

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECCION DE POSTGRADO**



**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO
PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE**

TESIS

Para Optar el Grado de Maestro en Ciencias con
Mención en Ingeniería Estructural

Presentado por:

Ing. Javier Francisco Taipe Carbajal

Lima – Perú

2,003

**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA
NORMA PERUANA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE**

Ing. Javier Francisco Taipe Carbajal

Presentado a la Sección de Postgrado de la Facultad de Ingeniería
Civil en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERIA ESTRUCTURAL**

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Diciembre de 2003

© 2003, Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados

Autor:

Javier Francisco Taipe Carbajal
Facultad de Ingeniería Civil
Diciembre de 2003

Recomendado por:

Dr. JAVIER PIQUE DEL POZO
Profesor de Postgrado
Asesor de Tesis

Aceptado por:

Dr. JORGE ALVA HURTADO
Jefe de la Sección de Postgrado



CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

RESUMEN

Las consecuencias sociales y económicas de los eventos sísmicos; así como la carencia de especificaciones claras y precisas respecto al desempeño sismorresistente de las obras civiles en los códigos de diseño; plantean la necesidad de desarrollar nuevas metodologías de diseño para reducir efectivamente el riesgo sísmico.

En tal sentido, existe una tendencia creciente y relativamente rápida en el mundo, principalmente en EE.UU. y Japón, para desarrollar trabajos de investigación basados en el desempeño sismorresistente de las obras civiles, de manera que ésta sea más predecible y controlable.

El enfoque de diseño basado en el desempeño sismorresistente de las obras civiles, se denomina en este trabajo Diseño por Desempeño.

El Diseño por Desempeño aún se encuentra en desarrollo; pese a que ya se encuentra definida como una recomendación de criterios o pautas de diseño en los EE.UU.; e inclusive ya se encuentra incorporado en la norma japonesa; no obstante aún son para casos muy específicos.

Para el desarrollo del Diseño por Desempeño en nuestro medio y para su incorporación en la norma E-030; se propone una Metodología de Diseño en el que se definen Niveles de Desempeño, Sismo de Diseño, Objetivos de Desempeño, Evaluación de Desempeño y Análisis de Aceptabilidad.



PERFORMANCE DESIGN CRITERIA FOR PERUVIAN EARTHQUAKE RESISTANT CODE E-030

ABSTRACT

The social and economic consequences due to earthquake events and the absence of rules about performance in the seismic design code; raise the necessity to make new concepts and new design methodology about performance based seismic design to reduce the seismic risk largely.

There is an increasing tendency in the world, mainly in Japan and USA to develop research works about performance based seismic design with more predictable and controllable seismic performance.

Performance based seismic design is defined in this work as performance based design.

The performance based design is still madder development in spite of development as recommended seismic design criteria in the USA. In Japan has already been incorporated in the seismic code, but these are for specific cases yet.

To develop performance design in Peru and for gradual incorporation in the seismic code E-030; a design methodology is proposed in which performance levels, level of seismic design, performance objectives, performance evaluation and acceptability analysis are defined.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE**
Javier Francisco Taipe Carbajal



INDICE GENERAL

RESUMEN EN ESPAÑOL

RESUMEN EN INGLES

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1	Propósito	1/5
1.2	Contexto	1/5
1.3	Alcances	4/5
1.4	Límites	4/5
1.5	Organización y Contenido	5/5

CAPITULO 2

CONCEPTO DE DISEÑO POR DESEMPEÑO

2.1	Necesidad de Nuevo Concepto de Diseño por Desempeño	1/8
2.2	Concepto de Diseño Basado en el Desempeño Sismorresistente	4/8

CAPITULO 3

METODOLOGÍAS DE DISEÑO

3.1	Metodología General del SEAOC	1/19
3.2	Metodología del ATC-40	3/19
3.3	Proceso de Rehabilitación del FEMA-273	4/19
3.4	Criterios de Diseño del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.	8/19
3.5	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	9/19
3.6	Marco Global de Krawinkler	14/19
3.7	Proceso de Diseño del ICC	16/19

CAPITULO 4

OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

4.1	Niveles de Desempeño	1/26
-----	----------------------	------



4.1.1	Niveles de Desempeño del SEACC	2/26
4.1.2	Niveles de Desempeño del ATC-40	3/26
4.1.3	Niveles de Desempeño del FEMA-273	6/26
4.1.4	Niveles de Desempeño del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.	9/26
4.2	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	10/26
4.2.1	Niveles de Desempeño del FEMA-350	15/26
4.3	Sismo de Diseño	17/26
4.3.1	Niveles de Sismo de Diseño del SEACC	17/26
4.3.2	Niveles de Peligro Sísmico del ATC-40	18/26
4.3.3	Niveles de Sismo de Diseño del FEMA-273	18/26
4.3.4	Niveles de Sismo de Diseño del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.	19/26
4.4	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	19/26
4.4.1	Niveles de Sismo de Diseño del FEMA-350	20/26
4.5	Objetivos de Desempeño	20/26
4.5.1	Objetivos de Desempeño del SEACC	21/26
4.5.2	Objetivos de Desempeño del ATC-40	23/26
4.5.3	Objetivos de Rehabilitación del FEMA-273	23/26
4.5.4	Objetivos de Desempeño del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.	25/26
4.6	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	25/26

CAPITULO 5

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

5.1	Enfoques de Diseño del SEACC	2/20
5.2	Procedimientos para la Evaluación de Desempeño del ATC-40	9/20
5.3	Procedimientos Analíticos para el Método de Rehabilitación del FEMA-273	12/20
5.4	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	14/20



CAPITULO 6

ANALISIS DE ACEPTABILIDAD

6.1	Procedimientos de Análisis de Aceptabilidad del SEACC	1/13
6.2	Límites de Aceptabilidad del ATC-40	5/13
6.3	Criterios de Aceptabilidad del FEMA-273	7/13
6.4	Proyectos de Investigación Desarrollados en Japón	10/13
6.5	Análisis de Aceptabilidad del FEMA-350	11/13

CAPITULO 7

PROPUESTAS DE INCORPORACIÓN DEL DISEÑO POR DESEMPEÑO EN LA NORMA PERUANA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.1	Marco de Desarrollo	1/73
7.2	Metodología de Diseño	3/73
7.3	Niveles de Desempeño	5/73
7.4	Sismo de Diseño	8/73
7.5	Objetivo de Desempeño	16/73
7.6	Evaluación de Desempeño	19/73
7.7	Análisis de Aceptabilidad	34/73
7.8	Aplicación de la Metodología de Diseño	45/73

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1	Conclusiones	1/3
8.2	Recomendaciones	3/3

ANEXO

REFERENCIAS



Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1 PROPOSITO

La razón principal de la existencia de normas técnicas de diseño sismorresistente es contribuir efectivamente a la reducción de riesgo sísmico. No obstante este propósito aún no se ha logrado totalmente, tal como se puede deducir de las consecuencias sociales y económicas de los sismos ocurridos en los últimos treinta años y a lo largo de la historia.

En el afán de conseguir normas técnicas más confiables surge el Diseño por Desempeño como una evolución de los conceptos de la ingeniería estructural.

En tal sentido, consideramos una necesidad el desarrollo del Diseño por Desempeño en nuestro medio con fines de incorporación en la norma de diseño sismorresistente E-030.

1.2 CONTEXTO

El tema de Diseño por Desempeño, es materia de investigación de diversos grupos de trabajo en el mundo y es discutido en diversos congresos (11WCEE [35], EEWW [37], 12WCEE [36]). En EE.UU ya existen normas técnicas definidas como pautas o criterios de diseño (Visión 2000 [4], FEMA-273 [32], FEMA-350 [16]); en Japón inclusive ya se encuentra incorporado en el código de diseño [33]. Sin embargo, se debe precisar que el Diseño por Desempeño aún no se encuentra desarrollado, difundido y empleado plenamente, mucho menos en nuestro medio; todavía son para casos muy particulares o como opción de diseño avanzado.

Los trabajos de investigación desarrollados hasta la fecha que definen el estado de arte del enfoque de diseño antes mencionado y que sirvieron de base al presente trabajo son: en EE.UU (Vision 2000 [4], ATC-40 [43])



FEMA-273 [32], FEMA-350 [16]); y en Japón [7]...[13], [33]. Los mismos que se describen brevemente a continuación.

- **SEAOC (1995)**

La Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC), a raíz de las consecuencias del sismo moderado de Loma Prieta (1989, M7.1, pérdidas directas \$ 8000 millones); formó un comité especial denominado Visión 2000 en 1992 para desarrollar un marco de referencia para la generación de normas técnicas de diseño basado en el desempeño sismorresistente de una edificación [19]. En este trabajo se plantea las siguientes fases de desarrollo:

Fase I (1992 - 1995)

Etapa de desarrollo del marco conceptual del diseño basado en el desempeño sismorresistente de una edificación. Se estimó la duración de 1992 a 1995. Los resultados de esta investigación fueron publicados en 1995 como **Visión 2000 "Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño de Edificaciones"** [4]; constituye el primer trabajo de investigación publicado, contiene abundante sustento teórico que sirve de base a otros trabajos de investigación.

Fase II (1998 - 2000)

Etapa en que el marco conceptual desarrollado se debe incorporar paulatinamente como pautas de diseño en las normas técnicas. Se estimó la duración de 1998 a 2000. Los avances de esta fase se conoce sólo por trabajos expuestos en algunos congresos en 1998 (EEWW [37]), como pautas preliminares para el diseño basado en el desempeño sismorresistente de edificaciones nuevas [30]. Se entiende que este



trabajo busca implementar el diseño sobre la base del enfoque basado en desplazamientos como parámetro de respuesta.

Fase III (2000 - 2005)

Etapa en el que las pautas deben incorporarse a los formatos de las normas técnicas para la práctica del diseño sismorresistente. Se estimó la duración de 2000 a 2005. No se conocen avances o resultados correspondientes a esta fase, se presume que se encuentra en desarrollo.

- **ATC-40 (1996)**

En el estado de California desde 1990 se realizaron investigaciones para mejorar el estado de arte del diseño sismorresistente de edificaciones de concreto del sector privado y público. Desde 1994 el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) preparó una metodología para la evaluación y adaptación sísmica de edificaciones de concreto existentes; los resultados de este trabajo se publicaron en Noviembre de 1996 como **ATC-40 "Evaluación y Readaptación Sísmica De Edificaciones De Concreto"** [43].

- **FEMA-273 (1997)**

La Agencia Federal de Gestión de Emergencia (FEMA), con colaboración de otras instituciones como Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC); desde 1991 desarrolló el proyecto de investigación para preparar pautas para la rehabilitación sísmica de edificaciones existentes. Los resultados de este trabajo fueron publicados en el año 1997 como **FEMA-273 "Pautas Para La Rehabilitación Sísmica De Edificaciones"** [20], [32]. Constituye el primer



trabajo de investigación referido al diseño por desempeño aplicado a rehabilitación de edificaciones en general.

- **PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADOS EN JAPÓN**

El Ministerio de Construcción del Japón con participación de instituciones de investigación y universidades, probablemente a raíz de las consecuencias del terremoto de Hanshin (1995, Kobe); desarrolló desde 1995 un proyecto que tuvo como propósito crear un sistema en que esté definido claramente el desempeño sismorresistente de una edificación; y que los ocupantes (consumidores) estén bien informados de cómo será el desempeño sismorresistente de sus edificaciones y cuánto costará alcanzar estos fines. La respectiva publicación se realizó en el año 1998 como **"Nuevo Marco De La Ingeniería Para Edificaciones"** [7]...[13]. Constituye un enfoque de diseño basado en la necesidad de los usuarios. Por otro lado, se debe indicar que los requerimientos de la norma técnica de diseño sismorresistente japonesa fueron revisados en Junio de 2000, respecto a un marco de diseño basado en el desempeño sismorresistente de una edificación. En tal sentido, ya existen conceptos del enfoque de diseño en mención incorporados en la norma publicada en japonés en 2001 [33].

- **FEMA-350 (2000)**

La Agencia de Gestión de Emergencia Federal (FEMA), con colaboración de otras instituciones como Asociación de Ingenieros Estructurales de California (ASCE), el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) y universidades de California que en conjunto se denominó proyecto SAC; a raíz de las fallas de las conexiones viga-columna en las estructuras de acero durante el sismo de Northridge de 1994, desarrolló un proyecto para estudiar las causas de estas fallas y formular procedimientos de diseño sismorresistente más confiable. La respectiva publicación se realizó el año



2000 como **FEMA-350 "Criterios Recomendados De Diseño Sísmico Para Edificaciones Aporticadas De Acero"** [16], [38]. Constituye un proyecto específicamente referido a edificaciones de acero, adopta un enfoque probabilístico basado en confiabilidad para explicar las incertidumbres y casualidades inherentes al diseño sismorresistente.

Se debe precisar que los trabajos mencionados no son los únicos, existen otros trabajos que diversas instituciones de investigación vienen desarrollando el diseño por desempeño como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. [44].

1.3 ALCANCE

Sobre la base de los trabajos existentes y mencionados anteriormente se presenta el concepto general de Diseño por Desempeño, así como una metodología para su desarrollo en nuestro medio y un procedimiento analítico para el diseño sismorresistente de obras civiles en general privadas y públicas.

El método de diseño es diferente al método convencional existente; sin embargo el Diseño por Desempeño se considera más racional.

1.4 LIMITES

El Diseño por Desempeño, es decir el diseño basado en el desempeño sismorresistente de una obra civil está sujeto a numerosas incertidumbres. Parte de las incertidumbres son por ejemplo: el riesgo sísmico, las propiedades de los materiales, la distribución de las deformaciones, los límites de aceptabilidad, entre otros.

El trabajo de investigadores, ingenieros, ocupantes de las obras civiles y la sociedad en general busca reducir tales incertidumbres.



El Diseño por Desempeño no elimina completamente tales incertidumbres pero intenta reducirlas.

1.5 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO

La organización del presente trabajo se divide en ocho (08) capítulos.

En el capítulo 1 se introduce en el estudio en su propósito, contexto, alcance, límites, así como en su organización.

En el capítulo 2 se presenta el concepto general del Diseño por Desempeño sobre la base de las observaciones realizadas por parte de diversos grupos de investigación a algunos aspectos de las normas técnicas de diseño sismorresistentes vigentes; y que sustentan la necesidad de un nuevo enfoque de diseño basado en el desempeño sismorresistente de una obra civil.

En el capítulo 3 se presenta la Metodología de Diseño sobre cuya base se viene desarrollando e implementando el Diseño por Desempeño.

En el capítulo 4 se presenta la definición de los Componentes de la Metodología de Diseño; como son: niveles de desempeño, sismo de diseño, objetivos de diseño.

En el capítulo 5 se presenta la Evaluación de Desempeño como una de las partes principales en la metodología de diseño planteado.

En el capítulo 6 se presenta el Análisis de Aceptabilidad, como otra de las partes principales en la metodología de diseño planteado.

En el capítulo 7 se propone metodología para el Diseño por Desempeño para su desarrollo e implementación en nuestro medio para su posterior incorporación en la norma E-030 .

En el capítulo 8 se presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.



Capítulo 2

CONCEPTO DE DISEÑO POR DESEMPEÑO

2.1 NECESIDAD DE NUEVO CONCEPTO DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

Las consecuencias de sismos ocurridos desde el inicio de nuestra existencia hasta la fecha no pueden ser evitadas o por lo menos considerablemente reducidas a daño irrelevante. Algunas de las experiencias recientes de sismos como en California: Loma Prieta (1989, magnitud 7.1, pérdidas por \$ 7000 millones) y Northridge (1994, magnitud 6.7, pérdidas por \$ 15000-20000 millones), así como el gran terremoto de Hanshin (Kobe, 1995) en Japón; fueron considerados inaceptables social y económicamente por el número de personas sin hogar, por el nivel de pérdidas económicas derivadas del daño físico sufrido por las obras civiles, y especialmente por los daños funcionales e indirectos. Más aún, si se considera el tamaño de estos eventos relativamente frecuentes en zonas de sismicidad alta. [1], [2]

Ante las consecuencias de los sismos, diversos investigadores han observado la metodología de diseño de las normas técnicas de diseño sismorresistente actuales, por ejemplo:

- **Vitelmo V. Bertero (1995)**

"Los códigos sísmicos modernos, que intentan reflejar grandes avances en conocimiento y entendimiento de una manera muy simple no son transparentes sobre el nivel de comportamiento esperado o respuesta del sistema completo suelo-cimentación-estructura-elementos no estructurales. El nivel esperado de comportamiento se ha convertido en una parte implícita, más que explícita de los códigos, a través de una serie de factores empíricos y requerimientos de armadura que esconden la



verdadera naturaleza del problema de diseño sismorresistente: el comportamiento del edificio" [39].

En tal sentido, las normas técnicas de diseño sismorresistente actuales utilizan una filosofía de diseño sísmico basada en un solo nivel correspondiente a la "protección de vida" sin una clara definición cuantitativa; y emplean procedimientos de diseño que satisfacen fundamentalmente requisitos de resistencia[1],

- **Javier Piqué (1995)**

La metodología de diseño actual, está basada en un terremoto de diseño de única intensidad o nivel de aceleración. En concordancia con la filosofía de diseño, toda estructura que es sometida a un terremoto intenso debería diseñarse para evitar el colapso más no para evitar sufrir daños estructurales. Este criterio no está adecuadamente representado en la metodología de diseño y constituye uno de los puntos débiles de la ingeniería sismorresistente. El diseño en la condición límite del sismo no es verificado o calibrado contra demandas o solicitaciones del sismo por lo que no hay ninguna garantía sobre la capacidad real de la estructura bajo estas condiciones[3].

- **Proyecto Amplio de Desarrollo e Investigación del Gobierno Japonés (1998)**

Primero, el desempeño sismorresistente de una edificación no está representado en el diseño; las edificaciones se diseñan empleando procedimientos predeterminados, sin investigar su comportamiento ante fuerzas sísmicas y sin definición del desempeño sismorresistente requerido.

Segundo, es difícil para los ocupantes entender el concepto de desempeño sismorresistente de una edificación, que trae consigo la confusión en cuanto a la perspectiva de daño ante un sismo ocurrido. Tercero, el



desempeño sismorresistente de una edificación no es empleado para tomar decisiones; puesto que no involucra principios de mercado, el concepto de costo de desempeño sismorresistente es raramente usado en el campo de edificaciones; en otros productos industriales, este balance entre el costo y el desempeño es dominante[7], [10].

La comparación de un diseño convencional y un nuevo diseño sismorresistente se ilustra en la Fig. 2.1

De lo mencionado antes se puede plantear que las consecuencias sociales y económicas de los sismos y las observaciones a las normas técnicas de diseño antes descritas, demuestran claramente la necesidad de nuevos conceptos de diseño sismorresistente, en que estén definidos los aspectos siguientes:

- ✓ El desempeño sismorresistente de una obra civil, entendiendo el término de desempeño sismorresistente como el nivel de comportamiento esperado ante un sismo.
- ✓ Metodologías basadas en niveles de sismos de diseño que correspondan por lo menos a la filosofía general de diseño sismorresistente: para sismos ligeros prevenir daños no estructurales, para sismos moderados prevenir daños estructurales y minimizar daños no estructurales, y para sismos importantes evitar el colapso.
- ✓ Enfoques de diseño basados en parámetros de respuesta como desplazamiento, energía, aceleración o quizás velocidad; además del enfoque basado en fuerza/resistencia ampliamente difundido actualmente.
- ✓ Participación y corresponsabilidad de los propietarios (usuarios) en la definición del desempeño sismorresistente de una obra civil.

En tal sentido, un enfoque prometedor para el desarrollo de las normas técnicas de diseño más confiable está constituido por la aplicación e implementación de los conceptos de la ingeniería basados en el desempeño sismorresistente de obras civiles, tema que ha sido discutido en los congresos recientes (11WCEE [35], 12WCEE [36], Structural Engineering World Wide [37]). En los trabajos de



investigación al respecto que se vienen desarrollando en EE.UU. y Japón, principalmente, es común encontrar términos relacionados como: *Performance Based-Engineering*, *Performance-Based Earthquake Engineering*, *Performance Based Design*, *Performance Based Seismic Design*, *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*. Así como diversas publicaciones, como por ejemplo: *Conceptual Framework for Performance Based Seismic Engineering of Building* (SEAOC-Vision 2000, 1995) [4], *NEHRP Guidelines and Commentary for Seismic Rehabilitation of Building* (ATC, 1997) [32], *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Building* (SAC Joint Venture, 2000) [16], y en Japón *Development of a New Engineering Framework for Building Structures* [7].

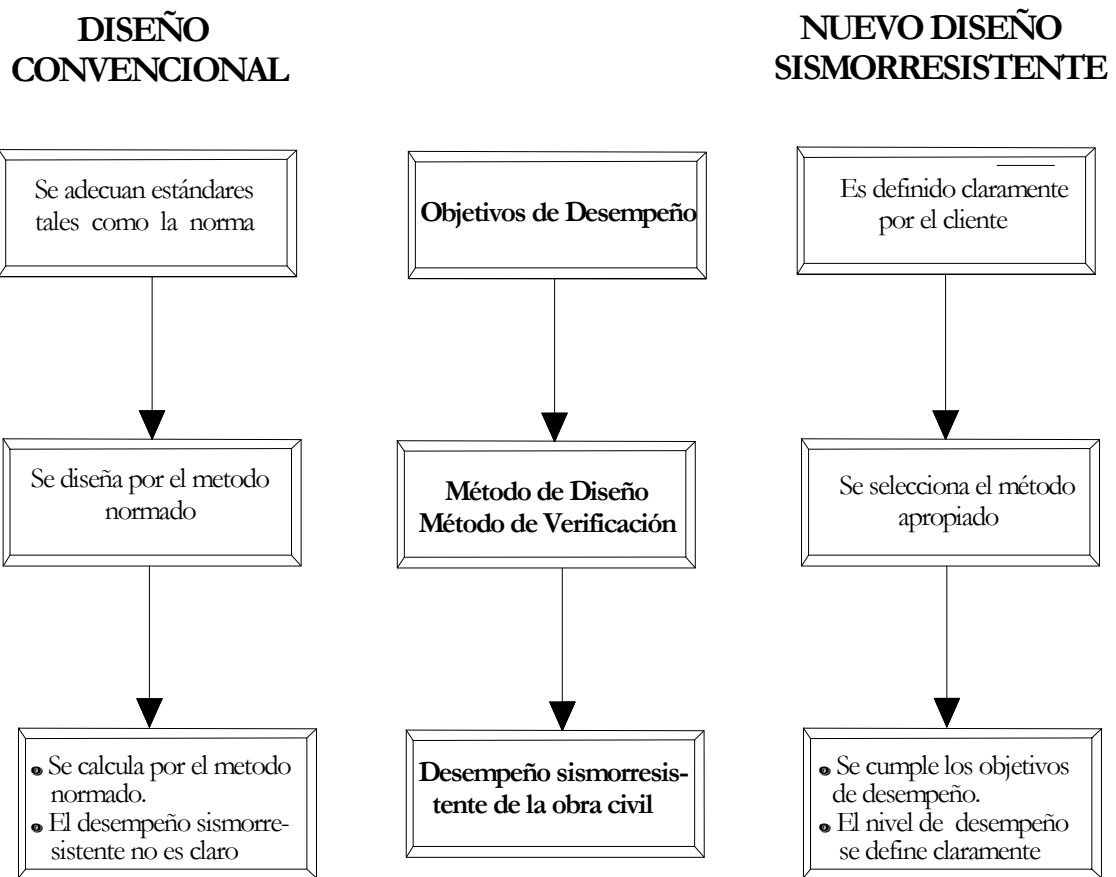


Fig. 2.1 Comparación de Diseño Convencional y Nuevo Diseño Sismorresistente
(Ministerio de Construcción del Japón, 1998)



2.2 CONCEPTO DE DISEÑO BASADO EN EL DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE

La evolución de los conceptos de ingeniería estructural [38] se puede ilustrar como:

- *Diseño por Códigos*: se define como la etapa en que el diseño se basa en el empleo de códigos de diseño sismorresistente. El lapso de uso se estima desde 1927 hasta 1990.
- *Adaptación Sísmica por Códigos*: etapa en la que la adaptación sísmica de obras civiles se basa en el empleo de códigos de diseño. El lapso de uso se estima durante las décadas de los 80 y 90.
- *Diseño y Adaptación basada en el desempeño sismorresistente*: es la etapa desde mediados de los 90 hasta la fecha, en el cual el diseño y adaptación se basa en el desempeño sismorresistente de las obras civiles.

Consideramos que el presente trabajo se enmarca en esta etapa.

- *Gerencia de riesgo sísmico*: es un concepto que se basa en conceptos financieros; tal como la consideración del impacto socio-económico del desempeño sismorresistente de la obra civil. El diseño y la adaptación sismorresistente son considerados como inversión.

Algunas ideas básicas del nuevo concepto de diseño sismorresistente antes mencionado se describe brevemente:

- En general, la idea básica de un diseño basado en el desempeño sismorresistente es diseñar una estructura que se desempeñará de una manera definida cuando esté sujeta a varios escenarios de sismo.



Además, la finalidad es facilitar a los ocupantes y al diseñador la selección de alternativas de metas u objetivos de diseño [5].

- El concepto general del diseño basado en el desempeño sismorresistente de edificaciones debe ser capaz de lograr un alto nivel de confianza para que los daños no excedan ciertos límites durante los sismos. Los niveles permisibles de daño se denominan niveles de desempeño mientras que la especificación para que los niveles de desempeño definidos no sean excedidos durante el sismo de diseño se denominan objetivos de desempeño [39].
- En EE.UU. esta terminología (performance-based design) se aplica al proceso general en el cual se selecciona una serie de objetivos de desempeño en el inicio del proyecto, y entonces estos sirven de base para el diseño. Aunque tenga mayor desarrollo en el campo de la ingeniería sísmica, no es limitado exclusivamente a esta área. Se intenta cubrir todos los aspectos del proceso de diseño de una edificación incluyendo incendio/protección de vida, seguridad estructural, sistemas mecánico y eléctrico [6].

Por otro lado, las definiciones por parte de los proyectos de investigación desarrolladas en EE.UU y Japón también se resumen a continuación:

CONCEPTO GENERAL DEL SEAOC (1995)

La ingeniería basada en desempeño sismorresistente de una edificación se define como "la selección de criterios de diseño, sistema estructural apropiado, proporcionalidad y detallado de una estructura y su componente no estructural y contenido; para asegurar y controlar la calidad de la construcción y mantenimiento; para cada nivel especificado de movimiento sísmico, con niveles definidos de confiabilidad, la estructura no superará los daños ante ciertos estados límites u otros límites inusuales". Los estados límites referidos



se denominan "niveles de desempeño". Los niveles de desempeño son acoplados con niveles especificados de movimiento sísmico probable para definir los "objetivos de desempeño" para los cuales se diseña la estructura. El logro de los objetivos de desempeño nunca se garantiza pero se espera, con niveles definidos de riesgo y confiabilidad [4].

La ingeniería basada en desempeño sismorresistente se define como una serie de procedimientos para que las edificaciones tengan un desempeño sismorresistente controlable y predecible, cuando responden a niveles definidos de sismo, dentro de niveles de confiabilidad definidos[30].

CONCEPTO DEL ATC-40 (1996)

El diseño de edificaciones basado en el desempeño, se refiere a la metodología de diseño en la cual el criterio estructural se expresa en términos de selección de un objetivo de desempeño. En contraste al método convencional en el cual el criterio estructural se define por exigencias sobre los elementos, que resultan de un nivel predeterminado de fuerza cortante aplicado.

CONCEPTO DEL FEMA-273 (1997)

Los conceptos y terminología de diseño basados en desempeño son nuevos y deben ser cuidadosamente estudiados y discutidos con los ocupantes. Se entiende la terminología nivel de desempeño para representar las metas del diseño. El desempeño sismorresistente de una edificación puede ser descrito cualitativamente en términos de: seguridad ofrecida a los ocupantes durante y después del evento sísmico, el costo y facilidad de reparación de la edificación antes del sismo, el periodo de tiempo durante el cual la edificación interrumpe su servicio o uso para llevar a cabo la reparación, la economía, la arquitectura e impacto histórico sobre la comunidad. Estas características de desempeño sismorresistente son relacionadas directamente al grado de daño sufrido por la



edificación. El grado de daño de la edificación se categoriza como nivel de desempeño de la edificación. Cada nivel consiste de un nivel de desempeño estructural, el cual define los daños aceptables para el sistema estructural, y nivel de desempeño no estructural, el cual define los daños aceptables en los componentes no estructurales y contenido[32].

CONCEPTO EMPLEADO EN EL PROYECTO AMPLIO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DEL GOBIERNO JAPONÉS (1998)

En este marco los ocupantes deben participar en la definición de metas u objetivos de desempeño y deben ser responsables por los resultados. La mayoría de productos industriales tienen descripciones del desempeño y los consumidores usan esta información para decidir si los productos satisfacen sus necesidades y para juzgar el costo del mismo. Las edificaciones también deberían ser seleccionadas de esta forma.

El desempeño sismorresistente de una edificación debe ser una de las principales medidas para que los ocupantes definan el valor de las edificaciones. Basado en la información facilitada sobre el desempeño sismorresistente de una edificación y su costo, un propietario juzga si la edificación cumple sus necesidades y objetivos. Como resultado, el desempeño sismorresistente de una edificación será adecuadamente reflejado en este valor. En tal sentido, plantea igualmente la necesidad de implementar el diseño basado en el desempeño sismorresistente de una edificación para: promover innovación en la ingeniería, progreso en la ingeniería estructural y globalización, mejorar técnicas de diseño, mayor flexibilidad en el diseño y una armonización internacional. Por otro lado, tiende a convertirse en el más importante criterio para definir el valor de la edificación por parte de los ocupantes [7], [10].



CONCEPTO DEL FEMA -350 (2000)

El enfoque de diseño basado en desempeño puede ser usado como una opción para un diseño avanzado. Los procedimientos de evaluación de desempeño que se proponen pueden ser usados para confirmar la capacidad de cada estructura para cumplir con los objetivos de desempeño establecidos, o pueden ser usados para implementar diseños basados en desempeño que intentan cumplir objetivos de desempeño exigentes. También puede emplearse para cuantificar la bondad de un diseño específico para cumplir objetivos de desempeño deseados. Es aplicable sólo a una estructura de acero regular bien configurada. Un enfoque de desempeño basado en confiabilidad, ha sido adoptado por el proyecto SAC [16] para el diseño y para la evaluación. Este enfoque pretende explicar las casualidades e incertidumbres en la demanda sísmica y capacidades de una manera consistente y para satisfacer, con una confiabilidad definida, objetivos de desempeño correspondiente a varios grados de daño y niveles de peligro sísmico. Los procedimientos de evaluación de desempeño permiten la estimación de un nivel de confianza que poseerá una estructura para alcanzar un objetivo de desempeño deseado [16], [34].

En el presente trabajo el diseño sismorresistente basado en el desempeño descrito anteriormente, se denominará **diseño por desempeño** en concordancia con los términos empleados en ingeniería estructural como: diseño por esfuerzos de trabajo, diseño por resistencia, diseño por capacidad, etc. Debe indicarse además que con la expresión **desempeño** se considera la capacidad de serviciabilidad y habitabilidad de la edificación, la seguridad para la protección de vidas humanas y la necesidad o practicabilidad de efectuar reparaciones de la estructura y restaurar su servicio [4].



Capítulo 3

METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Las Metodologías de Diseño que se describen en este capítulo se refieren al marco conceptual de los diversos trabajos de investigación relacionados con el Diseño por Desempeño, que se resumen a continuación.

3.1 METODOLOGIA GENERAL DEL SEAOC (1995)

El marco conceptual del proyecto Visión 2000[4]; abarca diversos aspectos de temas de discusión en ingeniería para crear sistemas estructurales con desempeño sismorresistente predecible y controlable, dentro de niveles definidos de riesgo. La metodología se ilustra en la Fig. 3.1

- **Selección de Objetivos de Desempeño**

Esta selección constituye el primer paso y se realiza por el cliente en consulta con el profesional responsable del diseño se basa en consideraciones de las expectativas del cliente, peligro sísmico (sismo de diseño), análisis económico, y riesgo aceptable (nivel de desempeño).

- **Determinar Localización Adecuada y Sismo de Diseño**

Antes del inicio del diseño estructural y considerando los Objetivos de Desempeño propuesto para el proyecto; se debe analizar la ubicación adecuada para el propósito de la edificación. El análisis de ubicación adecuada incluye consideraciones de sismicidad, tipo de suelo y potencial de riesgo. El análisis de peligro sísmico determinará el sismo de diseño considerando todas las zonas sísmicas críticas. Los movimientos son representados como tiempo historia, espectro de respuesta de aceleración,



espectro de respuesta de desplazamiento, espectro de demanda de distorsión, o por otras medidas requeridas para el diseño y análisis.

- **Diseño Conceptual**

Se procede con el diseño estructural, una vez que se selecciona los objetivos de desempeño y se definen la ubicación adecuada y sismo de diseño. La etapa de diseño se inicia con un Diseño Conceptual que implica selección de la distribución, configuración, selección del sistema estructural y materiales, selección de la cimentación y selección de sistema no estructural. En esta etapa se toman las decisiones fundamentales para determinar la viabilidad última del diseño.

- **Diseño Preliminar y Diseño Final**

El diseño preliminar y diseño final involucra el predimensionamiento y detallado del sistema estructural y no estructural de modo que los Objetivos de Desempeño se puedan cumplir. Los Objetivos de Desempeño se transforman en términos de ingeniería como criterios de aceptabilidad-parámetros de respuesta estructural que incluyan grados de daño esperados. El criterio de aceptabilidad, valores restrictivos en los parámetros de respuesta, se convierten en metas para el diseño. Ellos incluyen límites de deformación y distorsión, límites de fuerza y aceleración, límites de fluencia, límites de ductilidad y disipación de energía que se puedan cumplir para que la respuesta estructural sea consistente con los Objetivos de Desempeño. El Diseño Preliminar, establece las dimensiones iniciales de elementos estructurales basados en un criterio de diseño inicial. El Diseño Final, refina las dimensiones y completa los detalles de ductilidad.



- **Comprobación de Aceptabilidad en cada paso del diseño**

En cada paso de diseño, se requiere una comprobación de aceptabilidad para verificar que se cumplan los Objetivos de Desempeño. La respuesta estructural medida por ciertos parámetros cuantificables debe ser consistente con los Objetivos de Desempeño y asociados a criterios de aceptabilidad. El criterio de aceptabilidad consiste en la restricción de valores en los parámetros de respuesta estructural, asociados con niveles de desempeño seleccionados o con grados de daño para niveles especificados de movimiento sísmico. Los parámetros de respuesta típicos a ser verificados pueden incluir: índice de resistencia, índice de deformación y distorsión, aceleraciones, índice de demanda de ductilidad, disipación de energía demanda vs. capacidad. Deben desarrollarse investigaciones para establecer los valores límites típicos para estos parámetros de respuesta para cada nivel de desempeño, los cuales incluyen ensayos de laboratorio, o bien calibrando valores límites por análisis de edificaciones que han experimentado daños cuantificables en terremotos pasados y por el registro del movimiento sísmico disponible.

- **Revisión de Diseño**

Es un importante paso para asegurar la calidad en el proceso de diseño.. Cada revisión se debe emprender al término del Diseño Preliminar y Diseño Final, a fin de proporcionar un análisis profesional independiente de: diseño, hipótesis, modelos, análisis y eficacia del diseño en el cumplimiento de las metas de desempeño sismorresistente.

- **Garantía de control de la calidad durante la construcción**

A pesar de la calidad del diseño y la sofisticación del análisis, el diseño sismorresistente no será un éxito sin un adecuado control de calidad durante la construcción. Este proceso involucra trabajo en equipo, incluyendo



profesionales de diseño, revisores, inspectores especiales, autoridades, laboratorios de ensayos, y contratistas.

- **Mantenimiento y Operatividad de la edificación**

La ingeniería basada en desempeño no termina con la construcción de la edificación. Las responsabilidades simplemente cambian. La condición de la edificación, su configuración y uso influyen directamente sobre la vida útil de la estructura.

3.2 METODOLOGÍA DEL ATC-40 (1996)

La metodología general para la evaluación y adaptación sísmica de edificaciones existentes de concreto armado se pueden ilustrar en la Fig. 3.2; cada paso de la metodología se enumera a continuación:

- Etapa de inicio del proceso
 - ✓ Inicio de proceso
 - ✓ Selección de profesionales calificados
- Evaluación básica y adaptación de una estrategia
 - ✓ Establecimiento de objetivos de desempeño
 - ✓ Revisión de las condiciones de la edificación
 - ✓ Formular una estrategia
 - ✓ Empezar el proceso de aprobación
 - ✓ Conducir investigaciones detalladas

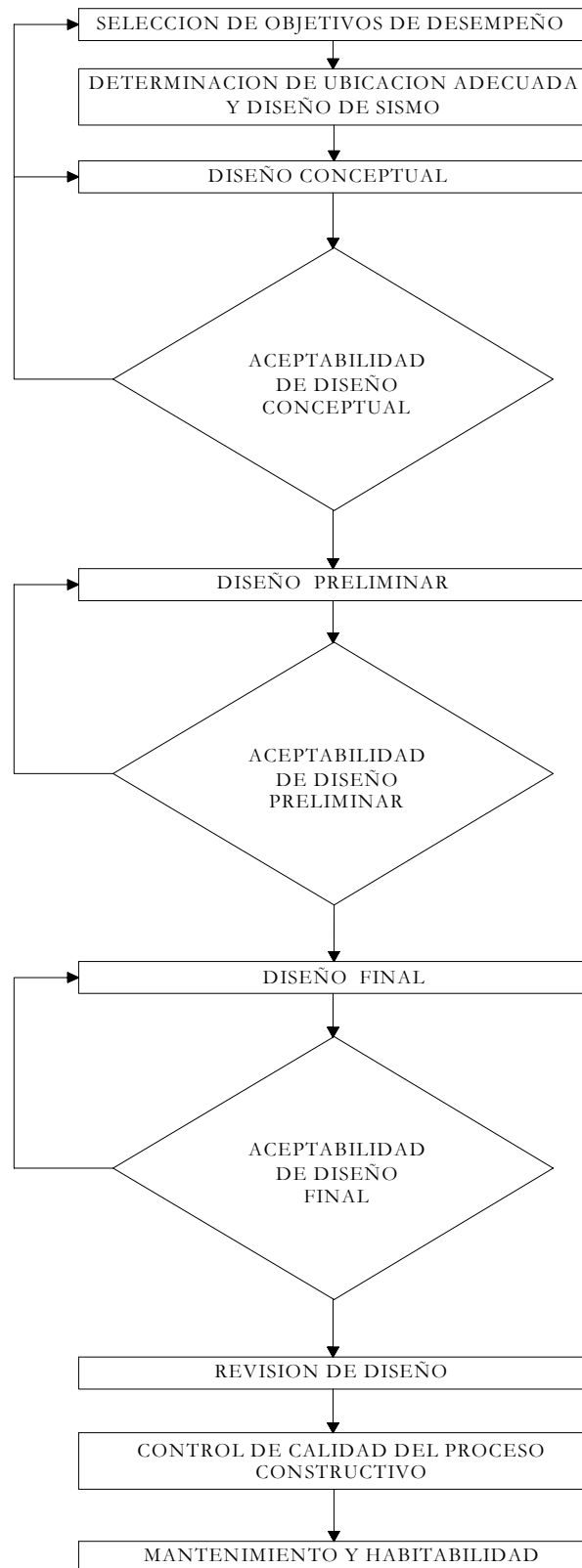


Fig. 3.1 Metodología del Diseño Basado en Desempeño (SEAO, 1995)



- Concepto de Evaluación y Adaptación
 - ✓ Estudiar la Capacidad sismorresistente
 - ✓ Determinar la sollicitación sísmica
 - ✓ Verificar el desempeño sismorresistente

- Diseño final y Construcción
 - ✓ Preparar documentos de construcción
 - ✓ Monitoreo de calidad de construcción.

3.3 PROCESO DE REHABILITACION DEL FEMA-273 (1997)

La metodología para el proceso de rehabilitación de edificaciones existentes se puede ilustrar en la Fig. 3.3. las acciones que conforman el diagrama se pueden resumir como:

- Selección de Objetivo de Rehabilitación en función al nivel de desempeño y sismo de diseño.
- Selección de método de rehabilitación.
- Selección de procedimientos de análisis.
- Selección de estrategia de rehabilitación.
- Crear modelo matemático.
- Evaluación de la relación Fuerza-Deformación.
- Definir criterios de aceptabilidad.
- Realizar control de calidad durante la construcción.
- Uso alternativo de materiales y métodos de construcción.



