

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UNA ESTANTERÍA METÁLICA

SERGIO ARANGO\*  
ALEJANDRO PAZ\*\*  
MARÍA DEL PILAR DUQUE\*\*

### RESUMEN

La ingeniería sísmica se ha encargado de investigar sobre métodos de diseño para lograr que las estructuras tengan comportamientos aceptables durante su vida útil y cumplan con la función para la cual fueron diseñadas. Se propone en este artículo una metodología para el diseño sísmico de estanterías metálicas de almacenamiento basada en el enfoque de diseño por desempeño, considerando las sollicitaciones sísmicas de diseño de Colombia. Se dan elementos para analizar el comportamiento estructural ante distintos niveles de demanda sísmica de acuerdo con la utilización que se les dará. Con esta metodología se presenta la posibilidad de realizar modificaciones y ajustes a diseños existentes para garantizar el cumplimiento de objetivos de desempeño propuestos, mejorando la eficiencia de los diseños, su competitividad en el mercado y la confiabilidad en el diseño.

PALABRAS CLAVE: estanterías metálicas; desempeño sísmico; diseño estructural.

### METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE EVALUATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF A METALLIC RACK

### ABSTRACT

Seismic engineering has been responsible of proposing design methods to ensure that structures behave according to defined limit states during their lifetime and to fulfill the function for which they were designed. This article proposes a methodology to be applied to the design of steel storage racks based on a design philosophy for seismic performance, considering the demands for seismic design in Colombia. This article gives elements to analyze their structural behavior for different seismic demands, defined according to the use they will have and

---

\* Ingeniero Civil, EIA. Ingeniero Residente, Convel. Medellín, Colombia. sergioarango@convel.com.co

\*\* Ingeniero Civil, EIA. Ingeniero de Diseño, Integral S. A. Medellín, Colombia. apaz@integral.com.co

\*\*\* Ingeniera Civil, Universidad Eafit, Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Coordinadora y docente Área de Estructuras, EIA. Medellín, Colombia. pfmaduq@eia.edu.co

leaving an open door to make suggestions and adjustments as may be required to existing designs to ensure the meeting of the performance objectives proposed for the structure, improving the efficiency of the rack's designs, their market competitiveness, and in turn obtaining safer structures.

KEY WORDS: steel racks; seismic performance; structural design.

## PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUCTURAL DE UMA ESTANTE METÁLICA

A engenharia sísmica se tem encarregado de investigar sobre métodos de desenho para alcançar que as estruturas tenham comportamentos aceitáveis durante sua vida útil e cumpram com a função para a qual foram desenhadas. Propõe-se neste artigo uma metodologia para o desenho sísmico de estantes metálicas de armazenamento baseada no enfoque de desenho por desempenho, considerando as solicitações sísmicas de desenho da Colômbia. Dão-se elementos para analisar o comportamento estrutural frente a diferentes níveis de demanda sísmica de acordo com a utilização que se lhes dará. Com esta metodologia se apresenta a possibilidade de realizar modificações e ajustes a desenhos existentes para garantir o cumprimento de objetivos de desempenho propostos, melhorando a eficiência dos desenhos, sua competitividade no mercado e a confiabilidade no desenho.

### 1. INTRODUCCIÓN

En muchas oportunidades el ingeniero calculista de estructuras sismorresistentes se ve obligado a incurrir en el sobredimensionamiento de los elementos para cumplir unos requisitos de diseño sísmico vigentes, que muchas veces no obedecen al sistema analizado. El consecuente sobre costo afecta el mercado de ciertos sistemas estructurales haciéndolos poco competitivos. Un ejemplo específico son las estanterías metálicas para almacenamiento de mercancía. Las exigencias actuales del mercado y de la disponibilidad de espacio obligan a que los sistemas de almacenamiento se tengan que hacer con alturas y solicitaciones cada vez mayores. Es un reto para el ingeniero diseñador garantizar la seguridad del material almacenado, cuyo valor supera en gran medida el precio propio de la estantería; y minimizar el riesgo de pérdidas humanas, en el caso de almacenes que ofrecen su mercancía en estanterías totalmente expuestas al público, sin que dichas premisas signifiquen un incremento en el costo de la estantería propuesta.

Un sismo podrá causar colapso o volcamiento de las estanterías, si no se encuentran adecuadamente diseñadas, ancladas, mantenidas y cargadas.

Las normas para el diseño de estanterías se empezaron a desarrollar hace más de medio siglo, en la actualidad se cuenta con la norma editada por el Instituto de Fabricantes de Estanterías (Rack Manufacturers Institute, RMI) de los Estados Unidos y con la norma FEMA 460, las cuales han buscado reglamentar la construcción de estanterías metálicas con fines de seguridad y funcionalidad en los diseños.

En general, el diseño de estanterías metálicas en Colombia se lleva a cabo a partir de prácticas empíricas o por métodos de diseño extranjeros que se han adaptado para cumplir con ciertos requisitos sísmicos de las normas de diseño para estructuras genéricas usados en el país (Gallego, 2000). Aunque se ha tratado de reglamentar la construcción de las estanterías metálicas en Colombia, no existe una normativa clara aplicable, lo que ha propiciado que el diseño y la construcción dependan solo del fabricante, generando una competencia poco sana, donde es más importante el precio que la calidad y seguridad.

Es así como, por medio de la propuesta de una metodología para el análisis por desempeño sísmico de la estructura de las estanterías metálicas, se estarían dando las pautas para llegar a un mejor



conocimiento de su comportamiento estructural ante diferentes demandas sísmicas y se estaría permitiendo la posible elaboración de modificaciones y ajustes a los diseños iniciales de la estructura para mejorar su eficiencia, garantizando la competitividad en el mercado, sin sacrificar la seguridad.

En este artículo se presenta una recopilación de normas internacionales para el diseño de estructuras metálicas y se propone una metodología de diseño acorde con ellas y con los niveles de amenaza sísmica colombiana, según estudio realizado como trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil de dos autores (Arango y Paz, 2009).

