

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

**NITINOL Y GALFENOL:
ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE DERIVAS Y COMO REFUERZO A
FLEXION DE VIGAS DE CONCRETO**

Por:

Manuel Francisco Cabrales Camacho

**MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
BOGOTA, COLOMBIA
DICIEMBRE 2006**

RESUMEN

La necesidad de la Ingeniería Civil de evolucionar en sus técnicas, procedimientos y metodologías obliga a la búsqueda continua de nuevos materiales con propiedades, que mejoren el comportamiento de las obras civiles y la capacidad de sus elementos constitutivos. En Colombia, el estudio de nuevos materiales para uso en proyectos de Ingeniería Civil es muy limitado, por tal razón se busca por medio de esta investigación establecer parámetros y recomendaciones para el uso de estos materiales novedosos dentro de aplicaciones estructurales específicas. En general los materiales novedosos cuentan con propiedades físicas y mecánicas muy atractivas y permiten considerar estos materiales como alternativas competitivas dentro de la Ingeniería Estructural. En esta investigación se estudian dos materiales inteligentes, el nitinol y el galfenol. El primer material pertenece al grupo de las aleaciones con memoria de forma (SMA) y el segundo al grupo de los materiales magnetoreológicos. Los resultados de las aplicaciones estudiadas se comparan con un material tradicional como lo es el acero para mirar su viabilidad en el control de deformaciones de un pórtico arriostrado con estos materiales sometido a cargas laterales y también como material de refuerzo en vigas de concreto sometidas flexión. Los resultados muestran una mayor ductilidad en los pórticos arriostrados con estos materiales, como también aumentos en los momentos resistentes de las vigas reforzadas con estos materiales.

ABSTRACT

The necessity of Civil Engineering to evolve in its techniques, procedures and methodologies, forces the continuous search of new materials with properties that improve processes or conditions of civil works or their elements. The study of new materials in Colombia, for use within Civil Engineering is very limited, for such reason, this study tries to establish parameters and recommendations for the use of these novel materials (Smart Materials) within specific structural applications. These materials have very attractive physical and mechanical properties to consider them as efficient alternatives in Structural Engineering. This particular research will use two specific smart materials, the first one is nitinol, that is part of Shape Memory Alloys group, and the second one is galferol that is part of the magnetoreologic materials group. The results of the studied applications are compared with a traditional material as steel to observe its viability in the control of deformations of a portal frame braced with these materials put under lateral loads and as also material of reinforcement in beams of concrete subjected to flexural bending. The results show a greater ductility in the portal frames braced with these materials, and also increases at the resistant moments of the concrete beams reinforced with these materials.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1 Materiales.	1
1.2 Aplicaciones.	3
1.3 Estudios previos.	4
1.4 Alcance.	5
1.5 Objetivos.	5
1.6 Relevancia de la investigación.	6
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	7
2.1 Descripción detallada de materiales	7
2.1.1 Nitinol	7
2.1.1.1 Súper elasticidad	8
2.1.1.2 Memoria de forma	9
2.1.2 Galfenol	10
2.1.3 Acero	11
2.2 Tabla comparativa de las propiedades de los materiales	11
2.3 Aplicaciones de los Materiales	12
2.3.1 Pórticos arriostrados con nitinol, galfenol y acero.	12
2.3.2 Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión.	14
2.4 Modelación de la Memoria de Forma	16
CAPITULO 3: RESULTADOS	19

3.1	Pórticos Arriostrados	19
3.2	Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión	21
3.2.1	Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Momento resistente	21
3.2.2	Secciones de concreto reforzado con Galfenol-Acero: Momento resistente	23
3.2.3	Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Deflexión en el centro de la luz.	25
CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS		27
4.1	Pórticos arriostrados	27
4.2	Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión	28
4.2.1	Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Momento resistente	28
4.2.2	Secciones de concreto reforzado con Galfenol-Acero: Momento resistente	28
4.2.3	Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Deflexión en el centro de la luz.	29
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		30
CAPITULO 6: BIBLIOGRAFIA		32

CAPITULO 1: INTRODUCCION

Los materiales inteligentes son un grupo de materiales que solos o en compuestos determinados cuentan con propiedades particulares magnéticas, eléctricas, térmicas y mecánicas que superan la de los materiales tradicionales. Estas propiedades permiten su utilización en diferentes campos de la industria moderna como, la medicina, la industria automotriz y robótica entre otros. Esta investigación busca estudiar posibles aplicaciones de los materiales novedosos dentro de la Ingeniería estructural, aprovechando sus propiedades para mejorar la respuesta estructural, la capacidad de elementos estructurales, y para promover alternativas a soluciones ya establecidas. Estos materiales se pueden clasificar en tres grandes grupos: materiales con memoria de forma, materiales electro o magneto activos y los materiales foto o cromo activos (Tabla 1).

MATERIALES INTELIGENTES	MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA
	Aleaciones con memoria de forma
	Polímeros con memoria de forma
	Cerámicas con memoria de forma
	Aleaciones ferromagnéticas
	MATERIALES ELECTRO Y MAGNETOACTIVOS
	Materiales Magnetoreológicos
	Materiales Piezoeléctricos
	Materiales electro y Magneto restrictivos
	MATERIALES FOTO Y CROMOACTIVOS
	Fotoactivos: Fluorescentes, Fosforescentes.
	Cromoactivos: Fotocrómicos, Termocrómicos

Tabla 1. Materiales Inteligentes.

1.1 Materiales

El análisis se enfoca en dos tipos específicos de materiales, el nitinol, el cual es una aleación Níquel y Titanio y se encuentra en el grupo de los materiales con

memoria de forma y el galfenol, el cual pertenece al grupo magneto activo y al sub-grupo de los materiales magnetoreológicos. Estos materiales fueron escogidos sobre otros materiales inteligentes por sus atractivas propiedades mecánicas y sus posibles aplicaciones dentro de la Ingeniería Civil. El comportamiento de estos materiales se comparará con el acero de bajo carbono, material que es el utilizado comúnmente en estas aplicaciones estructurales.

A continuación en las siguientes tablas se muestran algunas propiedades de estos materiales.

PROPIEDADES FISICAS NITINOL	
Densidad (g/cm ³)	6.5
Modulo de elasticidad de Martensite (GPa)	28-41
Modulo de elasticidad de Austenite (GPa)	70 - 80
Punto de Fusión (°C)	1310
Coefficiente de expansión térmica (1/°C)	6.6 x 10 ⁻⁶

Tabla 2. Propiedades Físicas del Nitinol [4].

PROPIEDADES MECANICAS NITINOL	
Esfuerzo de fluencia, F _y . Mpa)	600-800
Esfuerzo de tensión (Mpa)	1100
Deformación crítica (falla)	50%
Deformación recuperable	8%
Carga recuperable (Mpa)	400
Resistencia a la corrosión	Buena

Tabla 3. Propiedades Mecánicas del Nitinol [4]

PROPIEDADES GALFENOL	
Densidad (g/cm ³)	7.45

Modulo de elasticidad (GPa)	72.4 – 86.3
Esfuerzo de fluencia, F_y . (Mpa)	500
Esfuerzo Ultimo a tensión (Mpa)	580
Radio de Poisson	0.4 – 0.6
Resistencia (ρ) Ohm*m	$1.17 \cdot 10^{-6}$
Máxima Magneto-restricción (λS).	240 ppm
Permeabilidad relativa (μ_r)	60 – 360

Tabla 4. Propiedades del Galfenol [9].

PROPIEDADES ACERO DE BAJO CARBONO	
Densidad (g/cm ³)	7.8
Modulo de elasticidad, Gpa.	207
Esfuerzo de fluencia, F_y . (Mpa)	250 - 415
Esfuerzo de tensión (Mpa)	450

Tabla 5. Propiedades del Acero [13]

1.2 Aplicaciones

Este estudio se concentra en dos aplicaciones estructurales: la primera corresponde al análisis de deformaciones laterales (derivas) en pórticos de acero arriostrados con diagonales de nitinol, galfenol y acero. La segunda aplicación analiza el comportamiento de secciones de concreto reforzado sometido a flexión, en las que el refuerzo incluye nitinol, galfenol y acero.

