

ANÁLISIS SISMORESISTENTE DE ESTANTERÍAS METÁLICAS PARA ALMACENAMIENTO (RACKS) DE ACUERDO CON LA NSR-10

Ponencia presentada en las XVIII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de
Colombia, Septiembre de 2009



I.C. Luis Gonzalo Mejía C.
Medellín

ANÁLISIS SISMORESISTENTE DE ESTANTERÍAS METÁLICAS PARA ALMACENAMIENTO (RACKS) DE ACUERDO CON LA NSR-10

*I.C. Luis Gonzalo Mejía C.
U.N. y U. Karlsruhe Alemania*
Luis Gonzalo Mejía & Cía. Medellín
lgm@une.net.co

Resumen

El desarrollo del país exige, cada vez más, la construcción de centros de distribución y almacenamiento que requieren el uso de estanterías (Racks) las cuales, dada su esbeltez, son supremamente susceptibles de colapsar durante un evento sísmico, causando no solo pérdidas de mercancías, sino pérdidas de vidas, especialmente si están en lugares con acceso del público.

El principal objetivo de este artículo es analizar el comportamiento de las estanterías y, a la luz de la NSR-10^[1] y otras normas internacionales, tratar los diferentes aspectos que influyen en la determinación del coeficiente de disipación de energía R_p , lo cual puede conducir en algunos casos a usar un R_p menor que el recomendado en la NSR-10 y en otros casos a justificar el uso de un R_p mayor, necesario lo primero por razones de seguridad y requerido lo segundo por razones de economía.

Summary

The development of the country demands the construction of distribution and storage centers that require the use of racks which, given its slenderness, are supreme susceptible to collapse during a seismic event, causing not only losses of merchandise, but losses of lives, especially if they are in places with access of the public.

The main objective of this article is to analyze the behavior of the racks and, in the light of the NSR-10 and other international norms, the different aspects that influence in the determination of the coefficient of energy dissipation R_p , which can lead in some cases to use a R_p smaller than the recommended one in the NSR-10 and in other cases to justify the use of a greater R_p , necessary the first for reasons of security and required the second for reasons of economy.

1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de mercancías en bodegas y centros de distribución (CEDIS), se hace por medio de estanterías (Racks). Sin embargo, durante los últimos años, el número de almacenes de grandes superficies en los cuales la mercancía se exhibe en racks de mucha altura, ha incrementado considerablemente y por consiguiente el riesgo de que se presenten lesiones en el público y daños en la mercancía durante un evento sísmico

Durante un sismo, la seguridad de los ocupantes y mercancías dependerá del desempeño estructural del edificio y del de los racks de almacenamiento y su contenido. Los sismos pueden causar colapso ó volcamiento de los racks si no están diseñados, anclados, instalados y cargados adecuadamente.

Adicionalmente, cuando la mercancía no se encuentra amarrada o confinada por elementos que garanticen su lugar en la estantería, se pueden producir caídas y derrames, creando riesgos de lesiones personales y pérdida de vidas que se suman a las pérdidas económicas que esto implica (Ver fotos 1).



Fotos 1. Colapso por sobrecarga y caída de elementos en una sección del Home Depot Santa Clarita en California durante el terremoto de Northridge en 1994^[5].

Como para cualquier otro tipo de sistema estructural, en la determinación de las fuerzas sísmicas de diseño de éstas estanterías, es necesario utilizar el coeficiente de disipación de energía R_p , pero las características especiales de las uniones de estas estructuras hacen difícil determinar el valor de R_p necesario para encontrar las fuerzas de diseño, lo cual ha llevado a que no exista unidad de criterios entre diferentes normas internacionales y mucho menos entre fabricantes. La incorrecta determinación del R_p , al igual que para todos los sistemas estructurales, pasa por alto las premisas que tuvieron los miembros del comité ATC-19 en su definición, los cuales, por su importancia, se resumen brevemente:

1. Se asume que la estructura está muy bien detallada de tal forma que pueda soportar grandes deformaciones sin colapsar e igualmente que puede desarrollar resistencias más allá de las de diseño.
2. Cuando R_p es mayor que 1, el diseñador asume que los análisis lineales permiten estimar el comportamiento no lineal.
3. Se acepta también que mientras mayores sean los valores de R_p , mayor es la respuesta no lineal y por lo tanto mayores son los daños que deben esperarse.