## **2. ENFOQUES DE DISEÑO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS**

### **2.1 Procedimientos de diseño**

El diseño de estructuras sismorresistentes se puede realizar actualmente con dos enfoques: por resistencia o por desempeño.

El diseño basado en la resistencia, propuesto por la mayoría de normas y códigos actuales, tiene como objetivo principal que las estructuras de uso convencional sean capaces de resistir sismos de baja intensidad sin sufrir daños significativos, sismos moderados con daños reparables y sismos de mayor intensidad sin que se produzca el colapso (Mejía, Osorio y Ortiz, 2005). De acuerdo con este concepto, el desempeño en términos del daño potencial no se cuantifica, debido a que por lo general solo se considera el nivel del movimiento del terreno para el cual la edificación no debería colapsar y rara vez se reconoce que pueden ocurrir daños sustanciales y grandes pérdidas asociadas a sismos de naturaleza más frecuente. En este sentido, se quiere decir que la seguridad ante el colapso debido a grandes sismos no implica precisamente un comportamiento aceptable de una estructura durante sismos de mediana y pequeña intensidad.

Las deficiencias detectadas en el desempeño de las estructuras cuando son sometidas a movimientos telúricos de diferente intensidad han dado origen al enfoque de diseño por desempeño. El diseño por desempeño busca concebir edificaciones diseñadas para ser capaces de exhibir comportamientos predecibles al ser afectadas por diferentes niveles de sismo. Dicho enfoque consta de tres fases: conceptual; numérica y evaluación; implementación. La fase conceptual consiste en la definición de los niveles de desempeño y amenaza esperados para la edificación cuya definición está orientada principalmente por dos propuestas: el Comité Vision 2000 (SEAOC, 1995) y el ATC-40 (1996). La fase numérica y de evaluación comprende el análisis de la estructura por diferentes métodos que pueden ser lineales equivalentes o no lineales. En general, la metodología de análisis se basa en determinar la capacidad y compararla con la demanda, determinando el nivel de desempeño de la estructura para cada una de las intensidades de sismo definidas en la fase conceptual. Por último, en la fase de implementación, se realizan los ajustes o arreglos a la estructura para cumplir con los objetivos de diseño planteados.

El diseño por desempeño no solo cubre las etapas de selección de los objetivos de comportamiento: características sísmicas del terreno, diseño conceptual, diseño preliminar, diseño final, chequeos de aceptación durante el diseño y revisión del diseño; sino que también implica el control de calidad durante la construcción y el mantenimiento durante la vida de la estructura.

### **2.2 Métodos de diseño**

Entre los métodos de diseño se cuenta con el método basado en las fuerzas y el basado en los desplazamientos.

#### **2.2.1 Método de diseño basado en las fuerzas**

Este método es la base de la mayoría de los códigos actuales de diseño (ICBO 1997, ICC 2003, NRC 2005, CEN 2004, NSR-98) soportados por el

enfoque de diseño por resistencia (Christopoulos y Filiatraut, 2006). Utiliza un espectro elástico de aceleraciones para determinar la carga lateral que la estructura debe resistir si permaneciera en el rango elástico. El método se fundamenta en el concepto de los desplazamientos iguales en el rango elástico e inelástico de la estructura (figura 1). La fuerza de diseño lateral  $V_y$  se obtiene dividiendo la carga elástica  $V_e$  por un coeficiente de reducción de fuerzas  $R$  que representa la sobrerresistencia inherente y la capacidad de ductilidad del sistema de resistencia sísmica seleccionado al entrar en el rango inelástico. Los sistemas diseñados por este método deben contar con la resistencia necesaria para soportar el sismo de colapso, la rigidez suficiente para controlar las derivas, y la ductilidad mínima para asegurar un adecuado nivel de deformación inelástica sin el colapso de la estructura.

La principal ventaja de este método es la simplicidad en su aplicación. Algunas de las limitaciones que presenta son: sólo se puede aplicar a un nivel de desempeño de la estructura (caso de análisis estáticos); se trabaja con el período elástico de la estructura sabiendo que se adentrará en el rango inelástico; la imposición por parte de la norma de un valor para el factor  $R$  que no se verifica para el comportamiento real de la estructura; la suposición de que el concepto de los desplazamientos equivalentes es aplicable a todo tipo de estructuras independien-

temente de la resistencia y la no consideración de los desplazamientos en el diseño.

### 2.2.2 Método de diseño basado en desplazamientos

Existen varios métodos para el diseño de desplazamientos, entre ellos está el propuesto por Priestley, Calvi y Kowalsky (2007), denominado el “método directo de desplazamientos” (direct displacement-based design). De manera general, este método consiste en fijar un desplazamiento máximo de diseño, considerado como desplazamiento objetivo  $\Delta_d$ .

Se supone una rigidez secante equivalente de la estructura  $k_e$  y se encuentra el cortante sísmico de diseño en la base de la estructura  $V_b$  para ser aplicado en el diseño.

$$V_b = k_e * \Delta_d \tag{1}$$

Luego, partiendo de las ecuaciones básicas de un oscilador de un grado de libertad, se calcula el período de oscilación equivalente  $T_e$  en función de la rigidez equivalente de la estructura y de la masa equivalente  $m_e$

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{k_e}} \tag{2}$$

Con este período equivalente se encuentra, en un espectro de desplazamientos, el desplazamiento

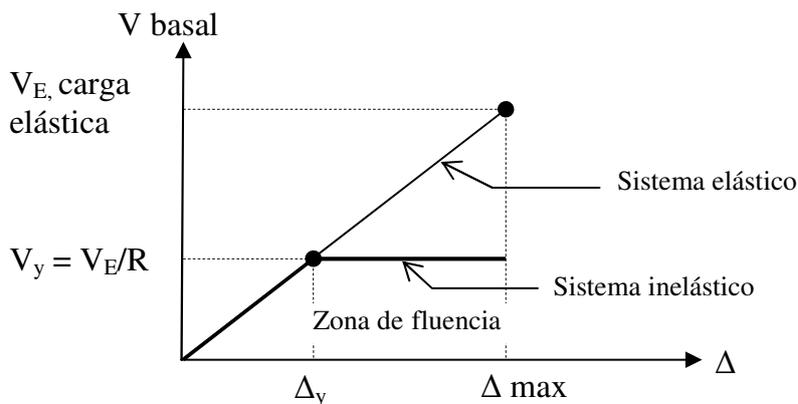


Figura 1. Concepto de desplazamientos iguales en el método de las fuerzas



de la estructura para la rigidez equivalente supuesta; si es mayor que el desplazamiento objetivo, se procede a modificar la rigidez equivalente.

