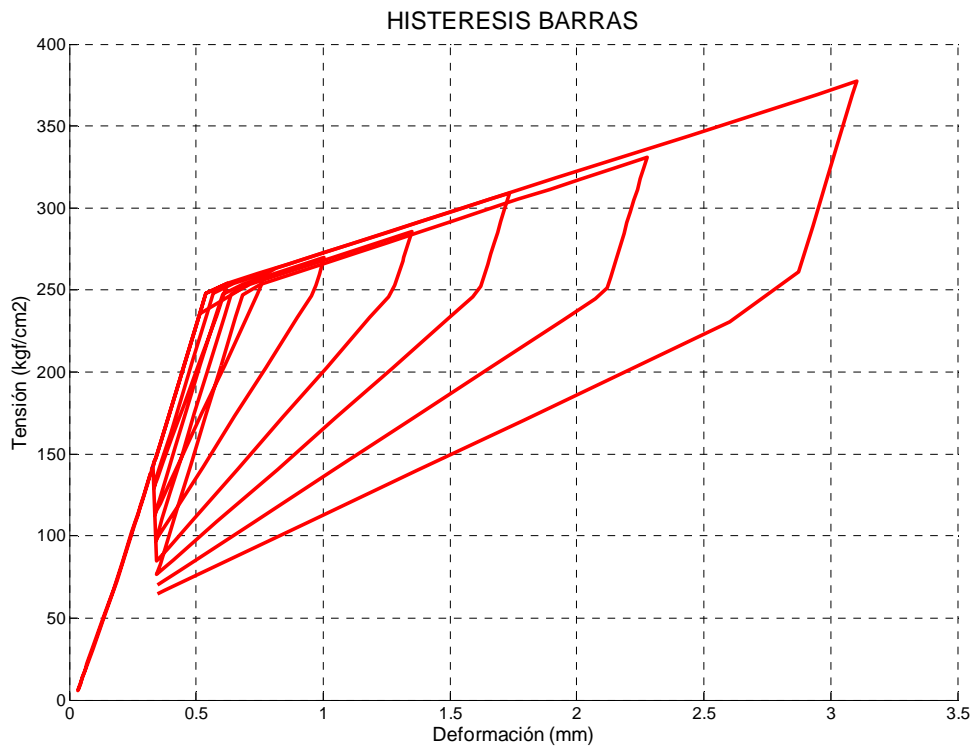


Figura 5.13: Histéresis de las barras del modelo – giros de 0,375 a 3%



Figura 5.14: Histéresis de la punta de la viga – giros de 0,375 a 3%

## 5.5 Comparación del modelo con los ensayos

### 5.5.1 Posibilidad de comparar

Para poder comparar ensayos y modelo numérico, se hizo una correlación desplazamiento v/s fuerza en la punta de la viga de tal manera que los desplazamientos fueran los mismos, y así poder comparar las fuerzas. Los desplazamientos son los estipulados por el SAC del 97 [12]. La tabla 5.1 muestra para cada ciclo el desplazamiento estipulado y los desplazamientos logrados tanto numéricamente como experimentalmente.

<b>Desplazamiento vertical punta de la viga [mm]</b>		
SAC	ANSYS	Conexión: Ensayo 8
29	28.15	28.21
19	19.99	17.25
15	14.71	13.25
10	10.93	8.82

*Tabla 5.1: Desplazamientos en la punta de la viga*

Se puede ver que el modelo numérico reprodujo con buena fidelidad los desplazamientos estipulados, pero en los ensayos, la conexión respondió con desplazamientos menores a los que estaban impuestos, salvo en el caso del ciclo con mayor desplazamiento.

Por lo tanto, la comparación entre modelo y ensayo se puede hacer solamente con los resultados del ciclo mayor, con 29 [mm] de desplazamiento vertical, porque en ambos casos la respuesta fue buena. Entonces, a continuación, las comparaciones de los comportamientos de las barras se basan en este único ciclo.

### 5.5.2 Histéresis de las barras

La superposición de las histéresis del modelo y de los ensayos se ve en las dos figuras 5.15 y 5.16.