La NSR-10, en el capítulo A.9 “Elementos no estructurales”, tabla A.9-2 especifica, en forma muy general, el coeficiente de amplificación dinámica a_p y el tipo de anclaje según el grado de desempeño requerido, el cual permite determinar el R_p como se indica en el literal A.9.4.9 e indica además, la metodología para analizar elementos no estructurales, apoyados tanto en losa de contrapiso, como en losa de entrepiso.

2. ALCANCE

En este artículo se analizan las consideraciones sísmicas requeridas para el diseño de racks localizados en bodegas, centros de distribución y almacenes de grandes superficies, (Fig. 1). Excepto cuando se encuentran adyacentes a muros, las estanterías generalmente están configuradas en dos filas paralelas interconectadas. Las estibas tienen áreas típicas de 1.30 m^2 y pueden soportar una carga máxima de unos 1600 kgf. Las dimensiones típicas de un módulo son de 1.05 m de profundidad por 2.54 m de ancho y pueden acomodar dos estibas. La altura de las estanterías en bodegas y centros de distribución puede alcanzar 15.0 y más metros y generalmente está limitada por la altura de la cubierta. En almacenes se tienen alturas entre 4.0 m y 5.5 m.

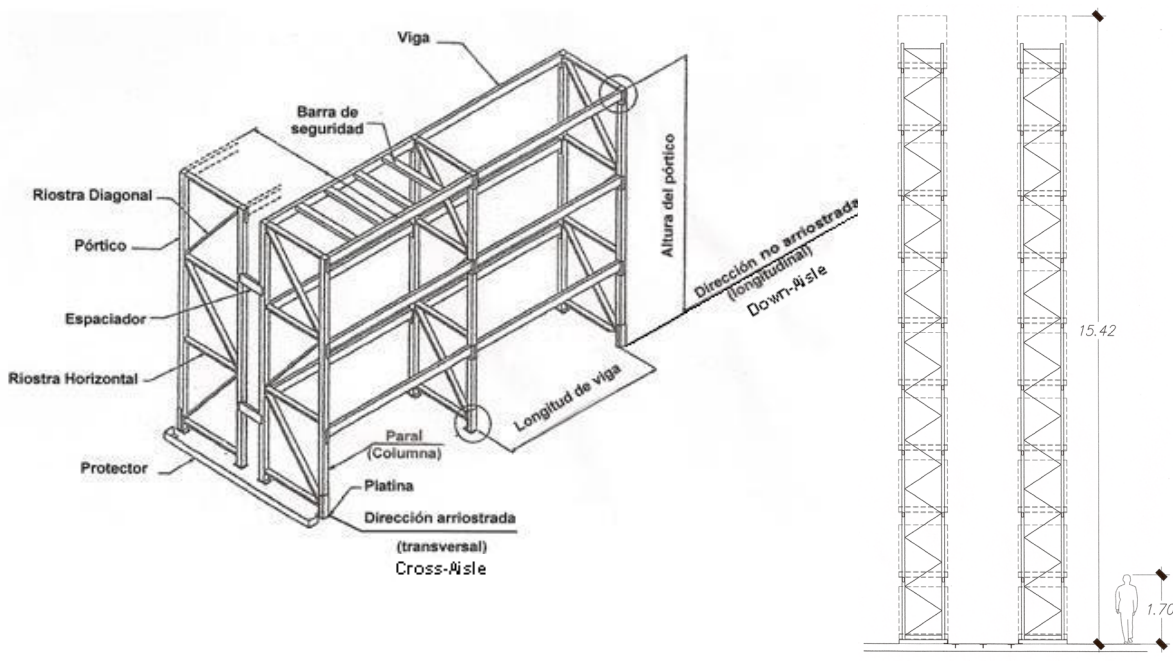
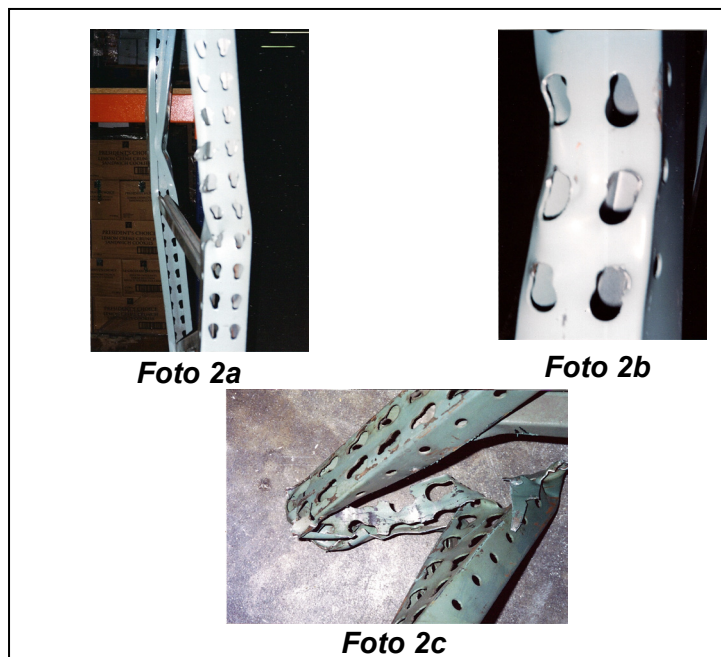