La primera aplicación estudia el comportamiento de los pórticos arriostrados sometidos a cargas laterales para observar la respuesta de las diagonales ante la aplicación de la carga y sus consecuentes deformaciones, analizando las deformaciones laterales máximas y residuales del pórtico. La segunda aplicación

es la de vigas de concreto sometidas a flexión y reforzadas con los materiales inteligentes escogidos y con acero.

1.3 Estudios previos

Se realizó una revisión bibliográfica profunda y se encontraron una serie de estudios donde se analizaba los materiales escogidos para esta investigación en la mayoría de estos trabajos se caracterizaba el material y muy pocas investigaciones se enfocaban en aplicaciones directas dentro de la ingeniería estructural, a continuación se describen dos trabajos específicos a partir de los cuales se obtuvo información valiosa y complementaria para nuestro estudio.

Una investigación realizada muestra la viabilidad del uso del nitinol cuando se utilizan como material complementario de unas diagonales de acero en un pórtico y como andaje de columnas combinado con barras de acero, cuando se someten a cargas sísmicas simuladas [1], los resultados de esta investigación muestran que el material presenta un buen comportamiento en cuanto a la disipación de energía, cargas cíclicas y cambios de temperatura.

La segunda aplicación es la de vigas de concreto sometidas a flexión y reforzadas con los materiales inteligentes escogidos y con acero. Para este estudio se hacen suposiciones consistentes con investigaciones previas de elementos sometidos a flexión y reforzados con nitinol [2]. En dicha investigación varias vigas, cuyo refuerzo externo es de nitinol y acero, son sometidas a flexión. Las siguientes suposiciones producto de este estudio son incluidas en el análisis:

- Se presenta la propiedad de memoria de forma del Nitinol interactuando con el concreto (refuerzo externo anclado), cuando es sometido a flexión.
- El procedimiento de diseño del concreto reforzado con acero es aplicable a secciones reforzadas con Nitinol.

- Cuando se utiliza el Nitinol (material mas dúctil) como refuerzo se presenta una perdida de rigidez en la sección.

Estas conclusiones serán consideradas como base del presenta proyecto, también se plantea como recomendación, las secciones compuestas de nitinol y acero [2]. A partir de esta recomendación se trabajara en la elaboración de gráficas de momento resistente y de deformación en el centro de la luz, que inicialmente se refuerzan con 100% de acero, pero que de acuerdo a su respectiva cuantía inicial, se varia el porcentaje de participación del nitinol y el galfenol en el refuerzo de la respectiva viga, hasta llegar a secciones donde el refuerzo es 100% de la cuantía de los materiales inteligentes tratados.

1.4 Alcance

Se considera importante adelantar una investigación que permita establecer parámetros y recomendaciones para el uso de estos materiales en elementos estructurales. Se propondrá un modelo analítico basado en datos existentes de las propiedades mecánicas de estos materiales.

El estudio de estos materiales ha sido objeto de numerosas investigaciones, sin embargo ya es hora de utilizar ese conocimiento y explorar su uso en miembros estructurales, logrando así avances considerables en la modelación, diseño y construcción de estructuras.

1.5 Objetivos

Los objetivos que se buscan cumplir con este trabajo son los siguientes:

- Analizar la viabilidad de la utilización de estos materiales inteligentes como elementos estructurales, y como alternativa a soluciones ya establecidas.

- Realizar un análisis de las deformaciones laterales (derivadas) en pórticos de acero arriostrados.
- Analizar el comportamiento de secciones de concreto reforzado con estos materiales sometido a flexión.
- Utilizar información anterior de las propiedades de materiales inteligentes, para deducir propiedades que nos permitan establecer la viabilidad de la utilización de estos materiales en miembros estructurales.

1.6 Relevancia de la investigación

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de buscar alternativas a los materiales tradicionales usados en la Ingeniería Civil, estos materiales inteligentes (nitinol y galfenol) nos proporcionan un buen comportamiento mecánico, provisto por sus condiciones o propiedades naturales, muestra de esto es que estos materiales son usados cada vez mas en otras áreas industriales (como la bioingeniería medica, la robótica y la ingeniería mecánica), su utilización puede generar alternativas eficaces en la solución de problemas o en la agilización de los procesos, tales como las aplicaciones que se analizan en esta investigación.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Descripción de los Materiales

2.1.1 Nitinol

El nitinol es una aleación metálica que tiene como principal propiedad la memoria de forma. Esta propiedad consiste en que el material es capaz de asumir deformaciones aparentemente plásticas y recuperar dichas deformaciones en su totalidad o en un alto porcentaje, bien sea al remover la carga que causa la deformación o por calentamiento. Estas dos propiedades se denominan súper elasticidad y memoria de forma, respectivamente, y dependen de la fase en la que se encuentre el material.

El nitinol presenta dos fases conocidas como austenítica y martensítica, la primera es una fase rígida o fuerte donde las propiedades mecánicas del material son mayores que en la segunda fase, y el material es estable a altas temperaturas. La segunda fase, martensítica, es una fase dúctil o suave y es estable a bajas temperaturas. Cada una de estas fases se caracteriza por sus diferentes estructuras internas del material, y comportamientos ante la aplicación de cargas como también ante cambios de temperatura. La transformación entre estas fases permite la presencia de las propiedades particulares del material: Súper elasticidad y Memoria de forma.

Las propiedades físicas y mecánicas del Nitinol son las principales razones por las cuales se busca su implementación en aplicaciones específicas dentro de la Ingeniería Civil y en particular en la ingeniería estructural. Entre estas propiedades se tiene un esfuerzo de fluencia y un esfuerzo último muy altos, este último permite la aplicación de cargas considerables al material, el material también posee un módulo de elasticidad que permite la disipación de energía, además el

material es estable a temperatura ambiente [5]. Entre otras características que presenta el material son, un buen comportamiento ante cargas repetidas, alta resistencia ante agentes externos, es decir, presenta una alta resistencia a factores ambientales o a la intemperie.

De las aleaciones con memoria de forma, el nitinol es el material que presenta mejores condiciones o propiedades, superando a aleaciones que contienen hierro, cobre o aluminio, que aunque presentan propiedades mecánicas aceptables, no cuentan con la memoria de forma o sus resistencias a la fatiga y al ambiente son menores a la del nitinol, dependiendo de la aleación en particular. Las propiedades físicas y mecánicas del nitinol se muestran en la tabla 2, las cuales son para el material en su fase rígida o fuerte, fase austenítica, se debe aclarar también que el nitinol es una aleación comercial, para la cual se han definido previamente los porcentajes de Níquel y Titanio, con un porcentaje que varía entre el 50% y el 60% por peso de Níquel y un 40% al 50% de Titanio.

2.1.1.1 Súper-elasticidad

La súper elasticidad del nitinol se presenta cuando el material se encuentra en su fase fuerte o austenítica. El material es capaz de asumir grandes cargas gracias a sus propiedades mecánicas, presentando un comportamiento elástico; una vez se alcanza una aparente fluencia el material se deforma de manera plástica, gracias a una transformación de la estructura interna o a un cambio de fase de austenítica a martensítica, una vez se produce esta transformación, el material puede asumir carga adicionales hasta llegar a su esfuerzo último, aunque si la carga cesa el material puede recobrar su forma inicial o parte de la deformación sufrida, debido a una transformación inversa de fases, el material vuelve a su fase inicial (austenítica). Esta transformación inversa permite recuperar la deformación del material, tanto en el esfuerzo, como en la deformación aparentemente plástica,

este fenómeno descrito es lo que se conoce como memoria de forma y se ilustra en la Figura 1.

