

ACHISINA

Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica

DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO

UN PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO
PARA EL ANALISIS Y DISEÑO SÍSMICO
DE EDIFICIOS

COLABORADORES

AICE
INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES DE CHILE A.G.

ICH
Instituto del Cemento y
del Hormigón de Chile

NOVIEMBRE 2017



DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO UN PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

Este es un documento de consenso desarrollado por el Subcomité n° 7 de ACHISINA compuesto por las siguientes personas:

BONELLI, Patricio

CARVALLO, Jorge

DELPORTE, Cristián

HOLMBERG, Augusto

KÜPFER, Marianne

LAFONTAINE, Mario

LAGOS, René

LEIVA, Gilberto

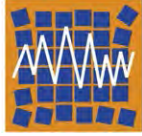
LÜDERS, Carl

MASSONE, Leonardo

RETAMALES, Rodrigo

ROJAS, Fabián

YAÑEZ, Fernando



PRESENTACIÓN

La Asociación Chilena de Ingeniería Sísmología e Ingeniería Sísmica formó un grupo de estudio en 2015 encargado de escribir una nueva guía para el diseño por desempeño de edificios de hormigón armado. El método tradicional basado en fuerzas, ampliamente utilizado actualmente, determina la resistencia requerida en los elementos estructurales de un edificio utilizando un espectro de diseño reducido, que podría interpretarse como un sismo de baja intensidad, esperándose para él una respuesta sin daños. Para ello se limitan las deformaciones de manera de evitar el daño estructural y se da resistencia suficiente para asegurar una respuesta dentro del rango lineal. Este método ha funcionado en general con buenos resultados. Sin embargo, tiene la limitación que no permite ver la respuesta del edificio ante un terremoto destructor.

El desarrollo de la computación, la sofisticación de los métodos de análisis no lineal y su divulgación, permiten hoy el acceso a programas comerciales de análisis no lineal. Si bien es cierto que existe incertidumbre respecto al futuro sismo que actuará sobre el edificio que se está diseñando y que no se conocen bien las propiedades que tendrán los materiales cuando ocurra el terremoto, el estudio de la respuesta dentro del rango no lineal da una gran información de lo que podrían ser las demandas de deformación en las secciones críticas y su ubicación en el sistema estructural, la resistencia que deben tener los elementos que se espera que permanezcan elásticos, las aceleraciones en cada piso que se relacionan con el daño en el contenido, y los desplazamientos laterales que el edificio deberá ser capaz de sostener.

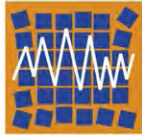
Esta guía de diseño propone un procedimiento alternativo, que se espera que próximamente pueda llegar a convertirse en una norma. El gran aporte, diferente a lo actualmente considerado en la aplicación de guías similares de diseño, está en adoptar sólo un sismo de diseño, el que conocemos y que ha sido registrado en Chile, y para él proponer un diseño que pretende una ocupación inmediata después del sismo. Si el daño para este sismo queda controlado, no es necesario considerar la respuesta de las estructuras ante sismos menores. La incertidumbre en la sollicitación y en el método de diseño hace que sea necesario otorgar a la estructura de una ductilidad adicional, proponiéndose procedimientos y valores que se han considerado razonables, según lo que hasta ahora conocemos.

La guía de diseño alternativo de edificios comienza un periodo de marcha blanca, esperando recibir comentarios y sugerencias que puedan ir mejorándola.

En nombre de la directiva de ACHISINA quiero agradecer al subcomité que participó en su gestación, especialmente al ingeniero Mario Lafontaine que estuvo a cargo de su redacción.

Patricio Bonelli
Presidente

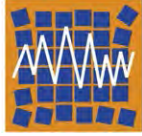




CONTENIDO

PRESENTACIÓN	3
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Aspectos generales	7
1.2 Calificaciones del equipo de diseño	7
2. OBJETIVO, ALCANCE Y METODOLOGÍA	8
2.1 Objetivo	8
2.2 Alcance	8
2.3 Metodología	8
2.4 Propiedades de resistencia y rigidez	10
3. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y DISEÑO	12
3.1 Generalidades	12
3.2 Requisitos para el análisis	12
3.2.1 Modelo matemático	12
3.2.2 Modelos analíticos de los componentes	14
3.2.3 Interacción Suelo-Estructura	14
3.2.4 Amortiguamiento	15
3.3 Diseño por capacidad	16
3.3.1 Clasificación de las acciones estructurales	16
3.4 Evaluación del estado límite de ocupación inmediata	17
3.4.1 Generalidades	17
3.4.2 Sismo de Diseño (SD)	17
3.4.3 Descripción del procedimiento de análisis	18
3.5 Evaluación de la capacidad de deformación adicional	18
3.5.1 Generalidades	18
3.5.2 Sismo máximo considerado (SMC)	18
3.5.3 Descripción del procedimiento de análisis	19
4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	21
4.1 Criterios de aceptación para el estado límite de ocupación inmediata	21
4.1.1 Criterio de aceptación a nivel de componente	21
4.1.2 Criterio de aceptación a nivel global	22
4.2 Criterios de aceptación para el estado límite de capacidad de deformación adicional ..	22
4.2.1 Criterio de aceptación a nivel de componente	22
4.2.2 Criterio de aceptación a nivel global	23





