

Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sismorresistente

Conceptos de diseño Sismorresistente.

Método de las fuerzas

Dr. Francisco J. Crisafulli

Profesor Titular

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
1. OBJETIVO Y CONTENIDOS	3
2. INTRODUCCION Y CONCEPTOS GENERALES.....	3
2.1 Ingeniería estructural.....	3
2.2 La estructura.....	3
2.1 Clasificación de las estructuras.....	4
2.2 Materiales estructurales	8
2.3 Diseño estructural.....	9
3 RIESGO SÍSMICO Y INGENIERÍA SÍSMICA	10
4 DISEÑO SISMORRESISTENTE.....	12
4.1 Introducción	12
4.2 Métodos de diseño sismorresistente.....	13
4.3 Rigidez, resistencia, ductilidad y disipación de energía	14
5 MÉTODO DE LAS FUERZAS	17
5.1 Aspectos conceptuales.....	17
5.2 Factor de modificación de respuesta R.....	19
5.3 Factor C_d	22
5.4 Definición de la acción sísmica: espectro de diseño	22
5.5 Métodos de análisis	24
5.6 Control de los desplazamientos laterales. Distorsión de piso	24
5.7 Proceso de diseño sismorresistente.	26
6 DISEÑO POR CAPACIDAD.....	29
6.1 Aspectos conceptuales.....	29
6.2 Método “Neozelandés”	30
6.3 Método del factor de sobrerresistencia Ω_o	31
6.4 Método basado en el análisis dinámico temporal no lineal	32
6.5 Método de superposición modal efectiva.....	33
7 DISEÑO BASADO EN DESEMPEÑO	33
8 SISTEMAS AVANZADOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	35
9 REHABILITACIÓN SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES	40
9.1 Aspectos generales	40
9.2 Estrategias de rehabilitación	41
10 BIBLIOGRAFÍA	43

Conceptos de diseño Sismorresistente. Método de las fuerzas

1. OBJETIVO Y CONTENIDOS

El objeto principal de esta guía de estudio es presentar los aspectos conceptuales sobre diseño sismorresistente y su aplicación mediante el método de las fuerzas para los estudiantes de la asignatura Ingeniería Sismorresistente de la carrera de Ingeniería Civil, si bien pueden resultar de utilidad para otras asignaturas vinculadas a la ingeniería estructural. En la Sección 2 se incluyen algunos conceptos básicos sobre estructuras y diseño estructural, como introducción, para luego presentar los temas específicos de esta guía de estudios. Es importante aclarar que en esta guía de estudio se presentan en forma general y conceptual que luego serán profundizados al estudiar otros temas, por ejemplo, el método estático, el análisis dinámico modal, el diseño y análisis de edificios, etc.

2. INTRODUCCION Y CONCEPTOS GENERALES

2.1 Ingeniería estructural

La ingeniería estructural es la ciencia y el arte de proyectar, construir, mantener y rehabilitar el sistema estructural, temporario o permanente, de las obras civiles, cumpliendo con todos los requisitos de seguridad, funcionalidad, durabilidad, estética, factibilidad de ejecución (constructiva y económica) y sustentabilidad. Esta tarea implica definir los materiales y tipos estructurales a utilizar, identificar y cuantificar las cargas actuantes en la estructura a lo largo de su vida útil, determinar las dimensiones, configuración y conexiones de los componentes y supervisar la construcción y mantenimiento de la estructura.

La función del ingeniero estructural implica una gran responsabilidad social, debido a que su labor profesional tiene por objeto principal la seguridad de las construcciones civiles, esto es de todas las obras de infraestructura que la sociedad requiere. Aquí se incluyen edificios de distinto tipo, puentes, tanques y otros recipientes, torres, túneles, presas, etc. Los errores en la labor del ingeniero estructural pueden resultar en pérdidas de vidas humanas y generar daños económicos y sociales. Esta responsabilidad social implica también desarrollar una solución económicamente aceptable para resguardar los intereses del propietario, particularmente cuando se trata de obras públicas que se realizan con fondos del estado.

2.2 La estructura

La estructura puede definirse como el conjunto de componentes adecuadamente vinculados entre sí, en forma monolítica o mediante conexiones de distinto tipo, para resistir la acción de las cargas que la solicitan a lo largo de toda su vida útil. Se desprende de esta definición que la función principal de la estructura se relaciona con las condiciones de seguridad, lo que implica cumplir con criterios bien definidos de resistencia, rigidez, ductilidad y estabilidad. Sin embargo, debemos destacar que el objeto principal de una construcción no es soportar cargas, sino cumplir con el fin para el cual fue propuesta.

El sistema estructural es una parte importante de la construcción, pero no la única, la cual integran también instalaciones de servicios, cerramientos, revestimientos, carpintería, equipamiento, etc., dependiendo del destino de la misma. De modo que el diseño estructural queda totalmente condicionado al cumplimiento de una serie de requerimientos que no son de carácter estructural, pero que resultan prioritarios (como se representa esquemáticamente en la Figura 1). En otras palabras, la estructura es una parte imprescindible de la construcción, pero el diseño de la estructura está condicionado por los requerimientos propios de la misma.

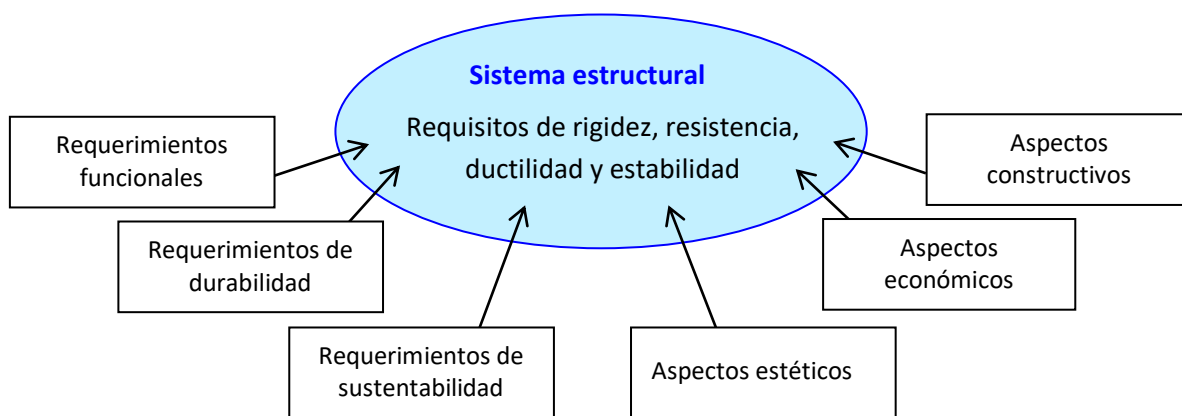


Figura 1. Sistema estructural de una construcción y los distintos requerimientos que lo condicionan.

2.1 Clasificación de las estructuras

La clasificación de las estructuras puede realizarse según distintos criterios. En esta guía de estudio planteamos dos, a saber:

- Según su destino o función
- Según la geometría de los componentes estructurales.

A partir del criterio que considera el destino o función de la construcción, se tienen los tipos de estructuras indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las estructuras según su función.

Tipo de estructura	Destino o función
Edificios	Proporcionar espacio habitable, principalmente por encima del terreno
Puentes	Proporcionar un medio para atravesar un sitio por encima del nivel de terreno
Torres	Soportar por encima del terreno líneas eléctricas, tuberías, dispositivos de transmisión, equipos varios, etc.
Depósitos y contenedores	Almacenar distintos tipo de fluidos, materiales granulares, residuos, etc., o bien aislar y proteger materiales contaminantes (como un reactor nuclear)
Presas	Embalsar agua para su aprovechamiento u otro líquido
Muros de contención	Retener el suelo u otro material
Plataformas	Generar una superficie adecuada para soportar equipos, maquinarias o almacenar materiales, tanto sobre la tierra o fuera de costa.
Túneles	Proporcionar un medio para atravesar un sitio por debajo del nivel de terreno

Otra alternativa es considerar como criterio de clasificación la geometría de los componentes estructurales. De este modo podemos dividir las estructuras en tres grupos: estructuras de barras, estructuras de superficie y estructuras volumétricas. En la Tabla 2 se presenta la descripción y ejemplos de cada caso. Esta clasificación puede servir con una primera ayuda para la modelación de la estructura,

que en la actualidad se realiza usualmente con distintos programas de computación basados en el método de los elementos finitos. Así por ejemplo, una estructura de barra, como un pórtico, se modela usualmente con elementos tipo viga (elemento lineal de dos nodos). Los modelos para representar estructuras de superficie y volumétricas usualmente se implementan utilizando elementos finitos planos (por ejemplo, de 3 o 4 nodos) y elementos sólidos, respectivamente.

Tabla 2. Clasificación de las estructuras según la geometría de sus componentes.

Tipo de estructura	Descripción y ejemplos
Estructuras de barras	Estructuras formadas por miembros de desarrollo lineal (una dimensión predomina frente a las otras dos). Ejemplos: pórticos, reticulados.
Estructuras de superficie	Estructuras de desarrollo superficial (dos dimensiones predominantes frente a la tercera). Las superficies pueden ser planas o curvas. Ejemplos: losas, cúpulas, bóvedas, tabiques.
Estructuras volumétricas	Estructuras masivas, de desarrollo volumétrico. Ejemplos: presas de gravedad, macizos de fundación.

Las estructuras de superficie, también denominadas estructuras laminares, se emplean en distintos tipos de construcciones, si bien las aplicaciones más usuales son para cubiertas de grandes luces con distintas formas y entresijos. Una primera y simple clasificación de las estructuras de superficie surge de considerar que se dividen en superficies planas y curvas. Sin embargo, se pueden plantear otras clasificaciones que consideran las propiedades geométricas de la superficie o el método de generación de las mismas. Si bien en la bibliográfica específica del tema se encuentran distintas clasificaciones, presentamos en esta publicación dos alternativas. En la primera, las superficies se dividen en regladas y no regladas, como se indica en la Tabla 3. Se entiende por superficie reglada aquella generada por una recta, denominada generatriz, al desplazarse sobre una o varias líneas rectas o curvas, denominadas directrices. A modo de ejemplo podemos indicar que el plano, el cono y el cilindro son superficies regladas mientras que la esfera y el elipsoide son no regladas. A su vez, las superficies regladas pueden ser desarrollables (dicho coloquialmente, una superficie desarrollable es aquella que puede ser construida a partir de un papel plano mediante "doblado") o alabeadas (son las superficies regladas no desarrollables). Cabe señalar que las superficies regladas también pueden ser de revolución, tales como los conos y cilindros cuyas directrices son circunferencias y el hiperboloide de una hoja cuyas secciones con planos perpendiculares al eje, también son circunferencias.

Tabla 3. Clasificación de las superficies.

Regladas	Desarrollables: plano, cilindro, cono, etc.
	Alabeadas: paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de una hoja, etc.
No regladas	De revolución: esfera, paraboloides, toro
	De traslación (o evolución)
	Superficies de forma libre

Se puede plantear otra clasificación de las superficies considerando tres grupos principales: superficies de revolución, superficies de traslación y superficies de forma libre (ver Tabla 4). En los dos primeros grupos se considera, además, si la superficie es de simple o doble curvatura. Las superficies de revolución se generan a partir de la rotación de una línea recta o curva alrededor de un eje. Como ejemplos típicos

podemos mencionar el cono y el cilindro (simple curvatura) o la esfera y el hiperboloide de una hoja (doble curvatura). Las superficies de traslación se generan por el movimiento de una curva plana a lo largo de otra curva plana. Las bóvedas por ejemplo, poseen una forma geométrica generada por el movimiento de un arco generatriz a lo largo de un eje.

Esta clasificación geométrica de las superficies resulta conveniente para modelación analítica del comportamiento estructural, en el cual la estructura se representa matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales. En esta formulación, el o los radios de curvatura son las variables principales que se emplean para definir matemáticamente la superficie bajo estudio (para mayor información puede consultarse el texto de Odone Belluzzi, Ciencia de la construcción, Tomo III).

Tabla 4. Clasificación de las superficies.

Superficie de revolución	Simple curvatura: cilindro, cono
	Doble curvatura: esfera, hiperboloide de una hoja
Superficie de traslación	Simple curvatura: bóvedas de cañón
	Doble curvatura: bóvedas de arista
Superficie de forma libre	

Es importante aclarar que las dos clasificaciones de las superficies presentadas en las Tablas 3 y 4 no son complementarias entre sí, por el contrario, constituyen dos enfoques diferentes para agrupar a todas las superficies a partir de cómo se generan las mismas. Adicionalmente, debemos mencionar que en las construcciones reales es frecuente que se combinen distintos tipos de estructuras como se muestra en los ejemplos de la Figura 2, donde observamos un tanque para almacenamiento de combustibles y una losa apoyada en columnas. En el primer caso, la estructura está formada por distinto tipo de superficies: una losa plana de hormigón armado (fondo), una superficie cilíndrica de acero (paredes) y otra superficie cónica (techo). En el segundo ejemplo, vemos una losa plana (estructura de superficie) que apoya en una serie de columnas (estructura de barras).

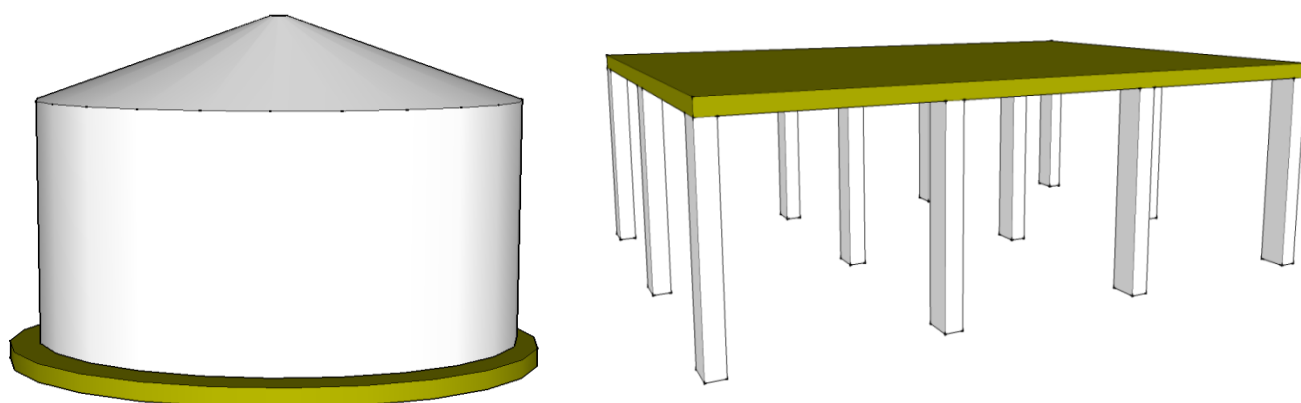


Figura 2. Ejemplos de construcciones que combinan distinto tipo de estructuras.

Las superficies de forma libre, que presentan formas complejas difíciles de representar matemáticamente y de materializar constructivamente, se han comenzado a utilizar en construcciones civiles en las últimas décadas, fundamentalmente como resultado del desarrollo de programas computacionales para el diseño asistido y el análisis estructural. Para la generación de las superficies libres se emplean herramientas de diseño asistido por computadora, las que usualmente aplican para estas tareas algoritmos basados en curvas parametrizadas que se expresan como combinaciones lineales de

funciones *B-Spline* (puede traducirse como línea polinómica suave básica), particularmente *B-splines* racionales no uniformes o NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*). Estas herramientas se desarrollaron originalmente para el diseño de las carrocerías de automóviles, pero luego su uso se extendió también al diseño arquitectónico. Actualmente, diversos programas de computación gráfica y CAD (por ejemplo, Rhinoceros, SolidWorks, etc.) utilizan esta metodología. Así ha sido posible diseñar, analizar y construir edificaciones como las que mostramos en la Figura 3.



Figura 3. Imágenes del Museo Guggenheim Bilbao, España (Frank Owen Gehry, 1997) y del Centre Pompidou, Metz, Francia (Shigeru Ban y Jean de Gastines, 2010).

Desde el punto de vista conceptual, la clasificación de las estructuras es un aspecto importante. Es por ello, que cuando estudiemos el tema de edificios sismorresistentes analizaremos en detalle los tipos estructurales o morfología estructural y discutiremos su relación con el modelo estructural empleado para el análisis.

El estudio de los tipos estructurales, o morfología estructural, es un tema que en general no se trata con frecuencia en la bibliografía propia de la ingeniería estructural, si bien tiene una importancia significativa desde el punto de vista conceptual. Estos textos usualmente se concentran en temas específicos de análisis, cálculo y dimensionamiento. Por el contrario, en diversos textos sobre estructuras destinados a arquitectos se encuentran clasificaciones y estudios sobre los tipos estructurales.

La ingeniería estructural, como cualquier disciplina técnica, emplea una terminología bien definida que permite expresar con precisión y sin ambigüedades los distintos conceptos, variables y métodos que le son propios. En esta publicación, proponemos una clasificación de las estructuras, ver Tabla 5, en la que las mismas se dividen según dos criterios bien definidos: en primer lugar, se dividen en tres grupos principales, considerando una condición geométrica (estructuras con elementos lineales, superficiales o volumétricos), y luego cada uno de esos grupos se subdividen teniendo en cuenta el tipo de esfuerzos que en ellos se desarrollan. De esta forma, consideramos que la clasificación propuesta contribuye a comprender conceptualmente el comportamiento estructural, con una terminología clara y acorde a la disciplina. En forma deliberada, no hemos considerado algunas propuestas de clasificación de estructura que se presenta en libros o publicaciones de arquitectura, dado que emplean una terminología inadecuada, o incluso incorrecta desde el punto de vista estructural.

Tabla 5: Clasificación de las estructuras según su geometría y esfuerzos que en ellas se generan.