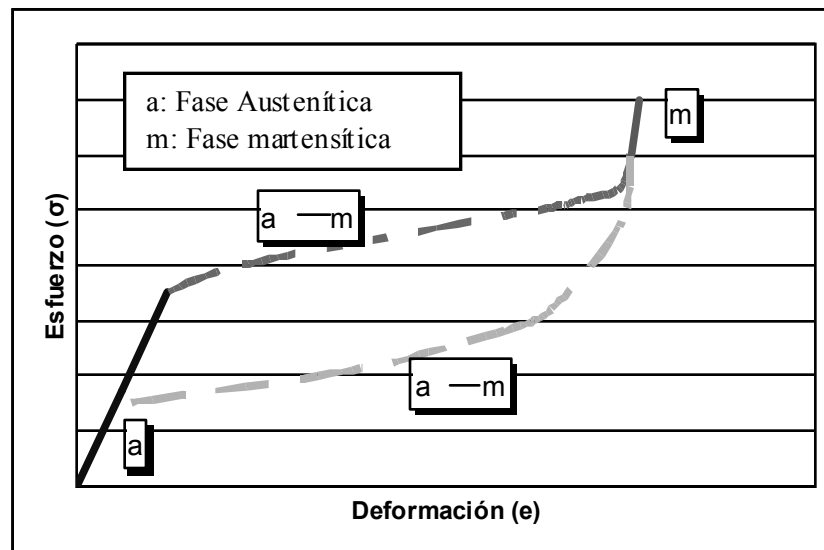


Figura 1. Súper Elasticidad Nitinol [3].

2.1.1.2 Memoria de Forma del Nitinol

La memoria de forma es un efecto característico de esta aleaciones, esta propiedad se presenta en el nitinol cuando este se encuentra en la fase dúctil o fase martensítica. Al aplicar una carga sobre el material éste reacciona de manera elástica pero llega al límite de fluencia ante la aplicación de cargas inferiores a las que resiste en la fase austenítica. Una vez se alcanza dicho limite el material sufre deformaciones aparentemente plásticas, las cuales son debidas a cambios en la estructura interna del material. Después de alcanzar deformaciones plásticas importantes el material es capaz de continuar asumiendo carga hasta su falla. Si el material se descarga antes de la falla, puede recuperar parte de su deformación, pero para lograr volver a su estado inicial es necesario calentarlo para producir un efecto termomecánico que conduce a la recuperación total de la deformación, hasta alcanzar su estado inicial [3], como se ilustra en la Figura 2.

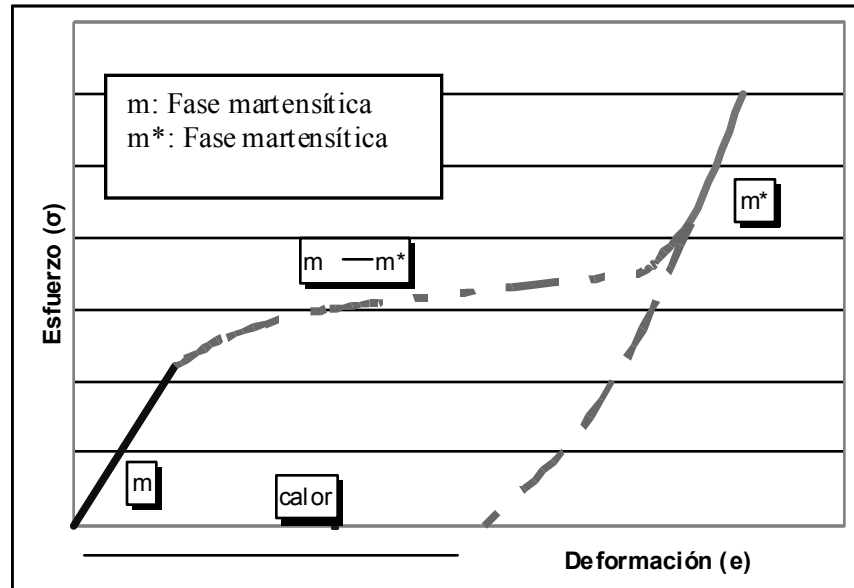


Figura 2. Memoria de Forma Nitinol [3].

2.1.2 Galfenol

El Galfenol es un material que hace parte del grupo de los materiales magnetoreológicos, los cuales son materiales que se caracterizan por que sus propiedades dependen o varían ante la aplicación de campos magnéticos. El galfenol en particular es una aleación de Galio y Hierro, con porcentajes en peso de Galio que varían entre un 13 y un 30%. El galfenol puede presentar dos estados magnetizado y no magnetizado y cambia de estado con la aplicación de un campo magnético [9]. Su módulo de elasticidad depende directamente del flujo magnético y varía entre 65 y 150 Gpa. El módulo de elasticidad se incrementa cuando se aumenta el campo magnético, también se puede disminuir si se aumenta el porcentaje de Galio de la aleación [9].

El material fue seleccionado para su estudio en esta investigación debido a la combinación de las siguientes características o propiedades:

- Propiedades Mecánicas.
- Alta ductilidad, permite grandes deformaciones.
- Alta resistencia ante cargas de impactos [10].

El galfenol es un material dúctil que permite la disipación de energía por medio de deformaciones, siendo esta la principal ventaja del material como se puede observar en su curva esfuerzo-deformación (Figura 3). El material aunque no presenta la memoria de forma del Nitinol, si presenta un deformación recuperable del 2% lo cual es considerablemente mayor que la del acero convencional.

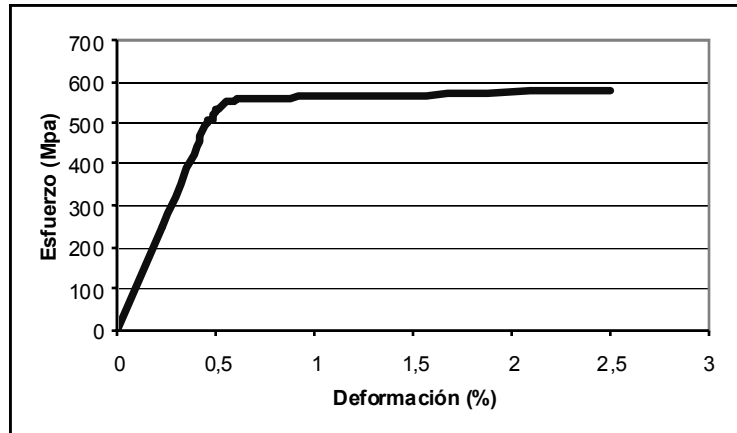


Figura 3. Curva esfuerzo deformación Gal fénol [7].

2.1.3 Acero

El acero a utilizar en las diferentes aplicaciones es el acero de bajo carbono..

2.2 Tabla comparativa de las propiedades de los materiales.

Propiedad	Acero	Nitinol	Galfenol
Densidad, g/cm ³ .	7.8	6.5	7.45
Módulo de elasticidad, Gpa.	207	70 – 80	87
Esfuerzo de fluencia Fy. Mpa.	250	600 - 800	500
Esfuerzo último, Mpa.	450	1100	580
Radio de Poisson	0.3	0.3 – 0.33	0.4 – 0.5
Deformación recuperable	2%	8%	2-4%
Coefficiente de expansión térmica, 1/°C.	1,17 x 10 ⁻⁵	6.6 x 10 ⁻⁶	1,170 x 10 ⁻⁵

2.3 Aplicación de los Materiales

El uso de materiales como el galfenol y el nitinol en ingeniería se concentra en aplicaciones que maximizan las propiedades mecánicas de los elementos estructurales y minimizan sus cuantías. Actualmente, la producción de estos materiales novedosos es limitada y costosa. Por lo tanto la mayoría de las aplicaciones se justifican teniendo en cuenta propiedades relacionadas con su alta ductilidad, disipación de energía, la memoria de forma (nitinol), su alta resistencia a impactos, resistencia a la fatiga, resistencia a los agentes de externos o de condiciones atmosféricas agresivas.

