



Bases técnicas para el diseño estructural de estantería metálica en Chile



Mindugar tiene el agrado de compartir con usted, este valioso trabajo que se extendió por más de 5 años junto a ICHA y que de seguro será un aporte al trabajo de todos los que participan en la industria de la logística en Chile.



Bases técnicas para el diseño estructural de estantería metálica en Chile

Derechos reservados 2017
Insc. Reg. Prop. Intelectual N° 286203
I.S.B.N. N° 978-956-8149-10-9

Proyecto Editorial
Instituto Chileno del Acero

Adaptación y Desarrollo
Luis Leiva Aravena, Ingeniero Civil, MSc.

Revisor
IDIEM

Diseño y diagramación
Tandem Estrategia

Nueva Tajamar 481, Torre Norte, oficina 803, Las Condes. Santiago
Teléfono +56232626803
www.icha.cl

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de la Corporación Instituto Chileno del Acero –ICHA-, bajo las sanciones establecidas por las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento incluidos la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución de ejemplares de la misma mediante alquiler o préstamos públicos.

Derechos reservados
©Copyright 2017

Índice

1 Introducción	9
2 Tipología de los racks de almacenaje	11
2.1 Estantería Selectiva	11
2.1.1 Estantería Selectiva de Profundidad Simple	12
2.1.2 Estantería Selectiva de Doble Profundidad	13
2.2 Estantería Compacta	13
2.2.1 Drive In	13
2.3 Estantería Dinámica	14
2.3.1 Push Back	14
2.3.2 Flow Rack	15
2.3.3 Case Flow	16
2.4 Estantería Selectiva Manual	16
2.4.1 ANRA (Ángulo ranurado)	16
2.4.2 Altillo Estructural	17
2.4.3 Mini Rack	18
2.5 Estantería Autoportante	19
2.6 Cantilever	19
3 Experiencias de comportamiento de racks en sismos	21
3.1 Introducción	22
3.2 Daños observados en racks bajo carga sísmica	23
3.2.1 Fallas de elementos sometidos a compresión	23
3.2.2 Fallas de elementos sometidos a tracción	25
3.2.2.1 Unión viga-pilar	25
3.2.2.2 Unión riostra-pilar	26
3.2.2.3 Unión pilar-fundación	26
3.3 Fallas generales de los racks	27
3.3.1 Causas de las fallas en racks bajo carga sísmica	28
4 Diseño estructural de estantería metálica	31
4.1 Bases de cálculo y planimetría de proyecto	32
4.1.1 Ensayo de elementos estructurales	34
4.2 Descripción del modelo de análisis	34

4.3 Descripción de las solicitaciones consideradas en el proyecto	34
4.3.1 Cargas gravitacionales	34
4.4.2 Cargas horizontales	37
4.4.3 Combinaciones de cargas	40
4.3.4 Verificación del diseño de elementos críticos	42
4.3.5 Verificación de deformaciones	46
4.3.6 Separaciones entre racks	47
5 Recomendaciones de uso y mantenimiento de la estantería metálica	49
5.1 Respetar las cargas máximas especificadas para el rack	50
5.2 Proteger los racks	51
5.3 Inspección continua del estado de los racks	52
5.3.1 Inspección permanente (diaria) del estado de los racks	52
5.3.2 Inspección semanal-mensual	52
5.3.3 Inspección semestral	52
6 Conclusiones	53
Anexos	55
Anexo 1 Tipología de Pallets	56
A.1. 1 Materiales utilizados en la fabricación de pallets	56
A.1.1.1 Pallets de madera	56
A.1.1.2 Pallets de cartón	56
A.1.1.3 Pallets de plástico	56
A.1.1.4 Pallets de fibra de madera	57
A.1.1.5 Pallets metálicos	57
Anexo 2 Elementos componentes de la estructura de un rack	58
Anexo 3 Criterios de diseño sísmico de racks considerados en normas extranjeras	59

Prólogo

El Instituto Chileno del Acero (ICHA), como entidad promotora del correcto uso del acero en nuestro país, ha desarrollado el presente documento con la finalidad de orientar a compradores y proveedores de racks, entregándoles una base para el diseño estructural donde se implementarán estanterías metálicas para almacenaje.

Por otra parte, frente a la ausencia de organismos reguladores en el ingreso de estructuras metálicas al país, que no cumplían con la normativa vigente, así como también frente al poco conocimiento de la normativa vigente, nos sentimos motivados en desarrollar los requisitos mínimos en la preparación de bases de diseño para este tipo de estructuras, considerando el notable desarrollo en el último tiempo y la exposición de personas en torno a éstas.

Estas bases son de vital importancia tanto para ingenieros estructurales como para los profesionales encargados de las adquisiciones, ya que permite generar un estándar de decisión que contempla elementos de juicio técnico necesarios para el correcto desempeño de la estructura.

Dado lo anterior, este documento aborda temas como:

- Sistemas de almacenaje existentes, diferenciando FIFO y LIFO.
- Experiencia sísmica.
- Componentes de las estanterías metálicas.
- Normativa vigente y consideraciones de diseño.

Finalmente, queremos agradecer a los profesionales que participaron en la elaboración de este documento que constituye un aporte para todos quienes están relacionados con el diseño, licitación, adjudicación, montaje, uso y mantención de proyectos de esta naturaleza.

Nuestro especial reconocimiento a las empresas Mecalux, Mindugar y Tamegal, quienes generosamente compartieron sus conocimientos y experiencia para que este documento fuese un éxito.



1. Introducción

Para un correcto desempeño estructural de las estanterías industriales o racks, en el contexto de un país sísmico como Chile, es fundamental que los elementos constitutivos de este tipo de estructuras se fabriquen con acero de calidad certificada y espesores de plancha garantizados, además de cumplir con los requerimientos que exige la normativa chilena actual.

Una vez que la estantería metálica está en funcionamiento, se deben considerar inspecciones que permitan detectar eventuales fallas que reduzcan la capacidad resistente de la estructura del rack.

Por ello, el objetivo de este documento es presentar los aspectos que deben ser tomados en cuenta por todos los participantes de la cadena de producción de las estanterías: desde el mandante y fabricante hasta el ingeniero calculista y el usuario final.

La correcta consideración de los distintos aspectos aquí presentados, contribuye a garantizar un buen comportamiento de las estanterías evitando o minimizando sus fallas ante un sismo.

Por ejemplo, en el capítulo 2 se describe la tipología de racks que se utiliza en el país; en el capítulo 3 se analizan las fallas que se pueden presentar en los racks luego de un sismo y se describen sus causas posibles; en el capítulo 4 se analiza el diseño de los racks donde se describen los aspectos que se deben considerar e incluir en la memoria de cálculo; y en el capítulo 5 se entregan recomendaciones de uso y mantenimiento de los racks, que pueden determinar el comportamiento estructural de las estanterías.

Adicionalmente se incluyen 3 anexos donde se describen las distintas tipologías de los pallets que se usan en conjunto con las estanterías metálicas; se muestran los distintos componentes de una estructura de rack; y finalmente se abordan algunos criterios de diseño en que se incluyen normas norteamericanas (RMI) y europeas (EN).

Tipología de los racks de almacenaje

2. Tipología de los racks de almacenaje

Las tipologías de racks comúnmente utilizadas en Chile son las siguientes:

2.1 Estantería Selectiva

2.1.1 Estantería Selectiva de Profundidad Simple

Sistema de almacenaje paletizado de acceso directo a cada posición almacenada que opera en la lógica FIFO (primero en entrar, primero en salir). Esto lo convierte en la más versátil de las opciones para el manejo de productos diferentes, además de poseer un excelente control de rotación e inventarios. Ver fig. 2.1

La distribución y altura de las estanterías se determinan en función de las características de las grúas elevadoras, de los elementos de almacenamiento y de las dimensiones del local. El ancho, fondo y alto definen el diseño geométrico, mientras que el peso define el diseño estructural.

La distribución de este sistema se realiza mediante estanterías murales de uno y centrales de doble acceso, con pasillos que permiten el correcto movimiento de las grúas. Permite además operación de picking en los niveles inferiores y alturas de carga de más de 12 metros.

Las principales características de este sistema son:

- Un pasillo por estante.
- Gran facilidad de control e inventarios.
- Acceso directo a todas las referencias.
- Facilidad de operación.
- Adaptable a cualquier espacio, peso o tamaño de la mercancía a almacenar.
- Combinable con estanterías para picking manual.
- No requiere personal capacitado.
- Para almacenar un mayor número de pallets se pueden instalar estanterías de doble fondo que permiten almacenar uno delante de otro, a cada lado del pasillo.



Figura 2.1 Rack selectivo de profundidad simple

* Los distintos elementos que componen la estructura de un rack se incluyen en el anexo 2 de este documento.

2.1.2 Estantería Selectiva de Doble Profundidad

Este sistema Rack Selectivo genera doble profundidad al almacenar dos pallet de fondo para cada frente de rack. Es utilizado para productos con baja rotación, que no necesitan altas velocidades de acceso. Son LIFO (último en entrar, primero en salir). Tiene acceso unidireccional, al igual que los racks convencionales.



Figura 2.2 Rack selectivo de doble profundidad

2.2 Estantería Compacta

2.2.1 Drive In

El sistema de paletización compacto Drive In se basa en la lógica LIFO (último en entrar, primero en salir) y almacena por acumulación en altura. Esto lo hace ideal para grandes cantidades de un mismo producto. Optimiza el espacio de almacenaje al requerir de una cantidad de pasillos mínima, convirtiendo anteriores vías de tránsito en zonas cargables. Ver fig. 2.3.

Las principales características de este sistema son:

- Baja superficie de pasillos.
- Alta rentabilidad del espacio.
- Requerimiento de grúas de pasillo angosto.
- Gran volumen de pocos ítems, obliga a uno por calle.

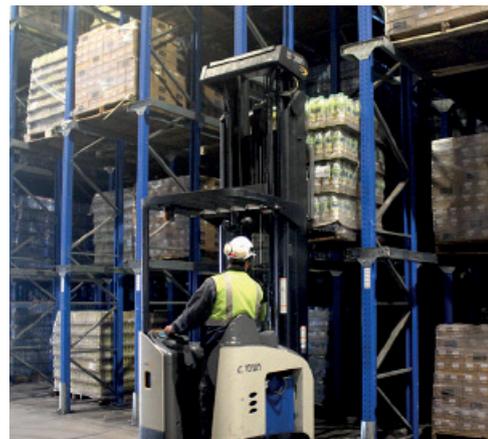


Figura 2.3 Drive In

2.3 Estantería Dinámica

2.3.1 Push Back

Sistema de almacenamiento por acumulación que en general permite almacenar sobre carros hasta cuatro pallets en fondo por cada nivel y se basa en la lógica LIFO (último en entrar, primero en salir). Todos los pallets de un mismo nivel, a excepción del último, se asientan sobre un conjunto de carros que se desplazan, por empuje, sobre los carriles de rodadura. Ver fig. 2.4.

Este sistema es apropiado para el almacenamiento de productos de media rotación, con dos o más pallets por referencia. Sus principales características son:

- Óptimo aprovechamiento del espacio.
- Mínima pérdida de espacio en altura.
- Cada nivel puede almacenar una referencia distinta.



Figura 2.4 Estantería Push Back

2.3.2 Flow Rack

Sistema de almacenaje dinámico que permite funcionar bajo la lógica FIFO o LIFO, que consiste en camas de polines ubicadas linealmente por donde se desplazan por gravedad las unidades de carga. Permite cargar y descargar por un mismo pasillo (LIFO) o por diferentes (FIFO). Ver fig. 2.5.

El sistema Flow Rack se asemeja estructuralmente al sistema Drive In, sólo que incorpora las camas de rodado por las cuales se desplazan los pallets.

El auto desplazamiento de la carga por gravedad, desde el punto de ingreso al de

salida, otorga un extraordinario efecto de racionalización y eficiencia en la operación.

Las principales características de este sistema son:

- Alta densidad.
- Requiere mantención esporádica.
- No exige equipos de manipulación especiales.
- Alta inversión inicial.
- Requiere pallets en formato único y excelente calidad.



Figura: 2.5 Flow Rack

2.3.3 Case Flow

Corresponde a un sistema de almacenaje dinámico diseñado para cajas o productos pequeños y que funciona por la lógica FIFO o LIFO. Diseñado para optimizar la operación logística de empresas con altos niveles de rotación de stock y preparación de pedidos pequeños. Ver fig. 2.6.



Figura 2.6 Case Flow

2.4 Estantería Selectiva Manual

2.4.1 ANRA (Ángulo ranurado)

Son estanterías totalmente desmontables que cubren todas las exigencias de almacenamiento por su adaptabilidad, pueden almacenar cargas ligeras e incluso relativamente pesadas. Admiten su modificación o ampliación tanto en altura como en longitud, llegando a alcanzar varios niveles. Estos factores las convierten en instalaciones importantes bajo el punto de vista estructural. Ver fig. 2.7 y 2.8.