Por último, se diseña la estructura para que cumpla con el requisito de rigidez secante equivalente supuesta para el cortante sísmico encontrado en el primer paso.

El método permite fijar desde el principio desplazamientos objetivos con los cuales se lleva un control del daño en la estructura para la intensidad de sismo deseada, por esto se considera como el método más acorde con el de diseño por desempeño.

Algunas de las desventajas de este método radican en las simplificaciones consideradas en el ajuste al espectro de desplazamientos para diseño, considerando la respuesta inelástica de la estructura y el nivel de amortiguamiento de esta.

## 2.3 Procedimientos de análisis

Para ambos enfoques y para ambos métodos de diseño existen diferentes procedimientos de análisis, entre ellos se cuenta con: análisis estático lineal, análisis dinámico lineal, análisis estático no lineal (*pushover*) y análisis dinámico no lineal.

Se enfatiza en el procedimiento del análisis estático no lineal (*pushover*), pues es éste el que se

propondrá como procedimiento de análisis para el diseño de las estanterías metálicas.

### 2.3.1 Procedimiento de análisis estático no lineal (*pushover*)

El procedimiento de análisis no lineal estático se define en el documento FEMA 273 (*Federal Emergency Management Agency, 1997*) como una aproximación de la forma no lineal de respuesta de una estructura cuando se expone a una carga dinámica de sismo. La aproximación estática consiste en aplicar una fuerza lateral a un modelo que tiene en cuenta las no linealidades de una estructura ya diseñada, y en forma progresiva ir aumentando esa carga hasta que se obtenga el desplazamiento objetivo o se alcance el colapso bajo la combinación de las cargas laterales y los efectos P-delta. Durante el proceso se grafica el cortante basal contra desplazamiento en el último nivel, como se muestra en la figura 2.

La gráfica de cortante basal contra desplazamiento se transforma en términos de aceleración espectral contra desplazamiento espectral, conocida como *curva de capacidad o espectro de capacidad* de la estructura y es comparable con la gráfica de demanda obtenida a partir de los espectros de diseño.

Este procedimiento sirve para varios propósitos: revela las formas indeseables de formación de

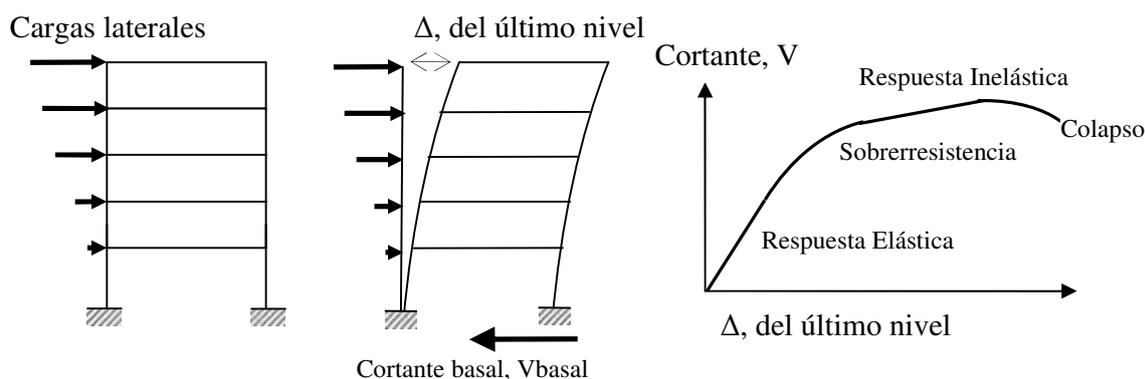


Figura 2. Secuencia del proceso de análisis *pushover*

mecanismos inelásticos, permite una evaluación de la máxima capacidad de deformación de la estructura, permite una evaluación del daño en la estructura inducido por el incremento de deformaciones y permite una mejor estimación de las máximas deformaciones con diferentes niveles de sismo (Christopoulos y Filiatrault, 2006).

### 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE ESTANTERÍAS METÁLICAS

Para el diseño de las estanterías se debe tener en cuenta si se encuentran a nivel de terreno o apoyadas en una losa aérea. Esto representa una diferencia fundamental en el diseño, ya que las fuerzas para cada caso son distintas.

Cuando las estanterías se encuentran localizadas a nivel del terreno su diseño, según recomendaciones de la RMI, se puede hacer considerándolas como elementos no estructurales. Para el caso de estanterías ubicadas en la losa de entrepiso, no se indican procedimientos de análisis para carga horizontal, aunque se especifica que existe la obligación de diseñarlas, fabricarlas e instalarlas de tal modo que cumplan con las sollicitaciones de los pisos superiores de la estructura, causadas por la amplificación dinámica que se presenta.

En las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, las estanterías hacen parte de los elementos no estructurales. En la tabla A.9.2 se define el coeficiente que toma en cuenta la amplificación producida en las estanterías y el tipo de anclajes requeridos para determinar el factor de reducción de fuerzas o coeficiente de disipación de energía  $R$  utilizado en el diseño de la estructura y sus anclajes.

Considerando que las normas colombianas no son suficientes en el alcance de sus recomendaciones, se propone una metodología de diseño para las estanterías metálicas que consiste en aplicar el enfoque de diseño por desempeño, con el método

de diseño basado en las fuerzas y el procedimiento de análisis *pushover*.