ESTRATEGIA	1	Inicio del proceso
		Requerimientos jurisdiccionales Cambios arquitectónicos
	2	Selección de profesionales calificados
		Ingeniero estructural Arquitecto
	3	Establecimiento de objetivos de desempeño
		Estabilidad estructural Seguridad limitada Protección de vida Control de daño Ocupación inmediata
		Revisión de condiciones de edificación
Revisión de dibujo Inspección visual Cálculos preliminares		
Formular una estrategia		
Procedimiento simplificado Métodos de capacidad inelástica		
6	Empezar el proceso de aprobación	
7	Conducir investigaciones detalladas	
	Análisis de la ubicación Propiedades del material Detalles de construcción	
	Estudiar la capacidad sismorresistente	
8	Modelar reglas Fuerza y desplazamiento	
	Determinar sollicitación sísmica	
	Peligro sísmico Interdependencia con capacidad Desplazamiento meta	
	Verificar desempeño sismorresistente	
10	Límite de respuesta global Aceptabilidad de componente	
	Preparar documentos de construcción	
11	Plan de Revisión Proforma de contrato de construcción	
	Monitoreo de calidad de construcción	
12	Rendimientos, ensayos e inspecciones Verificación de condiciones existentes Observación de la construcción por el diseñador	

Fig. 3.2 Metodología para Evaluación y Adaptación Sísmica (ATC-40, 1996).

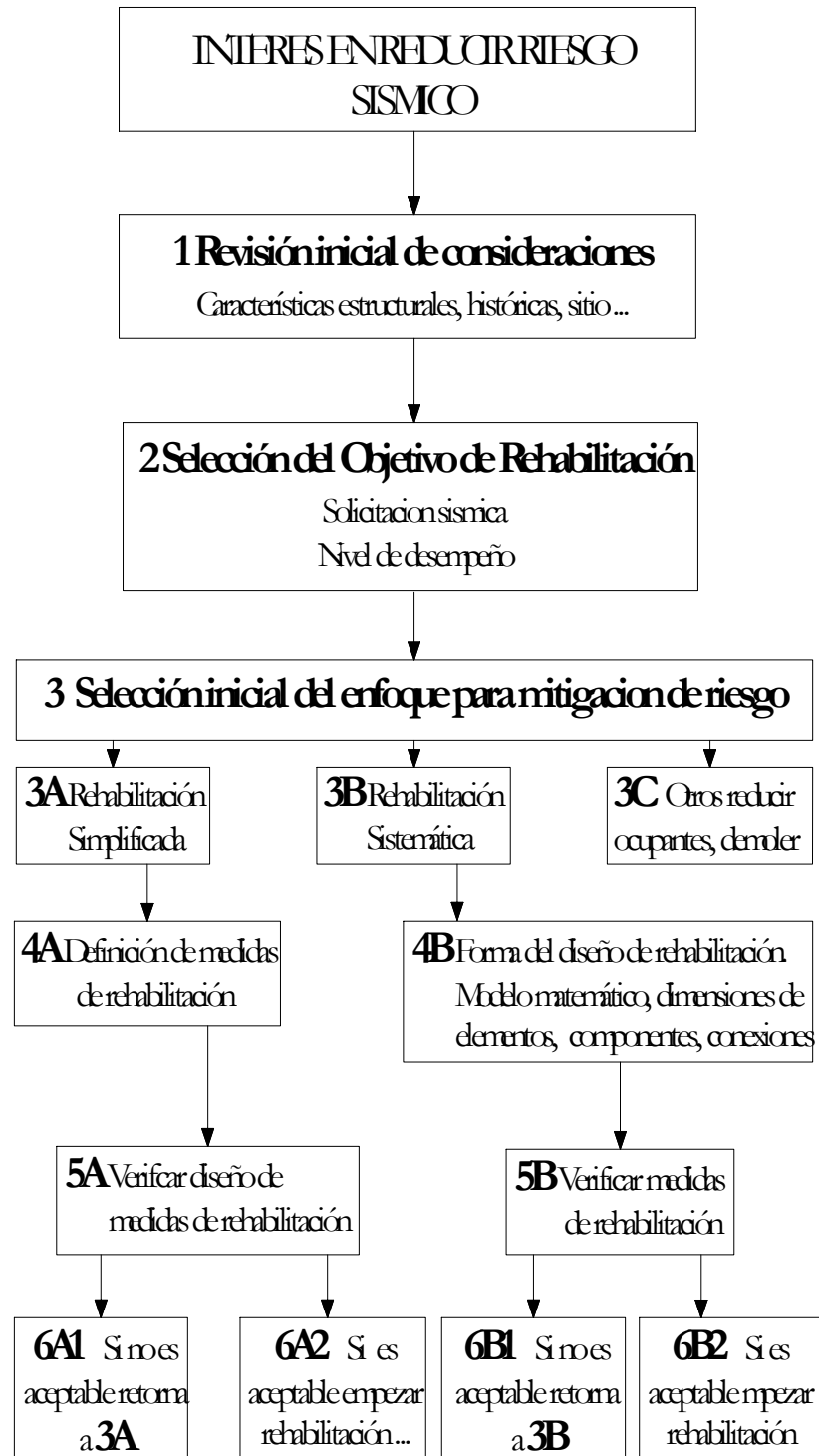


Fig. 3.3 Diagrama del proceso de rehabilitación (FEMA-273, 1997)



3.4 CRITERIOS DE DISEÑO DEL CUERPO DE INGENIERIOS DEL EJERCITO DE LOS EE.UU. (1998)

Los criterios recomendados para diseñar y construir edificaciones militares para resistir sismos tienen por finalidad:

- Recomendar criterios de diseño mínimos para una edificación apropiada.
- Mejorar la capacidad de las edificaciones para contener materiales de riesgo antes y después del diseño sísmico.
- Procedimientos analíticos para cada objetivo de desempeño seleccionado.
- Análisis de aceptabilidad para cada objetivo de desempeño y procedimiento analítico apropiado.

La Fig. 3.4 ilustra el procedimiento para la determinación de un objetivo de desempeño.

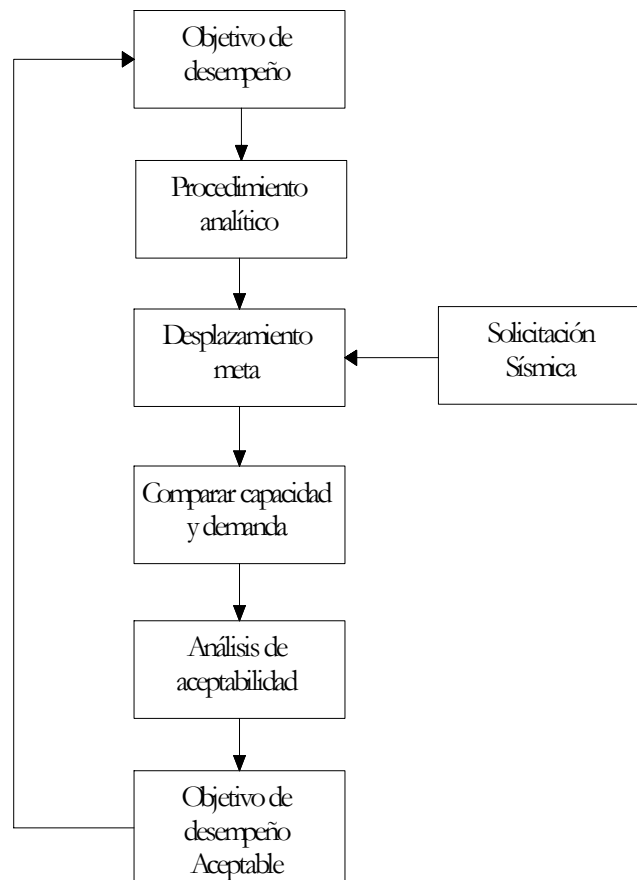


Fig. 3.4 Procedimiento para definir Objetivo de Desempeño



3.5 PROYECTOS DE INVESTIGACION EN JAPÓN

□ MARCO DE DESARROLLO DEL PROYECTO INTEGRAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DEL GOBIERNO JAPONES (1995 - 1998)

Se define un nuevo marco de desarrollo planteado por el Ministerio de Construcción del Japón con participación de universidades y grupos de investigación[7]...[13]; tal como se ilustra en el diagrama de flujo de la Fig. 3.5.1. Consiste de tres elementos básicos que enseguida se definen brevemente.

- **Determinación de niveles y metas de desempeño**

Para aclarar los requerimientos de diseño y determinar los niveles de desempeño y metas de desempeño, se debe considerar las necesidades del público. Las edificaciones en las ciudades tienen sus propios roles definidos por los usuarios y estos deberían ser satisfechos. Propietarios y diseñadores deberían entender los roles que las edificaciones juegan con el público ante ciertas circunstancias. Los niveles de desempeño y metas de desempeño apropiados para una edificación se determinan no sólo en términos de tecnología estructural sino por las demandas de los propietarios, usuarios y sociedad.

Se deben desarrollar tecnologías, sistemas para definir los niveles de desempeño para cumplir los propósitos e importancia de la edificación, para proteger funciones urbanas y sociales, y para cumplir las necesidades de los propietarios, estos niveles deben ser categorizados en términos de racionalidad económica y protección de vida.



- **Evaluación de Desempeño**

La evaluación de desempeño describe los principios para analizar si un diseño estructural satisface los objetivos de desempeño.

El profesional responsable del diseño planea la estructura (pórtico estructural, materiales) para conseguir los niveles de desempeño y metas de desempeño definidos. Por ejemplo para resistir un sismo con un pórtico, el profesional investigará si el pórtico resiste la energía y fuerza del sismo, así para resistir o controlar estos efectos se debe emplear mecanismos o dispositivos, y seleccionar métodos de diseño detallados. Igualmente las especificaciones son determinadas por el profesional responsable del diseño y se pueden desarrollar nuevas estructuras, mecanismos y tecnologías. El diseñador planea los detalles, prepara el anteproyecto y especificaciones.

- **Informe o Certificación de Desempeño Sismorresistente**

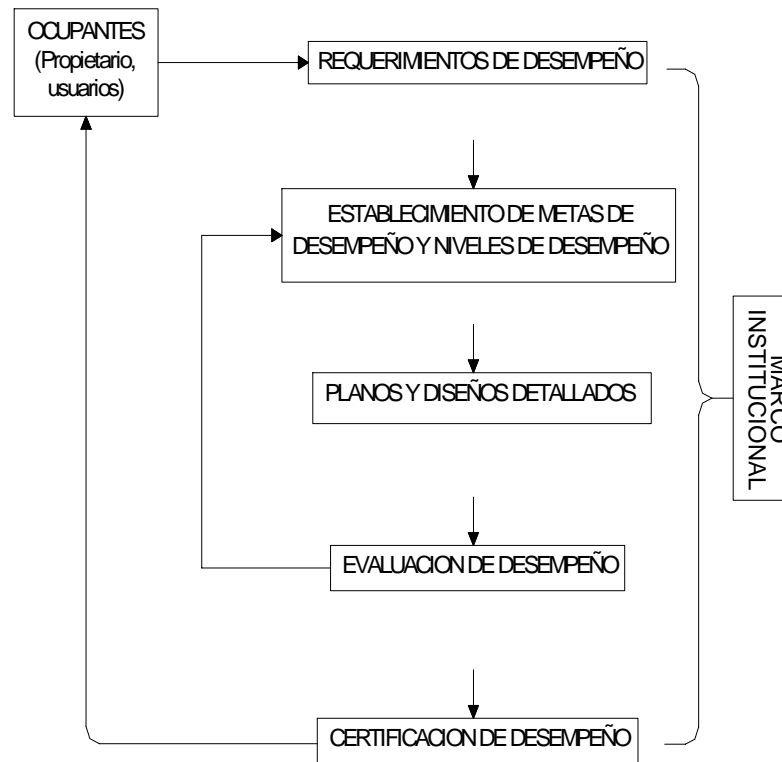
Se define el informe certificación de desempeño sismorresistente cuando la evaluación muestra que la estructura diseñada satisface los niveles de desempeño y las metas de desempeño. La certificación de desempeño vincula a los ocupantes de las edificaciones y los diseñadores, debe ser de fácil comprensión de la gente. Una clara certificación del desempeño es responsabilidad del profesional responsable del diseño.

En este marco conceptual, además plantea la necesidad de un Marco Institucional y un sistema de soporte para asegurar la operación eficiente del nuevo marco propuesto. Estos deben incluir herramientas tecnológicas, costumbres y práctica de diseño.

- **INSTITUTO DE INVESTIGACION DE EDIFICACIONES (1998 - 2000)**



El Instituto de Investigación de Edificaciones del Ministerio de Construcción del Japón (BRI) propone un marco conceptual para el desarrollo e implementación del diseño sismorresistente basado en desempeño en vista que la Ley de Edificaciones del Japón fue revisada desde 1998. Esta estructura conceptual se ilustra en la Fig. 3.5.2 [12].



nota: Control de la calidad de construcción y mantenimiento debe ser considerado separadamente,

Fig. 3.5.1 Sistema de diseño basado en desempeño
(Ministerio de Construcción del Japón, 1998)

- La primera ruta propuesta posibilita evaluar y verificar el desempeño sismorresistente sea cual sea el método de diseño usado. Es un procedimiento de evaluación que verifica si se cumplen o no los Objetivos de Desempeño recomendados.
- La segunda ruta es el procedimiento de evaluación convencional que se usa actualmente. Esta ruta se considera que fue creada para satisfacer las disposiciones del procedimiento de evaluación.



- La tercera ruta se aplica a edificaciones menores. No requiere cálculo estructural y se considera que satisfacen las disposiciones del procedimiento de evaluación.
- La cuarta ruta incluye todas las alternativas de procedimientos de evaluación y cumplimiento de disposiciones, cada uno desarrollados y certificados por instituciones privadas.

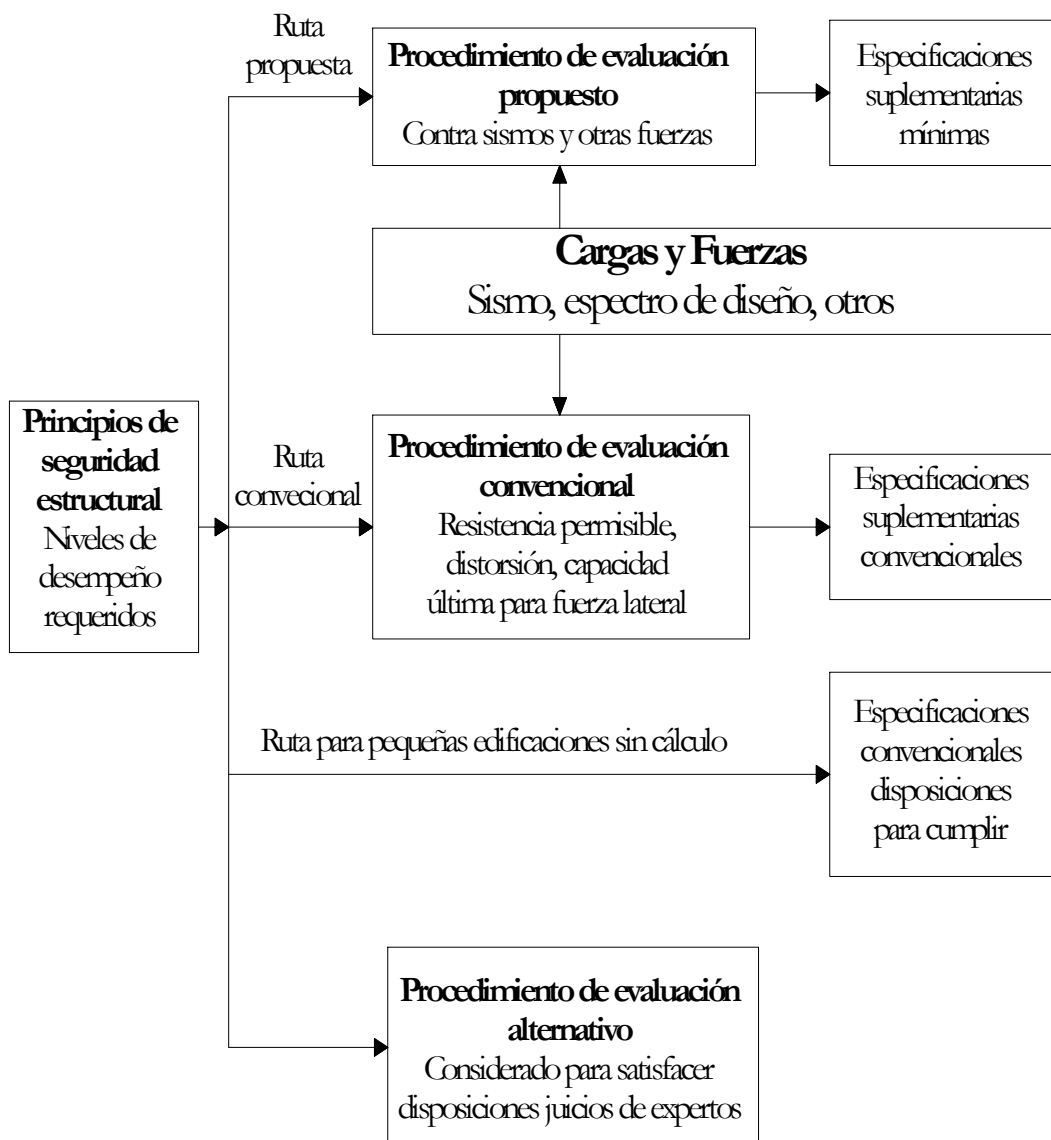


Fig. 3.5.2 Marco conceptual propuesto para las disposiciones estructurales basadas en desempeño (BRI Japón, 2000)



□ METODOLOGÍA PROPUESTA POR OTROS INVESTIGADORES (1999)

En el diseño basado en desempeño, un diseñador tiene que: establecer en forma clara los requerimientos del cliente a través de la discusión con ellos; determinar las metas de desempeño y confirmar que los resultados satisfacen estas metas. Después del diseño se debe formalizar el mantenimiento requerido. Estas actividades se pueden ilustrar en la Tabla 3.1 [31].

Tabla 3.1 Proceso del diseño basado en desempeño (Yamawaki, Kitamura;1999)

Predimensionamiento Diseño preliminar -DISEÑO BASICO	<ul style="list-style-type: none">• Establecer/confirmar requerimientos del cliente• Determinar metas de desempeño
Desarrollo del diseño -detalles de diseño -especificaciones	<ul style="list-style-type: none">• Determinar diseño basado en desempeño• Especificar el diseño basado en desempeño
Contrato de construcción	
Supervisión de Construcción	<ul style="list-style-type: none">• Confirmar la construcción basado en el desempeño.
Mantenimiento -calidad de inspección	<ul style="list-style-type: none">• Proveer soporte para mantenimiento.

□ BREVE COMENTARIO RESPECTO AL NUEVO CÓDIGO DE JAPÓN (2001)

Los requerimientos de diseño sísmico en Japón fueron revisados en Junio de 2000 respecto a un marco de diseño basado en desempeño. Los objetivos de desempeño son (a) Seguridad (b) Control de Daño, correspondiente a dos niveles de sismo. El movimiento sísmico de diseño es definido en términos de espectro de respuesta de aceleración. Los periodos de retorno son aproximadamente 500 años y 50 años para el estado límite de protección de vida y estado límite de iniciación de daño, respectivamente. La respuesta es



examinada por el "Método de Espectro de Capacidad" por comparación del espectro de demanda elástico lineal del sismo de diseño y la curva de capacidad de un sistema de un grado de libertad simple equivalente (ESDF). La estructura es reducida a un sistema ESDF usando un análisis estático no lineal bajo fuerzas horizontales incrementadas monotónicamente. Se usa el amortiguamiento equivalente para modificar el espectro de demanda tomando en cuenta la capacidad de disipación de energía de una estructura en el estado límite. [33]

3.6 MARCO GLOBAL PLANTEADO POR KRAWINKLER (1999)

Helmut Krawinkler de la Universidad de Stanford [15], presenta un marco global que identifica procesos, conceptos y temas de discusión que necesitan ser investigados. Este marco se ilustra en el diagrama de la Fig. 3.6

- **Objetivos de Desempeño**

El Objetivo de Desempeño, es una expresión del Nivel de Desempeño esperado para cada nivel de diseño sísmico o Sismo de Diseño. Un Objetivo de Desempeño puede ser expresado en términos de minimización de costo total "esperado" (inicial más seguro más mantenimiento más pérdidas de tiempo) sujeto a restricciones tales como una probabilidad aceptable de excedencia anual de un estado límite (colapso). El desempeño sismorresistente esperado o Nivel de Desempeño es expresado en términos socio-económicos como: colapso, cerca de colapso, prevención de colapso, protección de vida, operacional, completamente operacional, control de daño, ocupación inmediata y serviciabilidad.

Se necesita identificar Niveles de Desempeño en términos de ingeniería y que puedan convertirse en el foco de toma de decisiones de diseño. Por razones prácticas el diseño necesita basarse en parámetros físicos como: resistencia, rigidez, distorsión global y de entrepiso, capacidad de



deformación, capacidad de disipación de energía; que puedan ser asociados con estados límites como: límite elástico, resistencia de componente máximo, y grado de incapacidad para mantener capacidad de carga de gravedad (estado límite de parcial o colapso de sistema completo); a fin de que se convierta en metas para el diseño. Esto se aplica al sistema estructural, sistema no estructural y contenido. Muy poco de estos parámetros y estados límites es expresado en los términos socio-económicos de los Niveles de Desempeño.

Por otro lado, la contribución de la ingeniería estructural necesita enfocarse al tema de discusión de la más apropiada representación del sismo para evaluación de desempeño, para reducir las incertidumbres causadas por la simplificación en la descripción de riesgo. Hay muchos otros riesgos sísmicos incluyendo efectos de duración del movimiento que afectan daño acumulativo, efectos "cuenca" que pueden ser críticos para estructuras con periodo largo, y la existencia de riesgos colaterales.

- **Diseño Conceptual**

En esta fase se necesita definir un sistema estructural que cumpla diversos requerimientos en varios Niveles de Desempeño. Esta fase es crítica porque se toman importantes decisiones de diseño. El éxito del diseño basado en desempeño dependerá de las pautas que se puedan establecer para el Diseño Conceptual. Se deben analizar mejor los movimientos sísmicos y los parámetros de ingeniería que deben ser definidos y cuantificados para establecer metas para resistencia, rigidez y ductilidad. Niveles de Desempeño diferentes pueden controlar diferentes aspectos del diseño, y consideraciones simultáneas de Objetivos de Desempeño llegarán a ser un aspecto fundamental del diseño conceptual.



- **Evaluación de Diseño y Modificación**

Este proceso es el núcleo de la ingeniería sísmica basada en el desempeño y requiere extensa investigación. Agrupa todos los aspectos relacionados a la capacidad sismorresistente y sollicitación sísmica para ejecutar una evaluación de diseño en diferentes niveles y para modificar decisiones de diseño sí no se cumplen los Objetivos de Desempeño o si el costo es inaceptable. Es decir, un desempeño satisfactorio implica que las demandas impuestas por sismos no excedan la capacidad estructural, no estructural, componentes y sistemas que sean posibles de establecer.

Los temas de discusión que requieren amplia investigación son diversos. Se requieren investigaciones para cuantificar el deterioro e incorporarlo en modelo analítico. Otro tema de discusión principal para evaluación de capacidad es el daño acumulado, ejemplo la dependencia de la capacidad con la fuerza o historia de deformación. Los temas de investigación asociados con la calificación de ensayos son la identificación y cuantificación de parámetros de gobierno de desempeño sismorresistente (aceleración, velocidad o desempeño de desplazamiento sensitivo). Es materia de investigación cuándo se establece y define los parámetros de ingeniería a ser usados en el criterio de aceptabilidad (resistencia, deformación, o disipación de energía histerética). Se requiere investigación para definir y cuantificar parámetros de daño en sistemas y definir criterios de aceptabilidad para cada parámetro; se requiere amplia investigación, sobretodo para estructuras existentes.

- **Consideraciones sobre el análisis de costo/beneficio - ciclo de vida**

El análisis de costo/beneficio puede ser basado en el sistema estructural solo, o incorporar sistemas no estructurales y contenido. Puede ser basado en pérdidas directas (costo de reparar) o puede incorporar pérdidas indirectas (interrupción del negocio, efectos en una comunidad..). En todos los casos se necesita considerar la vida útil en el cual la edificación espera estar en



operación. Se requiere investigación en el análisis costo/beneficio que permitirá una evaluación de objetivo de los beneficios que pueden ser logrados a través de la implementación del diseño basado en desempeño.

Por otro lado, la metodología de diseño es altamente complicada por la incertidumbre en el sismo de diseño, en la ubicación de capacidades de componente estructural y sistemas, e incertidumbres inherentes en el modelo de sismo de entrada, en el modelo fuerza - deformación de componentes, y en las simplificaciones del método de análisis empleado. Por lo tanto puede ser formulado en un formato de confiabilidad probabilístico completo. El énfasis en la investigación necesita reducir las incertidumbres, establecer medidas de incertidumbres y casualidades, y desarrollar una metodología que cuente estos fenómenos en el proceso de diseño y evaluación.

En tal sentido no es un tema de investigación sólo de la ingeniería estructural, es un tema para todas las partes involucradas en esfuerzo diseño/construcción. Se debe concretar a través de un trabajo en conjunto entre todos los miembros (disciplinas) del equipo de diseño/construcción, incluyendo arquitectos, ingenieros estructurales, geotécnicos, mecánicos, e ingenieros eléctricos, todas las entidades de construcción, así como los ocupantes.

3.7 PROCESO DE DISEÑO DEL ICC (2000)

De acuerdo al Concejo Internacional de Códigos (International Code Council-ICC), las provisiones de los códigos basados en el desempeño cubren todos los aspectos del proceso de diseño de la edificación, incluyendo incendio, seguridad estructural, mecánica y sistema eléctrico [6].

El proceso de diseño se ilustra en la Fig. 3.7. Se inicia con una Selección de Objetivos de Desempeño para pasar a la fase de Diseño Preliminar, luego se Verifica la Capacidad de Desempeño para cumplir los objetivos anteriormente definidos.

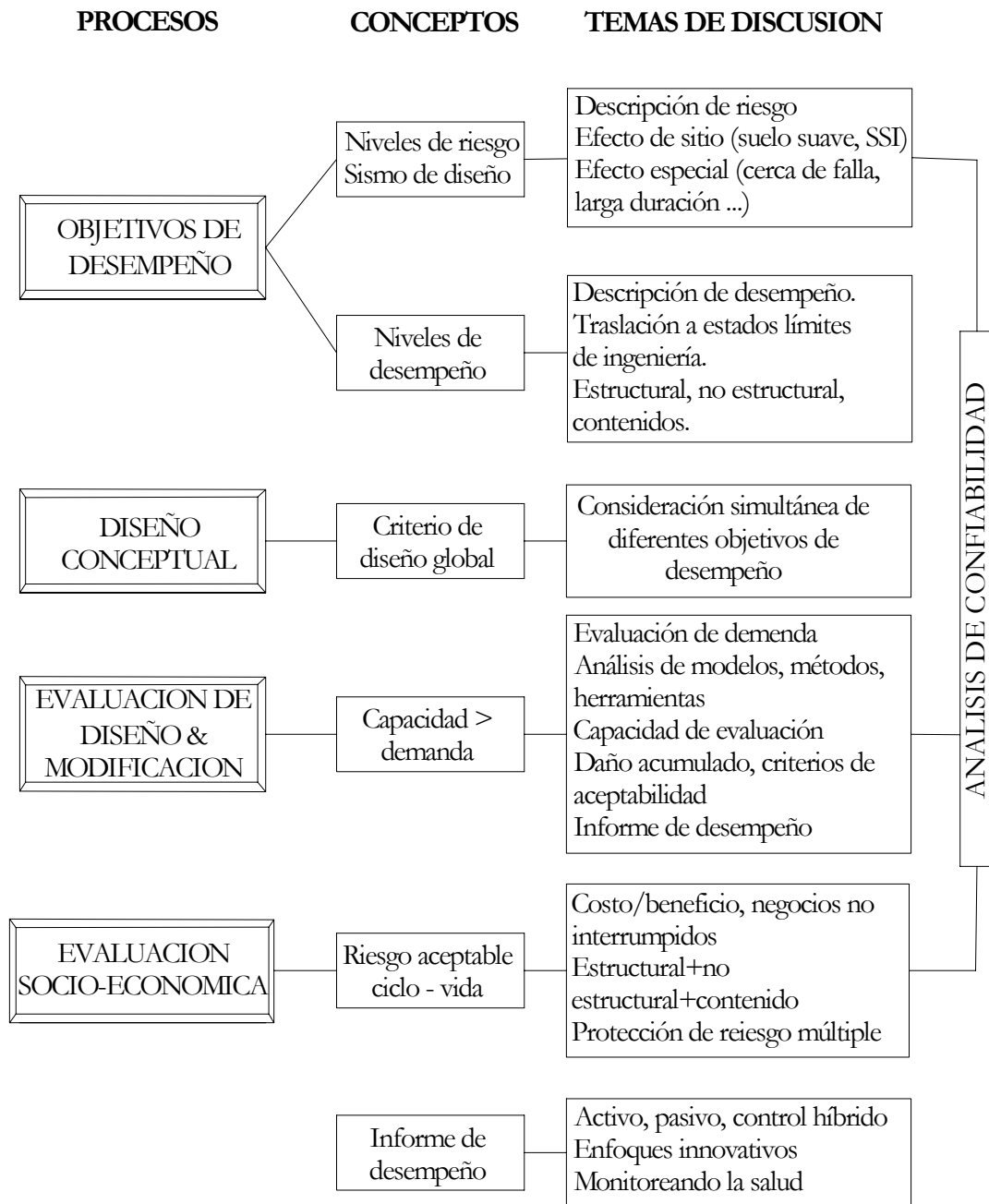


Fig. 3.6 Marco global para la ingeniería basada en desempeño
(Krawinkler, 1999)



Para esta verificación se cuenta con tres caminos: Cálculos para demostrar que se cumple con la adecuada resistencia, rigidez, ductilidad para resistir los niveles de sismo con un nivel de daño aceptable. Otro camino es Ensayar un Prototipo de vivienda para someterlo a diversos movimientos sísmicos de simulación para demostrar el cumplimiento de su capacidad de comportamiento previsto. Finalmente se puede demostrar que se cumple o satisface las normas o estándares previstos por el código.

La Metodología de Diseño por Desempeño por los diversos grupos de investigación que se describieron brevemente, son conceptualmente similares y se plantea en forma integral; es decir comprende desde la etapa de proyecto hasta la etapa de mantenimiento.

Para efectos de organización del presente trabajo se puede definir tres etapas: etapa de proyecto (pre- construcción), una etapa de construcción y una etapa de mantenimiento (post-construcción).

Para la etapa de proyecto, materia del presente trabajo, se puede identificar los siguientes componentes: Objetivos de Desempeño, Evaluación de Desempeño y Análisis de Aceptabilidad.

El primer componente Objetivo de Desempeño contempla la meta u objetivo del diseño. El segundo componente Evaluación de Desempeño corresponde a la fase del diseño propiamente dicho. El tercer componente Análisis de Aceptabilidad se refiere a la verificación del diseño apropiado.



Los componentes identificados de la Metodología del Diseño por Desempeño serán tratados en los capítulos siguientes.

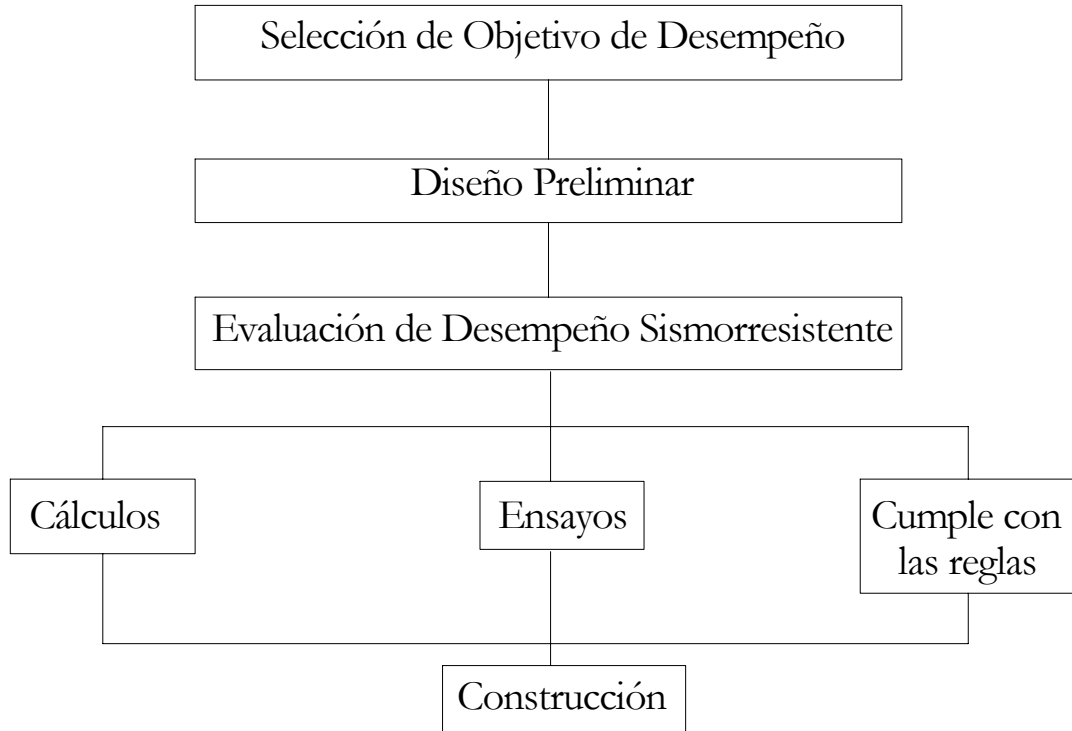


Fig. 3.7 Proceso de Diseño Basado en Desempeño (ICC,2000)



Capítulo 4

PROPUESTAS DE OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

Para comprender mejor los Objetivos de Desempeño es necesario definir los Niveles de Desempeño y Sismo de Diseño.

Se presentan en este capítulo los conceptos por parte de diversos grupos de investigación sobre: Niveles de Desempeño, Sismo de Diseño y Objetivos de Desempeño.

4.1 NIVELES DE DESEMPEÑO

El proyecto Visión 2000 (SEAOC, 1995)[4], denomina Niveles de Desempeño a una expresión del grado máximo de daño para una edificación, dado para un nivel de Sismo de Diseño específico. Se considera la condición del elemento estructural, elemento no estructural y contenidos. La Fig. 4.1 ilustra grados de daño de una edificación ante eventos sísmicos.

El Nivel de Desempeño para el ATC-40 describe una condición de daño límite el cual puede ser considerado satisfactorio para una edificación y un sismo dado.

Los Niveles de Desempeño para el FEMA-273 empleada en rehabilitación de edificaciones, define como puntos discretos de una escala continua que describe el desempeño sismorresistente esperado de una edificación, o alternativamente, daño, pérdida económica, interrupción que puede ocurrir.

En los proyectos de investigación desarrollados en Japón se indica que los niveles de desempeño apropiados son determinados no sólo en términos de tecnología estructural, sino por la demanda de propietarios, usuarios y la sociedad.

El FEMA-350 (2000) [16], define Nivel de Desempeño como una combinación del desempeño sismorresistente de ambos componentes estructural y no estructural. Un Nivel de Desempeño estructural describe los límites del grado de daño del sistema estructural. Un Nivel de Desempeño no estructural describe los límites del grado de daño del sistema no estructural.



4.1.1 NIVELES DE DESEMPEÑO DEL SEAOC (1995)

Se definen cuatro niveles, cada nivel define el límite para un rango de daño, el cual cumple las necesidades básicas del usuario como continuidad de función, aptitud para la reparación, seguridad, etc.

- **Operatividad Completa**

Nivel de desempeño en el cual la edificación, esencialmente no ha sufrido daño, la estructura permanece segura para ser ocupada; el equipamiento y servicios relacionados a la función y ocupación básica de la edificación se encuentran disponibles para su uso. No se requieren reparaciones.

El ATC-33.03 (1995) denomina este nivel como **Operatividad** [2].

- **Operatividad**

Nivel de desempeño donde ocurren daños moderados en elementos no estructurales y contenido, y también daño leve en elementos estructurales. Los daños son limitados y no comprometen la seguridad de la edificación para ser ocupada; daño de algunos contenidos, utensilios y componentes no estructurales pueden afectar parcialmente alguna función normal. El propietario puede iniciar la reparación a su conveniencia.

El ATC-33.03 (1995) lo denomina nivel **Ocupación Inmediata** [2].

- **Protección de Vida**

Nivel de desempeño en el cual ocurre un daño moderado de los elementos estructurales, no estructurales y contenido. La rigidez lateral y capacidad para resistir fuerza lateral adicional se reducen; la estructura no se encuentra disponible para ser ocupada inmediatamente; la edificación probablemente sea reparable.



- **Cerca al Colapso**

Nivel de desempeño en el que ocurre un daño extremo en el cual la resistencia vertical y lateral ha sido sustancialmente comprometido. La estructura se encuentra insegura para ser ocupada y la reparación puede no ser técnicamente o económicamente factible.

El ATC-33.03 (1995) denomina nivel **Prevención del Colapso** [2].

Por otro lado, el comité de sismología del SEAOC (1998) [30], presenta un enfoque basado en desplazamientos por el cual define niveles de desempeño en términos de parámetros de ingeniería cuantificables (desplazamiento inelástico) y en términos de pérdida económica. En este sentido define el desempeño estructural de una obra civil en términos de demanda de ductilidad de desplazamiento, medida por el índice de demanda desplazamiento inelástico IDDI. El índice de desplazamiento inelástico se expresa como una razón en que varía entre $IDDI = [0 \text{ a } 1.00]$ En esta definición $IDDI = 0$, corresponde a un desempeño estructural en el rango elástico, $IDDI = 1.0$ corresponde a un estado límite de inestabilidad en el cual la ductilidad está totalmente colmatada; un $IDDI = 0.6$ corresponde aproximadamente a un límite superior del nivel de desempeño de protección de vida. Estas definiciones se ilustran en la Fig. 4.2

Para niveles de desempeño no estructural, presenta como un enfoque en el cual define como una medida apropiada del nivel de desempeño, la razón o índice de pérdida económica probable. Los niveles de desempeño podrían estar en el rango de 0% de pérdidas a 100% de pérdidas. En un escenario de diseño típico, el sistema no estructural puede estar sin daño en un nivel de desempeño 1 cuando la respuesta estructural es elástica; mientras que en un nivel de desempeño 3, en una respuesta de protección de vida, el sistema no estructural podría estar entre 30% a 50% dañado.