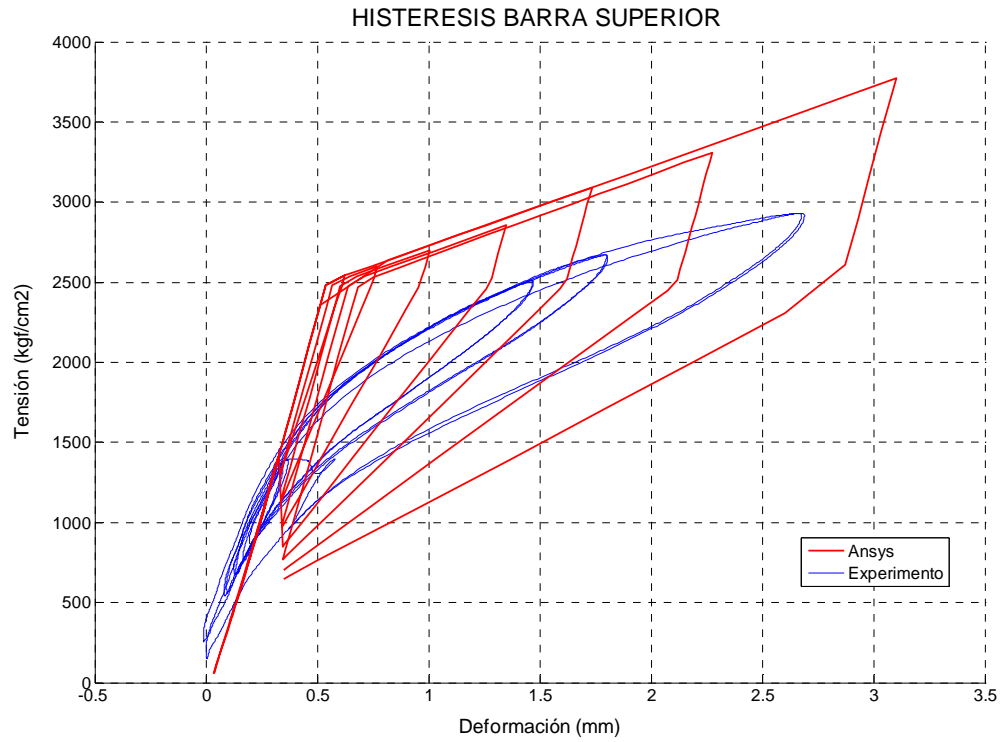


Figura 5.15: Comparación – histéresis barras superiores

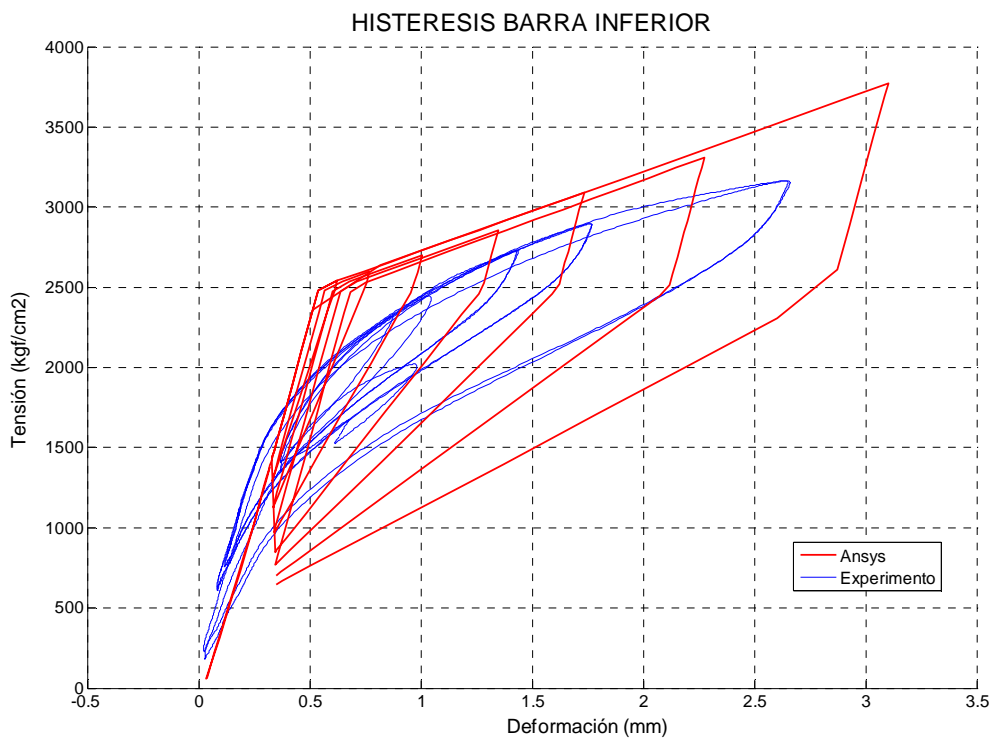


Figura 5.16: Comparación – histéresis barras inferiores

La primera conclusión que se puede hacer es que las barras del modelo siguen la bandera que represente el material CuAlBe (fluencia a 250 [MPa], convergencia de las ramas a 50 [MPa]).

A pesar que el comportamiento general del modelo es muy parecido a lo que pasó en los ensayos, se pueden destacar varias diferencias:

1. La fluencia aparece cerca de 200 [MPa] en los ensayos y está puesta a 250 [MPa] en el modelo,
2. En el modelo, las barras se deforman más que en el ensayo: para el ciclo de mayor deformación, el modelo alcanzó una deformación de 3.102 [mm] y los ensayos mostraron deformaciones de 2.652 [mm] (barra inferior) y 2.679 [mm] (barra superior).
3. La bandera del modelo es mucho más ancha que la de los ensayos.

Una explicación a esas diferencias se presenta más adelante.

### ***5.5.3 Curva Giro v/s Momento***

La superposición de la curva M-theta del modelo y de los ensayos se ve en la figura a continuación. M es el momento en la conexión, igual a la fuerza aplicada en la punta multiplicada por el largo de la viga. Theta es el giro de la conexión, obtenido dividiendo la deformación de una barra por la altura entre barras.