Este artículo se concentra en dos aplicaciones estructurales: la primera corresponde al análisis de deformaciones laterales (derivas) en pórticos de acero arriostrados con diagonales de nitinol, galfenol y acero (Figura 4). La segunda aplicación analiza el comportamiento de secciones de concreto reforzado sometido a flexión, en las que el refuerzo incluye nitinol, galfenol y acero. El análisis de los pórticos arriostrados se realiza por medio del programa de elementos finitos SAP2000 [11] y se compararan los resultados con un modelo analítico del pórtico. En el caso de las vigas de concreto reforzado sometidas a flexión se analiza el momento resistente y deflexiones en el centro de la viga.

2.3.1 Pórticos arriostrados con nitinol, galfenol y acero.

El análisis de pórticos arriostrados es representado por los desplazamientos relativos ante cargas laterales. Un pórtico típico está conformado por cinco elementos, dos columnas de acero, una viga en acero y dos diagonales para las cuales se variaron sus materiales componentes: nitinol, galfenol y acero con sección circular (Tabla 3).

Sección Columnas (perfil)	W8 x 24
Sección Vigas (Perfil)	W8 x 24
Diámetro de diagonales	3/8"
Carga Lateral (kN)	155
Altura de Columna (m)	2
Luz de Vigas (m)	3

Tabla 6. Características del pórtico y cargas aplicadas.

Para comparar los resultados obtenidos por medio del software, se analizó el mismo pórtico utilizando procedimientos analíticos de modelación, teniendo en cuenta la deformación que se produce debido a la carga lateral y las restricciones que ejercen las riostras a la deformación producida por dicha carga, como también las variaciones que se presentan en dicha restricción debido a los cambios en las propiedades de los materiales, como su diferente elasticidad y la memoria de forma del nitinol.

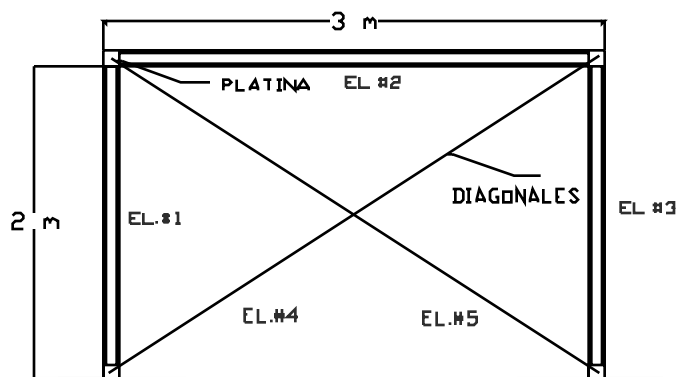


Figura 4. Esquema de pórticos en acero con diagonales.

Para el análisis se aplicará una misma carga para cada uno de los tres pórticos a analizar, dicha carga será la carga con la que se logre un 1% de deriva para el pórtico con diagonales en acero y se aplicará a los otros dos pórticos para poder comparar sus resultados.

Adicionalmente la deformación lateral se calcula con la ecuación 1, la cual se obtiene con base en un análisis del pórtico el cual considera la rigidez de la viga y de la columna, como también las condiciones de apoyo de la columna [12]:

$$\delta_{total} = k \cdot \left[\frac{Ph^3}{9EI} + \frac{Pl^3}{108EI} \right] \quad (1)$$

Donde:

P, Carga Lateral (kN).

H, Altura de la columna (cm.)

E, Módulo de elasticidad (Mpa)

I, Inercia de la sección (cm⁴)

A esta expresión se la adiciona una restricción debido al arrostramiento del pórtico. Esta restricción (k) representa el efecto sobre el pórtico de las diagonales en acero, o el efecto de las diagonales en nitinol y galfenol, estas diagonales se derivan modificando las propiedades mecánicas de las diagonales en acero.

2.3.2 Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión.

La segunda aplicación se refiere a secciones compuestas de concreto reforzado, con acero, nitinol y galfenol, o combinaciones entre dichos materiales. Para este análisis se asumen secciones transversales y luces típicas en la industria de la construcción. El objetivo es monitorear el efecto de los materiales de refuerzo en el control de deflexiones, y el aprovechamiento de propiedades como la memoria de forma del nitinol.

La pérdida de rigidez de la sección debido al uso del nitinol y galfenol, se incluye por medio de un coeficiente (Ω), el cual se denomina coeficiente de reducción de la rigidez y se le aplica directamente a la expresión de momento último resistente, dicho coeficiente se obtiene de los resultados obtenidos por C.A. Ayoub [2], haciendo una comparación entre los resultados analíticos y los resultados experimentales. En general se tiene un Ω de magnitud 0,9. Este coeficiente se

aplica tanto al galfenol como al nitinol debido a similitud de sus módulos de elasticidad.

Para realizar el análisis de las vigas primero se obtiene el refuerzo para la sección como si se fuera a reforzar totalmente con acero, por medio de las expresiones tradicionales del concreto reforzado [13]. Una vez se obtiene la cuantía de refuerzo, se hacen reemplazos porcentuales de ésta, aumentando la participación del Nitinol y de Galfenol respectivamente. Luego, se calculan tanto los momentos resistentes de acuerdo a la participación de cada material como la deformación en el centro de la luz (flechas), dichos cálculos se realizan con la ecuación 2 [13].

$$M_u = \Omega \phi A F_y * \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

Donde:

M_u , Momento último resistente (kN.cm.).

Ω , Coeficiente de reducción de rigidez, el cual solo aplica para el momento resistente de los materiales inteligentes.

A , Área de refuerzo de cada uno de los materiales que componen la sección, (cm²).

F_y , Esfuerzo de fluencia de cada uno de los materiales, (Mpa).

d , Altura efectiva de la sección medida desde la fibra superior hasta el centroide del refuerzo a tracción (cm.).

a , Localización del eje neutro, que es resultado del equilibrio estático de las resultantes a compresión y tensión de la sección, (cm.).

Para el cálculo de las deflexiones en el centro de la luz solamente se tienen en cuenta secciones reforzadas con acero y nitinol. Esta selección permite aprovechar la propiedad de memoria de forma del nitinol, la cual no se presenta en el galfenol. Adicionalmente la baja rigidez del galfenol no representa ventajas ante

secciones reforzadas íntegramente con acero. Para el cálculo de las deflexiones en el centro de la luz se utilizan las ecuaciones 3 y 4 [13].

$$I_e = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 * I_g + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] * I_r \quad (3)$$

Donde

M_r , Momento de fisuración (kN.cm.).

M_a , Momento actuante (kN.cm.).

I_g , Inercia de la sección no fisurada (cm⁴).

I_r , Inercia de la sección fisurada (cm⁴).

A partir de esta inercia efectiva utilizamos esta expresión para obtener la deflexión en el centro de la luz, de acuerdo a la cuantía de cada uno de los materiales involucrados como refuerzo.

$$\delta = \frac{5MaL^2}{48EI_e} \quad (4)$$

Donde:

δ , Deflexión de la viga en el centro de la luz (cm.).

L , Luz libre de la viga (cm.).

E , Módulo de elasticidad del concreto (Mpa).

I_e , Inercia efectiva (cm⁴).

2.4 Modelación de la Memoria de Forma

La memoria de forma del nitinol es una de sus propiedades características y una de las ventajas comparativas que expone el material. Su aplicación dentro de la ingeniería estructural es ilimitada y en particular para las aplicaciones que estamos

estudiando permite un buen comportamiento, en especial para el control de deformación y la recuperación de una deformación inicial.

Para la aplicación del pórtico con diagonales, se le aplica al pórtico su respectiva carga lateral, la cual produce una deformación inicial, a su vez las diagonales asumen una respectiva carga axial y se deforman. Una vez cesa dicha carga el material activa su propiedad característica y trata de recuperar su estado inicial, generándole al pórtico una carga de recuperación (ver figura 5) equivalente a la carga axial que asumió para contrarrestar la carga inicial. Pero el material no se comporta de la misma manera, puesto que en su etapa de memoria de forma tiene un comportamiento elástico diferente, por tal motivo a partir de su curva de esfuerzo deformación se obtiene un nuevo módulo, al cual se le asigna el nombre de Módulo de Elasticidad de memoria de forma (E' , figura 6) el cual se aplica al análisis del proceso de recuperación de su forma inicial y se obtiene gráficamente según la tendencia de la curva.