Rango de Daño & índice de daño

Grados de daño y umbral de Niveles de Desempeño

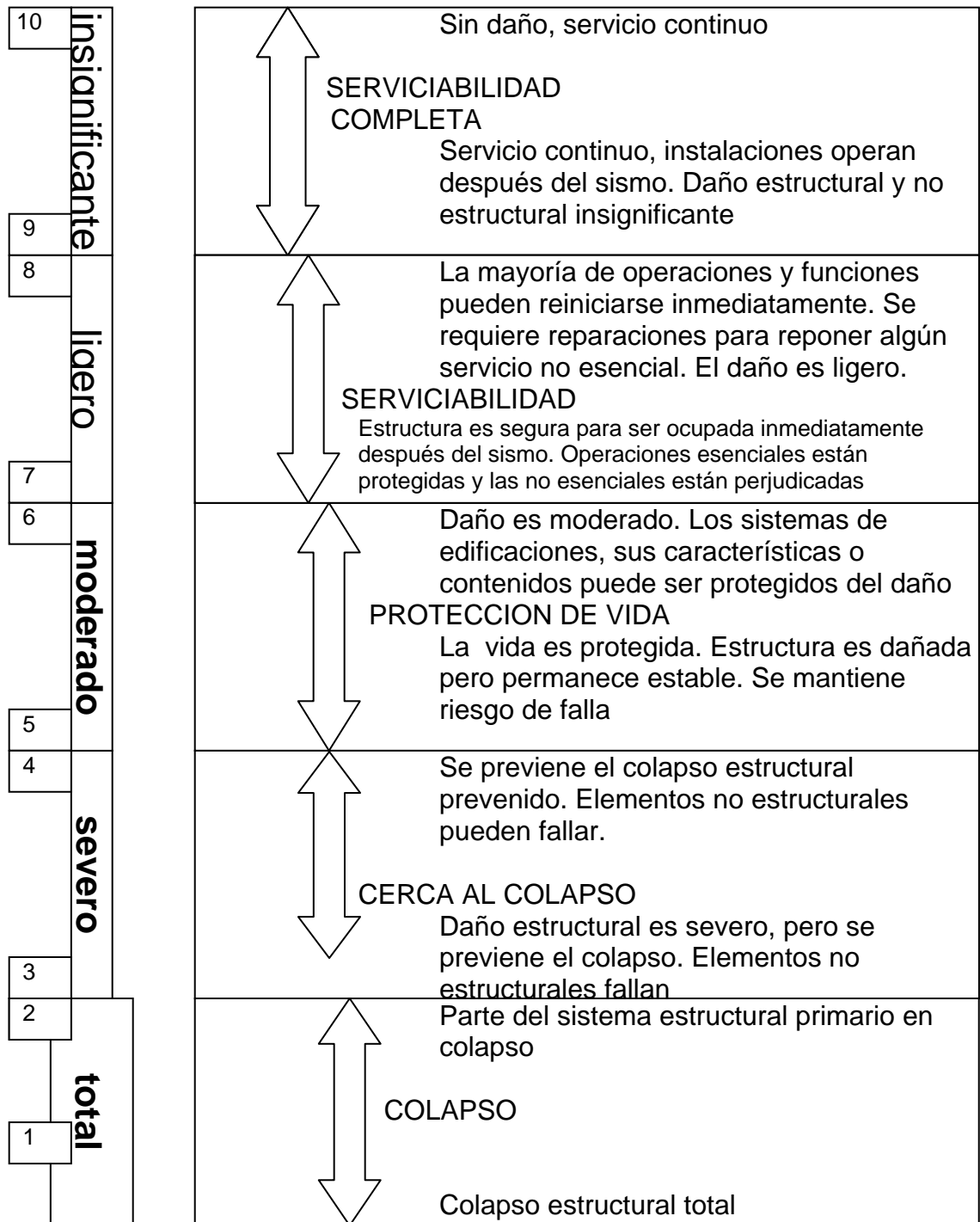


Fig. 4.1 Grados de Daño (SEAOC 1995)

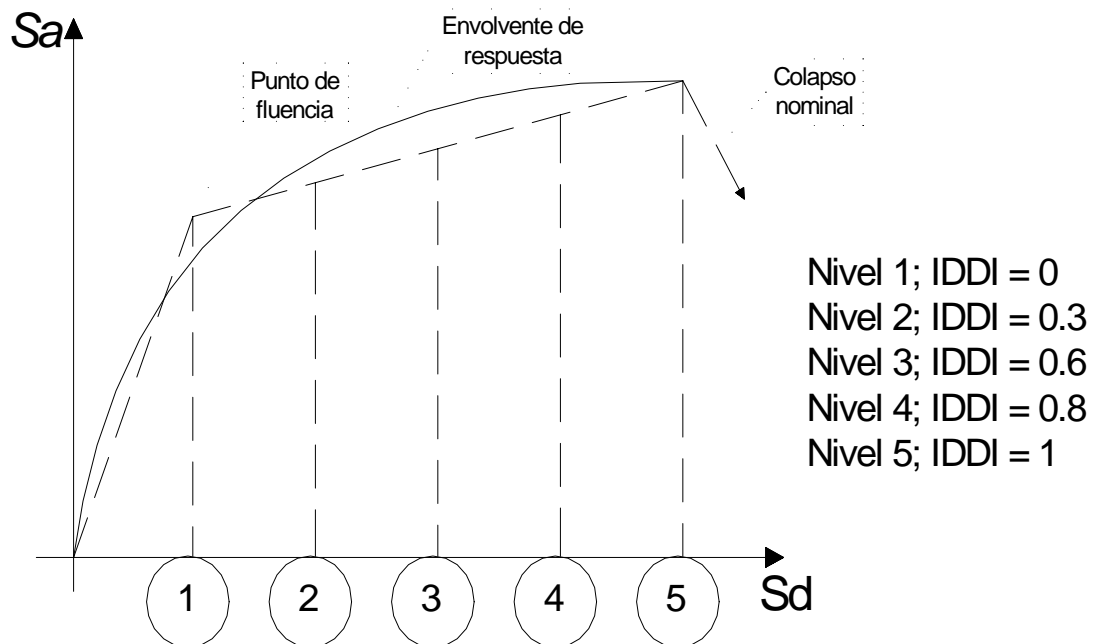


Fig. 4.2 Niveles de Desempeño en Términos de IDDI

(Índice de Demanda de Desplazamiento Inelástico SEAOC, 1998)

4.1.2 NIVELES DE DESEMPEÑO DEL ATC-40 (1996)

Los Niveles de Desempeño de la Edificación son una combinación del Nivel de Desempeño Estructural y Nivel de Desempeño no Estructural, como se puede ilustrar en la Tabla 4.1.

NIVELES DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

- **Ocupación Inmediata**

Condición en la que ocurrió un daño estructural muy limitado. El riesgo de vida por falla estructural es insignificante. La edificación debe estar segura para una salida y entrada segura, así como para su ocupación.



- **Rango de Control de Daño**

Condición en la que ocurrió un daño estructural limitado; pero su ocupación o habitabilidad no es cuestionado.

- **Seguridad de Vida**

Condición en la que ocurrió un daño estructural significativo, se descarta colapso parcial o total. El riesgo de vida por falla estructural es muy bajo. La edificación debe repararse para ser reocupada.

- **Rango de Seguridad Limitada**

Es un nivel intermedio entre nivel de Seguridad de Vida y Estabilidad Estructural.

- **Estabilidad Estructural**

Condición en la que ocurrió un daño estructural sustancial, en la que pone a la edificación a punto de experimentar colapso parcial o total.

NIVELES DE DESEMPEÑO NO ESTRUCTURAL

- **Operativo**

Condición de daño en que los elementos y sistemas no estructurales están en su lugar y funcionando.

- **Ocupación Inmediata**

Condición de daño en que los elementos y sistemas no estructurales están en su lugar. Ocurre algún desorden debido al daño de los contenidos.



- **Seguridad de Vida**

Condición de daño considerable en los elementos y sistemas no estructurales, pero que no incluye colapso o falla parcial o total. El riesgo de vida por daño no estructural es muy baja.

- **Riesgo Reducido**

Condición de daño extenso en los elementos y sistemas no estructurales pero no incluyen colapso parcial o total.

Tabla 4.1 *Combinaciones de Niveles de Desempeño Estructural y no Estructural para formar Niveles de Desempeño de la Edificación*

Niveles de Desempeño de la Edificación						
Niveles de Desempeño no Estructural	Niveles de Desempeño Estructural					
	Ocupación Inmediata	Control de Daño (Rango)	Seguridad de Vida	Seguridad Limitada (rango)	Estabilidad Estructural	No considerado
Operativo	Operativo	2-A	NR	NR	NR	NR
Ocupación Inmediata	Ocupación Inmediata	2-B	3-B	NR	NR	NR
Seguridad de Vida	1-C	2-C	Seguridad de Vida	4-C	5-C	6-C
Riesgo Reducido	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
No considerado	NR	NR	3-E	4-E	Estabilidad Estructural	No aplicable



4.1.3 NIVELES DE DESEMPEÑO DEL FEMA-273 (1997)

Define tres Niveles de Desempeño estructural y cuatro Niveles de Desempeño no estructural para formar los cuatro Niveles de Desempeño sismorresistente básicos: Operativo, Operativo Inmediato, Protección de Vida y prevención del Colapso. Adicionalmente se definen dos rangos de desempeño estructural.

NIVELES DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

- **Nivel De Ocupación Inmediato: S-1**

Nivel en el que sólo ocurre daño estructural limitado. El sistema estructural para fuerzas laterales y carga vertical conserva casi toda su resistencia y rigidez. El riesgo de pérdida de vida es muy bajo. Las reparaciones no son prioritarias para ser reocupadas.

- **Nivel De Protección De Vida :S-3**

Nivel en el que ocurre daño significativo en la estructura, pero que está al margen del colapso total o parcial. Algunos elementos y componentes estructurales se dañan severamente. El riesgo o amenaza de vida es baja. Podría ser prudente realizar reparaciones para ser reocupado.

- **Nivel De Prevención Del Colapso: S-5**

Significa que la estructura está a punto del colapso parcial o total. La edificación sufre daño sustancial, incluyendo degradación de la resistencia y la rigidez del sistema resistente de fuerza lateral, deformación lateral permanente, degradación de la capacidad de soporte vertical. Las reparaciones de la estructura no pueden ser técnicamente prácticas, y no pueden ser seguras para ser reocupadas.



- **Rango De Control De Daño: S-2**

Significa rango de daño continuo menor que el definido para el nivel de seguridad de vida pero mayor que el nivel de ocupación inmediata. Puede ser deseable para minimizar el tiempo de reparación e interrupción de la operación, protección de equipos y contenidos para preservar características históricas cuando el costo para el nivel de ocupación inmediata es excesivo.

- **Rango De Seguridad Limitada :S-4**

Significa rango de daño continuo menor que el definido para el nivel de prevención del colapso pero mayor que el nivel de seguridad de vida. Parámetros de diseño para este rango se pueden obtener por interpolación de los niveles S-3 y S-5.

- **Nivel De Desempeño Estructural No Considerado :S-6**

La designación S-6 nivel de desempeño estructural no considerado, se usan para cubrir situaciones donde sólo se introducen mejoras no estructurales.

NIVELES DE DESEMPEÑO NO ESTRUCTURAL

- **Nivel De Funcionamiento: N-A**

Se define a la situación o estado de daño post sismo de la edificación, en el cual los componentes no estructurales son capaces de soportar el funcionamiento de la edificación

- **Nivel De Funcionamiento Inmediato: N-B**

Se define a la situación o estado de daño post sismo de la edificación, en el cual ocurre daño no estructural limitado. Los accesos, el sistema de



seguridad de vida, incluyendo puertas, ascensores, luces de emergencia, alarmas de incendio, permanecen funcionando.

El riesgo o amenaza de vida es muy bajo.

- **Nivel De Protección De Vida: N-C**

Nivel en el que ocurre daño costoso y potencialmente significativo en los componentes no estructurales.

La restauración de estos componentes puede tomar mucho trabajo.

- **Nivel De Riesgo Reducido: N-D**

Nivel en el que ocurre daño extenso en los componentes no estructurales.

- **Nivel No Considerado: N-E**

La designación N-E nivel de desempeño no estructural no considerado, se usa para cubrir la situación donde sólo se introducen mejoras estructurales.

Estas definiciones se encuentran ilustradas esquemáticamente en la Fig. 4.3

4.1.4 NIVELES DE DESEMPEÑO DEL CUERPO DEL EJERCITO DE LOS EE.UU. (1998)

Los Niveles de Desempeño Estructural se resumen a continuación. El significado físico de estos niveles se ilustran en las Fig. 4.4 y Fig. 4.5.

- **Prevención del Colapso**

Condición de daño en que la edificación está en pie. Los daños en los sistemas estructurales y no estructurales son significantes. El colapso es inminente y es un rango inaceptable para edificaciones militares nuevas.



- **Seguridad de Vida**

Condición de daño en que la edificación está estable. El daño estructural es moderado, pero se descarta el colapso de la edificación.

- **Salida Segura**

Condición de daño en que la edificación se encuentra completamente segura para ser reocupada. El daño estructural es ligero y de fácil reparación.

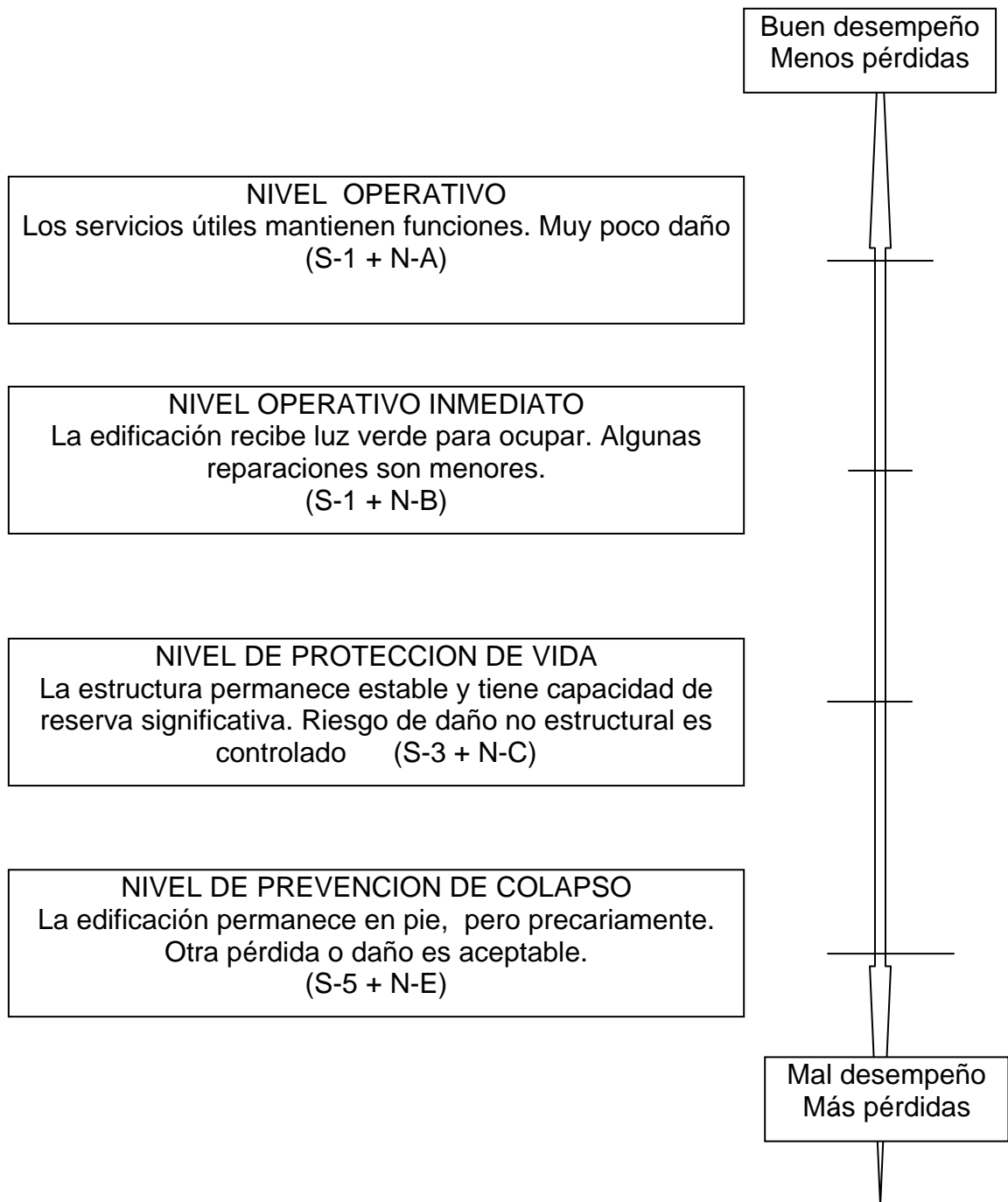


Fig. 4.3 Niveles de Desempeño (FEMA-273, 1997)

- **Ocupación Inmediata**

Condición de daño en que la edificación permanece estable para ser ocupada. El daño estructural es limitado y puede ser reparado mientras se ocupa la edificación.

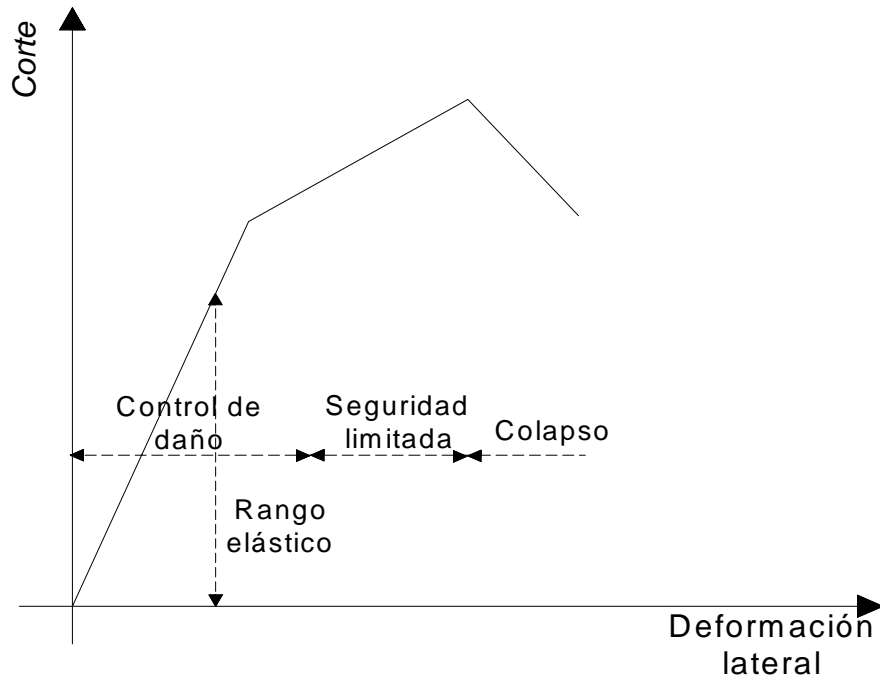


Fig. 4.4 Desempeño y Demanda de Deformación Estructural para estructuras no dúctiles

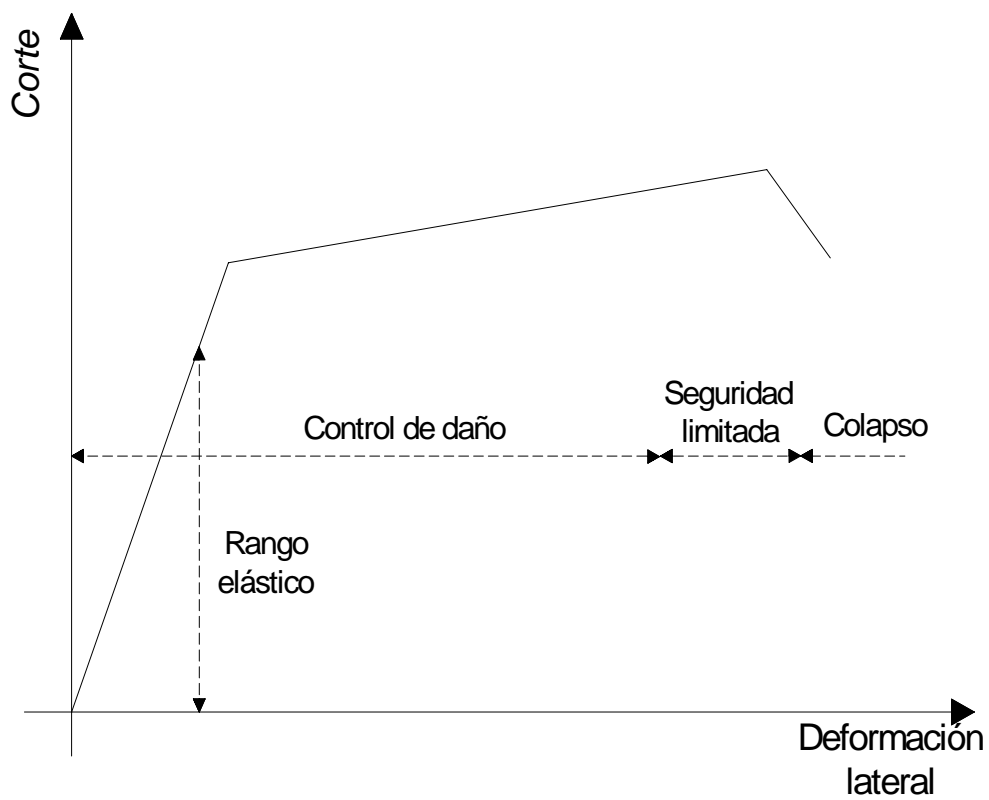


Fig. 4.5 Desempeño y Demanda de Deformación Estructural para estructuras dúctiles



4.1.5 PROYECTOS DE INVESTIGACION DESARROLLADOS EN JAPON

□ **Proyecto Integral De Investigación y Desarrollo Del Gobierno Japonés (1998)**

Los Niveles de Desempeño se pueden seleccionar o definir como categorías de desempeño de *seguridad*, *reparabilidad* y *serviciabilidad*; así como también deben ser categorizados en términos de racionalidad económica y protección de seguridad de vida. En la tabla 4.2 se ilustra los estados o situaciones límites de un desempeño estructural básico antes descrito.

□ **Ministerio De Construcción Del Japón (2000)**

Indica que los Niveles de Desempeño:

- **Seguridad de Vida**

El propósito principal de este requerimiento es la seguridad de la vida humana. Es definido para prevenir falla o colapso de los pisos en los pórticos estructurales.

- **Limitación de Daño**

Este requerimiento es para la limitación de daño. Se define para prevenir daño del sistema estructural, en los elementos, en los acabados interiores y exteriores.



Tabla 4.2 Situaciones límites de desempeño (adaptado de Ministerio de Construcción de Japón) [8]

Desempeño estructural básico	Seguridad (protección de vida)	Reparabilidad (protección de propiedad)	Serviciabilidad (mantenimiento de las funciones y confort)
Objeto de evaluación	Estados o situaciones límites		
	Límite de seguridad	Límite de reparabilidad	Límite de serviciabilidad
Estructura	La estructura nunca pierde la capacidad de soporte de carga vertical.	Los daños en la estructura debe estar dentro de los rangos predeterminados en términos de reparabilidad	La deformación o vibración de la estructura nunca afecta al uso diario de la edificación
Elementos de la edificación (estructurales y no estructurales)	Los elementos de la edificación no fallan o se alteran.	Los daños en los elementos de la edificación deben estar dentro de los rangos predeterminados en términos de reparabilidad	La deformación o vibración de los elementos nunca afecta al uso diario de la edificación
Equipamiento	El equipamiento no se voltean o se desplazan debido a la deformación o vibración de la estructura o elemento.	Los daños en el equipamiento debido a la deformación o vibración de la estructura o elemento; deben estar dentro de los rangos predeterminados en términos de reparabilidad	La deformación o vibración de la estructura o elementos nunca afecta al uso diario de los equipos
Muebles	Los muebles no se voltean o se desplazan debido a la deformación o vibración de la estructura o elemento.	Los daños a los muebles debido a la deformación o vibración de la estructura o elemento deben estar dentro de los rangos predeterminados en términos de reparabilidad	La deformación o vibración de la estructura o elementos nunca afecta al uso diario de los muebles
Suelo (2)	El suelo no colapsa (3) o sufre deformación muy seria que afecte la capacidad de soporte vertical de la estructura.	La caída o pérdida de capacidad de deformación del suelo debe estar dentro de los rangos predeterminados en términos de reparabilidad	La caída o pérdida de capacidad de deformación del suelo nunca afecta al uso diario de la edificación o pasadizos

(2) Se refiere a efectos como desprendimiento del suelo, fallas inclinadas.

(3) Se refiere a deformación causada por caída de rigidez como licuefacción



□ **Otros autores (2000)**

Otros investigadores como Yamawaki, Kitamura [31], definen los Niveles de Desempeño siguientes.

• **Conserva Función**

Ningún daño en casi todas las funciones. No necesita reparación. Daño en los elementos estructurales no sustancial. Deformación residual no visible. Ningún Daño.

• **Conserva Mayoría de Funciones**

La mayoría de funciones están operativas. Se pueden recobrar casi todas las funciones con una ligera reparación. Daño Ligero.

• **Conserva Funciones Limitadas**

Casi todas las funciones pueden ser recobradas con una reparación. Pérdida ligera de la resistencia estructural. Daño en Escala Pequeña.

• **Seguridad de Vida**

La edificación permanece accesible y está disponible para actividades de emergencia. Pérdida sustancial de la resistencia estructural. Probable reparación inmediata. Daño en Escala Media.

• **No garantiza Seguridad de Vida**

No se permite ingreso a la edificación. Daño peligroso para la vida humana. Daño serio en los elementos estructurales. Probable colapso parcial. Daño Serio.



□ DISPOSICIONES EN LA NORMA TÉCNICA JAPONESA (2001)

La Norma Técnica Japonesa (2001) [33], considera como estandar mínimo para el desempeño sismorresistente de edificaciones dos estados límites:

- **Seguridad**

Es el estado límite definido para salvaguardar la vida de los habitantes. Para la seguridad o protección de la vida humana, ningún nivel de la edificación debe colapsar ante condiciones o requerimientos de fuerza extraordinarias.

- **Control de Daño**

Es el estado límite definido para proteger las propiedades de los habitantes. Para la protección de la propiedad se deben prevenir daños estructurales que puedan ocurrir más de una vez durante la vida útil de la edificación.

4.1.6 NIVELES DE DESEMPEÑO DEL FEMA-350 (2000)

La tabla 4.3 describe los dos Niveles de Desempeño, llamados Prevención de Colapso y Ocupación Inmediata.

NIVELES DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

Se definen dos niveles de desempeño estructural prevención de colapso y ocupación inmediata. La tabla 4.4 relaciona estos niveles de desempeño estructural a los estados de daño límite para elementos aporricados comunes de acero.



Tabla 4.3 Niveles de desempeño de la edificación

	Niveles de desempeño de la edificación	
	Nivel de prevención de colapso	Nivel de ocupación inmediata
Daño global	Severo	Ligero
General	Poca rigidez y resistencia residual, pero son soportadas las fuerzas de gravedad. Distorsión permanente grande. Algunas salidas pueden ser bloqueadas. Acabado exterior puede ser extensamente dañado y algunas fallas locales pueden ocurrir. La edificación está cerca del colapso.	La estructura retiene sustancialmente la resistencia y rigidez original. Fisuramiento pequeño. El funcionamiento de los elevadores pueden ser restablecidos. Protección contra incendio operativo.
Componente no estructural	Daño extenso	Equipamiento y contenidos están generalmente seguros, pero no pueden operar debido a fallas mecánicas o desconocimiento de uso
Comparación con FEMA-302 sujeto a sismo de diseño	Significativamente más daño y gran riesgo	Mucho menor daño y bajo riesgo
Comparación con FEMA-302 sujeto a sismo máximo	Mismo nivel de desempeño	Mucho menor daño y bajo riesgo

Nota: el FEMA-302 se refiere a disposiciones recomendadas para regulación sísmica de edificaciones nuevas.

Tabla 4.4 Niveles de Desempeño Estructural

Elementos	Niveles de desempeño estructural	
	Nivel de Prevención de colapso	Nivel de Ocupación inmediata
Viga	Extensa distorsión, fluencia local y pandeo. Pocas vigas con fractura parcial	Fluencia o pandeo local menor en algunos lugares.
Columna	Distorsión moderada, algunas columnas fluyen, pandeo local en algunas alas	No se observan daños o distorsión
Conexión viga-columna	Numerosas fracturas y algunas conexiones experimentan pérdida casi total de capacidad	Menos de 10% de conexiones fracturadas en algún piso, fluencia menor en otras conexiones.
Zona de panel	Distorsión extensa	Distorsión menor
Empalme de columna	Sin fracturas	No fluye
Plancha de base	Fluencia extendida de pernos de anclaje en plancha de base	No se observan daños o distorsión
Distorsión de entrepiso	Permanente grande	"mucho" menor que 1% permanente



- **Ocupación Inmediata**

Definida como la condición de daño post sismo, en la cual ocurre daño estructural limitado. Los sistemas de resistencia a las cargas laterales y verticales retienen casi toda sus resistencia y rigidez. El riesgo de vida como un resultado de daño estructural es muy bajo. La edificación debe estar segura para ser ocupada inmediatamente, suponiendo que el daño a los elementos no estructurales es ligero y que los servicios públicos necesarios están disponibles.

- **Prevención del Colapso**

Definida como la condición de daño post sismo, por la cual la estructura está al borde del colapso parcial o total, Daño sustancial en la estructura incluyendo degradación de la rigidez y resistencia, deformación lateral permanente y con ciertos límites, degradación en la capacidad de cargas verticales. La estructura puede no ser ni técnicamente y económicamente práctico ser reparada y no es seguro ser reocupada.

Conceptualmente el Nivel de Desempeño es similar para todos los grupos de trabajo antes indicado; sin embargo los niveles o número de Niveles de Desempeño son diversos y cada uno tiene una denominación específica.

En ningún caso, los grupos de trabajo mencionados definen Nivel de Desempeño único.

Por otro lado, aún la norma ISO 3010 define dos niveles como: Estado Límite de Serviciabilidad y Estado Límite Ultimo.

- **Estado Límite de Serviciabilidad**

Las estructuras deben resistir movimientos sísmicos moderados que se espera que puedan ocurrir en el sitio durante su vida útil sin daño estructural y con daño no estructural dentro de límites aceptables.



- **Estado Límite Ultimo**

La estructura no debe colapsar ni dañar vidas humanas debido a movimientos sísmicos severos que posiblemente puedan ocurrir en el sitio.

4.2 SISMO DE DISEÑO

Para efectos de diseño el peligro sísmico debe ser definido en niveles de Sismo de Diseño. El peligro sísmico incluye rotura, movimiento del suelo, licuefacción y otros peligros potenciales, como se indica en la Tabla 4.5. Sin embargo, el movimiento del suelo es la causa de más daño.

Los niveles de Sismo de Diseño son expresados en términos de intervalos de recurrencia o probabilidad de excedencia. El intervalo de recurrencia es una expresión del promedio del periodo de tiempo, expresado en años, entre la ocurrencia de un sismo el cual produce efectos del mismo, o mayor, severidad. La probabilidad de excedencia es una representación estadística de la posibilidad que un efecto sísmico exceda una severidad dada, experimentada en un sitio dentro de un número de años especificado. El intervalo de recurrencia puede ser directamente relacionado con una probabilidad de excedencia para un número especificado de años [4].

La peligrosidad sísmica representa la probabilidad de ocurrencia, dentro de un periodo específico de tiempo y dentro de un área dada, de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad determinada [51]. La evaluación de peligro sísmico se efectúa por medio de métodos deterministas y probabilistas, para proponer niveles sísmicos de movimientos máximo del suelo en el área de estudio. En tal sentido se definen Estudio Sísmico Determinístico y Estudio Sísmico Probabilístico. Cornell en 1968 evalúa probabilísticamente el riesgo sísmico, el método consiste en una revisión de la actividad sísmica del pasado para determinar las fuentes sismogénicas considerando las características tectónicas de la región; luego se determina las zonas sismogénicas y con la atenuación sísmica se determina los valores probables de intensidades sísmicas.



Conforme a las relaciones desarrolladas por Sarria [52], la probabilidad de ocurrencia $P(a)$ de una aceleración A , generada por la ruptura de una fuente sismogénica resulte igual o menor a un parámetro prefijado "a", siempre y cuando la ruptura produce una magnitud mayor a la especificada como mínimo.

$$P(a) = P\left(A \leq \frac{a}{M} \geq M_{min}\right) \quad (4.1)$$

Suponiendo N eventos independientes, una variable aleatoria y con una distribución de Poisson en el tiempo, partiendo además del teorema de probabilidad condicional total; la probabilidad acumulada de la aceleración máxima para un periodo de "t" años se puede plantear como:

$$P(a)_{max}(t) = e^{-\Phi} [1 - P(a)] \quad (4.2)$$

Donde Φ es el número promedio de eventos por año.

La ecuación se origina en el producto de dos variables, la primera por una caracterización de la fuente mediante la recurrencia de las magnitudes, la segunda es una generación aleatoria de magnitudes en el futuro que no tiene memoria. El proceso de Poisson genera las magnitudes sin tener en cuenta si acaba de ocurrir un gran sismo o no.

El periodo de retorno medio T_r está dado por:

$$T_r = 1/[1 - P(a)] \quad (4.3)$$

Que se puede aproximar a:

$$T_r(a) \approx \frac{T_r}{\phi} \quad (4.4)$$

De donde:

$$P(a)_{max} \approx e^{-t/T_r} \quad (4.5)$$

$P(a)_{max}$: probabilidad de ocurrencia de una aceleración máxima.

t : tiempo de exposición

T_r : periodo de retorno promedio de la aceleración para la condición establecida.

$[1 - P(a)_{max}]$ margen de confiabilidad.



La evaluación de P(a) se puede efectuar por el programa RISK desarrollada por McGuirre (1976) en el cálculo de peligro sísmico.

Tabla 4.5 *Parámetros de Peligro Sísmico*

Peligro	Parámetro
Movimiento	Aceleración efectiva pico Espectro de respuesta elástica Espectro de respuesta inelástica Registro tiempo historia
Licuefacción	Capacidad portante permisible Asentamiento diferencial vertical esperado Desplazamiento de suelo lateral esperado
Avalancha	Desplazamiento de suelo lateral y vertical esperado
Asentamiento	Asentamiento diferencial esperado
Ruptura	Movimiento vertical y horizontal esperado

4.2.1 NIVELES DE SISMO DE DISEÑO DEL SEAOC (1995)

Define cuatro niveles que se ilustran en la Tabla 4.6

Tabla 4.6 *Niveles de Sismo de Diseño de Vision 2000 (SEAOC(1995))[4]*

Nivel de sismo de diseño	Intervalo de recurrencia	Probabilidad de excedencia
Frecuente	43 años	50% en 30 años
Ocasional	72 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy Raro	970 años	10% en 100 años



4.2.2 NIVELES DE PELIGRO SÍSMICO DEL ATC-40 (1996)

Los niveles de peligro sísmico para definir el Sismo de Diseño son:

- **Sismo de Serviciabilidad**

Es definido probabilísticamente como sismo que tiene 50% de probabilidad de ser excedida en un periodo de 50 años. Es aproximadamente 0.50 veces el Sismo de Diseño. Representa un nivel de sismo frecuente con periodo de retorno aproximado de 75 años.

- **Sismo de Diseño**

Es definido probabilísticamente como sismo que tiene 10% de probabilidad de ser excedida en un periodo de 50 años. Representa un nivel de sismo no frecuente con periodo de retorno aproximado de 500 años.

- **Sismo Máximo**

Es definido determinísticamente como el nivel máximo. Se puede estimar como el sismo que tiene 5% de probabilidad de ser excedido en un periodo de 50 años. Es típicamente 1.25 o 1.50 veces el Sismo de Diseño. El periodo de retorno aproximado es de 1000 años.

4.2.3 NIVELES DE SISMO DE DISEÑO DEL FEMA-273 (1997)

Se puede ilustrar los niveles definidos en la Tabla 4.7

Tabla 4.7 Niveles de sismo de diseño (adaptado de FEMA-273 (1997)) [32]

Nivel de sismo de diseño	Probabilidad de excedencia
Sismo 1	50 % en 50 años
Sismo 2	20% en 50 años
Sismo de seguridad básico BSE-1	10% en 50 años
Sismo de seguridad básico BSE-2	2% en 50 años



4.2.4 NIVEL DE SISMO DE DISEÑO DEL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJERCITO DE EE.UU. (1998)

Considera fracciones (2/3 y 3/4) para el máximo sismo considerado A y B respectivamente. Las probabilidades de excedencia son 10% en 50 años y 2% en 50 años, con periodos de retorno de 500 años y 1000 años respectivamente; como se puede apreciar en la Tabla 4.8 siguiente:

Tabla 4.8 Sismo de Diseño (US Army CE)

Nivel de sismo de diseño	Intervalo de recurrencia	Probabilidad de excedencia
2/3 (sismo máximo A)	500 años	10% en 50 años
3/4 (sismo máximo B)	1000 años	5% en 50 años

4.2.5 PROYECTOS DE INVESTIGACION DESARROLLADOS EN JAPON

□ PROYECTO INTEGRAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO POR EL GOBIERNO JAPONES (1995)

Define dos niveles como se puede ilustrar en la Tabla 4.9. [8]

Tabla 4.9 Niveles de Sismo de Diseño

Sismo de Diseño	Periodo de Retorno
Estado Límite de Serviciabilidad	30 años Aproximadamente
Estado Límite Ultimo	500 años Aproximadamente

□ MINISTERIO DE CONSTRUCCION DEL JAPON (2000)

Considera dos niveles como se ilustra en la Tabla 4.10

Tabla 4.10 Niveles de Sismo de Diseño

Sismo de Diseño	Periodo de Retorno
Sismo máximo	500 años Aproximadamente
Sismo único en todo el periodo de diseño	30 - 50 años Aproximadamente



4.2.6 SISMO DE DISEÑO DEL FEMA-350 (2000)

Considera dos niveles como se ilustra en la Tabla 4.11

Tabla 4.11 Niveles de Sismo de Diseño del FEMA-350 (2000) [16]

Sismo de Diseño	Probabilidad de Excedencia
Movimiento del Suelo Máximo (MCE)	2% en 50 años Periodo de Retorno de 2500 años Aproximadamente
Movimiento del Suelo de Diseño	2/3 (MCE)

Todos los grupos de trabajo definen los niveles de sismo de diseño en función al estudio de peligro sísmico y se basa principalmente en el Periodo de Retorno del Sismo.

La norma ISO 3010 establece un Periodo de Retorno del sismo de 20 años para el Estado Límite de Serviciabilidad; y un Periodo de Retorno del sismo de 500 años para el Estado Límite Ultimo.

El primer nivel de Sismo de Diseño del ISO 3010 es más bajo que el de los grupos de trabajo mencionados ($Tr = 20$ años contra $Tr = 43$ años del vision 2000).

El último o segundo nivel de sismo de diseño del ISO 3010, es aproximadamente igual al nivel único de sismo de diseño de la norma E 030-97.

4.3 OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

Es una expresión del Nivel de Desempeño deseado para la edificación para cada nivel de Sismo de Diseño. Los Objetivos de Desempeño se pueden seleccionar basados en la ocupación, importancia o funciones de la edificación; tambien teniendo en cuenta consideraciones económicas incluyendo costo relacionado a la reparación de daños e interrupción del servicio, y consideraciones de la importancia potencial de la edificación como un lugar histórico y cultural[4].



El FEMA-273 denomina al Objetivo de Desempeño como objetivo de rehabilitación; define como la combinación de un Nivel de Desempeño con un nivel de Sismo de Diseño. En tal sentido, el objetivo de rehabilitación es el establecimiento de un límite de daño deseado o pérdida para una demanda por sollicitación sísmica. El objetivo de rehabilitación seleccionado como una base para el diseño determinará la extensión, el costo y la facilidad de algún proyecto de rehabilitación, así como también como el beneficio a ser obtenido en términos como el mejoramiento de la seguridad, reducción de daños en propiedad, e interrupción de uso en un evento sísmico futuro

El FEMA-350 define al Objetivo de Desempeño como la especificación de un Nivel de Desempeño estructural y una baja probabilidad que un pobre desempeño pueda ocurrir dentro de un periodo específico de tiempo, típicamente tomado como 50 años. Alternativamente se pueden evaluar Objetivos de Desempeño determinísticamente. El Objetivos de Desempeño determinísticos consisten de la especificación de un Nivel de Desempeño y un sismo específico.

En el Japón definen conceptualmente los Objetivos de Desempeño u objetivos de diseño, como los denominan, para protección de vida, conservación de propiedad y mantenimiento de funciones y confort. Por otro lado se precisa que la norma japonesa define Objetivos de Desempeño para la Seguridad y Control de Daño de las edificaciones.

4.3.1 OBJETIVOS DE DESEMPEÑO DEL SEAOC (1995)

Recomienda Objetivos de Desempeño para diversas categorías de edificaciones.

- **Objetivo Seguridad Crítica**

Se define para edificaciones que contiene cantidades de materiales de riesgo como: toxinas, explosivos y materiales radioactivos.

La tabla 4.12 a continuación ilustra estos objetivos.



Tabla 4.12 *Objetivos de Desempeño para edificaciones de seguridad críticas*

Edificaciones de seguridad críticas	
Nivel del sismo de diseño	Nivel de desempeño mínimo
Frecuente	Serviciabilidad completa
Ocasional	Serviciabilidad completa
Raro	Serviciabilidad completa
Muy raro	Serviciabilidad

- **Objetivo esencial/riesgoso**

Se define para edificaciones como: hospitales, estaciones policiales, centros de comunicación, central de emergencia.

La tabla 4.13 a continuación resume los objetivos.