Sus características principales son las siguientes:

- Sistema simple y económico para las más diversas aplicaciones.
- Mayor distribución del almacenaje.
- Desmontables.
- Ideales para el almacenaje manual.



Figura 2.7 ANRA 1 piso



Figura 2.8 ANRA 2 pisos multinivel

2.4.2 Altillo Estructural

La principal característica de los altillos es que la altura de un local se aprovecha al máximo, duplicando y hasta triplicando la superficie, adecuándola como área de almacenaje, oficinas, vestuario, talleres, bodegas, entre otros. Este sistema es útil para aprovechar al máximo el espacio, sin tener que efectuar modificaciones en la construcción. Ver fig. 2.9.

Con diseño autosoportante, no transmiten esfuerzos estructurales adicionales a las construcciones adyacentes, utilizando una mínima cantidad de pilares. Los distintos pisos (de metal, madera y otros) entregan una amplia gama de resistencias (de 250 a 800 kg/m²) para usos como oficinas, talleres, bodegas, etc.

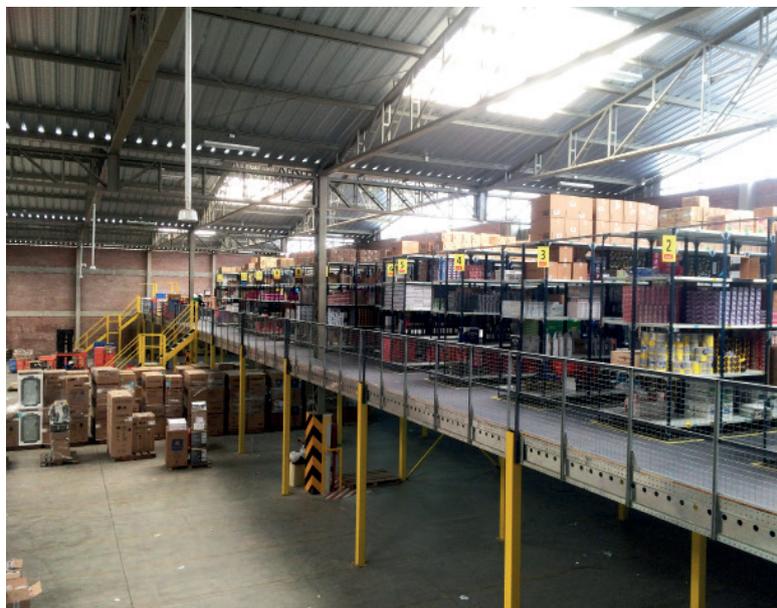


Figura 2.9 Altillo Estructural

2.4.3 Mini Rack

Corresponde a un sistema de almacenaje para cargas medianas tales como cajas o productos unitarios. Representa una excelente combinación de resistencia, economía y flexibilidad para el almacenaje de cargas en formatos no paletizados y, además, tiene una gran versatilidad al contar con una importante distancia entre pilares y la posibilidad de incorporar entrepisos. Esto hace que sea bastante recomendable como solución a múltiples problemas de almacenaje. Ver fig. 2.10.

Las principales características de este sistema son:

- Es capaz de almacenar múltiples productos.
- Constituye una eficiente solución para cargas intermedias.
- Proporciona resistencia, economía y flexibilidad.



Figura 2.10 Mini Rack

2.5 Estantería Autoportante

En este caso, las propias estanterías forman parte del sistema constructivo del edificio junto con los laterales y las cubiertas. Las estanterías soportan no sólo las cargas propias de las mercaderías y de los diversos elementos de la construcción sino también los empujes de los medios de manipulación y los agentes externos: fuerza del viento, sobrecarga de nieve, movimientos sísmicos, etc. Ver fig. 2.11.

Además, la altura de estas bodegas sólo está limitada por las normativas locales o por la altura de elevación de las grúas o transelevadores. Se pueden construir bodegas de más de 30 m de altura.

Este sistema posibilita:

- Almacenamiento a gran altura, máximo aprovechamiento de la superficie disponible.
- Almacenamiento de mercadería de diversa índole.
- Opción de utilizar sistemas convencionales o automáticos.



Figura 2.11 Rack Autoportante

2.6 Cantilever

Las estanterías Cantilever resuelven el almacenaje de productos largos, tamaños y formas heterogéneas o de características especiales (tubos, muebles, planchas, etc.) ya que permiten el acceso directo en forma horizontal.

Se caracterizan por una estructura muy simple compuesta por columnas y una serie de brazos en voladizo sobre los que se deposita la carga. En función de la altura y del peso de la mercadería, se puede elegir entre la estantería ligera o la pesada. Ambas ofrecen la posibilidad de situar los niveles a un solo o a ambos lados de la estructura. Ver fig. 2.12.

La manipulación de la carga puede realizarse manualmente, cuando es de poco peso, o mediante grúas y medios de elevación apropiados cuando es pesada.

Este sistema permite:

- Manejo de cargas largas.
- Manejo de cargas de formatos heterogéneos.
- Estructura de gran simplicidad y resistencia.
- No exige carga palletizada.
- Ninguna pérdida de espacio entre pilares.



Figura 2.12 Cantilever

Experiencias de comportamiento de racks en sismos

3. Experiencias de comportamiento de racks en sismos

3.1 Introducción

Chile es un país de alta sismicidad. Se ubica en la zona en que se enfrentan la placa de Nazca y la Sudamericana, produciéndose constantemente movimientos de distinta intensidad. Ver fig. 3.1.



Figura 3.1 Ubicación placa Sudamericana y de Nazca

En la figura 3.2 se muestra el ranking de los 12 mayores sismos registrados en el mundo., cuatro de ellos ocurridos en Chile, donde el de mayor magnitud corresponde al sismo de 1960 en Valdivia.

- 1960 05 22 - Chile - M 9.5
- 1964 03 28 - Prince William Sound, Alaska - M 9.2
- 2004 12 26 - Sumatra-Andaman Islands - M 9.1
- 2011 03 11 - Near the East Coast of Honshu, Japan - M 9.1
- 1952 11 04 - Kamchatka - M 9.0
- 1868 08 13 - Arica, Perú (now Chile) - M 9.0
- 1700 01 26 - Cascadia Subduction Zone - M 9.0

- 2010 02 27 - Offshore Bio - Bio, Chile - M 8.8
- 1906 01 31 - Off the Coast of Esmeraldas, Ecuador - M 8.8
- 1965 02 04 - Rat Islands, Alaska - M 8.7
- 1755 11 01 - Lisbon, Portugal - M 8.7
- 1730 07 08 - Valparaíso, Chile - M 8.7

Figura 3.2. Mayores sismos registrados en el mundo

El diseño estructural de las estanterías industriales o racks está determinado fuertemente por su diseño sísmico.

Las estructuras de racks han sido sometidas a sismos con intensidad mayor a 7 en escala Richter en los últimos 15 años, permitiendo verificar correctamente el diseño basado en la normativa nacional e internacional, pero en algunos casos se han producido fallas locales y, en situaciones puntuales, colapsos totales de las estructuras de rack.

Sin embargo, en algunos casos se han producido fallas locales y, en situaciones puntuales, colapsos totales de las estructuras del rack.

3.2 Daños observados en racks bajo carga sísmica

A continuación, se analizarán las fallas observadas en los elementos componentes de los racks, producto de los sismos, diferenciando las fallas en compresión y tracción.

3.2.1 Fallas de elementos sometidos a compresión

Los daños observados tras sismos de alta magnitud tienen relación principalmente con los elementos sometidos a compresión: pilares y riostras.

En un sismo, los pilares sufren cargas mayores que las gravitacionales presentes en condiciones estáticas.

En pilares y riostras se pueden presentar daños por:

a) Pandeo general del perfil (pilar o riostra)

El pandeo general se puede producir por:

- Pandeo por flexión.
- Pandeo por flexo-torsión.
- Pandeo distorsional.

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad en que el elemento comprimido pasa de forma repentina de un estado de compresión a uno de flexión.

Pandeo por flexión

El elemento comprimido se pandea deformándose en dirección de uno de los dos ejes principales de la sección. Ver fig. 3.3.



Figura 3.3 Pandeo por flexión en las riostras inferiores de un rack

Pandeo por flexo-torsión

El elemento comprimido se pandea deformándose en dirección diagonal en relación con los ejes principales de la sección. Esta gira en el tramo central, mientras que en los apoyos mantiene su orientación original. Los elementos de sección abierta con solo un eje de simetría (canal, omega) son especialmente propensos a sufrir pandeo flexo-torsional. Ver fig. 3.4.

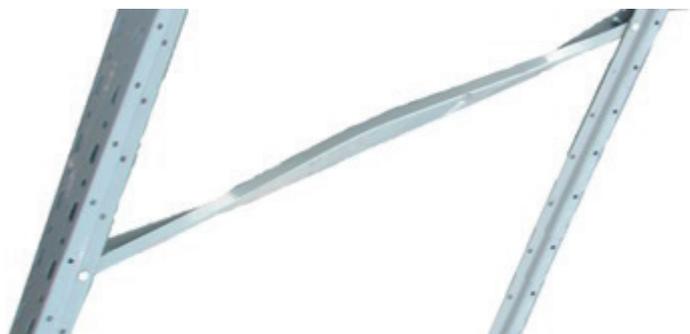


Figura 3.4 Pandeo por flexo-torsión en diagonal

Pandeo distorsional

El pandeo distorsional se caracteriza por un cambio en la geometría de la sección, que se abre. Los encuentros ala-alma dejan de ser de 90°. Ver fig. 3.5



Figura 3.5 Pandeo distorsional en una sección de pilar tipo omega

b) Pandeo local

Consiste en el pandeo de una parte componente de la sección del perfil. Puede producirse en el alma y/o en las alas del perfil. Esta falla puede originarse por el incremento de la compresión fruto de la componente vertical del sismo.

En la figura 3.6 se muestra el pandeo local en la base de un pilar de rack



Figura 3.6 Pandeo local en la base de un pilar

3.2.2 Fallas de elementos sometidos a tracción

Los elementos sometidos a tracción, en general, no sufren fallas. Sin embargo, pueden presentarlas tanto en las uniones entre elementos, como en la de los racks a la base.

3.2.2.1 Unión viga-pilar

Funciona como una unión cuya rigidez depende del tipo de conexión, que puede ser apernada o enganchada, dependiendo del fabricante. La carga sísmica en el sentido longitudinal produce esfuerzos en las uniones viga-pilar que pueden superar su capacidad. Un ejemplo de esto es la falla que se produce en la soldadura de unión viga-placa de fijación al pilar. Ver fig. 3.7.

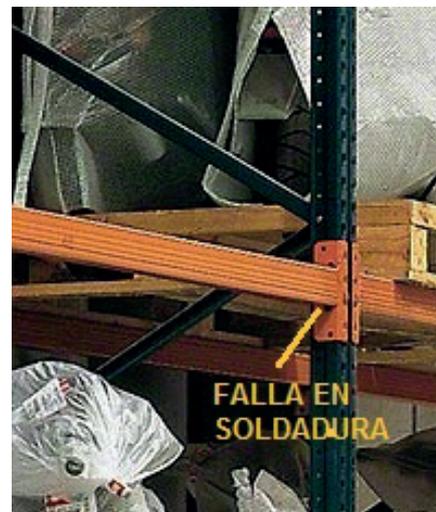
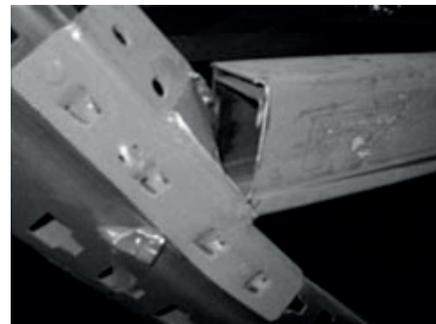


Figura 3.7 Unión viga-pilar

3.2.2.2 Unión riostra-pilar

La tracción en la riostra puede producir una falla por aplastamiento en la unión apernada riostra-pilar. Ver fig. 3.8.



Figura 3.8 Falla conexión riostra-pilar en marco

3.2.2.3 Unión pilar-fundación

Durante un sismo, los pernos de anclaje se ven sometidos a tracción. Superados ciertos límites, esta tracción puede provocar fallas en los pernos de anclaje y en el hormigón de la base de los pilares.

Los pernos de anclaje pueden fallar por:

- Extracción del perno

Esta falla se puede producir debido a un hormigón de menor calidad que la especificada en el proyecto, deficiencias de diseño y/o a una inadecuada colocación de los pernos de anclaje.