Figura 1. Configuración típica de estanterías para almacenamiento y ejemplo de una estantería esbelta (Proyecto Farmazona Panamá)

3. COMPORTAMIENTO DE LAS ESTANTERÍAS

Las estanterías con perfiles abiertos y uniones de botón y ojal (fotos 2), son las más ampliamente utilizadas en todo el mundo. Sin embargo este tipo de estantería presenta fallas súbitas, no solo durante eventos sísmicos, sino por sobrecargas y especialmente por almacenamiento asimétrico (foto 3), fallas que son facilitadas por el deficiente anclaje al piso (fotos 4) y la flexibilidad de las uniones. Al analizar fallas de estanterías, es notoria también la ineficiencia del uso de un solo perno de anclaje (fotos 5). Finalmente, por ser los perfiles abiertos, la unión de las riostras horizontales y diagonales, en dirección transversal, normalmente es difícil de ejecutar correctamente y por esto, esta unión falla a bajos niveles de carga (foto 6). Este hecho tiene implicaciones importantes, pues normalmente en el diseño en esta dirección transversal se supone un pórtico arriostrado y se usa un $R_p=4$, de acuerdo con lo recomendado por el RMI^[2]. Es claro que al fallar la unión de los arriostramientos, la estructura en esa dirección pierde capacidad de disipación de energía y por lo tanto, en estas condiciones, debería ser diseñada para un R_p menor.



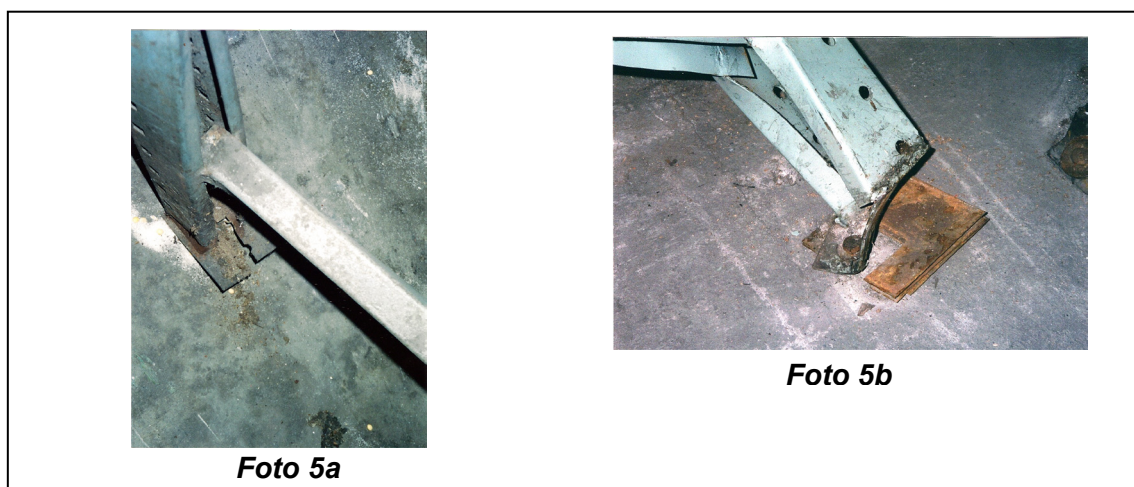
Fotos 2. Unión tipo botón y ojal. Nótese como se rasga el ojal y la excesiva flexibilidad de este tipo de unión.