1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

El objetivo de este documento es proporcionar un método basado en el desempeño para el análisis y diseño sísmico de edificios de manera que tengan un comportamiento predecible y seguro al ser sometidos a movimientos sísmicos severos. Estas disposiciones están basadas en las propuestas del Tall Buildings Structural Design Council de Los Angeles (LATBSDC) y permiten identificar las demandas sísmicas más importantes sobre los edificios de manera más precisa que los tradicionales modelos lineales usados en la práctica nacional. En este sentido, se espera que la aplicación del procedimiento contenido en este documento tenga como consecuencia edificios que resistan los sismos de manera efectiva y confiable.

El diseño sísmico de edificios conforme a estas pautas puede ofrecer una serie de ventajas, tales como:

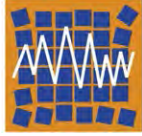
- Obtención más confiable del desempeño sísmico que se persigue.
- Acomodo de características arquitectónicas que de otro modo pueden no ser viables.
- Uso de sistemas y materiales estructurales innovadores.

A pesar de estas ventajas potenciales, los ingenieros que estén considerando utilizar este documento para el diseño de un edificio deben tener debida cuenta del hecho de que una correcta implementación de estas recomendaciones requiere una profunda comprensión del riesgo sísmico, del comportamiento de los materiales estructurales y de la respuesta estructural dinámica no lineal.

1.2 Calificaciones del equipo de diseño

La correcta implementación de estos procedimientos requiere de conocimientos expertos en ingeniería estructural y sísmica, incluyendo los siguientes:

- Análisis de riesgo sísmico y selección de registros de aceleraciones.
- Comportamiento dinámico no lineal de estructuras y sistemas de fundaciones, incluyendo la construcción de modelos matemáticos capaces de predecir dicho comportamiento de manera confiable, utilizando herramientas de software apropiadas.
- Principios de diseño por capacidad.
- Detallamiento de elementos para resistir demandas inelásticas cíclicas, evaluación de la capacidad de resistencia, capacidad de deformación y deterioro de éstas bajo carga inelástica cíclica.



2. OBJETIVO, ALCANCE Y METODOLOGÍA

2.1 Objetivo

El propósito de este documento es proporcionar un método alternativo, basado en el desempeño, para el análisis y diseño sísmico de edificios, con un comportamiento predecible y seguro al ser sometidos a los movimientos sísmicos. Estas disposiciones permiten identificar las demandas sísmicas más importantes sobre los edificios de manera más precisa que los tradicionales modelos lineales. En este sentido, se espera que la aplicación del procedimiento contenido en este documento tenga como consecuencia edificios que resistan las fuerzas sísmicas de manera efectiva y confiable.

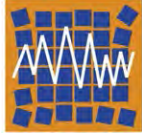
2.2 Alcance

Este documento fue desarrollado para el diseño principalmente de edificios altos, los cuales generalmente quedan controlados por una respuesta de flexión. Sin perjuicio de esto, no hay impedimento para utilizarlo en el diseño de otro tipo de edificaciones.

2.3 Metodología

El procedimiento contenido en este documento se basa en los principios de diseño por capacidad, seguido de una serie de verificaciones del diseño basadas en el desempeño. En primer lugar, los principios del diseño por capacidad se aplican para diseñar una estructura que tenga un mecanismo o mecanismos de fluencia dúctil adecuados bajo deformaciones laterales. Para determinar la resistencia requerida por los distintos elementos estructurales, se puede utilizar el análisis lineal tradicional requerido por los códigos vigentes.

Posteriormente se deberá evaluar analíticamente el cumplimiento de dos estados límites establecidos en esta normativa: estado límite de ocupación inmediata para el sismo de diseño SD (capítulo 3.4) y capacidad de deformación adicional para el sismo máximo considerado SMC (capítulo 3.5). Para esto se utilizarán modelos no lineales de acuerdo a lo indicado en el capítulo 3.2, a menos que se demuestre que la estructura permanece lineal para el nivel de demanda considerado (todos sus elementos cumplen los requisitos para acciones controladas por resistencias indicadas en el capítulo 4.1 o 4.2 según corresponda).