- Falla del hormigón de la base (falla tipo cono de arranque).

En esta situación, la tracción en los pernos de anclaje produce una falla por corte en el hormigón. La superficie comprometida corresponde a un cono invertido alrededor del perno de anclaje. Ver fig. 3.10.



Figura 3.9 Falla por extracción del perno



Figura 3.10 Falla del hormigón en la base

3.3 Fallas generales de los racks

Se pueden producir fallas que afectan a la estructura global del rack. Entre este tipo de fallas, se pueden mencionar:

El choque del rack con estructuras vecinas

Se produce por no contar con separaciones (dilataciones) adecuadas entre el rack y estructuras vecinas. Ver fig. 3.11.

Desplome del rack

La estructura se deforma durante un sismo y debido al trabajo mecánico en las uniones, el rack no recupera su geometría original. Ver fig. 3.12



Figura 3.12 Desplome de rack luego de un sismo

Colapso de la estructura

Se puede producir una falla generalizada gatillada por la falla de las riostras de los marcos transversales o la falla de las uniones rígidas en los marcos longitudinales. Ver fig. 3.13. Las causas posibles de estas fallas son diversas y se detallan a continuación.



Figura 3.11 Choque de rack con pilar estructural del edificio



Figura 3.13 Colapso de rack

3.3.1 Causas de las fallas en racks bajo carga sísmica

Como en toda estructura las fallas de los racks pueden producirse por:

- Diseño insuficiente.
- Errores de fabricación.
- Errores de montaje.
- Errores de manejo y mantenimiento.

Diseño insuficiente

Los errores de diseño pueden producirse si eventualmente no hay un cálculo y diseño estructural conforme a las normas vigentes. Esto puede presentarse si los racks son fabricados por empresas que no cuentan con un respaldo técnico y de ingeniería suficiente.

Cada proyecto de rack debe contar con una memoria de cálculo completa que pueda ser analizada por otro ingeniero revisor.

En el proyecto de los racks deben considerarse todas las variables y parámetros que se incluyen en el diseño sísmico de estructuras.

Entre otros aspectos, deben tenerse en cuenta las condiciones locales del suelo en que se emplazarán los racks. Estas pueden eventualmente amplificar el efecto de un sismo.

Si los racks deben soportar recipientes con contenido líquido, es necesario considerar los empujes dinámicos adicionales que se presentan por el movimiento del mismo.

Todos los aspectos relacionados con el diseño sísmico de racks se desarrollan en el capítulo 5 de este documento.

Errores de fabricación

Pueden estar relacionados con:

- a) Utilización de acero sin una calidad certificada y fallas en los procedimientos de control de calidad de la fabricación.
- b) Deficiencias en la fabricación de las distintas uniones: viga-pilar, pilar-riostra y placa de anclaje-pilar.

Por ejemplo, la ejecución de soldaduras de mala calidad debida a la utilización de menor amperaje del necesario (evidenciada por la aparición de “perlitas” en el cordón de soldadura) o un espesor menor de los perfiles fabricados en relación con los perfiles de diseño, apelando a una cierta tolerancia que puede existir en esta dimensión al

fabricarlos. Lo anterior implica, que el rack va a tener una resistencia menor a la de diseño, ya que sus perfiles son más delgados. Por ello, resulta de suma importancia conocer de antemano cual será el espesor real del perfil de acero que se utilizará, para que el diseño se realice acorde con la realidad.

Errores de montaje

Es posible que se produzcan deficiencias en terreno, como por ejemplo:

- a) Colocación de una menor cantidad de pernos de anclaje que los indicados en la especificación técnica del proyecto.
- b) Pernos de anclaje sin el torque suficiente para producir un anclaje adecuado en la base de hormigón.
- c) Pernos sin la profundidad de anclaje necesaria.
- d) Que el instalador no revise bien el rotulado de cada elemento y se instalen elementos que no corresponden.
- e) Que exista una falta de coordinación entre el montaje y el diseño general de la bodega. Esto puede producir que, por ejemplo, los pernos de anclaje no alcancen la profundidad necesaria debido a que topan con la armadura de losa o que una junta de dilatación quede justo en medio de un rack.
- f) La incorrecta colocación de la placa base sobre la superficie de hormigón

Errores de manejo y mantenimiento

Entre este tipo de errores se puede mencionar:

- a) Colisiones de grúas horquillas

Estos choques producen abolladuras que debilitan la estructura. La resistencia de una columna de acero a la compresión se reduce en forma importante si presenta imperfecciones geométricas. En un sismo, los pilares sufren cargas mayores que las cargas gravitacionales presentes en condiciones estáticas (ver fig. 3.14).



Figura 3.14 Pilar con abolladura por colisión con grúa

Las deformaciones en los elementos que trabajan a compresión (pilares, riostras) producen una fuerte reducción de la resistencia del elemento, según se aprecia en la fig. 3.15.

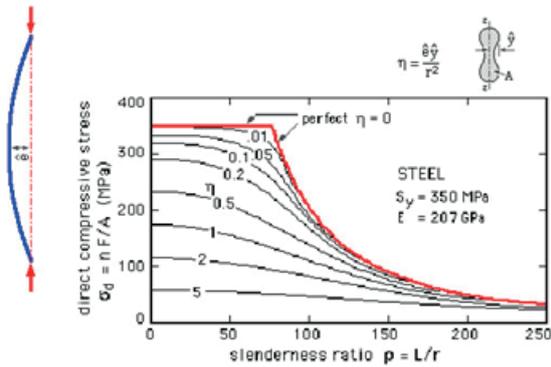


Figura 3.15 Efecto de las deformaciones en la capacidad de carga de una columna

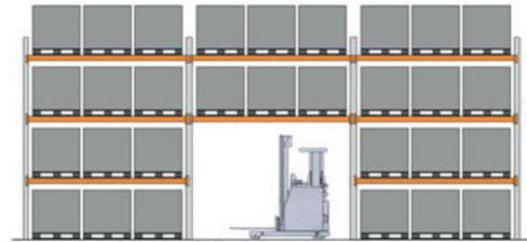


Figura 3.16 Rack modificado

La resistencia de una columna recta está representada por la línea en rojo. Dependiendo del tamaño de la deformación del elemento, ésta disminuye fuertemente (curvas en negro). En suma, el elemento deformado es susceptible de pandearse más fácilmente, reduciendo así su capacidad de carga.

b) Sobrecarga de los racks

En ocasiones, los usuarios cargan los racks con pesos mayores que para los que fueron diseñados. También puede suceder que se utilice un factor de ocupación mayor que el considerado en el diseño de los racks.

Para evitar este tipo de sobreutilización de la estructura, deben estar provistos de placas visibles que especifiquen las cargas admisibles máximas para los cuales fueron diseñados.

c) Modificaciones y/o traslados del rack por parte del cliente

Muchas veces los racks sufren daños debido a que los operarios hacen un mal uso de ellos, por ejemplo, se remueven niveles inferiores de vigas para ser usados como pasillos o como paso de vehículos, todo lo cual disminuye considerablemente la resistencia del rack. Ver fig. 3.16. Es muy importante que se haga un buen uso de éstos y se respete tanto su configuración inicial como la posición original para la cual fueron diseñados.

Diseño estructural de estantería metálica

4. Diseño estructural de estantería metálica

Es responsabilidad del cliente exigir que el fabricante realice el diseño del rack conforme con la normativa vigente, teniendo en cuenta que una memoria de cálculo debe contar al menos con los siguientes puntos:

4.1 Bases de cálculo y planimetría de proyecto

En las bases de cálculo se deben incluir las normas que se han considerado en el diseño de la estructura de racks.

Las normas a considerar son de tres tipos:

Normas relacionadas con las cargas y combinaciones de carga a utilizar en el diseño

- NCh 1537.Of2009 - Diseño Estructural - Cargas Permanentes y Cargas de Uso.
- NCh 2369.Of2003 - Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales.
- NCh 3171.Of2010 - Diseño Estructural - Disposiciones Generales y Combinaciones de Carga.
- NCh 431. Of2010 - Diseño Estructural –Sobrecargas de nieve.
- NCh 432. Of2010 - Diseño Estructural –Cargas de Viento.
- Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

Normas relacionadas con el diseño de la estructura de los racks

- NCh428:2017 Estructuras de acero - Ejecución de construcciones de acero - Perfiles laminados, soldados y tubos.
- Specification for Structural Steel Buildings – ANSI/AISC 360-10.
- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 1992, AISC.
- AISI S100-07 -North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007. (Publicación ICHA "Especificaciones Norteamericanas para el Diseño de Miembros Estructurales Conformados en Frío", 2009).
- Structural Welding Code-Sheet Steel, AWS D1.3-98.
- FEMA 460 - Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public - September 2005.
- ANSI MH16.1:2012 Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks - 2012 Edition (documento publicado por el Rack Manufacturers Institute" Estados Unidos.
- EN 15512 Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design (March 2009).
- EN 16681 Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design (March 2016).

- EN 15620 Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Tolerances, deformations and clearances (October 2008).

Normas relacionadas con aspectos constructivos de los racks

- NCh428:2017 Estructuras de acero - Ejecución de construcciones de acero - Perfiles laminados, soldados y tubos.
- NCh697.Of1974 - Acero - Barras y Perfiles Livianos - Clasificación y Tolerancias.
- NCh730.Of1971 - Acero - Perfiles Estructurales Soldados al Arco Sumergido.
- NCh203.Of2006 - Acero para Uso Estructural - Requisitos.
- NCh 1186.Of1977 ISO225 - Elementos de fijación.
- NCh 301.Of1963 - Pernos de Acero con Cabeza y Tuerca Hexagonal.
- NCh1420.Of1997 ISO 888 - Elementos de fijación - Pernos - Longitud Nominal, Longitud Roscada de Pernos para Usos Generales.
- NCh 701.Of1971 - Acero - Planchas Delgadas de Acero al Carbono Laminadas en Caliente - Tolerancias.
- NCh 702.Of1971 - Acero - Planchas Delgadas de Acero al Carbono Laminadas en Frío-Tolerancias.
- NCh430.Of 2008 – “Hormigón armado – Requisitos de diseño y cálculo”.
- ACI318-08S - “Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario”.
- AISC Steel Design Guide Series – “Column Base Plates” – 2003.
- NCh170.Of 1985 – “Hormigón – Requisitos generales”.
- D.S. N°60 – “Requisitos de Diseño y Cálculo para el Hormigón Armado”.

4.1.1 Ensayos de elementos estructurales

Durante el proceso de revisión estructural, se considera la realización de ensayos de elementos estructurales validados por el mandante, frente a eventuales discrepancias entre el diseño estructural original y su revisión.

Descripción del sistema sismorresistente

Debe incluir los siguientes puntos:

- Tipo de rack (Rack Selectivo, Flow Rack, etc.).
- Tipología de pilares, vigas y riostras: Se debe incluir el tipo de perfil de acuerdo con la denominación del fabricante.
- Tipología de uniones viga-pilar y anclaje a la base: Se debe incluir placa de unión, el tipo de perno de anclaje, etc.
- Se debe incluir la calidad del acero en todos los elementos del rack.

4.2 Descripción del modelo de análisis

Constituye el input del programa de análisis y diseño estructural. Debe incorporar:

- La definición del sistema resistente en el sentido transversal y en el sentido longitudinal (marco arriostrado, marco rígido).
- Las dimensiones geométricas del rack.
- La definición de las uniones (rotuladas, semi rígidas y rígidas) entre elementos del rack y las uniones del rack a la base.

4.3 Descripción de las solicitaciones consideradas en el proyecto

4.3.1 Cargas gravitacionales

Peso propio (PP)

La carga por peso propio equivale al peso de la estructura de acero que conforma la estantería industrial.

Sobrecarga de uso (SC)

La carga por sobrecarga de uso corresponde al peso de los pallets más el peso de los elementos almacenados sobre ellos. Esta carga se considera uniformemente distribuida sobre las vigas.

Para evaluar el comportamiento de un rack durante un movimiento telúrico, es importante determinar la magnitud que podría tener un sismo en el lugar donde se encuentra posicionado el rack, su resistencia, detalles de diseño, carga en el momento del sismo y, en general, cualquier otra condición que pueda afectar su comportamiento. En este sentido, se ha definido el concepto de “factor de ocupación”.

Factor de ocupación

Corresponde al porcentaje de carga sobre el rack al momento del sismo. Este factor no es fijo y debe ser determinado en conjunto por los ingenieros estructurales y el cliente, ya que este último es quien posee la información necesaria acerca de la rotación de la mercadería en su bodega.

Lamentablemente existe confusión al utilizar este concepto, ya que muchas veces se relaciona con una idea de “espacios ocupados”, lo cual es erróneo.