Foto 3. Falla súbita de una estantería por almacenamiento asimétrico.



Fotos 4. Falla del anclaje al piso. Nótese que las platinas de ajuste (calzas de nivelación) reducen la eficiencia a los pernos de anclaje al disminuir su longitud de anclaje.



Fotos 5. Giro en estanterías con un solo perno. Nótese las calzas de nivelación que indican que la losa no tenía la planitud requerida.



Foto 6
Foto 6. Falla de la unión en la dirección arriostrada

4. NORMATIVIDAD

Antes de hacer referencia al tratamiento que la NSR-10 da a las estanterías, es conveniente mencionar brevemente el informe del ASCE/SEI 7-05^[3] para estas estructuras. Como es bien conocido, este standard ha sido adoptado en los Estados Unidos para la determinación unificada, es decir en todos los estados,

de las cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras. La ASCE 7-05 dedica su capítulo 13 a definir los “requerimientos para diseño sísmico de elementos no estructurales” y el capítulo 15 a definir los “requerimientos para el diseño sísmico de estructuras diferentes a edificios (nonbuilding structures) pero similares a ellos”. En su numeral 13.1.5 especifica que las estanterías para almacenamiento (storage racks), deben ser diseñadas de acuerdo con los requerimientos del capítulo 15, de lo cual se desprende que las estanterías no son consideradas como elementos no estructurales. Por su parte, las especificaciones preparadas por el instituto de fabricantes de estanterías de los Estados Unidos RMI^[2] trata las estanterías como estructuras diferentes a edificios, pero similares a ellos y coincide, por lo tanto, en este aspecto, con el ASCE 7-05^[3]. Por su parte la NSR-10, no hace ninguna distinción, entre elementos no estructurales y estructurales similares a edificios e incluye las estanterías en el título A.9 “Elementos no estructurales”

5. CLASIFICACIÓN DE ESTANTERÍAS SEGÚN SU PERIODO Y LOCALIZACIÓN

Según las referencias [1], [4] y [5], las estanterías pueden clasificarse en rígidas si su periodo es menor de 0.06 segundos y flexibles si su periodo de vibración es mayor de 0.06 segundos, siendo este último caso el que corresponde a la generalidad de los casos. Mientras más flexible sea la estructura de la estantería y mientras más débiles sean sus apoyos, mayores serán las aceleraciones que actúan sobre ellas al verse amplificadas apreciablemente con relación a las aceleraciones en el punto de soporte. Este aspecto se describe en el literal A.9.4.2.2 de la NSR-10 y se ampliará mas adelante. Las estanterías pueden clasificarse también según estén localizadas en una losa de contrapiso o en losa de entrepiso^{[2], [3], [4]}, lo cual representa una diferencia fundamental, pues las fuerzas para cada caso, son sensiblemente diferentes como se verá más adelante.

6. ANÁLISIS DE RACKS

De acuerdo con el literal A.9.4.2 de la NSR-10, las fuerzas para el diseño de las estanterías serían las indicadas en la figura 2 y están definidas por la siguiente expresión:

$$F_p = a_i \frac{a_p}{R_p} g M_p \quad (1)$$

Debe notarse que por tratarse de un elemento en voladizo (apoyado solo en su base), la norma introduce, para ambos casos, es decir, independientemente de su localización, un factor de amplificación dinámica a_p de 2.5 (ver tabla 1), que tiene en cuenta la amplificación producida en las estanterías al éstas “cabalgar” sobre la estructura e igualmente, que la aceleración para una estantería en un entrepiso es sensiblemente superior a otra colocada a nivel de fundación, es decir en la losa de contrapiso.