La metodología propone los siguientes pasos:

- Diseño preliminar
- Selección de objetivos de diseño
- Determinación de las características sísmicas del terreno y niveles de intensidad sísmica
- Modelación de la estructura
- Análisis y revisión del diseño
- Control de calidad en la construcción e instalación
- Utilización y mantenimiento de la estantería por parte del propietario

#### 3.1 Diseño preliminar

Para el análisis con la metodología *pushover*, se debe partir de un diseño de la estructura que considere las condiciones de carga y sus propiedades de rigidez. Dicho diseño se puede realizar por el método de las fuerzas, aplicando el procedimiento de la fuerza horizontal equivalente del RMI, ajustado a las condiciones sísmicas colombianas.

Las cargas para considerar en el diseño son: la carga muerta ( $DL$ ), la carga de producto ( $PL$ ), la carga viva ( $LL$ ) y la carga sísmica.

La carga muerta ( $DL$ ) incluye el peso del marco, vigas y accesorios de la estantería. En la determinación de esta carga es normal utilizar porcentajes menores del 5 % de la carga del producto para soportar. La carga de producto depende del uso de la estantería.

Según las consideraciones de la RMI, las cargas vivas de una estantería de uso normal son del orden de  $2,9 \text{ kN/m}^2$  (si el sistema analizado consiste en estanterías para carga pesada, de muy poco movimiento y sin pasarelas para caminar adheridas a la estantería, la carga viva se podría considerar nula).

El cortante basal correspondiente a la carga sísmica se obtiene de:



$$V = S_a I_p W_s \quad (3)$$

Donde:

$I_p$  indica el nivel de importancia de la estructura. Para las estanterías metálicas comúnmente se toma como 1 por tratarse de una ocupación normal, sin peligro de derrame de elementos peligrosos y situada en áreas no abiertas al público, sin embargo, dicha consideración se debe reevaluar para la ubicación y uso que se le quiera dar a cada estantería.

$W_s$  es el peso sísmico efectivo, que es función de la relación entre la carga promedio y la carga máxima del entrepaño y de las cargas vivas y muertas que lleva la estructura. Está determinado por la fórmula:

$$W_s = (0,67 \times PL_{FR} \times PL) + DL + 0,25 \times LL \quad (4)$$

El factor de reducción de carga almacenada ( $PL_{RF}$ ) se toma normalmente de acuerdo con las especificaciones del cliente. Se acostumbra tomar un valor del 75 %.

$S_a$  es el coeficiente de aceleración leído en el espectro de diseño de la NSR-98 para el período  $T$  calculado según la recomendación de la FEMA 460 y como se muestra en la ecuación 5.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_L} W_{pi} h_{pi}^2}{g(N_c k_{bu} + N_b k_u)}} \quad (5)$$

Donde:

- $N_c$ : Número de conexiones entre viga y paral en el sistema
- $N_b$ : Número de apoyos del sistema
- $W_{pi}$ : Peso de la estiba del nivel  $i$
- $h_{pi}$ : Altura al centro de gravedad de la estiba en el nivel  $i$
- $N_L$ : Número de niveles cargados en la estantería
- $k_{bu}$ : Rigidez rotacional total entre la viga y parales

$k_u$ : Rigidez rotacional total de los parales en la base.

$k_{bu}$  y  $k_u$  están dadas por:

$$k_{bu} = \frac{k_c k_{be}}{k_c + k_{be}} \quad (6)$$

$$k_u = \frac{k_b k_{ce}}{k_b + k_{ce}} \quad (7)$$

Donde

$k_c$ : Rigidez secante rotacional de los conectores para cierta sollicitación

$k_{be}$ : Rigidez flexorrotacional de la viga en sus extremos

$k_b$ : Rigidez secante rotacional de la placa de base

$k_{ce}$ : Rigidez flexorrotacional del paral en su extremo apoyado en el piso

$$k_{be} = \frac{6EI_b}{L} \quad (8)$$

$$k_{ce} = \frac{4EI_c}{H} \quad (9)$$

Donde:

- $E$ : Módulo de Young de las vigas
- $I_b$ : Momento de inercia de cada viga
- $I_c$ : Momento de inercia de cada columna
- $H$ : Espacio entre apoyos de cada columna
- $L$ : Espacio entre apoyos de cada viga

El valor de rigidez de las conexiones utilizado en la determinación del período fundamental de la estantería seleccionada se determina a partir de ensayos recomendados en la norma RMI, tales como el método del portal (Sec. 9.4.2 de la ANSI MH-16.1-04).

Por último, la estantería se diseña para una fuerza sísmica igual al cortante basal dividido por  $R$ , que según recomendaciones del RMI se puede tomar igual a 6 cuando se diseña en la dirección sin arriostamiento (sentido largo de la estantería), y a

4 en sentido arriostrado de esta. La fuerza sísmica de diseño se reparte en la altura de acuerdo con el método de la fuerza horizontal equivalente del título A de la NSR-98.

### 3.2 Niveles de desempeño

El nivel de desempeño de la estructura describe un estado límite de daño en función de tres aspectos fundamentales:

- la posibilidad de daños físicos en los elementos estructurales y no estructurales
- la amenaza sobre la seguridad de los ocupantes de la edificación
- la funcionalidad de la estructura luego del sismo

Aunque las estanterías de almacenamiento no son consideradas como edificaciones por la Norma NEHRP 2003 del National Earthquake Hazards Reduction Program, de acuerdo con los requisitos de diseño constructivos y las recomendaciones de la FEMA 460, deben ser capaces de proveer seguridad de vida cuando se diseña para terremotos básicos y no podrán colapsar cuando llegue el máximo sismo de acuerdo con las características del suelo.

El desempeño sísmico de las estanterías consta de dos componentes: el desempeño mismo de la estructura y la respuesta de los elementos que ésta almacena.

Siguiendo las recomendaciones de la FEMA 460, se propone tener en cuenta dos niveles de desempeño para el diseño:

- Estado de desempeño *Life Safety* (LS). Este estado se alcanza si se combinan las siguientes condiciones:
  - se previene la falla de componentes de la estantería o su desprendimiento que puedan ocasionar colapso en ésta.
  - se previene el volcamiento de la estantería, y

- no hay pérdida de elementos almacenados a 2,40 m o más de altura, medidos desde el nivel de apoyo de la estantería.