Para el factor de ocupación, no es importante el número de nichos ocupados, ni el área utilizada en total. Hace referencia a un concepto probabilístico, es decir, cual es la carga más probable que tenga el rack en el momento del sismo.

Este factor es un concepto fundamental en el diseño estructural de un rack y un nombre adecuado sería también “factor de sobrecarga”.

Este valor afecta directamente los costos, pues incide en qué tan resistente será la estructura bajo una cierta cantidad de carga, lo que implica naturalmente especificaciones distintas. Debido a esto el factor de ocupación debe ser determinado entre el cliente y el fabricante, teniendo en cuenta la real utilización de la estantería metálica.

Un factor de ocupación mal estimado puede ser causante de fallas estructurales y hasta colapso general del rack, en el caso de haber considerado un valor menor al que tiene la operación en la realidad.

Carga de impacto vertical

En normas extranjeras se considera una carga de impacto vertical, que se refiere al impacto que puede causar la caída brusca del pallet sobre la estructura, lo cual puede ocurrir probablemente cuando se coloca el pallet en el rack.

Por ejemplo, la norma ANSI MH16.1-2012 entregada por el RMI, dispone que tanto las vigas como sus uniones a columnas deben diseñarse considerando una carga de impacto vertical equivalente al 25% de una unitaria, y que debe ubicarse en el punto más desfavorable de la viga o brazo en voladizo. Sin embargo, no es necesario considerar esta carga de impacto en el diseño de columnas ni tampoco en el control de deformaciones.

Carga de nieve

En el caso de racks de tipo autoportante, se debe considerar la carga de nieve, que viene definida en la norma NCh 431.Of2010 - Construcción - Sobrecarga de Nieve.

La magnitud de la carga de nieve depende de la latitud y de la altura sobre el nivel del mar del lugar de emplazamiento de las estructuras de rack.

Carga sísmica vertical

En el punto 5.1.1 de la norma NCh2369.Of2003, Dirección de la Solicitud Sísmica, se indica que el efecto de las aceleraciones sísmicas verticales se deben considerar en diversos casos. De ellos, los que podrían eventualmente aplicar para las estructuras de rack son:

- Fundaciones y elementos de anclaje y apoyo de estructuras y equipos.
- Cualquier otra estructura o elemento en que la variación de la acción sísmica vertical afecte en forma significativa su dimensionamiento, como por ejemplo, las estructuras o elementos en voladizo.

De acuerdo con la norma NCh 2369, la acción sísmica vertical se puede considerar en forma estática o, alternativamente, desarrollando un análisis dinámico vertical.

a) Análisis estático vertical

La acción sísmica vertical puede considerarse en forma estática tomando en cuenta los puntos anteriores, en este caso, el coeficiente sísmico debe ser igual a $2A_0/3g$.

La fuerza sísmica vertical es entonces: $F_v = \pm (2A_0/3g) I P$.

Donde:

P: cargas permanentes + sobrecargas x factor de ocupación.

I: Factor de importancia definido en la tabla 4.1. La aceleración máxima del suelo A_0 depende de la zona sísmica donde se ubicará la estructura, de acuerdo a lo indicado en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Aceleración efectiva máxima del suelo

Zona sísmica	A_0
1	0.20 g
2	0.30 g
3	0.40 g

A_0 : Aceleración efectiva máxima del suelo. Tabla 5.2 de la NCh2369.

g : es la aceleración de gravedad.

b) Análisis dinámico vertical

De forma alternativa, se puede desarrollar un análisis dinámico vertical con el espectro de aceleraciones siguiente:

$$S_a = \frac{2,75 A_0 I}{R} \left(\frac{T'}{T} \right)^n \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$$

Donde:

T = período de vibración del modo considerado.

T' , n : son parámetros relativos al suelo de fundación. Tablas 5.3 y 5.4 NCh2369.

R : factor de modificación de la respuesta

ξ = razón de amortiguamiento. Tablas 5.5 NCh2369.

En este caso, la ordenada espectral S_a no necesita ser mayor a IA_0 .

Se considera $R=3$ y $\xi=0,03$. Razones de amortiguamiento mayores que 0,03 se deben justificar especialmente.

4.3.2 Cargas horizontales

Las cargas horizontales corresponden normalmente a las cargas sísmicas.

En el caso de racks autoportantes, se deben considerar además las cargas de viento.

Carga sísmica

Para el cálculo sísmico se debe realizar un análisis elástico dinámico (modal espectral). De acuerdo con las disposiciones de la norma NCh2369, para la construcción del espectro de diseño se debe considerar:

- Zona sísmica.
- Tipo de suelo.
- Coeficiente de importancia.
- Factor de modificación de la respuesta R.
- Razón de amortiguamiento
- Masa sísmica, considerando, por ejemplo, un porcentaje de ocupación de la estantería por sobrecarga de uso.

Corte basal

De acuerdo con la NCh2369, el corte basal Q_0 se calcula según: $Q_0 = C I P$

Donde:

C: coeficiente sísmico.

I: coeficiente de importancia.

P: peso total a nivel basal.

Para la determinación del coeficiente de importancia, la NCh2369, indica lo siguiente:

Tabla 4.2 Coeficiente de importancia

Coeficiente de importancia (I)	Categoría	Equipos
1,2	C1	Vitales. peligrosos o esenciales
1,0	C2	Normales
0,8	C3	Equipos menores o provisionales

La experiencia muestra que, en general, se usa un valor para el coeficiente de importancia igual a 1.0, y en algunos casos 1.2, pero raramente se diseña con un valor de 0.8.

En el anexo 3 se presenta el enfoque de normas extranjeras para la determinación del peso sísmico (Anexo A3.2) y el factor de importancia (Anexo A3.3).

Coeficiente sísmico

El coeficiente sísmico se determina según la siguiente expresión:

$$C = \frac{2,75 A_o}{g R} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$$

En relación con el factor de modificación de la respuesta R, se recomienda seguir lo que se indica en la Norma NCh2369.Of2003, que entrega un valor máximo R = 4 para estanterías de almacenamiento. Tabla 5.6.

En el Anexo A3.4 se presenta el enfoque de la norma RMI para la definición del factor R.

ξ = razón de amortiguamiento, que se obtiene de la tabla 5.5. Se considera $\xi = 0.03$, ya que es el valor que corresponde para marcos de acero con uniones apernadas, con o sin arriostamiento.

T*: periodo fundamental de vibración en la dirección del análisis. En la actualidad, los fabricantes lo determinan mediante modelos matemáticos, acorde con lo que se encuentra en la NCh 2369, que indica que para su cálculo puede utilizarse un procedimiento teórico o empírico fundamentado. Sin embargo, cabe destacar que normas extranjeras, como por ejemplo el RMI, sugieren determinar el periodo considerando una rigidez de unión F, obtenida mediante ensayos.

Corte basal mínimo

El corte basal mínimo, de acuerdo a la NCh2369, viene dado por:

$$Q_{\min.} = 0,25 I \frac{A_o}{g} P$$

Corte basal máximo

El corte basal máximo se calcula con un coeficiente sísmico máximo C_{max} .

$$Q_{max} = C_{max} I P$$

Considerando un factor de modificación de la respuesta $R=4$ y una razón de amortiguamiento $\xi= 0.03$. La norma NCh2369.Of2003 establece un coeficiente sísmico máximo C_{max} de acuerdo con la zona sísmica, según lo indicado en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Corte basal máximo Nch2369.Of2003			
Zona sísmica	1	2	3
C_{max}	0.135	0.203	0.270

4.3.3 Combinaciones de cargas

Para establecer las distintas combinaciones de carga en general se puede utilizar la NCh3171.Of2010, Diseño estructural - Disposiciones generales y Combinaciones de Carga. Sin embargo, al considerarse a los racks como instalaciones industriales, pueden utilizarse directamente las que se especifican en la NCh2369 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales.

De acuerdo con la norma NCh3171.Of2010, las combinaciones de carga ASD a considerar son las siguientes

U1: D.

U2: D + L.

U3: D + 0.75L + 0.75 Ex.

U4: D + 0.75L + 0.75 Ey.

U5: D + Ex.

U6: D + Ey.

U7: 0.6 D + Ex.

U8: 0.6 D + Ey.

Donde:

D: Peso Propio

L: Sobrecarga de uso al 100% de la capacidad máxima de almacenaje.

Ex: Sismo Transversal.
Ey: Sismo Longitudinal.
Ez: Sismo Vertical.

Las combinaciones de carga LFRD a considerar son las siguientes:

U1: 1.4D.
U2: 1.2D + 1.6L.
U3: 1.2D + L + 1.4 Ex.
U4: 1.2D + L + 1.4 EY.
U5: 0.9D + 1.4 Ex.
U6: 0.9D + 1.4 EY.

Según la NCh2369.Of2003, en el punto 4.5 Combinaciones de Cargas, se indica que la composición de las solicitaciones con las cargas permanentes y los distintos tipos de sobrecargas se debe hacer usando uno de los dos métodos aceptados actualmente: ASD (por método de las tensiones admisibles) o LRFD (por método de las cargas últimas).

De acuerdo con la norma Nch.2369.Of2003, las combinaciones de carga a considerar son las siguientes:

Método ASD:

U1: $D + aL \pm Ex \pm Ez$.
U2: $D + aL \pm Ey \pm Ez$.

Método LRFD:

U1: $1.2D + aL \pm bEx \pm bEz$.
U2: $0.9D + aL \pm bEy \pm bEz$.

El factor "a" corresponde al "factor de ocupación" definido anteriormente en el punto 4.4.1 Cargas gravitacionales - sobrecarga de uso.

El factor "a" toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia simultánea de la sobrecarga con el nivel de la solicitación sísmica definida de acuerdo con la norma NCh2369.

El valor del factor de ocupación "a" fluctúa entre 0 y 1. Sin embargo, el valor de "a" no debe ser menor a 0.5, según lo estipulado por la norma NCh2369 para bodegas y en general zonas de acopio con baja tasa de rotación".

El factor "b" es un factor de amplificación de la carga sísmica. Para estructuras de acero "b" = 1.1.

Finalmente, la norma NCh3171.Of2010 indica que en el caso del diseño sísmico prevalecen las disposiciones de la NCh2369.

4.3.4 Verificación del diseño de elementos críticos

Propiedades de las secciones

El diseño estructural de los elementos conformados en frío que componen los racks debe regirse por la norma AISI S100-12 - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. La publicación ICHA, Especificaciones para el Diseño de Miembros Estructurales Conformados en Frío, entrega una adaptación de la versión de esta norma correspondiente al año 2007. Sin embargo, debido a que los elementos componentes de los racks pueden tener perforaciones, surgen aspectos específicos que modifican algunas de las expresiones contenidas en ella.

Como se verá a continuación, se considera un factor Q que toma en cuenta la presencia de perforaciones y modifica los valores de las propiedades de las secciones (área A, módulo resistente S).

Cálculo del factor Q

El factor Q toma en cuenta la existencia de perforaciones y debe determinarse mediante ensayos de compresión de columnas cortas que no fallen por pandeo general sino por local.

La definición de Q es la siguiente:

$Q = \text{Resistencia de la columna corta según ensayo} / \text{Resistencia teórica con área total.}$

La resistencia teórica con área total (sin perforaciones) es $= F_y A_{TOT.}$

La resistencia teórica con área total de una sección con perforaciones es $= F_y A_{NET MIN.}$

$A_{NET MIN.}$ se calcula en una sección que pase por una zona con perforaciones.

Si un cierto elemento se fabrica con distintos espesores t se pueden efectuar ensayos para determinar Q para el elemento con el mayor espesor (Q_{MAX}) y el menor espesor (Q_{MIN}).

El valor de Q para los espesores intermedios se puede obtener interpolando entre los valores anteriores, según lo siguiente:

$$Q = Q_{MIN} + (Q_{MAX} - Q_{MIN}) \frac{(t - t_{MIN})}{(t_{MAX} - t_{MIN})}.$$

a) Verificación de pilares

Se deben tomar en consideración los siguientes puntos:

• Determinación de la longitud efectiva de los tramos libres de pandeo del pilar
Compresión: se deben verificar todos los tipos de pandeo que puede sufrir el elemento para establecer cuál de ellos es el más crítico. Esto implica pandeo por flexión, torsión y flexo-torsión.

Flexión: se debe considerar la resistencia a la flexión simple y al pandeo lateral torsional debido a la flexión.

Interacción flexión- compresión: Se debe considerar que los pilares están sometidos simultáneamente a compresión y flexión.

La norma AISI S100-12 - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members entrega fórmulas de interacción. Estas ecuaciones están consideradas en los softwares computacionales utilizados para el diseño de este tipo de estructuras.

b) Verificación de vigas

Las vigas se diseñan a la flexión de forma habitual. También se debe verificar la resistencia de la viga al corte. En los apoyos debe considerarse la interacción momento-corte.