TABLA A.9-2				
Coeficiente de amplificación dinámica, a_p , y tipo de anclajes o amarres requeridos, usado para determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R_p , para elementos arquitectónicos y acabados				
Elemento	a_p	Tipo de anclajes o amarres para determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R_p , mínimo requerido en A.9.4.9		
		Grado de desempeño		
		Superior	Bueno	Bajo
no estructural Anaqueles, estanterías y bibliotecas de más de 2.50 m de altura, incluyendo el contenido • Diseñadas de acuerdo al Título F • Otras				
	2.5	Especiales	Dúctiles	No requerido ⁽³⁾
	2.5	Dúctiles	No dúctiles	No requerido ⁽³⁾

Tabla 1. Tabla de coeficiente de amplificación dinámica a_p según la NSR-10
(Extracto Tabla A.9 - 2)

En la aplicación de estas expresiones es importante mencionar que en la NSR-10, la masa de diseño M_p , se define como la “masa del elemento no estructural”, mientras el RMI^[2] define $W_S = (0.67 \times PL_{RF} \times PL) + DL + 0.25 \times LL$. Según el ASCE/SEI 7-05^[3] las estanterías deben ser diseñadas para cada una de las siguientes condiciones: a) El peso de la estantería más la estantería cargada en todos sus niveles con el 67% de la capacidad de carga de cada nivel y b) El peso de la estantería más la estantería cargada en su nivel superior con el 100% de su capacidad de carga.

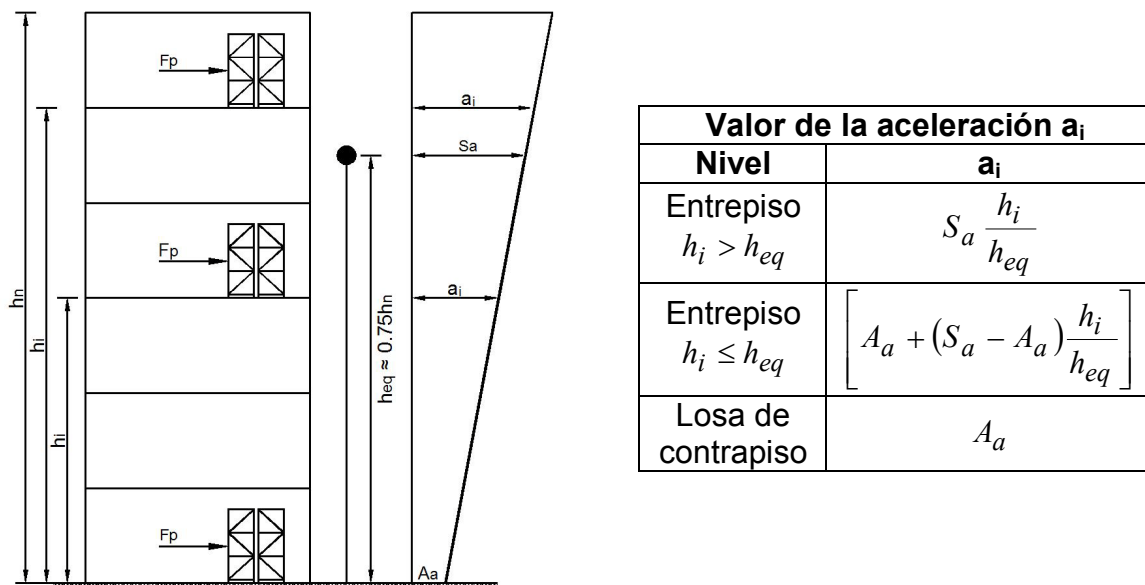


Figura 2. Fuerzas de diseño para estanterías apoyadas en losa de contrapiso y losa de entrepiso según la NSR-10