C.2.3 En Chile la fuente principal de terremotos es la subducción. En promedio, cada veinte años se tiene un terremoto de magnitud mayor que $M_w=8.0$. Ese es el sismo que se conoce. El uso de una estructura rígida, proveniente de la tradición del uso del muro de hormigón armado, se ha traducido en una excelente respuesta a los sismos más grandes del planeta. Los edificios fundados en suelos blandos donde la roca está profunda y edificios con irregularidades en la vertical, sufrieron daños que es posible evitar mediante la aplicación de las correcciones a las norma de diseño hechas con posterioridad al terremoto de 2010.

De la observación de daños, se puede concluir que la respuesta ha sido operacional (Lagos et al, 2013), salvo en el caso particular de edificios que tuvieron daños en muros delgados sin refuerzo transversal de confinamiento.

Evaluaciones de edificios dañados en 2010 estimaron que el desplazamiento lateral debe haber estado en torno al 1.2% de la altura total del edificio, valor no muy alto pero suficiente para producir el daño en muros que resultaron ser muy frágiles.

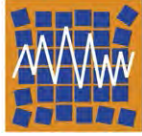
El muro ha mostrado ser muy eficiente para evitar la falla de piso blando, que ha producido múltiples colapsos en terremotos pasados en el mundo, con gran pérdida de vidas. En el caso extremo del único edificio de mediana altura que colapsó en Concepción, la mayoría de los habitantes sobrevivieron porque no ocurrió la denominada falla de “panqueque”, la cual consiste en el derrumbe sucesivo de un piso encima de otro, quedando una losa en contacto con otra.

Estudios de réplicas y mediciones en un edificio en Viña del Mar (Edificio Alcázar, Boroschek, 2010) han demostrado que los desplazamientos en eventos distintos al principal producen respuestas elásticas, de un orden de magnitud menor al que experimentan ante el sismo principal.

Por estas razones se propone adoptar como sismo de diseño, el sismo conocido, registrado en 1985 en la zona central, en 2010 en la zona central y sur del país, en 2014 en Iquique y en 2015 en Coquimbo. Para este sismo, adoptado como sismo de diseño, y caracterizado por el espectro elástico de desplazamientos indicado en el artículo 13 del Decreto Ley Num. 61 en 2011, es posible obtener una respuesta de ocupación inmediata.

Este sismo será denominado como el sismo de diseño (SD), y es posible de ocurrir con bastante certeza durante la vida útil de la estructura

Como medida de seguridad adicional, se requerirá verificar la capacidad de deformación adicional del edificio para un sismo mayor que el de diseño (Sismo Máximo Considerado o SMC).



2.4 Propiedades de resistencia y rigidez

Los modelos estructurales deben incorporar estimaciones realistas de rigidez y resistencia considerando el nivel anticipado de excitación y daño. Se deben utilizar las propiedades esperadas de los materiales a diferencia de las propiedades nominales o especificadas. En vez de una justificación detallada, se pueden utilizar los valores proporcionados en las Tablas 1 y 2 para las resistencias esperadas de los materiales y las estimaciones de la rigidez de los componentes, respectivamente.

Tabla 1. Resistencias esperadas de los materiales

Material		Resistencia esperada
Resistencia a la fluencia para		Resistencia
Acero estructural	Perfiles y barras estructurales laminadas en caliente	
	ASTM A36/A36M	$1,5F_y$
	ASTM A572/A572M Grado 42 (290)	$1,3F_y$
	ASTM A992/A992M	$1,1F_y$
	Todos los demás grados	$1,1F_y$
	Secciones estructurales huecas	
	ASTM A500, A501, A618 y A847	$1,3F_y$
	Tuberías de acero	
	ASTM A53/A53M	$1,4F_y$
	Placas	$1,1F_y$
	Todos los demás productos	$1,1F_y$
Resistencia a la fluencia para el acero de refuerzo		1,17 veces el f_y especificado
Resistencia máxima para el hormigón		1,3 veces el f'_c especificado

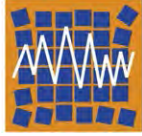


Tabla 2. Propiedades de rigidez del hormigón armado

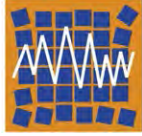
Elemento	Rigidez a usar
Muros estructurales	Flexión – $1,0 E_c^{*,**}$ Corte – $0,5 A_g$
Muros subterráneo	Flexión – $0,8 I_g$ Corte – $0,8 A_g$
Vigas de acople	Flexión – $0,2 I_g$ Corte – $1,0 A_g$
Diafragmas (en el plano)	Flexión – $0,25 I_g$ Corte – $0,25 A_g$
Vigas de pórtico resistentes a momento	Flexión – $0,35 I_g$ Corte – $1,0 A_g$
Columnas de pórtico resistentes a momento	Flexión – $0,7 I_g$ Corte – $1,0 A_g$

* El módulo de elasticidad se basa en las siguientes ecuaciones:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{para } f'_c \leq 41 \text{ MPa}$$

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa} \quad \text{para } f'_c > 41 \text{ MPa (de acuerdo a ACI 363R-92)}$$

** Los elementos de fibra no lineales responden automáticamente por la fisuración del hormigón, puesto que las fibras del hormigón tienen menor resistencia a tracción. La rigidez a flexión de cualquier elemento modelado con fibras no requiere ser modificada.



3. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y DISEÑO

3.1 Generalidades

El análisis y diseño sísmico de los edificios se debe realizar de modo que el edificio tenga las siguientes características:

1. Un comportamiento inelástico bien definido, donde las acciones y elementos no lineales se encuentren claramente definidos, y todos los demás elementos hayan sido diseñados de manera que sean más resistentes que la demanda impuesta por los elementos diseñados para experimentar un comportamiento no lineal (método de diseño por capacidad).
2. Los sistemas estructurales y no estructurales del edificio y de sus componentes permanezcan operativos para ocupación inmediata cuando sean sometidos al sismo de diseño (SD).
3. La estructura tenga una capacidad de deformación adicional para la eventualidad de un sismo mayor que el de diseño, denominado como sismo máximo considerado (SMC).

C.3.1 El procedimiento contenido en este documento incorpora una filosofía que busca que las construcciones sean capaces de:

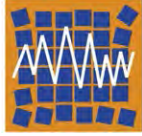
1. Resistir el sismo de diseño (SD) con una respuesta de ocupación inmediata.
2. Al obtener una respuesta de ocupación inmediata para el SD, se hace innecesario verificar la respuesta para un sismo frecuente o de servicio.
3. Ante la eventualidad que la demanda pueda superar la de diseño, se otorgará a la estructura una capacidad de deformación adicional.

3.2 Requisitos para el análisis

3.2.1 Modelo matemático

o Generalidades

Se deben usar modelos matemáticos tridimensionales de la estructura física que representen la distribución espacial de la masa y rigidez de la estructura hasta donde sea adecuado para calcular los aspectos significativos de la respuesta dinámica del edificio. Los modelos estructurales deben incorporar cálculos realistas de la rigidez y amortiguamiento considerando los niveles previstos de excitación y daño (Tablas 1 y 2).



Cuando sea significativo, se debe incluir explícitamente en el análisis dinámico no lineal, la contribución al efecto P- Δ de todas las cargas permanentes del edificio.

Además de los elementos y componentes del sistema resistente a fuerzas laterales, en el modelo matemático se deben incluir todos los otros elementos y componentes que combinados contribuyan o afecten significativamente la rigidez local o total del edificio.

o Unión viga-columna de marcos metálicos

En el análisis de marcos resistentes a momento de acero se debe considerar la flexibilidad de los nudos, incluyéndose la sección panel determinada por la intersección de las vigas que llegan a ellos. Como alternativa a un modelo explícito de la zona panel viga-columna, se puede modelar la viga sin cacho rígido (largo flexible hasta el eje de la columna)

C.3.2.1.a Se puede obtener información adicional respecto de las suposiciones adecuadas sobre la rigidez de la estructura de acero, derivándola de los datos de ensayos adecuados, o bien en Moehle et al. (2008) y Hamburger et al. (2009).

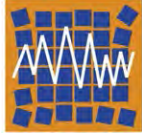
o Diafragmas de piso

Si fuera necesario, en el modelo matemático se deben incluir los diafragmas de piso usando propiedades de rigidez realistas. Independientemente de la rigidez o flexibilidad relativa de los diafragmas de piso, la flexibilidad de los diafragmas con transferencia de fuerzas significativa (por ejemplo, niveles de trancamiento donde se produce un cambio brusco de resistencia y rigidez por la adición de nuevos ejes resistentes) se debe incluir explícitamente en el modelo matemático. En el diseño de los diafragmas se deben considerar tanto los esfuerzos de corte como los de flexión. En las discontinuidades de los diafragmas, como aberturas y esquinas entrantes, se debe evaluar la disipación o transferencia de fuerzas de los colectores a los ejes resistentes.

C.3.2.1.b En el caso de no considerar la no linealidad en diafragmas de piso fuera del plano, se debe reducir la rigidez fuera del plano para reproducir resultados concordantes con la capacidad del diafragma.

o Bases de columnas

Se deben usar suposiciones realistas para representar la fijación de la base de las columnas. Se puede considerar que una base de columna está empotrada cuando la conexión de la base de la columna a la fundación es capaz de transferir las fuerzas y deformaciones de la columna hacia la fundación con una rotación insignificante de la unión, considerando la flexibilidad de la fundación.



3.2.2 Modelos analíticos de los componentes

o Elementos no lineales

Las curvas constitutivas e histeréticas de todos los componentes no lineales deben estar basadas ya sea en experiencia documentada que apoye los supuestos considerados o en ensayos específicos del componente.