Tabla 4.13 *Objetivos De Desempeño Para Edificaciones Esenciales/Riesgosas*

Edificaciones esenciales/riesgosas	
Nivel del sismo de diseño	Nivel de desempeño mínimo
Frecuente	Serviciabilidad completa
Ocasional	Serviciabilidad completa
Raro	Serviciabilidad
Muy raro	Vida segura

- **Objetivo Básico**

En la tabla 4.14 a continuación se resume los objetivos.



Tabla 4.14 *Objetivos de Desempeño para edificaciones comunes*

Edificaciones comunes	
Nivel del sismo de diseño	Nivel de desempeño mínimo
Frecuente	Serviciabilidad completa
Ocasional	Serviciabilidad
Raro	Vida segura
Muy raro	Cerca de colapso

Los Objetivos de Desempeño recomendados, se resumen en la Fig. 4.5

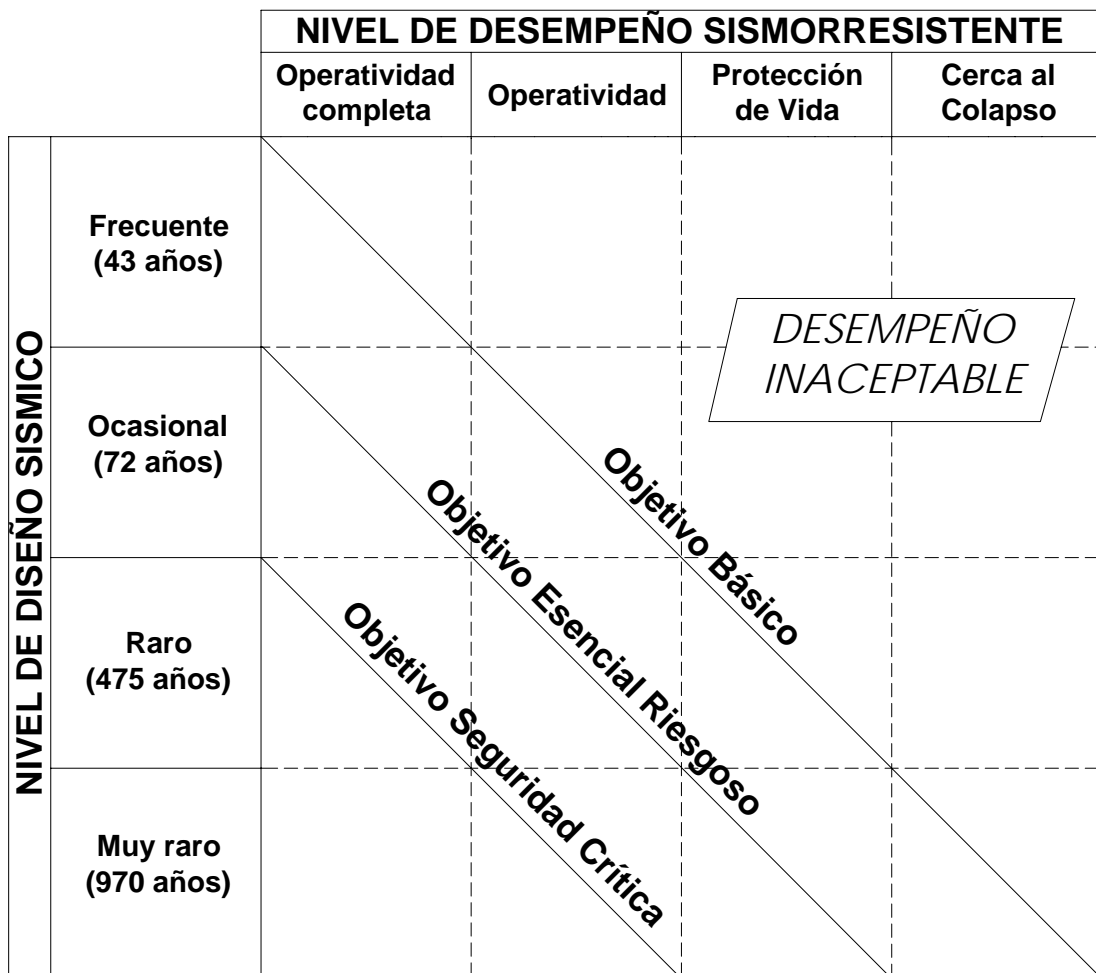


Fig. 4.5 *Objetivos de Desempeño (SEAOC, 1995)*



4.3.2 OBJETIVOS DE DESEMPEÑO DEL ATC-40 (1996)

La definición de Objetivo de Desempeño se ilustra en la Fig 4.6

4.3.3 OBJETIVO DE REHABILITACION DEL FEMA-273 (1997)

La Fig. 4.7 que a continuación se ilustra presenta una matriz que indica los rangos de Objetivos de Rehabilitación. Cada celda de esta matriz es un Objetivo de Rehabilitación.

Definición de un Objetivo de Desempeño				
	Nivel de Desempeño de la Edificación			
Sismo de Diseño	Operacional	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vida	Estabilidad Estructural
Serviciabilidad	✓	NA	NA	NA
Sismo de Diseño	✓	✓	✓	NA
Máximo		✓	✓	✓

NA : no aceptable

Fig. 4.6 definición de un Objetivo de Desempeño



		NIVELES DE DESEMPEÑO DE EDIFICACION			
		Nivel serviciabilidad (1-A)	Nivel de habitabilidad inmediata (1-B)	Nivel de protección de vida (3-C)	Nivel de prevención de colapso (5-C)
NIVEL DE RIESGO SISMICO	50% / 50 años	a	b	c	d
	20% / 50 años	e	f	g	h
	BSE-1 ~10% / 50 años	i	j	k	l
	BSE-2 ~2% / 50 años	m	n	o	p

k + p = Obs objetivos básico de seguridad
 k + p + alguno de a, e, i, m, b, f, j, ó n = O Objetivo mejorado
 k sólo ó p sólo = objetivo limitado
 c, g, d, h = objetivos limitados
 BSE-1, BSE-2 : seguridad sismorresistente básica

Fig. 4.7 Objetivos de Rehabilitación (FEMA-273, 1997)

4.3.4 OBJETIVO DE DESEMPEÑO DEL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJERCITO DE LOS EE.UU. (1998)

Se ilustra en la Tabla 4.15 que a continuación se presenta, donde:

1-A: se define para todas las edificaciones militares para Protección de Vida.

2-A: corresponde a una salida segura para edificaciones especiales

2-B: corresponde a una salida segura para edificaciones con riesgo.

3-B: corresponde a ocupación inmediata para edificaciones esenciales.



Tabla 4.15 *Objetivos de Desempeño (USA ARMY, 1998)*

Parámetros de Desempeño		
Niveles de Desempeño	Niveles de Sismo	Objetivo de Desempeño
Seguridad de Vida	2/3 Sismo Máximo A	1-A
Salida segura	2/3 Sismo Máximo A	2-A
Salida Segura	3/4 Sismo Máximo B	2-B
Ocupación Inmediata	3/4 Sismo Máximo B	3-B

4.3.5 PROYECTOS DE INVESTIGACION DESARROLLADOS EN JAPON

□ **Otros Investigadores (2000)**

Kitamura y Yamawaki, presentan con la denominación "menú de desempeño sísmico"; fueron preparados para identificar varios Niveles de Desempeño requerido por los ocupantes [31], tal como se ilustra en la Tabla 4.16



Tabla 4.16 Menú de Desempeño Sísmico (Kitamura, Yamawaki; 2000)

Nivel de sismo de diseño	Sismo que puede ocurrir varias veces durante la vida de la edificación. Probabilidad de excedencia 80% en 50 años	Sismo que puede ocurrir una vez en la vida de edificación. Probabilidad de excedencia 10% en 50 años	Ejemplo
Nivel para uso especial SS	Conserva función	Conserva función	Estación de generadores
Grado ordinario S	Conserva función	Conserva mayoría de función	Centro de prevención de desastre, hospital central...
Grado ordinario A	Conserva función	Conserva función limitada	Hospital ordinario, instalación de refugio, centro de cómputo, oficina principal...
Grado ordinario B	Conserva mayoría de función	Seguridad de vida	Edificación ordinaria
Función limitada E	Conserva función limitada	-	Edificación temporal

Los trabajos de investigación desarrollados en EE.UU. definen Objetivos de Desempeño en función de Nivel de Desempeño y Sismo de Diseño para diferentes tipos de obras civiles.

Los trabajos de investigación desarrollados en Japón emplean el término metas de niveles de desempeño y definen en función de la conservación de la vida y de la propiedad principalmente.



No existe uniformidad en la definición de los Objetivos de Desempeño; cada grupo de trabajo de acuerdo a los fines del estudio define los Objetivos de Desempeño para casos específicos.



Capítulo 5

EVALUACION DEL DESEMPEÑO

Se requiere de una Evaluación del Desempeño para asegurar el cumplimiento de los Objetivos de Desempeño.

La selección de un apropiado enfoque de diseño para un proyecto depende de varios factores incluyendo los Objetivos de Desempeño, el tipo y complejidad del sistema estructural a ser usado. En general, edificaciones simples con criterios de desempeño modestos pueden usar enfoques simples. Estructuras complejas con mayor demanda de objetivos de desempeño requerirán enfoques de diseño más rigurosos. El enfoque de diseño debe ser consistente con los Objetivos de Desempeño definidos para un proyecto, así como con el tipo y complejidad del sistema estructural [4].

Para evaluar el desempeño sismorresistente de edificaciones existentes y verificar el diseño de adaptaciones sísmicas, se requieren de procedimientos analíticos. Por ejemplo los métodos de análisis no-lineal simplificado, que incluye el análisis estático no lineal. Este análisis incluye el método de espectro de capacidad, el método de coeficiente de desplazamiento (FEMA-273 que usa un análisis “pushover” y una versión modificada de la aproximación de desplazamiento equivalente para estimar el desplazamiento máximo) y el método secante que usa una estructura sustituta y una rigidez secante [43].

El enfoque de Evaluación de Desempeño para rehabilitación de edificaciones es analizar la estructura para un sismo con probabilidad de excedencia deseada y determinar si las demandas de deformación son menores que la capacidad de deformación de la estructura en el Nivel de Desempeño deseado. Si la demanda de distorsión es menor que la capacidad, entonces la estructura tiene una gran probabilidad de no excedencia para el Nivel de Desempeño deseado. Los procedimientos de análisis para la Evaluación de Desempeño son los pasos para conseguir la distribución de fuerzas y deformaciones en la estructura inducidos por el movimiento sísmico u otros riesgos para un objetivo de rehabilitación seleccionado. Los análisis dirigen las demandas sísmicas y las capacidades para



resistir estas demandas por todos los elementos de la estructura. La selección del método está basado en las limitaciones de las características de la edificación. [38].

En el Japón se define a las pautas para la Evaluación de Desempeño como la descripción de los principios para analizar si un diseño estructural satisface los niveles o tipos de metas u objetivos de desempeño.

El FEMA-350 define al proceso básico de la Evaluación de Desempeño como el desarrollo de un modelo matemático de la estructura y la evaluación de su respuesta para el riesgo sísmico por uno o más métodos de análisis estructural. El análisis estructural es empleado para predecir el valor de parámetros de respuesta estructural (distorsión de entrepiso, fuerzas axiales en columnas). Estos parámetros de respuesta están relacionados con los daños experimentados por la estructura.

A continuación se describe brevemente los procedimientos analíticos para la Evaluación del Desempeño por parte de diversos grupos de trabajo.

5.1 ENFOQUES DE DISEÑO DEL SEAOC (1995)

Sólo presenta enfoques de diseño para su implementación y desarrollo, como:

- **Enfoque de Diseño Integral**

Es un enfoque de diseño probabilístico en estado límite, en el cual se considera la optimización del costo durante el ciclo de vida. Se desarrolla el concepto que toda edificación debe cumplir como mínimo un objetivo básico, más aún luego que el diseño sísmico ideal se basa en el menor costo total durante la vida de la obra, incluyendo costo inicial y costo de reparaciones por daños debidos a sismo.

Este enfoque toma en cuenta demandas simultáneas para resistencia y deformación y sus efectos combinados sobre la demanda de energía y capacidad para toda la edificación, incluyendo componentes estructural y no estructural.



Este enfoque conceptual está basado en el uso de conceptos de energía sobre los principios fundamentales de dinámica estructural y diseño integral, y considera el comportamiento mecánico real de toda la edificación.

En la práctica puede ser usado para casos especiales que involucren irregularidad, complejidad o seguridad crítica, debido al ámbito y la complejidad de la información y análisis.

Este enfoque de diseño continúa implementándose por ejemplo Bertero [1] establece la siguiente metodología de diseño preliminar:

1. Definición del Sismo de Diseño:

Se deben obtener espectros de respuesta para diversos estados límites para resistencias, desplazamientos y diferentes factores de amortiguamiento. La evaluación del daño acumulado causado por fuerza cíclica se puede hacer a través de funciones o índices de daño, razón de ductilidad aceptable máximo y energía disipada.

2. Procedimientos de Diseño Numérico Conceptual:

Se define para diseñar contra las combinaciones críticas del sismo de diseño con otras solicitaciones que puedan actuar sobre la edificación de acuerdo a su localización y ubicación. Se estima la fuerza de diseño sismorresistente a través del uso del espectro de resistencia para diferentes estados límites; los espectros que se hacen para un sistema de 1GDL se modifica por efecto de modos de vibración alto de sistemas de VGDL, por efecto de torsión, daño aceptable y sobrerresistencia.

- **Diseño Basado en Desplazamiento**

Se basa en el desplazamiento antes que la fuerza como punto de inicio del diseño sísmico, asume que el control del desplazamiento, o distorsión, es la clave para controlar el desempeño de la estructura.



En un diseño tradicional basado en la resistencia, la estructura es diseñada elásticamente para una respuesta de aceleración reducida y fuerzas asociadas. Desplazamiento o distorsión es entonces verificado como parte de la verificación de aceptabilidad. En este enfoque el proceso de diseño se invierte diseñando la edificación para un control de desplazamiento y verificando para la resistencia.

Empieza con el establecimiento de una meta, nivel de desplazamiento o distorsión de fluencia y de servicio, consistente con los objetivos de desempeño. Las metas de desplazamiento deben ser ajustados a una razón consistente con la capacidad de ductilidad de la estructura prevista.

Así por ejemplo, para un nivel de protección de vida, la distorsión de entrepiso se limita al desplazamiento que convoca alguno de los siguientes efectos:

- a)** Esfuerzo de compresión de 0.003 en pórtico confinado o muro de corte. **b)** Esfuerzo de compresión de 0.004 en una columna de concreto armado.
- c)** Deformación pico o máxima en albañilería confinada determinada por datos experimentales o ensayos físicos.
- d)** Se calcula el desplazamiento por análisis no lineal cuando empezó la degradación de resistencia de algún elemento.

Típicamente una estructura elástica sustituta puede ser usada para modelar la rigidez efectiva de la estructura inelástica en el desplazamiento último. Un apropiado espectro de respuesta de desplazamiento elástico amortiguado será usado con la estructura sustituta para diseñar la estructura real. Para un apropiado objetivo de desempeño seleccionado para el sismo frecuente se debe emplear otro espectro con amortiguamiento ajustado, con la estructura real en rango elástico.

Sin embargo, se requiere más investigación para su aplicabilidad en sistemas de varios grados de libertad, relacionado por ejemplo al establecimiento de amortiguamiento efectiva real.



Existen dos procedimientos de diseño basados en el desplazamiento como se ilustra en la Fig. 5.1. Los procedimientos referidos son:

► **Diseño Basado en Desplazamiento Equivalente**

Está basada en los resultados de desplazamiento encontrados por Newmark-Hall (1982); quienes indican que para edificaciones con periodos entre 0.5 a 0.7 segundos, la demanda de desplazamientos en una estructura que responde elásticamente es aproximadamente igual a la demanda de desplazamiento en una estructura que responde inelásticamente con igual rigidez inicial [30].

► **Diseño Basado en Desplazamiento Directo**

Se basa en procedimientos de análisis de una “estructura sustituta” desarrollada por Shibata y Sozen (1976). Los fundamentos de este diseño se ilustra en la Fig. 5.2 [29]. Se caracteriza la estructura por una rigidez secante K_e y el máximo desplazamiento Δ_d (Fig. 5.2b) y un nivel apropiado de amortiguamiento viscoso para la energía histerética absorbida durante la respuesta inelástica. El periodo efectivo T_e en la respuesta de desplazamiento máximo puede ser leído del espectro de desplazamiento de diseño (Fig. 5.2d). Representando la estructura con un sistema equivalente de un grado de libertad y la rigidez efectiva en el desplazamiento de respuesta máximo, se encuentra como:

$$T_e = \sqrt{\frac{M_e}{K_e}} \quad (5.1)$$

$$K_e = 4\pi^2 \frac{M_e}{T_e^2} \quad (5.2)$$

De la Fig. 5.2b el corte en la base en la respuesta máxima es:

$$V_b = K_e \Delta_d \quad (5.3)$$



► **Modelo Equivalente de Un Grado de Libertad (estructura sustituta)**

Desplazamiento efectivo

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (5.4)$$

donde n es el número de pisos y m_i es la masa por piso

Masa efectiva

Considerando la participación de masa en el modo fundamental, la masa efectiva es:

$$M_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_d} \quad (5.5)$$

Este enfoque de diseño se sigue desarrollando e investigando por parte de investigadores como Chopra [53] respecto a la ventaja de emplear espectro elástico o inelástico.

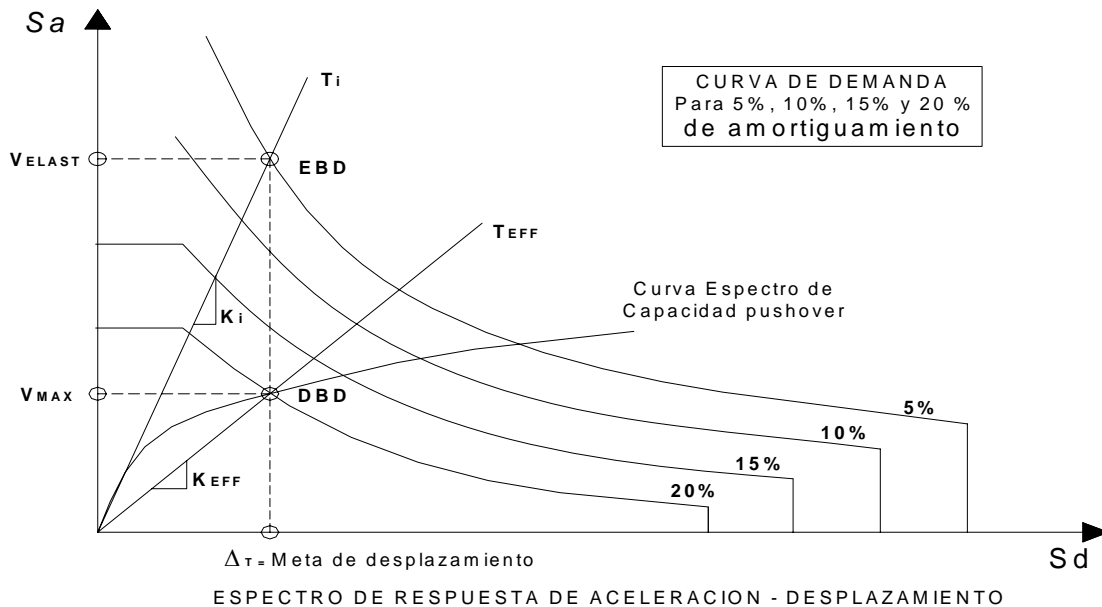


Fig. 5.1 Procedimientos de DBD y EBD (SEAOC, 1995)

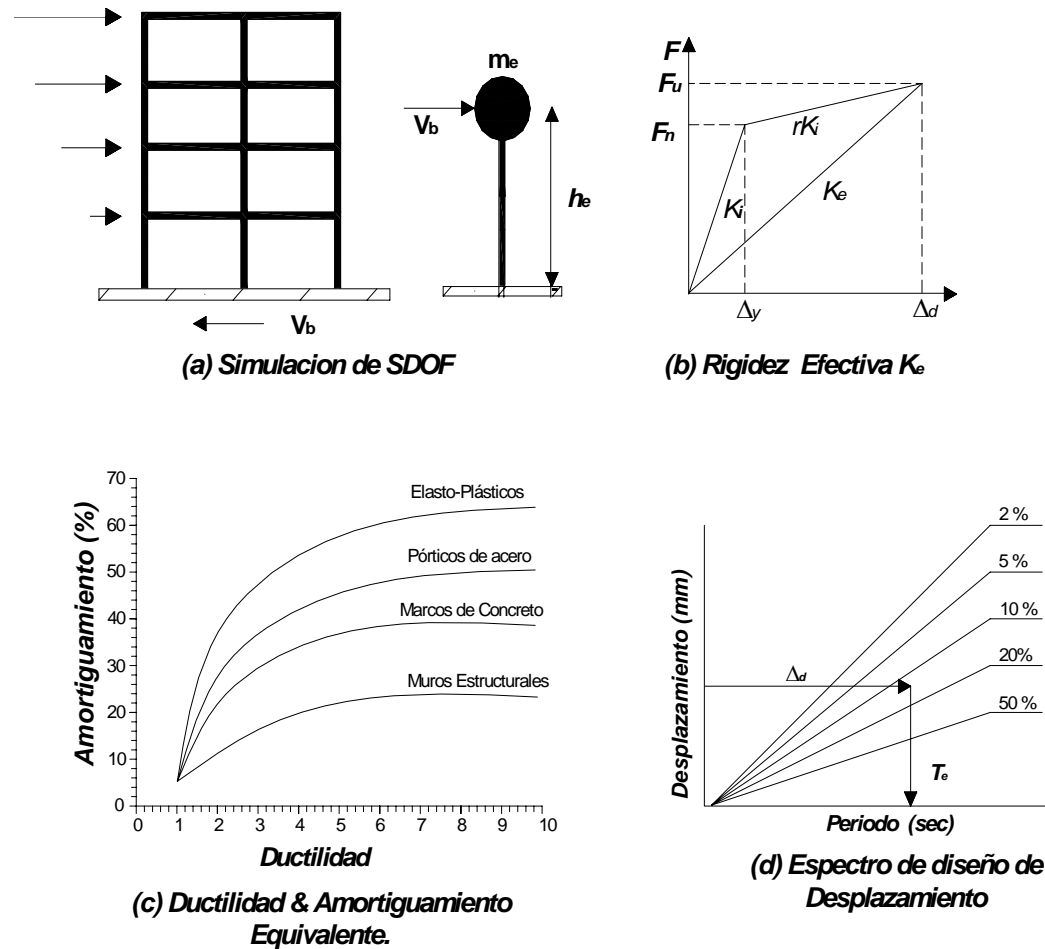


Fig. 5.2 Diseño Basado en Desplazamiento Directo

- **Enfoque de Diseño Basado en Energía**

Este enfoque se basa en la premisa que el daño está directamente relacionado a la energía de entrada; esta energía de entrada es función de la velocidad efectiva del sismo y su duración y su interrelación entre el movimiento y la estructura. La velocidad y duración no son tomados en cuenta en el espectro de respuesta de aceleración comunmente usado en el diseño. Ese enfoque de diseño toma en cuenta directamente el efecto de la duración y el contenido de energía del sismo en periodos estructurales



diferentes también como para la degradación del sistema estructural a través de la respuesta cíclica.

El enfoque empieza con la estimación de la energía de entrada de un sismo de diseño esperado en un rango de frecuencias y la estructura es diseñada para proveer una mayor capacidad de absorción y disipación de energía que la demanda esperada. Este esquema fue propuesto por Housner en 1956.

Este enfoque, aún se encuentra en desarrollo y es relativamente poco conocido como para convertirse en un diseño práctico.

La ecuación de balance de energía se puede presentar como:

$$E_i = E_e + E_d = E_k + E_s + E_{H\mu} + E_{H\xi} \quad (5.6)$$

Comparando con la ecuación de diseño:

$$DEMANDA \leq OFERTA \quad (5.7)$$

Donde:

- E_i : Energía de entrada
- E_e : Energía elástica
- E_d : Energía disipada
- E_k : Energía cinética
- E_s : Energía de deformación elástica
- $E_{h\xi}$: Energía de amortiguamiento
- $E_{h\mu}$: Energía histerética plástica

E_i representa la demanda y $E_e + E_d$ representa la oferta.

Para un diseño sismorresistente eficiente el primer paso es una buena estimación de E_i para el sismo de diseño crítico. Entonces se analiza si es posible económicamente y/o técnicamente balancear esta demanda sólo con E_e , o si es conveniente reducir E_e , por disipación tanto como sea posible los



efectos de E_i empleando E_d . Para este propósito existen tres caminos: incrementando la energía disipada a través de amortiguamiento histerético $E_{h\xi}$, por incremento de la razón de amortiguamiento viscoso lineal ξ ; otro es incrementando la energía histerética plástica $E_{h\mu}$; y por una combinación de incrementos de $E_{h\xi}$ y $E_{h\mu}$.

Si es técnica o económicamente imposible balancear el requerimiento de E_i por E_e+E_d , el diseñador puede disminuir E_i , esto es posible a través de enfoques de diseño innovador como: técnicas de aislamiento de base y/o mecanismos de disipación de energía [19]

- **Enfoque de Diseño Basado en Fuerza/Resistencia**

El enfoque de diseño sismorresistente basado en fuerza/resistencia es el más común empleado actualmente, en la literatura se dispone generalmente como enfoque de fuerza lateral o como enfoque de fuerza lateral equivalente. Se basa en determinar una fuerza lateral de corte en la base mínimo, distribuido sobre toda la altura de la edificación por un procedimiento estático o dinámico, diseñando miembros con suficiente resistencia, para resistir las fuerzas resultantes y detallar componentes con suficiente ductilidad.

Las principales desventajas de esta filosofía de diseño es:

1. El diseño se basa en un objetivo de desempeño único, usualmente asociado al movimiento sísmico con periodo de recurrencia de 475 años.
2. Supone un comportamiento elástico lineal, para la cual la resistencia está basada en la reducción de la resistencia requerida a través de un factor de reducción de resistencia R , que depende sólo del tipo del sistema estructural.

En tal sentido se plantea una modificación a este enfoque tradicional para adaptarlo al diseño por desempeño, así:



- Especificar para cada nivel de desempeño espectros diferentes. El espectro de respuesta y desplazamiento están basados en la función de daño aceptable o índice de daño.
- Para el espectro de diseño de resistencia, especificar el espectro de resistencia reducida para cada nivel de desempeño involucrando daño estructural. El factor R considera todos los parámetros importantes que puedan afectar cada uno de los valores antes mencionados.

En este enfoque se propone la definición de R como:

$$R. = R_{\Delta T} \times (R_{OVS} + 1) \times R_{\mu, E_{H\mu}} \times R_{E_{H\Delta\xi}} \quad (5.7)$$

Donde:

$R_{\Delta T}$: Factor que depende del cambio de los periodos del sistema estructural completo.

R_{OVS} : Factor de reducción de sobrerresistencia; depende del sistema estructural, el periodo fundamental, efecto de otras fuerzas y método de diseño.

$R_{\mu, E_{H\mu}}$: Factor de reducción del factor de ductilidad aceptable; que depende del grado de daño aceptable, duración del movimiento sísmico fuerte, periodo, características mecánicas de la edificación.

$R_{E_{H\Delta\xi}}$: Factor de reducción de amortiguamiento, depende de la energía que puede ser disipada a través del posible incremento del coeficiente del coeficiente de amortiguamiento viscoso histerético.

Como se ilustra en la Fig. 5.3, se muestra espectro de diseño correspondiente al sismo de diseño extremo (máximo), luego se reduce a través de valores especificados de R para cada Objetivo de Desempeño.



5.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA EVALUACION DE DESEMPEÑO DEL ATC-40 (1996)

El documento enfatiza el análisis estático no lineal basado en el método del espectro de capacidad. Los procedimientos de análisis no lineal simplificado como el método de espectro de capacidad y el método de coeficiente de desplazamiento requiere la determinación de los tres primeros elementos: capacidad, demanda o sollicitación sísmica (desplazamiento) y desempeño.

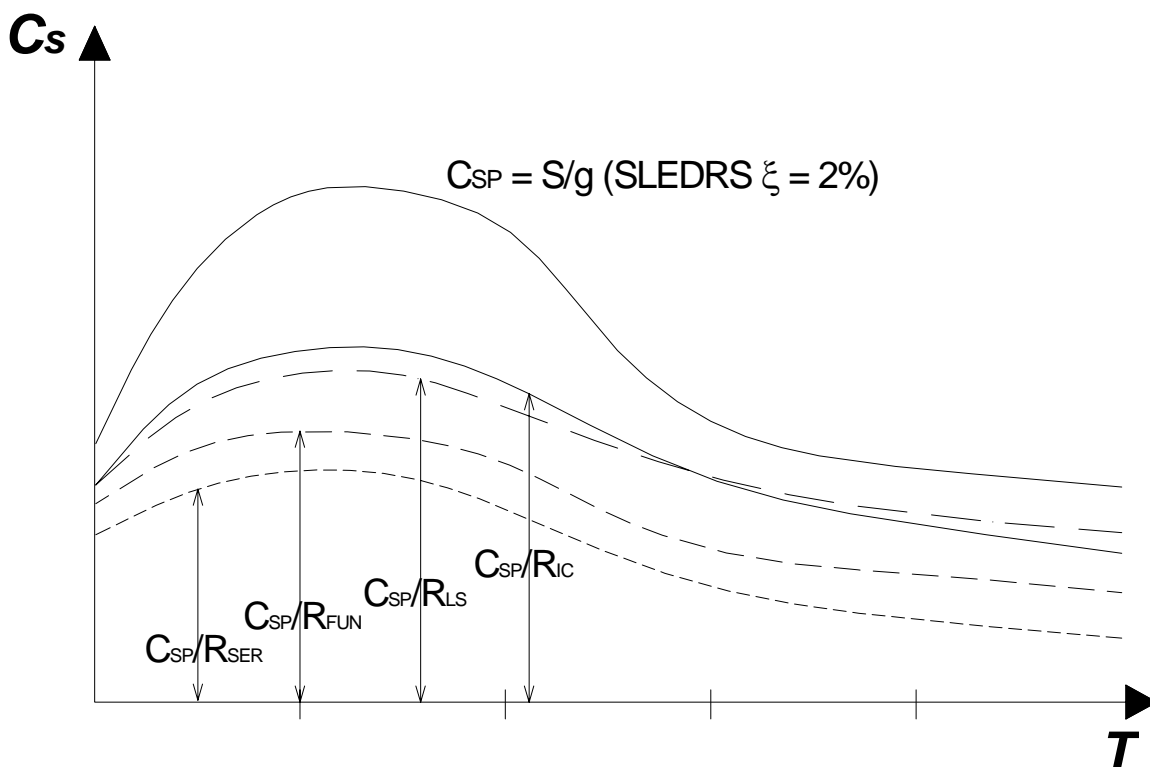


Fig. 5.3 Espectro de Diseño correspondiente al máximo sismo suavizado



• CAPACIDAD

Es una representación de la habilidad de la estructura para resistir la demanda sísmica. La capacidad de la estructura depende de la resistencia y capacidad de deformación de los componentes individuales de la estructura. La capacidad de la estructura está representada por una curva creciente. El camino más conveniente para plotear la curva fuerza-desplazamiento a través del corte en la base y desplazamiento en entrepiso. La curva de capacidad generalmente representa el primer modo de respuesta de la estructura basado en la hipótesis que el modo fundamental de vibración es la respuesta predominante de la estructura.

La curva de capacidad se ilustra en la Fig. 5.4

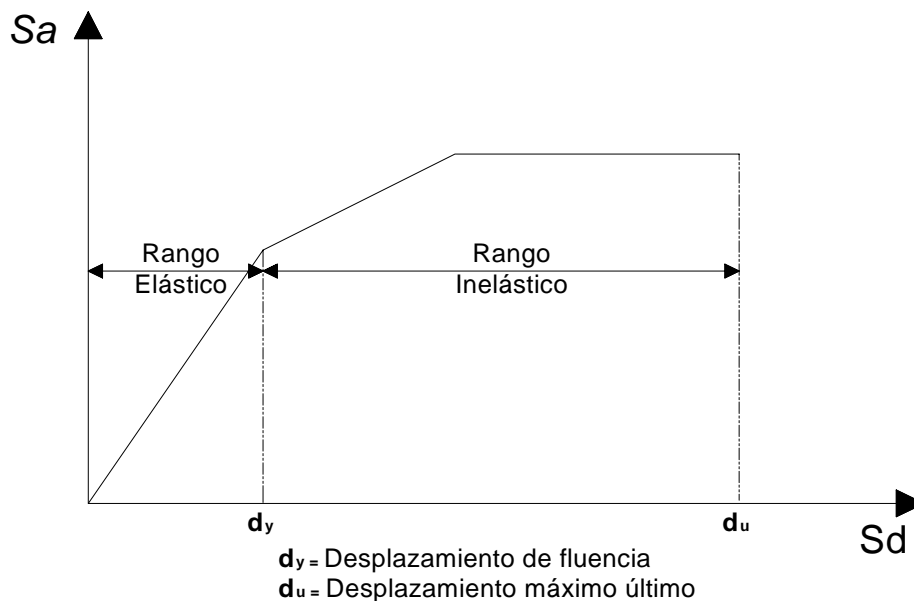


Fig. 5.4 Curva de Capacidad

• DEMANDA O SOLICITACION SISMICA

Grandes movimientos durante un sismo producen padrones de desplazamiento horizontal complejos en estructuras que pueden variar con el tiempo. El espectro de respuesta de $\beta=5\%$ reducido, llamado espectro de demanda, puede



ser plotado como se muestra la figura 5.5. Cada espectro representa un nivel diferente de amortiguamiento efectivo.

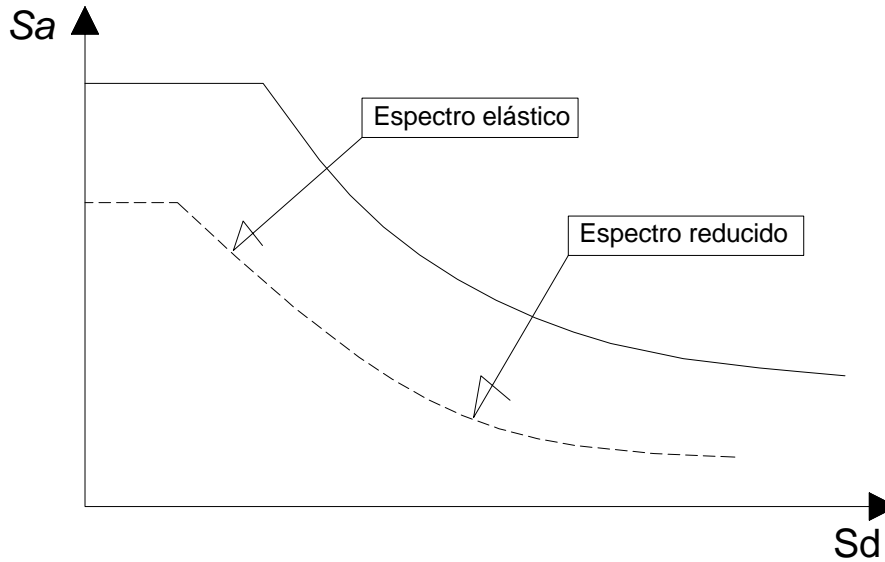


Fig. 5.5 Solicitación Sísmica

- **DESEMPEÑO**

La revisión o comprobación del desempeño verifica que los componentes estructurales y no estructurales no son dañados más allá de los límites aceptables de los objetivos de desempeño para las fuerzas y desplazamiento implicado por la demanda. El punto de desempeño representa el desplazamiento estructural máximo esperado para el movimiento sísmico de demanda.

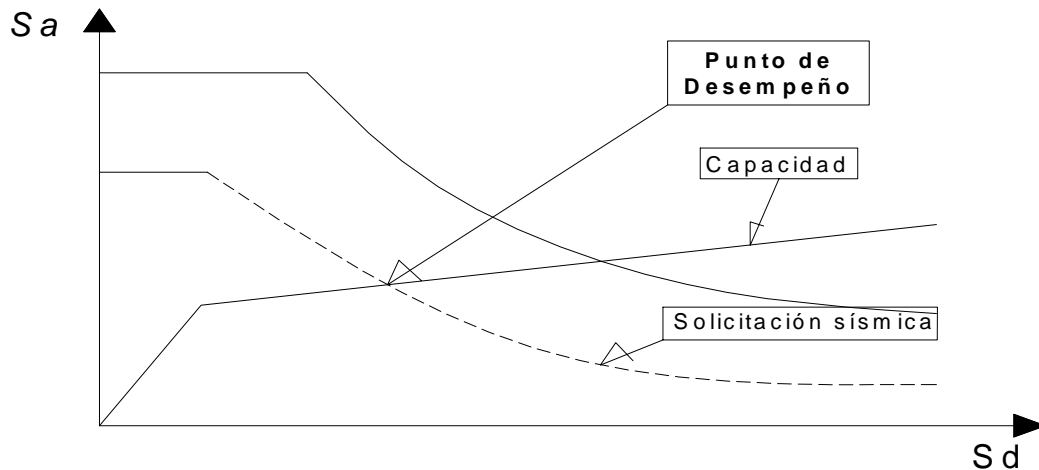


Fig 5.6 Punto de Desempeño



5.3 PROCEDIMIENTOS ANALITICOS PARA EL METODO DE REHABILITACIÓN DEL FEMA - 273 (1997)

Los métodos de rehabilitación para conseguir la reducción de la vulnerabilidad sísmica de una edificación se clasifican en un método de rehabilitación Simplificado y Método de Rehabilitación Sistemático. El primer método se emplea para ciertas edificaciones pequeñas; para conseguir objetivos de rehabilitación limitados. El segundo método se puede emplear para cualquier edificación.

Describe dos procedimientos de análisis: análisis lineal y análisis no lineal.

- **Análisis lineal**

Se clasifica en un Análisis Estático Lineal y un Análisis Dinámico Lineal. No se debe usar para edificaciones irregulares. El Análisis Estático Lineal emplea procedimientos de análisis estático con fuerzas equivalentes que se encuentran en la mayoría de los códigos. El Análisis Dinámico Lineal está conformado por un análisis de espectro de respuesta y un análisis tiempo-historia lineal.

Las acciones y deformaciones deben ser afectadas por Factores de Modificación; por ejemplo:

$$V = C_1 C_2 C_3 S_a W \quad (5.8)$$

V : pseudo fuerza lateral

C_1 : factor de modificación relacionado al desplazamiento inelástico máximo
(1-1.5)

C_2 : factor de modificación relacionado a la degradación de la rigidez (1- 1.5)

C_3 : factor de modificación relacionado al incremento de desplazamiento P- Δ
(1-1.5)

S_a : Aceleración Espectral



W : Peso de la Edificación

Los factores de modificación son mayores que uno y varían hasta 1.5, en función de cada tipo de edificación y sistema estructural.

- **Análisis no lineal**

Puede ser un análisis estático no-lineal (análisis “pushover”) y un análisis dinámico no-lineal (análisis tiempo-historia no lineal). Son especialmente recomendados para edificaciones irregulares.

Por ejemplo el desplazamiento objetivo se calcula como:

$$\delta = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e^2}{4\pi^2} \right) g \quad (5.9)$$

Donde:

T_e : Periodo efectivo que se puede deducir de una relación bilineal
Fuerza- Desplazamiento

C_0 : Factor de modificación relacionado al desplazamiento espectral

C_1 : Factor de modificación relacionado al desplazamiento inelástico
máximo

C_2 : Factor de modificación relacionado a la forma de histéresis.

C_3 : Factor de modificación relacionado al incremento de
desplazamiento P- Δ

S_a : Aceleración Espectral

g : gravedad

Los valores numéricos de los factores C_0 , C_1 , C_2 , C_3 ; varían de 1 a 1.5, en función del número de pisos, sistema estructural y otros.



5.4 PROYECTOS DESARROLLADOS EN JAPON

□ PROYECTO INTEGRAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DEL GOBIERNO JAPONES (1995-1998)

El sistema de Evaluación de Desempeño se ilustra en la Fig. 5.4; cuyas pautas son:

- Selección de ítem o Niveles de Desempeño para evaluar y establecer un Objetivo de Desempeño para cada ítem.
- Verificar si el estado límite de una edificación diseñada es suficiente para resistir la carga y fuerza externa de varios tipos.
- Certificar la evaluación para cada Nivel de Desempeño

Metas De Desempeño Estructural

- **Desempeño Estructural Básico**

Las pautas proporcionan la seguridad, reparabilidad y serviciabilidad como el desempeño estructural básico, que corresponde a la protección de vida, a la protección de propiedad, y funciones y confort. Estos tres Niveles de Desempeño están mutuamente interrelacionados.