Para la modelación de la memoria de forma en la aplicación de las secciones de concreto reforzado con Nitinol, se siguió un procedimiento similar. De acuerdo a la cuantía de este material se establece el momento que esta soportando, una vez termine la aplicación de las cargas no permanentes, el material genera una especie de contra-flecha en dirección opuesta a la de la deformación producida por la carga distribuida inicial.

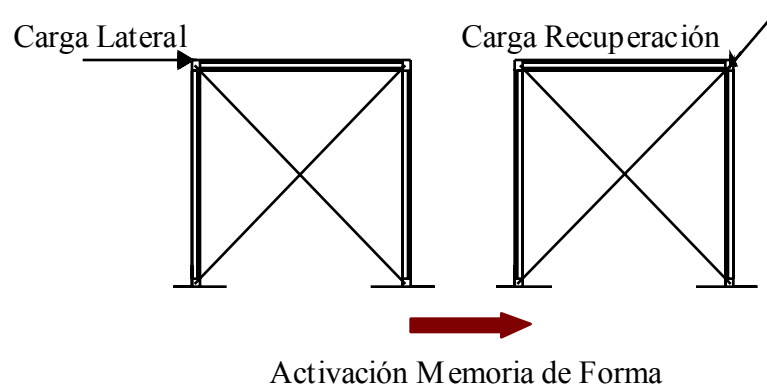


Figura 5. Modelación memoria de forma pórtico.

El valor del módulo de elasticidad de la memoria de forma se obtiene de esta curva como se muestra en la figura 6 y tiene una magnitud de 20 Gpa, este módulo se emplea en el nitinol únicamente en su etapa de recuperación de su estado inicial.

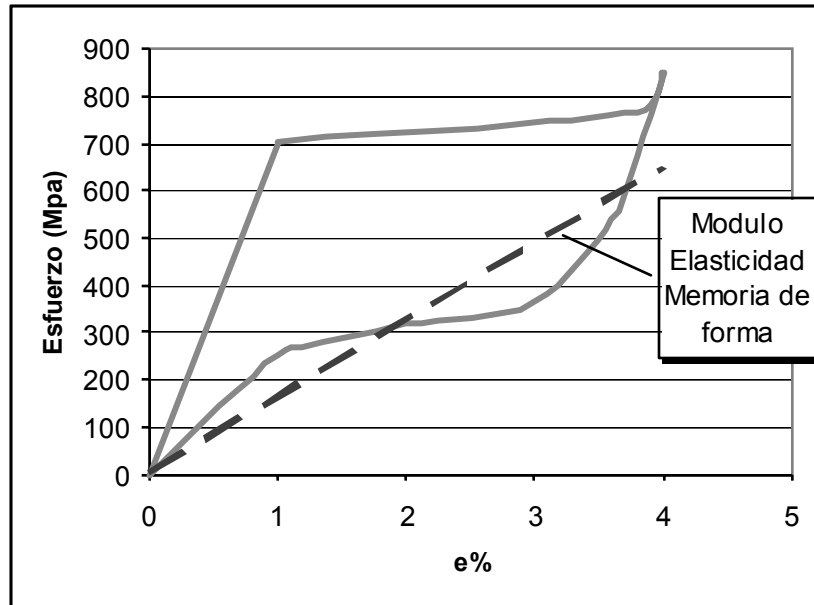


Figura 6. Curva esfuerzo deformación nitinol (Módulo de elasticidad memoria de forma).

CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 Pórticos Arriostrados

Los resultados que se muestran a continuación son de los análisis realizados en el software SAP2000 [11] a los pórticos con diagonales en cada uno de los materiales analizados, se pueden apreciar las derivas y los ángulos de rotación para cada nudo, causadas por la aplicación de la carga lateral de 8 toneladas, la nomenclatura de los nudos se muestra en la figura 7 y los resultados ver tablas 7, 8 y 9.

Nudo	U	V	W	Rx	Ry	Rz
	cm.	cm.	cm.	Rad.	Rad.	Rad.
1	0	0	0	0	0	0,0155
2	1,8738	0,0147	0	0	0	0,0042
3	0	0	0	0	0	0,0114
4	1,8489	-0,0149	0	0	0	0,0041

Tabla 7. Desplazamientos pórtico con diagonales en acero.

Nudo	U	V	W	Rx	Ry	Rz
	cm.	cm.	cm.	Rad.	Rad.	Rad.
1	0	0	0	0	0	0,0196
2	3,1787	0,0172	0	0	0	0,0071
3	0	0	0	0	0	0,0195
4	3,1538	-0,0176	0	0	0	0,0069

Tabla 8. Desplazamientos pórtico con diagonales en níquel.

Nudo	U	V	W	Rx	Ry	Rz
	cm.	cm.	cm.	Rad.	Rad.	Rad.
1	0	0	0	0	0	0,018996
2	3,0752	0,0174	0	0	0	0,006834
3	0	0	0	0	0	0,018869
4	3,0503	-0,0173	0	0	0	0,006712

Tabla 9. Desplazamientos pórtico con diagonales en gal fénol.

A continuación se muestra la numeración de los nudos y unas coordenadas de referencia para entender los resultados de las tablas y la dirección de las deformaciones.

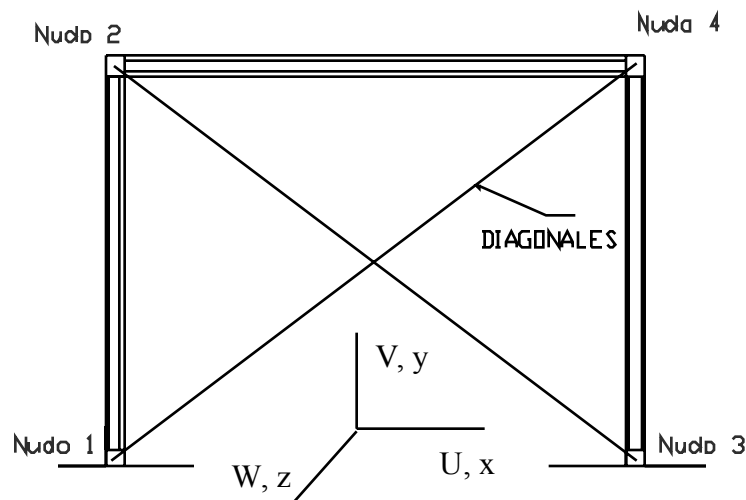


Figura 7. Pórtico con sus respectivos nudos

Los desplazamientos producidos por la memoria de forma de las diagonales en Nitinol al pórtico se muestran a continuación, están con signo negativo pues son en la dirección contraria a los desplazamientos iniciales, ver tabla 10. La fuerza axial que asume la diagonal y que produce dicha recuperación es de 78,5 kN.

Nudo	U	V	W	Rx	Ry	Rz
	cm.	cm.	cm.	Rad.	Rad.	Rad.
1	0	0	0	0	0	-0,01007
2	-1,6277	-0,0092	0	0	0	-0,00357
3	0	0	0	0	0	-0,01013
4	-1,6406	0,0088	0	0	0	-0,00365

Tabla 10. Desplazamientos pórtico con diagonales en nitinol debido a la memoria de forma.

Por lo tanto la deformación residual del pórtico arriostrado con diagonales en Nitinol sería las deformaciones máximas iniciales menos la recuperación producto de su memoria de forma. Ver tabla 11.