Se debe confirmar que las deformaciones máximas de la viga no superen la admisible D_{adm} . La norma ANSI MH16.1-2012 indica $D_{adm} = L/180$, donde L corresponde a la luz de la viga.

c) Verificación de riostras

En relación con la estructuración de las riostras, la norma NCh2369 no permite configuraciones con diagonales que solo trabajan en tracción. Entonces, en un eje resistente deben haber diagonales que trabajen en tracción y otras en compresión.

La verificación de estos elementos debe incluir los siguientes puntos:

- Verificar que en un eje resistente, en cada nivel, la resistencia de las diagonales traccionadas debe ser como mínimo equivalente a un 30% del corte en dicho eje.
- Verificación de la esbeltez local de los elementos que componen la sección de la riostra (alas, alma). Esto se realiza para establecer las dimensiones efectivas de la sección.
- Verificación del pandeo flexural en X-X.
- Verificación del pandeo flexural en Y-Y.
- Verificación del pandeo torsional.
- Verificación del pandeo flexo-torsional.

d) Verificación de la placa base

Diseño de la placa base bajo cargas gravitacionales

El diseño de la placa base se realiza con los métodos tradicionales. Para esto se asume que la presión de contacto se distribuye en forma uniforme bajo la placa y que ésta se analiza como un elemento rígido.

Las dimensiones de la placa base queda definida por los siguientes puntos:

- Aplastamiento del hormigón bajo la placa

La resistencia al aplastamiento del hormigón debe verificarse en la base de las columnas. Esta confirmación debe realizarse en un el área cargada de la placa base, A_1 ,

$$ASD: F_p = 0.35 * f'_c * \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 0.7 * f'_c$$

$$LRFD: F_p = 0.85 * \phi * f'_c * \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1.7 * f'_c$$

Donde:

F_p = Tensión de aplastamiento del hormigón

A_2 = Área de hormigón geoméricamente similar a la placa base

A_1 = Área cargada No debe ser mayor al área de la placa base

f'_c = Resistencia a compresión cilíndrica del hormigón

ϕ = Factor de reducción de resistencia

Diseño de la placa base bajo cargas de levante

Si se presenta una carga de tracción en el pilar, el espesor mínimo de la placa base se determina en base al momento flector $M = T \times 0.5 d$, siendo:

T: tracción que recibe cada perno de anclaje. La placa base puede contar con uno o más pernos de anclaje.

d: distancia entre el eje del perno de anclaje y el borde más cercano de la columna del rack.

Diseño de la placa base bajo momento y cargas axiales

Cuando se presenta simultáneamente una carga gravitacional, N, y un momento M debido a cargas laterales, el espesor de la placa base se determinará de acuerdo con lo siguiente:

Si $e = M/P \leq N/6$, siendo N el ancho efectivo de la placa base, no se tiene tracción en el pilar. En este caso, los pernos de anclaje se deben diseñar para el corte máximo que se presenta en la base. La placa base se diseñará según lo indicado en el punto determinado anteriormente.

Si $e = M/P > N/6$, los pernos de anclaje están sometidos a tracción.

A partir de esta verificación se determina las dimensiones mínimas de la placa base en planta. La resistencia a la flexión determina el espesor mínimo de la placa base.

Existen dos metodologías para el diseño de las placas: una asume una distribución variable de las tensiones de compresión bajo la placa; mientras que la segunda considera una distribución constante de las tensiones de compresión. De acuerdo con las disposiciones de la norma AISC, ambas son válidas.

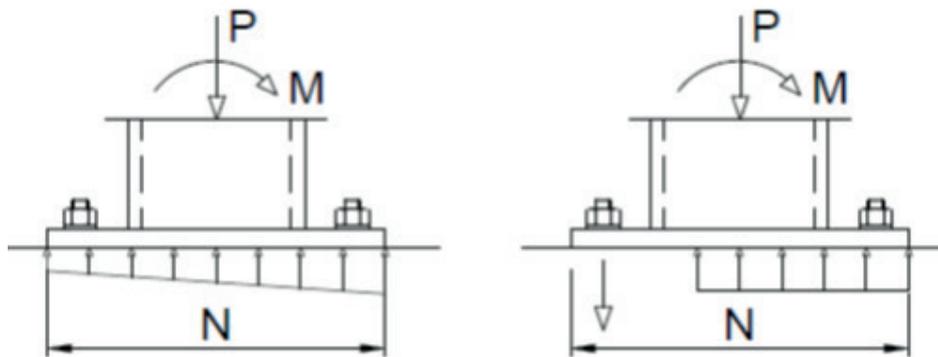


Figura 4.1 Metodologías de análisis de la distribución de tensiones bajo la placa base

Planchas de nivelación

Bajo las placas base se pueden disponer planchas para aplomar y/o nivelar las columnas del rack. Estas planchas deben estar hechas de un material con una resistencia igual o mayor a la resistencia al aplastamiento del hormigón y deben tener una dimensión igual o mayor que las de la placa base.

La norma ANSI MH16.1:2012 Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks – 2012, (Punto 7.1.4) establece criterios para la utilización de planchas de nivelación.

Para evitar en el futuro deslizamiento accidentales entre las placas de nivelación que puedan generar deterioro de la nivelación de la estanterías, la práctica recomienda que en caso de utilizar más de 5 laminas de 2 mm de espesor, se deben soldar entre sí las placas de nivelación, según recomendación ICHA.

Al diseñar los pernos de anclaje, se debe tomar en cuenta la flexión asociada al espesor total de las planchas de nivelación.

e) Verificación de los pernos de anclaje

Deberán diseñarse de acuerdo con las disposiciones contenidas en el Anexo D de la norma de hormigón armado ACI 318. Los pernos están sometidos a tracción y corte.

Se debe considerar la interacción corte-tracción en los pernos de anclaje y la falla del hormigón por extracción.

Según lo indicado en el punto D.7.1 del código ACI318-08, si $V_{ua} \leq 0.2 * \phi V_n$, entonces se permite usar la resistencia total en tracción, donde:

V_{ua} : Corte último solicitante

ϕ : Factor de reducción de resistencia – Corte

V_n : Resistencia nominal a corte

Según lo indicado en el punto D.7.2 del código ACI318-08, si $N_{ua} \leq 0.2 * \phi N_n$, entonces se permite usar la resistencia total por cortante tracción, donde:

N_{ua} : Tracción última solicitante

ϕ : Factor de reducción de resistencia – Tracción

N_n : Resistencia nominal a tracción

En estos dos casos, el código indica que no es necesario considerar la interacción tracción – corte.

Los anclajes, además de ser verificados, deben ser específicos para sismo y el proveedor de los mismos debe disponer de homologaciones o ensayos que certifiquen la validez del anclaje para resistir cargas sísmicas

f) Verificación de la conexión viga-pilar-riostros

Las uniones entre columnas, vigas y riostras de los racks deberán diseñarse de acuerdo con las disposiciones contenidas en la norma AISI S100-07 - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.

4.3.5 Verificación de deformaciones

Las deformaciones máximas deben verificarse en el sentido transversal y en el longitudinal de la estructura.

La norma chilena NCh2369 establece que debe realizarse un análisis de segundo orden o P- delta si la deformación sísmica excede el valor $0.015h$, donde h corresponde a la altura total del rack.

Las deformaciones sísmicas se determinan según el punto 6 de la Norma NCh2369, que establece la siguiente expresión:

Las deformaciones se deben determinar de:

$$d = d_0 + d_d$$

en que:

d = deformación sísmica;

d_0 = deformación debida a cargas de servicio no sísmicas;

d_d = deformación calculada con el espectro elástico de la norma NCh2745 o mediante análisis de respuesta en el tiempo, de acuerdo a las cláusulas 5.8.1 y 5.8.2, respectivamente

Las estructuras de racks deben estar dilatadas entre sí y con respecto a las estructuras vecinas.

Se deben evitar los choques y golpeteos que se pueden producir entre estructuras vecinas durante un sismo. Estos producen cargas adicionales que pueden generar una falla progresiva y eventual colapso del rack.

Las deformaciones de los racks deben limitarse debido también a aspectos funcionales.

4.3.6 Separaciones entre racks

Adicionalmente y complementario para cualquier cálculo estructural que indique las distancias de las estructuras a los muros perimetrales (u otras distancias como las libres), se debe considerar el tipo de sustancias que se almacenarán.

En función de esto, existen regulaciones escritas en decretos donde se indica la distancia de los racks perimetrales a los muros para almacenar productos tales como químicos inflamables, explosivos, corrosivos, etc. Estas regulaciones son siempre más conservadoras que las normas de diseño, razón por la cual el diseñador y comprador deben revisar el documento que regule su producto a trabajar debido a que, probablemente, las dimensiones de la bodega serán distintas a las que indica un cálculo estructural.

La separación mínima requerida entre racks debe determinarse mediante el cálculo estructural.

En casos donde no exista regulación o indicación se debe cumplir lo indicado en la NCh2369.

Recomendaciones de uso y mantenimiento de la estantería metálica

5. Recomendaciones de uso y mantenimiento de la estantería metálica

Para evitar los errores de manejo y mantenimiento indicados anteriormente, se recomienda tomar medidas como las que se describen a continuación:

5.1 Respetar las cargas máximas especificadas para el rack

Los racks deben tener una placa que especifique claramente la carga máxima para la que han sido diseñados. A modo de ejemplo, en la fig. 5.1 se muestra una placa tipo con la especificación.

FICHA TÉCNICA DE LA ESTANERÍA	
Tipo de Producto: <input type="text"/>	Detalle de unidad de Carga: X: <input type="text"/> / Y: <input type="text"/> / H: <input type="text"/> mm 
Año de Fabricación: <input type="text"/>	Peso por Unidad de Carga: <input type="text"/> Kg.
Fabricante: <input type="text"/>	Unidades de Carga por Nivel: <input type="text"/>
Cliente: <input type="text"/>	Capacidad Total del Proyecto: <input type="text"/> Pallets
Nota: Se considera, sobre vigas, carga uniformemente distribuida.	
DESCRIPCION DEL PROYECTO	
<input type="text"/>	
	Proyecto basado en las normas chilenas de diseño estructural Nch 427 - cR76 y diseño antisísmico Nch 2369-Of 2003.
	Proyecto verificado para las configuraciones de vigas, marcos, cargas y dimensiones de diseño original, la que no debe ser alterada sin consultar al fabricante.
	Para su correcta utilización y control preventivo referirse a la directriz de mantención de estanterías.
	ADVERTENCIA Las capacidades mostradas arriba están referidas a componentes en buen estado, el daño reduce la cacidad de la estantería. Repáre o reemplace los componentes dañados.

Figura 5.1 Ficha tipo con especificación de carga del rack

5.2 Proteger los racks

Para evitar las colisiones con grúas horquilla u otros vehículos, se recomienda colocar barreras de protección.

En la fig 5.2 se muestran diversas alternativas de defensas para la protección de racks contra eventuales colisiones.



Figuras 5.2 Defensas para racks

5.3 Inspección continua del estado de los racks

Se deben establecer rutinas y procedimientos que permitan realizar una inspección continua del estado de los racks. Es necesario realizar:

5.3.1 Inspección permanente (diaria) del estado de los racks

A cargo del personal del lugar y choferes de grúa horquilla.

En caso de una colisión con grúa horquilla que resulte en un elemento abollado se debe:

- Dar aviso inmediato al responsable de la bodega.
- Descargar el rack en los módulos comprometidos de carga, para minimizar cualquier riesgo.
- Contactar al proveedor para evaluar el daño y programar el recambio del elemento con prontitud.

5.3.2 Inspección semanal/mensual

La debe realizar el encargado de seguridad de la instalación, en forma semanal o mensual. Luego de esta inspección, es necesario realizar un informe acerca del estado de las estructuras de racks.

La norma europea EN indica las deformaciones que se pueden considerar como admisibles en los elementos de un rack, fig. 5.3.