Tipos de estructuras		Ejemplos	Materiales usuales	
Estructuras de barra o miembros prismáticos	Estructuras de tracción o compresión pura	Tracción	Cables y redes	Acero
		Compresión	Arcos	Hormigón estructural, mampostería
	Estructuras de tracción y compresión simultánea predominante		Reticulados, pórticos arriostrados concéntricamente	Acero, madera, hormigón estructural
	Estructuras de flexión predominante		Vigas, emparrillados, pórticos planos o espaciales	Hormigón estructural, acero, madera
Estructuras laminares o de superficie	Membranas (esfuerzos axiales y tangenciales)	Planas	Tabiques o muros con carga en su plano	Hormigón estructural, mampostería armada, acero, madera.
		Curvas	Cúpulas y bóvedas con condiciones de vínculo adecuadas	Hormigón estructural, acero, mampostería
	Membranas textiles tensadas		Poliéster, PVPC, polímeros, etc.	
	Placas (esfuerzos de flexión)	Planas (losas)	Losas Tabiques o muros en general	Hormigón estructural, acero, madera, mampostería
		Curvas (cáscaras)	Cúpulas y bóvedas en general	Hormigón estructural, acero, mampostería
Estructuras masivas o volumétricas			Presas de gravedad, bases de fundación, terraplenes, escolleras	Hormigón estructural, suelos, rocas

2.2 Materiales estructurales

El sistema estructural se compone de diversos elementos o miembros (vigas, columnas, losas, bases, etc.), los que pueden construirse utilizando uno o varios materiales estructurales. El empleo de más de un material en una misma estructura es una alternativa usual para optimizar el diseño, buscando potenciar las ventajas de cada uno y contrarrestar sus limitaciones. Para ello, es necesario que el diseñador conozca no solo las propiedades de cada material desde el punto de vista estructural, sino también otros aspectos tales como requerimientos constructivos, costos, durabilidad, etc. En la selección de los materiales estructurales, el diseñador debe

En esta guía de estudio no vamos a analizar cada uno de los materiales estructurales y su comportamiento. Simplemente, a modo de resumen, presentamos una lista de los más usuales:

- a) Acero estructural
- b) Acero inoxidable
- c) Aluminio
- d) Hormigón simple
- e) Hormigón reforzado:
 - Hormigón armado
 - Hormigón pretensado o postensado
 - Hormigón reforzado con fibras (sintéticas o de acero).

- f) Madera:
 - Madera aserrada o maciza
 - Madera laminada (*glulam*)
 - Contrachapado fenólico estructural (*structural plywood*)
 - OSB (oriented strand board): paneles de virutas orientadas (Newpanel)
 - LVL (*laminated veneer lumber*): tableros de madera microlaminada
 - CLT (*cross laminated timber*): madera laminada cruzada
- g) Mampostería:
 - Mampostería encadenada (con o sin armadura horizontal)
 - Mampostería reforzada con armadura distribuida
- h) Polímeros reforzados con fibras de vidrio, carbono o aramida (PRF)
- i) Vidrio
- j) Suelos y rocas

En la lista precedente no hemos incluido el **adobe** por considerar que no reúne las propiedades mínimas necesarias para cumplir los requisitos de resistencia y durabilidad propios de las construcciones sismorresistentes. Tampoco se incluye el **hierro fundido** y el **bambú**, porque actualmente tienen una aplicación limitada.

2.3 Diseño estructural

La palabra “diseño”, de acuerdo al diccionario, significa “traza, delineación de un edificio o de una figura”, “descripción, bosquejo de una cosa, hecho por palabras”, o también “proyecto, plan”. En particular, el término “diseño estructural” se usa en distintos contextos. En algunos casos se refiere al proceso completo de seleccionar y proyectar el sistema estructural de una obra determinada, cumpliendo con los requisitos de seguridad, funcionalidad, durabilidad, factibilidad de ejecución y sustentabilidad (esto es cumpliendo con los objetivos propios de la ingeniería estructural). Sin embargo, existen también otras interpretaciones más limitadas que la anterior. Por ejemplo, en algunos casos se considera que diseño estructural representa solo la etapa creativa y conceptual mediante la que se selecciona el sistema estructural para una determinada construcción. Alternativamente, también se usa el término diseño (especialmente en la bibliografía técnica en inglés) para referirse al proceso de dimensionamiento de miembros de un determinado material (por ejemplo, *reinforced concrete design*). Nosotros emplearemos el término diseño estructural a partir de la definición más amplia, entendiendo como tal a todo el proceso completo, que incluye la fase conceptual y también otros aspectos más sistemáticos y específicos como el análisis estructural y el dimensionamiento de los elementos resistentes.

El diseño estructural es un proceso complejo que requiere del diseñador no solo sólidos conocimientos estática, resistencia de materiales, análisis estructural, dimensionamiento, etc., sino también creatividad y experiencia. Para resumir este proceso, presentamos en la Figura 4 un esquema indicativo con los distintos pasos, los que podemos agrupar en dos etapas principales. La primera incluye los aspectos conceptuales requeridos para definir la estructura más conveniente para la obra. La experiencia del diseñador juega un rol fundamental al momento de seleccionar los materiales y tipos estructurales, como así también la configuración espacial según la cual se disponen los mismos para resistir y transferir todas las cargas actuantes de los puntos de aplicación hasta los vínculos. Es una etapa de “lápiz y papel”, que requiere de imaginación para proponer y evaluar distintas alternativas. Resulta de gran importancia que el diseñador tenga la capacidad de analizar las ventajas y limitaciones de estas alternativas, con el objeto de llegar a una solución compatible con los requerimientos estructurales y los requisitos propios de la construcción que se estudia.

La segunda etapa abarca los distintos pasos que aseguran que la estructura cumple los requisitos de seguridad y funcionalidad, de acuerdo con las reglamentaciones vigentes. Se requiere de la aplicación de

métodos específicos para la evaluación de acciones, análisis estructural, dimensionamiento y verificación de componentes estructurales, cálculo de conexiones y fundaciones, etc. Es una etapa analítica, donde las herramientas computacionales representan una ayuda de gran importancia para simular el comportamiento estructural y realizar las distintas verificaciones. Es importante destacar, sin embargo, que las herramientas computacionales deben utilizarse en forma racional, conociendo las hipótesis de cálculo y asegurando que los datos ingresados representan en forma aceptable la estructura que se analiza. Las simulaciones computacionales arrojan una gran cantidad de resultados, los que deben revisarse para asegurar su validez. Para ello es necesario comprender conceptualmente el comportamiento de la estructura, aplicar juicio crítico y realizar verificaciones manuales simples.

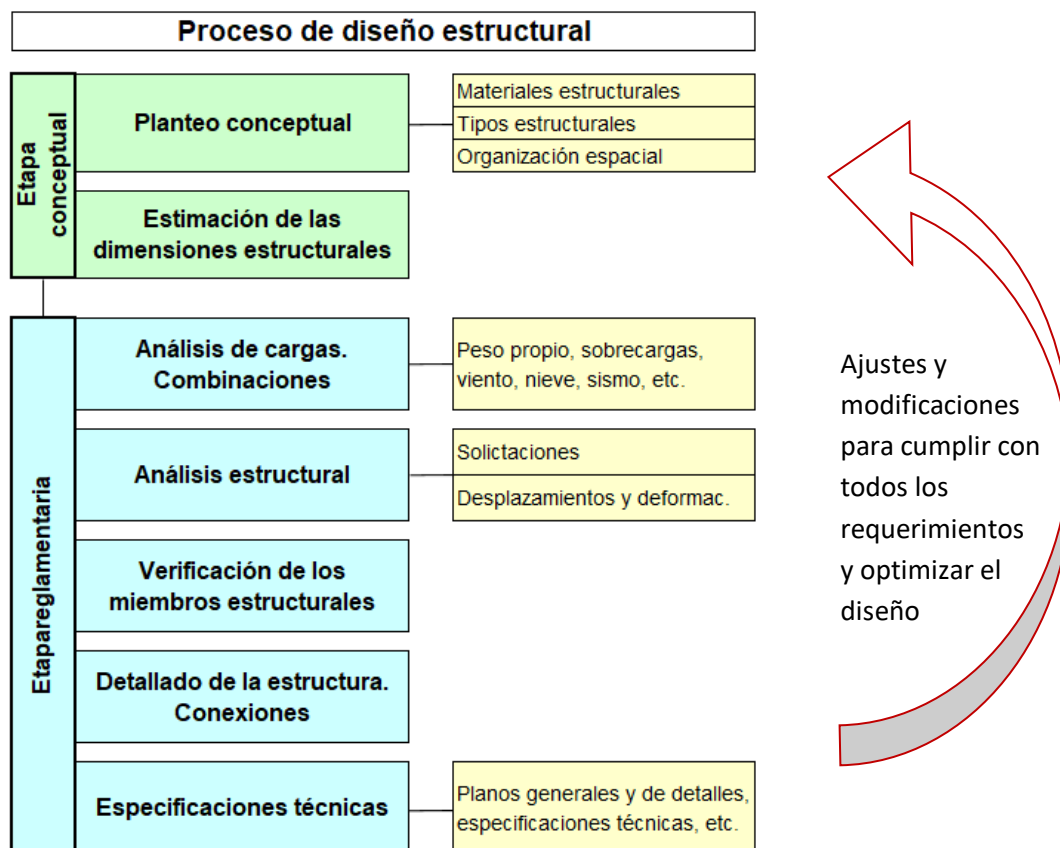


Figura 4. Esquema indicativo de las etapas del proceso de diseño estructural.

El diseño estructural generalmente no es un proceso secuencial, sino que a medida que se avanza en el proceso es necesario realizar comprobaciones cualitativas o cuantitativas que eventualmente puede requerir la realización de modificaciones y ajuste para optimizar el diseño, y lograr una solución más conveniente, o para cumplir con los requerimientos del caso (estructurales, reglamentarios, funcionales, etc). Estos ajustes pueden implicar modificaciones menores, como incrementar las dimensiones de algunos elementos estructurales, o bien cambios significativos, como adoptar una nueva organización espacial o utilizar otros materiales estructurales. Esta situación la representamos esquemáticamente en la Figura 4 mediante la flecha que indica volver atrás en el proceso en un determinado paso y reiterar los pasos ya realizados con las nuevas condiciones adoptadas.

3 RIESGO SÍSMICO Y INGENIERÍA SÍSMICA

La humanidad ha experimentado a lo largo de su historia el efecto destructivo de los terremotos. En el siglo XX, estas catástrofes naturales han ocasionado una media anual del orden de 14.000 muertos, por

encima de otros desastres como ciclones, huracanes, inundaciones, avalanchas y erupciones volcánicas. Adicionalmente, originan cuantiosas pérdidas económicas como resultado del daño en las obras de infraestructura pública y construcciones privadas, lo que impacta negativamente en el desarrollo de las zonas afectadas. Latinoamérica no es ajena a esta situación y muchos de sus países han sufrido el efecto devastador de estos eventos.

En el año 1910 la Sociedad Sismológica de América identificó los tres aspectos principales del problema sísmico: el terremoto en sí mismo (cuándo, dónde y cómo ocurren los sismos), el movimiento del terreno asociado y su efecto sobre las construcciones. Los dos primeros aspectos representan la peligrosidad o amenaza sísmica de un determinado lugar, mientras que el tercer aspecto se vincula la vulnerabilidad. Ésta puede definirse como la susceptibilidad o predisposición de las construcciones a sufrir daño ante la ocurrencia de fenómenos desestabilizantes de origen natural o antropogénico. A partir de consideraciones holísticas, algunos autores amplían el concepto de vulnerabilidad considerando no sólo las obras o construcciones sino toda la comunidad.

El riesgo sísmico, en términos generales, puede interpretarse como una medida de las pérdidas potenciales (económicas, sociales, ambientales, etc.) que pueden originar los sismos en un periodo de tiempo especificado. Desde un punto de vista más técnico, el riesgo sísmico surge como resultado de la interacción de dos variables principales: la amenaza sísmica y la vulnerabilidad. De ahí la importancia de no confundir amenaza y riesgo, como muchas veces ocurre en la práctica. En resumen, la amenaza sísmica describe el potencial que presenta el fenómeno, por ejemplo, en términos de sacudimiento, y que obviamente puede resultar en consecuencias desfavorables para la sociedad y sus obras de infraestructura. El riesgo sísmico cuantifica la probabilidad de ocurrencia de esas consecuencias.

No es posible actualmente modificar la amenaza sísmica, pero la ingeniería sí dispone de soluciones para reducir la vulnerabilidad de las construcciones, y por ende el riesgo sísmico. La experiencia recogida a lo largo de décadas indica, sin lugar a dudas, que el daño producido por los sismos puede controlarse y reducirse a niveles aceptables mediante medidas sistemáticas de prevención. La formulación de estas medidas debe realizarse en forma integral, con criterio multidisciplinario e incluyendo no solo aspectos ingenieriles, sino también consideraciones sociales, educacionales, de manejo de emergencia, etc. No obstante, es obvio que uno de los aspectos claves para asegurar el éxito de este proceso se vincula con la seguridad estructural de las construcciones sismorresistentes.

La ingeniería de terremotos o ingeniería sísmica (*earthquake engineering*) puede definirse como la integración de conocimientos multidisciplinarios con el objetivo de proteger a la sociedad y al ambiente de los terremotos, reduciendo el riesgo sísmico a niveles aceptables desde el punto de vista social y económico. Dentro de este marco general, la ingeniería sismorresistente es una disciplina relativamente nueva que se encarga de estudiar el comportamiento de las construcciones de modo de diseñarlas y construirlas para que respondan adecuadamente ante la acción sísmica, integrando conocimientos de ingeniería estructural, ciencia de los materiales, geotecnia, sismología, etc. Si bien resulta difícil indicar con precisión cuándo y dónde se originó, lo cierto es que surgió como una necesidad imperiosa para controlar el efecto de los sismos. Los terremotos de San Francisco, EEUU, en 1906, de Reggio-Mesina, Italia, en 1908, pueden considerarse como hechos claves que mostraron la vulnerabilidad de los centros urbanos ubicados en zonas sísmicas y originaron un cambio significativo en los criterios de cálculo de la época. Este proceso continuó impulsado por sismos posteriores como el de Kanto, Japón, 1923 y el de Hawke's Bay, Nueva Zelanda, 1931, y posteriormente, la experiencia recogida *in situ* tras la ocurrencia nuevos terremotos, la investigación analítica y experimental y el desarrollo de reglamentos de diseño sismorresistente han contribuido para un avance continuo y significativo durante los últimos 100 años.

En la actualidad la ingeniería sismorresistente dispone de soluciones adecuadas que permiten reducir el riesgo sísmico mediante el uso de distintos materiales estructurales, sistemas constructivos,

dispositivos innovadores para el control de vibraciones, criterios de diseño y métodos de análisis confiables.

Sin embargo, la reducción del riesgo sísmico no se ha alcanzado en forma uniforme a escala mundial. Ello se debe a distintas razones, algunas de las cuales no son de carácter técnico o ingenieril sino social, cultural y económico. Es por ello que uno de los mayores desafíos, particularmente en Latinoamérica, es lograr la implementación práctica de las soluciones que la ingeniería sismorresistente ha desarrollado tanto para construcciones nuevas como para la rehabilitación de estructuras existentes que no cumplen con los niveles de seguridad requeridos en la actualidad. Uno de los problemas que se observa reiteradamente en regiones afectadas por los terremotos es la discrepancia entre los criterios de diseño y la estructura realmente construida. Por desconocimiento, negligencia o razones económicas se realizan modificaciones en obra que luego conducen al daño o colapso de los componentes estructurales.

4 DISEÑO SISMORRESISTENTE

4.1 Introducción

Los sismos son eventos con baja probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias pueden ser tremendas en términos de destrucción y del sufrimiento que provocan. Por estas razones el diseño de estructuras sismorresistentes presenta particularidades que lo distinguen del diseño para otro tipo de acciones como cargas gravitatorias o viento.

Los códigos de diseño estructural usualmente indican el nivel general de protección que debe esperarse de ellos. Para las estructuras sismorresistentes la mayoría de los códigos establece requerimientos mínimos para asegurar la protección de la vida humana (esto es, evitar el colapso parcial o total) pero sin controlar el daño que puede resultar de la acción sísmica severa. En general los objetivos de diseño pueden resumirse en los siguientes:

- Para sismos de intensidad reducida: sin daños.
- Para sismos de intensidad moderada: daño limitado en los componentes estructurales
- Para sismos severos (sismo de diseño): prevención del colapso, si bien se aceptan daños en componentes estructurales, no estructurales y contenidos.

Si bien estos objetivos son generalmente aceptados, tanto por las reglamentaciones como los ingenieros estructurales, en la práctica no se define qué es un sismo de intensidad reducida o moderada. En general, la mayoría de los reglamentos sólo incluyen el sismo severo como condición para diseñar la estructura.

Las estructuras sismorresistentes, salvo casos especiales, se diseñan para responder en rango inelástico, de modo de desarrollar ductilidad y disipar energía durante la ocurrencia de un terremoto severo. El ingeniero estructural debe comprender adecuadamente el criterio de diseño sismorresistente a los efectos de aplicar correctamente las especificaciones reglamentarias. Este criterio difiere significativamente del aplicado para otros estados de carga, por ejemplo, para acciones laterales por viento, donde la estructura se diseña con el objetivo de permanecer esencialmente en rango elástico. La razón principal de esta diferencia es de orden económico, a los efectos de que los costos de construcción sean aceptables.

Es importante resaltar que la disipación de energía y el comportamiento dúctil de la estructura bajo la acción sísmica solo puede lograrse si los miembros que componen la misma son adecuadamente detallados (para evitar fallas de tipo frágil). Además, el desarrollo de la ductilidad implica la ocurrencia de daño estructural, como resultado de la fluencia del acero y eventualmente de problemas de inestabilidad

como el pandeo local. El daño que produce el terremoto tiene un costo de reparación, pudiendo ser significativo según el tipo y la cantidad de componentes afectados, las técnicas de reparación requeridas, etc.