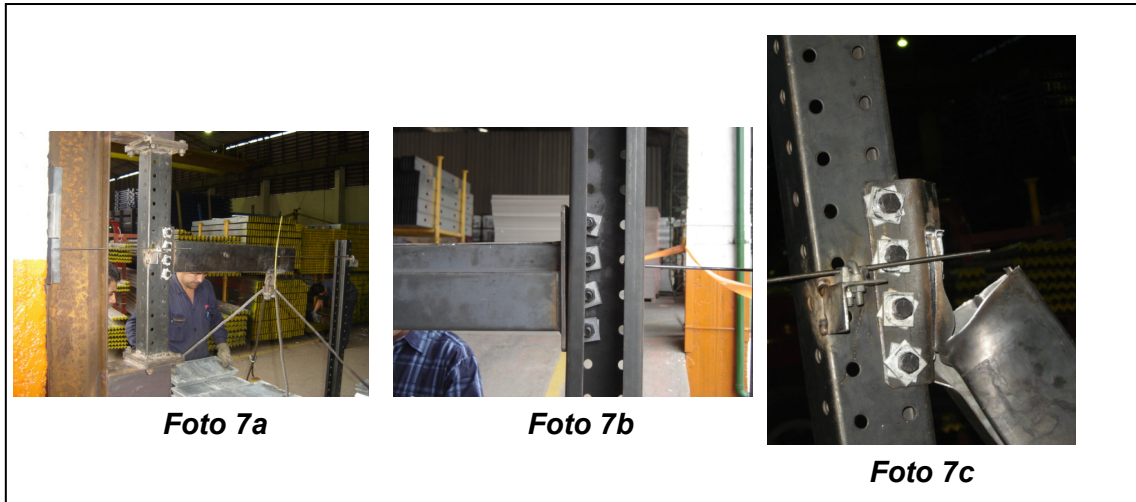
7. DISEÑO DE RACKS

Como cualquier otra estructura, las estanterías se diseñan para unas fuerzas inelásticas que resultan de dividir las fuerzas reales (elásticas) ocasionadas por el sismo, por el coeficiente de disipación de energía R_p .

Puesto que la función de una estructura es transmitir cargas, es apenas obvio que mientras mayor sea el valor adoptado para el R_p menores serán las fuerzas de diseño, y por lo tanto, más liviana y económica resulta la estantería, asumiendo que se cumplen los requerimientos de desplazamientos. Desafortunadamente no existe unidad en las diferentes normas, lo cual ha llevado a los diseñadores y fabricantes a usar casi exclusivamente las recomendaciones del RMI^[2], el cual en su numeral 2.7.3 especifica para racks un R_p de 4.0 en la dirección arriostrada y un R_p de 6.0 en la dirección no arriostrada (Fig. 1). Lo que no es claro para muchos diseñadores es que éste alto valor de $R_p=6.0$ es aplicable sólo si se demuestra experimentalmente, que la unión viga-columna es rígida, lo cual fue corroborado por el Sr. John Nofsinger, director del RMI, en correspondencia personal del 25 de junio del año 2002 (traducido al español): “Los valores de R_p mencionados en las especificaciones de la RMI corresponden a un diseño y detallamiento apropiado de las conexiones y arriostramientos”. La NSR-10 permite la utilización de un $R_p=6.0$ sólo si se utilizan anclajes dúctiles y el diseño de la estantería se efectúa de acuerdo con el título F (Estructuras metálicas), para garantizar que los nudos sean rígidos.

Es usual que los diseñadores de estanterías, sin disponer de ningún dato experimental suministrado por los fabricantes y sin efectuar los diseños de la unión viga-columna según el Título F, asuman en sus análisis, que en dirección longitudinal, los nudos se van a comportar como rígidos, lo cual puede ser completamente erróneo. Ya el RMI^[2] en el numeral 9.4 llama la atención al respecto: “Los nudos entre el paral y las vigas, en general no se comportan como rígidos. Esto se debe principalmente a la distorsión de las paredes de los paraleles en el nudo y en menor cuantía a la distorsión que ocurre en la misma conexión. Esta peculiaridad, influencia muy significativamente el comportamiento total”. La suposición injustificada de la rigidez de los nudos, aunada a la utilización de coeficientes de disipación de energía R_p sumamente altos, 6 usualmente, conducen, en nuestra opinión, al diseño de racks inseguros, que pueden fallar en eventos sísmicos menores que los de diseño.

Las uniones viga-columna que se efectúan con pernos y platinas (fotos 7) pueden considerarse como semirígidas y un valor de $R_p=3.0$ sería apropiado de acuerdo con las normas NEHRP^[4] en su numeral 14.4, mientras que la unión con botón y ojal (Foto 2) se aproxima más a una unión articulada y no debería utilizarse en zonas sísmicas a no ser que se utilicen diagonales de arriostramiento en la dirección longitudinal. La utilización de valores de R_p de 4.0 ó superiores con nudos articulados o semirígidos es riesgosa y estos valores solo deberían utilizarse si se han efectuado pruebas de laboratorio que los justifiquen, como mínimo, las descritas en el numeral 9.4 de las especificaciones del RMI^[2].



Fotos 7. Ensayo en voladizo según el RMI^[2] para determinar la capacidad de momento de una unión con pernos, efectuado por Industrias CENO de Medellín.