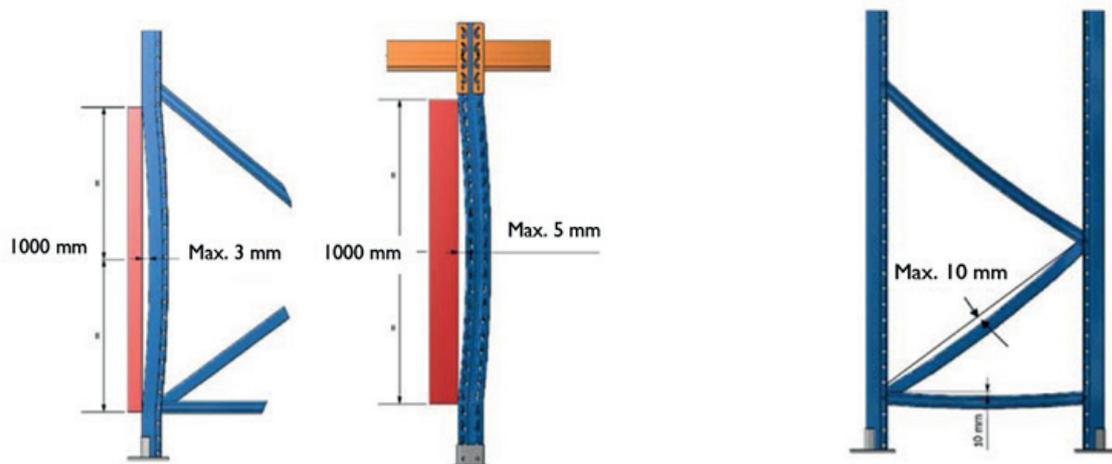


Figura 5.3 Deformaciones admisibles en elementos de un rack

5.3.3 Inspección semestral

Esta inspección la debe realizar un experto y debe resultar en un informe con observaciones y propuestas de acción.

6. Conclusiones

En un país sísmico como el nuestro, es de vital importancia considerar un conjunto de medidas, absolutamente necesarias, para obtener un desempeño estructural adecuado de las estanterías metálicas para almacenaje, tanto en la etapa de proyecto, como durante su fabricación y posterior uso.

En el caso de la etapa de proyecto, estas estructuras deben ser diseñadas contemplando las normativas vigentes y el diseño se debe ver reflejado en una memoria de cálculo donde se contemplen todos los aspectos estructurales, especialmente, los relativos al diseño sísmico, ya que tras un sismo las estructuras pueden sufrir daños de diversa magnitud.

Para la fabricación y montaje de los racks, se deben realizar procesos de calidad que incluyan, entre otros, la certificación de la calidad de los aceros, el control dimensional de los elementos estructurales y los espesores de los elementos que deben ser congruentes con los nominales considerados en el diseño estructural.

Finalmente, es primordial contar con una inspección permanente para detectar eventuales fallas. Las estanterías metálicas en uso deben ser protegidas de forma tal de que no sufran choques ya que las deformaciones reducen fuertemente su resistencia y nunca deben ser sobrecargadas más allá de las cargas para las cuales fueron diseñadas.

Anexos

Anexo 1. Tipología de Pallets

A1.1 Materiales utilizados en la fabricación de pallets

A1.1.1 Pallets de madera

Dentro de los materiales más utilizados se encuentra el pallet de madera, que representa entre el 90% y 95% del mercado de pallets.

Para los pallets de madera usados en la exportación de productos, se exigen dos requisitos indispensables: un certificado de origen del pallet y otro del tipo de tratamiento aplicado para su desinfección. La nueva reglamentación fitosanitaria NIMF-15 (Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias), de la IPPC (The International Plant Protection Convention, organismo perteneciente a la ONU, -única entidad que regula y autoriza esta norma a nivel internacional-) trata de evitar la entrada de plagas, insectos o parásitos que pueda contener la madera procedente de otros países.



A1.1.2 Pallets de cartón

Los pallets también pueden ser hechos de cartón, los cuales, al ser desechables (de un solo uso), garantizan el higiene.

Estos son utilizados en mayor medida en el mercado agrícola o agroalimentario.

Están fabricados en cartón ondulado, con sus partes encoladas unas a otras, por lo que no se emplean corchetes ni clavos.



A1.1.3 Pallets de plástico

Representan una alternativa al pallet de cartón en envíos internacionales, aunque tienen menor presencia en el mercado. Generalmente se escogen por su bajo peso e higiene.

Se suelen utilizar en el sector de la logística industrial, donde es muy conveniente para los almacenes automatizados.



A1.1.4 Pallets de fibra de madera

Están hechos de viruta de madera que se obtiene de manera industrial, y del reciclaje de pallets de madera y resina. No poseen clavos, tornillos ni corchetes.

Están disponibles en varias medidas y capacidades que van desde 250 hasta 1.250 kilos. Respecto a su eliminación, es similar a los pallets de madera. La viruta puede reutilizarse para crear nuevos pallets y otros productos de manera prensada.



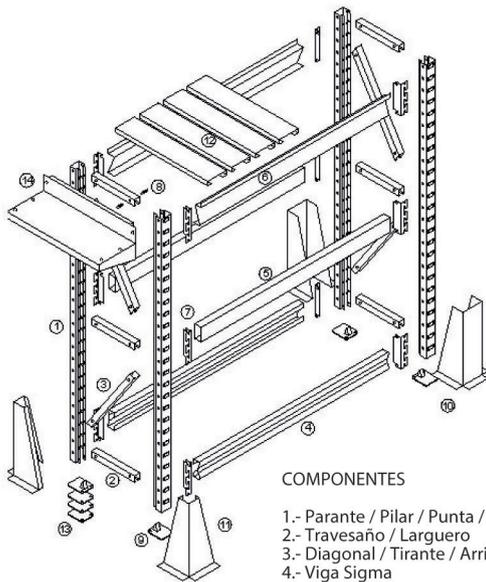
A1.1.5 Pallets metálicos

Están hechos de acero o aluminio y son mucho menos utilizados, a pesar de ofrecer los mayores valores de resistencia a la carga. Aunque su precio es bastante alto, la inversión inicial se recupera debido a su larga vida útil.

Se emplean principalmente en sectores en los que funcionan sistemas cerrados o donde los pallets se recuperan; así como en aquellos donde se deben soportar cargas muy altas, tales como la industria militar y aeroespacial.



Anexo 2. Elementos componentes de la estructura de un rack



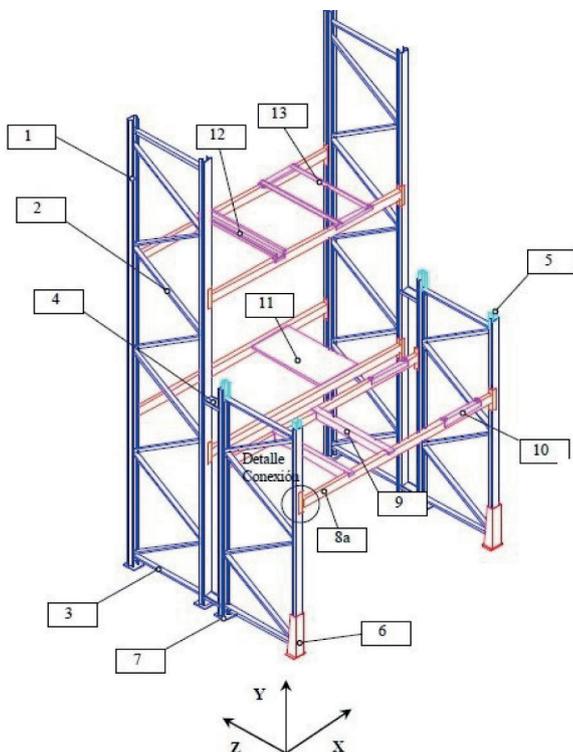
COMPONENTES

- 1.- Parante / Pilar / Punta / Columna / Vertical
- 2.- Travesaño / Larguero
- 3.- Diagonal / Tirante / Arriostamiento / Atirantado
- 4.- Viga Sigma
- 5.- Viga Cerrada
- 6.- Viga "Z"
- 7.- Uña/ Empalme
- 8.- Tornillo
- 9.- Pata / Pie Compacto / Apoyo Puntal



ADICIONALES

- 10.- Defensa / Protección Frontal
- 11.- Defensa / Protección Esquinero
- 12.- Tablillas
- 13.- Espesor de nivelación / Placa suplemento pie compacto / Placa de nivelación
- 14.- Exhibidor



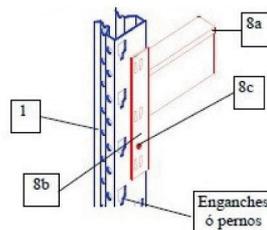
Marcos

- 1.- Pilar de marcos
- 2.- Riostra diagonal
- 3.- Riostra horizontal
- 4.- Separador de marcos
- 5.- Unión entre piales
- 6.- Protección pilar
- 7.- Placa de anclaje

Vigas y accesorios

- 8a.- Viga
- 8b.- Conector
- 8c.- Seguro
- 9.- Travesaño portapallet
- 10.- Cuñas portatambor
- 11.- Bandejín carga a granel
- 12.- Soporte palletainer
- 13.- Soporte portarollos

Detalle Conexión Viga - Pilar



Anexo 3. Criterios de diseño sísmico de racks considerados en normas extranjeras

A) Alcance de este anexo

En este anexo se presentan los criterios de diseño sísmico de racks contemplados en las normativas de Europa y Estados Unidos.

Este anexo no pretende incluir de forma exhaustiva todos los contenidos de ambas normas, sino que intenta presentar sus aspectos más relevantes.

Las normas consideradas son:

RMI Rack Manufacturers Institute (USA)

ANSI MH16.1:2012 Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks – 2012 Edition (documento publicado por el Rack Manufacturers Institute) Estados Unidos.

EN (Europa)

EN 102.08 – Recommendations for the Design of Static Steel Pallet Racking in Seismic Conditions – Version 1.02 – December 2010

Los criterios de diseño de racks de las normativas europea y norteamericana que aquí se presentan consideran los siguientes aspectos:

- Criterios Generales de Diseño
- Metodologías de Análisis Sísmico de Racks
- Carga Sísmica
- Sismo Vertical
- Carga de Impacto
- Combinaciones de Carga
- Dilatación Sísmica de Racks
- Capacidad Rotacional de la Unión Viga-Columna
- Area Neta de la Sección
- Evaluación del Volcamiento

B) Criterios generales de diseño

La norma europea (EN) considera los siguientes requerimientos fundamentales:

- 1) El rack se diseñará para resistir la acción sísmica sin que se produzca un colapso local o general de su estructura.
- 2) Luego de un sismo la estructura del rack puede sufrir daños. Estos deben evaluarse antes de volver a poner los racks en uso.

3) Las aceleraciones sísmicas pueden producir el deslizamiento de los pallets sobre las vigas de soporte. Este aspecto modifica la respuesta sísmica de la estructura.

La norma norteamericana no define del mismo modo criterios generales para el diseño sísmico de los racks. Sin embargo considera aspectos específicos relativos al diseño sísmico de los racks. Los puntos más relevantes se presentan en este anexo.

C) Metodologías de análisis sísmico de racks

C.1 Metodología de análisis sísmico de racks – Norma RMI

La norma RMI se basa en el desarrollo de un análisis sísmico lineal elástico de la estructura del rack.

C.2 Metodología de análisis sísmico racks – Norma EN

De acuerdo a la norma EN los racks pueden diseñarse bajo 2 conceptos considerando su desempeño estructural:

a) Análisis lineal elástico

Este análisis se aplica a estructuras de racks denominadas por la norma como “de baja disipación” y corresponde a las estructuras de racks que tienen asignado un factor de desempeño $q \leq 2$.

b) Análisis no-lineal

La norma EN permite efectuar un análisis no lineal a estructuras de racks “con disipación”. Esta capacidad está definida por un factor de desempeño $q > 2$ (ver numeral D.2.2.2) y consiera que

ciertas zonas de la estructura tienen capacidad de soportar acción sísmica fuera de su rango elástico. En este caso se puede realizar un análisis estático no lineal (pushover) o un análisis tiempo-historia no lineal.

La norma EN indica sin embargo que el método de referencia para la evaluación sísmica del rack es el análisis modal espectral considerando un modelo lineal-elástico.

D) Carga sísmica

D.1 Carga sísmica - Norma RMI

La norma RMI establece que se debe considerar un corte basal mínimo, V:

$$V = C_s I_p W_s \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

C_s : coeficiente de respuesta sísmico
 I_p : factor de importancia del sistema de almacenamiento
 W_s : peso sísmico efectivo de los racks

D.1.1 Peso sísmico efectivo de los Racks, W_s

En la determinación del peso sísmico efectivo (W_s) de los racks, la norma RMI considera la carga real que pueden tener los racks cuando se analiza la acción sísmica en el sentido longitudinal del rack. También considera el movimiento relativo que puede producirse entre la carga y la estructura del rack.

El peso sísmico efectivo (W_s) de un rack se calcula con la expresión:

$$W_s = (0.67 \times P_{RF} \times P) + D + 0.25 L \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

D: Peso propio

L: Sobrecargas de uso distintas a la de los pallets: Cargas eventuales sobre plataformas soportadas por racks.

P: Peso máximo de los pallets o de los productos almacenados en los racks.

P_{RF} : Factor de reducción de carga del producto.