Algunos terremotos relativamente recientes, como el de Maule, Chile, 2010, y el de Christchurch, Nueva Zelanda, 2011, y otros anteriores como el de Northridge, USA, 1994, han demostrado que la implementación y aplicación efectiva de reglamentos de diseño avanzados permite controlar el colapso y así proteger las vidas humanas. Si bien este es un logro significativo de la ingeniería sísmica, estos terremotos ocasionaron pérdidas económicas de consideración, a un nivel tal que resulta inaceptable para la sociedad.

4.2 Métodos de diseño sismorresistente

Desde comienzos del Siglo XX, la ingeniería sismorresistente ha desarrollado e implementado distintos métodos de diseño, con un grado creciente de complejidad y precisión. En 1909, se dispuso en Italia que los edificios debían diseñarse para soportar una fuerza lateral igual a 1/12 del peso total del edificio. Luego, en 1912 se estableció que debía aplicarse un factor de 1/12 en el primer nivel y de 1/8 para el segundo y tercero, considerando que en ese momento se permitían edificios de hasta tres pisos. De esta forma se introduce el método de las fuerzas estáticas equivalente, simplificando la naturaleza dinámica del problema y los efectos inerciales producidos por la vibración sísmica sobre la masa de la construcción. En 1927, aparece el primer reglamento UBC (*Uniform Building Code*) en Estados Unidos, el que es adoptado por distintas ciudades de ese país. En forma progresiva los métodos de diseño fueron avanzando mediante la mejora en la estimación de la demanda sísmica y la incorporación de procedimientos más confiables para el análisis y verificación de componentes estructurales. Esto ha permitido reducir significativamente la vulnerabilidad de las construcciones sismorresistentes, en la medida que estos procedimientos se implementan en forma efectiva.

El criterio de diseño generalmente aceptado considera que la estructura sometida a la acción sísmica se puede deformar en rango inelástico. Es decir que se asume que la estructura puede desarrollar ductilidad y de esa forma disipar parte de la energía entregada por el sismo, lo que implica daño en la construcción. Usualmente, las reglamentaciones sísmicas definen los objetivos del diseño. En el caso del Reglamento INPRES-CIRSOC 103, 2013, Parte I, se indica que:

Este Reglamento establece los requisitos básicos a cumplir en el diseño, cálculo, ejecución, reparación y refuerzo de las construcciones y de sus partes componentes con el objeto de considerar en ellas el efecto sísmico.

*Las acciones sísmicas de diseño, procedimientos de análisis estructural, requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad, disposiciones constructivas y previsiones generales se establecen con el propósito principal de **evitar colapso total o parcial de la construcción y pérdidas de vida**. No se establece como objetivo limitar los daños ni mantener las funciones de las construcciones luego de la ocurrencia de un terremoto.*

En la actualidad se cuenta con una amplia variedad de procedimientos, ya sea de aplicación reglamentaria o como recomendaciones de diseño, para estructuras en general o para casos particulares. Si bien resulta difícil agrupar estos métodos de diseño sismorresistente, se puede plantear una clasificación general considerando tres tipos principales, de acuerdo al criterio utilizado para definir la demanda sísmica:

- Diseño basado en fuerzas: es el criterio más antiguo y empleado en la práctica, por el cual la demanda se define a partir de un espectro de aceleraciones considerando las propiedades dinámicas de la

estructura. A partir del análisis estructural (estático o dinámico) se determinan las resistencias requeridas para verificar los miembros estructurales. Adicionalmente, se realiza una verificación de los desplazamientos laterales o distorsiones de piso para limitar el daño. Como ejemplo de la implementación de este método se puede mencionar los reglamentos INPRES-CIRSCO 103, ASCE/SEI 7-16 y ANSI/AISC 341-16, etc.

- Diseño basado en desplazamientos: en este caso la demanda sísmica se define a partir de un espectro de desplazamientos. El diseño basado en desplazamiento, cuyo estudio detallado escapa a los alcances del presente trabajo, permite iniciar el proceso a partir de definir condiciones límites de desplazamientos (o deformaciones) que pueden vincularse directamente con niveles de daño o desempeño y luego se realizan las verificaciones vinculadas a la capacidad resistente de la estructura.
- Diseño basado en energía: en esta tercera alternativa, la demanda se define a partir de espectros de energía). Este criterio, si bien resulta muy interesante y claro, desde el punto de vista conceptual, no ha tenido una aplicación difundida.

Para completar esta presentación general de los métodos de diseño sismorresistente es importante mencionar otros procedimientos como el diseño por capacidad y el diseño basado en desempeño (se describen posteriormente en las Secciones 6 y 7). Estos procedimientos son complementarios a los métodos indicados previamente en la clasificación general. Es decir, que el diseño basado en desempeño puede utilizar el método de las fuerzas para cuantificar la acción sísmica e incluir también el diseño por capacidad.

4.3 Rigidez, resistencia, ductilidad y disipación de energía

En esta sección discutiremos tres conceptos básicos de ingeniería estructural, que presentan fundamental importancia en el diseño de estructuras sismorresistentes y caracterizan la respuesta estructural: rigidez, resistencia y ductilidad. Es importante aclarar que estos tres parámetros pueden definirse a distintos niveles dentro de la estructura, ya sea que se considere el material, las secciones, los miembros y conexiones o el sistema estructural completo. En cada uno de esos niveles la respuesta puede representarse mediante una relación entre un parámetro estático y otro cinemático, como se indica en la Figura 5.

La rigidez estructural mide la mayor o menor capacidad para deformarse de un miembro, conexión o estructura y se cuantifica, en general, como la relación entre una fuerza (o momento) y un desplazamiento (o rotación). En estructuras sismorresistentes, resulta de particular interés la rigidez lateral de la estructura, esto es asociada a los desplazamientos de piso. En el caso general de sistemas o miembros con comportamiento no lineal, la definición de rigidez puede variar según el criterio que se use para su determinación, siendo tres los criterios más usuales (ver Figura 6):

- Rigidez inicial: se determina a partir del estado inicial de la estructura, y está dada por la pendiente de la recta tangente a la curva de respuesta en el punto inicial.
- Rigidez tangente: se determina mediante la pendiente de la recta tangente a la curva de respuesta en el punto determinado. La rigidez tangente varía desde un valor máximo inicial a medida que la estructura incursiona en rango no lineal.
- Rigidez secante: es la correspondiente a la de la recta secante definida por el punto inicial y un punto determinado de la curva de respuesta. Su valor varía dependiendo del punto considerado para su determinación, al igual que ocurre con la rigidez tangente.

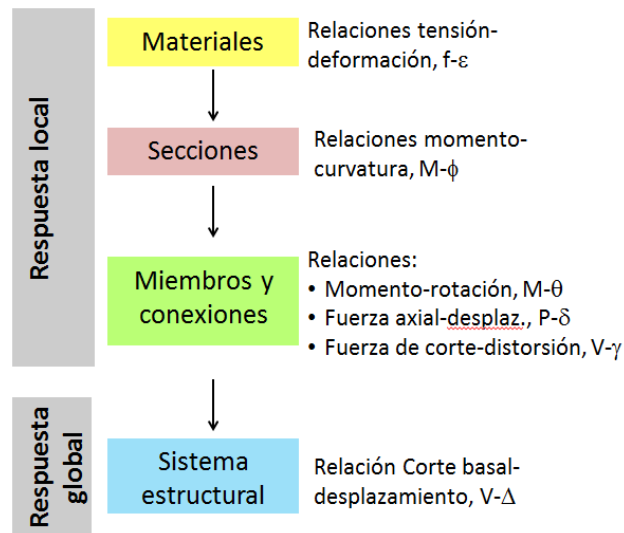


Figura 5. Relaciones que definen la respuesta local y global de la estructura, considerando distintos niveles dentro del sistema estructural.

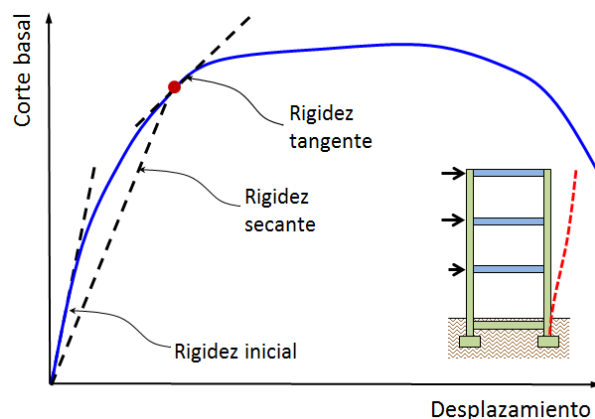


Figura 6. Curva de respuesta global donde se indican distintos criterios para definir la rigidez lateral de la estructura.

La resistencia es una propiedad estructural que se vincula directamente con los estados límites últimos, es decir con la seguridad de la construcción. Según sea el tipo de sollicitación la resistencia de los miembros se determina como una fuerza axial, fuerza de corte, momento flector o momento torsor. Esta propiedad está relacionada con la capacidad de la estructura. Sin embargo, en los métodos modernos de diseño es usual denominar como resistencia requerida a las sollicitaciones, es decir en este caso la propiedad se vincula con la demanda. En resumen, se pueden distinguir los siguientes tipos de resistencia:

- Resistencia nominal: es el valor de resistencia obtenido mediante algún procedimiento racional (ecuaciones de diseño, análisis seccional, etc.) a partir de las propiedades mecánicas de los materiales y de la geometría de la sección.
- Resistencia de diseño: es igual a la resistencia nominal reducida por el factor de resistencia $\phi < 1.0$. En forma genérica, se puede designar también como resistencia disponible o capacidad resistente.
- Resistencia esperada: es el valor máximo probable que puede desarrollar una sección o miembro y se determina considerando la sobrerresistencia del material y las dimensiones reales de la sección o miembro estructural. Esta resistencia se usa en el diseño por capacidad (como se explica en la sección siguiente).

- Resistencia requerida: es el esfuerzo interno que solicita un miembro o componente estructural y que se obtiene mediante análisis estructural con las combinaciones de cargas mayoradas por los factores de carga, diseño por capacidad u otro procedimiento similar.

La ductilidad, μ , es una propiedad estructural que puede definirse como la capacidad de un material, sección, componente o sistema de deformarse inelásticamente sin pérdida de resistencia y se cuantifica como la relación entre la deformación o desplazamiento máximo y el correspondiente a fluencia. La ductilidad puede definirse a partir del desplazamiento máximo impuesto por el sismo (demanda de ductilidad), por ejemplo, para un sistema estructural se tiene que:

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

donde Δ_{max} es el máximo desplazamiento lateral de la estructura bajo la acción del sismo y Δ_y es el desplazamiento de fluencia. Alternativamente, también puede definirse para cuantificar la capacidad o ductilidad disponible. En este segundo caso, se determina como

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

donde Δ_u es el desplazamiento último que el sistema puede resistir.

Finalmente, analizaremos el concepto de energía disipada, debido a que es un aspecto de gran importancia en el diseño sismorresistente. En primer lugar consideramos un sistema lineal y elástico, Figura 7 (a) en el cual se aplica una determinada fuerza de modo de producir un desplazamiento Δ . En este proceso la estructura absorbe energía de deformación, la cual se representa gráficamente por el área OAB. Si descargamos la estructura, la misma vuelve a su posición inicial sin disipar energía. En segundo término, consideramos un sistema inelástico, Figura 7 (b), en el cual la estructura se deforma, siguiendo la trayectoria OAB hasta alcanzar el desplazamiento máximo, Δ_{max} , absorbiendo energía de deformación que se representa por el área OABC. Al descargar la estructura, la trayectoria en este caso es diferente, debido a que han desarrollado deformaciones plásticas. Por esta razón, al eliminar la fuerza la estructura queda deformada y se tiene un desplazamiento permanente, Δ_p . Parte de la energía absorbida se recupera (área BCD) mientras que el resto es disipado por efecto de las deformaciones inelásticas (área OABCD). La energía disipada por un sistema es una variable importante en el diseño y es una de las razones por las cuales se pueden reducir las acciones elásticas de diseño, según se explica posteriormente.

Es importante aclarar ductilidad y energía disipada son conceptos que están relacionados, pero no son equivalentes. Esta afirmación puede comprenderse mejor si se analizan los ejemplos ilustrados en la Figura 8. En el caso (a) se representan dos sistemas estructurales que presentan los mismos desplazamientos máximos y de fluencia, razón por la cual la ductilidad desarrollada es la misma. Sin embargo, el sistema 2 exhibe el fenómeno de estrechamiento del ciclo (*pinching*) por lo que su capacidad de disipar energía es menor. En el caso (b) también se muestran dos sistemas con los mismos desplazamientos máximos y de fluencia, pero con diferente resistencia, de modo que el sistema 2 posee menor capacidad de disipar energía.

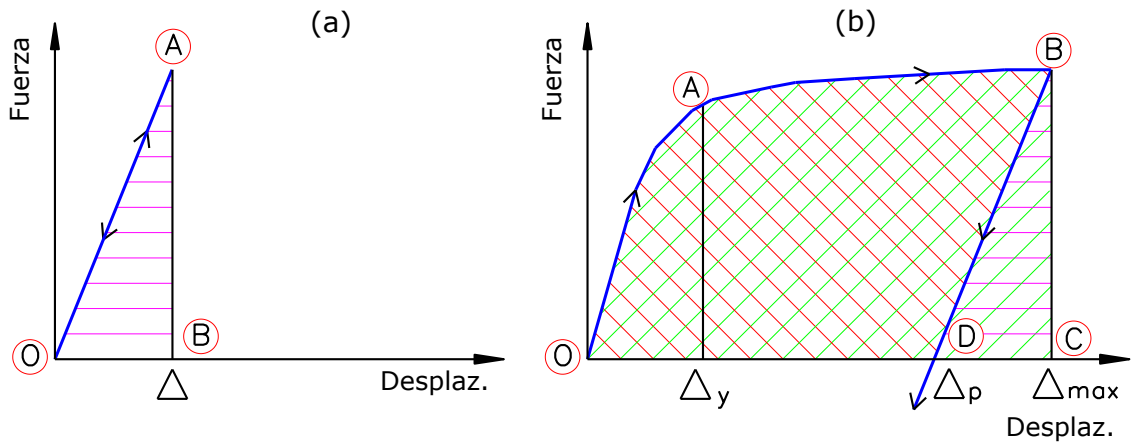


Figura 7. Diagramas fuerza-desplazamiento de un sistema lineal y elástico y de un sistema inelástico para explicar los conceptos de energía absorbida y disipada.

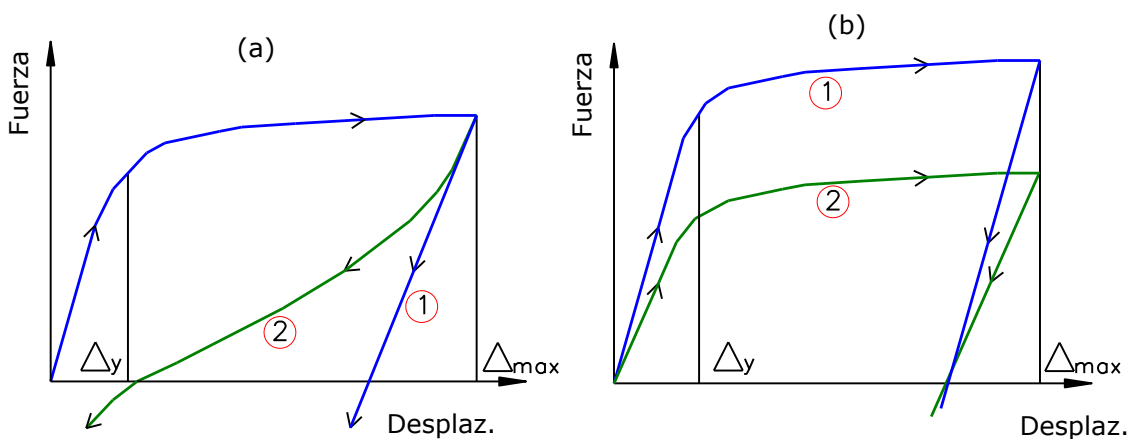


Figura 8. Ejemplos de sistemas estructurales con igual ductilidad y diferente capacidad de disipación de energía.

5 MÉTODO DE LAS FUERZAS

5.1 Aspectos conceptuales

En esta sección explicaremos los aspectos conceptuales más relevantes en los que se basa el método de diseño actualmente vigente en Argentina. Luego, en las secciones siguientes presentaremos detalles más específicos del procedimiento. El reglamento INPRES-CIRSOC 103, 2013, Parte I, sigue criterios de diseño acordes con las normas norteamericanas, particularmente el ASCE/SEI 7 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. La filosofía de diseño que aplican estos reglamentos para la evaluación de la demanda sísmica, en términos de resistencia y desplazamientos, puede explicarse a partir de la Figura 9, en la que se representa la respuesta de una estructura sismorresistente mediante un gráfico de la curva corte basal versus desplazamiento lateral.

una fuerza un poco mayor que la acción de diseño V_d (punto D). Ello se debe a que en el diseño de los componentes se han considerado los factores de resistencia, que reducen la capacidad nominal. Luego, se desarrolla la respuesta inelástica de la estructura, hasta alcanzar su máxima resistencia (punto E) y a partir de ese punto se inicia la degradación de resistencia que lleva al colapso (punto F). Es importante destacar que el hecho de que la resistencia máxima real de la estructura sea mayor que la resistencia de diseño resulta como consecuencia de la sobrerresistencia del sistema y se tiene en cuenta a través del factor Ω_o . Si luego de realizar el diseño estructural con el procedimiento reglamentario, se realizara un análisis inelástico considerando la estructura con sus dimensiones y propiedades reales se debería obtener una resistencia mayor que la de diseño, en forma similar a lo indicado en la Figura 16.