- **Ítems de evaluación de desempeño**

Son combinaciones de cinco objetos de evaluación: estructura, elementos de edificación, equipamiento, muebles y suelo; y los tres Niveles de Desempeños básicos (seguridad, reparabilidad y serviciabilidad).



- **Estados límites**

Los estados límites de los items de evaluación de desempeño se denominan: límite de Seguridad, límite de Reparabilidad y límite de Serviciabilidad. Límite de Seguridad se basa en la posibilidad de peligro directo para la vida de la gente en el interior y fuera de la construcción. Límite de Reparabilidad se basa en el grado de daño de la estructura para efectos de reparación y restauración de las mismas. Límite de Serviciabilidad se considera sobre la base de las funciones y confort de la edificación.

- **Carga y fuerza externa**

Se puede considerar como carga muerta, carga viva, carga de nieve, presión de viento, fuerza sísmica, y otras cargas y fuerzas externas o perturbaciones del suelo, temperatura, etc. Las frecuencias de verificaciones de desempeño estructural básico por cargas o fuerzas externas deben ser decididas por el propietario y el diseñador de acuerdo al uso y la importancia de la edificación.

- **Niveles de Desempeño estructural**

Los Niveles de Desempeño estructural, deben ser decididos por el propietario y el diseñador y nunca deben estar por debajo de lo especificado por los códigos. Se expresan como combinaciones de estados límites y fuerza externa. Los factores que deben ser considerados para determinar Niveles de Desempeño son el uso, la importancia, y vida de la edificación.

El Nivel de Desempeño de una edificación ante sismos se ilustra en la Fig. 5.7

La figura muestra líneas CCC, BBB y AAA que corresponden a límite de serviciabilidad, límite de reparabilidad y límite de seguridad, respectivamente; se pueden hacer una serie de combinaciones como: AAA, AAB, ABC, BBA, BBB, CCA, CCB, CCC, etc. La curva esquelética corte-desplazamiento se muestra en la Fig. 5.7(b). Esta figura muestra esquemáticamente la



envolvente de tres edificaciones y su espectro de respuesta contra sismos de intensidades de (a) a (e); las intersecciones representan la respuesta de la estructura y la curva sólida corresponde de arriba hacia abajo a niveles AAA, BBB y CCC de la Fig 5.7(a).

Verificación de desempeño

Se realiza para verificar si las respuestas alcanzan el estado límite en concordancia con los principios de verificación de desempeño. Este principio significa que el valor de respuesta, que expresa la respuesta de la edificación o parte de ella ante fuerza externa apenas debe ser excedido por el valor límite, que es un valor que expresa el correspondiente estado límite. El nivel de Desempeño además se representa por un valor ingenieril cuantitativo. La verificación de desempeño tiene los siguientes pasos:

- ✓ Determinación cuantitativa del valor ingenieril para carga y fuerza externa
- ✓ Determinación del tipo de valor ingenieril para expresar la respuesta y el valor límite
- ✓ Predicción del valor de respuesta
- ✓ Estimación del valor límite
- ✓ Comparación entre la respuesta y valores límites

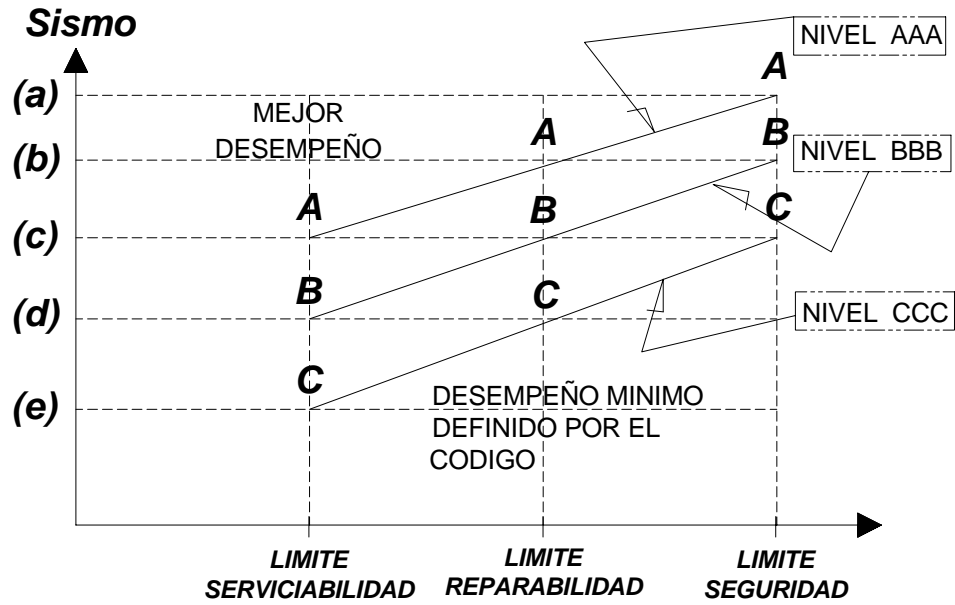


Fig. 5.7 (a) Mapa de Nivel de Desempeño

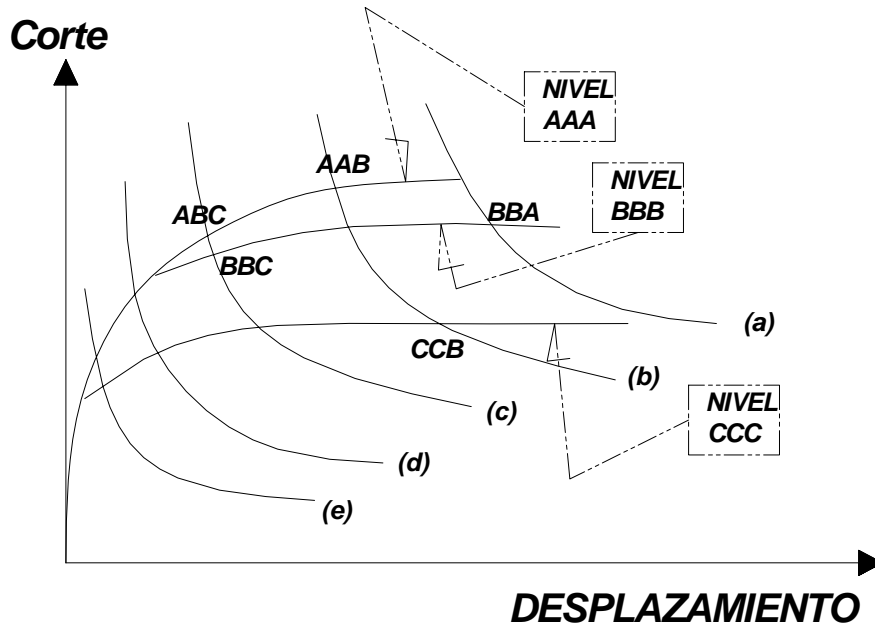


Fig. 5.7 (b) Propiedad corte-desplazamiento y Niveles de Desempeño contra sismo

Fig. 5.7 Diagrama esquemático de Nivel de Desempeño estructural básico contra sismos (ministerio de construcción del Japón, 1998)

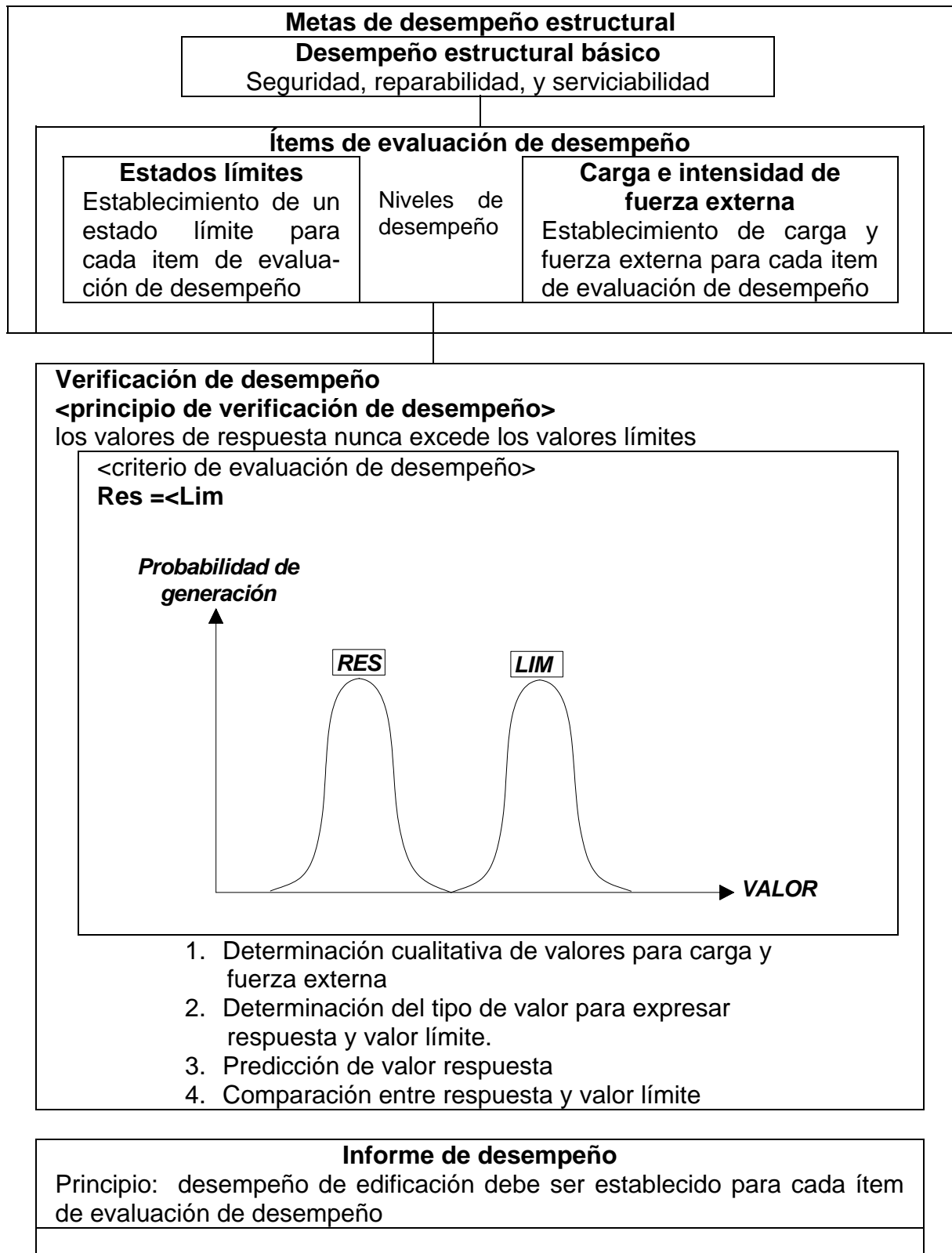


Fig. 5.8 Sistema de Evaluación de Desempeño Estructural



- **Certificación de Desempeño**

Los resultados de la Evaluación del Desempeño estructural y las condiciones supuestas deben ser certificadas. Este informe de certificación debe ser de fácil entendimiento por el público general.

- **MINISTERIO DE CONSTRUCCION DEL JAPON (2000)**

La Evaluación de Desempeño de una estructura se examina por comparación del diagrama de capacidad de la estructura y el espectro de demanda del movimiento sísmico de diseño. La intersección (llamado punto de desempeño) del espectro de demanda para una fracción apropiada de amortiguamiento equivalente y la curva de capacidad representa la respuesta máxima ante el movimiento sísmico de diseño. Este procedimiento se ilustra en la figuras Fig. 5.8 y Fig. 5.9 [33]

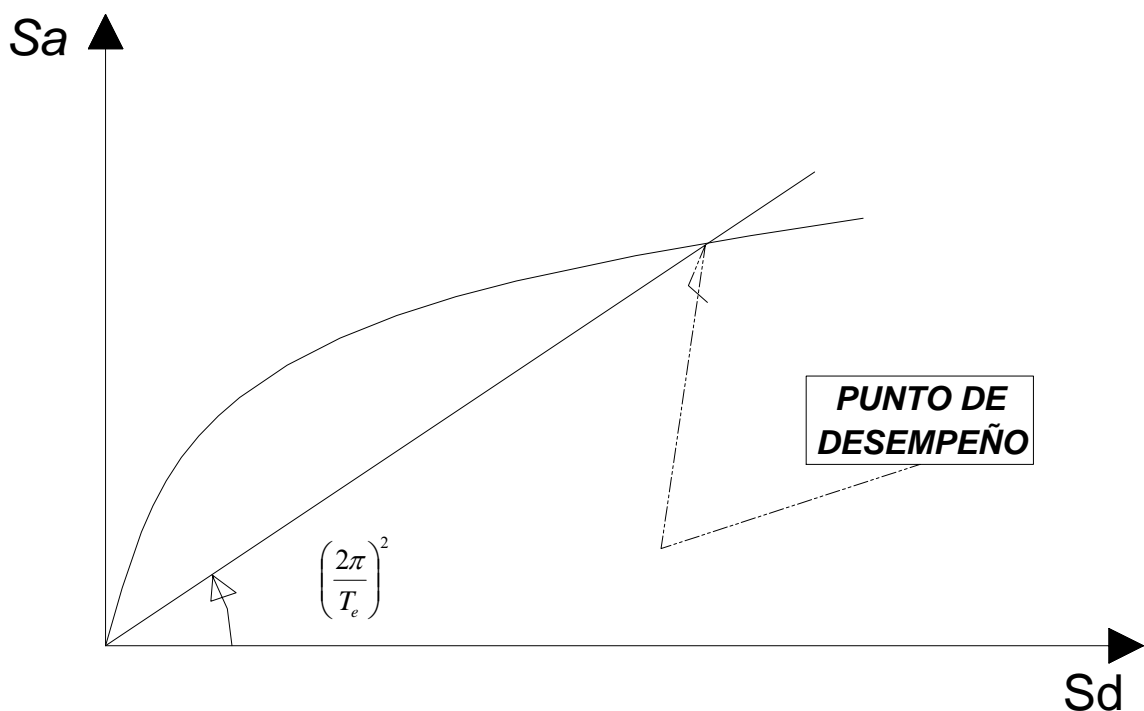


Fig. 5.9 Curva de Capacidad

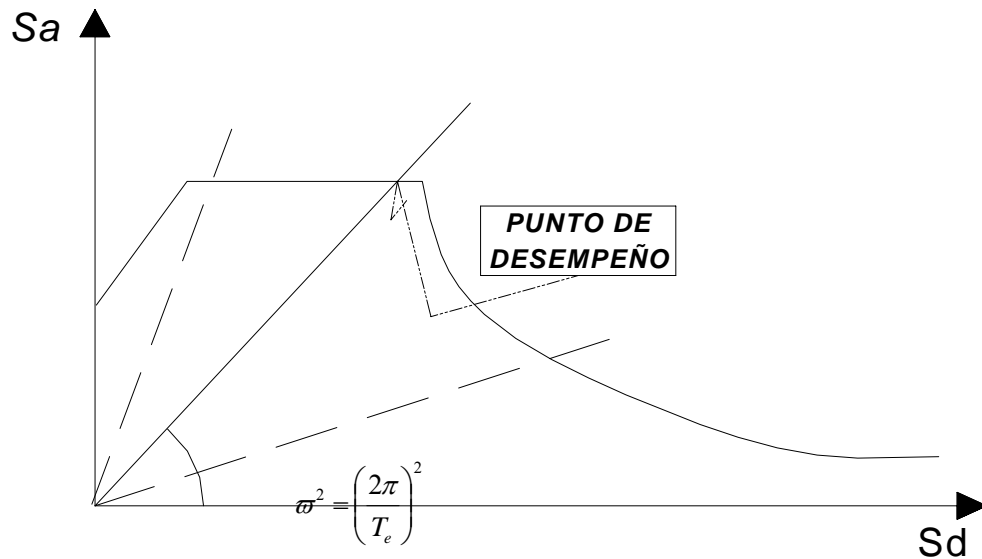


Fig. 5.10 Espectro de Diseño

La Evaluación de Desempeño aún se encuentra en desarrollo; se requieren desarrollar mayores trabajos para convalidar los métodos de diseño planteados. Se puede indicar que la Evaluación de Desempeño basada en el método de espectro de capacidad (ATC-40), el método de coeficiente de desplazamiento (FEMA-273) y método de desplazamiento directo son los que se encuentran mayormente en la literatura. Consideramos que los métodos basados en el método de espectro de capacidad se vienen implementando mayormente e inclusive ya se señala como tal en la norma japonesa. Sin embargo falta establecer procedimientos para volver práctico el diseño, lo que se logrará en la medida que se presenten las ventajas respecto al método convencional.

El método convencional de diseño así como los requerimientos de los códigos de diseño sismorresistente basan su metodología considerando un comportamiento elástico, no considera el comportamiento inelástico que se produce para sismos severos. Los métodos de diseño para la Evaluación de Desempeño difieren de los métodos de diseño convencionales; estos últimos podrían emplearse para el nivel de serviciabilidad o para el Nivel de Desempeño sismorresistente de la obra civil que esté en el rango elástico.



Capítulo 6

ANALISIS DE ACEPTABILIDAD

El Análisis de Aceptabilidad se usa para verificar el diseño adecuado, los Objetivos de Diseño y que los criterios de aceptabilidad se hayan cumplido, el diseño estructural se analiza para comparar los parámetros de respuesta crítica con los valores límites de estos parámetros asociados con los Niveles de Desempeño seleccionados. Los valores límite de varios parámetros de respuesta estructural forman el criterio de aceptabilidad para el diseño. Los parámetros de respuesta son medidos de la respuesta estructural que pueden ser correlacionadas con niveles de daño y con los Objetivos de Desempeño. Los parámetros pueden incluir distorsión, desplazamiento, resistencia, esfuerzos e índices de deformación, demanda de ductilidad, demanda de energía, aceleración y quizás velocidad [4] .

Los efectos de fuerzas y desplazamientos impuestos en varios elementos por la demanda sísmica deben ser verificados por un Análisis de Aceptabilidad para el Nivel de Desempeño seleccionado. Estos criterios de aceptabilidad generalmente son categorizados por material. También se puede estimar un costo para la revisión de la aceptabilidad económica del diseño.

Los criterios de aceptabilidad para rehabilitación de edificaciones son definidos para cada material (acero, concreto armado, mampostería, madera); y se definen como los valores permisibles de cada propiedad como distorsión y deformación inelástica empleada para determinar la aceptabilidad de un desempeño proyectado en un Nivel de Desempeño dado [32].

6.1 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE ACEPTABILIDAD DEL SEAOC (1995)

Presenta procedimientos de Análisis de Aceptabilidad para que se desarrolle e implemente en el Diseño por Desempeño. Dichos procedimientos recomendados se describen brevemente a continuación.



- **Procedimiento de Análisis Elástico**

La mayoría de códigos de diseño sísmico están basados en los procedimientos de análisis elástico. Incluyen procedimientos de diseño estático y dinámico: análisis de fuerzas laterales equivalentes, análisis espectral, análisis modal, análisis tiempo-historia elástico. Sin embargo el análisis numérico no puede ser confiable por la naturaleza inelástica de la respuesta sísmica. Son apropiados para el nivel de Operatividad Completa, el cual se define en la respuesta elástica.

- **Procedimiento de Análisis Elástico Basado en la Respuesta de los Componentes**

Es una extensión del procedimiento de análisis lineal. Pueden ser aplicados como una medida de la demanda de ductilidad sobre cada componente. Los índices de demanda inelásticos son calculados como la fracción de la demanda de resistencia por el análisis elástico respecto a la capacidad de fluencia de los elementos individuales. Estas razones son tomadas como una medida de demanda de ductilidad producida por el sismo de diseño en varios elementos de la estructura. Sin embargo, este procedimiento no provee una buena indicación de la real distribución de la demanda inelástica si la estructura no tiene distribución uniforme de rigidez y resistencia o si tiene irregularidades torsionales. El sismo de diseño puede ser representado por un espectro de respuesta inelástica o un espectro de respuesta elástica estándar factorado para tener en cuenta los efectos del comportamiento inelástico.

- **Método del Espectro de Capacidad**

Este método compara la capacidad inelástica de una estructura con la del espectro de diseño que representa el movimiento sísmico. Como un



procedimiento de aceptabilidad, las curvas de espectros de capacidad son comparadas con la curva de demanda para un sismo. Si la curva de capacidad cruza la curva de demanda, el diseño es aceptable.[4]

Se debe señalar que este método fue desarrollado por Freeman (1998) y en la actualidad su empleo inclusive ya está reglamentado en el código japonés [33], La demanda sísmica es expresada en términos de una serie de espectros de respuesta con aceleración en el eje vertical y desplazamiento en el eje horizontal. El periodo es determinado por líneas radiales desde el origen. Esta conveniente representación permite que la demanda y la capacidad (expresada como una curva pushover) sea dibujada en el mismo gráfico. Se requiere alguna manipulación en la curva “pushover” para transformarla en un modelo equivalente de un grado de libertad. El procedimiento requiere de un apropiado nivel de amortiguamiento elástico equivalente que se determina sobre la base de la demanda de ductilidad.[29]

Este método integra la capacidad de fuerza-desplazamiento global de la estructura con la demanda sísmica. El procedimiento compara la capacidad y demanda para definir un “punto de desempeño”, que representa la condición para la cual la capacidad es igual a la demanda.

Es decir el punto de desempeño es una localización de la curva de capacidad donde la demanda de ductilidad de desplazamiento es igual a la capacidad de ductilidad de desplazamiento de la estructura.

El procedimiento aproxima este punto iterativamente. [23]. La ilustración gráfica se puede ver en la Fig. 6.1

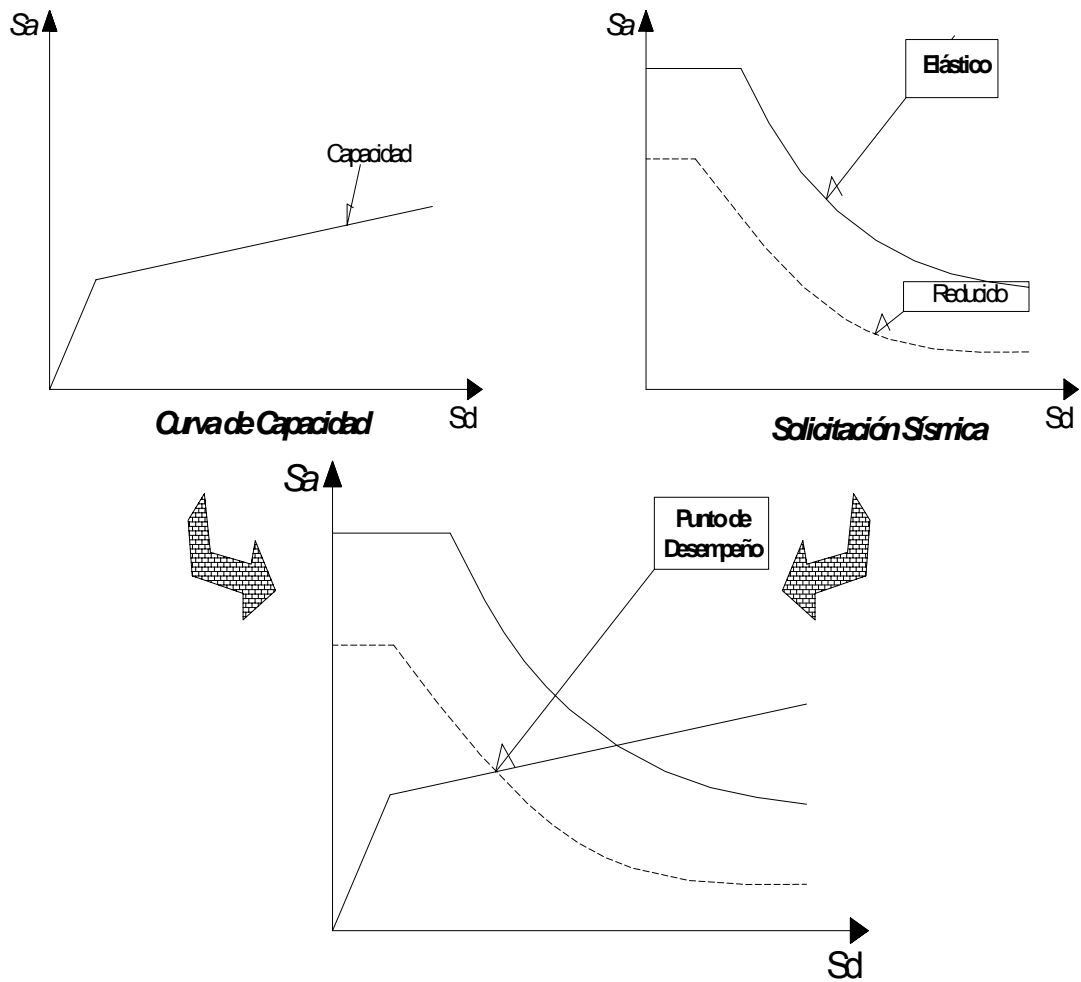


Fig. 6.1 Ilustración del Método de Espectro de Capacidad

- **Métodos de Análisis Estático Incremental**

Son técnicas usuales para estudiar la respuesta no lineal de una estructura, como la secuencia de fluencia de los elementos estructurales ante incremento de fuerzas. Una forma popular es usando fuerza estática incremental en una distribución triangular la cual rastrea el comportamiento



de la edificación en el incremento del desplazamiento. Este método no toma en cuenta la distribución de fuerza debido a la fluencia progresiva de pisos blandos ni modos altos o efectos tridimensionales tales como torsión. Pese a estas limitaciones el enfoque simplificado es usual en una verificación de aceptación para edificaciones de altura limitada y configuración regular que pueden ser diseñadas por el método de fuerza lateral equivalente. La estructura elástica se sujeta a una evaluación del espectro de respuesta, se determina el corte en la base y el desplazamiento de entrepiso. El modelo lineal elástico se modifica con rótulas plásticas para los elementos que han fluido. El proceso se repite; para cada iteración la estructura se rastrea para la iniciación de la inestabilidad global. Se considera que va a ocurrir inestabilidad si se excede la ductilidad rotacional de algún elemento estructural.

- **Análisis Dinámico Tiempo-Historia no Lineal**

Es la técnica de análisis más sofisticada disponible para modelar una edificación e investigar sus respuestas dinámicas. El procedimiento consiste en una solución paso por paso a través del dominio de tiempo para la respuesta dinámica de una estructura para un movimiento tiempo historia seleccionado. Requiere uso de sofisticados programas de computadora. El modelo estructural refleja el comportamiento elástico y post-elástico de los materiales y debe incluir participación del componente no estructural significativo y la interacción suelo-estructura.

- **Análisis del Espectro de Capacidad de Distorsión**

El efecto del sismo en Northridge y otros sismos en un campo cercano han demostrado que la demanda estructural puede ser significativamente diferente en un campo cercano que en un área remota. Se ha sugerido que este fenómeno de campo cercano puede ser representado por una nueva medida, el espectro de demanda de distorsión (Iwan, 1994),



En este método, la distorsión del entrepiso es graficada como una función de la altura o número de pisos para diferentes niveles de amortiguamiento basado sobre estudios de análisis paramétricos.

El espectro de demanda de distorsión puede ser usado para determinar los requerimientos de amortiguamiento, demanda de distorsión y requerimientos de separación de edificaciones para estructuras estandar o requerimientos de capacidad de distorsión para estructuras con aislamiento en la base [4].

El método fue propuesto por Iwan y Huang (1998), es muy similar al método del espectro de capacidad. La mayor diferencia está en el espectro de respuesta, para este método se emplea el “espectro de distorsión”. El espectro nuevo es calculado aplicando la teoría de propagación de onda para un modelo de viga de corte elástico y es establecido para calcular la deformación local en lugar de desplazamiento de entrepiso de una estructura (Iwan, 1997)[23].

6.2 LIMITES DE ACEPTABILIDAD DEL ATC-40 (1996)

La respuesta límite se clasifica en dos categorías:

- **Límites de aceptabilidad global**

Estos requerimientos incluyen capacidad de fuerza vertical, resistencia de carga lateral, y distorsión lateral.

La capacidad de carga de gravedad de la edificación permanece intacta para un desempeño aceptable en cualquier nivel. En los elementos o componentes donde se perdió la capacidad de carga de gravedad, la estructura debe ser capaz de redistribuir carga a otros elementos o componentes existentes o adaptar el sistema. Algunos componentes están sujetos a degradación por ciclos múltiples de carga, entonces cuando el número de componentes degradados es mayor se puede afectar la resistencia a carga lateral de la edificación.



Esta resistencia incluyendo la resistencia a las fuerzas de gravedad a través de desplazamientos laterales, no debe ser degradada más del 20% de la resistencia máxima de la estructura. Los desplazamientos laterales relativos del punto de desempeño se deben verificar contra los límites de deformación.

Se presentan los valores en la Tabla 6.1 para los límites de deformación. La distorsión total máxima se define como la distorsión de entrepiso en el desplazamiento del punto de desempeño.

La distorsión inelástica Máxima se define como la porción del desplazamiento máximo después del punto de fluencia efectivo.

Tabla 6.1 Deformaciones límites

	Nivel de Desempeño			
Límite de distorsión de entrepiso	Ocupación inmediata	Control de daño	Seguridad de vida	Estabilidad estructural
Distorsión total máxima	0.01	0.01 - 0.02	0.02	$0.33V_i/P_i$
Distorsión inelástica máxima	0.005	0.005 - 0.015	No limita	No limita

- **Límites de Aceptabilidad de Componentes y Elementos Estructurales**

Cada componente (pórtico, muro, diafragma o cimentación) se verifica si cumple con los límites de aceptabilidad.



La resistencia de demanda en el punto de desempeño no debe exceder las resistencias establecidas para acciones de deformación-controlada. Los parámetros que no deben ser excedidos se dá en las tablas del Apéndice y, la siguiente figura Fig 6.2 presenta la relación generalizada para componentes fuerza-deformación.

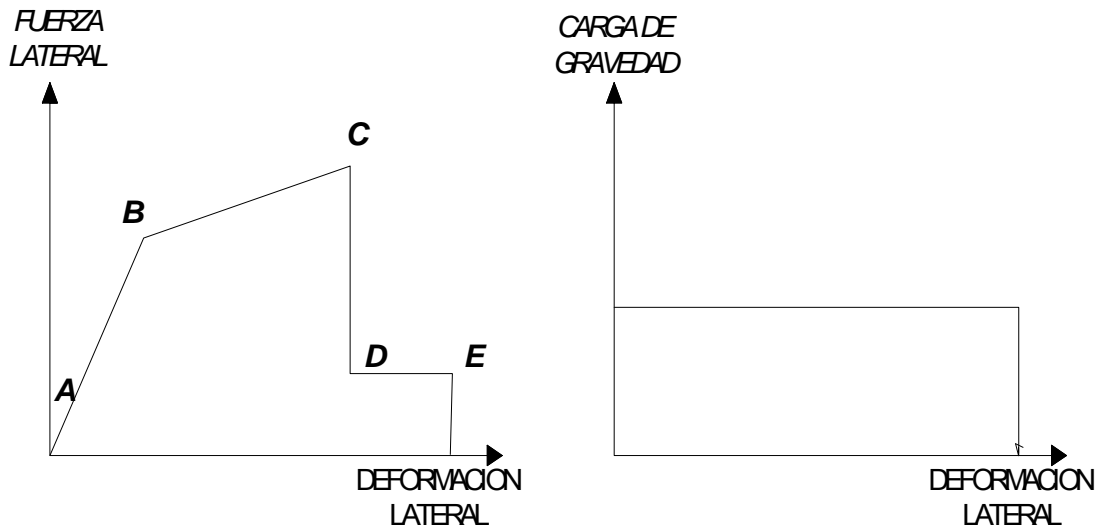


Fig. 6.2 Relaciones Fuerza-Deformación generalizada

Las deformaciones de los componentes calculadas no deben exceder deformaciones límites para niveles de desempeño apropiado. El criterio para establecer criterios de aceptabilidad para deformación es: la capacidad de deformación del componente en el nivel de desempeño Estabilidad Estructural es definido como la deformación para la cual la resistencia a carga lateral empieza a degradarse. La capacidad de deformación en el nivel de desempeño Seguridad de Vida es el 75% de la deformación de Estabilidad Estructural. Se ilustra en la Fig. 6.3

También proponen como alternativa usar datos de ensayos experimentales. Cuando los límites de aceptabilidad no se cumplen, es necesario redefinir el objetivo de desempeño o adaptar la edificación.

6.3 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD DEL FEMA - 273 (1997)

Para el propósito de evaluación de la aceptabilidad, las acciones se categorizan como: deformaciones-controladas o fuerzas-controladas.

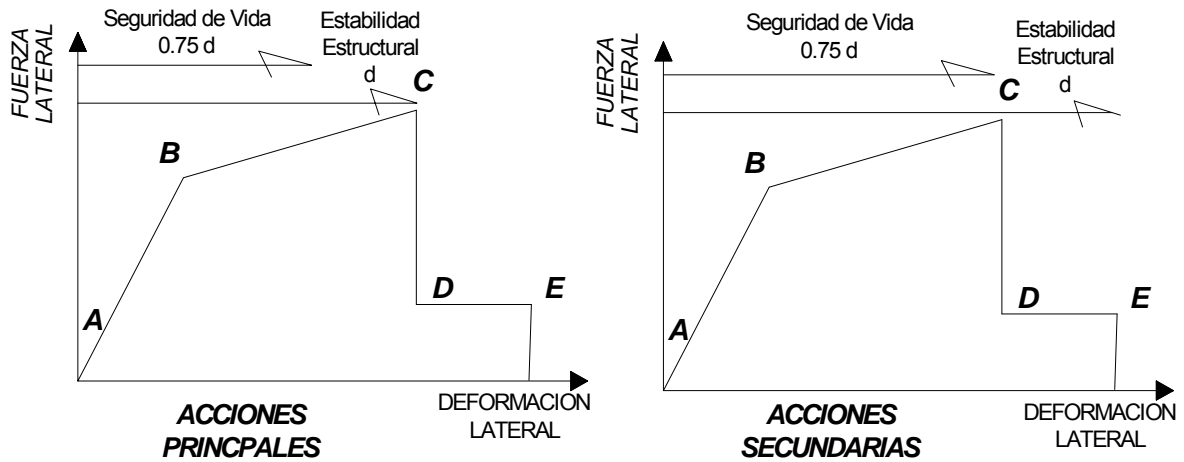


Fig. 6.3 Criterio de Aceptabilidad Fuerza-Deformación típico (componentes y elementos estructurales).

- **Criterios de aceptabilidad para procedimientos lineales**

a.- Acciones de Deformación-Controlada. Debe satisfacer la ecuación

$$mkQ_{CE} \geq Q_{UD} \quad (6.1)$$

donde:

m : Componente o elemento de demanda modificado teniendo en cuenta la ductilidad esperada de la deformación asociada con esta acción en el nivel de desempeño seleccionado.

K :Factor de conocimiento (mínimo: 0.75; amplio: 1.00)

Q_{CE} :Resistencia esperada del componente o elemento en el nivel de deformación considerando acciones de deformación controlada.

Q_{UD} :Acciones de diseño debido a las fuerzas de gravedad y fuerzas de sismo.

b.- Acciones de Fuerza-Controlada.- Debe satisfacer la ecuación

$$kQ_{CL} \geq Q_{UF} \quad (6.2)$$



donde:

Q_{CL} :resistencia más baja del componente o elemento de demanda en el nivel de deformación considerando acciones de fuerza-controlada.

Q_{UF} : acciones de diseño debido a las fuerzas de gravedad y fuerzas de sismo.

- **Criterios de Aceptabilidad para Procedimientos No- Lineales**

Los componentes primarios y secundarios tienen una capacidad esperada no menor que las deformaciones o fuerzas máximas. Las capacidades deben ser determinadas considerando todas las fuerzas y deformaciones.

El comportamiento de los diferentes tipos de componentes se puede visualizar en la Fig. 6.4; donde: La curva tipo 1 es para un comportamiento típico dúctil, donde se define el rango elástico (0-1), el rango plástico incluyendo endurecimiento (1-2) y el rango de resistencia degradada (2-3).

La curva tipo 2 es para un comportamiento poco dúctil. Y la curva tipo 3 para un comportamiento frágil o comportamiento no dúctil. Para algunos componentes es conveniente describir los criterios de aceptabilidad en términos de deformación o razón de deformación. Los valores numéricos de las fracciones de deformación se dá para cada tipo de componente y elemento.

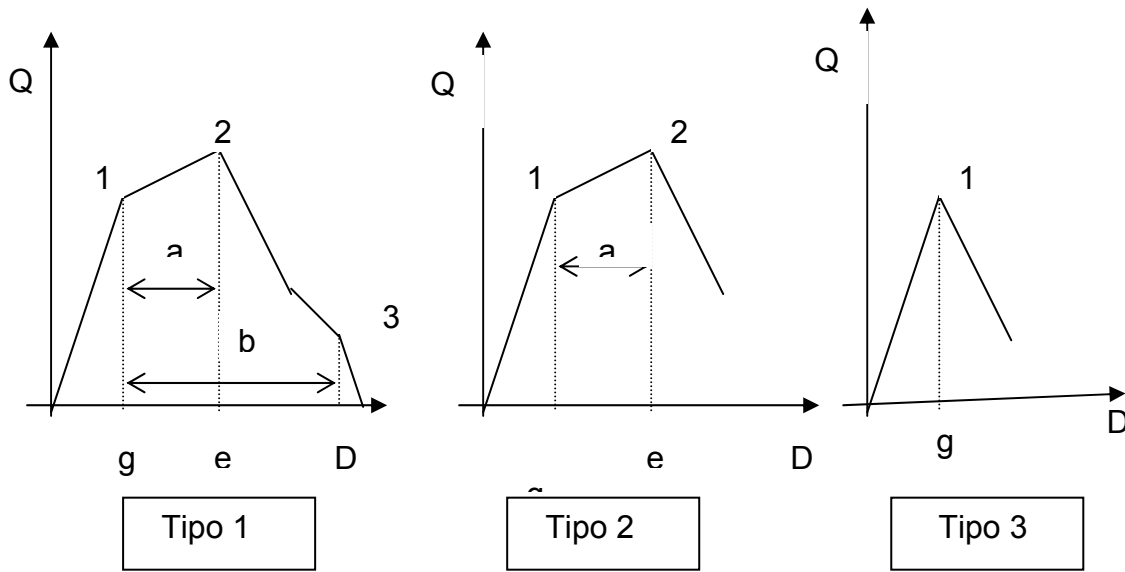


Fig. 6.4 Curvas Generalizadas de Comportamiento de Componentes Estructurales

6.4 PROYECTOS DESARROLLADOS EN JAPON

Los criterios recomendados por algunos consultores privados japoneses respecto al análisis de aceptabilidad se pueden apreciar en las tablas 6.2, 6.3 y 6.4 [31].



Tabla 6.2 Metas de control de daño para estructuras de concreto y estructuras de concreto armado y acero

Nivel de Desempeño	Límite de daño en edificación y miembro estructural
Conserva Función Ningún daño	Desplazamiento residual no sustancial Fisura máxima de ancho 2 mm no tan visible excepto en observaciones cercanas o detalladas
Conserva función completa Daño ligero	Deformación plástica no sustancial en principales miembros estructurales Fisuras visibles con ancho 0.2mm a 1mm
Conserva función limitada Daño en escala pequeña	Mayoría de miembros estructurales no alcanzan su resistencia última Grandes fisuras 1mm a 2mm pero la salida de concreto es limitada.
Seguridad de vida Daño a escala promedio	Se mantiene la capacidad de soporte de carga vertical, se observa desplazamientos residuales o inclinaciones No hay ruptura o colapso parcial pero algunos miembros alcanzan sus resistencia última. Se necesita reparación de inmediato. Fisuras grandes mayores de 2mm de ancho



Tabla 6.3 Criterios para parámetros de diseño para estructuras de concreto y estructuras de concreto armado y acero

Nivel de Desempeño	Conserva funciones			Conserva mayoría de funciones			Conserva funciones limitadas			Seguridad de vida		
	Aportic.	Mixtas	Muros	Aportic.	Mixtas	Muros	Aportic.	Mixtas	Muros	Aportic.	Mixtas	Muros
Distorsión	1/200	1/250	1/300	1/120	1/150	1/200	1/100	1/120	1/150	1/80	1/100	1/120
Corte	No más que resistencia de fluencia			No más que última resistencia			No más que última resistencia			Ningún límite		
Ductilidad	1			1.5			2			3		

Tabla 6.4 Criterios para parámetros de diseño para estructuras de acero

Nivel de Desempeño	Conserva funciones	Conserva mayoría de funciones	Conserva funciones limitadas	Seguridad de vida
Distorsión	1/150	1/100	1/100	-
Fracción de deformación inelástica acumulada	0	1/4	1/2	-

6.5 ANALISIS DE ACEPTABILIDAD DE FEMA-350 (2000)

Para cada Nivel de Desempeño se especifica criterios de aceptabilidad. La aceptabilidad del desempeño estructural es evaluada considerando desempeño local (nivel de elemento) y desempeño global. Los criterios de aceptabilidad han



sido desarrollados sobre la base de confiabilidad, incorporando demanda y factores de resistencia relacionados a la incertidumbre inherente al proceso de evaluación y variación inherente a la respuesta estructural, cada nivel de confianza puede ser establecido considerando la habilidad de la estructura para proveer desempeño específico en una probabilidad de excedencia seleccionada. Se describen los procedimientos de análisis y análisis de aceptabilidad, en los párrafos siguientes.