En el estándar más reciente de la FEMA 460^[6], se dan las consideraciones mínimas para racks de almacenamiento localizados en zonas de acceso al público y éstas son consideradas como el punto de partida para la próxima actualización de normas como la RMI y los estándares NERPH y ASCE-7, pues propone procedimientos alternativos basados en desplazamientos y estimula la investigación en ensayos de uniones viga-columna para conocer sus diagramas de momento-rotación, para, a partir de ellos, tener un modelo más representativo, económico y seguro del rack. Por este motivo recomienda los ensayos de uniones viga-columna siguiendo protocolos de carga como el indicado en la figura 3^[7], los cuales ya se efectúan en Norteamérica y Europa. A su vez recomienda que cada fabricante suministre al diseñador las características de su unión viga-columna de tal manera que se tenga un modelo más aproximado de la estructura y que le permita usar un valor de R_p que conduzca a unos racks seguros y económicos.

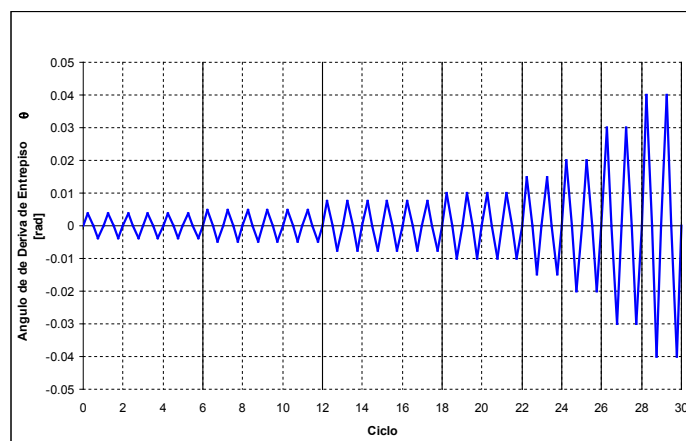


Figura 3. Protocolo típico de carga para calificación de conexiones viga-columna resistentes a momento^[7]

Vale la pena finalmente mencionar que los criterios actuales de diseño por desempeño^[6] indican que el comportamiento de un rack ante el sismo de diseño debe evitar la falla de los componentes que puedan conducir a su colapso o volcamiento y garantizar que no haya pérdidas de mercancía almacenada. Para un sismo aun de mayor intensidad, la recomendación es que como mínimo se prevenga el colapso o el volcamiento.

8. ANCLAJES

El anclaje de las estanterías en la losa, como ya se mencionó, juega un papel fundamental en su comportamiento, pues debido a su esbeltez, se presentan grandes tracciones en los apoyos de la estantería. Por este motivo, el uso de anclajes no dúctiles (NSR-10 literal A.9.4.9.3), por ejemplo como los pernos de expansión o anclajes epóxicos superficiales, es decir, aquellos cuya porción embebida es menor de 8 veces el diámetro del perno, pueden volver la estantería inestable especialmente cuando los nudos son articulados o semirígidos, pues las estructuras se van a comportar como articuladas en su base, convirtiéndose la estantería en un mecanismo inestable, y en este caso, el valor máximo del R_p no debería ser mayor de 1.5. Si no se puede garantizar que las uniones de la estructura sean rígidas ó los pórticos estén arriostrados, debe diseñarse la base empotrada y se deben proveer anclajes dúctiles como mínimo, cuya profundidad asegure un buen desempeño consecuente con el análisis. Especial atención debe prestarse al uso de calzas de nivelación que disminuyen la longitud de anclaje del perno, y con esto, invalidan las suposiciones de una base empotrada.

Conclusiones

Para lograr un diseño sismoresistente de estanterías (Racks), debe prestarse especial cuidado al diseño y detallado de las uniones y de los anclajes en el piso. Sólo de esta forma pueden obtenerse valores altos de R_p y así lograr un diseño económico y seguro. Valores de R_p compatibles con la rigidez del nudo y el tipo de anclaje y fuerzas determinadas considerando si la estantería está a nivel de la base (losa de contrapiso) ó a nivel de una losa de entrepiso, constituyen las bases para un diseño sismoresistente exitoso de las estanterías.