La respuesta real de la estructura puede aproximarse mediante una respuesta bilineal equivalente, a los efectos de definir el nivel de fluencia (con corte basal V_y). El factor R_μ considera la ductilidad del que proporcionan los componentes dúctiles del sistema estructural. Este cuantifica la diferencia entre el nivel de respuesta elástica, V_E , y la resistencia V_y de la estructura

De la explicación previa deducimos que la demanda sísmica para considerar en el diseño se define a partir de factores de desempeño sísmico (en inglés, *seismic performance factors, SPF*), los que se encuentran tabulados para distintos tipos de estructuras en los respectivos reglamentos. En la sección siguiente profundizaremos sobre el significado y definición de los mismos.

5.2 Factor de modificación de respuesta R

El concepto del factor de modificación de respuesta se introdujo en la década de 1960, fundamentalmente a través de las investigaciones realizadas por Veletsos y Newmark a partir de los resultados obtenidos del análisis dinámico de estructuras simples con comportamiento elasto-plástico, se propuso que el espectro inelástico (para diseño) podía obtenerse con cierta aproximación a partir de un espectro elástico. De esta forma se podía reducir la demanda sísmica de diseño (determinada a partir de un espectro elástico) para considerar la capacidad de disipación de energía de la estructura por comportamiento no lineal. Para ello se aplicó, como variable principal, el concepto de ductilidad de desplazamiento, μ , definida como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia, y se aplicaron consideraciones simplificadas deducidas de la observación de los resultados obtenidos del análisis dinámico.

En primer lugar, se observó que en el rango de periodos largos el desplazamiento máximo en rango no lineal es similar al desplazamiento máximo del sistema elástico (ver Figura 10), situación que se puede expresar como “criterio de igual desplazamiento” (algunos autores utilizan el término “principio” en lugar de criterio o regla, lo que sería incorrecto dado que es observación deducida a partir valores promedios obtenidos de resultados de análisis dinámicos). A partir de esta observación se deduce que el factor de reducción es igual a la ductilidad del sistema:

$$R = V_E / V_y = \mu \quad (3)$$

donde V_e es la fuerza sísmica en el sistema elástico, V_y la fuerza de fluencia en la estructura inelástica y μ es la ductilidad definida como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia (Ecuación 2).

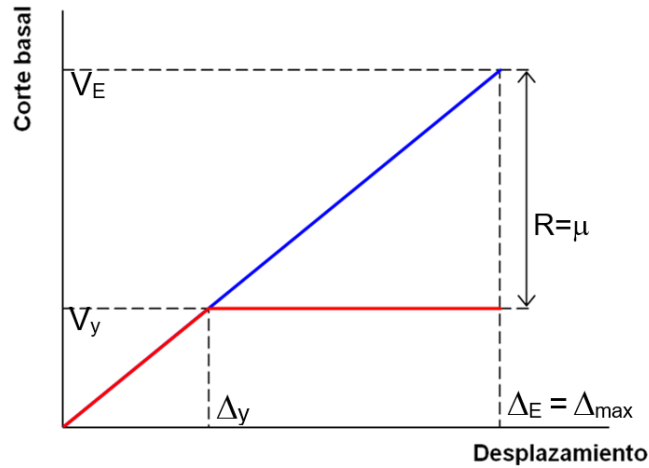


Figura 10. Regla o concepto de igual desplazamiento entre un sistema elástico y otro elasto-plástico.

Para el caso de estructuras con periodo de vibración bajos se concluyó que, aproximadamente, la energía en ambos sistemas era equivalente, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 11; este concepto representa el “criterio o regla de igual energía”. A partir de igualar el área bajo la curva de comportamiento elástico y elasto-plástico se puede deducir que:

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (4)$$

Finalmente, para el caso de periodos intermedios se observó un comportamiento más complejo y se propusieron algunos procedimientos simplificados para la consideración de este caso. Sin embargo, las reglas de igual desplazamiento e igual energía representaron criterios importantes que han influenciado significativamente el diseño sismorresistente. Es importante aclarar que estos criterios surgieron de la observación y análisis de numerosos resultados numéricos, no fueron obtenidos a partir de una deducción racional.

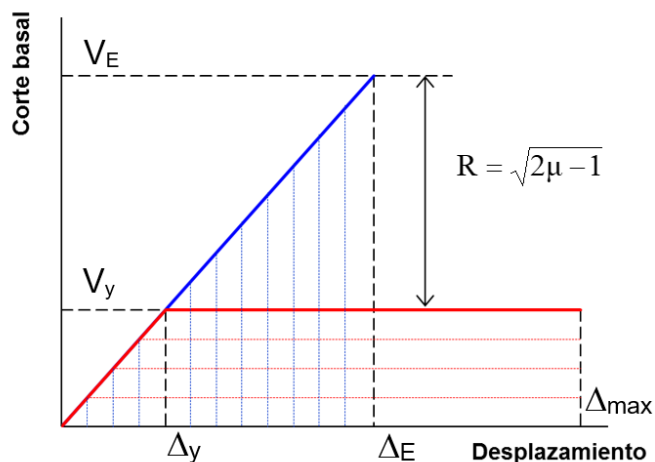


Figura 11. Regla o concepto de igual energía entre un sistema elástico y otro elasto-plástico.

En la Figura 12 se grafica la variación del factor R en función del periodo fundamental, T, que resulta de considerar las Ecuaciones 3 y 4 combinadas con tramos de variación lineal para cubrir todo el rango de interés. En esa figura se presentan los resultados para dos valores de ductilidad, $\mu = 3$ y 6 . También se incluyen, con líneas de trazo, un criterio simplificado en el cual se asume una variación lineal entre $R=1$, para $T=0$, y $R=\mu$. Este criterio fue adoptado por muchos códigos de diseño durante varias décadas.

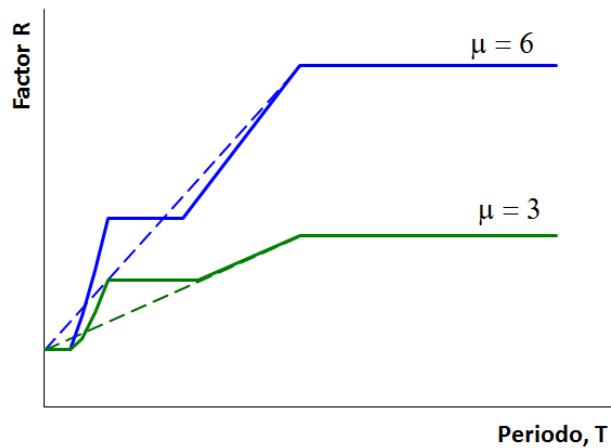


Figura 12. Factores de respuesta (o de reducción) propuesto por Newmark y Hall.

A partir de las investigaciones de Veletsos, Newmark y sus colaboradores, muchos otros investigadores profundizaron los estudios sobre el factor de respuesta R . Los estudios realizados permitieron identificar distintas variables que intervienen y deducir ecuaciones y valores del factor R más precisos. Las recomendaciones NERPH del año 1988 propusieron modificaciones importantes para el cálculo del factor R , considerando el efecto de la ductilidad y de la sobrerresistencia estructural de todo el sistema.

En la actualidad el reglamento ASCE igual que los reglamentos de varios países de Latinoamérica, especifican un criterio para evaluar el factor R que considera no solo el efecto de la ductilidad, sino también la sobrerresistencia del sistema. De modo que:

$$R = R_{\mu} \Omega_o \quad (5)$$

donde R_{μ} es el factor de reducción por ductilidad y Ω_o es el factor de sobrerresistencia global de la estructura.

El factor R_{μ} considera la ductilidad del sistema (definida como $\mu = \delta_s / \delta_y$) que proporcionan los componentes con capacidad para disipar energía. Este cuantifica la diferencia entre el nivel de respuesta elástica, V_E , y la resistencia V_y de la estructura, de modo que:

$$R_{\mu} = V_E / V_y \quad (6)$$

La capacidad de disipación de energía puede variar significativamente según el tipo de estructura y depende principalmente del grado de degradación de rigidez y resistencia que experimenta el sistema estructural. Estos efectos se producen por la ocurrencia de mecanismos frágiles como el pandeo local, en las estructuras de acero, o la fisuración y fallas de corte en las estructuras de hormigón armado.

La disipación de energía puede cuantificarse a través del área de los ciclos de histéresis que desarrolla la estructura a medida que se deforma en rango inelástico bajo la acción sísmica. Para explicar este concepto, la Figura 13 muestra dos ejemplos típicos de comportamiento histerético. El primero, Figura 13 (a) corresponde al caso de una estructura dúctil, que es capaz de mantener casi toda su rigidez y resistencia a pesar de soportar grandes ciclos de deformación inelástica. El segundo ejemplo, Figura 13 (b) corresponde al caso de una estructura que experimenta una significativa degradación de rigidez, lo que origina el estrechamiento (*pinching*) de los ciclos de histéresis, además de cierta degradación de resistencia.

El valor del factor de reducción R_{μ} se determina en base a resultados experimentales y analíticos de la respuesta estructural de distintos sistemas, aplicando además criterio ingenieril. A los efectos del diseño, los reglamentos incluyen tablas con este factor para distintos tipos de estructura (las que se presentan posteriormente).

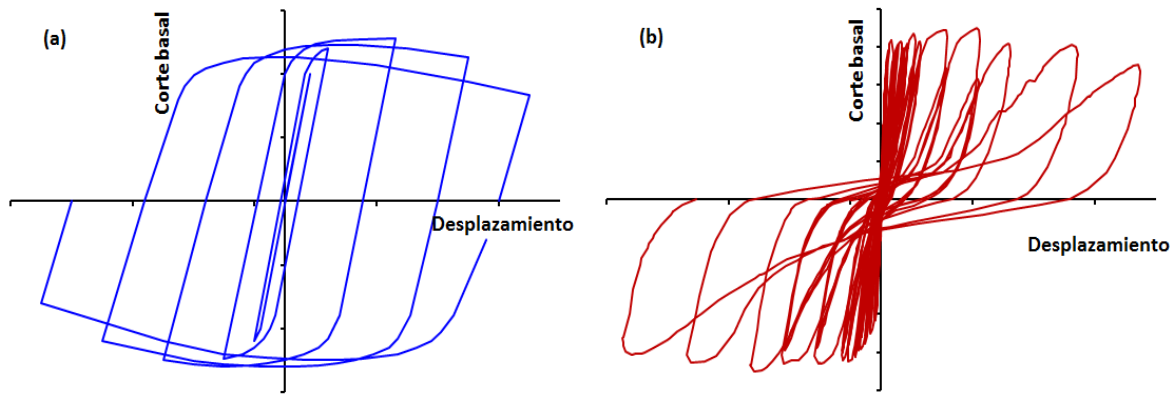


Figura 13. Ciclos de histéresis típicos de: (a) estructura dúctil y (b) estructura con estrechamiento de los ciclos (pinching).

El factor de sobrerresistencia Ω_o tiene en cuenta la reserva de resistencia entre los niveles V_Y y V_D , la que se origina por factores tales como la redundancia estructural, la sobrerresistencia de los materiales, del sobredimensionamiento de los miembros, de combinaciones de cargas distintas al sismo, de límites de distorsión de piso, del efecto del factor de resistencia, etc. Este factor resulta de gran importancia para la aplicación práctica del diseño por capacidad, según se explica en la Sección 6.

5.3 Factor C_d

El factor de amplificación de desplazamientos C_d , permite estimar los desplazamientos de diseño, con los cuales se controlan las distorsiones de piso (ver Sección 5.6). Este factor mayor los desplazamientos obtenidos del análisis lineal elástico de la estructura. Sin embargo, se espera que ante la acción sísmica de diseño los desplazamientos laterales sean significativamente mayores, dado que se acepta que la estructura se deformará en rango inelástico. Es por ello que, en vez de exigir la realización de análisis no lineales, el reglamento incluye un procedimiento aproximado para estimar los desplazamientos considerando la respuesta no lineal a través del factor C_d .

La consideración del factor C_d para determinar los desplazamientos de diseño, aun siendo un método aproximado, representa una mejora con respecto al criterio que se aplicaba previamente, por ejemplo, en la versión del año 1982 del reglamento INPRES-CIRSOC 103. Este procedimiento aplicaba directamente el concepto de igual desplazamiento (ver Figura 10), de modo que los desplazamientos elásticos se multiplicaban por R , el mismo factor usado para reducir la acción sísmica.

El uso de un factor C_d (distinto de R), permite mejorar la estimación de los desplazamientos, dado que este factor se define a partir de resultados experimentales y de estudios paramétricos realizados a partir de análisis no lineales para distintos tipos de estructuras.

5.4 Definición de la acción sísmica: espectro de diseño

Los espectros de respuesta representan el efecto de un solo registro de aceleración y, por lo tanto, no pueden usarse para el diseño. Por esta razón, los reglamentos sismorresistentes utilizan espectros de diseño. Éstos presentan dos características principales: (i) consideran la peligrosidad sísmica de una zona o región y (ii) son curvas suavizadas, es decir, no presentan las variaciones bruscas propias de los espectros de respuesta.

La obtención de las respuestas espectrales, como parte del análisis de amenaza sísmica, puede realizarse mediante procedimientos probabilísticos o determinísticos, según lo que resulte más conveniente en cada caso.

Desde hace más de una década, se ha desarrollado en Estados Unidos un procedimiento que permite

definir los espectros de diseño a partir de lo que se denomina terremoto máximo considerado (MCE, *maximum considered earthquake*). Éste no debe interpretarse como el máximo terremoto que puede ocurrir en una región, sino como el máximo nivel de sacudimiento que se considera razonable para el diseño de estructuras. Se describe a continuación, en términos generales, el criterio que adoptan las especificaciones ASCE/SEI 7-16 para definir el espectro de diseño. Este reglamento considera para casos usuales un sismo definido como terremoto máximo considerado con probabilidad de colapso uniforme, MCE_R (*risk-targeted maximum considered earthquake*). Este concepto fue introducido en la edición del año 2010 de mencionado reglamento para considerar que la probabilidad de colapso estructural presenta incertidumbres. Anteriormente, los valores de movimiento de suelo (*ground motion values*) se definían bajo la condición de “amenaza uniforme” (*uniform hazard*), sin considerar las incertidumbres en la capacidad estructural. Es por ello que en la edición 2010 se modificaron los parámetros de movimiento de suelo de manera que la probabilidad de colapso esperada asociada a los espectros resultantes sea uniforme.

El terremoto MCE_R se determina asumiendo una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años (equivalente a un periodo de retorno¹ T_R de 2475 años) y se caracteriza mediante tres parámetros principales:

- La aceleración espectral para periodos cortos ($T=0.2s$), S_s .
- La aceleración espectral para un periodo $T=1.0s$, S_1 .
- El periodo de transición para periodos largos, T_L

El espectro de diseño se determina considerando una reducción de 2/3 de las aceleraciones espectrales de referencia para el terremoto máximo considerado, MCE_R . El factor 2/3 representa un “margen sísmico” para transformar el espectro MCE_R , que corresponde a un nivel de colapso, en otro a nivel de diseño. Como consecuencias de dividir por 2/3, se obtiene un margen uniforme contra el colapso, pero no una probabilidad de ocurrencia uniforme de los espectros obtenidos para distintos sitios). explican que el factor 2/3 representa una modificación en el objetivo de desempeño considerado por el reglamento que cambió del nivel de “seguridad de vida” (*life safety*) a “prevención del colapso” (*collapse prevention*).

En Argentina, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica, INPRES, ha adaptado el criterio del espectro de diseño de la normativa ASCE/SEI 7, a partir de la información disponible sobre terremotos ocurridos en las distintas zonas sísmicas del país. Es así, que el reglamento INPRES-CIRSOC 103 determina los espectros de diseño para cuatro zonas sísmicas, considerando para cada zona 3 tipos espectrales, según sea la clasificación del sitio (condiciones del suelo). Para mayor información ver la Guía de Estudios sobre Espectros y el reglamento.

Los espectros descriptos previamente se utilizan para definir la acción sísmica horizontal. Los reglamentos de diseño incluyen también requerimientos para considerar el efecto de la acción sísmica vertical. Esta consideración se debe a que el movimiento del suelo, resultante de la propagación de las ondas sísmicas, presenta también una componente en la dirección vertical. Por lo tanto, el reglamento INPRES-CIRSOC 103 define la acción sísmica como el efecto combinado del sismo horizontal y vertical:

$$E = E_H + E_V \tag{7}$$

El sismo vertical, E_V , se define a partir de una aceleración espectral constante (independiente del periodo

¹ El periodo de retorno T_R (o intervalo de recurrencia) se define como la inversa de la probabilidad de excedencia anual, p_a , de modo que $T_R=1/p_a$. Es usual, sin embargo, indicar la probabilidad de excedencia, p_t , durante un cierto periodo de tiempo t (por ejemplo: 50 años). En este caso, puede demostrarse que $T_R = -t / \ln(1 - p_t)$.

de vibración de la estructura) y se considera que actúa sobre la masa vinculada a las cargas permanentes, de modo que:

$$E_v = \frac{C_a}{2} \gamma_r D \quad (8)$$

donde C_a es un parámetro característico del espectro de diseño (definido en el reglamento) y D representa el estado de cargas permanentes.