Factor P_{RF}

Este factor da cuenta que la carga real de los pallets con frecuencia es menor que la capacidad de carga definida en el diseño de los racks. Este factor solo se toma en cuenta en la dirección longitudinal que es donde repiten varias posiciones de pallets.

El valor del factor de reducción de carga del producto, P_{RF} es el siguiente:

Dirección de la Fuerza Sísmica	P_{RF}
Dirección Transversal	1.0
Dirección Longitudinal	$PL_{Promedio} / PL_{Máximo}$

Donde:

$PL_{Promedio}$ es el peso total máximo del producto esperado sobre los estantes en cualquier fila longitudinal dividido por el número total de repisas en esa fila.

$PL_{Máximo}$ es el máximo peso de productos que puede ser colocado en cualquier repisa en la fila longitudinal. Este corresponde normalmente a capacidad de diseño.

Para tiendas de retail abiertas al público general se considera el peso máximo $PL_{Máximo}$ como el valor para el $PL_{Promedio}$.

El factor 0.67 corresponde a una estimación de la cantidad de carga que participa en el desarrollo de la fuerza sísmica. La experiencia ha mostrado que la masa total de la mercadería almacenada en un sistema de racks no participa en la inercia generada del movimiento del suelo. Hay algo de fricción induciendo disipación de energía relativa al movimiento entre los racks y los productos almacenados durante los movimientos sísmicos. Este factor de 0,67 representa la fracción de carga del sistema totalmente cargado contribuyendo al peso horizontal sísmico efectivo.

D.1.2 Factor de Importancia, I

La norma RMI indica un factor de importancia del sistema de almacenamiento, $I \geq 1.0$ lo que equivale a exigir un mejor desempeño de ciertas instalaciones de racks bajo condiciones sísmicas.

Los valores del factor de importancia son los siguientes:

$I_p = 1.5$ si el sistema es una instalación esencial

$I_p = 1.5$ si las estanterías contienen materiales peligrosos

$I_p = 1.5$ si el sistema es de retail abierta al público

$I_p = 1.0$ para las demás estanterías

D.1.3 Coeficiente de respuesta sísmico, C_s

El coeficiente de respuesta sísmico, C_s , se calcula con la expresión:

$$C_s = S_{D1} / T R \quad (\text{Ec.3})$$

El valor máximo de C_s es

$$C_s = S_{DS} / R \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

S_{D1} : aceleración de respuesta espectral para un periodo de 1 seg.

S_{DS} : aceleración que depende de la respuesta espectral para un periodo de 0.2 seg. y de la clasificación sísmica del terreno.

T: Periodo fundamental del rack en cada dirección. Si el sistema estructural corresponde a marcos rígidos, se debe considerar la rigidez de las conexiones para determinar el periodo.

R: Factor de modificación de la respuesta.

R= 4 en la dirección arriostrada

R= 6 en la dirección no arriostrada

Se permiten usar valores mayores del factor de modificación de la respuesta "R", si estos se demuestran mediante ensayos.

El valor mínimo de C_s es

$$C_s = 0.044 \text{ SDS}$$

En lugares en que la respuesta espectral para un periodo de 1 seg, S_1 , sea igual o mayor que 0.6g, el valor mínimo de C_s es

$$C_s = 0.5 S_1 / R$$

D.1.4 Espectro de diseño

La magnitud del espectro de diseño está definido por el tipo de terreno y la zonificación sísmica de EE.UU. Considera un amortiguamiento del 5%.

D.2 Carga sísmica - Norma EN

La norma EN establece que se debe considerar un corte basal, F_b , en cada dirección de análisis:

$$F_b = S_{d,red}(T_1) \times W_{E,tot} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

$S_{d,red}$: ordenada del espectro de diseño modificado.

T_1 : periodo fundamental de vibración del modo traslacional en la dirección considerada.

$W_{E,tot}$: masa sísmica total.

D.2.1 Peso sísmico de los pallets, W_E

Al considerar la acción sísmica horizontal, la norma EN define un peso de pallet de diseño W_E :

$$W_E = R_F \times E_{D2} \times Q_{P, rated} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

$Q_{P, rated}$: peso máximo de la carga unitaria (valor indicado en las especificaciones de técnicas del proyecto). La carga unitaria es el peso total de la carga de almacenamiento + peso de pallets.

R_F : factor de ocupación determinado por el ingeniero estructural y el cliente.

Sin embargo, debe considerarse:

$$\begin{aligned} R_F &\geq 0.8, \text{ en el sentido longitudinal} \\ R_F &= 1.0 \text{ en el sentido transversal} \end{aligned}$$

E_{D2} : factor de modificación del peso del pallet

Este factor representa el efecto de la interacción entre el pallet y la estructura del rack. La respuesta sísmica del rack se ve afectada por esta interacción ya que modifica la masa sísmica y modifica el periodo de vibración.

A continuación se muestra el valor de E_{D2} según el tipo de producto almacenado (EN, Tabla 2.8):

E_{D2}	Tipo de almacenaje	Ejemplo
1.0	compacto restringido	Productos congelados planchas de acero, rollos de papel o acero
0.8	débil	Piezas pequeñas en comparación con el tamaño del pallet
0.7	suelto no restringido	Productos que se mueven fácilmente dentro de un contenedor, ej. materiales granulados
1.0	líquido	Carga unitaria con líquido que golpea las paredes del contenedor

D.2.2 Espectro de diseño

La norma EN establece que el análisis modal espectral constituye el método de referencia para la evaluación de las solicitaciones sísmicas. Este análisis se desarrolla utilizando un modelo lineal-elástico de la estructura del rack y un espectro de diseño, $S_d(T)$.

Entre las variables específicas que se consideran en la definición del espectro de diseño para los racks, $S_d(T)$, la norma EN incluye:

- el factor de importancia, y_I
- el factor de desempeño, q_{64}

D.2.2.1 Factor de importancia, y_I

El factor de importancia afecta la aceleración del terreno considerada en el espectro y por lo tanto afecta el tamaño de la carga sísmica a considerar.

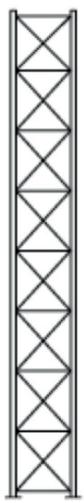
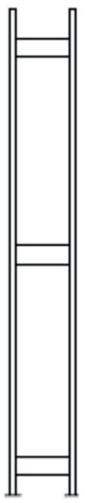
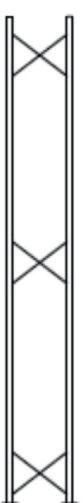
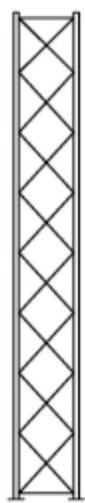
Los factores de importancia son:

- $y_I = 0.67$ para áreas con racks con almacenaje automatizado o con poco personal (menos de 5)
- $y_I = 0.84$ para almacenajes normales
- $y_I = 1.2$ para racks en retails
- $y_I = 1.4$ para racks con productos peligrosos.

D.2.2.2 Factor de desempeño, q

El valor del factor de desempeño, q, depende del tipo de estructuración del rack y puede tomar distintos valores para la dirección transversal y longitudinal del rack.

En la tabla siguiente se muestran los valores del factor de desempeño, q, según la estructuración del rack en el sentido transversal:

q = 1.5, 2 ó 4	q = 1	q = 1	q = 1.0 ó 1.5				q = 4
							
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(d1)
marcos arriostrados tipo X con travesaños	marco tipo Vierendel	marco parcialmente arriostrado	marcos arriostrados tipo Z	marcos arriostrados tipo D	marcos arriostrados tipo K	marcos arriostrados tipo X	marcos arriostrados tipo Z con disipación

En el sentido longitudinal los racks se estructuran frecuentemente en base a marcos rígidos. En estos casos, se puede considerar un factor de desempeño $q = 1.5$ como un valor conservador bajo un concepto de estructura de baja disipación.

Se puede utilizar $q = 2$ si se cumplen ciertas condiciones relativas a la inclusión de al menos un perno para asegurar la unión del conector extremo de una viga con una columna.

Si $q < 2$ se puede usar el método estático o el análisis modal espectral.

Si $q > 2$ dependiendo del valor del factor θ se debe usar el método estático, el análisis modal espectral, el análisis pushover, el método de análisis para grandes desplazamientos, o un análisis historia en el tiempo incluyendo análisis no lineal.

D.2.3 Espectro de diseño reducido

La norma europea EN toma en cuenta la disipación de energía que se produce con el deslizamiento de los pallets sobre las vigas de soporte. Este efecto implica una reducción de la acción sísmica sobre el rack debido a la disipación de energía y a la limitación para la acción horizontal que puede transmitir el pallet a la estructura.

Debido a esto la norma define un espectro de diseño reducido, $S_{D,RED}$

En la norma se introducen los factores E_{D1} y E_{D3} : factores de modificación del espectro de diseño, $S_D(T)$, definido en el Eurocódigo en 1998-1

$$S_{D,RED}(T) = S_D(T) \times E_{D1} \times E_{D3} \quad (\text{Ec.7})$$

El factor E_{D1} depende a su vez de:

- la intensidad de la acción sísmica (que se obtiene del espectro de diseño)
- el periodo de vibración (que expresa a su vez el número de niveles de carga, la masa total y la rigidez de la estructura)
- la carga horizontal máxima que puede transmitir el pallet a las vigas de soporte.

Esta carga depende del coeficiente de fricción m_s entre las vigas de acero y los pallets. Este coeficiente varía entre 0.10 y 0.37 dependiendo de la materialidad del pallet (madera, acero, plástico) y las condiciones ambientales del almacenaje (normales, refrigeradas, húmedas).

E) Sismo vertical

E.1 Sismo vertical - Norma RMI

La norma RMI no incluye disposiciones específicas para el cálculo de la carga producto del sismo vertical. Solo introduce en las combinaciones de carga un factor β que considera la acción sísmica vertical, ver apartado F.1 de este anexo.

E.2 Sismo vertical - Norma EN

La norma EN establece que la componente vertical del sismo se debe considerar solo en el diseño de los siguientes elementos:

- a) vigas en voladizo (componentes cantilever)
- b) vigas que soporten columnas
- c) columnas asociadas a los 2 casos de vigas anteriores

La norma EN entrega un espectro de diseño con variables específicas para el sismo vertical. En este caso no se pueden aplicar los factores de reducción por deslizamiento E_{D1} , E_{D2} y E_{D3} indicados antes.

F) Carga de impacto

El deslizamiento de la carga unitaria de los pallets trae aparejado el riesgo que esta caiga. Debido a esto, se incluye en las combinaciones de carga, la carga de impacto, I.

F.1 Carga de impacto - Norma RMI

La norma EN plantea que las cargas de impacto deben ser consideradas en el diseño, pero no define un criterio para su determinación. La norma EN recomienda tomar medidas que impidan la caída de los pallets como por ejemplo que exista una pendiente descendiente de al menos un 1% entre la viga delantera y la viga trasera con un tope en la parte posterior del rack. .

G) Combinaciones de carga

G.1 Combinaciones de carga - Norma RMI

En la tabla siguiente se presenta un cuadro general con las combinaciones de cargas incluidas en la norma RMI de EE.UU. .

Las combinaciones de carga que considera la norma RMI son coherentes con las combinaciones especificadas en la norma ASCE 7. A dichas combinaciones se les agrega la carga de almacenaje, P , de los racks.

La carga P_{app} representa la carga de almacenaje que puede estar presente simultáneamente con viento o sismo. Para el análisis de la estabilidad sísmica, se recomienda utilizar la carga utilizada para el cálculo del corte sísmico basal.

Para la estabilidad frente a la carga de viento solo se consideran los pallets existentes generando carga de viento.

La carga viva, L , incluida en las combinaciones de carga corresponde a eventuales cargas de piso en plataformas de trabajo o a cargas de equipos móviles.

La carga viva de techo, L_r , se debe considerar al diseñar racks autoportantes.

La norma RMI permite la utilización de los métodos de diseño ASD y LRFD.

En las tablas siguientes se presentan las combinaciones de carga para los métodos de diseño ASD y LRFD.