Para efectos de determinar las resistencias de las secciones críticas, se deben utilizar las expresiones indicadas en el código del material vigente usando los valores de resistencia esperados indicados en la Tabla 1 y un factor de minorización de resistencia $\phi = 1.0$

C.3.2.2 Algunas referencias donde se puede encontrar información referente a la modelación no lineal de distintos componentes son:

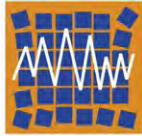
- ASCE (2013) Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ASCE/SEI 41-13, American Society of Civil Engineers, Reston, VA
- PEER/ATC (2010). Modeling and acceptance criteria for seismic design of tall buildings, PEER/ATC 72-1 Report, Applied Technology Council, Redwood City, CA
- Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (LATBSDC 2017), An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region, Los Angeles, CA
- PEER/TBI (2017), Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, PEER Report 2017/06, Berkeley, CA

o Dispositivos para la modificación de la respuesta

Si se usan dispositivos para modificar la respuesta sísmica (como aislación sísmica o disipadores de energía), se deben incluir en el análisis las propiedades de dichos dispositivos, las cuales deben estar respaldadas mediante ensayos de laboratorio. Si las propiedades de estos dispositivos varían significativamente, las simulaciones de respuesta de la estructura deben usar modelos adicionales que incorporen las condiciones de borde superiores e inferiores de dichas propiedades. Si los dispositivos tienen un límite funcional más allá del cual dejan de operar (por ejemplo, un límite de desplazamiento) debe estar representado en el modelo analítico (siempre cuando dicho límite sea superado).

3.2.3 Interacción Suelo-Estructura

Actualmente existen procedimientos de análisis detallado de la interacción suelo-estructura, los cuales se pueden utilizar. En esta sección se propone un procedimiento simplificado.



El movimiento debe ser aplicado en la base de la estructura y puede ser movimiento de campo libre del terreno (u_g) o bien, movimiento de la fundación (u_{FIM}), el cual es modificado por los efectos de la interacción cinemática.

Cuando existe un adecuado confinamiento del suelo, la masa de los niveles subterráneos puede ser modificada o ignorada. Alternativamente puede modelarse la rigidez lateral del suelo mediante elementos no lineales que solo resistan compresión (Figura 1).

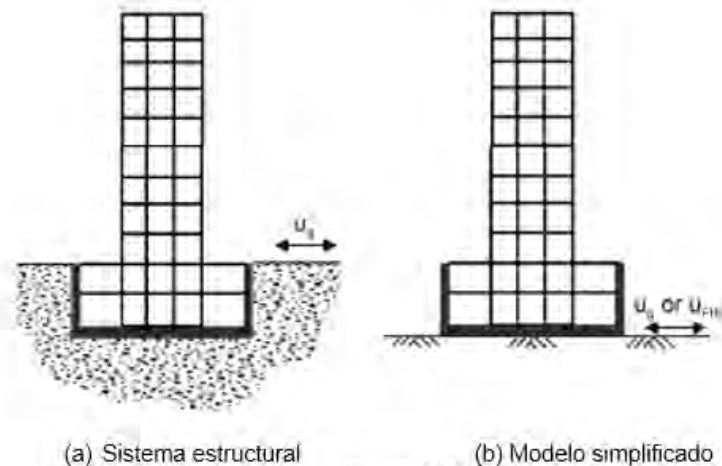


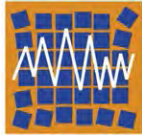
Figura N° 1

C.3.2.3 El método simplificado aquí presentado puede ser adoptado fácilmente en la práctica para el análisis y diseño estructural. Métodos más complicados pueden requerir mayor esfuerzos sin obtenerse mejores resultados, como lo demuestra Naeim et al. (2010).

3.2.4 Amortiguamiento

Gran parte de la disipación de energía se capturará mediante la modelación explícita del ciclo histerético de los elementos inelásticos. De todos modos se puede incluir un pequeño amortiguamiento viscoso equivalente o un amortiguamiento proporcional a una combinación de masa y rigidez para representar el amortiguamiento inherente de la estructura. El amortiguamiento inherente adicional no debe exceder el 2,5% del amortiguamiento crítico en los modos principales.

C.3.2.4 Mediante un amortiguamiento viscoso equivalente se puede considerar el efecto del amortiguamiento de los elementos estructurales que no se hayan incorporado en el modelo de análisis (por ejemplo, columnas estáticas si éstas no fueron modeladas), del efecto de la interacción suelo-estructura



y de los componentes no estructurales. La cantidad de amortiguamiento viscoso debe basarse en las características específicas del diseño del edificio y puede quedar representado por el amortiguamiento modal, por amortiguamiento viscoso modelado explícitamente, o por un amortiguamiento proporcional a la rigidez y a la masa (por ejemplo, amortiguamiento de Rayleigh). En la Sección 2.4 de ATC-72 (ATC 2009) se discute y se dan recomendaciones sobre cómo considerar en el análisis el amortiguamiento viscoso en el análisis de edificios altos.