5.5 Métodos de análisis

El análisis estructural es un paso importante dentro del proceso de diseño, mediante el cual se calculan las solicitaciones y desplazamientos, a partir de un modelo matemático más o menos complejo. En la actualidad se dispone de una amplia oferta de programas de computación que facilitan la realización del análisis estructural, tanto para la práctica profesional como para tareas de investigación. En el caso del diseño sismorresistente, los procedimientos de análisis pueden dividirse en dos grupos:

- **Método estático o de las fuerzas estáticas equivalentes:** este método asume que la acción dinámica del sismo puede reemplazarse por fuerzas laterales equivalentes que se determinan mediante un coeficiente sísmico actuando sobre el peso total de la construcción. El coeficiente sísmico se obtiene a partir de la aceleración espectral, afectada por factores que tienen en cuenta el destino de la construcción y el comportamiento estructural. Las fuerzas se distribuyen en altura asumiendo una variación creciente con la altura. Es el método más simple, si bien no representa adecuadamente la naturaleza dinámica del problema. Desde el punto de vista reglamentario, su aplicación se limita a construcciones de bajas y con regularidad estructural en planta y elevación.
- **Método dinámico:** el análisis dinámico considera la naturaleza vibratoria del problema y requiere de la explícita consideración de la masa y del amortiguamiento en el modelo estructural. Se han desarrollado distintos procedimientos dentro de esta categoría, los que pueden agruparse en:
 - Análisis modal espectral: es un procedimiento que utiliza la descomposición modal para desacoplar el sistema de ecuaciones diferenciales (ecuación de equilibrio). A partir de esta descomposición se determina la respuesta máxima de cada modo de vibración (usando el espectro de diseño) y luego se aplican reglas de combinación modal para determinar la respuesta máxima probable de cada variable (esfuerzos internos, desplazamientos y deformaciones). En este método no se determina la respuesta en el tiempo.
 - Análisis dinámico temporal: este grupo incluye distintos procedimientos numéricos para determinar la solución de la ecuación de equilibrio dinámico y calcular la respuesta en el tiempo de todos los parámetros estructurales. La acción sísmica se define mediante registros de aceleración.

Los métodos descriptos consideran el comportamiento lineal y elástico de la estructura, que el criterio usual para el análisis según la reglamentación vigente. No obstante, en ciertos casos es necesario evaluar la respuesta no lineal, para lo cual debe considerarse en la ecuación de equilibrio que la matriz de rigidez cambia a medida que la estructura se deforma en rango no lineal. El estudio de los métodos de análisis no lineal escapa al alcance de esta publicación.

5.6 Control de los desplazamientos laterales. Distorsión de piso

El desplazamiento lateral que experimentan las estructuras por acciones como viento o sismo es una variable de importancia en el diseño, debido a su vinculación con tres aspectos: (i) la estabilidad estructural y el daño, (ii) el control de daño en elementos no estructurales, y (iii) el confort de los usuarios de la construcción. En el caso de la acción sísmica, el tercer aspecto no se relaciona con el objetivo

primario del diseño, que es evitar la pérdida de vidas humanas, pero resulta importante para asegurar condiciones de servicio de la construcción. En esta sección analizaremos tres parámetros que se relacionan entre sí:

- Desplazamientos o deflexiones laterales de piso, Δ : representan los desplazamientos horizontales medidos en correspondencia con los entresijos, techo u otros puntos característicos de la estructura..
- Desplazamientos relativos de piso (*story drift* o *interstory drift*): se definen como la diferencia entre el desplazamiento lateral en un determinado nivel y el nivel inferior.
- Distorsiones de piso (*story drift angle* o *story drift ratio* o *story drift index*), θ : igual al desplazamiento relativo de piso dividido por la altura de ese piso.

Los desplazamientos laterales esperados en estructuras sometidas a la acción sísmica de diseño son mayores que los desplazamientos obtenidos del análisis elástico, Δ_{dE} , por el desarrollo del comportamiento no lineal, como ya se explicó previamente. Es por ello que el desplazamiento lateral de diseño, Δ_d , se determina como:

$$\Delta_d = \frac{C_d \Delta_{dE}}{\gamma_r} \quad (9)$$

donde γ_r es el factor de riesgo que depende del destino de la construcción (su valor se encuentra tabulado en el reglamento y varía entre 0.8 y 1.5).

En los procedimientos de diseño basados en fuerza, el control de desplazamientos se plantea como una verificación adicional que es muy importante, especialmente para controlar el daño en elementos no estructurales. Como parámetro de control se considera la distorsión horizontal de piso, θ_i , definida por (ver Figura 14):

$$\theta_i = \frac{(\Delta_{di} - \Delta_{di-1})}{h_i} \leq \theta_{lim} \quad (10)$$

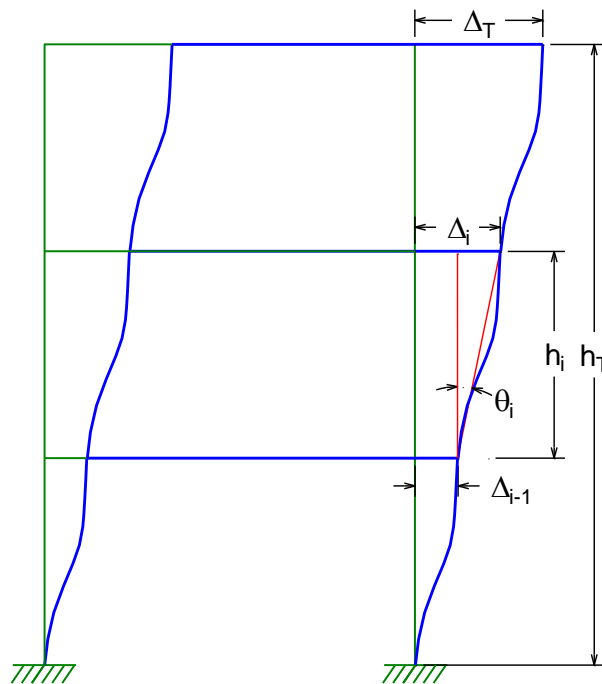


Figura 14. Deflexión lateral de la estructura y definición de la distorsión de piso.

Los valores de θ_{lim} se indican en el reglamento y entre 0.01 y 0.025, dependiendo del tipo de estructura, la categoría de ocupación, las características de los componentes no estructurales, etc. El control de las

distorsiones puede resultar en la necesidad de modificar el diseño estructural, particularmente en el caso de estructuras flexibles, como los pórticos no arriostrados.

A nivel global, también se puede definir la distorsión total de la construcción (medida en toda la altura, h_T , ver figura 14), como la relación entre el desplazamiento total y la altura del edificio:

$$\theta_T = \frac{\Delta_T}{h_T} \quad (11)$$

Es importante aclarar que la notación empleada por reglamento INPRES-CIRSOC 103 para los desplazamientos laterales difiere de la utilizada en este texto. Ello se debe a que se ha priorizado la notación más usual en la bibliografía técnica que define a los desplazamientos laterales con la letra griega, Δ . En la mencionada normativa, los desplazamiento totales se designan como d , mientras que para los desplazamientos relativos se emplea Δ .

5.7 Proceso de diseño sismorresistente.

En la Sección 2.3 describimos, en forma general, los pasos principales del proceso de diseño estructural (ver Figura 4). Para las construcciones sismorresistente, el proceso de diseño es similar, si bien presenta algunos aspectos particulares que discutiremos en esta sección. Estos aspectos se indican en la Figura 15, destacándose los mismos con texto en azul.

En la Figura 16 se detallan los aspectos relevantes correspondientes al análisis de carga, según los criterios reglamentarios actuales. En dicha parte del proceso de diseño, la evaluación de la acción sísmica se realiza según dos procedimientos: el método estático o el método dinámico, dependiendo de las características de la construcción y su destino. En ambos procedimientos, la acción sísmica queda definida por el espectro de diseño (en término de aceleraciones). Sin embargo, cuando se aplica el análisis dinámico con integración en el tiempo, la acción sísmica se define mediante registros de aceleración. Se incluye también en la Figura 16 la evaluación de la regularidad estructural de la construcción (aplicable a estructuras de edificios o similares). Esta evaluación considera las variaciones de masa y rigidez en altura, como así también la regularidad en planta, con el objeto de controlar los efectos debido a la vibración torsional que originan aumentos de solicitaciones y desplazamientos en zonas localizadas de la estructura. Los requerimientos sobre la evaluación de la regularidad se indican en el reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte I.

Es importante aclarar que la evaluación de la regularidad requiere, entre otras consideraciones, de la determinación de los desplazamientos laterales de la construcción producidos por la acción sísmica, para lo cual es necesario realizar el análisis estructural (usualmente con el método estático). Las condiciones de regularidad de la estructura, en planta y en elevación, son aspectos que considera el reglamento para definir el método de análisis a aplicar en el diseño. De modo que es necesario realizar un análisis preliminar para evaluar la regularidad y en base a ello se determina cuál es el procedimiento a aplicar para el análisis estructural definitivo.

En el análisis estructural de construcciones sismorresistentes (ver Figura 17), la consideración de la acción sísmica, según el método que se aplique, implica diferencias en el modelo de cálculo. En particular, cuando se aplica el método dinámico es necesario incluir las masas correspondientes a toda la construcción. Otros aspectos relevantes, que se incluyen en la Figura 17, son el control de las distorsiones de piso, la aplicación del diseño por capacidad para proteger los componentes frágiles que pueden llevar a fallas no deseadas, y los detalles propios de cada material estructural para asegurar la respuesta dúctil. Este último aspecto, se incluye en las distintas partes del reglamento INPRES-CIRSOC 103 que corresponden a estructuras de hormigón armado, mampostería, acero, etc.

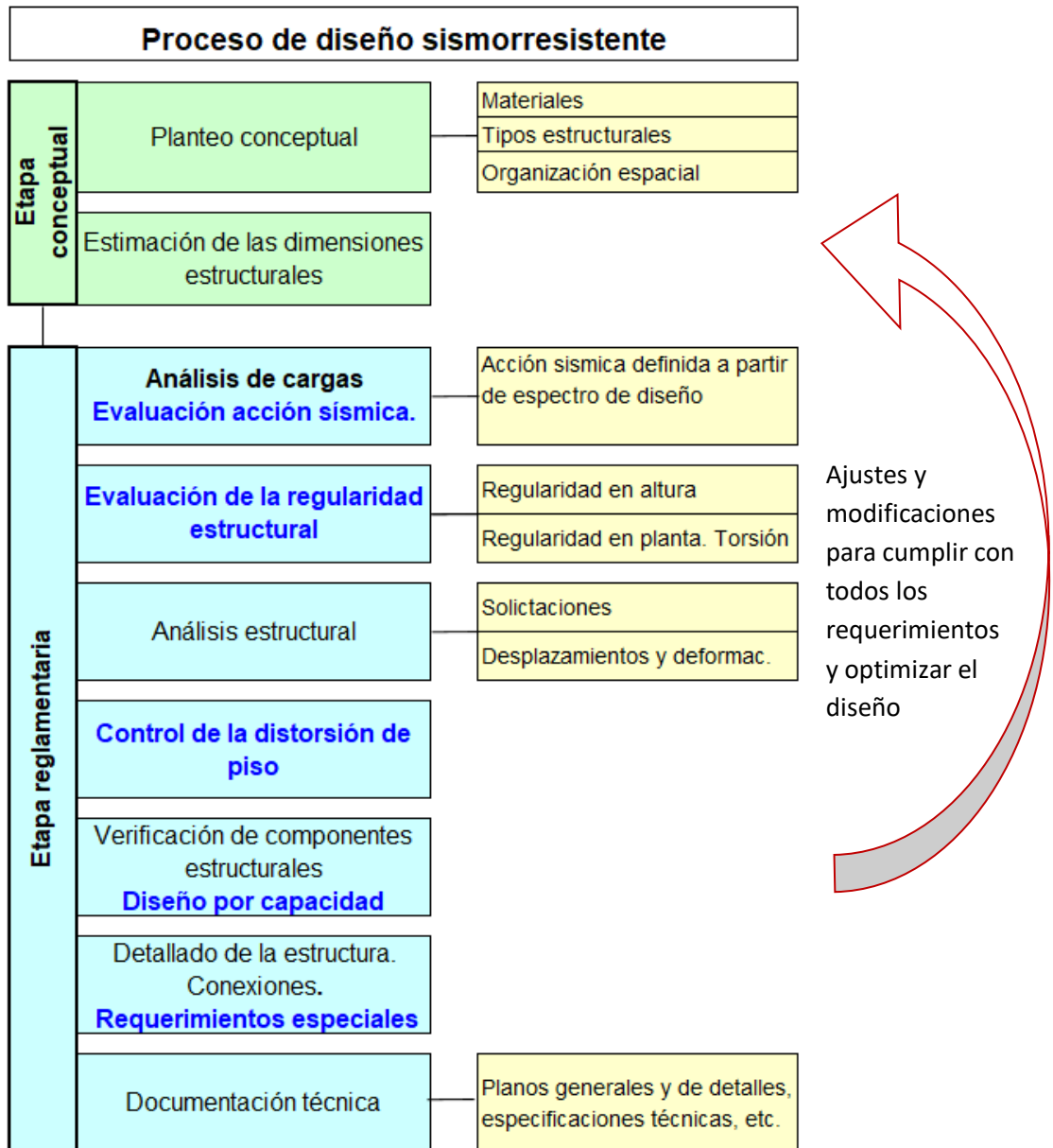


Figura 15. Esquema indicativo de las etapas del proceso de diseño estructural para construcciones sismorresistentes (método de diseño basado en fuerzas).

Análisis de cargas	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de cargas debidas a peso propio, sobrecargas de servicio, viento, nieve, etc, según reglamentación vigente. 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de la acción sísmica (en dirección horizontal y vertical) <ul style="list-style-type: none"> - Zona sísmica y sitio de emplazamiento de la construcción → Espectro de diseño elástico - Destino de la construcción, γ_r - Factores de respuesta estructural: R, Ω_o y C_d. 		
	Método estático	Método dinámico	
	<ul style="list-style-type: none"> • Periodo fundamental de vibración • Coeficiente sísmico (a partir del espectro de diseño) • Corte basal, $V=C W$, y distribución en altura de las fuerzas sísmicas 	Análisis modal espectral	Análisis temporal
		<ul style="list-style-type: none"> • Espectro de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> • Registros de aceleración (compatibles con el espectro de diseño)
Evaluación de la regularidad estructural	<ul style="list-style-type: none"> • Regularidad en planta. Efectos torsionales → Momentos torsores por excentricidad accidental. • Regularidad en elevación 		

Figura 16. Análisis de cargas y en la evaluación de la regularidad estructural.

Análisis estructural	<ul style="list-style-type: none"> • Modelación estructural • Análisis estructural para los distintos estados de carga (salvo la acción sísmica) 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis estructural para la acción sísmica 		
	Método estático	Método dinámico	
	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo estructural: Rigidez • Análisis estático con fuerzas laterales equivalentes 	Análisis modal espectral	Análisis temporal
		<ul style="list-style-type: none"> • Modelo estructural: Rigidez y masa • Análisis modal • Combinación modal 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis modal e integración temporal, o Integración temporal del sistema de ecuaciones. • Determinación de los valores máximos de respuesta.
<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de esfuerzos internos (M, V, P), tensiones, desplazamientos y deformaciones. • Combinaciones de estados de carga según reglamento. • Determinación de valores máximos y mínimos para diseño (envolventes). 			
Control de la distorsión de piso	<ul style="list-style-type: none"> • Control de la distorsión de piso para diseño (a partir de los desplazamientos elásticos multiplicados por el factor de amplificación de desplazamientos, C_d) 		
Verificación de componentes estructurales	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño por capacidad: mecanismos plástico. • Dimensionamiento o verificación de vigas, columnas, muros, losas, riostras, etc. • Cálculo y verificación de fundaciones. 		
Detalles estructurales	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de Conexiones • Detalles. Requerimientos especiales para estructuras sismorresistentes según reglamentación. 		

Figura 17. Detalle del análisis estructural y verificaciones posteriores.

6 DISEÑO POR CAPACIDAD

6.1 Aspectos conceptuales

Las bases del diseño por capacidad fueron formuladas en un libro publicado en 1961 por Blume, Newmark y Corning, *Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions*. Posteriormente, el ingeniero neozelandés Hollings propuso en 1968 un procedimiento para controlar la respuesta inelástica en edificio de hormigón armado, basado en el libro mencionado. El término “diseño por capacidad” fue acuñado por un grupo de ingenieros neozelandeses, liderado por Otto Glogau, quien incorporó en el reglamento de obras públicas este nuevo concepto de diseño. El impulso definitivo para difusión del diseño por capacidad se debe al trabajo de Robert Park y Thomas Paulay en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. Ellos realizaron numerosas investigaciones y dieron forma a un método para la aplicación del diseño por capacidad a estructuras de hormigón armado.

El diseño por capacidad se basa en la formulación de una jerarquía en la resistencia de los componentes que componen el sistema estructural para permitir la formación de un mecanismo de deformación plástica (o mecanismo de colapso); se evita así la ocurrencia de fallas frágiles. Para ello, se seleccionan ciertos componentes o zonas de la estructura sismorresistente, los que son diseñados y detallados para disipar energía en forma dúctil y estable. En estas zonas críticas, denominadas comúnmente “rótulas plásticas”, el sismo induce deformaciones plásticas y se evitan otros mecanismos de falla mediante un incremento de la resistencia asignada (por ejemplo, fallas de corte en los miembros de hormigón armado o problemas de pandeo local en secciones de acero). Todos los demás componentes se protegen de la posibilidad de falla asignando una resistencia mayor que la correspondiente al desarrollo de la máxima resistencia esperada en las potenciales regiones de plastificación. De esta forma, el diseño por capacidad permite contrarrestar las incertidumbres existentes para definir la demanda sísmica y asegura que la estructura responda en forma estable y con adecuada capacidad de disipación de energía.

Los conceptos del diseño por capacidad pueden resumirse en tres aspectos básicos y fundamentales:

- Selección de un mecanismo de deformación plástica para todo el sistema estructural, identificando los miembros o componentes en los que pueden desarrollarse deformaciones inelásticas. Este mecanismo no debe conducir a una demanda concentrada de deformaciones plásticas.
- Detallado adecuado de los miembros o componentes inelásticos para asegurar su comportamiento dúctil, es decir la capacidad de soportar deformaciones inelásticas manteniendo la capacidad resistente.
- Diseño de los restantes miembros o componentes estructurales para resistir la acción sísmica en rango elástico, considerando la probable sobrerresistencia de los mecanismos dúctiles.