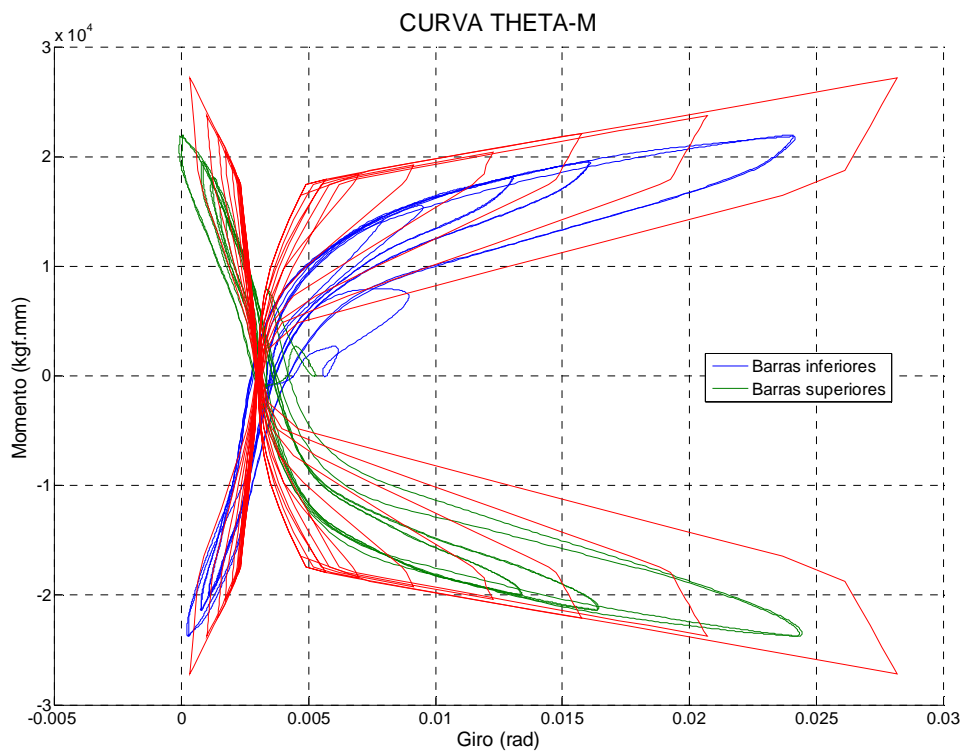
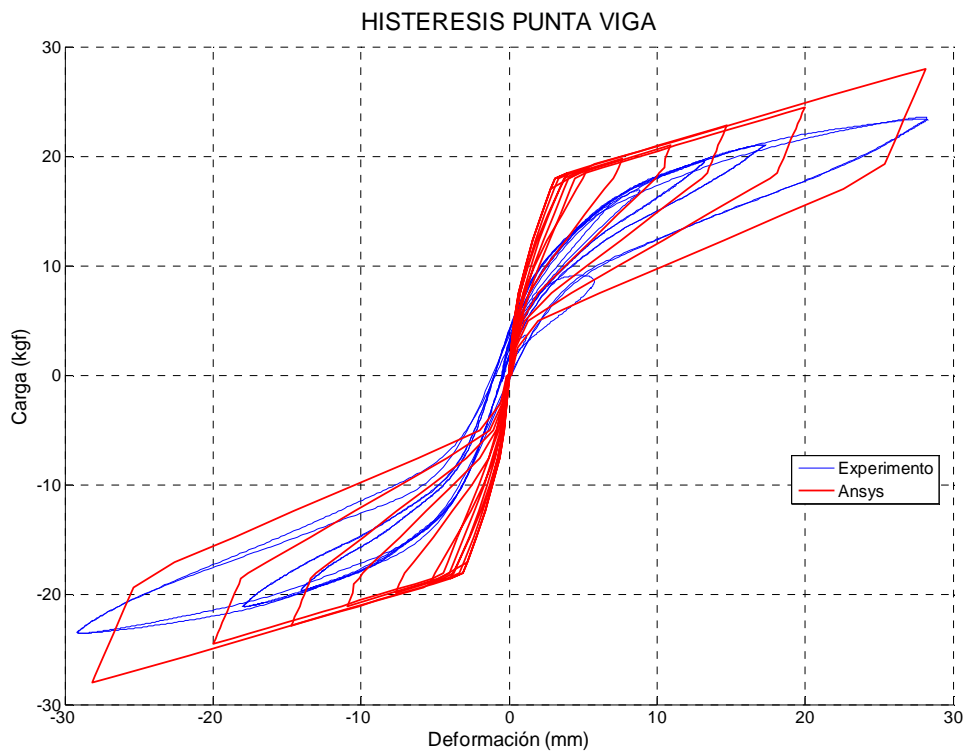


Figura 5.17: Comparación – curva giro v/s momento

Globalmente, los tres puntos de discusión destacados en el punto 5.5.2 son válidos para la comparación de las curvas M-theta.

#### 5.5.4 Histéresis punta viga

La superposición de la histéresis en la punta de la viga del modelo y de los ensayos se ve en la figura 5.18.



*Figura 5.18: Comparación – histéresis punta viga*

En este gráfico, se puede ver de manera más clara la diferencia de rigidez entre el modelo y los ensayos. La tabla 5.2 presenta a continuación el valor de la carga en la punta de la viga, para niveles de deformación iguales.

*Tabla 5.2: Comparación de rigidez*

Deformación [mm]	Carga [kgf]	
	ANSYS	ENSAYO 8
28.03	28.0	23.58
17.08	23.5	21.07
13.17	22	19.63
9.04	20.6	17.57



### 5.5.5 Comentarios

Los puntos destacados a continuación permiten entender las diferencias constatadas entre el modelo numérico y los experimentos. Se refiere aquí a la dificultad de modelar matemáticamente fenómenos complejos como los contactos y los apoyos.

Se construyó y calibró el modelo del material SMA sobre las curvas obtenidas con los ensayos cíclicos de barras de CuAlBe. En el modelo, las barras reproducen adecuadamente la curva tensión v/s deformación entrada en el programa. Por lo tanto, la diferencia entre el comportamiento a tracción de una barra sola y el comportamiento de la barra en la conexión no se puede ver. Esta diferencia, bastante notable en los ensayos, explica gran parte de las diferencias destacadas entre experimentos y cálculos.