Se deben garantizar anclajes dúctiles y que la unión viga-columna en la dirección no arriostrada de los racks sea rígida, tal como se requiere para una estructura del tipo DMO, según la NSR-10, para poder usar coeficientes de capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, R_p superiores a 4.0. Si no se puede garantizar ésta rigidez de las uniones viga-columna, R_p debe tomarse como máximo igual 3.0^[4] o a 1.5 si además, el anclaje es no dúctil.

Garantizar un adecuado anclaje es fundamental para la estabilidad de los racks ante sismos. Se debe prestar especial atención cuando las losas de contrapiso son de poco espesor ($\leq 10,0$ cm) y/o cuando las losas de entrepiso son aligeradas, ya que la longitud de anclaje de los pernos puede ser insuficiente al

igual que cuando se utilizan calzas de nivelación (ver foto 4). En estos casos, los anclajes funcionarán deficientemente y la falla de los racks será inevitable.

Para el caso de losas aligeradas, la figura 4 indica una posible solución, cuando las patas coinciden con la zona de los casetones.

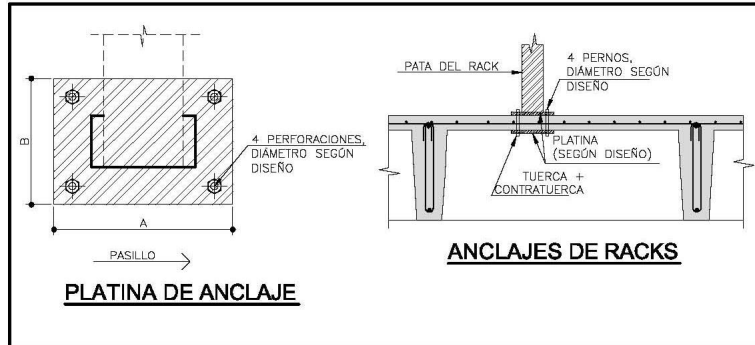


Figura 4. Detalle sugerido para el apoyo de los racks en losas aligeradas

Se debe limitar además, la posible caída de mercancía durante eventos sísmicos por medio de amarres adecuados o cadenas. Estas medidas, adicionalmente ayudan a mejorar la protección de las personas en lugares con acceso de público.

Finalmente es importante mencionar, que los procedimientos de análisis y recomendaciones presentados en este artículo, son igualmente válidos para las góndolas de exhibición en los almacenes, las cuales son críticas para volcamiento, por lo cual deben anclarse a las losas.

Nomenclatura

- A_a = Aceleración pico efectiva, según A.2.2 de la NSR-10.
 a_i = Aceleración en el punto de apoyo de la estantería.
 a_p = Coeficiente de amplificación dinámica (Tabla A.9-2, NSR-10).
DL = Carga muerta debido a la estantería
 F_p = Fuerza inelástica de diseño del elemento no estructural [N].
 g = Aceleración debida a la gravedad [$g = 9.8 \text{ m/s}^2$].
 h_n = Altura total del edificio
 h_{eq} = Altura equivalente del sistema de un grado de libertad que simula la edificación. En forma simplificada puede tomarse: $h_{eq} = 0.75h_n$
 h_i = Altura del nivel en el cual se encuentra la estantería.
LL = Carga viva diferente a PL
 M_p = Masa del elemento no estructural
PL = Carga máxima de los productos almacenados en los racks.
 PL_{RF} = Factor de reducción de carga en dirección transversal = $PL_{\text{promedio}}/PL_{\text{máximo}}$
 R_p = Coeficiente de disipación de energía en el rango inelástico.
 S_a = Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado. Está definido en el literal A.2.6, de la NSR-10.

Referencias

- [1] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, NSR-10, “Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente”.
- [2] RMI (Racks Manufacturers Institute), MH 16.1 – 2004 “Specification for the design, testing, and utilization of industrial steel storage racks”.
- [3] ASCE/SEI 7-05, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, Published by the American Society of Civil Engineers, United States, 2005.
- [4] FEMA 368, “NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures”, Part 1 - Provisions, 2000 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 2001.
FEMA 369, “NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures”, Part 2 - Commentary, 2000 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 2001.
- [5] FEMA 350, “Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings”, Julio 2000.
- [6] FEMA 460, “Seismic considerations for steel storage racks located in areas accessible to the public”, 2005 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 2005.
- [7] AISC, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, 2005.