El concepto del diseño por capacidad puede expresarse en forma simple a través de la analogía de la cadena, Figura 18 (a), la cual se encuentra sometida a una fuerza axial P . Esta cadena cuenta con un eslabón dúctil que fluirá a un cierto nivel de fuerza, P_y . Los restantes eslabones, que presentan comportamiento frágil, se diseñan para resistir una fuerza mayor a P_y , con lo cual se asegura una respuesta dúctil.

Las zonas plásticas se denominaron inicialmente como “rótulas plásticas”, debido que el mecanismo dúctil considerado se basaba únicamente en la fluencia originada por la flexión (caso usual en pórticos no arriostrados, por ejemplo). Sin embargo, las zonas dúctiles pueden deformarse no solo por la acción del momento flector, sino también por efecto del corte o de la carga axial, dependiendo del tipo de estructura que se considera. Es por ello que el concepto de rótula plástica se ha generalizado y se emplea aún en los casos de riostras que fluyen en tracción o en placas de acero que lo hacen por corte.

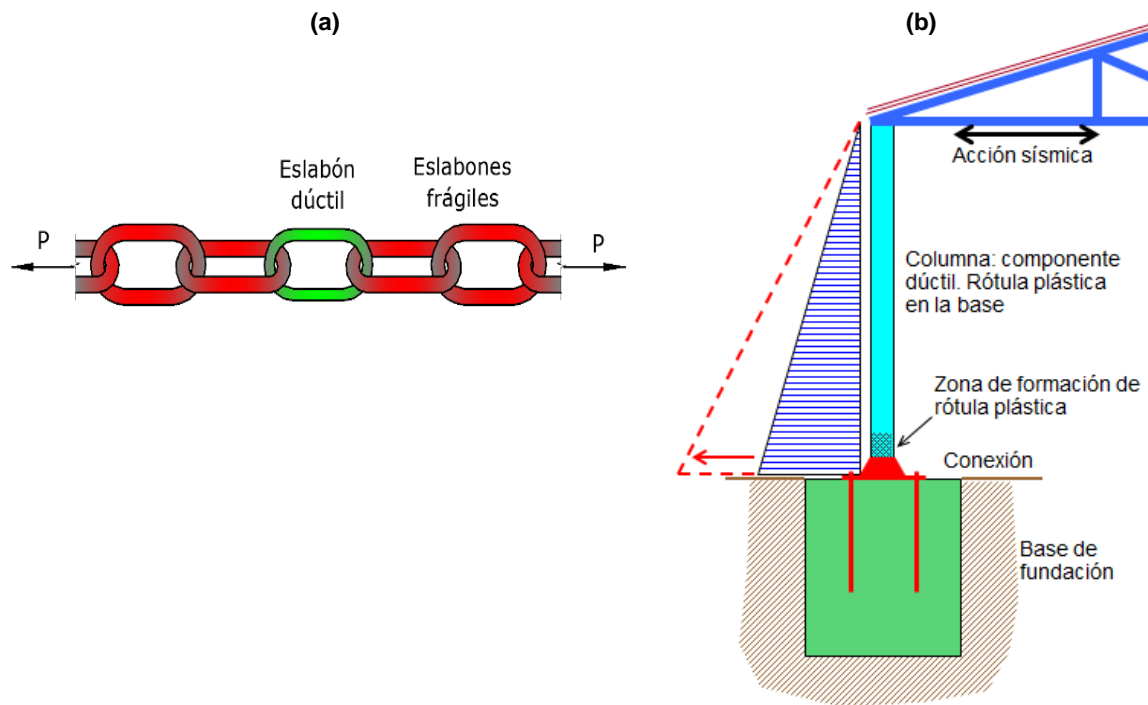


Figura 18. (a) Analogía de la cadena para explicar el concepto de diseño por capacidad, y (b) ejemplo de la aplicación del diseño por capacidad en una estructura simple

Las partes componentes de la estructura se agrupan en dos tipos, según el concepto explicado previamente:

- zonas o componentes dúctiles o componentes controlados por deformación, y
- componentes frágiles o componentes controlados por fuerza (su diseño depende de la resistencia probable de los componentes dúctiles) o componentes sensibles a la sobrerresistencia estructural o componentes protegidos por capacidad.

La Figura 18 (b) muestra un ejemplo para el caso de una estructura simple de acero. Las columnas de la nave industrial son los miembros dúctiles del sistema y se diseñan considerando que pueden formarse rótulas plásticas en la parte inferior de las mismas. La unión soldada entre la columna y la placa de acero que la vincula a la fundación es un componente frágil debe diseñarse para resistir en rango elástico la acción sísmica, aun cuando las solicitaciones (momento flector) aumenten como consecuencia de la sobrerresistencia probable del acero al formarse una rótula plástica en la columna. La conexión debe diseñarse para resistir el momento máximo probable en la columna (representado por el diagrama en línea de trazos).

En los párrafos anteriores hemos descriptos los aspectos conceptuales, que definen lo que se denomina “filosofía” del diseño por capacidad. Estos conceptos, en su aplicación práctica, se implementan mediante diferentes métodos o procedimientos. En las próximas secciones presentamos un resumen de los métodos más usuales, tanto a nivel reglamentario como de recomendaciones de diseño desarrolladas por distintos investigadores.

6.2 Método “Neozelandés”

Este fue el primer procedimiento de diseño por capacidad para estructuras de hormigón armado. El método se desarrolló a partir de las investigaciones de Paulay y Park (ver su libro *Reinforced Concrete Structures*, 1975) y se implementó a través de la norma neozelandesa NZS 3101. En Argentina, el reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte II, especifica un procedimiento muy similar.

El método parte de asumir un mecanismo plástico, por ejemplo, para pórticos la rotulación de extremos de vigas y de base de columnas. Las rótulas se diseñan con una resistencia requerida que surge del análisis estructural con los estados de carga y combinaciones reglamentarias. Luego, los componentes frágiles, que se quieren proteger, se diseñan con resistencias requeridas que surgen de considerar la sobrerresistencia del material y de la estructura. En esta segunda parte del procedimiento es necesario realizar cálculos manuales para determinar los distintos factores de sobrerresistencia de los componentes y evaluar así la resistencia requerida (por ejemplo, para determinar el corte en vigas y los momentos flectores y esfuerzos axiales en las columnas que no plastifican). La explicación detallada de este procedimiento no se presenta en esta publicación, es un tema de estudio específico de las estructuras de hormigón armado.

El método de diseño por capacidad “neozelandés”, desarrollado en la década del 1970, representó un avance muy importante en el diseño sismorresistentes, pero hoy no se adecua a los criterios modernos de diseño, principalmente debido a la dificultad de implementar el procedimiento en forma sistemática mediante programas de computación. Particularmente para el caso de estructuras complejas, con muchos componentes estructurales, el procedimiento requiere de la realización de numerosos cálculos manuales. Esta razón, junto con el hecho de que el procedimiento hoy se considera aproximado debido al uso de varios factores empíricos, ha llevado una pérdida paulatina de su vigencia y, consecuentemente, a la implementación de otros métodos.

6.3 Método del factor de sobrerresistencia Ω_o

Las normas norteamericanas introdujeron un procedimiento de diseño por capacidad en la década de 1990 para estructuras de acero (a través de las especificaciones ANSI/AISC 341 en forma conjunta con el reglamento ASCE/SEI 7). Posteriormente, el mismo procedimiento se aplicó a estructuras de hormigón armado (en el reglamento ACI 318).

El método implementado difiere significativamente al propuesto originalmente en Nueva Zelanda para estructuras de hormigón armado. La diferencia principal radica en la determinación de la resistencia requerida de los componentes protegidos por capacidad, la cual se realiza a través de dos estados de acciones sísmicas adicionales:

- **Acciones sísmicas con sobrerresistencia, E_{mh} :** definidas a partir del factor de sobrerresistencia global de la estructura:

$$E_{mh} = \Omega_o Q_E \quad (12)$$

donde Q_E representa el efecto de la acción sísmica determinada a partir del espectro de diseño y reducida por el factor R . El factor de sobrerresistencia Ω_o se determina para los distintos tipos estructurales como un valor promedio o aproximado para condiciones usuales y no considera las características particulares de la estructura analizada.

- **Acciones sísmicas limitadas por capacidad, E_{cl} :** estas acciones se definen como las máximas solicitaciones obtenidas de un análisis plástico racional, considerando los valores esperados de la resistencia de los materiales. Estas acciones sísmicas permiten determinar valores más precisos de la resistencia requerida de los componentes que deben permanecer en rango elástico, dado que en su determinación se consideran las características propias de cada estructura, tales como propiedades geométricas, secciones utilizadas, materiales, etc. De modo que la determinación de la sobrerresistencia es más precisa. Es por ello que se reglamentariamente se considera que las acciones limitadas por capacidad representan un límite superior, esto es:

$$E_{mh} \leq E_{cl} \quad (13)$$

Los criterios para definir la acción sísmica limitada por capacidad se indican para cada tipo estructural. Estos criterios se pueden agrupar en dos principales: definición a nivel global o definición a nivel local. En el primer caso, se debe considerar toda la estructura y realizar un análisis plástico o bien un análisis no lineal, mientras que en el segundo caso se considera un mecanismo local, por ejemplo plastificación de los extremos de una viga, y se determina el corte inducido en esa situación a partir de consideraciones de equilibrio.

Una vez definidas las acciones sísmicas para el diseño por capacidad se obtiene la resistencia requerida a partir de las combinaciones reglamentarias, que en forma genérica se pueden representar mediante la siguiente ecuación:

$$R_u = \sum \lambda_i Q_i + (E_{mh} \text{ o } E_{cl}) \quad (14)$$

donde $\lambda_i Q_i$ representa, en forma genérica, los distintos estados de cargas con sus correspondientes factores de carga, según la combinaciones reglamentarias.

Es decir que los componentes frágiles se diseñan a partir de acciones sísmicas que consideran la sobrerresistencia de la estructura (definida a partir de un factor global promedio, según el tipo estructural) o bien de la sobrerresistencia real obtenida de considerar los valores máximos probables de los componentes dúctiles. En la Figura 19 se muestra en forma resumida la determinación de la resistencia requerida de acuerdo con este método y su relación con el proceso de diseño (indicado previamente en la Figura 15).

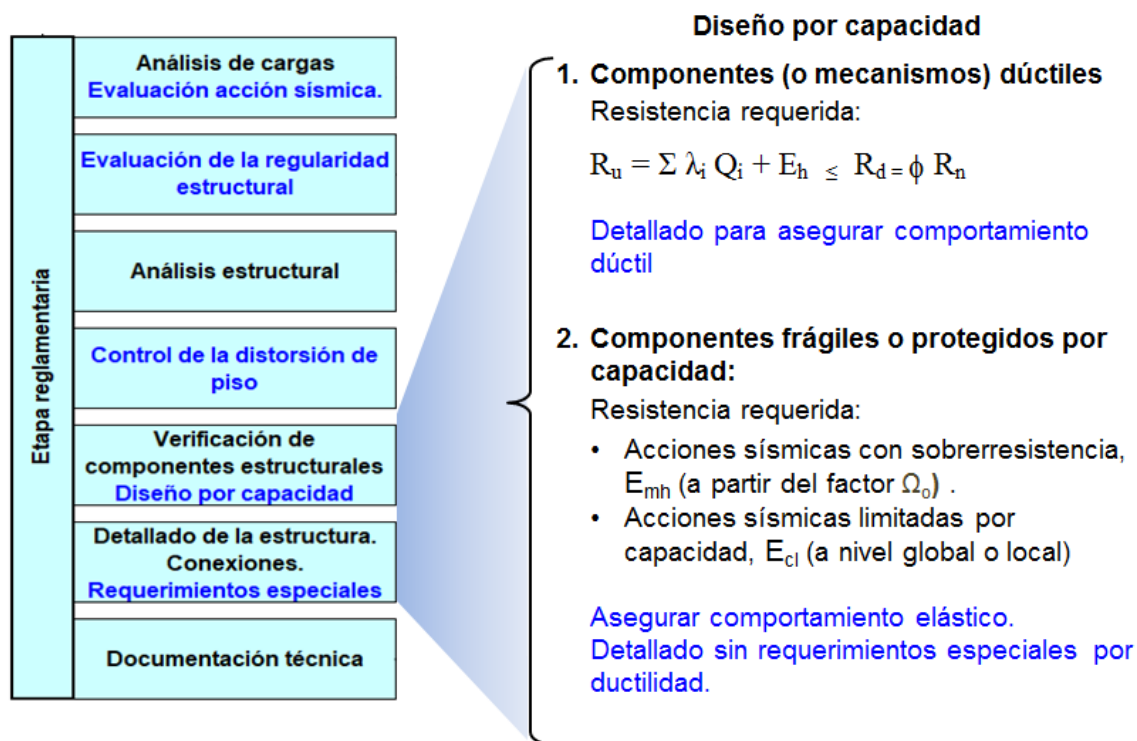


Figura 19. Etapa reglamentaria del diseño sismorresistente y la aplicación del diseño por capacidad.

6.4 Método basado en el análisis dinámico temporal no lineal

El análisis dinámico temporal no lineal es la herramienta de cálculo más precisa, y a la vez más compleja, para evaluar la respuesta sísmica de una estructura. Por esta razón, en la última década, distintos investigadores (como N. Priestley y M. Calvi) han propuesto aplicar los conceptos del diseño por capacidad, pero usando resultados del análisis dinámico no lineal para determinar la resistencia requerida de los componentes frágiles que se quieren proteger. Para ello, se requiere implementar un modelo en

donde se incluye las rótulas plásticas con su sobrerresistencia (según el mecanismo plástico adoptado), mientras todos los componentes restantes se considera que se comportan en rango elástico. El uso de este procedimiento requiere que el diseñador tenga conocimientos avanzados sobre modelación no lineal de estructuras y análisis dinámico, debiendo disponer de programas de computación confiables para realizar estas simulaciones.

Para mayor información sobre la aplicación de este método puede consultarse la Guía de Diseño elaborada por *Los Angeles Tall Building Structural Design Council* (<https://www.latalbuildings.org/>)

6.5 Método de superposición modal efectiva

Este procedimiento, propuesto por Priestley y sus colaboradores, se basa en calcular la resistencia requerida a flexión y corte de los componentes frágiles mediante análisis modal espectral. La particularidad del método es que utiliza una regla de combinación modal que incluye un factor de sobrerresistencia, cuyo valor puede determinarse por análisis seccional o adoptarse como un valor constante para toda la estructura. La explicación detallada del procedimiento excede los alcances de esta guía de estudios, por lo que solo se menciona con un procedimiento propuesto en la literatura técnica (para mayores detalles consultar las siguientes referencias: Priestley, M. J. N y Calvi, G. M. *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 2007; Sullivan, T. J., Priestley, M. J. N y Calvi, G. M. *A Model Code for the Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 2013).

7 DISEÑO BASADO EN DESEMPEÑO

Desde sus inicios, la ingeniería sísmica tuvo como objetivo principal salvaguardar la seguridad de las personas, lo que implica evitar el colapso total o parcial de las construcciones. Es por ello que los procedimientos tradicionales de diseño controlan, como variables principales, la resistencia y ductilidad del sistema estructural. Los terremotos de Northridge, 1994, M6.7, y Hanshin–Awaji (Kobe), 1995, M7.2, entre otros, confirmaron que los edificios diseñados con los reglamentos vigentes cumplen satisfactoriamente este objetivo. Sin embargo, se observó que los daños producidos, las pérdidas económicas y los costos de reparación fueron excesiva e inesperadamente elevados. Esta situación generó una demanda de la sociedad para incorporar objetivos adicionales al diseño sismorresistente.

La *Structural Engineers Association of California, SEAOC*, reconoció esta necesidad previamente a la ocurrencia de los mencionados terremotos y, en el año 1992, propuso la creación del comité VISION 2000 para desarrollar recomendaciones y nuevas metodologías de diseño sismorresistente que permitieran considerar el daño estructural en forma explícita. Es así que en el año 1995 se presentó un documento denominado *Performance-based seismic engineering of buildings*, conocido en forma generalizada como VISION 2000. En este documento se propone formalmente el uso de del diseño basado en desempeño o prestaciones (en inglés performance-based design), el que puede definirse como una metodología donde los criterios de diseño estructural se expresan en función de alcanzar un grupo de objetivos de desempeño o prestaciones. Actualmente, esta metodología también se denomina diseño sísmico basado en desempeño (performance-based seismic design) o diseño sismorresistente basado en desempeño (performance-based earthquake-resistant design).

El documento VISION 2000 considera distintos tipos de terremotos, de modo que se definen cuatro niveles de amenaza sísmica en base a consideraciones probabilísticas:

- Sismo frecuente: 50% de probabilidad de excedencia en 30 años, periodo de retorno $T_R= 43$ años.
- Sismo ocasional: 50% de probabilidad de excedencia en 50 años, periodo de retorno $T_R= 72$ años.
- Sismo raro: 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, periodo de retorno $T_R= 475$ años.
- Sismo muy raro: 10% de probabilidad de excedencia en 100 años, periodo de retorno $T_R= 950$ años.

Además, se definen cuatro objetivos de desempeño o prestación, los que se corresponden con distintos niveles de daño en la construcción. Estos objetivos se definen en forma cualitativa:

- Totalmente operativo (TO): la construcción se mantiene en servicio continuo. Daño despreciable en elementos estructurales y no-estructurales. Respuesta prácticamente elástica. Deformación remanente despreciable.
- Operativo (O): Daño ligero. La mayoría de las actividades y servicios pueden reanudarse luego del terremoto. Fisuración o fluencia menor en algunos elementos estructurales. Deformación remanente despreciable.
- Seguridad de vidas (SV): daño moderado. La estructura permanece estable, pero con reducción en la resistencia y rigidez. Deformaciones remanentes. El edificio puede quedar fuera de servicio y ser evacuado. La reparación es posible, pero el costo puede ser elevado.
- Prevención de colapso: Daño severo, pero se evita el colapso. Los elementos no-estructurales pueden caer o fallar. Deformaciones remanentes apreciables.