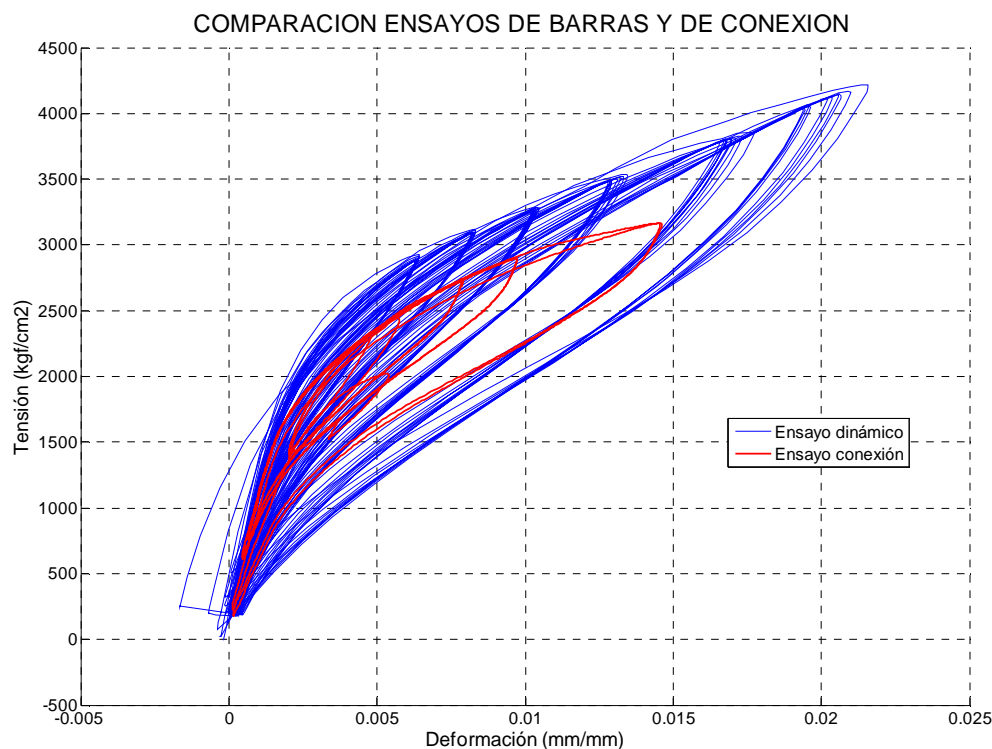


Figura 5.19: Diferencia ensayo de barra y de conexión (8) – barras inferiores

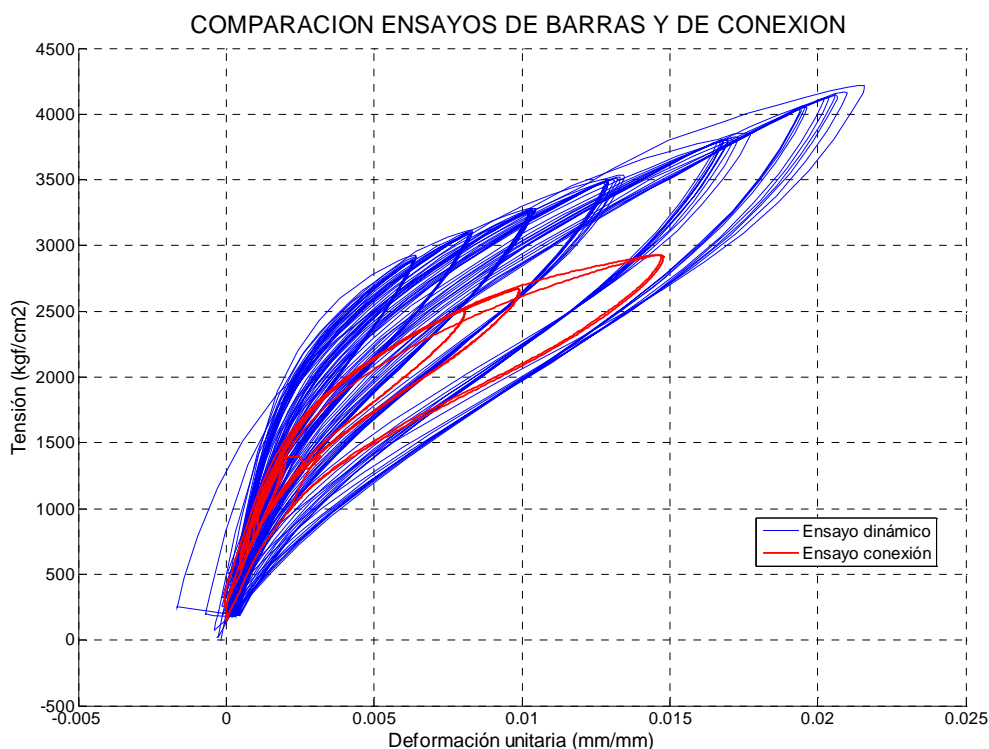


Figura 5.20: Diferencia ensayo de barra y de conexión (8) – barras inferiores

Las figuras 5.19 y 5.20 presentan las curvas de los ensayos cíclicos de una barra de CuAlBe (azul), y las histéresis de las barras de la conexión durante el ensayo 8 (rojo). Se puede ver entonces que se calibró el modelo sobre curvas que muestran una rigidez inicial mayor a la del ensayo de conexión (aproximadamente 1,5 vez más), que muestran una fluencia más alta de aproximadamente 50 [MPa] y que muestran una “bandera” más ancha. Por lo tanto, aquí se puede constatar que la mayor fuente de diferencias entre experimentos y modelo numérico viene de la variabilidad de las propiedades del material CuAlBe.