Nudo	U	V	W	Rx	Ry	Rz
	cm.	cm.	cm.	Rad.	Rad.	Rad.
1	0	0	0	0	0	0,009563
2	1,5511	0,0082	0	0	0	0,003489
3	0	0	0	0	0	0,009389
4	1,5132	-0,0088	0	0	0	0,003286

Tabla 11. Desplazamientos residuales pórtico con diagonales en nitinol.

Los pórticos también fueron analizados por medio de procedimientos tradicionales de modelación, obteniendo los siguientes resultados:

PORTICO	Deriva pórtico (cm.)	Deformación residual (cm.)
Pórtico con diagonales en Acero	1,9987	
Pórtico con diagonales en Nitinol	3,2594	1.3605
Pórtico con diagonales en Galfenol	3,0655	

Tabla 12. Desplazamientos laterales en pórticos arriostrados.

3.2 Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión.

Para las secciones de concreto reforzado se estudiaron diferentes, secciones transversales, luces entre apoyos, cargas distribuidas y variando la composición porcentual del refuerzo como sus cuantías iniciales, analizamos el comportamiento tanto del momento resistente, como de la deformación en la mitad de la luz de las secciones compuestas de nitinol y acero.

3.2.1 Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Momento resistente.

Para secciones compuestas de nitinol y acero se analizaron los siguientes casos típicos:

- Sección transversal de 30 x 30 cm., luz 6 metros, carga distribuida de 12 kN/m, refuerzo de acero inicial 5,77 cm². Figura 8.
- Sección transversal de 40 x 40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 12 kN/m, refuerzo de acero inicial 7,28 cm². Figura 9.
- Sección transversal de 40 x 40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 15 kN/m, refuerzo de acero inicial 7,28 cm². Figura 10.

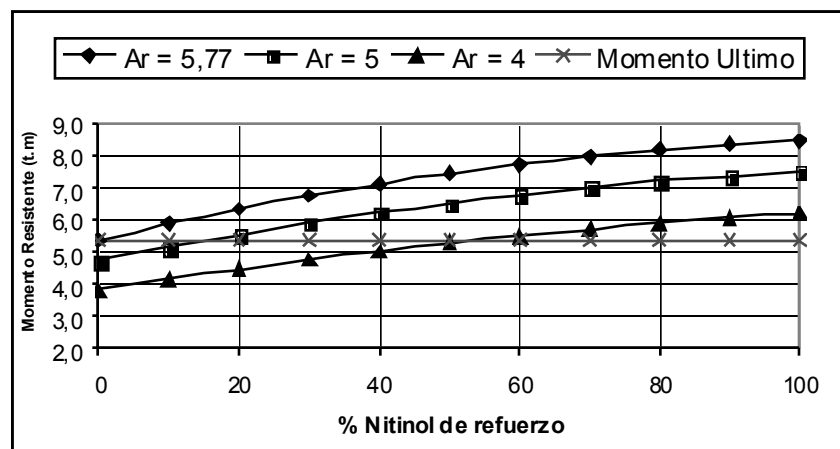


Figura 8. Momento Resistente - % de nitinol. Sección de 30 x 30 cm., luz 6 metros, carga distribuida de 12 kN/m

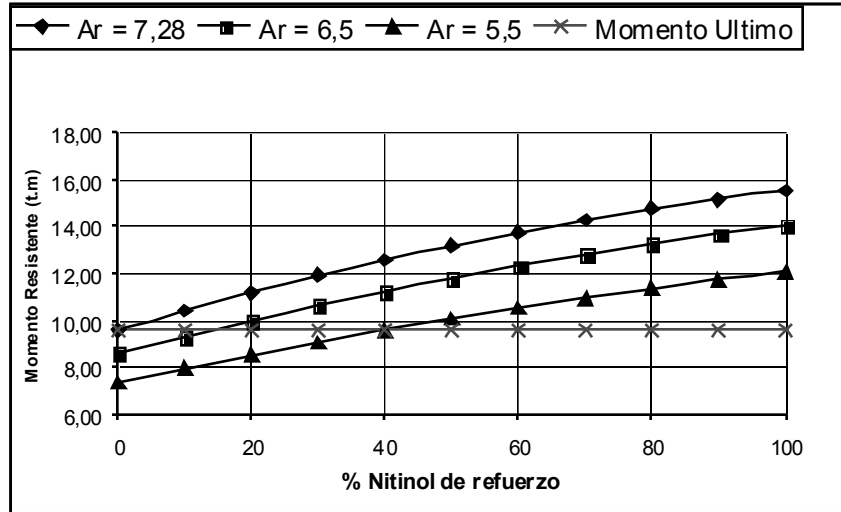


Figura 9. Momento Resistente - %Nitinol Sección de 40 x 40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 12 kN/m

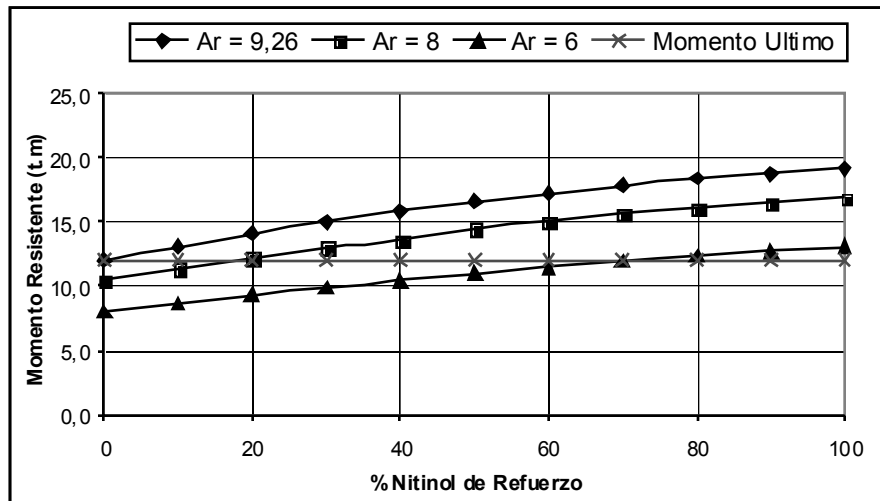


Figura 10. Momento Resistente - % de nitinol. Sección de 40x40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 15 kN/m

3.2.2 Secciones de concreto reforzado con Galfenol-Acero: Momento resistente.

Para secciones compuestas de Galfenol y acero se analizaron los siguientes casos.

- Sección transversal de 30 x 30 cm., luz 6 metros, carga distribuida de 12 kN/m, refuerzo de acero inicial 5,77 cm².

- Sección transversal de 40 x 40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 12 kN/m, refuerzo de acero inicial 7,28 cm².
- Sección transversal de 40 x 40 cm., luz 8 metros, carga distribuida de 15 kN/m, refuerzo de acero inicial 7,28 cm².

Los resultados de los tres casos anteriores se pueden observar en las figuras 11, 12 y 13 respectivamente.

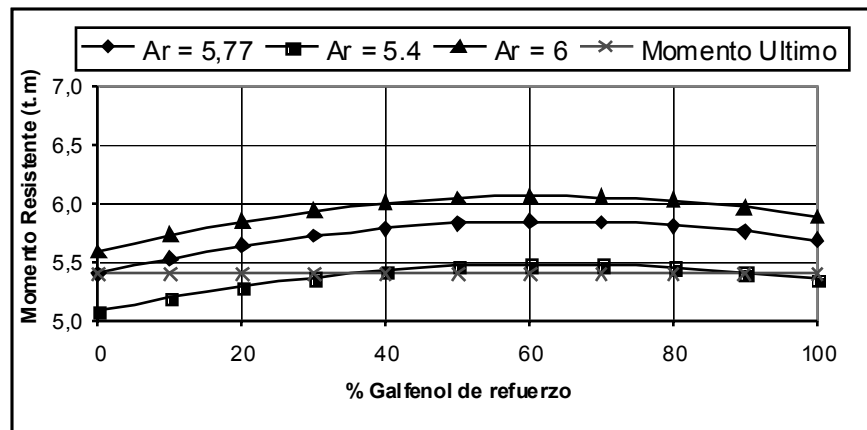


Figura 11. Momento Resistente - %Gal fenol. Sección de 30 x 30 cm., luz 6 m, carga distribuida de 12 kN/m