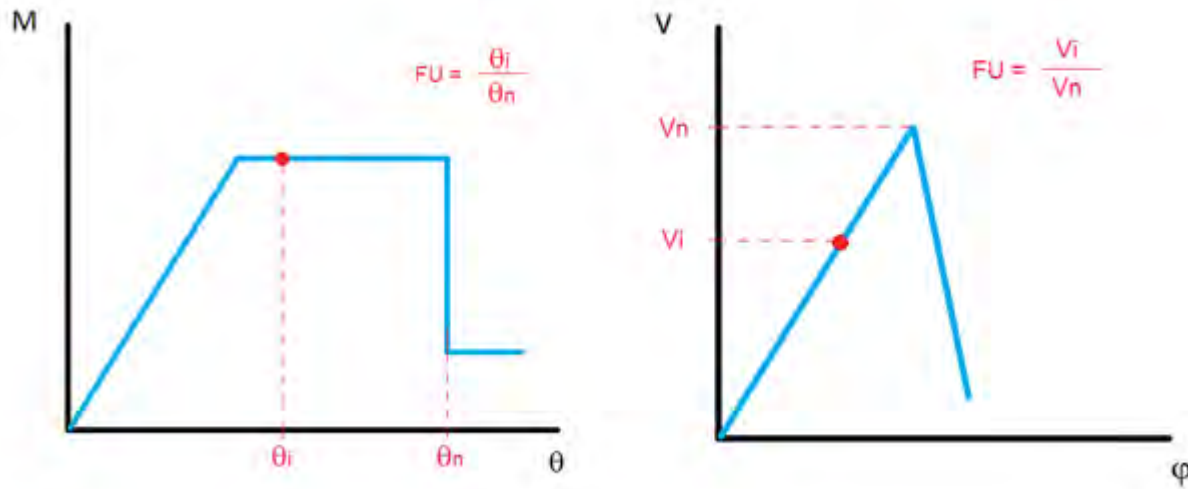
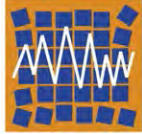
3.3 Diseño por capacidad

El diseño del edificio debe basarse en los principios del diseño por capacidad y en los procedimientos analíticos descritos en este documento. Debe quedar claramente demostrado que el sistema estructural del edificio tiene un comportamiento inelástico bien definido, donde la acción no lineal se encuentra limitada a los elementos y regiones claramente identificados, y que todos los demás elementos son más resistentes que los elementos diseñados para soportar un comportamiento no lineal.

3.3.1 Clasificación de las acciones estructurales

Todas las acciones (fuerzas, momentos, deformaciones unitarias, desplazamientos u otras deformaciones) deben ser clasificadas ya sea como acciones controladas por resistencia o controladas por deformación. Las acciones controladas por deformación son aquellas donde el comportamiento es dúctil y se pueden alcanzar deformaciones inelásticas confiables sin pérdidas sustanciales de resistencia. Las acciones controladas por resistencia son aquellas en las que el comportamiento es más frágil y no se pueden alcanzar deformaciones inelásticas confiables.

El factor de utilización de las acciones controladas por deformación será el cociente entre la deformación solicitante y la deformación resistente, mientras que para las acciones controladas por resistencia será el cociente entre la fuerza (momento) solicitante v/s la fuerza (momento) resistente. En la Figura 2 se muestran dos ejemplos, un factor de utilización de una rótula plástica a flexión considerada dúctil (controlada por deformación) y un factor de utilización de una sección bajo esfuerzos de corte considerada frágil (controlada por resistencia).



3.4 Evaluación del estado límite de ocupación inmediata

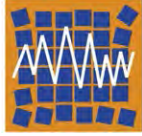
3.4.1 Generalidades

El objetivo de esta evaluación es verificar que los sistemas estructurales y los componentes y fijaciones no estructurales del edificio conservarán su funcionalidad general durante y después de un sismo. En caso necesario, se espera que las reparaciones sean menores y se puedan realizar sin afectar sustancialmente el uso normal y la funcionalidad de la edificación.

3.4.2 Sismo de Diseño (SD)

El sismo de diseño queda definido por una familia de mínimo tres pares de registros horizontales (reales o artificiales). Los registros deben tener magnitudes, distancias a la falla, fuentes del mecanismo del sismo y tipos de suelo que sean consistentes con aquellos que controlan el SD. Cuando no se disponga de componentes de registros reales, se pueden agregar registros artificiales.