La diferencia que se puede encontrar entre una modelación numérica y ensayos experimentales viene también del hecho que para modelar un fenómeno real, hay que idealizarlo. Por ejemplo, la modelación del apoyo entre la columna y la viga produjo problemas y por lo tanto diferencias de resultados. En los ensayos, este contacto era lo más plano que se pudo (se necesitó poner placas de acero entre la columna y la placa base para mejorar el contacto), y topes centrales impedían el desplazamiento vertical de la placa base (figura 5.21).

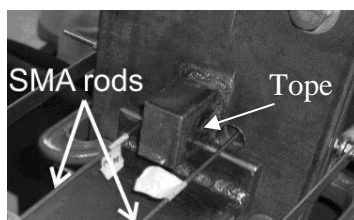


Figura 5.21: Topes verticales entre la placa base y la columna

En la modelación. Se probaron dos soluciones para representar este apoyo: por una parte, tres apoyos *compression only*: en la cara vertical de la placa base en contacto con la columna y en las caras horizontales superior e inferior. Por otra parte un apoyo *compression only* en la cara en contacto con la columna y desplazamiento nulo en la esquina superior de la placa base, para imponer que la rotación se haga con respecto a esta línea. Resultó que la segunda solución entregó resultados mucho mejores que la primera. En efecto, el apoyo de la primera solución confinaba la placa base más que en la realidad, lo que explica el exceso de rigidez de este modelo, como lo muestran las altas tensiones locales presentes en la placa base (figura 5.22).

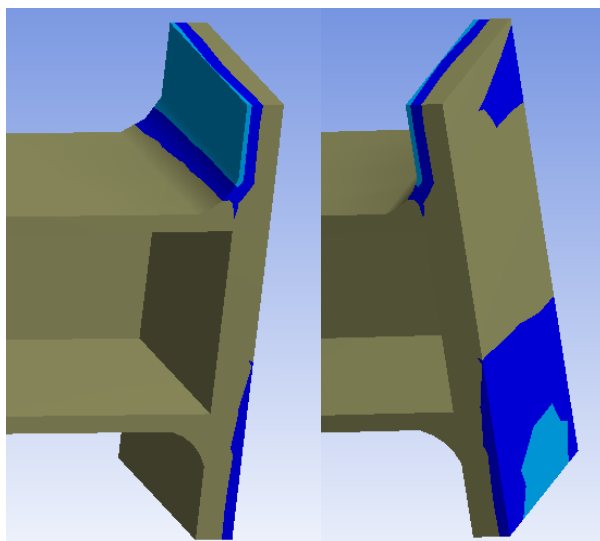


Figura 5.22: Concentración de tensiones en la placa base confinada

El comportamiento de la conexión en general refleja el tipo de apoyo: la figura 5.23 muestra que si la placa base está muy confinada, la conexión es más rígida que en el otro caso. Para el mismo nivel de deformación, cuando la viga alcanza una deformación vertical de 28 [mm] en su punta, en los ensayos se midió una fuerza de 24 [kgf], y el modelo numérico entregó

una fuerza de 28 [kgf] en el caso de la placa base simplemente apoyada y 40 [kgf] con la placa restringida. Por lo tanto se puede afirmar que las condiciones de apoyo de la viga en la columna determinan parte de la rigidez del modelo.