Aceptabilidad del desempeño de una edificación debe ser evaluado por determinación de un nivel de confianza en la habilidad de la estructura para cumplir con los objetivos de desempeño trazados. Los parámetros que se indican en la tabla 6.5 pueden ser independientemente evaluados, usando diversos procedimientos y parámetros y criterios de aceptación, para cada objetivo de desempeño evaluado.

Tabla 6.5 Parámetros de Desempeño que Requieren Evaluación de Confianza

PARAMETROS	DISCUSION
Distorsión de entrepiso	La máxima distorsión para cualquier nivel de la estructura se evalúa para comportamiento local y comportamiento global (para prevención de colapso y habitabilidad inmediata)
Carga Axial en Columna	La resistencia de la columna es calculada para la demanda de compresión máxima, podrá ser evaluada para prevención de colapso y ocupación inmediata.
Tracción en Columna	La resistencia de la columna debe ser calculada para la demanda de tracción máxima para prevención de colapso y habitabilidad inmediata



El nivel de confianza se evalúa a través de la evaluación de la razón factorada demanda–capacidad dada por la ecuación:

$$\lambda = \frac{\gamma \cdot \gamma_a D}{\phi C} \quad (6.3)$$

Donde:

- C : Capacidad de la estructura para cada parámetro antes indicado
- D : Demanda calculada para la estructura, obtenida del análisis estructural
- γ : Factor de variabilidad de demanda que toma en cuenta la variabilidad inherente en la predicción de la demanda relacionada a las hipótesis hechas en el modelo estructural y la predicción de carácter del movimiento.
- γ_a : Un factor de incertidumbre de análisis que toma en cuenta el sesgo e incertidumbre, inherente en el procedimiento analítico específico usado para estimar la demanda como una función de la intensidad de movimiento.
- ϕ : factor de resistencia que se cuenta por la incertidumbre y variabilidad, inherente en la predicción de la capacidad estructural como una función de la intensidad del movimiento.
- λ : Un parámetro de índice de confianza del cual se obtiene un nivel de confianza.

No existe uniformidad en los trabajos de investigación señaladas respecto a la definición de la Análisis de Aceptabilidad; cada grupo de trabajo recomienda límites de aceptabilidad de acuerdo al resultado de sus ensayos; sin embargo se aprecia que el desplazamiento es uno de los parámetros de respuesta estructural principal para definir la aceptabilidad del diseño.



En nuestro medio, para el diseño convencional y con los requerimientos actuales de la norma E-030, el desplazamiento relativo de entrepiso es el criterio de aceptabilidad.



Capítulo 7

PROPUESTA DE INCORPORACION DEL DISEÑO POR DESEMPEÑO EN LA NORMA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

Existe una tendencia cada vez más creciente en el mundo respecto a la incorporación en los códigos de diseño sismorresistente del Diseño por Desempeño.

En tal sentido, consideramos necesario que se debe desarrollar e implementar el Diseño por Desempeño en el Perú, así como se debe incorporar gradualmente en la Norma Técnica de Edificación E-030 "Diseño Sismorresistente".

Por otro lado, la metodología o filosofía del Diseño por Desempeño puede abarcar a todas las obras civiles (no sólo edificaciones).

7.1 MARCO DE DESARROLLO

La estructura o marco de desarrollo del Diseño por Desempeño que se viene desarrollando es integral; se formula desde la etapa de proyecto hasta de la etapa de mantenimiento; como se ilustra en la Fig. 7.1.

7.1.1 ETAPA DE PROYECTO

Es una etapa exclusivamente de concepción y desarrollo del diseño sismorresistente de una obra civil. Los elementos básicos que se definen en esta etapa son: Objetivos de Desempeño, Evaluación de Desempeño y Análisis de Aceptabilidad.

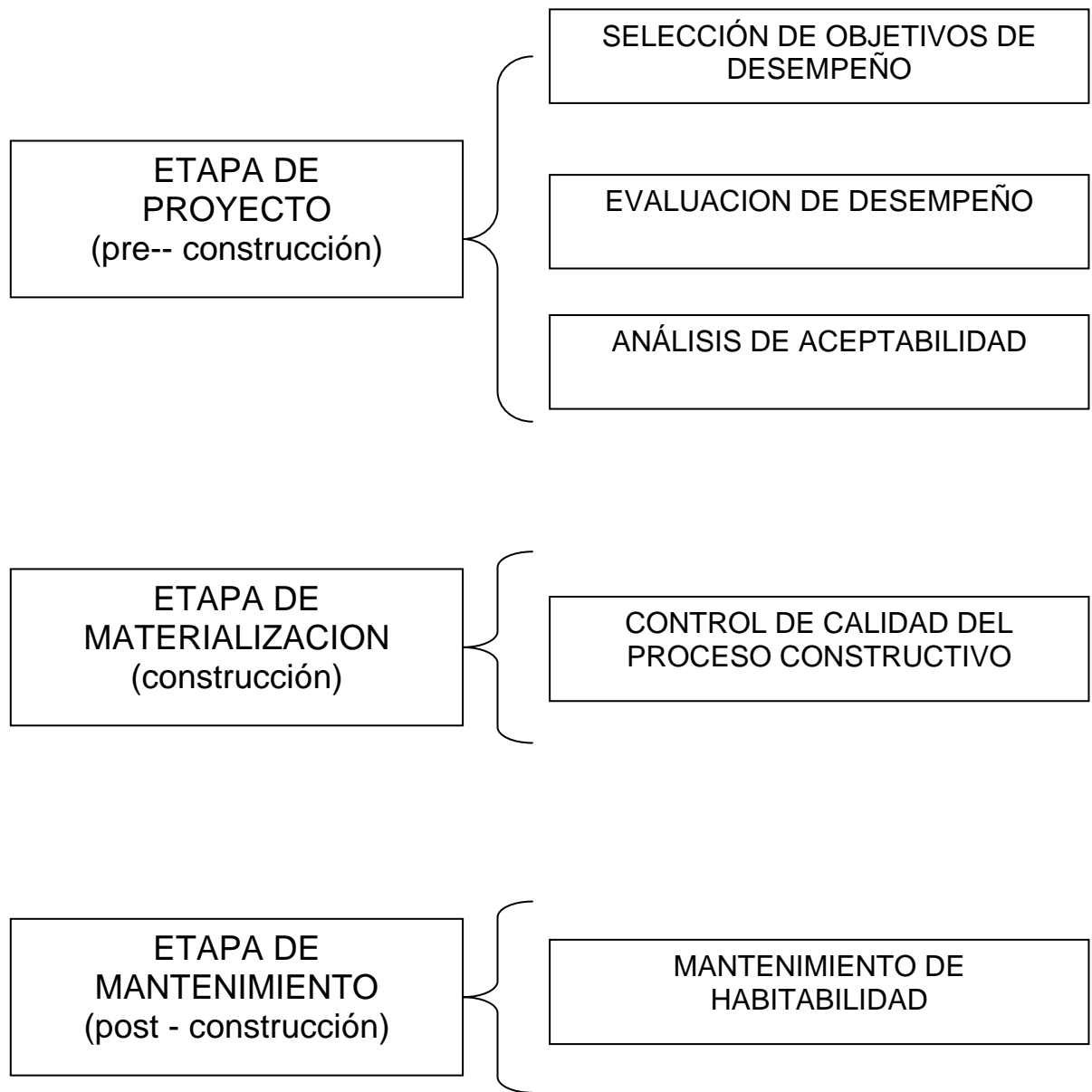


Fig. 7.1 Marco de Desarrollo del Diseño por Desempeño



✓ Selección de Objetivos de Desempeño

Esta selección constituye el primer paso. En su definición participa en forma directa y decisiva los ocupantes. Entiéndase por ocupante a los propietarios, a los usuarios o consumidor.

✓ Evaluación del Desempeño

Es necesario plantear un procedimiento de Evaluación de Desempeño sismorresistente de una obra civil para alcanzar los Objetivos de Desempeño escogidos.

✓ Análisis de Aceptabilidad

Se requiere de un Análisis de Aceptabilidad para comprobar que el procedimiento de Evaluación de Desempeño o diseño sismorresistente de una obra civil satisface los Objetivos de Desempeño seleccionados.

7.1.2 ETAPA DE MATERIALIZACION

Es la etapa de construcción del diseño sismorresistente de la obra civil, en tal sentido el criterio principal es el control de calidad del proceso constructivo.

Consideramos que se requiere educar respecto a la metodología o filosofía del Diseño por Desempeño a todos los participantes en el equipo diseño/construcción, incluyendo arquitectos, ingenieros estructurales, geotécnicos, mecánicos y electricistas, todas las entidades de construcción, y también a los ocupantes.

7.1.3 ETAPA DE MANTENIMIENTO

Es la etapa de mantenimiento por excelencia cuyo propósito es asegurar que se mantenga las características de la obra civil durante el periodo de diseño o su vida útil.



7.2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO POR DESEMPEÑO

A continuación se presenta el procedimiento general del Diseño por Desempeño, como se ilustra en la Fig. 7.2.

1. Definición del Nivel de Desempeño
2. Definición del Sismo de Diseño
3. Selección de los Objetivos de Desempeño.

Los Objetivos de Desempeño están en función a los Niveles de Desempeño y Sismo de Diseño y sobretodo en función a las expectativas de los ocupantes de la obra civil; que se resumen como:

- El Objetivo de Desempeño debe ser de fácil entendimiento para los ocupantes.
- El Objetivo de Desempeño influye directamente en el costo de construcción de la obra civil.
- Los ocupantes de la obra civil tienen corresponsabilidad en la selección del Objetivo de Desempeño

4. Evaluación del Desempeño o definición del método de diseño sismorresistente de la obra civil.
5. Análisis de Aceptabilidad de los resultados del método de diseño sismorresistente de la obra civil.
6. Certificación del desempeño sismorresistente de la obra civil.
7. Control de Calidad del procedimiento constructivo.
8. Mantenimiento y Habitabilidad de la obra civil.

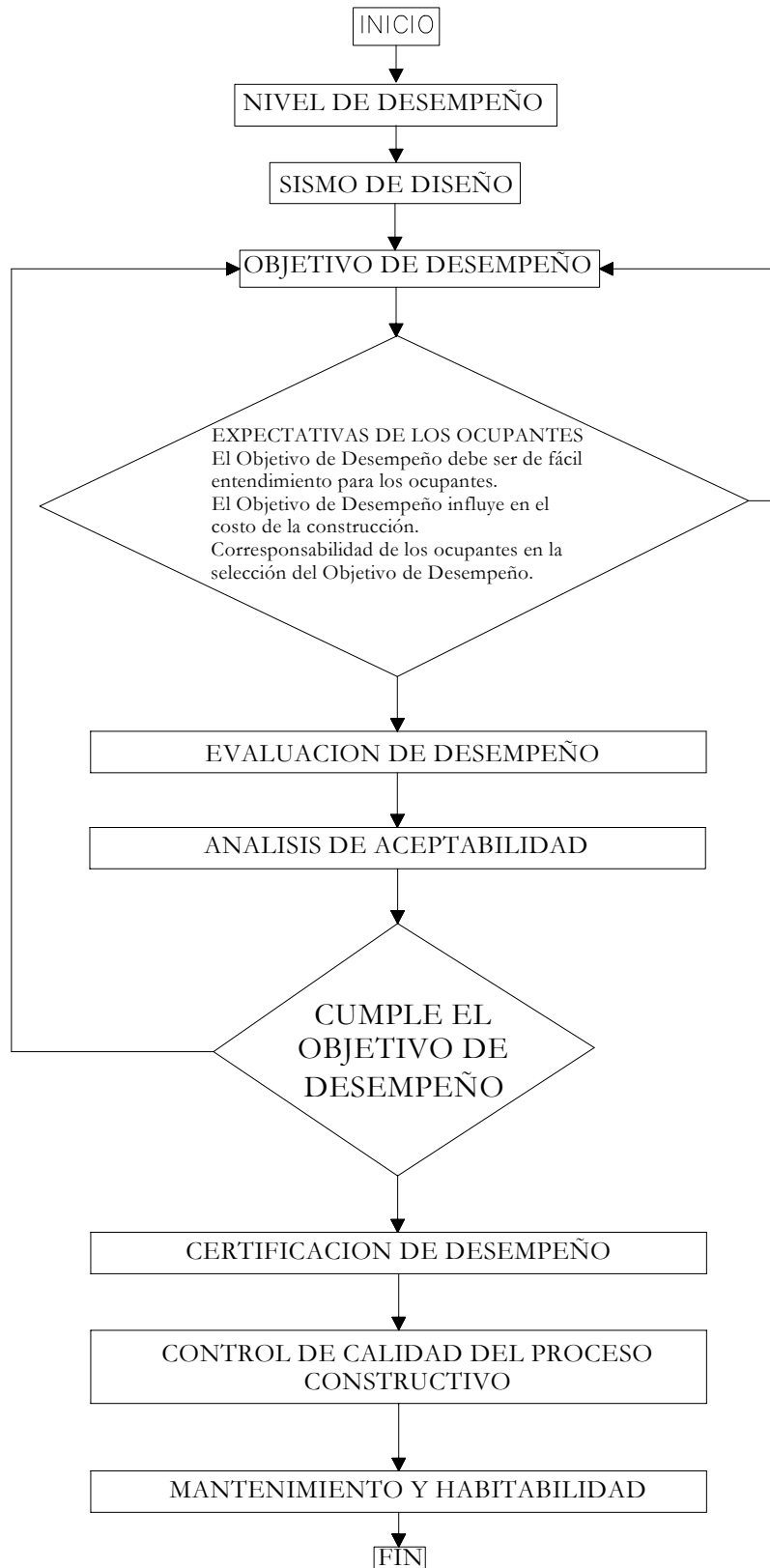


Fig. 7.2 Metodología del Diseño por Desempeño



7.3 NIVELES DE DESEMPEÑO

La filosofía general de la mayoría de códigos de diseño sismorresistente del mundo, consiste principalmente en:

- Resistir sismos leves sin daño
- Resistir sismos moderados considerando la posibilidad de daños estructurales leves.
- Resistir sismos severos con posibilidad de daños estructurales importantes, evitando el colapso de la edificación.

Los rangos de daño en la definición anterior son: sin daño, daño leve y daño importante.

Nuestra norma E-030 (2001) en el acápite 1.2 define Filosofía y Principios de diseño sismorresistente como:

La filosofía del diseño consiste en:

- Evitar pérdidas de vidas.
- Asegurar continuidad de los servicios básicos.
- Minimizar los daños a la propiedad.

Se reconoce que dar protección frente a todos los sismos no es técnicamente ni económicamente factible para la mayoría de estructuras. En concordancia con tal filosofía se establece los siguientes principios para el diseño:

- a) La estructura no deberá colapsar, ni causar daños graves a las personas debido a movimientos sísmicos severos que puedan ocurrir en el sitio.
- b) La estructura debería soportar movimiento sísmico moderados que puedan ocurrir en el sitio durante su vida útil de servicio, experimentando posibles daños dentro límites aceptables.

Los rangos de daño en la definición anterior son: daño grave y daño aceptable.

Por otro lado, los rangos de daño en las definiciones de los diferentes grupos de investigación señaladas en el capítulo 4 son: insignificante, ligero, moderado, severo.

En tal sentido, se plantea tres Niveles de Desempeño (Habitabilidad Inmediata, Reparabilidad y Prevención del Colapso); en función a los rangos de daño que



una obra civil puede sufrir ante un evento sísmico, tal como se encuentran resumidas en las Tablas 7.1 y 7.2.

□ HABITABILIDAD INMEDIATA

Definida como la condición de daño post sismo, en la cual la obra civil recibe luz verde para ser habitada inmediatamente. El rango de daño se define de insignificante a ligero.

Daño insignificante implica que la serviciabilidad es continua; dado que la obra civil se encuentra sin daño.

Daño ligero implica que la serviciabilidad puede reiniciarse inmediatamente, dado que la obra civil tiene daño leve. Los servicios públicos no experimentan interrupción en su servicio.

□ REPARABILIDAD

Definida como la condición de daño post sismo, en la cual la obra civil permanece en pie y estable. El rango de daño se define de moderado a importante.

Daño moderado, implica que se requieren algunas reparaciones de los elementos estructurales.

Daño importante, implica que la serviciabilidad total de la obra civil es posible luego de ejecutar reparaciones.

Tabla 7.1 Definición de Rangos de Daño

Filosofía de Diseño Sismorresistente	Norma peruana E-030 (2001)	Diversos grupos de investigadores (Cap. 4)	PROPUESTA DE NIVEL DE DESEMPEÑO
Sin daño	Daño aceptable	Insignificante	HABITABILIDAD INMEDIATA
Daño leve		Ligero	
Daño importante	Daño grave	Moderado	REPARABILIDAD
		Severo	PREVENCION DEL COLAPSO



Tabla 7.2 Niveles de Desempeño

RANGO DE DAÑO	NIVELES DE DESEMPEÑO DEFINIDOS POR DIVERSOS GRUPOS DE INVESTIGACION									PROPUESTA
	SEAOC (1995)	ATC-40 (1996)	FEMA-273 (1997) / ATC 33.03 (1995)	ISO 3010	U.S.A. Army (2000)	R & D (1998)	FEMA -350 (2000)	Yamawaki, Kitamura (2000)	COD. JAPON (2001)	
INSIGNIFICANTE	Operatividad Completa	Operatividad	Operatividad	Serviciabilidad	Ocupación Inmediata	Serviciabilidad	Ocupación Inmediata	Funcionalidad completa	Control de Daño	HABITABILIDAD INMEDIATA
LIGERO	Operatividad	Ocupación Inmediata	Ocupación Inmediata					Funcionalidad Parcial		
MODERADO	Protección de Vida	Protección de Vida	Protección de Vida	Ultimo	Salida Segura	Reparabilidad	Funcionalidad Limitada	Protección de Vida	Seguridad	REPARABILIDAD
					Protección de Vida	Seguridad				
SEVERO	Cerca del Colapso	Estabilidad Estructural	Prevención del Colapso			Prevención del Colapso				PREVENCIÓN DEL COLAPSO



□ PREVENCIÓN DEL COLAPSO

Definida como la condición de daño post sismo, en la cual la obra civil permanece en pie. El rango se define como daño severo, estado en el cual ha ocurrido daño estructural significativo de la obra civil que está al borde del colapso parcial.

7.4 SISMO DE DISEÑO

El Sismo de Diseño se define en función al peligro sísmico. La peligrosidad sísmica representa la probabilidad de ocurrencia, dentro de un periodo específico de tiempo y dentro de un área dada, de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad determinada [51]. También se refiere a la distribución probabilística de cualquier efecto derivado de la ocurrencia de un sismo como: movimiento o sacudimiento del suelo, licuefacción, deslizamientos, hundimientos y otros peligros potenciales, como se indica en la Tabla 7.3. Sin embargo, se debe precisar que el movimiento o sacudimiento del suelo es la causa de más daño.

Tabla 7.3 *Parámetros de Peligro Sísmico*

Peligro	Parámetro
Movimiento	Aceleración efectiva pico Espectro de respuesta elástica Espectro de respuesta inelástica Registro tiempo historia
Licuefacción	Capacidad portante permisible Asentamiento diferencial vertical esperado Desplazamiento de suelo lateral esperado
Avalancha	Desplazamiento de suelo lateral y vertical esperado
Asentamiento	Asentamiento diferencial esperado
Ruptura	Movimiento vertical y horizontal esperado



La evaluación de peligro sísmico se efectúa por medio de métodos deterministas y probabilistas; ambos consideran la sismicidad como un fenómeno estacionario, y suponen que los sismos que ocurrirán en el futuro serán de las mismas características que en el pasado [59].

Los métodos deterministas analizan la sismicidad de cada zona sismogénica con el objeto de estimar el máximo sismo potencial que se pueda esperar en cada una de ellas. Este es único terremoto considerado en el análisis y se acepta que volverá a repetirse en el futuro. En la actualidad estos métodos no están muy difundidos.

Los métodos probabilistas parten del conocimiento de la sismicidad pasada para deducir las leyes estadísticas que regirán la actividad sísmica futura. Para la simulación de sismos generados en el tiempo se realizan mediante modelos estadísticos como los de Poisson (sismos espacial y temporalmente independientes...); y Markov. En la actualidad estos métodos se encuentran ampliamente difundidos.

Cornell en 1968 evalúa probabilísticamente el peligro sísmico, considerando la aleatoriedad de la ocurrencia de terremoto en el espacio y el tiempo; el método fue modificado e implementado en el programa Risk por McGuirre (1978); este análisis no considera las condiciones locales del suelo ni los efectos de interacción suelo-estructura.

El procedimiento general del método en mención es:

- Identificar las fuentes sismogénicas; en el Perú fueron determinadas por Casaverde y Vargas (1980) y revisadas en el CISMID, se definieron 20 fuentes sismogénicas (subducción y continentales).



- Análisis estadístico de Recurrencia Sísmica, en el Perú sólo se emplea información a partir de 1963 para el análisis estadístico de recurrencia sísmica.
- Determinación de la atenuación de la energía sísmica, se emplea dos leyes de atenuación de aceleraciones, la primera es la propuesta por Casaverde y Vargas (1980) y se usa para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción; cabe precisar que esta ley está basada sólo en registros de sismo en Lima, dado la escasez de datos en todo el Perú.

$$a = 68.7 e^{0.8Ms} (R+25)^{-1.0} \quad (7.01)$$

a: aceleración cm/s²

Ms: magnitud de ondas superficiales

R: distancia hipocentral en Km

La segunda ley de atenuación es la propuesta por Mc Guirre (1974) para la costa oeste de los EE.UU. y se emplea para las fuentes asociadas a sismos continentales.

$$a = 472 * 10^{0.28Ms} (R+25)^{-1.3} \quad (7.02)$$

a: aceleración cm/s²

Ms: magnitud de ondas superficiales

R: distancia hipocentral en Km

- Cálculo del valor probable de intensidad sísmica. [58]
El riesgo anual se expresa con la relación de Poisson

$$RISK_a = 1 - e^{-EXPt} \quad (7.03)$$

El nivel de excedencia se expresa como:

$$RISK = 1 - e^{-t/Ry(a)} \quad (7.04)$$

t: tiempo de vida útil

Ry(a): periodo de retorno de un sismo de intensidad mayor a "a".



La probabilidad de excedencia para un periodo de vida útil de "t" años en función del riesgo anual, se expresa como:

$$\text{RISK}_t = 1 - (1 - \text{RISK}_a)^t \quad (7.05)$$

A continuación se mencionan algunos resultados de cálculo de aceleraciones máximas como:

-Para Lima [47]

Periodo de Retorno (años)	30	50	500	1000
Aceleración (g)	0.24	0.29	0.62	0.76

Factor de nivel de sismo de diseño	0.39	0.47	1	1.23
------------------------------------	------	------	---	------

-Para sismos peruanos [50]

Periodo de Retorno (años)	45	500	1000
Aceleración (g)	0.20	0.40	0.50

Factor de nivel de sismo de diseño	0.50	1	1.25
------------------------------------	------	---	------

Igualmente, se señala algunos criterios de selección de movimientos sísmicos de diseño, como se resume en la Tabla 7.4.



Tabla 7.4 Algunos Criterios de Selección de Sismo de Diseño
(Grases, 1989) [58]

TIPO DE OBRA	VIDA UTIL (AÑOS)	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA	TIEMPO DE RETORNO
Instalaciones esenciales con capacidad de deformación inelástica y peligro de contaminación muy limitada (contenedor de residuos nucleares)	50 - 100	.01	15000
Equipos de Subestación Eléctrica de Alto Voltage	50	.03	1600
Puentes o Viaductos de Arterias Principales	100	.1	950
Tanques de Almacenamiento de Combustible	30	.05	590
Edificaciones para viviendas	50	.1 - .2	225 - 500
Construcciones Temporales	15	.3	40

En el presente trabajo se plantean cuatro niveles de Sismo de Diseño expresado en términos de periodo de retorno (T_r) o probabilidad de excedencia; tal como se ilustra en la Tabla 7.5. Se precisa que estos niveles se recomiendan teniendo en cuenta los niveles de Sismo de Diseño de los diversos grupos de trabajo señalados en el capítulo 4, como se resume en la Tabla 7.6.

Tabla 7.5 Sismo de Diseño

Niveles de Sismo de	Periodo de Retorno (T_r)	Probabilidad de
----------------------------	--	------------------------



Diseño		excedencia
Frecuente	30 años	50% en 30 años
Ocasional	50 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy Raro	970 años	10% en 100 años

Los valores de las aceleraciones para los niveles de sismo de diseño antes indicado para todas las capitales de Departamento del Perú fueron calculados por el programa RISK del CISMID.

Tabla 7.7 Aceleraciones Máximas calculadas

	NIVELES DE SISMO DE DISEÑO			
	Ocasional	Frecuente	Raro	Muy Raro
	Prob. de Excedencia: 50% en 30 años	Prob. de Excedencia: 50% en 50 años	Prob. de Excedencia: 10% en 50 años	Prob. de Excedencia: 10% en 100 años
	Periodo de Retorno: 43 años	Periodo de Retorno: 72 años	Periodo de Retorno: 475 años	Periodo de Retorno: 950 años
	Riesgo: 0.0228	Riesgo: 0.0138	Riesgo: 0.0021	Riesgo: 0.0011
ZONA 1				
Loreto (Iquitos): LS 3.729 LO 73.238 Acel. (g)	0.08	0.09	0.16	0.19
ZONA 2				
Amazonas (Chachapoyas): LS 6.227 LO 77.868 Acel. (g)	0.17	0.19	0.29	0.34
Apurímac (Abancay): LS 13.7 LO 72.75 Acel. (g)	0.18	0.20	0.30	0.35
Ayacucho LS 13.157 LO 74.223 Acel. (g)	0.24	0.28	0.45	0.53
Cuzco LS 13.513 LO 71.976 Acel. (g)	0.16	0.18	0.27	0.30



Huancavelica LS 12.785 LO 74.971 Acel. (g)	0.17	0.19	0.30	0.35
Huánuco LS 9.924 LO 76.237 Acel. (g)	0.15	0.18	0.28	0.33
Junín (Huancayo) LS 12.064 LO 75.208 Acel. (g)	0.16	0.18	0.29	0.34
Madre de Dios (Puerto Maldonado) LS 18.593 LO 69.176 Acel. (g)	0.22	0.25	0.39	0.46
Pasco (Cerro de Pasco) LS 10.678 LO 76.256 Acel. (g)	0.16	0.18	0.29	0.34
Puno LS 15.838 LO 70.022 Acel. (g)	0.21	0.24	0.36	0.41
San Martín (Moyobamba) LS 6.033 LO 76.972 Acel. (g)	0.16	0.18	0.30	0.35
Ucayali (Pucallpa) LS 8.373 LO 74.525 Acel. (g)	0.14	0.16	0.25	0.29
ZONA 3				
Ancash (Huaraz) LS 9.527 LO 77.526 Acel. (g)	0.17	0.20	0.32	0.38



Arequipa				
LS 16.394				
LO 71.535				
Acel. (g)	0.22	0.25	0.38	0.44
Cajamarca				
LS 7.153				
LO 78.508				
Acel. (g)	0.17	0.19	0.30	0.35
Callao				
LS 12.056				
LO 77.144				
Acel. (g)	0.24	0.28	0.45	0.53
Ica				
LS 14.067				
LO 75.723				
Acel. (g)	0.26	0.29	0.46	0.54
La Libertad (Trujillo)				
LS 8.111				
LO 79.3				
Acel. (g)	0.24	0.27	0.45	0.53
Lambayeque (Chiclayo)				
LS 6.772				
LO 79.846				
Acel. (g)	0.21	0.25	0.43	0.51
Lima				
LS 12.043				
LO 77.028				
Acel. (g)	0.24	0.27	0.44	0.52
Moquegua				
LS 17.191				
LO 70.932				
Acel. (g)	0.22	0.26	0.39	0.46
Piura				
LS 5.197				
LO 80.626				
Acel. (g)	0.22	0.26	0.45	0.54
Tacna				
LS 18.006				



LO 70.25 Acel. (g)	0.23	0.27	0.42	0.49
Tumbes LS 3.567 LO 80.457 Acel. (g)	0.21	0.24	0.42	0.51

7.5 OBJETIVO DE DESEMPEÑO

Se plantea tres Objetivos de Desempeño (Básico, Esencial, Crítico), en función a los Niveles de Desempeño y Sismo de Diseño previamente definidos; tal como se ilustra en la Fig. 7.3.

Objetivo de Desempeño Básico

Comprende obras civiles comunes como es el caso de las viviendas. La deformación inelástica debe ser estudiada a fin de prevenir el colapso para un Sismo de Diseño Raro. El desempeño sismorresistente se resume en la Tabla 7.8

Objetivo de Desempeño Esencial

Comprende obras civiles como: Hospitales, centros de emergencia, estaciones policiales, centros de comunicación, tanques de almacenamiento, puentes, viaductos, entre otros. La deformación inelástica debe ser controlada de modo que la obra civil sea reparable para un Sismo de Diseño Raro y se debe prevenir su colapso para un Sismo de Diseño Muy Raro. El desempeño sismorresistente se resume en la Tabla 7.8.

Objetivo de Desempeño Crítico

Comprende obras civiles como: Subestaciones Eléctricas de líneas de alta tensión, instalaciones nucleares, entre otros. La deformación inelástica debe ser limitada de modo que la obra civil sea habitable para un Sismo de Diseño Raro y completamente reparable para un Sismo de Diseño Muy Raro. El desempeño sismorresistente se resume en la Tabla 7.8.



7.6 EVALUACION DE DESEMPEÑO

En general, los procedimientos de análisis para la Evaluación de Desempeño de una obra civil se clasifican en: procedimiento lineal y procedimiento no lineal.

Procedimiento Lineal – Elástico

Es el procedimiento de análisis “clásico”, convencional que se viene empleando ampliamente. Consideramos que su progreso es tal que ya se cuenta con programas basados en elementos finitos, cuyo campo de aplicación es universal para estructuras con geometrías complejas y simplificadas.

Este procedimiento se debe emplear sólo para Niveles de Desempeño iniciales (Habitabilidad Inmediata).

Procedimiento No Lineal – Inelástico

El procedimiento no lineal en mención se clasifica en: estático y dinámico.

El procedimiento estático corresponde al análisis estático incremental (“pushover”); que representa la respuesta del modelo en el primer modo fundamental, basado en la hipótesis que el modo fundamental de vibración es la respuesta predominante.

En el procedimiento dinámico; se resuelve la ecuación de movimiento por el procedimiento de integración paso a paso.

Consideramos que el progreso del procedimiento no lineal sólo comprende elementos unidimensionales (barras, viga, pórtico), para modelos de vigas inelásticas (rótulas en extremos).

En tal sentido, consideramos que los programas basados en elementos finitos para este procedimiento en mención aún se encuentran en desarrollo; sin embargo por la literatura se conoce del progreso de estas investigaciones como: NONSAP (desarrollado en la universidad de Berkeley), MARC (1969), ANSYS, ABAQUS, ADYNA; SAMSON, WRECKER, DYNA [63].

Como criterios para la selección del procedimiento de análisis apropiado para la Evaluación de Obras Civiles se presenta la Tabla 7.9.



Tabla. 7.9 Criterios de Selección de Procedimientos de Análisis para la Evaluación de Desempeño

		NIVELES DE DESEMPEÑO		
		Habitabilidad Inmediata	Reparabilidad	Prevención del Colapso
SISMO DE DISEÑO	Frecuente	<i>Procedimiento lineal</i>		
	Ocasional	<i>Procedimiento lineal</i>	<i>Procedimiento No Lineal- Estático</i>	
	Raro	<i>Procedimiento lineal Dinámico</i>	<i>Procedimiento No Lineal- Estático</i>	<i>Procedimiento No Lineal- Dinámico</i>
	Muy Raro		<i>Procedimiento No Lineal- Dinámico</i>	<i>Procedimiento No Lineal- Dinámico</i>

El procedimiento no lineal estático tiene gran acogida en muchos grupos de investigación, por lo que a continuación se presenta la metodología empleada en la Evaluación de Desempeño.



La metodología para la Evaluación de Desempeño de una obra civil se define en función a la capacidad estructural y a la sollicitación sísmica; tal como se ilustra en la Fig. 7.4.

La Capacidad Estructural planteada se expresa como la relación entre el corte en la base y desplazamiento horizontal de último nivel, logrado a través de un a Análisis Estático Incremental.

La Sollicitación Sísmica planteada se expresa a través de un Espectro de Diseño o Espectro de Respuesta.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
 SISMORRESISTENTE**
 Javier Francisco Taípe Carbajal

Tabla 7.6 Sismo de Diseño

SISMO DE DISEÑO														
SEAO (1995)			ATC-40 (1996)		FEMA-273 (1997)		U.S.A. Army (2000)		FEMA -350 (2000)		COD. JAPON (2001)		PROPUESTA	
Nivel de Sismo	Periodo de Retorno (años)	Probab. de Excedencia	Nivel de Sismo	Probab. de Excedencia	Nivel de Sismo	Probab. de Excedencia	Nivel de Sismo	Probab. de Excedencia	Nivel de Sismo	Probab. de Excedencia	Nivel de Sismo	Interv. Recurrencia (años)	Nivel de Sismo	Probab. de Excedencia
Frecuente	43	50% en 30 años	Sismo de servicio bilidad	50% en 50 años Tr = 75 años	Sismo 1	50% en 50 años	A	2/3 (SM) Tr = 500 años	Sismo de diseño	2/3 (SM)	Serviciabilidad	30-50 años	FRECUE NTE	50% en 30 años
Ocasional	72	50% en 50 años											FRECUE NTE	50% en 50 años
Raro	475	10% en 50 años	Sismo de diseño	10% en 50 años Tr = 500 años	Sismo 2	20% en 50 años							B	3 / 4 (SM) Tr = 1000 años
					Sismo Seg. Básico 1	10% en 50 años	MUY RARO	2% en 50 años						
Muy raro	970	10% en 100 años	Sismo máximo	5% en 50 años Tr = 1000 años	Sismo Seg. Básico 2	2% en 50 años							MUY RARO	2% en 50 años



Tabla 7.8 Resumen de Objetivos de Desempeño

Obras civiles comunes	
Nivel de Sismo de Diseño	Nivel de Desempeño mínimo
Frecuente	Habitabilidad Inmediata
Ocasional	Reparabilidad
Raro	Prevención del Colapso
Muy raro	
Obras civiles importantes	
Nivel de Sismo de Diseño	Nivel de Desempeño mínimo
Frecuente	
Ocasional	Habitabilidad inmediata
Raro	Reparabilidad
Muy raro	Prevención del Colapso
Obras civiles esenciales	
Nivel de Sismo de Diseño	Nivel de Desempeño mínimo
Frecuente	
Ocasional	
Raro	Habitabilidad inmediata
Muy raro	Reparabilidad

		NIVELES DE DESEMPEÑO		
		Habitabilidad Inmediata	Reparabilidad	Prevención del Colapso
SISMO DE DISEÑO	Frecuente	 	 	
	Ocasional	 	 	
	Raro	 	 	
	Muy Raro	 	 	

Fig. 7.3 Objetivos de Desempeño



El Desempeño Sismorresistente planteado se expresa como el desplazamiento máximo esperado.

Se precisa, que la metodología planteada se basa en el método de Espectro de Capacidad originalmente desarrollada por Freeman (1978). Este método fue empleado por diversos grupos de investigación como ATC-40 [43], e inclusive se encuentra incorporado en el código japonés [33].

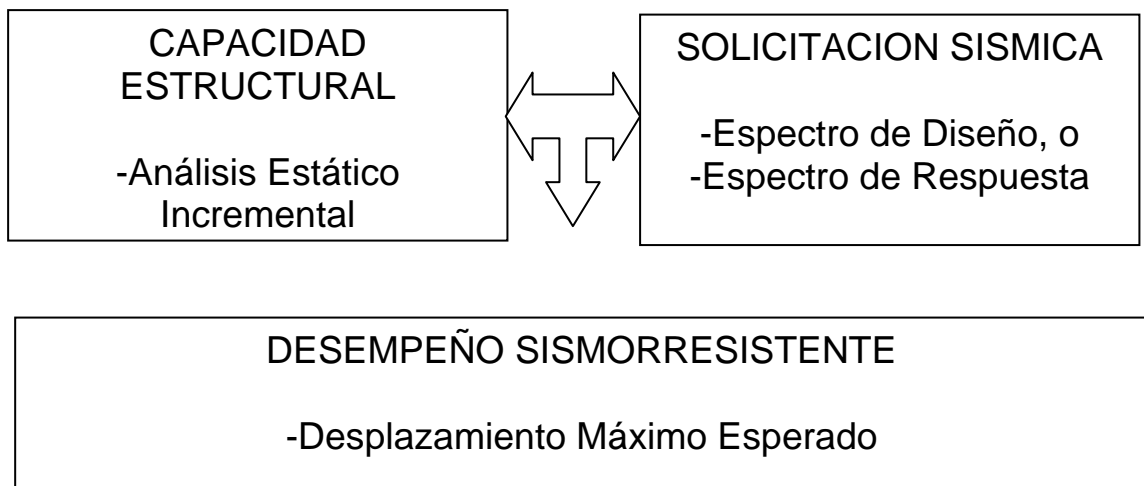


Fig. 7.4 Metodología para la Evaluación de Desempeño

7.6.1 CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Es una representación de la habilidad de la estructura para resistir la sollicitación sísmica. La capacidad estructural en la metodología planteada depende de la resistencia y capacidad de deformación de sus componentes. La capacidad de la estructura está representada por una curva creciente.

El camino más conveniente para representar la curva en mención es por la relación corte en la base (V) contra desplazamiento en entrepiso (D); determinados mediante análisis estático incremental.

El procedimiento general para el análisis estático incremental es como sigue:

1. Crear modelo analítico de la estructura.
2. Aplicar a la estructura carga lateral en cada piso en proporción al producto de la masa y la forma de modo fundamental.



3. Calcular las solicitaciones en los elementos de la estructura.
4. Construir un diagrama corte en la base - desplazamiento relativo de entrepiso.
5. Aplicar nuevo incremento de carga lateral a la estructura revisada
6. Repetir los pasos 2 a 5 hasta que la estructura alcance su límite último, tales como: inestabilidad por efecto P- Δ , distorsiones considerablemente mayores al nivel de desempeño deseado o degradación significativa de su resistencia.

Las propiedades de las rótulas plásticas de los componentes estructurales (vigas, columnas); así como la relación típica de Corte contra Desplazamiento se ilustra en Fig. 7.5 que sigue a continuación.