- Estado de desempeño *Collapse Prevention* (CP). Se logra cuando las siguientes condiciones se combinan:
  - Se previene el colapso de la estantería, y
  - Se previene su volcamiento.

### 3.3 Niveles de amenaza sísmica

De acuerdo con las recomendaciones y provisiones sugeridas por el NEHRP, las estanterías deben ser diseñadas para proporcionar un nivel de desempeño de seguridad de vida LS ante el sismo de diseño (Design basis earthquake, DBE), definido como el sismo con una probabilidad del 10 % de ser excedido en 50 años, con un período de retorno promedio de 475 años (FEMA, 2000a). La mayoría de los espectros de diseño de los códigos corresponden a este nivel sísmico.

Para la condición de desempeño de prevención de colapso CP se recomienda diseñar para el sismo máximo esperado (Maximum earthquake, ME), el cual corresponde a un sismo con una probabilidad del 2 % de ser excedido en 50 años, para un período de retorno aproximado de 2500 años (FEMA, 2000a). Se considera que este nivel es 1,5 veces el nivel de amenaza sísmica de diseño DBE (FEMA, 2000b).

#### 3.3.1 Espectros de diseño

En la NSR-98 existen dos tipos de espectros de diseño recomendados, consignados en el Título A y el Título H, y corresponden al sismo base de diseño (DBE).

El espectro de diseño del Título A se usa ampliamente en la práctica de la ingeniería en todo el país debido a su facilidad de aplicación. Sin embargo, el espectro del Título H es más exigente y se basa en las recomendaciones del NEHRP (FEMA, 2001), por lo cual está determinado para



ser de carácter obligatorio en futuras ediciones de la Norma (NSR 09), en caso de no contar con una microzonificación sísmica.

Para la determinación de la amenaza sísmica a la cual debe estar expuesta teóricamente la estantería cuyo diseño esté bajo revisión, se utilizará el espectro consignado en el título H de la NSR-98 como DBE y se partirá de éste para calcular el sismo máximo esperado (ME).

Para definir un espectro de diseño es necesario especificar la localización, el suelo y la funcionalidad.

### 3.3.2 Espectro de diseño según el título H de la NSR-98

Para la determinación del espectro de diseño sísmico existen dos coeficientes relacionados con los efectos de sitio:  $F_a$  y  $F_v$ , denominados coeficientes de amplificación, que afectan la aceleración en la zona de períodos cortos y períodos largos, respectivamente. Estos parámetros dependen de

la clasificación del suelo y de la aceleración pico efectivo para el sismo de diseño  $A_a$ . La clasificación de los suelos presentada en el título H de la NSR-98 (ver tabla H-1-1 de la NSR-98) coincide con las recomendaciones del NEHRP (FEMA, 2001). Esta clasificación depende de tres parámetros básicos: la velocidad media de la onda de corte ( $v_s$ ), el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (N) y la resistencia media al corte ( $s_u$ ).

Así pues, para la construcción del espectro de diseño base, se debe determinar en primer lugar el coeficiente  $A_a$  correspondiente a la zona donde se encuentra la estructura. Luego para el perfil de suelo analizado se debe determinar el coeficiente de amplificación  $F_a$  para la zona de períodos cortos del espectro y el coeficiente de amplificación  $F_v$ , que aumenta las ordenadas del espectro para períodos intermedios.

La figura 3 muestra cómo se define el espectro de diseño sísmico en términos de los parámetros mencionados.

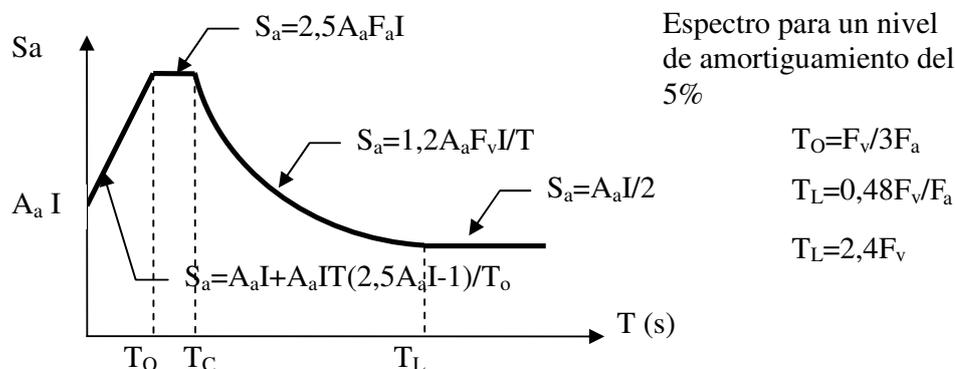


Figura 3. Espectro elástico de diseño según el título H de la NSR-98

Una vez obtenido el espectro de diseño para el sismo base (DBE), se amplifican las ordenadas del espectro 1,5 veces para obtener el espectro de diseño para el sismo máximo esperado (ME).

### 3.4 Modelación de la estructura

Para la construcción del modelo, es importante considerar todas las fuentes de no linealidad y las características de carga de la estantería, cuyos efectos son fundamentales en la respuesta final real de la estructura.

Las principales características que se deben tener en cuenta en la construcción del modelo son:

#### 3.4.1 Material

Definir en primera instancia el tipo de material por utilizar en los elementos que conformarán el modelo, resistencias nominales a la fluencia ( $F_y$ ) y a la rotura ( $F_u$ ). Dichos valores se recomienda sean corroborados mediante ensayos de laboratorio, ya que, debido a la modernización en los procesos de producción del acero, las resistencias reales desarrolladas pueden llegar a ser mucho mayores que los valores mínimos que se especifican.

Aunque el contar con resistencias reales superiores a las nominales puede ser beneficioso para ciertas características de la estructura, también puede conducir a efectos contraproducentes para su desempeño, tales como las fallas frágiles en conexiones, las cuales son diseñadas con base en una resistencia nominal de los elementos que conecta.