Para cada par de registros se deben construir los espectros de pseudo aceleraciones para $\beta=0.05$ y se deben combinar según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros se deben modificar de manera que el promedio de los espectros de desplazamientos combinados con SRSS para todos los pares de registros no resulte menor que 1.17 veces el espectro elástico de desplazamientos del artículo 13 del Decreto Ley Num. 61 del año 2011 para un $\beta=0.05$ y un rango de períodos comprendido entre $0.5T$ y $1.25T$, donde T corresponde a el (los) período(s) principal(es).



El espectro de desplazamiento S_d se puede obtener a partir del espectro de pseudo aceleración PS_a mediante la siguiente expresión:

$$S_d = \frac{T_n^2}{4\pi^2} PS_a$$

Alternativamente se puede obtener la demanda sísmica a partir de un estudio de riesgo sísmico específico para el proyecto considerando un período de retorno T_r de 475 años. Esta demanda no puede ser menor a un 80% que la especificada anteriormente (DS 61).

3.4.3 Descripción del procedimiento de análisis

Para evaluar este estado límite, se debe realizar una serie de análisis de respuesta dinámica no lineal con al menos tres pares apropiados de componentes horizontales, como se define en 3.4.2.

La estructura debe ser evaluada para las siguientes condiciones de carga:

$$1.0D + L_{exp} + 1.0SD$$

Donde D es la carga permanente y L_{exp} es la carga viva de servicio. L_{exp} puede tomarse como 25% de la carga viva no reducida a menos que se justifique de otro modo. Este estado de carga estático ($1.0D + L_{exp}$) debe ser considerado como un estado inicial antes de la aplicación de SD .

Para cada análisis de respuesta dinámica no lineal se deberá calcular el parámetro de interés. Cuando se utilicen al menos siete pares de registros compatibles con lo indicado en 3.4.2, se podrá utilizar el valor promedio de respuesta del parámetro de interés. En caso contrario se deberá utilizar la respuesta máxima del parámetro de interés.

3.5 Evaluación de la capacidad de deformación adicional

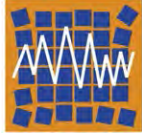
3.5.1 Generalidades

El objetivo de esta evaluación es verificar que la estructura tiene una capacidad de deformación adicional si es sometida a una demanda de deformación superior a la calculada con el SD .

3.5.2 Sismo máximo considerado (SMC)

Se deberá verificar la estructura para el sismo máximo considerado. Se pueden utilizar los mismos registros utilizados para el SD amplificados un 30%.

Alternativamente el SMC podrá provenir de un estudio de riesgo sísmico específico para el proyecto



para un período de retorno T_r de 950 años. Esta demanda no puede ser menor a un 80% que la especificada anteriormente (amplificación de 30% de los registros usados para el SD).

Adicionalmente se permite considerar el SMC como aquel que para un análisis estático no lineal (Pushover) lleve a la estructura a un desplazamiento de techo un 40% mayor que el desplazamiento de techo obtenido para el sismo de diseño.

3.5.3 Descripción del procedimiento de análisis

Se permiten dos métodos distintos para verificar este estado límite: un análisis estático no lineal (Pushover) y un análisis dinámico no lineal.

o Análisis Estático No Lineal (Pushover)

Para evaluar este estado límite, se debe realizar un análisis estático no lineal (Pushover) hasta el desplazamiento de techo indicado en 3.5.2.

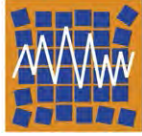
La estructura debe ser evaluada para las siguientes condiciones de carga:

$$1.0D + L_{exp} + 1.0SMC$$

Donde D es la carga permanente y L_{exp} es la carga viva de servicio. L_{exp} puede tomarse como 25% de la carga viva no reducida a menos que se justifique de otro modo. Este estado de carga estático ($1.0D + L_{exp}$) debe ser considerado como un estado inicial antes de la aplicación de SMC.

El patrón de carga lateral a utilizar será como mínimo la forma modal del modo de mayor masa traslacional en la dirección de análisis. Esto se deberá efectuar para todas las direcciones importantes de la estructura, considerando un mínimo de 4 casos (uno en la dirección longitudinal, otro en el sentido contrario a la dirección longitudinal, otro en la dirección transversal y otro en el sentido contrario a la dirección transversal).

Para cada uno de los análisis efectuados se deberá calcular el parámetro de interés. Se deberá utilizar la respuesta máxima del parámetro de interés para todos los patrones de carga y direcciones de análisis considerados.



o Análisis Dinámico No Lineal

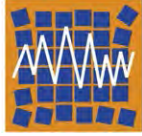
Alternativamente, se permite utilizar un análisis dinámico no lineal utilizando registros acorde a lo indicado en 3.5.2.