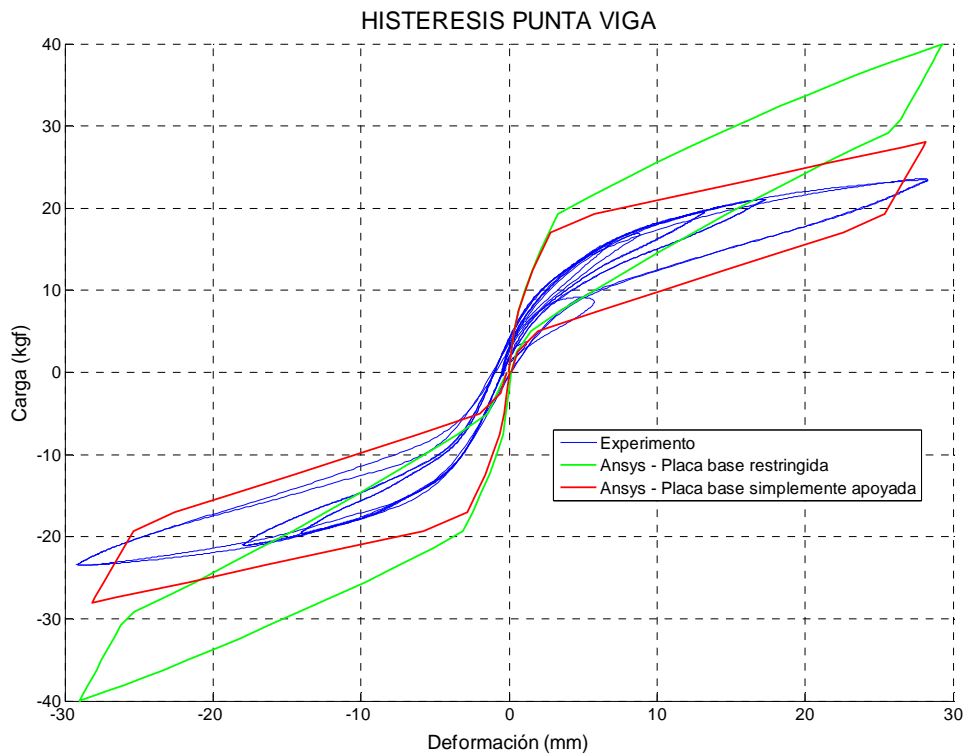
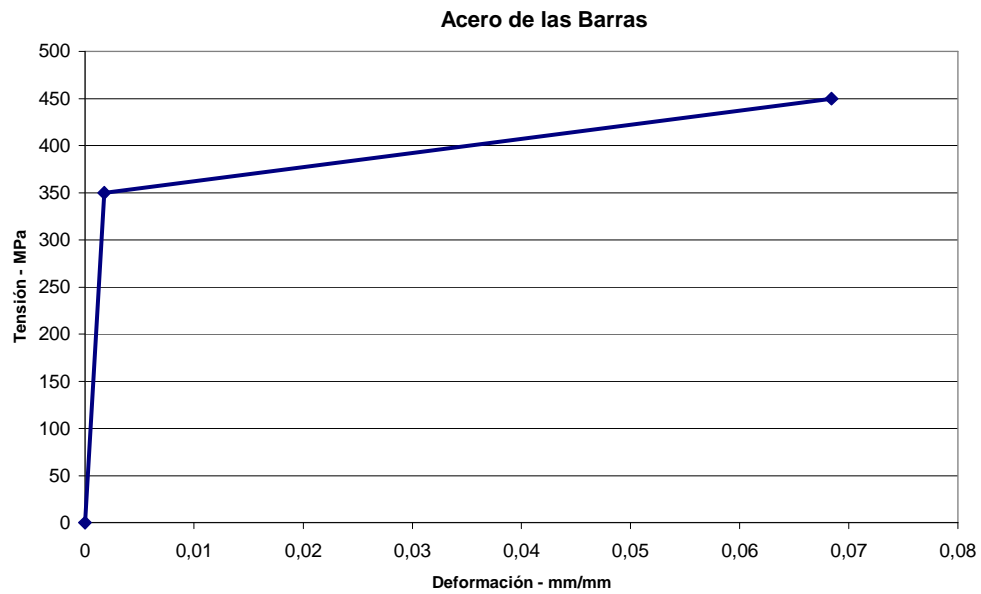


Figura 5.23: Comparación de resultados con el tipo de apoyo de la placa base

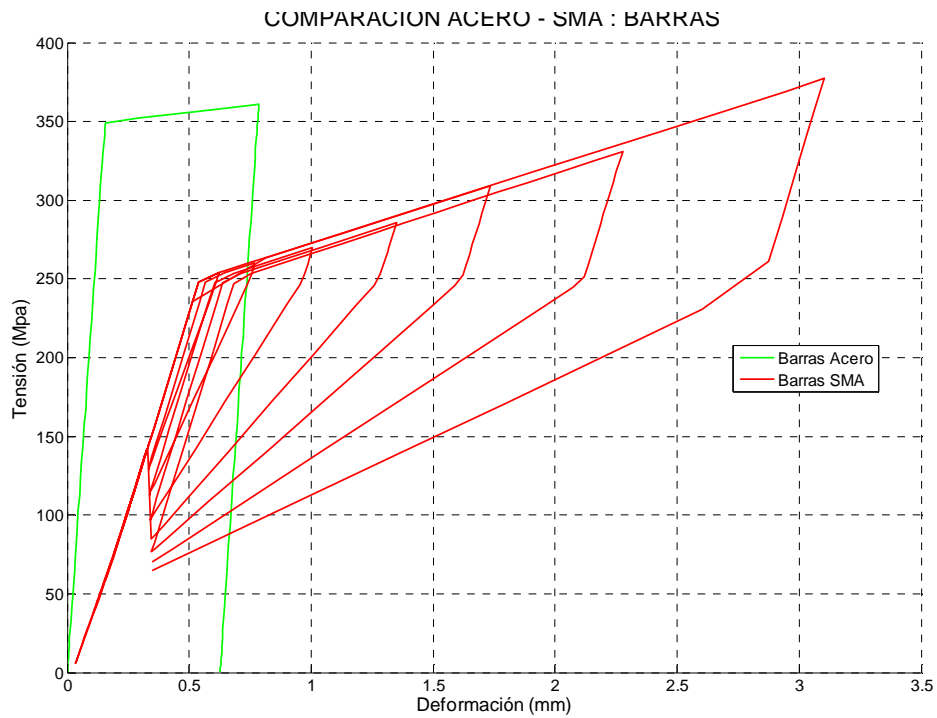
## 5.6 Comparación con las barras de acero

Para hacer la comparación, se reemplazó el material SMA de las barras por un material elasto-plástico bilineal, con una tensión de fluencia de 350 [MPa], un módulo de Young de 200 000 [MPa] y una tensión última de 550 [MPa] (figura 5.24).