#### 3.4.2 Modelado de los elementos estructurales

Las columnas, vigas y otros elementos pueden ser modelados mediante elementos estructurales tipo viga, los cuales incluyen efectos producidos por flexión, torsión, deformación axial y deformaciones por cortante. En los elementos tipo columna se debe garantizar la continuidad de rigidez, condición real de un par de estantería.

### 3.4.3 Nodos y conexiones

Para las intersecciones viga-columna, el modelo debe considerar el comportamiento real de las conexiones. Se recomienda realizar ensayos para determinar los valores de rigidez rotacional (curva momento-rotación) de las uniones, que se deben asignar a los extremos de los elementos horizontales, recreando así la rigidez limitada de la conexión sin afectar la continuidad de las columnas.

#### 3.4.4 No linealidad del material

Las características mecánicas del material, esto es, su curva esfuerzo-deformación se define para cada material de la estructura. Específicamente es importante que las características elásticas e inelásticas sean tenidas en cuenta en los puntos donde se espera plastificación de la sección. Algunos programas comerciales para el análisis de estructuras permiten definir estos puntos dentro de los elementos estructurales como rótulas plásticas. En el caso particular de las estanterías se recomienda ubicarlas en los extremos de los elementos de vigas y parales, que es donde se generan los mayores momentos.

En los programas comerciales, el comportamiento del material en las rótulas plásticas se define ingresando puntos que relacionen las características de resistencia-rotación o resistencia-deformación del material, como se muestra en las figuras 4 y 5.

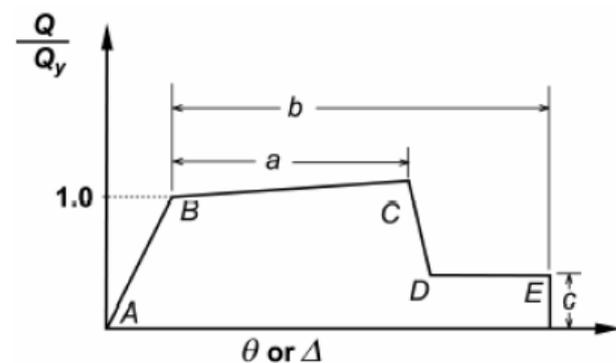


Figura 4. Curva representativa de las propiedades mecánicas del material, según FEMA, 2000

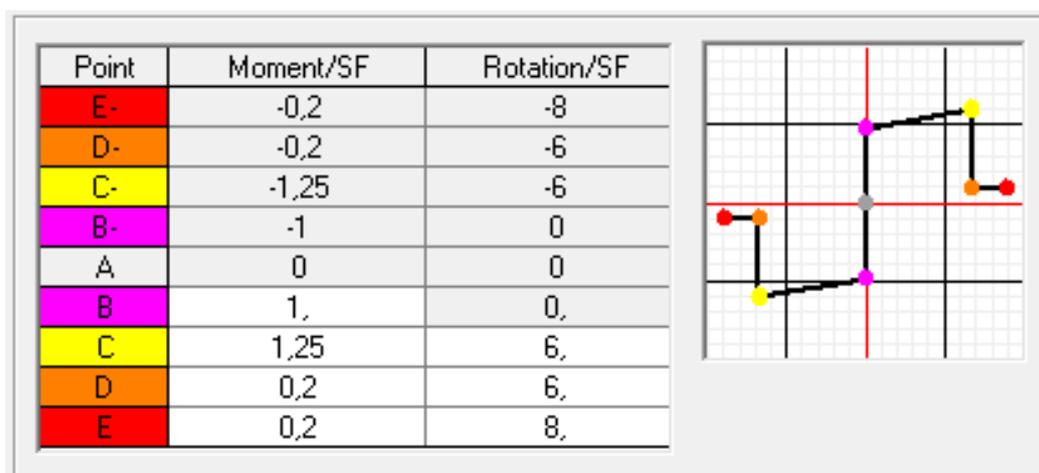


Figura 5. Definición de la curva de las características mecánicas del material. Tomado de SAP2000 V.12

Donde:

$Q$ : Esfuerzo interno del material

$Q_y$ : Resistencia nominal del material

$a, b, c$ : Parámetros que dependen del elemento y la fuerza interna

$\Delta$ : Deformación axial

$\theta$ : Rotación

### 3.4.5 No linealidad geométrica

La no linealidad geométrica es considerada en términos de los efectos P-delta o efectos de segundo orden, que se describen como la incidencia que tienen las cargas verticales en la estructura al desplazarse lateralmente, generando así momentos adicionales en los elementos.

Entre los programas de modelación se recomienda, por facilidad en el proceso de diseño y análisis, el programa SAP2000, el cual cuenta con tutoriales que explican paso a paso el desarrollo de un análisis *pushover*, como el que trae el sitio [http://www.csiberkeley.com/Watch&Learn/Pushover\\_V14S.wmv](http://www.csiberkeley.com/Watch&Learn/Pushover_V14S.wmv).

## 3.5 Análisis y revisión del diseño

Se realiza el análisis *pushover* al modelo propuesto y se determina la curva de capacidad de la estructura, cortante basal contra desplazamiento horizontal del nivel superior. Este se puede llevar a cabo considerando la misma distribución de fuerzas horizontales en altura del prediseño, esto es, la recomendada en el título A de la NSR-98, método de la fuerza horizontal equivalente.

Una vez obtenida la *curva de capacidad* se convierte a una relación de aceleración espectral contra desplazamiento espectral, llamada *espectro de capacidad*. La transformación se puede llevar a cabo según los procedimientos definidos por (Safina, 2001).

Los espectros de diseño para las demandas DBE y ME se transforman a curvas de aceleración espectral contra desplazamiento espectral, llamada *espectros de demanda*, que se pueden modificar para amortiguamientos mayores del sistema, dependiendo de las solicitaciones inelásticas de la estructura.

Por último, se superponen las curvas de espectro de capacidad y espectros de demanda. Los puntos de intersección determinan los niveles de desempeño para cada demanda sísmica, con lo

cual se corrobora el cumplimiento de los objetivos de diseño (desplazamientos objetivos).