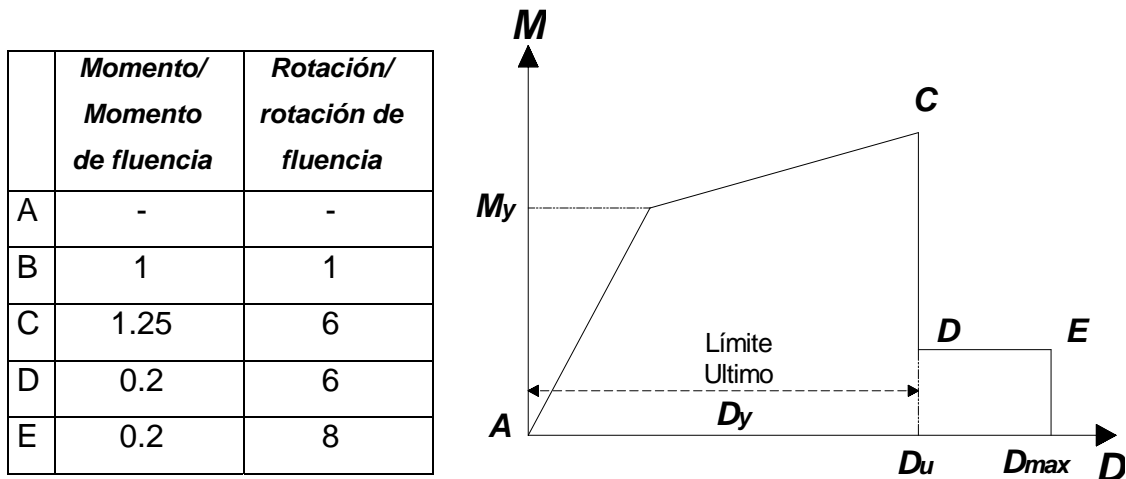


Fig. 7.5 Propiedades de Rótulas Plásticas y Relación Típica V-D

El tramo AB, representa el comportamiento antes de la fisuración. El punto B representa la resistencia de fluencia nominal.

El tramo BC, representa la resistencia máxima esperada. El punto C representa el inicio de la degradación significativa de la resistencia.

El tramo CD representa la falla inicial.

El tramo DE representa la pérdida de la capacidad de resistencia a la carga lateral. El punto E representa la deformación máxima.

• **Representación de la capacidad estructural en formato Sa - Sd**

El Corte V y el desplazamiento D, representa la fuerza elástica máxima y desplazamiento máximo.

Para fines de la metodología planteada se debe emplear los valores “espectrales”; es decir en formato Sa y Sd.

De la ecuación de movimiento para excitaciones sísmicas:

$$My + C\dot{y} + Ky = -Mu_G(t) \tag{7.06}$$

Por descomposición lineal $y = \sum_{i=1}^n a_i(t)X_i$ y premultiplicando la ecuación (7.06) por X_i^t se llega a la forma:

$$X_i^t M X_i \ddot{a}_i + X_i^t C X_i \dot{a}_i + X_i^t K X_i a_i = -\Gamma_i \ddot{u}_G \tag{7.07}$$

De donde se puede expresar para sistemas de múltiples grados de libertad

$$M_e \ddot{a}_i + C_e \dot{a}_i + K_e a_i = -\Gamma_e \tag{7.08}$$

M_e, C_e, K_e : masa, amortiguamiento y rigidez equivalente respectivamente.

Por otro lado, para sistemas de un grado de libertad se expresa como:

$$M \ddot{a}_i + C \dot{a}_i + K a_i = -F(t) \tag{7.09}$$

De las relaciones antes descritas se puede indicar que la ecuación modal de movimiento es de la misma forma para sistemas de un grado de libertad y múltiples grados de libertad.

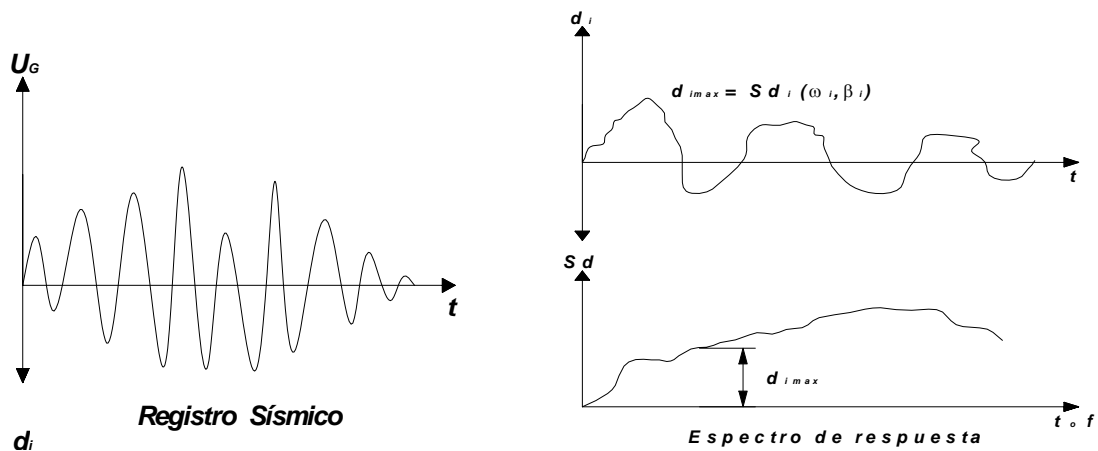


Fig. 7.6 Esquema de Espectro de Respuesta



Por otro lado, la ecuación (7.06), también se puede expresar como:

$$\ddot{a}_i + 2\beta_i \omega_i \dot{a}_i + \omega_i^2 a_i = -\Gamma_i \ddot{u}_G(t) \quad (7.10)$$

Y con un cambio de variable $Y = \sum_{i=1}^n d_i(t) \Gamma_i X_i$, se llega a la forma

$$\ddot{d}_i + 2\beta_i \omega_i \dot{d}_i + \omega_i^2 d_i = -u_G \quad (7.11)$$

En un Análisis Modal Espectral, la respuesta modal correspondiente al desplazamiento viene dado por:

$$Y_i = \sum_{i=1}^n Sd_i \Gamma_i X_i \quad \text{o} \quad D = Sd\Gamma\phi \quad (\text{para fines del procedimiento}) \quad (7.12)$$

De donde:

$$Sd = \frac{D}{\Gamma\phi} \quad (7.13)$$

Es la ecuación que se emplea para expresar el desplazamiento D de la curva de capacidad ("pushover")

Igualmente, la respuesta modal para la fuerza viene dado por:

$$F_i = m_i y_i = m_i S a_i \Gamma_i x_i \quad (7.14)$$

El cortante en la base viene a ser: $\sum_{i=1}^n F_i$

$$V = \sum_{i=1}^n F_i = Sa\Gamma \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (7.15)$$

Lo que se puede expresar como:

$$V = M_t Sa \left[\frac{(x_i^t m_i I)^2}{M_t x_i^t m_i x_i} \right] \quad (7.16)$$

Donde M_t es la masa total del sistema y la relación:

$$\alpha = \frac{(x_i^t m_i I)^2}{M_t x_i^t m_i x_i} \quad (7.17)$$

Se llama *Coficiente de Masa Efectivo*; de donde:

$$V = \frac{W}{g} Sa\alpha \quad (7.18)$$

Generalmente Sa se expresa en fracción de g, entonces se obtiene finalmente

$$Sa = \frac{V}{W} \frac{1}{\alpha} \quad (7.19)$$

Que es la ecuación que se empleará para expresar el corte en la base de la curva de capacidad ("pushover"), y donde:



α : Coeficiente de masa efectivo.

Γ : Factor de participación estática.

Que se obtienen de un análisis modal. La capacidad estructural representa el primer modo de respuesta de la estructura basado en la hipótesis que el modo fundamental de vibración es la respuesta predominante de la estructura.

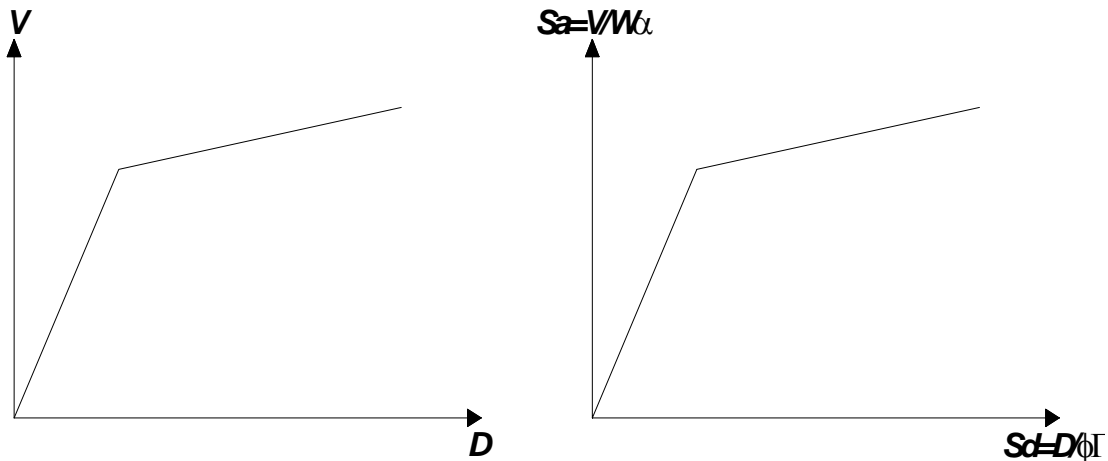


Fig. 7.7 Representación de la capacidad estructural en formato Sa-Sd

7.6.2 SOLICITACION SÍSMICA

La sollicitación sísmica puede ser representada por el espectro de respuesta o el espectro de diseño.

El espectro de respuesta se define como la envolvente o lugar geométrico de las máximas respuestas (velocidad, aceleración y desplazamiento) de un sistema de un grado de libertad para diferentes periodos de vibración, para un cierto nivel de amortiguamiento y un modelo histerético definido [47].

Los factores para la construcción de un espectro de diseño, se pueden determinar por medio de un análisis estadístico del espectro de respuesta para un número de sismos; esto se hace cuando puede determinarse los posibles parámetros máximos del movimiento de la base para futuros sismos que afecten un lugar [47].

El espectro de diseño inelástico de nuestra norma E-030; en la zona de plataforma da valores de aceleración espectral de hasta 0.21g. Los espectros de



diseño elásticos de las normas americanas dan valores de aceleración espectral en la zona de plataforma de hasta 2.5g [43], [49]. En las provisiones de la norma japonesa la aceleración espectral en la zona de plataforma da valores de 1.2g para un periodo de retorno de 500 años [33].

- **Representación de la Solicitación Sísmica en formato Sa - Sd**

La presentación de los espectros de diseño Sa - T, para fines de la metodología planteada debe presentarse en el formato Sa (g) – Sd, como se ilustra en la Fig. 7.8; donde:

$$Sa = Sd \omega^2 \quad (7.20)$$

$$Sd = \frac{SaT^2}{4\pi^2} \quad (7.21)$$

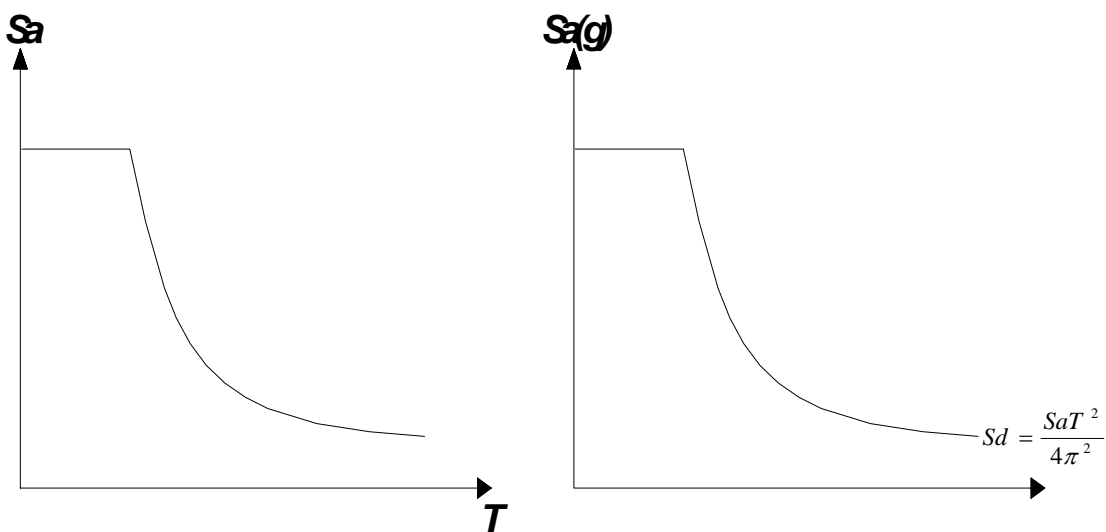


Fig.7.8 Representación del Espectro de Diseño en formato Sa(g)-Sd



7.6.3 DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE

El desplazamiento máximo esperado para una sollicitación sísmica dada, se define como el punto (llamado también punto de desempeño) en el cual la capacidad estructural (curva de capacidad) y la sollicitación sísmica son iguales.

El desplazamiento máximo esperado viene dado directamente por el punto de intersección entre la curva de capacidad y el espectro de diseño elástico si el punto en mención se da en el rango lineal elástico de la capacidad estructural.

Sin embargo, cuando la intersección se da en el rango inelástico; para encontrar el desplazamiento máximo esperado se emplean factores de reducción del espectro de diseño elástico o mediante el uso de espectro de diseño inelástico, como se detallará en las secciones siguientes.

□ PROCEDIMIENTO DEL ATC-40

Es un procedimiento estático no lineal en el que el espectro de diseño elástico se afecta por factores de reducción. Estos factores de reducción fueron definidos sobre la base de un análisis dinámico de un sistema lineal equivalente. En tal sentido, estos factores están en función de un amortiguamiento equivalente, que a su vez se dedujo de un sistema resistencia bilineal.

Amortiguamiento equivalente, se define como:

$$\beta_{eq} = \frac{63.7k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \leq 45\% \quad (7.22)$$

k: factor de comportamiento de edificación: 1, 2/3, 1/3

Para k=1 , $\beta_{eq} \leq 40\%$: estructura estable, histéresis similar al supuesto.

Para k=2/3 , $\beta_{eq} \leq 29\%$: histéresis moderadamente diferente al supuesto.

Para k=1/3 , $\beta_{eq} \leq 20\%$: histéresis diferente al supuesto.



Se precisa que para el procedimiento B que se encuentra implementado en el programa SAP2000 [49], mantiene constante a_y y d_y para obtener β_{eq} sólo en función de a_{pi} ; por lo que el Punto de Desempeño constituye la intersección de la curva de capacidad y la curva de aproximación o curva de transición formada por los puntos d_{pi} y β_{eq} .

Factores de reducción se definen como:

$$SRA = \frac{(3.21 - 0.68 \ln \beta_{eq})}{2.12} \quad (7.23)$$

$$SRV = \frac{(2.31 - 0.41 \ln \beta_{eq})}{1.65} \quad (7.24)$$

Donde SRA y SRV son factores de reducción para la zona de plataforma y para la zona decreciente del espectro, dado que las ecuaciones para cada zona del espectro de diseño con el que trabajaron son diferentes.

Con estos factores de reducción se afecta el espectro elástico hasta lograr un punto de intersección entre la curva de capacidad y la solicitud sísmica converjan.

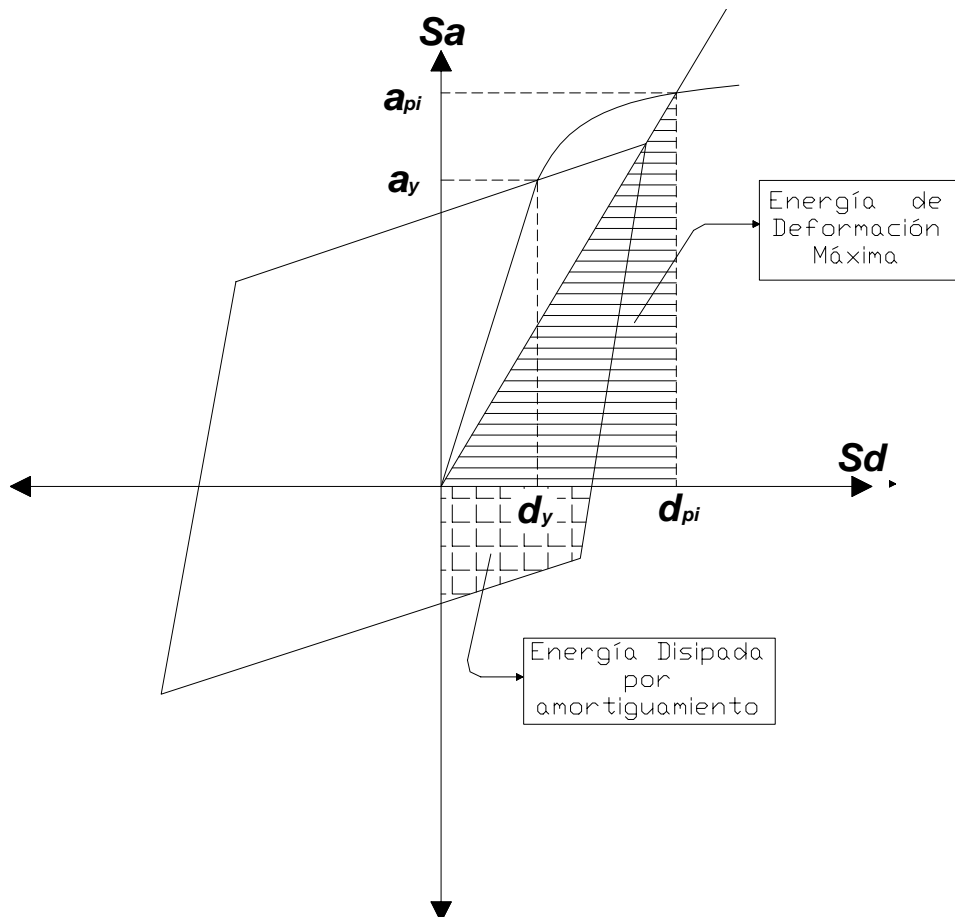




Fig. 7.9 Deducción del amortiguamiento viscoso equivalente

En las provisiones de la norma japonesa[33], la razón de amortiguamiento viscoso equivalente h_{eq} en el estado límite de protección de vida se define después de una serie de estudios de sistemas de un grado de libertad no lineal.

La razón de amortiguamiento equivalente de un elemento estructural:

$$h_{eqi} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (7.25)$$

$$h_{eqi} = \frac{1}{5} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (\text{para forma de histéresis tipo "slip"}). \quad (7.26)$$

La razón de amortiguamiento equivalente de un sistema de un grado de libertad, se estima como el promedio con respecto a la energía de deformación:

$$h_{eqi} = \frac{\sum_m h_{eqim} w_i}{\sum_m w_i} + 0.05 \quad (7.27)$$

Que puede ser modificado por efecto de interacción suelo-estructura.

Para el estado límite de protección de vida el factor de reducción respectivo es:

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h_{eq}} \quad (7.28)$$

Otros investigadores proponen otras relaciones de razón de amortiguamiento equivalente, así:

Sobre la base del modelo de Takeda para simular la respuesta de estructuras de concreto armado [24].

$$h_{eq} = 0.321 - \left[\frac{(0.82 + 0.01\mu)}{\sqrt{\mu}} \right] \quad (7.29)$$

Para estructuras híbridas: núcleo de concreto armado y estructuras de acero [25], la razón de amortiguamiento equivalente:



$$h = \frac{1}{\mu} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + 0.02 \quad (7.29)$$

Para un sistema equivalente y sobre la base del modelo elastoplástico, el amortiguamiento equivalente viene dado por: [45].

$$h_{eq} = \frac{2\mu-1}{\mu\pi} + 0.05 \quad (7.30)$$

□ **PROCEDIMIENTO DIRECTO**

Llamado también método del diagrama de capacidad-solicitación sísmica. Es propuesto por investigadores como Chopra y Goel, 1999 [45]; se plantea el uso de espectros inelásticos en lugar de los factores de reducción antes indicado. El espectro inelástico mencionado, se logra reduciendo el espectro elástico por medio de valores apropiados de factor de reducción de resistencia de fluencia-factor de ductilidad y periodo natural: $R_y-\mu-T$

Diversos investigadores plantean ecuaciones que relacionan estos factores como:

✓ **Newmark-Hall**

$$\mu = \begin{cases} T \leq T_a & \\ (1 + Ry^{\frac{2}{\beta}}) / 2 & T_a < T < T_b \\ (1 + Ry^2) / 2 & T_b < T < T_c \\ (T_c / T) Ry & T_c < T < T_c \\ Ry & T > T_c \end{cases} \quad \beta = \frac{\ln(T / T_a)}{\ln(T_b / T_a)} \quad (7.31)$$

T_a , T_b y T_c se definen del espectro de Newmark-Hall Fig 7.10

✓ **Krawinkler y Nassar (1992)**

$$\mu = 1 + 1 / c(Ry^c - 1) \quad (7.32)$$

$$c(T, \alpha) = T^a / (1 + T^a) + b / T$$



✓ Vidic, Fajfar y Fischinger (1994)

$$\mu = \begin{cases} 1 + (0.74(Ry - 1)T_o/T)^{1.053} & T \leq T_o \\ 1 + (0.74(Ry - 1))^{1.053} & T > T_o \end{cases} \quad (7.33)$$

$$T_o = 0.75\mu^{0.2}T_c \leq T_c$$

Por otro lado, también se puede emplear factores de amplificación para el espectro elástico para sismos peruanos; a fin de emplear en el procedimiento en mención espectros inelásticos.

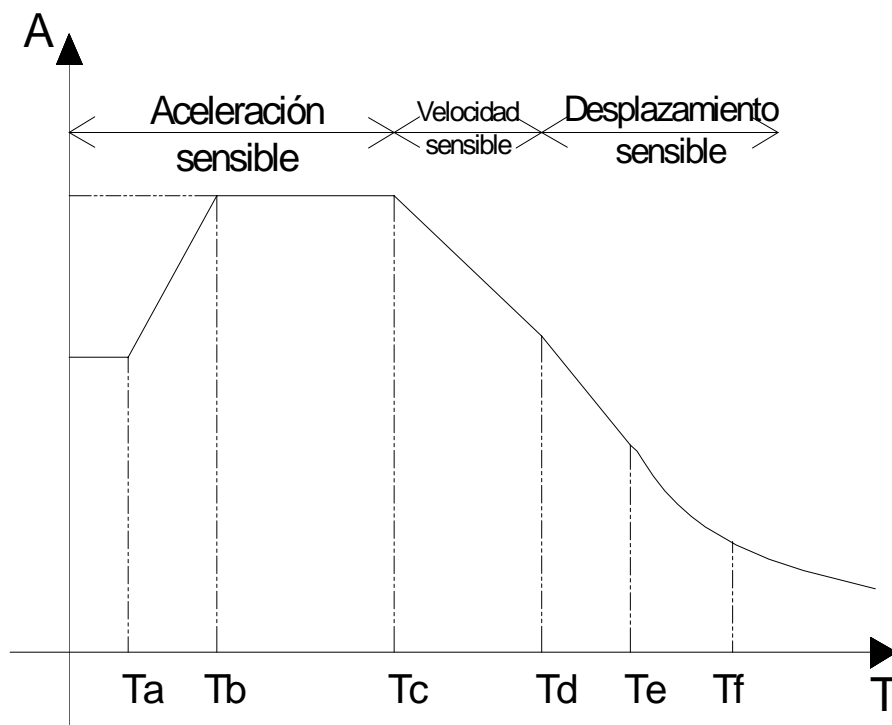


Fig 7.10 Espectro tipo Newmark-Hall

7.7 ANÁLISIS DE ACEPTABILIDAD

A continuación; se muestra parte de los trabajos de investigación que sustentan los parámetros de respuesta para el análisis de aceptabilidad propuesto.

7.7.1 PARA OBRAS CIVILES DE CONCRETO ARMADO

- Límites de deformación máxima para estructuras de concreto armado del ATC-40 [43]



Límite de distorsión de entrepiso	Nivel de desempeño			
	Ocupación inmediata	Control de daño	Protección de vida	Estabilidad estructural
Distorsión total máximo	0.01	0.01- 0.02	0.02	0.33Vi/Pi
Distorsión inelástico máximo	0.005	0.005- 0.015	-	-

♦ Vision 2000 [18]

Descripción de grados de daño

Nivel de desempeño	Distorsión máxima
Funcionalidad completa	1/500
Funcionalidad	1/200
Protección de vida	3/200
Cerca del colapso	1/40
Colapso	1/40

♦ vBertero [4]

Valores aceptables para la deformación IDI

Nivel de desempeño	Distorsión
servicio	1/500 - 1/200
seguridad	1/100 - 1/50
Prevención de colapso	1/50 - 1/25

♦ Yamawaki, Kitamura [31]

Criterios basados en pautas japonesas.

Nivel de desempeño	Estructura mixta		
	- 0.3	0.3 - 0.7	0.7 -
Funcionalidad completa	1/200	1/250	1/300
Funcionalidad parcial	1/120	1/150	1/200
Funcionalidad limitada	1/100	1/120	1/150
Protección de vida	1/80	1/100	1/120



◆ Aoki, Ohashi [8]

Criterios de deformación

Desempeño	Criterio de deformación
Fisura en concreto	1/200
Daño en elementos secundarios	1/100
Falla en elemento estructural	1/50
Colapso de edificación	1/30

◆ FEMA 273

Niveles de Desempeño	Criterio de deformación
Pórticos:	
Ocupación Inmediata	1/100
Seguridad de Vida	1/50 -1/100
Prevención del colapso	1/25
Muros estructurales:	
Ocupación Inmediata	1/200
Seguridad de Vida	1/100 -1/200
Prevención del colapso	1/50

◆ El Ing. Adolfo Galvez propone para muros de ductilidad limitada.

Niveles de Desempeño	Criterio de deformación
Ocupación Inmediata	1/500
Seguridad de Vida	1/285
Prevención del colapso	1/222

◆ Trabajos de investigación en muros estructurales indican distorsiones máximas de hasta 1/50 [60].

◆ De acuerdo a la norma japonesa una distorsión de 0.005 corresponde al nivel de iniciación de daño, es decir cuando un elemento estructural alcanza su resistencia permisible.

◆ Según la norma de Nueva Zelanda NZS4203-1992, la distorsión en el estado último no debe exceder:

1/50 : edificaciones de hasta 15m

1/50-1/67 : edificaciones de 15m a 30m



1/67 :edificaciones de más de 30m

- ◆ De acuerdo a la norma E-030 (1997) para concreto armado la distorsión admisible es 7/1000.

Sobre la base de la información antes indicada se propone los siguientes criterios de aceptabilidad (tabla 7.10). Se precisa que para su convalidación completa de estos límites se requiere mayores trabajos experimentales en nuestro medio.

Tabla 7.10 Criterios de Aceptabilidad propuestos basados en el parámetro de respuesta: *Distorsión Admisible*

NIVEL DE DESEMPEÑO	APORTICADAS	DUALES	MUROS ESTRUCTURALES	MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA
Habitabilidad inmediata	1/200	1/250	1/300	1/500
Reparabilidad	1/100	1/150	1/200	1/286
Prevención del Colapso	1/80	1/100	1/120	1/222

Por otro lado, la distorsión total máxima de los trabajos antes descritos correspondiente al inicio de colapso de la edificación es variable: 1/50, 1/40, 1/25-1/50, 1/80, 1/30-1/50.

Recomendamos como criterio para definir la distorsión total máximo como el menor de los siguientes valores:

- ✓ Distorsión total máximo: 1/50
- ✓ Punto de Inicio de Degradación de la Resistencia (Punto C de la Fig. 5.)

7.7.2 PARA OBRAS CIVILES DE ALBAÑILERIA

- ◆ USA ARMY (1998)

Presenta una distorsión de entrepiso permisible para cada nivel de desempeño.

Estructura	Nivel de desempeño		
	Salida segura	Seguridad de vida	Prevención de Colapso
Estructuras de hasta cuatro			



pisos con muros interiores	0.025h	0.020h	0.015h
Albañilería con muros en cantiliver	0.010h	0.010h	0.010h
Albañilería con muros de corte	0.007h	0.007h	0.007h
Albañilería con muros aporricados	0.013h	0.013h	0.010h
Otros	0.020h	0.015h	0.010h

◆ FEMA 273

Niveles de Desempeño	Criterio de deformación
Albañilería no reforzada (no dúctil):	
Ocupación Inmediata	1/1000
Seguridad de Vida	1/200-1/333
Prevención del colapso	1/166
Albañilería no reforzada (dúctil):	
Ocupación Inmediata	1/333
Seguridad de Vida	1/166
Prevención del colapso	1/100
Albañilería reforzada:	
Ocupación Inmediata	1/500
Seguridad de Vida	1/166
Prevención del colapso	1/67

□ **PARA OBRAS CIVILES DE ALBAÑILERIA CONFINADA**

◆ Meli y Salgado (1965) [42].

Ensayo monotónico de ladrillo de arcilla.

DESCRIPCION	DISTORSION
Agrietamiento	1/500
Condición última (aplastamiento)	1/100

◆ Klingner y Bertero (1976).

Ensayo cíclico [42]

DESCRIPCION	DISTORSION
--------------------	-------------------



Inicio de agrietamiento	1/500
resistencia máxima(pórtico contraventado)	1/100
aplastamiento de diagonales	1/80
comportamiento de pórtico dúctil(muro destruido)	1/30

- ◆ Gallegos y Casabonne (1984) [42]

DESCRIPCION	DISTORSION
inicio de agrietamiento	1/800
separación de confinamiento y paño de albañilería	1/150
agrietamiento en confinamiento y paños (sin aplastamiento de diagonales)	1/100

- ◆ Gibu, Serida (1993) [41].

Ensayo carga lateral cíclica.

DESCRIPCION	DISTORSION
rango elástico	1/3200
punto de fluencia, agrietamiento	1/1600 - 1/800
condición última	1/200 - 1/100

- ◆ Mely y Salgado (1969), Mely (1975), Herrera (1992), Aguilar (1994), García y Yamin (1994), Alcocer (19994), Ruiz (1995) [28].

DESCRIPCION	DISTORSION PARA EL NIVEL DE COLAPSO
Condición última	1/222 - 1/179

□ ALBAÑILERIA ARMADA

- ◆ Gallegos y Casabonne (1982) [42].

DESCRIPCION	DISTORSION
inicio de agrietamiento	1/2600
Inicio de fluencia de acero	1/350
Condición última	1/190

- ◆ Programa de investigación Japonés - Norteamericano [42].



DESCRIPCION	DISTORSION
inicio de agrietamiento	1/2000
Inicio de fluencia de acero	1/800
Condición última	1/200
Límite de reparabilidad	1/500

- ♦ La norma E-030 vigente define la distorsión para edificaciones en 1/200.

Sobre la base de la información antes indicada se propone:

Tabla 7.11 Criterios de Aceptabilidad propuestos basados en la Distorsión para edificaciones de Albañilería

Nivel de desempeño	Albañilería confinada	Albañilería armada
	1/800	1/1000
Habitabilidad inmediata	1/400	1/500
Prevención del colapso	1/200	1/200

La esbeltez h/b menor de 2.

7.7.3 PARA ESTRUCTURAS DE ACERO

- ♦ Yamawaki, Kitamura [31]

Nivel de desempeño	Distorsión
Funcionalidad completa	1/150
Funcionalidad parcial	1/100
Funcionalidad limitada	1/100
Protección de vida	

- ♦ FEMA 273

Niveles de Desempeño	Criterio de deformación
Pórticos:	
Ocupación Inmediata	1/142
Seguridad de Vida	1/40-1/100
Prevención del colapso	1/20
Pórticos arriostrados:	
Ocupación Inmediata	1/200
Seguridad de Vida	1/66-1/200



Prevención del colapso	1/50
------------------------	------

◆ FEMA 350

Altura de edificación	Nivel de desempeño			
	OCUPACION INMEDIATA		PREVENCIÓN DEL COLAPSO	
	distorsión entrepiso	Factor de resistencia	distorsión entrepiso	Factor de resistencia
Pórtico de momento especial (SMF)				
Baja (menor 04 pisos)	2/100	1	1/10	.9
Media (4-12 pisos)	2/100	1	1/10	.85
Alta (mayor 12 pisos)	2/100	1	1/11	.75
Pórtico de momento ordinario (OMF)				
Baja (menor 04 pisos)	1/100	1	1/10	.85
Media (4-12 pisos)	1/100	.9	1/12	.7
Alta (mayor 12 pisos)	1/100	.85	1/16	.6

- ◆ La norma E-030 vigente define la distorsión para edificaciones en 1/100.
- ◆ En función a los trabajos de investigación, se propone

Tabla 7.12 Criterios de Aceptabilidad propuestos basados en la Distorsión para edificaciones de Albañilería

Nivel de desempeño	Distorsión		
	Pórtico dúctil	Pórtico con arriostre excéntrico	Pórtico con arriostre en cruz
Habitabilidad Inmediata	1/150	1/112	1/112
Reparabilidad	1/100	1/75	1/75
Prevención del Colapso	1/80	1/60	1/60



Procedimiento de Análisis Dinámico Incremental:

Son técnicas que fueron desarrolladas por Luco y Cornell (1998) y descrito en detalle por VanVatsikos y Cornell (2001) [27] y FEMA 350 [16].

1. Seleccionar 10 a 20 registros de aceleraciones representativos del lugar geográfico donde se ubica la obra civil; cuya estabilidad global o nivel de desempeño correspondiente a Prevención de Colapso, se requiere analizar.
2. Construir un grafico cuya abscisa este formado por la distorsión máxima calculada y la ordenada este conformada por la aceleración obtenida del respectivo espectro de respuesta en el periodo fundamental de la estructura.

El tramo lineal – elástico del gráfico se logrará mediante un análisis dinámico lineal cuyo registro sísmico debe afectarse por un factor tal que alcance la primera formación de rotula plástica. A partir del cual se debe realizar un análisis dinámico no lineal – inelástico.

3. Continuar con el análisis incremental hasta que la pendiente del tramo no lineal - inelástico sea 1/5 de la pendiente del tramo lineal.
4. Repetir el proceso para cada registro sísmico.
5. Determinar el promedio de la capacidad de distorsión de entrepiso (C).
6. Determinar el factor de resistencia para colapso global; que se expresa como:

$$\phi = e^{-k/2(\beta u_2 - \beta_2)}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln C_i - \overline{\ln C_i})}{n-1}}$$



$$k = \frac{1.65}{\text{Ln} \left(\frac{S_{2/50}}{S_{10/50}} \right)}$$

Ci: Distorsión calculada

$$\beta_u = 0.15$$

n : Número de registros

$S_{2/50}$ = Aceleración máxima de probabilidad de excedencia 2% en 50 años.

$S_{10/50}$ = Aceleración máxima de probabilidad de excedencia 10% en 50 años.

N° de pisos	β
< 3	0.15
4-12	0.20
> 12	0.25

β : Desviación estándar logarítmica por aleatoriedad de registro sísmico.

β_u : Desviación estándar logarítmica por la incertidumbre en la definición de prevención del colapso global

k : Pendiente de la curva de peligro sísmico.

Los factores que puedan afectar la curva del Análisis Dinámico Incremental son:

Efecto P - Δ , incrementos empleados en el análisis, registros sísmicos empleados, razón de endurecimiento del esfuerzo, cambio de periodo fundamental por la no linealidad, efectos de modos altos y cambio en la localización de la máxima distorsión [34].



7.8 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO POR DESEMPEÑO

Se plantea como una aplicación de la metodología de diseño una obra civil correspondiente a una edificación para uso de vivienda.

a) OBJETIVO DE DESEMPEÑO

Se debe seguir la metodología indicada en la Fig. 7.2; en tal sentido, el profesional responsable del proyecto y el propietario (usuario o consumidor) deben seleccionar el Objetivo de Desempeño para la obra civil en función a los Niveles de Desempeño y Sismo de Diseño.

Sólo después de satisfacer las expectativas del propietario resumidas en la Fig. 7.2 se debe continuar con el proceso de diseño.

En nuestro caso hipotético, los Niveles de Desempeño son:

- Habitabilidad inmediata,
- Reparabilidad
- Prevención del Colapso.

Sismo de Diseño:

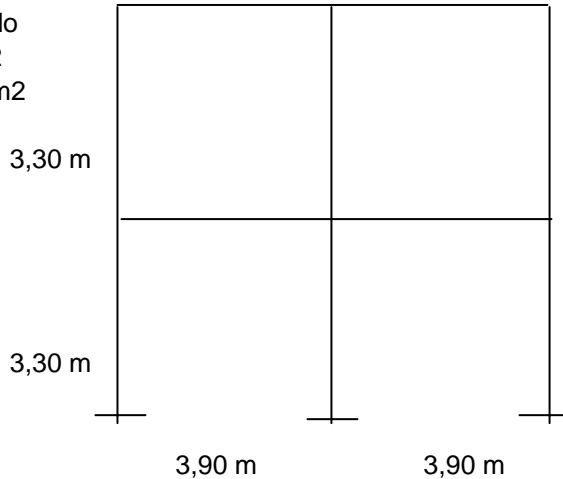
- Frecuente
- Ocasional
- Raro
- Muy Raro

Son los que corresponden a las aceleraciones máximas calculadas anteriormente tabla 7.6, es decir: 0.24, 0.29, 0.46, 0.54 respectivamente (Ica). Analizaremos para todos los Objetivos de Desempeño.



Características generales:

Concreto Armado
 $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
 $F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$



Columnas
 0,25m x 0,50m
 8d 5/8"; estribos d 3/8"

Vigas
 0,25m x 0,40m
 3d 5/8" inferior
 3d 5/8" superior
 estribos d 3/8"

Peso de la obra civil

P2=	13372.49	Kg	M2=	13.65 kg-s2/cm
P1=	19964.97	Kg	M1=	20.37 kg-s2/cm
PT=	33337.46	Kg		

Verificación de Cuantía de la viga:

$\rho = 0.00659775$
 $\rho_b = 0.02125$
 $0.75\rho_b = 0.0159375$
 $0.50\rho_b = 0.010625$
 Por lo que corresponde a una falla por tracción del acero.

Verificación de Cuantía de la columna:

$\rho = 0.01759401$
 $\rho_{max} = .04 - .06$

b. EVALUACION DE DESEMPEÑO

b.1 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS LINEAL - ELÁSTICO

ANÁLISIS LINEAL ESTÁTICO

Fuerza Cortante en la Base

$$V = \frac{ZUSC}{R} \times P$$

	norma	Frecuente	Ocasional	
Z=		0.4	0.24	0.29
U=		1.5		
S=		1	Tp=	0.4s
C=		2.5		
R=		8		



Distribución de la Fuerza Sísmica

$$F_i = \frac{P_i H_i}{\sum P_j H_j} \times V$$

Resumen de los desplazamientos de entrepiso (cm):

NIVEL	norma	Frecuente	Ocasional
1	1.58	0.95	1.15
2	1.88	1.13	1.36

Distorsión

NIVEL	norma (1/143)	Frecuente	Ocasional
1	1/209	1/347	1/288
2	1/176	1/293	1/243

ANÁLISIS LINEAL DINÁMICO

PROCEDIMIENTO POR SUPERPOSICION ESPECTRAL

Resumen de los desplazamientos de entrepiso (cm):

NIVEL	norma	Frecuente	Ocasional
1	0.96	0.58	0.70
2	1.04	0.63	0.76

Distorsión

NIVEL	norma (1/143)	Frecuente	Ocasional
1	1/344	1/574	1/475
2	1/316	1/527	1/437

PROCEDIMIENTO DINÁMICO TIEMPO-HISTORIA

Registros sísmicos:

			PGA cm/s ²
Sismo de Lima	17/10/66	7035	180.59
Sismo de Lima	17/10/66	7036	269.34
Sismo de Chimbote	31/05/70	7038	104.82
Sismo de Chimbote	31/05/70	7039	97.75
Sismo de Lima	03/10/74	7050	178.95
Sismo de Lima	03/10/74	7051	192.49

Resumen de los desplazamientos de entrepiso (cm):



NIVEL	Norma (1/143)	Frecuente	Ocasional
1	1.80	1.08	1.31
	1.96	1.18	1.42
	2.96	1.78	2.15
	3.04	1.83	2.21
	3.59	2.15	2.60
	2.32	1.39	1.68
2	1.43	0.86	1.04
	1.92	1.15	1.39
	2.86	1.72	2.08
	2.88	1.73	2.08
	3.86	2.31	2.80
	2.20	1.32	1.59

Distorsiones

NIVEL	Norma (1/143)	Frecuente	Ocasional	
1	1/183	1/305	1/252	
	1/168	1/280	1/232	
	1/111	1/186	1/154	1/126 1/211 1/174
	1/108	1/181	1/150	
	1/92	1/153	1/127	
	1/142	1/237	1/196	
2	1/230	1/384	1/318	
	1/172	1/286	1/237	
	1/115	1/192	1/159	1/131 1/218 1/180
	1/115	1/191	1/158	
	1/86	1/143	1/118	
	1/150	1/250	1/207	

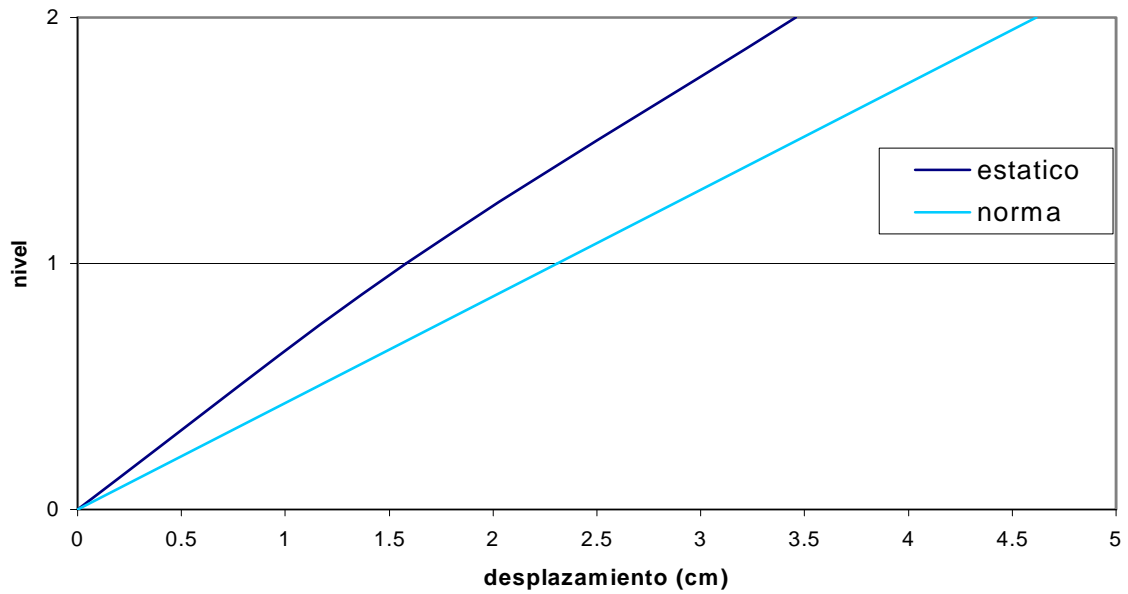
Los resultados de las distorsiones del análisis clásico para un único nivel de sismo de diseño satisfacen los requerimientos de la norma (1/143).