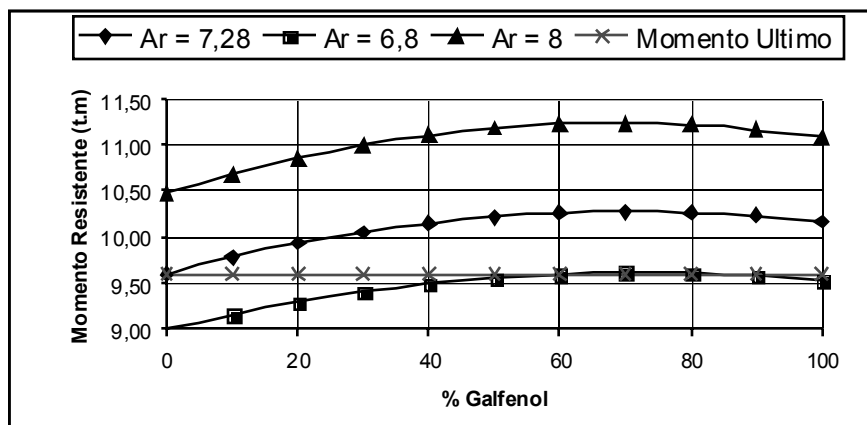


Figura 12. Momento Resistente - %Gal fenol. Sección de 40 x 40 cm., luz 8 m, carga distribuida de 12 kN/m

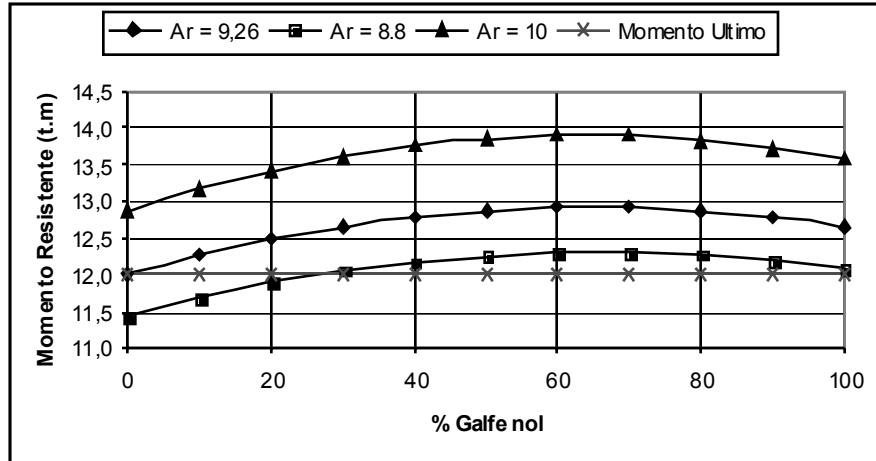


Figura 13. Momento Resistente - % de galñenol. Sección de 40x40 cm., luz 8 m, carga distribuida de 15 kN/m

3.2.3 Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Deflexión en el centro de la luz.

Se analizaron secciones tradicionales de concreto reforzadas con nitinol y acero y se modelo la memoria de forma del nitinol, en diferentes secciones, luces y cargas distribuidas, analizando deformaciones máximas y residuales. Se analizaron los siguientes casos particulares:

- Sección transversal de 30 x 40 cm., luz 6 m., carga distribuida de 12 kN/m.
- Sección transversal de 40 x 50 cm., luz 8 m., carga distribuida de 15 kN/m.

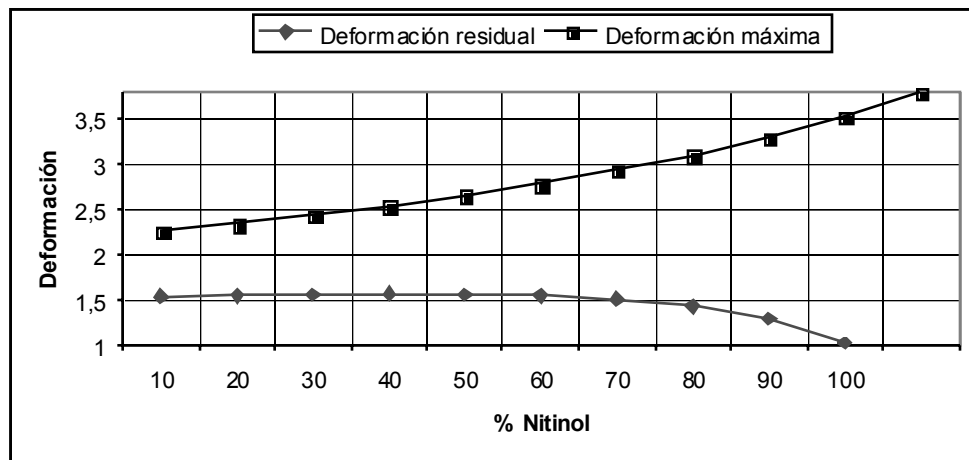


Figura 14. Deformación centro luz - % Nitinol. Sección 30x40cm, luz 6 metros y carga distribuida 12 kN/m.

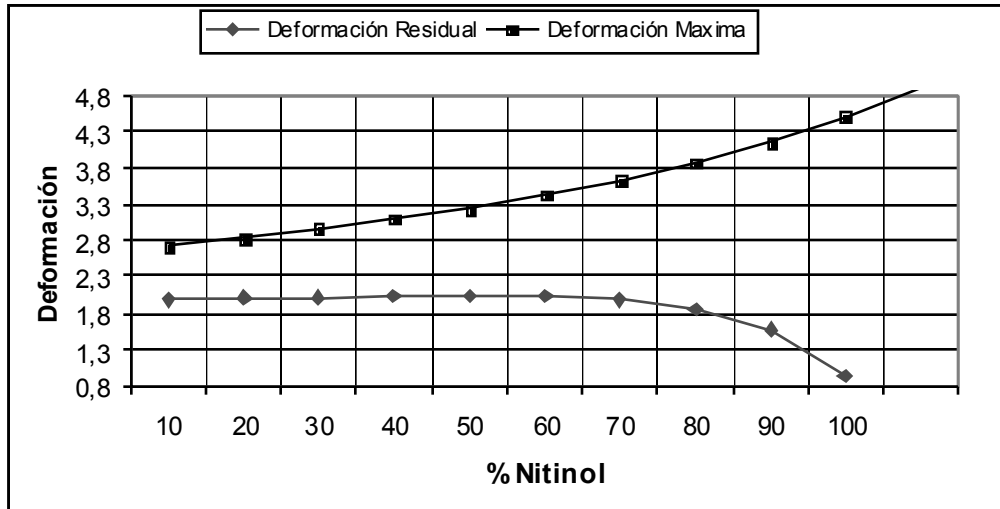


Figura 15. Deformación centro luz - % Nitinol. Sección 40x50cm, luz 8 metros y carga distribuida 15 kN/m.

CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Pórticos arriostrados

Los resultados de los pórticos arriostrados indican como los materiales inteligentes presentan un comportamiento dúctil, mostrando sus excelentes características como disipadores de energía en caso de la ocurrencia de cargas laterales (sismo o viento). Adicionalmente el nitinol debido a su característica de la memoria de forma, no solo es apto para la disipación de energía sino que también permite un buen control de deformaciones pues al tratar de recuperar su forma inicial genera una recuperación de la deriva máxima del pórtico. El pórtico no alcanza su estado inicial, debido a deformaciones residuales en los elementos, dado que el material del pórtico no es en su totalidad nitinol (columnas y viga en acero), pero si alcanza una recuperación de la deformación significativa (1,5132cm.), incluso inferior a la deformación del pórtico totalmente en acero (1.9987 cm.).