Adicionalmente se debe verificar la estabilidad de la carga almacenada según las recomendaciones del capítulo A.9 de la NSR-98. Es importante tener en cuenta la geometría y rugosidad específica de la mercancía almacenada.

### 3.6 Control de calidad en la construcción e instalación

El control de calidad involucra los procedimientos que se deben realizar para obtener el nivel de calidad requerido para la estructura, de modo que efectúe la función para la cual fue diseñada y se asegure el cumplimiento de sus objetivos de desempeño. Es una función del dueño, diseñador y constructor, e incluye decisiones de diseño, producción, muestreo, ensayos, instalación y mantenimiento.

En la construcción de la estantería se debe verificar la calidad de los materiales, chequear que estos correspondan a las consideraciones de diseño y que lo construido corresponda a las características del modelo estructural. Si se implementan conexiones viga-para o apoyos de base con características de rigidez o resistencia diferentes a las utilizadas en el modelo, se debe realimentar el modelo y rediseñar.

En la instalación de las estanterías es fundamental que no se presenten efectos de segundo orden diferentes a los considerados en el análisis, entonces, se debe garantizar la uniformidad y nivelación de los pisos donde se van a instalar las estanterías, como también las especificaciones de las losas de apoyo, con el fin de que no se presenten punzonamientos u otras condiciones que generen asentamientos diferenciales, que incrementen los momentos solicitados por la estructura asociados a los efectos P-delta.

### 3.7 Utilización y mantenimiento de la estantería por parte del propietario

El proceso de diseño por desempeño empieza con el planteamiento inicial de la estructura y termina

cuando ésta deja de existir. Por ello, es fundamental velar porque las cargas y sollicitaciones de diseño no se excedan a lo largo de la vida de la estructura.

También se deben hacer constantes revisiones del estado de los elementos estructurales, reemplazando elementos dañados por accidentes que pueden ocurrir en zonas de almacenamiento de materiales y equipo (como golpes con la maquinaria de transporte horizontal u otros y tomando acciones correctivas en el caso de haber exposición de los elementos estructurales a ambientes agresivos para los cuales sea insuficiente la protección constructiva.

## 4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UNA ESTANTERÍA METÁLICA DE USO COMÚN EN EL PAÍS

La metodología propuesta en este artículo se aplicó a la evaluación del diseño de una estantería metálica de cuatro niveles, que se muestra en la figura 6, utilizada comúnmente en el medio. Se presenta una síntesis de los resultados obtenidos; en Arango y Paz (2009) puede consultarse información adicional.

En la figura 7 se determinan los espectros de diseño correspondientes al DBE (*Design basis earthquake*), para el nivel de desempeño de Seguridad de Vida LS (*life safety*), y el sismo máximo ME (*maximun earthquake*), para el nivel de prevención de colapso CP en la ciudad de Medellín, según el título H de la NSR-98.

Se calcula el período de vibración y cortante sísmico en el sentido no arriostrado de la estantería:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_L} W_{pi} h_{pi}^2}{g(N_c k_{bu} + N_b k_u)}} = 1,46 \text{ s}$$

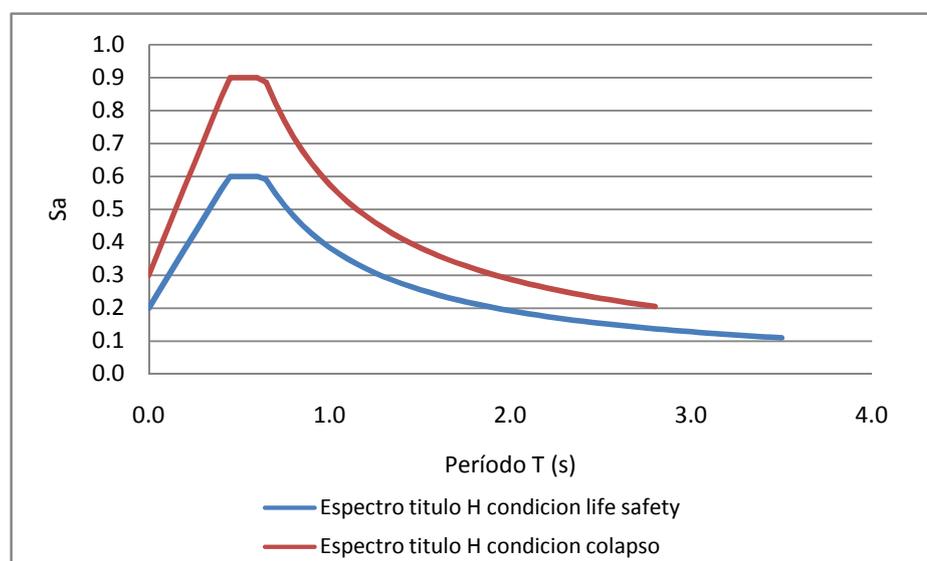
$$W_s = (0,67 \times 0,75 \times 40) + 1,2 = 21,3 \text{ kN}$$