Los niveles de amenaza sísmica, caracterizados en forma probabilística, se correlaciona mediante una matriz con el daño estructural y el desempeño, definido determinísticamente y en forma cualitativa. La Figura 20 muestra esta matriz, considerando tres tipos de construcciones, según su importancia. Para las construcciones básicas o usuales, por ejemplo, se espera que ante un sismo frecuente la misma se mantenga totalmente operativa, mientras que para el sismo muy raro solo se busca evitar el colapso.

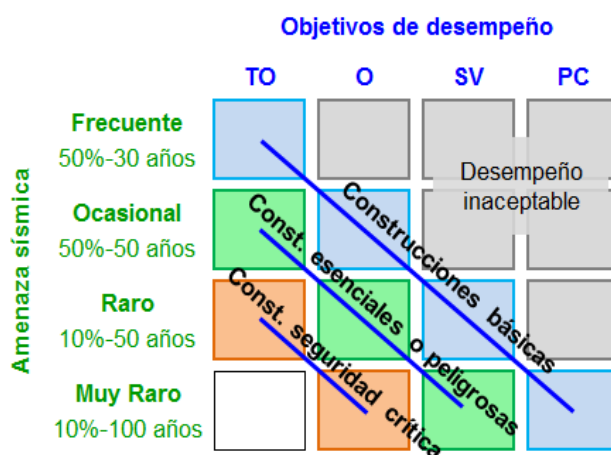


Figura 20. Relación entre amenaza sísmica y niveles de desempeño, según VISION 2000 (SEAOC, 1995). TO: totalmente operativo, O: Operativo, SV: seguridad de vidas y PC: prevención de colapso.

El documento VISION 2000, si bien no se ha aplicado en forma práctica ni implementado posteriormente en reglamentos u otras recomendaciones, ha sido relevante y sirvió como disparador para que distintas organizaciones e investigadores formularan nuevas propuestas de métodos de diseño basado en desempeño.

La implementación práctica del diseño basado en desempeño requiere de una definición más precisa, preferentemente cuantitativa, del daño asociado a los distintos niveles de desempeño. Es por ello que resulta conveniente relacionar el daño con indicadores vinculados al estado de deformación de la estructura, tales como desplazamientos o deformaciones específicas. Algunas propuestas de diseño por desempeño consideran como parámetro principal la distorsión de piso. Así por ejemplo, en la Tabla 6 se presenta la relación entre niveles de desempeño y distorsión de piso propuestos por Biddah y Heidebrecht. También puede cuantificarse el desempeño estructural mediante las deformaciones específicas que se desarrollan en los materiales constituyentes de la estructura. Es decir que se emplean tanto parámetros de respuesta global (distorsión de piso, ductilidad) como indicadores a nivel local

(deformaciones específicas). Para evaluar el desempeño de equipamientos y contenido de las construcciones se pueden usar índices de daño basados, por ejemplo, en la aceleración de piso.

Tabla 6. Relación entre niveles de desempeño y distorsión de piso.

Nivel de desempeño	Distorsión de piso
Totalmente operativo	< 0,2%
Operativo	0,2% a 0,5%
Seguridad de vidas	0,5% a 1,5%
Prevención del colapso	1,5% a 2.5%

El desarrollo e implementación del diseño por desempeño representa uno de los desafíos actuales que enfrenta la ingeniería sismorresistente. Sin embargo, aún persisten diversas incertidumbres y diferentes opiniones acerca de cómo aplicar este procedimiento en la práctica profesional. Así por ejemplo, algunos autores consideran que posibilidad de diseñar estructuras con un desempeño predecible sólo será posible mediante procedimientos totalmente probabilísticos (en contraposición de los criterios de diseño actuales que son principalmente determinísticos). Es por ello que para lograr su efectiva aplicación es necesario profundizar las investigaciones sobre algunos aspectos relevantes. Entre ellos puede mencionarse: caracterización probabilística de la capacidad resistente y el desempeño estructural, procedimientos de diseño para niveles múltiples de amenaza y desempeño, análisis y modelación del comportamiento inelástico con adecuada predicción de los desplazamientos máximos y residuales, etc. En Argentina, la reglamentación vigente para el diseño sismorresistente de estructura no incluye criterios de diseño basado en desempeño.

8 SISTEMAS AVANZADOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los criterios de diseño sismorresistente convencionales, presentados en secciones previas de este capítulo, se fundamentan principalmente en los conceptos de ductilidad (capacidad de disipar energía) y sobrerresistencia estructural, de modo que se pueden reducir las acciones de diseño inducidas por el sismo. Sin embargo, el desarrollo de la ductilidad implica la ocurrencia de daño en las rótulas plásticas, ya sea por la fluencia del acero, la fisuración y caída del recubrimiento (en hormigón armado) o el pandeo local de barras o placas. Así por ejemplo, la Figura 21 muestra el daño resultante en el extremo de dos vigas ensayadas en el laboratorio, luego de la formación de una rótula plástica. El comportamiento estructural es adecuado, pero el desarrollo de la ductilidad originó daño. En una estructura real, esto implicaría la reparación y las consecuentes pérdidas económicas.

A partir de la década de 1980 se produjeron avances significativos en la ingeniería sismorresistente, particularmente por el desarrollo e implementación de distintos dispositivos o sistemas innovadores para controlar la vibración inducida por la acción sísmica. De esta forma, es posible evitar o reducir la necesidad de desarrollar deformaciones plásticas en la estructura. En términos generales, los sistemas para control de la vibración se pueden agrupar en dos grandes categorías: (i) sistemas de control pasivo y (ii) sistemas de control activo, híbrido o semiactivo. La Figura 22 muestra esquemáticamente, a modo de resumen, la clasificación de los distintos sistemas de protección sísmica.

El primer grupo comprende una amplia gama de soluciones destinadas a modificar favorablemente algunas propiedades estructurales, tales como amortiguamiento, rigidez, resistencia y ductilidad. Estos dispositivos, usualmente, se incorporan a la estructura principal de modo tal que pueden remplazarse fácilmente en caso de que fuera necesario (en forma conceptualmente similar a un fusible en una instalación eléctrica). Los sistemas pasivos se pueden subdividir en dos grupos, de acuerdo al principio en

el que se basa su funcionamiento, esto es, (i) el aislamiento sísmico y (ii) la disipación adicional de energía (o amortiguamiento adicional).



Figura. 21. Imagen de rótulas plásticas en el extremo vigas de acero y hormigón armado, ensayadas en el laboratorio.

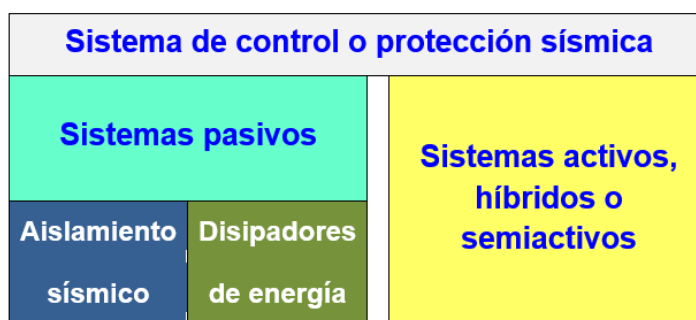


Figura 22. Clasificación de los distintos sistemas de protección sísmica.

El aislamiento sísmico se basa en el concepto de desacoplar la respuesta dinámica de la construcción con respecto a la componente horizontal del movimiento del terreno, mediante la colocación de elementos de muy baja rigidez horizontal dispuestos, generalmente, entre la construcción y sus fundaciones. Si bien se han propuesto muchos sistemas diferentes, su aplicación práctica se hizo realidad con el desarrollo de los aisladores formados por capas alternadas de goma (u otro material similar) y planchuelas de acero inoxidable. La primera aplicación de aisladores de goma se realizó en 1969 para una escuela de tres niveles en Skopje, Yugoslavia, diseñada y construida por un grupo de ingenieros suizos. Otro ejemplo importante es el edificio William Clayton, construido en 1981 en Wellington, Nueva Zelanda, donde se emplearon por primera vez aisladores de goma y plomo, que representa uno de los métodos de aislamiento sísmico más usados en la actualidad. En los últimos veinticinco años se han diseñado y aplicado otros sistemas de aislamiento, por ejemplo, aisladores de goma de alto amortiguamiento, péndulo de fricción, sistema de pilotes encamisados, etc.

Los disipadores de energía, o sistemas con amortiguamiento adicional, mejoran la capacidad de disipar la energía transmitida por el sismo y protegen la estructura principal de los daños que podrían originarse si se aplicaran los principios de diseño sismorresistente convencional. Estos sistemas han tenido una difusión relativamente rápida, siendo aplicados fundamentalmente para construcciones importantes y rehabilitación de edificios históricos, especialmente en Estados Unidos, Japón, Italia y Nueva Zelanda. Sin embargo, se han realizado también proyectos en Armenia, Chile, China e Indonesia para el uso de estos

sistemas en edificios de vivienda de bajo costo. Se ha desarrollado una amplia variedad de dispositivos (usualmente protegidos por patentes comerciales), en los que la disipación de energía se produce a partir de distintos mecanismos, como fluencia de metales, fricción, amortiguamiento viscoso, etc.

Las técnicas de aislamiento sísmico y de disipación sísmica son conceptualmente diferentes y no deben confundirse. La primera tiene por objetivo modificar la respuesta dinámica de la estructura mediante la incorporación de los aisladores, los que por su flexibilidad aumentan el periodo fundamental de vibración de la estructura con base fija, desde T_{BF} a T_A . Este incremento permite, en ciertos casos como se indica en la Figura 23 (a), reducir la demanda sísmica en término de aceleraciones. De ello se deduce que el sistema de aislación sísmica no tiene aplicación generalizada, sino que resulta efectivo en aquellas estructuras cuyo periodo fundamental (sin aisladores) tiene valores intermedios, esto es se ubica en la zona de aceleraciones máximas del espectro.

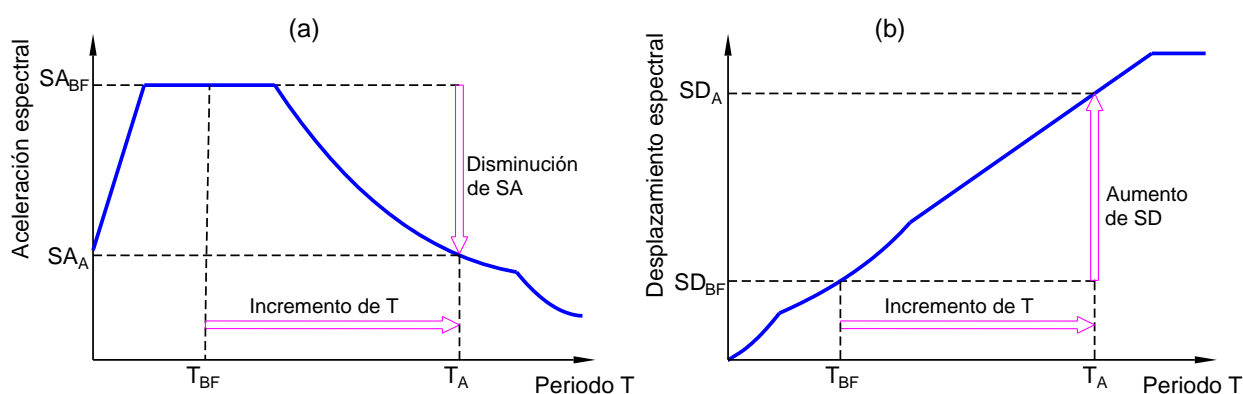


Figura 23. Efecto del aislamiento sísmico en la demanda de aceleración y desplazamiento (definida a través de los espectros de diseño).

El aislamiento sísmico también produce un aumento en la demanda de desplazamientos, como puede observarse en la Figura 23 (b). Este es un efecto no deseado, pero inevitable, debido a la forma usual de los espectros de aceleración y desplazamiento en el rango de periodos medios y grandes. El incremento en la demanda de desplazamientos requiere de aisladores con mayor capacidad de deformación lateral, los que son más grandes y por ende más caros. Para solucionar este inconveniente, los aisladores se combinan con algún mecanismo de disipación de energía adicional, el que puede incorporarse dentro del mismo aislador o como un dispositivo externo. Como ejemplo, podemos mencionar los aisladores de goma con núcleo de plomo, en los que la goma confiere una alta flexibilidad lateral, mientras que el plomo disipa energía por fluencia cuando el aislador se deforma lateralmente.

La capacidad de disipar energía puede representarse mediante un factor de amortiguamiento viscoso equivalente, ξ_{eq} . Este factor permite, en forma aproximada, considerar el efecto de la disipación adicional de energía (ya sea por fluencia de metales, fricción, etc) en la respuesta estructural. Es decir que se adopta un valor mayor de ξ (del orden del 15 al 30%, en casos usuales) y de esa forma se considera el amortiguamiento propio de la estructura (normalmente 5%) más un "amortiguamiento artificial" a través del cual se representa el mecanismo de disipación de energía adicional. La Figura 24 muestra los espectros de aceleración y desplazamiento para un factor de amortiguamiento del 5% (valor reglamentario) y para $\xi_{eq} > 5\%$. El incremento en la capacidad de disipar energía disminuye tanto las aceleraciones como los desplazamientos espectrales.

Al evaluar las características de los dispositivos de control pasivo es necesario considerar:

- Aspectos estructurales: rigidez, resistencia, capacidad de desplazamiento, capacidad de disipar energía o amortiguamiento (en el caso de los disipadores). Adicionalmente, la capacidad de recentrado, esto

es la capacidad de volver a la posición inicial de equilibrio luego de finalizado el terremoto, es una propiedad que mejora las prestaciones de los dispositivos.

- Otras propiedades: durabilidad, resistencia al fuego, costo, posibilidad de inspección y eventual reemplazo (en caso de que resulte necesario), requerimientos de mantenimiento, etc.

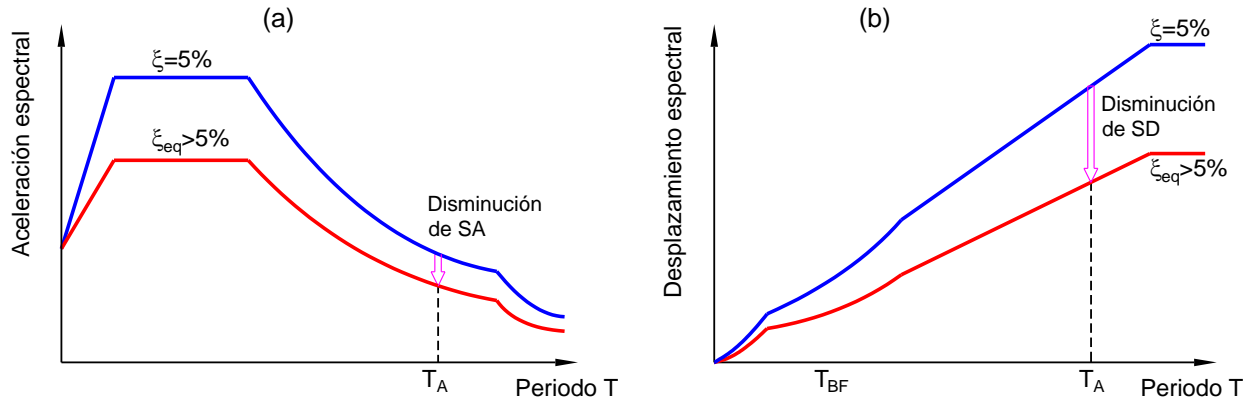


Figura 24. Efecto del aumento de amortiguamiento efectivo (disipación de energía) en combinación con el aislamiento sísmico. Los graficos representan los espectros de diseño para dos factores de amortiguamiento diferente.

Para explicar conceptualmente el efecto estructural de los sistemas pasivos de protección sísmica, conviene recurrir a consideraciones energéticas. La ecuación de equilibrio dinámico para un sistema de un grado de libertad sometido a la acción sísmica puede expresarse, en forma general, como:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + f_s = -m \ddot{u}_g \quad (15)$$

donde f_s es la fuerza restitutiva. En las estructuras sismorresistentes se admite el comportamiento inelástico ante la acción sísmica, de modo que f_s es una función no lineal que depende del desplazamiento u y de la historia previa de deformación. Para el caso particular de un sistema lineal y elástico, la fuerza restitutiva es $f_s = k u$. A partir de las ecuaciones de equilibrio dinámico puede derivarse una ecuación equivalente en términos de energía (multiplicando cada término por un diferencial de desplazamiento, du , integrando y reagrupando):

$$E_i = E_k + E_d + E_s + E_h \quad (16)$$

donde E_i representa la energía introducida por el sismo al sistema (*input*), E_k es la energía cinética, E_d es la energía disipada por amortiguamiento viscoso, E_s es la energía de deformación elástica y E_h es la energía disipada por comportamiento histerético. Es importante notar que las energías cinética y de deformación elásticas no son disipativas; por el contrario estas energías ingresan al sistema y se intercambian según sean los valores de la velocidad y del desplazamiento en un instante dado.