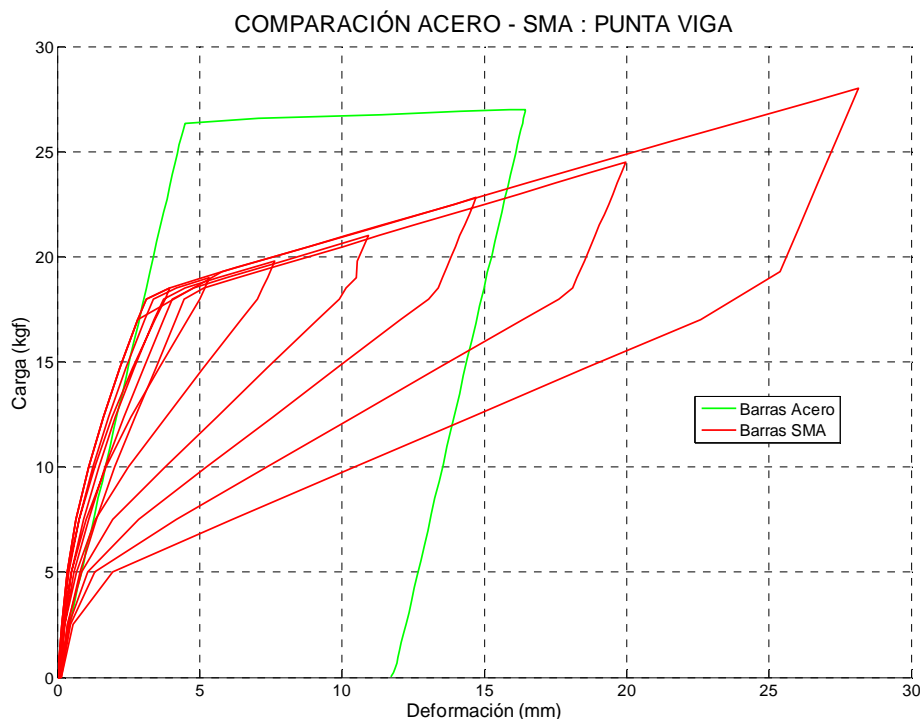
*Figura 5.24: Curva tensión deformación del acero de las barras*

Se aplicó a la conexión medio ciclo de fuerza hacia arriba de 270 [N], lo que corresponde al ciclo más grande al cual se sometió la conexión. Se hizo medio ciclo para disminuir el tiempo de cálculo. La figura 5.25 presenta el comportamiento comparativo de la barra inferior de la conexión en el caso SMA (rojo) y de acero (verde).



*Figura 5.25: Comportamiento comparativo de barras*

La barra de acero, 2.2 veces más rígida, alcanza la fluencia para un nivel de deformación para lo cual el material SMA está todavía elástico. Luego de la plastificación y de la descarga, se nota la deformación remanente, característica del material. El comportamiento de la conexión se analiza a continuación, en base a la figura 5.26.



*Figura 5.26: Comportamiento comparativo de la conexión*

Primero, se puede constatar que la rigidez de la conexión en el rango elástico casi no cambia entre los dos casos, lo que muestra que el material de las barras no influye este parámetro. Esto tiene que ver con la pretensión: la conexión se comporta como unión rígida hasta que se sobrepasa la tensión inicial.

Para el mismo nivel de esfuerzos, la conexión alcanza una deformación vertical de menos de 4 [mm] en un caso y de 28 [mm] en el otro. La conexión con barras de CuAlBe tiene por lo tanto un comportamiento mucho más flexible que con barras de acero.

No hay fluencia de la viga ni de la placa base, debido a que el sistema concentra las deformaciones inelásticas en las barras. Cuando fluye la barra, la deformación vertical de la viga aumenta rápidamente a pesar de que la deformación de la barra es pequeña, el sistema multiplica esa deformación: las barras de acero alcanzan una deformación máxima igual al 28% de la deformación máxima de las barras de SMA, mientras la viga alcanza una deformación vertical máxima igual al 59% de la deformación máxima en el caso SMA.

La deformación remanente de la conexión, característica del acero, hace que después del ciclo, la placa base no quede pegada a la columna. Por lo tanto, la transmisión de los esfuerzos de corte no es posible, lo que significa el potencial colapso de la estructura, si no hay topes verticales.



## Capítulo 6

# 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Se ha calibrado un modelo de elementos finitos con los resultados de ensayos cíclicos de una barra de CuAlBe y luego éste se ha usado para representar el comportamiento de una conexión viga columna que usa cuatro barras del mismo material como disipadores de energía. Luego se pudo sacar conclusiones comparando el modelo numérico de la conexión con ensayos experimentales de una misma conexión.

La comparación de los ciclos de histéresis y de las curvas M-theta muestra que el comportamiento de las barras y de la conexión en el modelo es muy similar al de la conexión ensayada. La modelación funcionó, y las aproximaciones necesarias a toda modelación tuvieron efectos de menor importancia.

El estudio comparativo de los resultados destacó cuatro mayores diferencias entre el modelo y el experimento:

- La rigidez del modelo, en la parte elástica, es mayor a la de la conexión ensayada,
- La energía disipada por el modelo es mayor a lo medido en los ensayos,
- El nivel de fluencia del modelo es mayor a lo constatado en los ensayos,
- La deformación de las barras es mayor en el modelo que lo medido en los ensayos.

Las tres primeras diferencias destacadas se explican con la etapa de modelación del comportamiento del material CuAlBe. El elemento implementado en ANSYS pide las cuatro tensiones que definen la bandera de tensión-deformación. La calibración de estos datos se hizo con los resultados de los ensayos dinámicos de barras hechos por Sepúlveda (2006). Comparando

estos ensayos con las curvas de histéresis de las barras durante los ensayos de la conexión, se notan las tres primeras diferencias destacadas más arriba. La calibración de la curva tipo del elemento SMA produjo esas tres diferencias.