$$S_a = \frac{1,2 A_a F_V I}{T} = 0,26$$

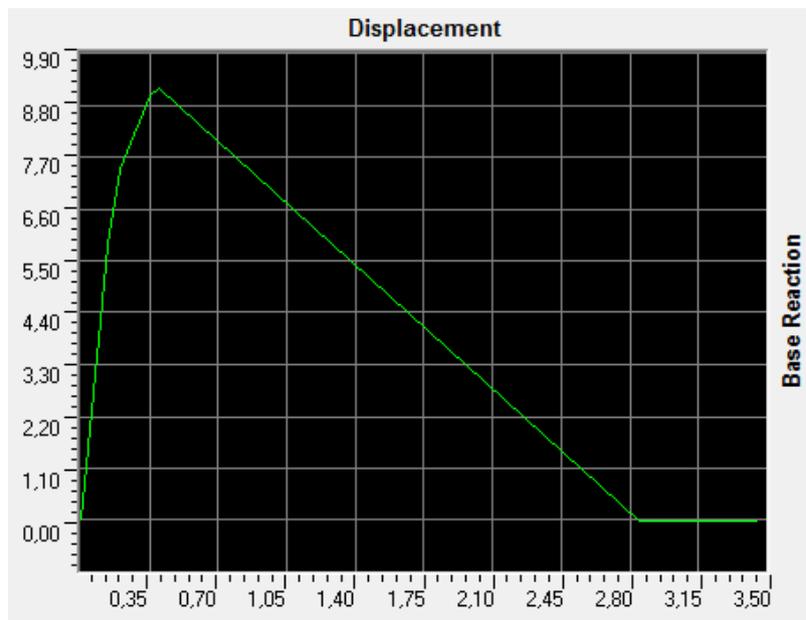
$$V = S_a I_p W_s = 5,5 \text{ kN}$$



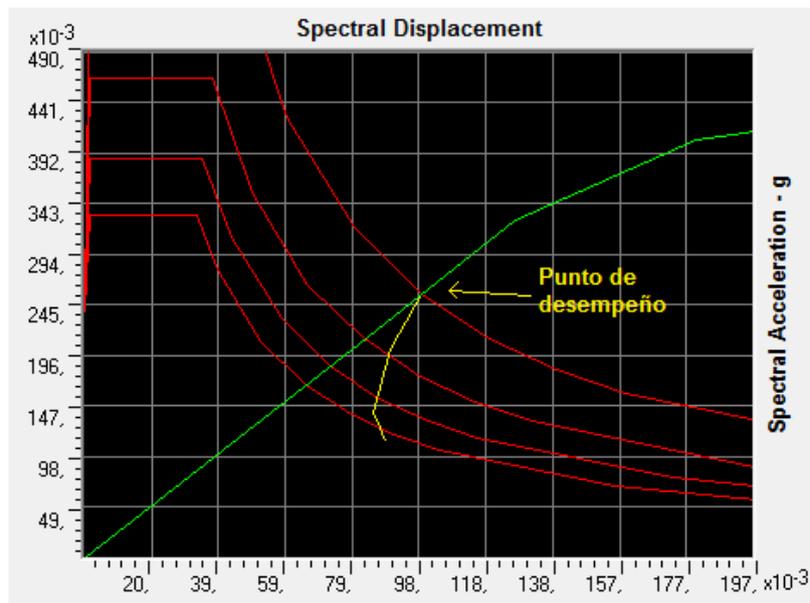
**Figura 6.** Vista general de la estantería estudiada y modelo estructural utilizado



**Figura 7.** Espectros utilizados en el diseño



**Figura 8.** Curva cortante basal contra desplazamiento, interfaz de resultados del análisis *pushover* de SAP2000 en kN, m



**Figura 9.** Superposición curva de capacidad y espectro de demanda de la estructura



En la figura 8 se puede ver la curva de capacidad de la estructura analizada en el programa SAP2000 V12, y en la figura 9 se sitúa el punto de desempeño de la estantería en el nivel de prevención de colapso.

## 5. DISCUSIÓN

- Actualmente el enfoque del diseño por resistencia no considera el desempeño de la estructura para diferentes demandas. La metodología propuesta permite conocer el comportamiento de las estanterías ante diferentes demandas de carga lateral, definidas según la utilización, permitiendo un diseño más eficiente y ajustado a las necesidades del mercado.
- Diseñar para la seguridad ante el colapso debido a grandes sismos no implica un comportamiento aceptable de una estructura durante sismos de mediana y pequeña intensidad. Utilizar la metodología propuesta permite un diseño más certero en cuanto al conocimiento del comportamiento de la estructura para diferentes niveles de demanda sísmica, obteniendo diseños más seguros.
- La metodología de propuesta permite adaptar los requisitos y procedimientos de análisis usados internacionalmente para el diseño de estanterías metálicas a las demandas sísmicas de Colombia.

## CÓDIGOS DE DISEÑO CONSULTADOS

ANSI MH-16.1-04

ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council. 1996.

CEN 2004. Eurocode 8-Design Provisions for earthquake resistance of structures. ENV 1998-2. Comité européen de normalisation, Bruxelles, Belgique.

FEMA 2000. Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings (Report FEMA

356). American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, FEMA. 2000.

FEMA 2000a. Report FEMA 350. Recommended seismic design criteria for new moment-resisting steel frame structures. 2000.

FEMA 2000b. Report FEMA 353. Recommended specifications and quality assurance guidelines for steel moment-frame construction for seismic applications. 2000.

ICBO Uniform building code, International Conference of Building Officials, Whittier, CA.

ICC 2003. International building code. International Code Council, Building Officials and Code Administrators International Inc. Country Club Hills, IL. International Conference of Building Officials, Whittier, CA. Southern Building Code Congress International, Inc. Birmingham. Alabama.

NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). National Earthquake Hazards Reduction Program. Building Seismic Safety Council. 2003.

NSR-98. Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS.

NRC 2005. National building code of Canada. National Research Council, Ottawa, Canada.

NSR-09. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente, 2009. Versión preliminar. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS.

Report FEMA 273. NEHRP. Guideline for the seismic rehabilitation of buildings. Building Seismic Safety Council. 1997.

Report FEMA 460. Seismic considerations for steel storage racks, locate in areas accessible to the public. Building Seismic Safety Council, September 2005.

Vision 2000 Report. Performance-based seismic engineering of buildings. Structural Engineers Association of California, SEAOC. 1995.

## REFERENCIAS

- Arango, S. y Paz, A. (2009). *Evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica*. Medellín: Escuela de Ingeniería de Antioquia. Trabajo de grado (Ingeniero Civil).
- Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia, Italy: IUSS. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Gallego, M. (2000). "Estimación de riesgo sísmico en la República de Colombia" Tesis UNAM. M.I.
- Mejía, L. G.; Osorio, L. I. y Ortiz, J. C. (2005). *Análisis sismorresistente de estanterías para almacenamiento (Racks)*. Bogotá: Susaeta.
- Priestley, M., Calvi, G. and Kowalsky, M. (2007). *Displacement-based design of structures*. Pavia, Italy: Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Safina, S. (2001). *Métodos simplificados de análisis estático no lineal*. Barcelona: Universidad de Barcelona.