Los resultados de los dos procedimientos utilizados para el análisis del pórtico arriostrado son aproximados y reflejan una tendencia similar en el comportamiento de las diagonales, ver tabla 10, donde se muestra una comparación de los resultados de los análisis, y como también se puede observar el porcentaje de recuperación del pórtico con diagonales en nitinol, comprobando de esta manera que la memoria de forma del nitinol permite la recuperación de un gran porcentaje (aproximadamente el 45%) de la deriva causada por la carga lateral.

Material de Diagonales	Deriva máxima método aproximada. cm.	Deriva residual método aprox. (%recuperación) cm.	Deriva máxima SAP 2000 (cm.)	Deriva residual SAP (%recuperación) cm.
Acero	1,9987		1,8738	
Nitinol	3,1787	1,5132 (41,74%)	3,2594	1,3605 (47,61%)
Galfenol	3,0655		3,0752	

Tabla 13. Resultados derivas de pórticos.

4.2 Secciones de concreto reforzado sometidas a flexión.

4.2.1 Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Momento resistente.

Las secciones compuestas de nitinol y acero muestran que el momento resistente de la sección aumenta cuando el porcentaje de nitinol del refuerzo de la sección aumenta, esto puede permitir reducciones significativas en la cuantía total de la sección, como se aprecia en las gráficas con áreas de refuerzo menores se puede lograr el momento último, siempre y cuando en dicha cuantía existe por lo menos alguna participación de nitinol como refuerzo. Por citar un ejemplo en la figura 10 correspondiente a una luz de 8 metros, con sección transversal de 40 x 40 centímetros y carga distribuida de 15 kN/m², se pueden obtener disminuciones del 15% de la cuantía, haciendo una combinación de 80% acero y 20% nitinol.

4.2.2 Secciones de concreto reforzado con Galfenol-Acero: Momento resistente.

Las secciones compuestas galfenol y acero presentan un comportamiento diferente, debido a que hay un punto donde se maximiza el momento resistente, debido a que debido a la pérdida de rigidez de la sección por el aumento de la cantidad de galfenol en el refuerzo, es decir, existe un punto donde al aumentar la cantidad de galfenol la sección comienza a disminuir su momento resistente debido a la pérdida de rigidez en la sección.

Los porcentajes de donde se máxima el momento resistente para secciones combinadas con estos dos materiales es aproximadamente entre el 40 y 60% de galfenol, también se pueden lograr disminuciones en las cuantías como con el nitinol pero son términos porcentuales menores, alrededor del 5% con adiciones de galfenol de aproximadamente 20 a 30% del refuerzo total.

4.2.3 Secciones de concreto reforzado con Nitinol-Acero: Deflexión en el centro de la luz.

El análisis de deflexiones se hizo solo para secciones compuestas nitinol-acero, debido a las ventajas que genera la propiedad del nitinol de recuperar deformaciones una vez se cesa la carga, propiedad que no se presenta en el galfenol. Se puede decir que esta propiedad permite recuperaciones significativas de la deformación máxima, por ejemplo para el caso de la figura 15, con el simple reemplazo de un 10% de acero por nitinol se logra una recuperación en la deformación del 30%.

Al aumentar el porcentaje de Nitinol aumenta la recuperación de la deformación máxima, en otras palabras al aumentar el porcentaje de nitinol disminuye la deformación residual en el centro de la viga.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en los análisis de las aplicaciones, tanto del pórtico arriostrado con diagonales en acero, nitinol y galfenol como de las vigas sometidas a flexión reforzadas con acero, nitinol y galfenol, muestran ventajas significativas al usar los materiales Inteligentes, en términos de ductilidad y control de deformaciones, y se obtienen las siguientes conclusiones:

- I. Las aplicaciones estudiadas permiten observar las ventajas en términos mecánicos que representa utilizar estos materiales inteligentes, ya que brindan la capacidad de resistir cargas gracias a la combinación de sus propiedades mecánicas y su alta ductilidad.
- II. En las aplicaciones estudiadas, tanto la de los pórticos como la de las secciones de concreto reforzadas con estos materiales, se puede observar que la memoria de forma del nitinol nos brinda unas ventajas respecto a los otros materiales, debido a que se obtienen deformaciones residuales menores a las del acero.
- III. El galfenol es un material con unas propiedades mecánicas aceptables y con aplicaciones potenciales dentro de la ingeniería estructural (como disipador de energía), aplicaciones donde se puedan explotar algunas de sus otras propiedades sobresalientes como la resistencia a impactos y la fatiga.
- IV. Usar estos materiales inteligentes como refuerzo a flexión del concreto, es una alternativa viable, sobre todo si se utiliza como complemento del acero de refuerzo, como se constato analíticamente se puede lograr disminución en las

cuantías, como también momentos resistentes mayores a los que se logran con refuerzo netamente en acero.

- V.** El nitinol gracias a sus propiedades mecánicas y principalmente a su memoria de forma es una alternativa que se puede utilizar como refuerzo de secciones combinándose con el acero, no solo por que se puedan lograr disminuciones de cuantía o aumentar los momentos resistentes, también se observa como se puede disminuir considerablemente las deformaciones residuales en el centro de la luz cuando se trata de secciones sometidas a flexión, por ejemplo una sección reforzada con una combinación 90-10 de acero nitinol respectivamente, puede lograr una disminución de cuantía alrededor del 10% y una disminución en la deformación máxima del 30%.
- VI.** La aplicación de secciones combinadas nitinol-acero se debe utilizar con porcentajes bajos de nitinol debido a sus costos, estas cuantías bajas de nitinol posibilita que se vea como viable económicamente su utilización, comparado con los beneficios que se obtienen. Es decir, buscar un equilibrio entre los beneficios mecánicos buscados con los costos del material.

CAPITULO 6: BIBLIOGRAFIA

- 1) Tamai, H., Kitagawa, Y. "Pseudoelastic behavior of shape memory alloys wires and its application to seismic resistance member for building". Computational Material Science 25, 218-227. 2002.
- 2) Ayoub C.A., "A Study of Shape Memory Alloys reinforced beams and cubes". University of Nevada, Reno. Agosto 2003.
- 3) Dolce, M. Cardone, D. "Mechanical Behavior of Shape memory Alloys for seismic applications. 1. Martensite and Austenite NiTi bars subjected to torsion" International Journal of Mechanical Sciences. 2001.
- 4) Smith, Brian J. A Critical Assessment of the Potential of Shape Memory Alloys for Seismic Resistant Designs and Retrofits. Tesis Georgia Institute of Technology. Atlanta: Georgia Tech Library, 2002.
- 5) Connor, Jerome J. Introduction to Structural Motion Control. Capítulo 6: Introduction to Active Structural Motion Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- 6) Cardone, D., Dolce, M. and Nigro, D., "Experimental Tests on SMA Based Seismic Devices", MANSIDE Project, II135-156, 1999.

- 7) Dolce, M. and Cardone, D., "Mechanical Behavior of Shapes Memory Alloy Seismic Applications 1. Martensite and Austinite NiTi Wires Subjected to Torsion", International Journal of Mechanical Sciences, 43, 2001 pp. 2631-2656.

- 8) Dolce, M. Cardone, D. "Mechanical Behavior of Shape memory Alloys for seismic applications. 2. Austenite NiTi wires subjected to tension" International Journal of Mechanical Sciences. 2001.

- 9) Flatau A. Staley M.E. "Development of a prototype magnetostrictive energy harvesting device" University of Maryland. 2005.

- 10) Downey P.R. Flatau A. "Magnetoelastic bending of Galfenol for sensor applications". Journal of applied Physics 97, University of Maryland. 2005.

- 11) Computers and Structures, Inc. "SAP2000 Version 8, Linear and non-linear static and dynamic analysis and design of three dimensional structures". Berkeley, California.

- 12) Segui William T. "Diseño de Estructuras de Acero con LRFD" Segunda edición. Thomson Editores. 1999.

- 13) Rochel A. Roberto. "Homigón Reforzado". Primera parte. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. Sexta Edición. Mayo 1999.