Para visualizar la diferencia, en términos energéticos (Ecuación 16) entre el diseño convencional y el aislamiento sísmico, Popov propuso una analogía hidráulica en la cual la estructura se representa mediante un recipiente y la energía del sismo mediante un cierto caudal de agua que ingresa al mismo. En la Figura 25 se presenta una versión adaptada de la propuesta original de Popov et al. En el caso del diseño sismorresistente convencional, el ingeniero estructural solo puede controlar, dentro de cierto rango, la energía E_h que puede disipar el sistema (modificando la ductilidad de los miembros estructurales). Esta situación se representa en la Figura 25(a), en donde parte de la energía ingresada permanece en el recipiente, E_k y E_s , mientras que la energía excedente es disipada en dos turbinas, E_d (amortiguamiento viscoso) y E_h (histéresis).

Cuando se incorporan aisladores a la construcción, su efecto puede representarse en esta analogía mediante un desvío de parte del agua ingresante, con lo cual se logra reducir la energía E_i , ver Figura 25(b). Finalmente, el uso de elementos disipadores permite incrementar la energía disipada, E_d y/o E_h , según el tipo de disipador, mejorando así la respuesta estructural y se evita que los miembros de la estructura convencional incurrieren en rango inelástico y desarrollen ductilidad. En la Figura 25(c) se muestra esta situación, representando los disipadores mediante un recipiente adicional, para indicar que son dispositivos claramente diferenciables de la estructura principal, los cuales pueden remplazarse en caso de ser necesario (conceptualmente similar a un fusible en una instalación eléctrica). Es importante mencionar que se han desarrollado sistemas de control que en un mismo dispositivo, o en forma separada, incorporan el aislamiento sísmico y la disipación adicional de energía. Con ello se logra optimizar la respuesta, combinando las ventajas de ambos sistemas. Tal es el caso de los aisladores de goma que incorporan un núcleo de plomo, es decir que en un mismo dispositivo se incorporan ambos mecanismos.

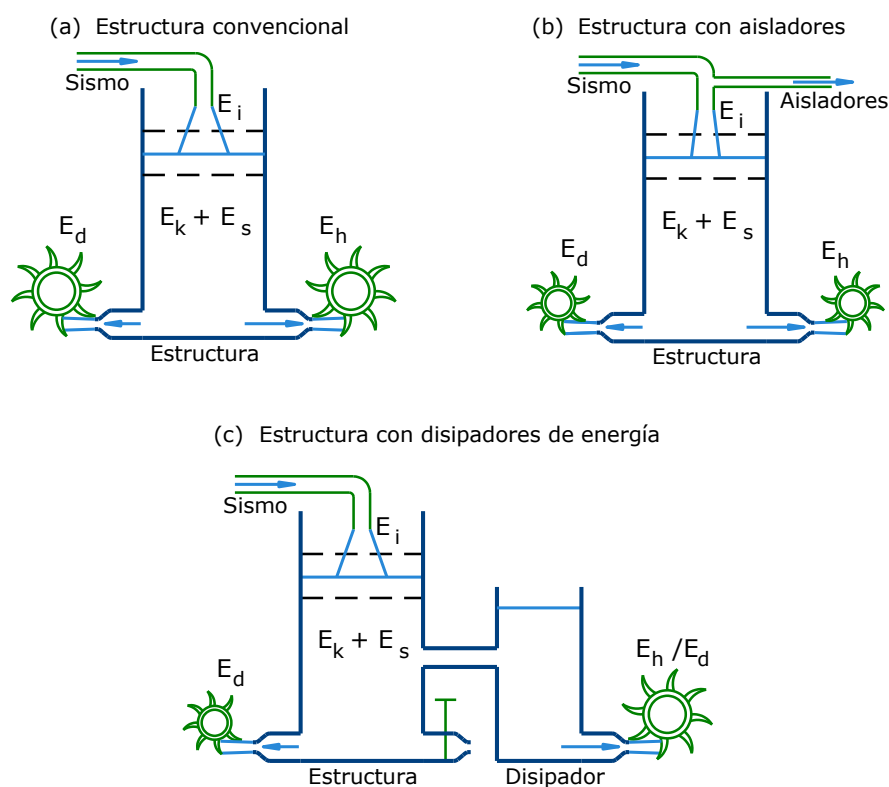


Figura 25. Analogía hidráulica para explicar los criterios de diseño en estructuras convencionales y con sistemas de control pasivo.

El control activo, híbrido o semiactivo incorpora dispositivos especiales para la aplicación de fuerzas (por ejemplo, actuadores hidráulicos), que son controlados por un procesador que recibe información de sensores ubicados en la estructura. De esta forma se logra, en tiempo real, contrarrestar los efectos peligrosos de la acción sísmica, mejorando la seguridad de la construcción. Esta técnica presenta ventajas importantes y ha tenido cierta difusión y desarrollo en los últimos veinte años para control de acciones de viento y sismo. Las principales desventajas son la necesidad de asegurar el suministro eléctrico durante el sismo y el mantenimiento constante de los elementos que integran el sistema de control para que funcione normalmente durante un terremoto. La mayoría de las aplicaciones de control activo de edificios se han realizado en Japón (el primer caso es el Kyobashi Seiwa Building, de once pisos, construido en 1989) y algunos casos aislados en Estados Unidos, Taiwán y China

El desarrollo e implementación de los diversos sistemas de protección sísmica surge, principalmente, como respuesta de la ingeniería estructural a una demanda de la sociedad, que requiere no solo evitar la

pérdida de vidas humanas ocasionadas por los sismos, sino también reducir y controlar las pérdidas económicas resultantes del daño de la construcción y del lucro cesante producto de la interrupción de actividades económicas. Estas nuevas soluciones, que se fundamentan en el avance científico y tecnológico, presentan ventajas en términos económicos cuando el análisis se formula en forma integral, mediante una evaluación de costos y beneficios a lo largo de toda la vida útil de la construcción (ver Figura 26). El costo inicial de la obra puede incrementarse ligeramente (5 a 10%) por la incorporación de sistemas de protección sísmica. Sin embargo, al producirse un sismo, estos sistemas permiten reducir o eliminar las pérdidas por daño y lucro cesante. Es por ello, que su aplicación se incrementa año a año, tanto en los países desarrollados como en desarrollo.

En esta sección hemos presentado aspectos conceptuales y ventajas del aislamiento sísmico y disipación adicional de energía. No se incluye el estudio detallado de los distintos dispositivos utilizados en la práctica, ni los requerimientos para el diseño y análisis estructural de construcciones que incorporan estos dispositivos. Este tema, de mucha importancia, es objeto de otra guía de estudio.

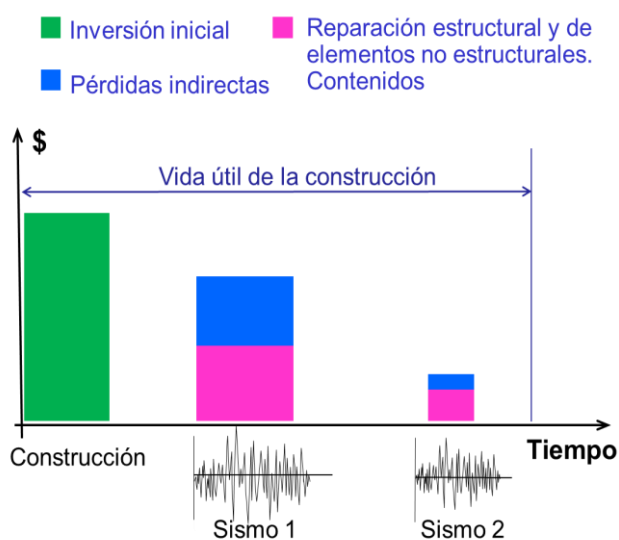


Figura 26. Esquema de la distribución de costos por inversión inicial, por reparación y pérdidas indirectas a lo largo de la vida útil de una construcción.

9 REHABILITACIÓN SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES

9.1 Aspectos generales

En la actualidad, una cantidad significativa de edificios ubicados en zonas sísmicas en todo el mundo no cumplen con los requerimientos de diseño sismorresistente que exigen los códigos modernos, de modo que son vulnerables y podrían resultar dañados ante la acción de un terremoto. Este problema se puso en evidencia en el terremoto de San Fernando, USA, en 1971, por lo que se iniciaron tareas de investigación para identificar y mitigar el riesgo sísmico. Estas tareas continuaron, y se extendieron a otros países, lo que permitió que en la década de 1990 se dispusiera de criterios y procedimientos confiables para la rehabilitación. Una edición especial de la revista *Earthquake Spectra* (*Earthquake Engineering Research Institute*) muestra claramente los avances logrados en la investigación sobre reparación y rehabilitación de distintos tipos de estructuras.

Para ello se deben fijar objetivos a cumplir y, a partir de las deficiencias detectadas en los estudios de evaluación, se adoptan medidas o estrategias de rehabilitación. De esta forma es factible modificar favorablemente propiedades del sistema estructural tales como resistencia, ductilidad, rigidez, redundancia, regularidad estructural, etc. En la Figura 27 se presentan, en forma esquemática y resumida,

los pasos del proceso de rehabilitación. Es importante aclarar que, por la complejidad del proceso y las particularidades de cada caso, estos pasos son indicativos y representan el proceso a seguir en las situaciones usuales. Distintas organizaciones internacionales han editado documentos o reglamentos vinculados a la rehabilitación sísmica, como *Federal Emergency Management Agency*, *American Society of Civil Engineers* y *New Zealand Society for Earthquake Engineering*.

Se acepta generalmente que la denominación "rehabilitación sísmica" se aplica en los casos de construcciones existentes que no cumplen con los criterios modernos de seguridad o desempeño, de modo que se implementan mejoras en forma preventiva (en la bibliografía en inglés, que constituye la referencia principal sobre el tema, se emplean los términos *retrofit*, *rehabilitation*, *upgrade* o *improvement*). En los casos en que la estructura ha sido dañada por un sismo, y su seguridad se ve comprometida, se usa normalmente el término "reparación" para designar el proceso destinado a recuperar un cierto nivel de seguridad. Si bien ambos procesos comparten muchos aspectos en común, cada uno presenta particularidades y diferencias que deben ser consideradas en particular.

Finalmente, es importante destacar que si bien el proceso de rehabilitación se basa principalmente en aspectos estructurales, existen otros factores que usualmente condicionan el proyecto y deben considerarse con especial cuidado, tales como costo de la rehabilitación, limitaciones funcionales y estéticas, procedimiento constructivo, interrupción de la ocupación del edificio, interferencia con instalaciones, etc.

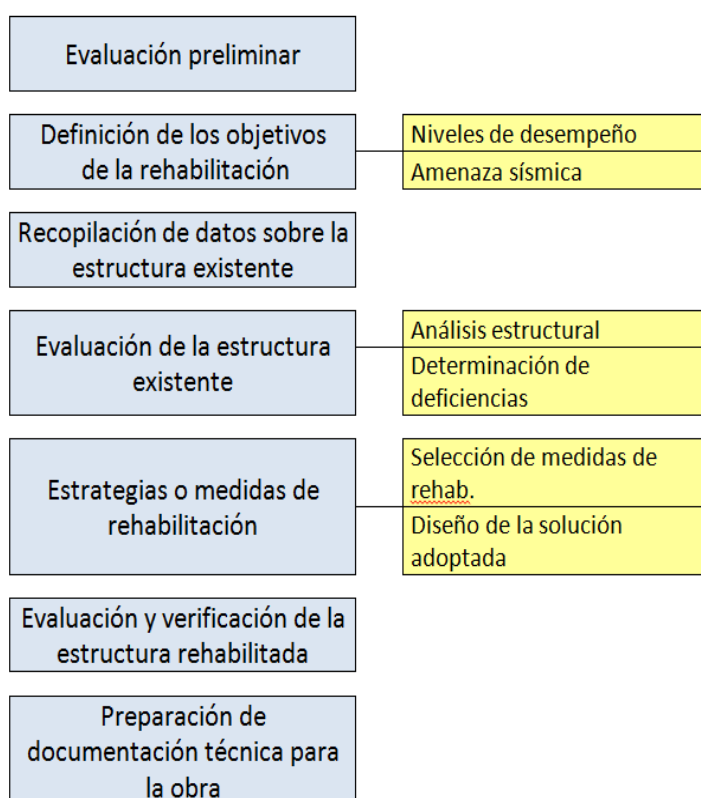


Figura 27. Esquema del proceso de rehabilitación sísmica.

9.2 Estrategias de rehabilitación

Las estrategias de rehabilitación permiten alcanzar los objetivos adoptados, solucionando las deficiencias detectadas en la evaluación estructural. Estas estrategias o medidas de rehabilitación pueden agruparse en las siguientes categorías (según los criterios adoptados en el documento FEMA 356):

- **Modificación local de componentes estructurales:** esta categoría comprende la realización de modificaciones locales en elementos estructurales para mejorar las conexiones o incrementar la

resistencia y/o capacidad de deformación, sin afectar la configuración global de la estructura. Para lograr estos objetivos se han desarrollado numerosas soluciones, de acuerdo al material estructural y al tipo de elementos. A modo de ejemplo pueden mencionarse el uso de placas de acero para el confinamiento de columnas, el encamisado o recrecimiento de elementos de hormigón armado o el uso de materiales compuestos (como polímeros reforzados con fibras) que se adhieren a la estructura existente.

- **Refuerzo global de la estructura:** cuando la respuesta inelástica global de la estructura se inicia a niveles de resistencia significativamente menores que el nivel de diseño adoptado para la rehabilitación es necesario incrementar la resistencia de todo el sistema estructural. Para ello pueden reforzarse los elementos existentes (con los métodos descritos para el caso de modificación local de componentes estructurales) o bien incorporar nuevos elementos estructurales. En este último caso es muy importante evaluar adecuadamente la interacción entre el sistema estructural existente y los nuevos componentes para evitar problemas que podría surgir por incompatibilidad o diferencias de comportamiento entre ambos.
- **Eliminación o reducción de irregularidades existentes:** esta estrategia de rehabilitación es efectiva en aquellos casos en que el proceso de evaluación y análisis, mediante la observación de los perfiles de desplazamiento y las demandas de deformación inelástica, indican que la presencia de irregularidades de masa, rigidez y/o resistencia afectan significativamente la respuesta de la estructura. Frecuentemente, estas irregularidades surgen por discontinuidades en la estructura que pueden corregirse, por ejemplo, mediante la incorporación de riostras de acero o tabiques de hormigón armado en lugares adecuadamente seleccionados. En otras situaciones es difícil eliminar dichas discontinuidades, como ocurre en el caso de construcciones patrimoniales con valor histórico, y deben buscarse otras alternativas para la rehabilitación.
- **Rigidización global de la estructura:** esta solución es aplicable cuando las deficiencias se originan en desplazamientos laterales excesivos y los componentes críticos no disponen de adecuada ductilidad para resistir las deformaciones así originadas. En estos casos es conveniente modificar el sistema estructural incorporando elementos que incrementen la rigidez lateral, como riostras o tabiques de distintos materiales.
- **Reducción de masas:** las fuerzas de inercia que el sismo genera sobre la estructura son directamente proporcionales a la masa, de modo que la reducción de ésta, en aquellos casos que es posible, es una alternativa para disminuir la demanda de resistencia y desplazamientos. Es decir que representa una forma de indirecta de reforzar y rigidizar la estructura. Ello puede ser posible eliminando elementos existentes pesados (particiones internas, contrapisos y pisos, revestimientos de piedras, equipamiento, etc.) y, eventualmente, reemplazándolos por otros más livianos.
- **Aislamiento sísmico:** la incorporación de aisladores, usualmente en las bases de la construcción, permite modificar favorablemente las propiedades dinámicas de la estructura. De esta forma se logra un aumento del periodo de vibración con lo cual se reduce significativamente la demanda en términos de aceleración. Esta técnica es más efectiva para el caso de edificios rígidos (periodos de vibración bajos a medianos) y con relaciones alto-anchura relativamente bajas. Se ha utilizado en países como Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda para la rehabilitación de edificios históricos, en los que el alto valor patrimonial de las construcciones justifica los elevados costos de este proceso de rehabilitación.
- **Incorporación de disipadores de energía:** estos dispositivos se incorporan a la estructura como nuevos componentes y permiten disipar energía a través de procesos friccionales, histeréticos o visco-elásticos, logrando así una reducción de la demanda en términos de desplazamientos y de aceleraciones. Usualmente los disipadores se vinculan a la estructura principal a través de riostras, por lo cual también se incrementa la rigidez lateral, y disipan energía a medida que el sistema se deforma. Este sistema, en general, es más efectivo para estructuras flexibles que presentan cierta capacidad de

deformación inelástica. En muchos casos es conveniente combinar el aislamiento sísmico con disipadores de energía para reducir la demanda de desplazamiento en los aisladores. En este grupo también se incluyen los disipadores de masa sintonizada (que es un tipo de disipador activado por movimiento), los que se han aplicado exitosamente para reducir el efecto de la acción del sismo y del viento.

El estudio detallado del proceso de evaluación y rehabilitación de estructuras escapa del alcance del presente trabajo. Para profundizar sobre este tema debe recurrirse a la normativa internacional y a la bibliografía especializada. En Argentina, el reglamento INPRES-CIRSCO 103, Parte I, incluye en su Capítulo 11 algunos requerimientos para las ampliaciones, reformas y refuerzos de construcciones existentes.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Belluzzi, O. Ciencia de la construcción, Tomo III. Ed. Aguilar. 1967.
- Christopoulos C. y Filiatrault, A. Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Aisolation. IUSS Press, 2006.
- Bozorgnia, Y. y Bertero, V. Earthquake Engineering. CRC Press, 2004.
- Connor, J. J. y Faraji, S. Fundamentals of Structural Engineering. Springer Science & Business Media. 2012.
- Crisafulli, F. J. Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero. ALACERO. 5ta Ed. 2018. <https://www.alacero.org/>
- Elnashai, A. y Di Sarno, L. Fundamentals of Earthquake Engineering. Wiley, 2008.
- Park, R. y Paulay, T ro *Reinforced Concrete Structures*, 1975.
- Priestley, M. J. N y Calvi, G. M. *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 2007
- Reboredo, A. El proceso de diseño estructural. 1999.