El hecho que en el modelo las barras tengan una mayor deformación se puede explicar por la imperfección de los contactos en el ensayo. En efecto, entre el bloque y la barra, varios elementos (pieza triangular, celda, mordazas) fueron modelados por la barra de alta rigidez. Los desplazamientos que existían entre cada uno de estos elementos no fueron modelados, por lo tanto, las barras tuvieron que tomar esa deformación, pues se impuso la deformación vertical en la punta de la viga como punto común entre modelo y ensayo.

Al comparar el sistema con elementos superelásticos y el mismo con barras de acero, las diferencias constatadas se explican por la deformación remanente, característica del acero. El giro remanente en la placa base impide que la conexión así dañada soporte más esfuerzos, lo que muestra la ventaja de usar disipadores superelásticos.

## 6.2 Recomendaciones

Las conclusiones del trabajo de Sepúlveda (2006) quedan vigentes después del presente estudio. La ventaja del uso de disipadores superelásticos en las conexiones viga columna de acero reside en la gran disipación de energía y la ausencia de deformaciones remanentes de aquellos elementos.

Un problema mayor que surgió en el presente trabajo es en la especificidad del algoritmo del elemento SMA de ANSYS, hecho para materiales tipo Nitinol, y que no puede representar banderas muy verticales como la del CuAlBe. Para mejorar este punto, y así no tener los problemas de calibración del modelo del material, se podría implementar otro algoritmo más adaptado al caso estudiado.

Otro problema de modelación fue la representación de los apoyos. En los comentarios del último capítulo, se muestra la influencia de las condiciones de apoyo sobre el comportamiento

global de la conexión. Se podría probar el tipo de apoyo siguiente: la placa base se apoya sobre la columna con su cara vertical en *compression only* y se le agrega un coeficiente de fricción vertical para impedir movimientos de cuerpo rígido. El coeficiente de fricción es el que corresponde a dos superficies planas de acero pegadas con la fuerza de pretensión. En este caso, uno dejaría la placa base girar libremente lo que debería representar los ensayos con más precisión.

Dado que las ventajas del uso de disipadores de CuAlBe en estructuras de acero está demostrado, la siguiente etapa del proyecto sería llevar esta tecnología a una aplicación constructiva: redactar un proceso de diseño de una conexión con elementos disipadores tipo SMA. En efecto, las investigaciones previas han probado el interés del tipo de disipador, pero falta mostrar los beneficios del uso de aquellos disipadores en edificios y estructuras industriales, para que, a largo plazo, su uso sea una alternativa común y competitiva.

## 7 Bibliografía y referencias:

[1] **Sepúlveda, José Rodrigo (2006)**. “*Diseño y Ensayo de un Disipador de Energía Usando Aleación SMA CuAlBe Superelástica para Conexiones Columna Viga*”, Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Chile.

[2] **Arellano, Daren Haydée (2002)**. “*Determinación del Amortiguamiento en Estructuras con Disipadores de Energía de Material SMA de Cobre*”, Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Chile.

[3] **Song G., Ma N., Li H. (2005)**. “*Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures*”, Engineering Structures 28 (2006), pp 1266-1274.

[4] **Ocel J., DesRoches R., Leon R. T., Hess W. G., Krumme R., Hayes J. R., Sweeney S. (2004)**. “*Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys*”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 5, N°1, pp. 732-740.

[5] **Prakash V., Powell G. H., Campbell S. (1993)**. “*Drain-2dx Base Program Description and User Guide*”, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA.

[6] **AISC (2005)** *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, and Supplement N°1* American Institute of Steel Construction, Chicago Il.

[7] **Desjouis, Guillaume. (2006).** “*Estudio Analítico de Conexiones de Momento Viga-Columna Usando Perfiles T Soldados*”, Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Chile.

[8] **Casciati F., Faravelli L., Petrini L. (1998).** “*Energy Dissipation in Shape Memory Alloy Devices*”, Department of Structural Mechanics, University of Pavia, Italy.

[9] **DesRoches R., Leon R. T., Hess W. G., Ocel J. (2000).** “*Seismic Design and Retrofit Using Shape Memory Alloys*”US-China Millennium Symposium on Earthquake Engineering, Beijing, China, November 2000.

[10] **Abolmaali A., Treadway J., Aswath P., Lu F. K., McCarthy E. (2005).** “*Hysteresis Behavior of T-stub Connections with Superelastic Shape Memory Fasteners*”. Journal of Constructional Steel Research Vol. 62, issue 8, pp: 831-838.

[11] **ANSYS Release 10.0 (2005).** “*ANSYS Elements Reference*”. Agosto 2005.

[12] **SAC (1997).** “*Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam column connection test and other experimental specimens*”. SAC Rep. SAC/BD-97/02, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.

[13] **ANSYS Release 10.0 (2005).** “*ANSYS Theory Reference*”. Agosto 2005.

[14] **Barrett P., Cunningham P. (2004).** “*Super Elastic Alloy Eyeglass Frame Design Using the ANSYS Workbench Environment*”. 2004 International ANSYS Conference.

[15] Sepulveda J., Boroschek R., Herrera R., Moroni O., Sarrazin M. (2007). “*Steel Beam-Column Connection using Copper-Based Shape Memory Alloy Dampers*”. Journal of Constructional Steel Research (2007), doi:10.1016/j.jcsr.2007.09.002.