La estructura debe ser evaluada para las siguientes condiciones de carga:

$$1.0D + L_{exp} + 1.0SMC$$

Donde D es la carga permanente y L_{exp} es la carga viva de servicio. L_{exp} puede tomarse como 25% de la carga viva no reducida a menos que se justifique de otro modo. Este estado de carga estático ($1.0D + L_{exp}$) debe ser considerado como un estado inicial antes de la aplicación de SMC.

Para cada análisis de respuesta dinámica no lineal se deberá calcular el parámetro de interés. Cuando se utilicen al menos siete pares de registros compatibles con lo indicado en 3.5.2, se podrá utilizar el valor promedio de respuesta del parámetro de interés. En caso contrario se deberá utilizar la respuesta máxima del parámetro de interés.



4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

4.1 Criterios de aceptación para el estado límite de ocupación inmediata

Los criterios de aceptación para el estado límite de ocupación inmediata se deben verificar a nivel de componentes y a nivel global.

4.1.1 Criterio de aceptación a nivel de componente

o Elementos controlados por resistencia

Todos los elementos controlados por resistencia deben ser clasificados en elementos críticos y no críticos. Los elementos controlados por resistencia críticos son aquellos en los que una falla puede ocasionar consecuencias severas en la estabilidad estructural bajo cargas estáticas o dinámicas.

Todos los elementos controlados por resistencia deben cumplir con:

$$\lambda Fu \leq \phi Fn$$

donde

$\lambda = 1.5$ para elementos críticos

1.0 para elementos no críticos

F_u = Demanda de resistencia para el SD

F_n = Resistencia nominal de acuerdo al código del material vigente pero usando los valores basados en las resistencias esperadas de los materiales (Tabla 1)

$\phi = 1.0$

o Elementos controlados por deformación

Los elementos controlados por deformación deben cumplir con los límites indicados a continuación:

Muros HA

Acortamiento unitario en el hormigón confinado:	0.008
Acortamiento unitario en el hormigón no confinado:	0.003
Alargamiento unitario en el acero de refuerzo:	0.030

Columnas de marco HA

Rotación plástica:	0.005
--------------------	-------

Vigas de marco HA

Rotación plástica:	0.01
--------------------	------

Vigas de acople HA

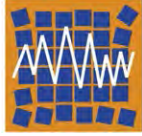
Rotación plástica:	0.01
--------------------	------

Vigas de marcos de acero

Rotación plástica:	θ_y
--------------------	------------

Columnas de marcos de acero

Rotación plástica:	θ_y
--------------------	------------



Se considerará el hormigón como confinado en caso de cumplir con las cuantías de confinamiento establecidas en el código de material vigente.

Los límites de deformación para los componentes no detallados en este documento deben elegirse de tal manera que respeten el espíritu del estado límite aspirado (continuidad operativa).

4.1.2 Criterio de aceptación a nivel global

La deriva de entrepiso máxima en cualquier punto de la planta para este estado límite debe ser inferior a los valores que se muestran a continuación:

Edificios con elementos no estructurales frágiles:	0.005
Edificios con elementos no estructurales dúctiles:	0.007

Estos valores no aplican para elementos flotantes.

4.2 Criterios de aceptación para el estado límite de capacidad de deformación adicional

4.2.1 Criterio de aceptación a nivel de componente

o Elementos controlados por resistencia

Todos los elementos controlados por resistencia críticos deben cumplir con:

$$F_u \leq \phi F_n$$

donde

F_u = Demanda de resistencia para el SMC

F_n = Resistencia nominal de acuerdo al código del material vigente pero usando los valores basados en las resistencias esperadas de los materiales (Tabla 1)

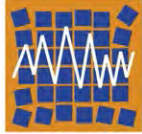
$\phi = 1.0$

o Elementos controlados por deformación

Los elementos controlados por deformación deben tener alargamientos o acortamientos menores a los límites indicados a continuación:

Muros HA

Acortamiento unitario en el hormigón confinado:	0.015
Acortamiento unitario en el hormigón no confinado:	0.003
Alargamiento unitario en el acero de refuerzo:	0.050



Columnas de marco HA

Rotación plástica: 0.025

Vigas de marco HA

Rotación plástica: 0.02

Vigas de acople de hormigón armado

(si no compromete estabilidad vertical)

Rotación plástica: Sin Límite

Vigas de marcos de acero

Rotación plástica: $6\theta_y$

Columnas de marcos de acero

Rotación plástica: $6\theta_y$

Se considerará el hormigón como confinado en caso de cumplir con las cuantías de confinamiento establecidas en el código de material vigente.

Los límites de deformación para los componentes no detallados en este documento deben elegirse de tal manera que respeten el espíritu del estado límite aspirado (seguridad de la vida).

4.2.2 Criterio de aceptación a nivel global

No aplica, están considerados implícitamente en los requisitos a nivel de componente.