G.1.1 Combinaciones de carga ASD según Norma RMI

	Para todos los miembros del rack	Estado límite crítico
1	$D + P$	Carga muerta
2	$D + P + L$	Carga gravitacional
3	$D + P + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$	Carga de nieve/lluvia
4	$D + 0.75(P + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R))$	Carga gravitacional + Carga de nieve/lluvia
5	$(1 + 0.105SDS)D + 0.75[(1.4 + 0.14SDS)\beta P + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R) + 0.7\rho E]$	Carga gravitacional + sismo (*)
6	$(1 + 0.14SDS)D + (0.85 + 0.14SDS)\beta P + 0.7\rho E$	
7	$D + 0.75(P + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R) + 0.6W)$	Carga gravitacional + viento
8	$0.6D + 0.6P_{app} + 0.6W$	Levantamiento por viento
9	$(0.6 - 0.14S_{DS})D + (0.6 - 0.14S_{DS})\beta P_{app} + 0.7\rho E$	Levantamiento por sismo
	Solo para vigas soportantes de cargas y sus conexiones:	
10	$D + L + 0.5(S \text{ or } R) + 0.88P + I$	Impacto

G.1.2 Combinaciones de carga LRFD según Norma RMI

	Para todos los miembros del rack	Estado límite crítico
1	$1.4D + 1.2P$	Carga muerta
2	$1.2D + 1.4P + 1.6L + 0.5(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	Carga gravitacional
3	$1.2D + 0.85P + 0.5L + 1.6(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	
4	$1.2D + 0.85P + 0.5W + 1.6(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	Carga de nieve/lluvia
5	$1.2D + 0.85P + 0.5L + 1.0W + 0.5(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	Carga viento
6	$(1.2 + 0.2S_{DS})D + (1.2 + 0.2S_{DS})\beta P + 0.5L + \rho E + 0.2S$	Carga sísmica
7	$0.9D + 0.9P_{app} + 1.0W$	Levantamiento por viento
8	$(0.9 - 0.2S_{DS})D + (0.9 - 0.2S_{DS})\beta P_{app} + \rho E$	Levantamiento por sismo
	Solo para vigas soportantes de cargas y sus conexiones:	
9	$1.2D + 1.6L + 0.5(S \text{ o } R) + 1.4P + 1.4I$	Impacto

Donde:

D = Carga muerta

L = Carga viva aparte de los pallets o los productos almacenados en los racks. (Ejemplo: carga en el piso de eventuales plataformas adosadas a los racks)

Lr = Carga viva del techo como se determina en ASCE 7 Sec. 4.9

S = Carga de nieve determinada de acuerdo a ASCE 7 Capítulo 7.

R = Carga de lluvia determinada de acuerdo a ASCE 7 Capítulo 8.

W = Carga de viento

E = Carga de sismo

I = Carga de impacto sobre una bandeja (Sección 2.3)

P = Carga máxima de los pallets o los productos almacenados en los racks.

P_{app} = Para el levantamiento del rack producto de la acción sísmica: la porción de la carga del pallet que es usada para calcular el corte sísmico basal.

Para el levantamiento del rack debido al viento: Se considerará sólo las cargas de pallets presentes para desarrollar las fuerzas laterales de viento en P_{app} . P_{app} será cero para un rack sin carga que soporta un revestimiento exterior.

ρ = Factor de redundancia para carga sísmica (Ver G.1.4)

β = Coeficiente sísmico de la carga de producto

$\beta = 0.7$

$\beta = 1.0$ para combinaciones de carga que consideran el levantamiento de la estructura

G.1.3 Combinaciones de carga para el diseño de conexiones y riostras

En el diseño de:

- conexiones viga- columna
- riostras
- conexiones riostras – columnas

Se deben considerar fuerzas horizontales actuando en combinación con las cargas verticales máximas correspondientes a la carga muerta (D), la carga de almacenamiento (P) y la carga viva (L).

La carga horizontal corresponde a la carga más crítica entre:

- a) Carga sísmica
- b) Carga de viento
- c) $-1.5\% D + 1.5\% P$ (para diseño ASD)
- d) $1.5\% (1.4 D) + 1.5\% (1.2 P)$ (para diseño LRFD)

Estas cargas deben ser consideradas de forma no simultánea en cada una de las dos direcciones principales del rack.

G1.4 Factor de redundancia sísmica, ρ

Este factor toma en cuenta la redundancia estructural del rack y solo tiene efecto cuando el diseño corresponde a una Categoría de Diseño Sísmico, D, E o F según la normativa norteamericana. La Categoría de Diseño Sísmico depende a su vez, de la clasificación de riesgo sísmico de la zona y del valor de la respuesta espectral S_{D1} .

Para las Categorías de Diseño Sísmico, A, B o C (riesgo sísmico bajo) este factor toma normalmente el valor $\rho = 1.0$.

Para las Categorías de Diseño Sísmico, D, E o F (riesgo sísmico alto) este factor toma normalmente el valor $\rho = 1.3$.

Este factor puede tomar el valor $\rho = 1.0$ si cuando hay 2 o más marcos resistentes actuando en conjunto y si el retiro de una riostra (o de su conexión) implica la reducción de la resistencia sísmica en menos de un 33%.

G.2 Combinaciones de carga Norma EN

G.2.1 Combinaciones generales de carga

De acuerdo a los eurocódigos y específicamente la norma EN, se considera un método de diseño que tiene características parecidas al método LRFD. Se considera cargas mayoradas por un factor γ . La combinación de carga E_d se define como:

$$E_d = \sum Y_{GA} G_k \text{ "+" } Y_{QA} \psi_{2,i} Q_{k,l} \text{ "+" } A_{E,d} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

"+" significa "se combina con"

Σ significa "los efectos combinados de"

G_k = valor característico de las cargas permanentes (dead loads)

$Q_{k,l}$ = valor característico de las cargas variables

$A_{E,d}$ = valor de diseño de la acción sísmica para un cierto periodo de retorno

Y_{GA} = factor de seguridad parcial para las cargas permanentes = 1.0

Y_{QA} = factor de seguridad parcial para las cargas variables = 1.0

$\psi_{2,i}$ = coeficiente de reducción parcial para las cargas variables

$\psi_{2,1}$ = 1.0 para las cargas unitarias

$\psi_{2,2}$ = 1.0 para las cargas de piso en las áreas de almacenamiento

$\psi_{2,3}$ = 0.5 para pisos y pasarelas adosadas a racks.

La normativa europea también señala lo siguiente:

a) Las cargas (o acciones) que deben considerarse en combinación con la carga sísmica:

- 1) cargas muertas (acciones permanentes)
 - * peso de la estructura
 - * peso de equipos fijados a la estructura
- 2) Carga de pallets (variable)
- 3) Cargas vivas (variable)
- 4) Cargas de piso y pasarelas
- 5) Equipos de manejo mecánico soportados por los racks

b) Las cargas (o acciones) que no deben combinarse con la carga sísmica.

- 1) cargas de viento
- 2) cargas de posicionamiento vertical
- 3) cargas de posicionamiento horizontal
- 4) empuje en barandas
- 5) cargas de temperatura
- 6) imperfecciones generales
- 7) cargas de impacto

G.2.2 Combinación de las componentes del sismo horizontal

De acuerdo a la norma EN se debe combinar las componentes del sismo horizontal E_x , E_y de acuerdo con:

- a) $E_{Edx} + 0.30 E_{Edy}$
- b) $0.30 E_{Edx} + E_{Edy}$

"+" significa " se combina con "

G.2.3 Combinación del sismo horizontal con sismo vertical

En caso que las componentes horizontales del sismo sean relevantes para los elementos que son afectados por el sismo vertical, E_z , se deben considerar las siguientes combinaciones:

- a) $0.30 E_{Edx} + 0.30 E_{Edy} + E_{Edz}$
- b) $E_{Edx} + 0.30 E_{Edx} + 0.30 E_{Edz}$
- c) $0.30 E_{Edx} + E_{Edy} + 0.30 E_{Edz}$

Al igual que antes "+" significa " se combina con "

H) Dilatación sísmica de racks

H.1 Dilatación sísmica de racks – Norma RMI

Se debe contemplar una dilatación mínima, δ_x , entre un rack y la estructura del edificio. Esta dilatación corresponde al desplazamiento calculado mediante un análisis elástico, δ_x , afectado por un factor de amplificación, C_d , y el factor de importancia, I_p .

$$x = (C_d \times \delta_x) / I_p \quad (\text{Ec.9})$$

C_d = Factor de amplificación del desplazamiento

$$\begin{aligned} C_d &= 3.5 \text{ en la dirección arriostrada} \\ C_d &= 5.5 \text{ en la dirección no arriostrada} \end{aligned}$$

De forma alternativa, se puede utilizar los siguientes valores para la dilatación:

$$\begin{aligned} \delta_x &= 0.02 h_{\text{total}} \text{ en la dirección arriostrada} \\ \delta_x &= 0.05 h_{\text{total}} \text{ en la dirección no arriostrada} \end{aligned}$$

h_{total} es la altura de la bandeja superior del rack.

H.2 Dilatación sísmica de racks – Norma EN

La norma EN no especifica dilataciones máximas para los racks.

Indica sin embargo que se debe verificar que no se produzcan colisiones:

- entre racks no conectados entre sí,
- entre racks y estructuras adyacentes. Esto último debe evaluarse tomado en cuenta el desplazamiento de la estructura vecina.

I) Capacidad rotacional de la unión viga-columna

I.1 Capacidad rotacional de la unión viga-columna – Norma RMI

Se debe evaluar la capacidad rotacional máxima de la unión viga columna, Θ , mediante ensayos. Se debe demostrar que esta capacidad es mayor que la demanda rotacional, Θ_D .

La demanda rotacional, Θ_D , es función de la altura total del rack y el desplazamiento sísmico del rack amplificado.

De acuerdo al punto 2.6.4 de la norma ANSI MH16.1: 2012:

$$\Theta_D = \frac{C_d(1+\alpha_s)\Delta_s}{h_{total}}$$

Θ_D : Demanda de desplazamiento teórica.

C_d : Factor de amplificación de deflexión.

α_s : Primera iteración del término de amplificación de segundo orden calculado usando un análisis apropiado, como el provisto en la sección 2.6.4 de los comentarios de la norma.

Δ_s : Desplazamiento sísmico calculado en el nivel más alto que se encuentre cargado.

h_{total} : Altura del nivel más alto que se encuentre cargado.

No se requiere verificar la capacidad rotacional de la unión viga-columna si se cumplen las dos condiciones siguientes:

El rack corresponde a alguna de la Categorías de Diseño Sísmico, A, B o C (riesgo sísmico bajo)

El coeficiente de respuesta sísmica ha sido calculado con su valor máximo: $C_s = S_{DS} / R$

I.2 Capacidad rotacional de la unión viga-columna – Norma EN

La norma EN establece que los marcos rígidos debe ser capaces de desarrollar rótulas plásticas ya sea en la vigas o en las uniones viga-columna.

Las uniones deben tener una capacidad de rotación, q , consistentes con las deformaciones que se obtienen de un análisis global de la estructura y con el factor de desempeño, q , asumido.

El efecto de las deformaciones de las conexiones en el desplazamiento global de la estructura (drift) se toma en cuenta realizando un análisis estático no lineal (pushover) o un análisis tiempo - historia no lineal.

J) Área neta de la sección

J.1 Área neta de la sección – Norma RMI

El hecho que los elementos de la estructura del rack tengan perforaciones, es considerado por la norma RMI a través de un factor Q. Este factor afecta el cálculo de las propiedades de la sección utilizadas en el diseño (área neta, módulo resistente). Este factor se determina mediante ensayos indicados en la norma.

Básicamente se trata de ensayar a la compresión columnas cortas (que no estén afectas a pandeo general) hasta obtener su carga última a causa de fallas locales.

El factor Q es entonces:

$$Q = \text{carga última de columna corta} \quad (\text{Ec.10})$$

$$\text{con,} \quad F_Y A_{\text{NET MIN}}$$

$A_{\text{NET MIN}}$: Área neta calculada en la sección más desfavorable a través de las perforaciones.
 F_Y : Tensión de fluencia
Q en ningún caso debe ser mayor a 1.

J.2 Área neta de la sección – Norma EN

La norma EN considera el área neta, A_{net} sólo para el cálculo de la capacidad de las riostras.

K) Evaluación del volcamiento

K.1 Evaluación del Volcamiento – Norma RMI

La norma RMI establece que se debe controlar el volcamiento bajo dos condiciones:

1. Peso propio del rack + todos los niveles con un factor de ocupación de 67%
2. Peso propio del rack + solo el nivel de almacenaje más alto cargado en un 100%

En el diseño se debe considerar la altura del centro de masa de la carga almacenada. A menos que todas las columnas estén ancladas, la relación momento resistente / momento volcante debe ser > 1.5 .

La relación altura del rack/ancho del rack no debe ser > 6 , de lo contrario deben considerarse pernos de anclaje o algún arriostamiento externo.

K.2 Evaluación del Volcamiento – Norma EN

La norma EN indica que el diseñador debe evaluar la estabilidad del rack.

De acuerdo a la norma EN, se debe tomar en cuenta la posición del centro de gravedad de la carga de los pallets respecto del nivel de las vigas soportantes (excentricidad vertical).

De acuerdo al punto 2.3.7 de la norma, solo se puede despreciar en el análisis en el sentido longitudinal de los racks, cuando este tenga más de 5 tramos.

Patrocinado por