El promedio del análisis dinámico es 1/126, 1/211, 1/174 y 1/131, 1/218, 1/180 para el primer y segundo nivel respectivamente. Se realizaron también los cálculos para los niveles de sismo frecuente y ocasional.

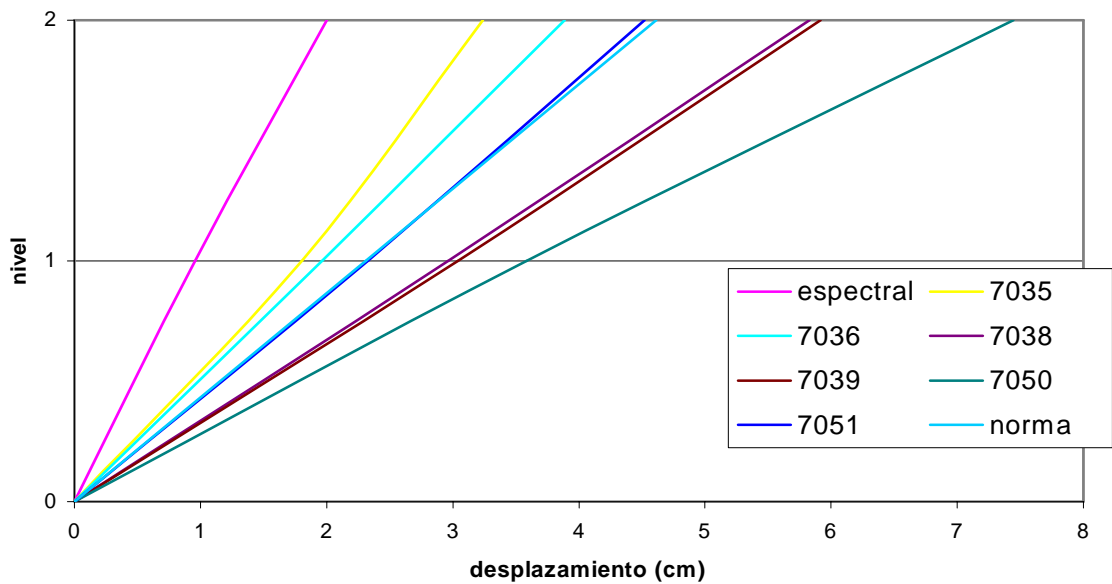
El procedimiento del cálculo se realizó con el programa SAP 2000.



**DESPLAZAMIENTO DE ENTREPISO
PROCEDIMIENTO LINEAL CLASICO - ESTATICO
(cm)**

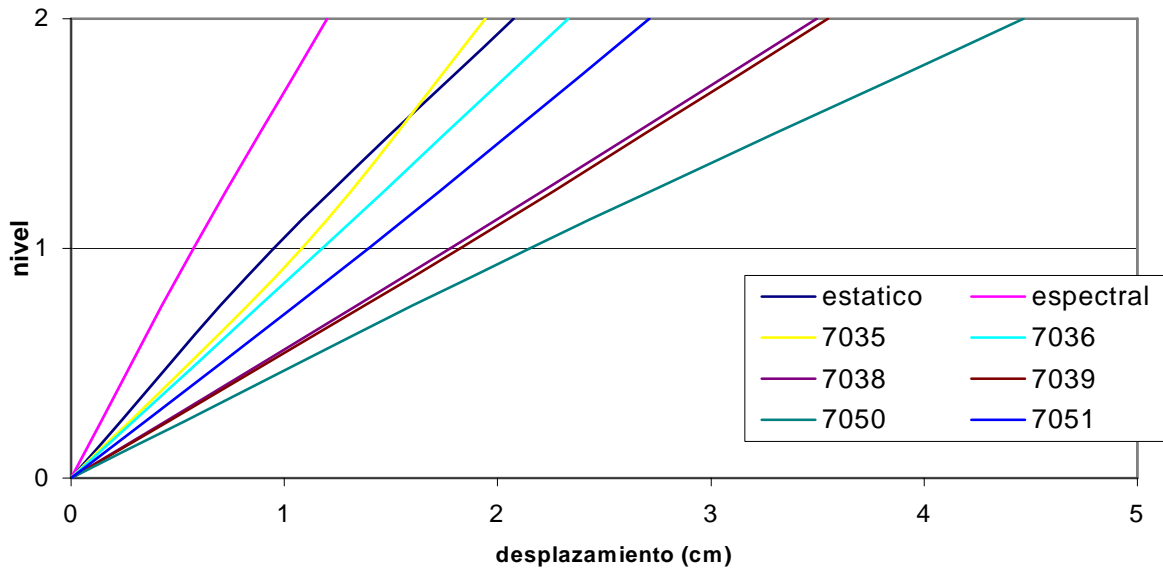


**DESPLAZAMIENTO DE ENTREPISO
PROCEDIMIENTO LINEAL DINAMICO
(cm)**

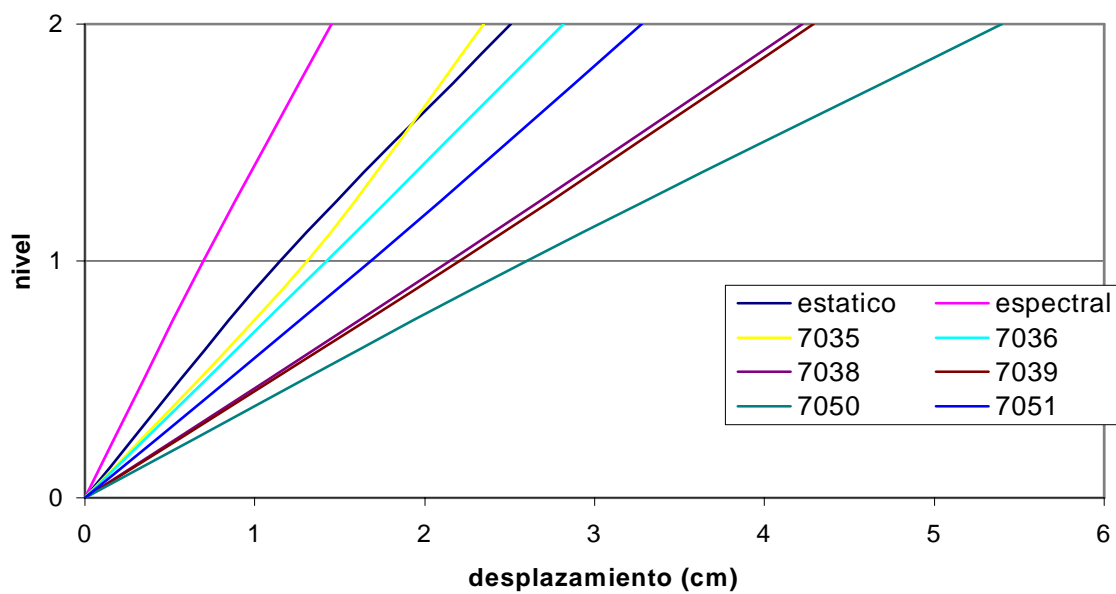




DESPLAZAMIENTO DE ENTREPISO PRCEDIMIENTO LINEAL PARA SISMO DE DISEÑO: FRECUENTE (cm)



DESPLAZAMIENTO DE ENTREPISO PRCEDIMIENTO LINEAL PARA SISMO DE DISEÑO: OCASIONAL (cm)





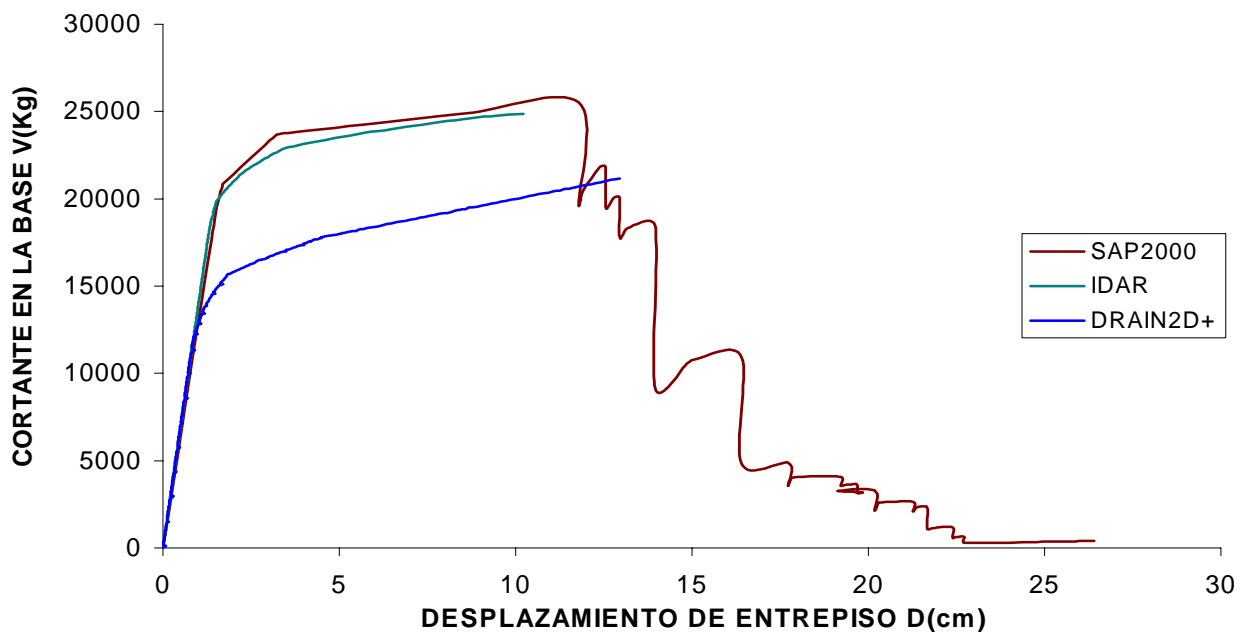
b.2 PROCEDIMIENTO NO LINEAL

B.2.1 Procedimiento no Lineal Estático:

Conforme a los criterios recomendados se ejecutará el análisis no lineal-inelástico para Sismo de Diseño : Raro y Muy Raro.

CAPACIDAD ESTRUCTURAL

ANALISIS ESTATICO INCREMENTAL



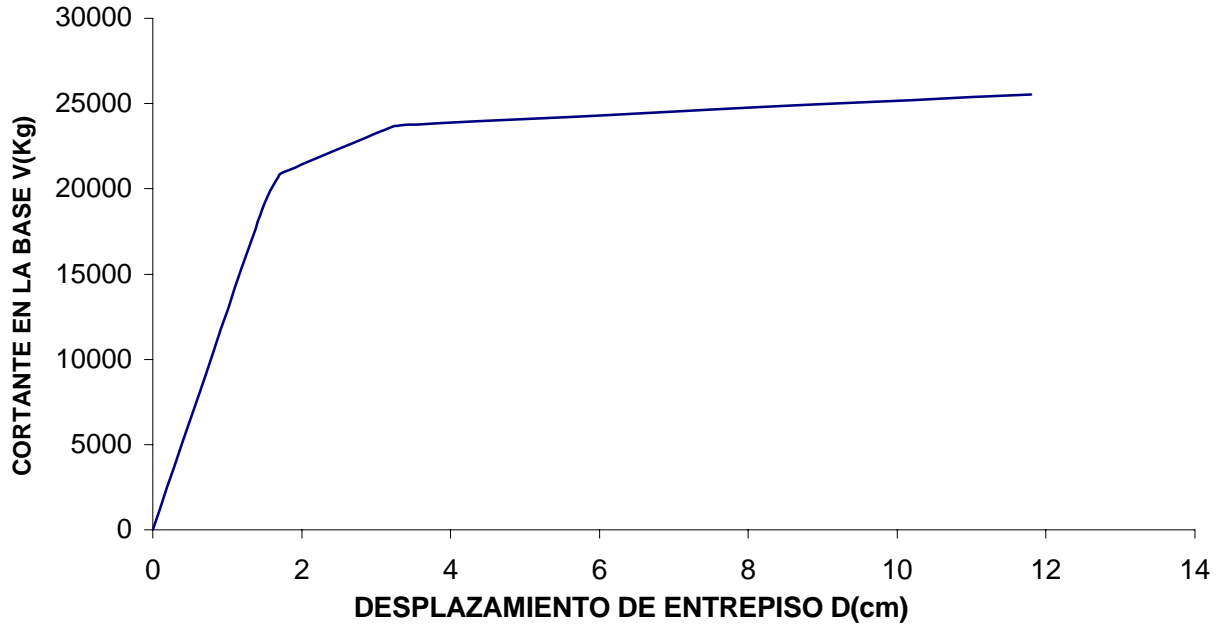
Los programas IDARC y DRAIN2D+ se ubican las rotulas plásticas automáticamente.

Para el análisis estático incremental se empleo los programas IDARC, DRAIN2D+ y SAP 2000.

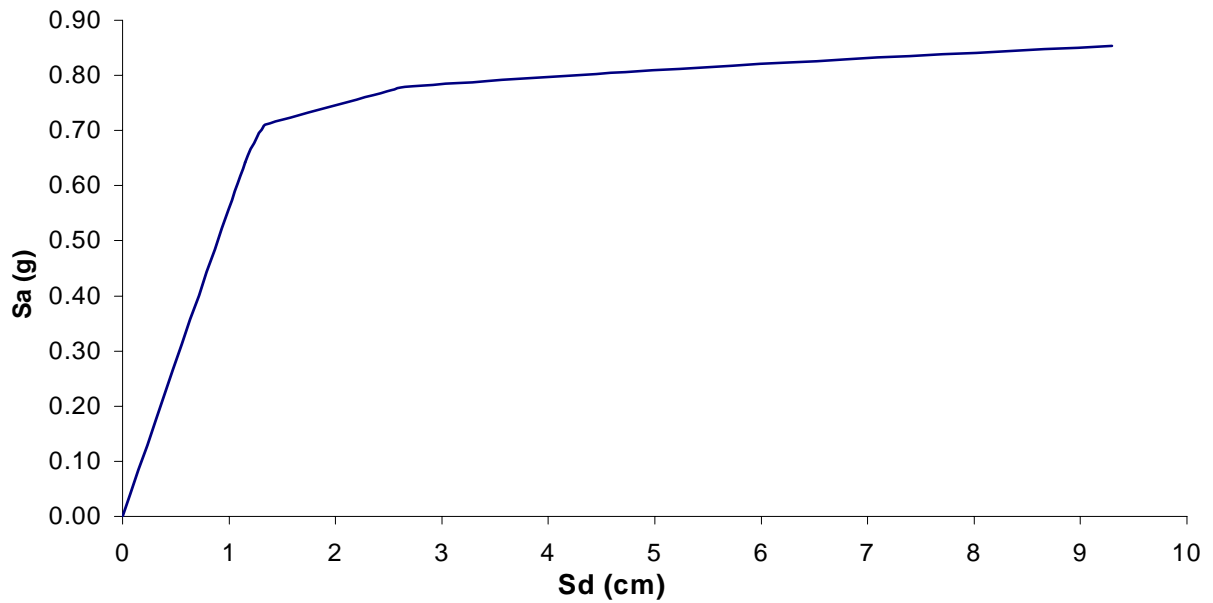
Para efectos de proseguir con el procedimiento se empleará los resultados del programa SAP 2000. Consideramos que la versión del DRAIN2D+ está orientado mayormente a estructuras de acero.



CAPACIDAD ESTRUCTURAL V - D



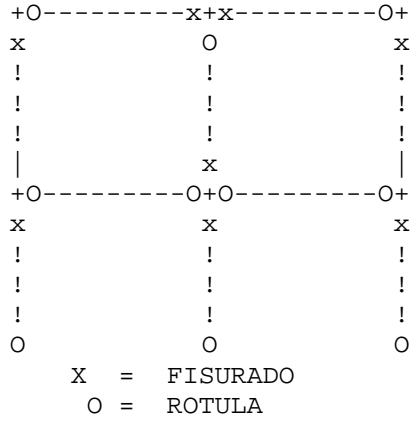
REPRESENTACION DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL EN FORMATO Sa-Sd



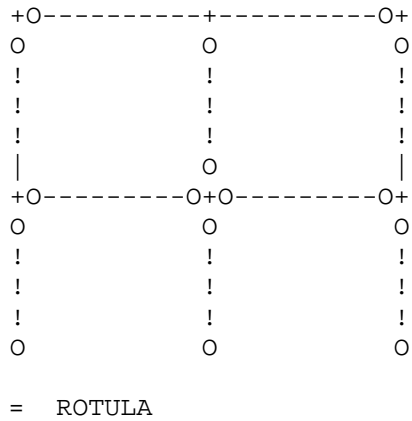


FORMA DE FALLA EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO INCREMENTAL

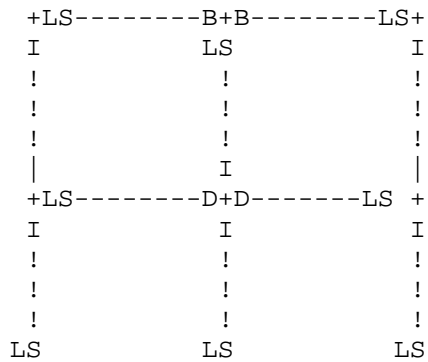
IDARC



DRAIN2D+



SAP2000



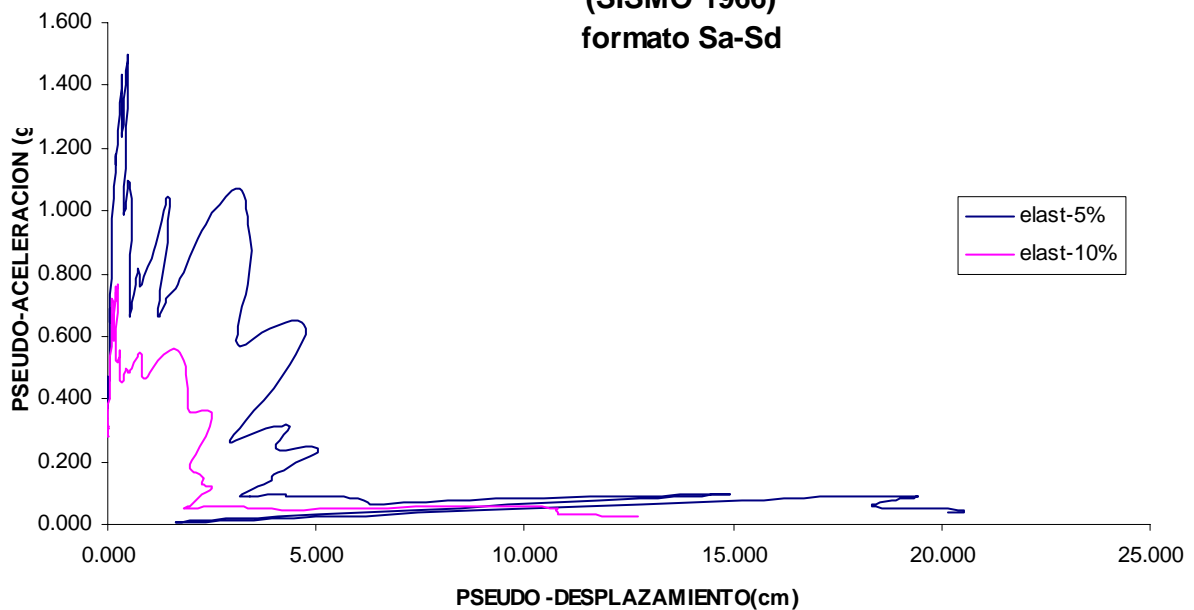
- B = FLUENCIA INICIAL
- LS= FLUENCIA MÁXIMA
- D= ZONA DEGRADADA



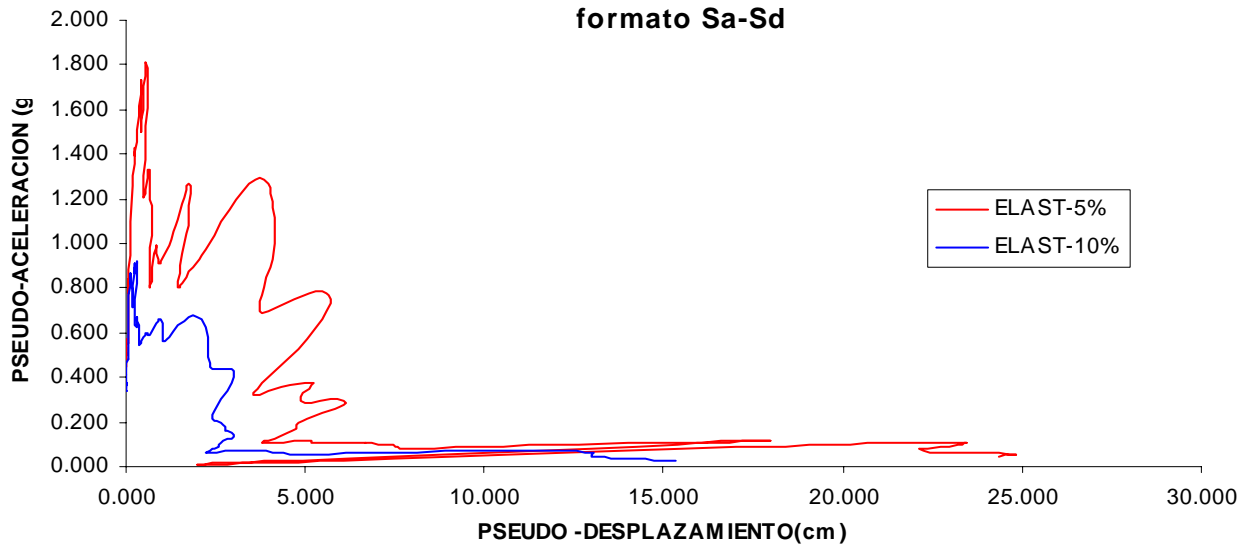
SOLICITACIÓN SÍSMICA

Se calcula los espectros de respuesta para las aceleraciones máximas previamente calculadas (Tabla 7.6): Frecuente, ocasional, raro y muy raro: 0.24 g, 0.29 g, 0.46 g, 0.54 g, respectivamente. Los factores de amplificación empleados son para sismos peruanos [47]

ESPECTRO DE RESPUESTA ELASTICO NIVEL DE SISMO: FRECUENTE (SISMO 1966) formato Sa-Sd

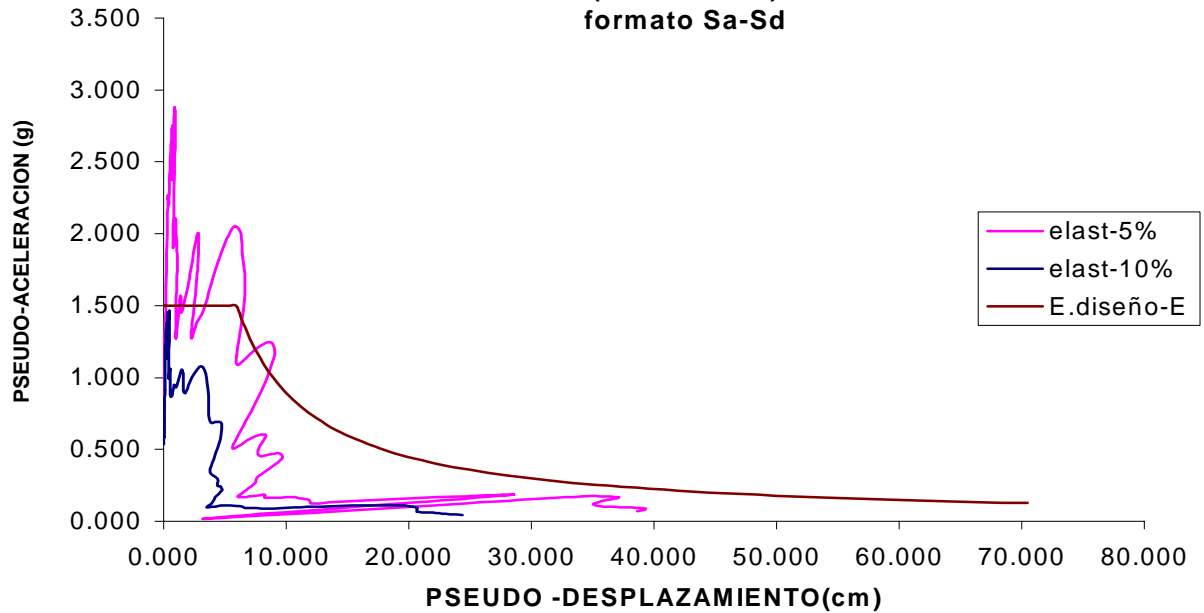


ESPECTRO DE RESPUESTA ELASTICO NIVEL DE SISMO: OCASIONAL (SISMO 1966) formato Sa-Sd

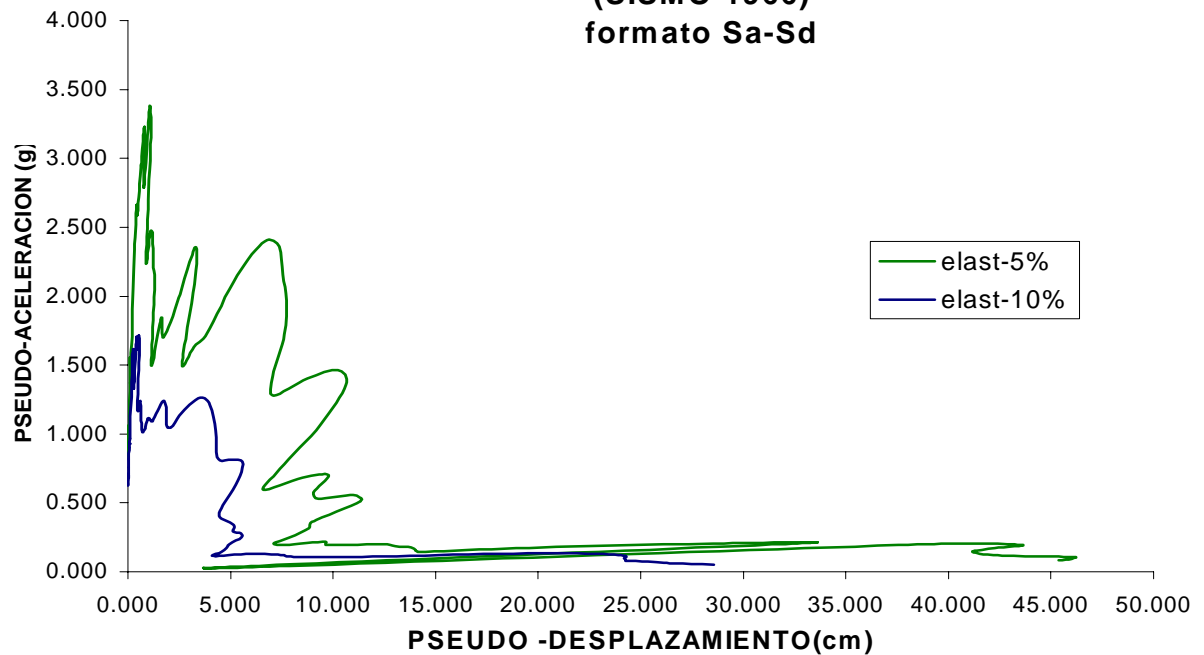




**ESPECTRO DE RESPUESTA ELASTICO
NIVEL DE SISMO: RARO
(SISMO 1966)
formato Sa-Sd**

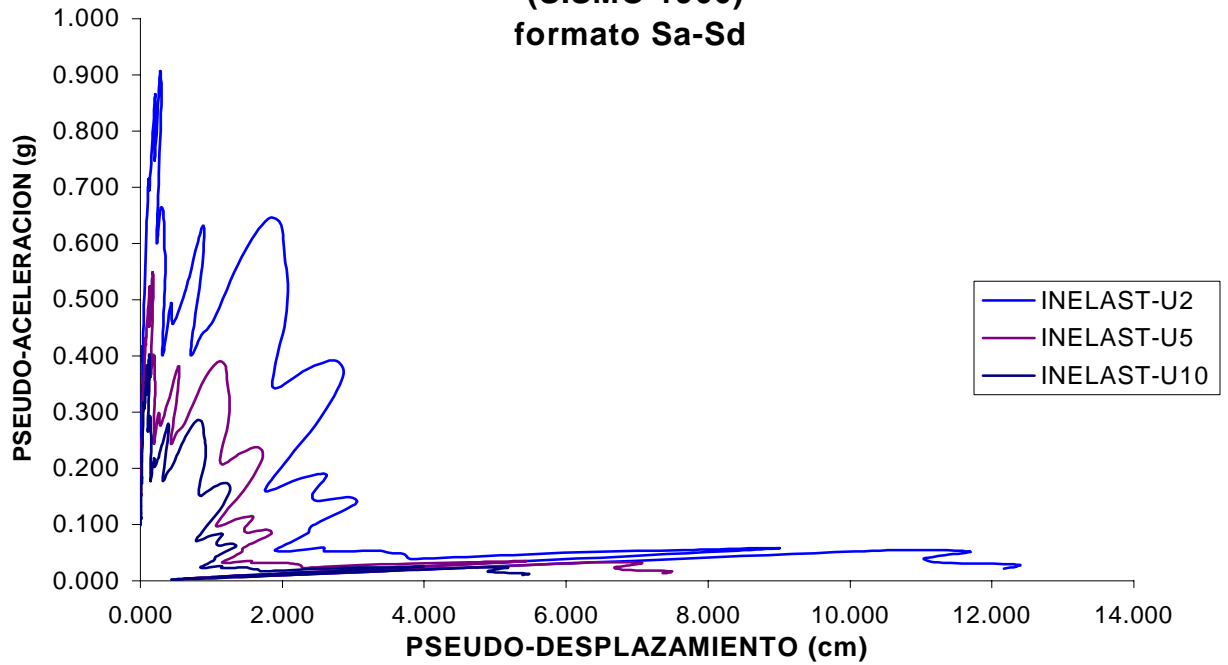


**ESPECTRO DE RESPUESTA ELASTICO
NIVEL DE SISMO: MUY RARO
(SISMO 1966)
formato Sa-Sd**

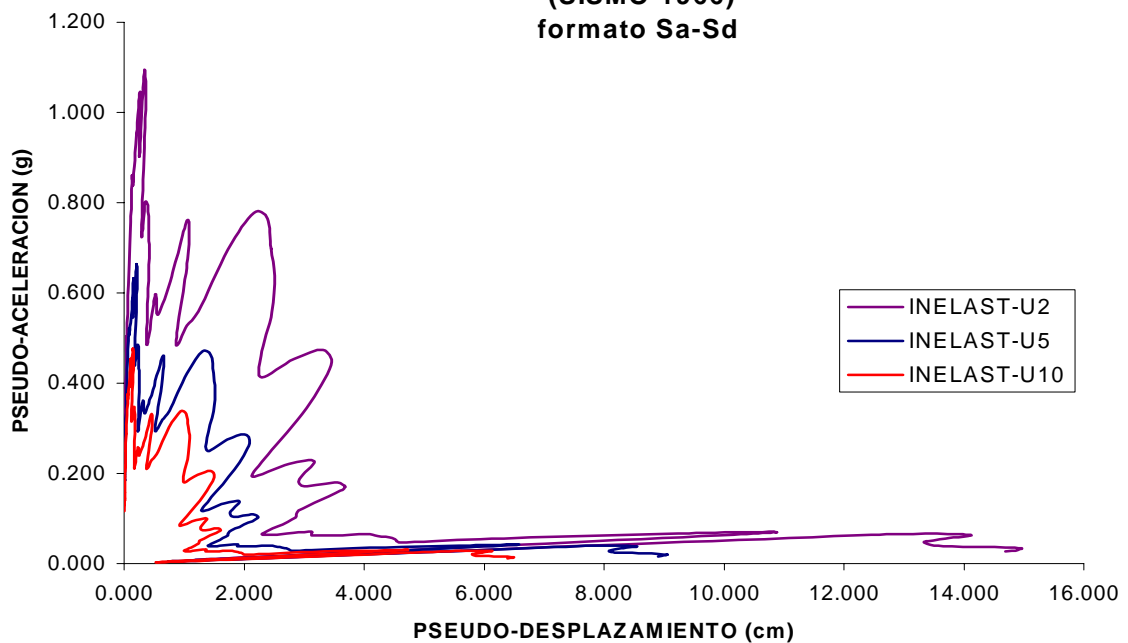


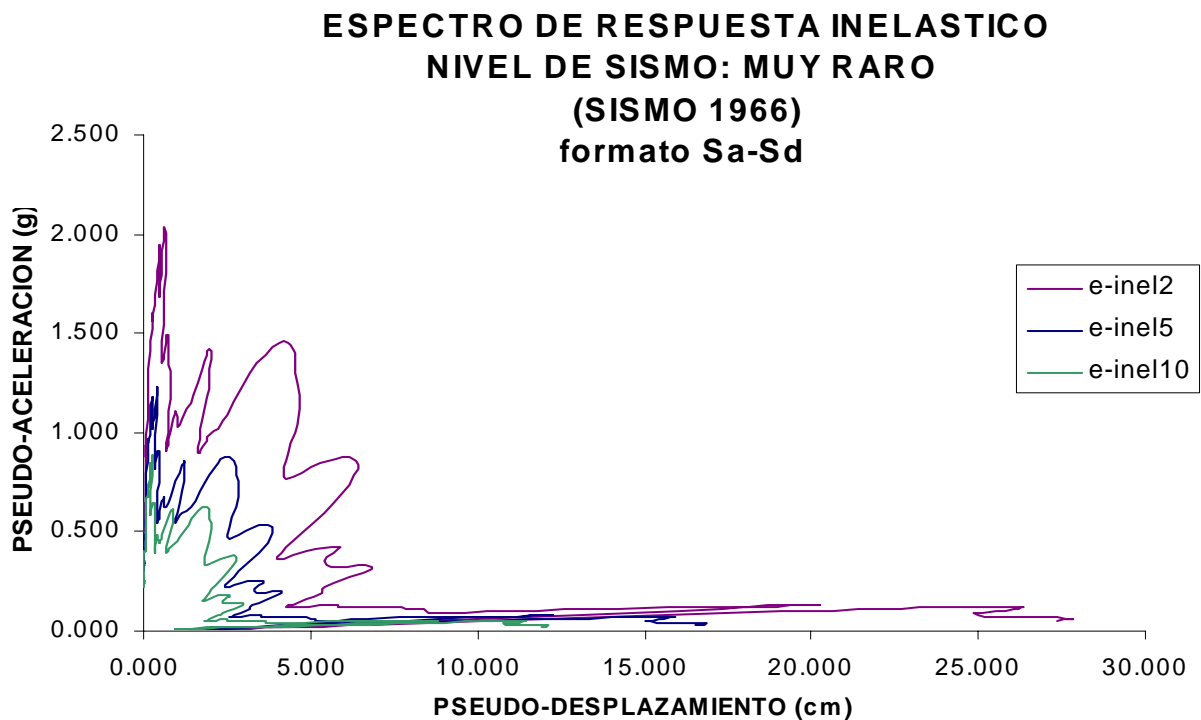
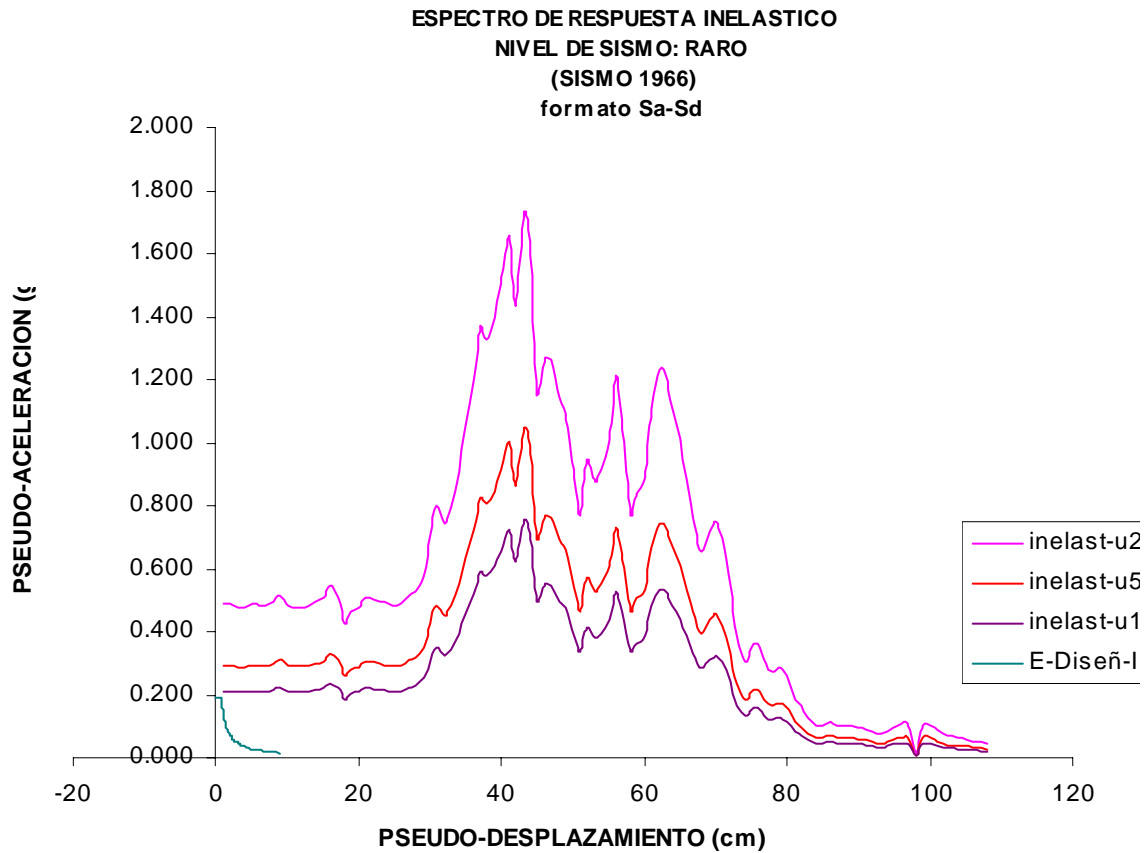


**ESPECTRO DE RESPUESTA INELASTICO
NIVEL DE SISMO: FRECUENTE
(SISMO 1966)
formato Sa-Sd**



**ESPECTRO DE RESPUESTA INELASTICO
NIVEL DE SISMO: OCASIONAL
(SISMO 1966)
formato Sa-Sd**

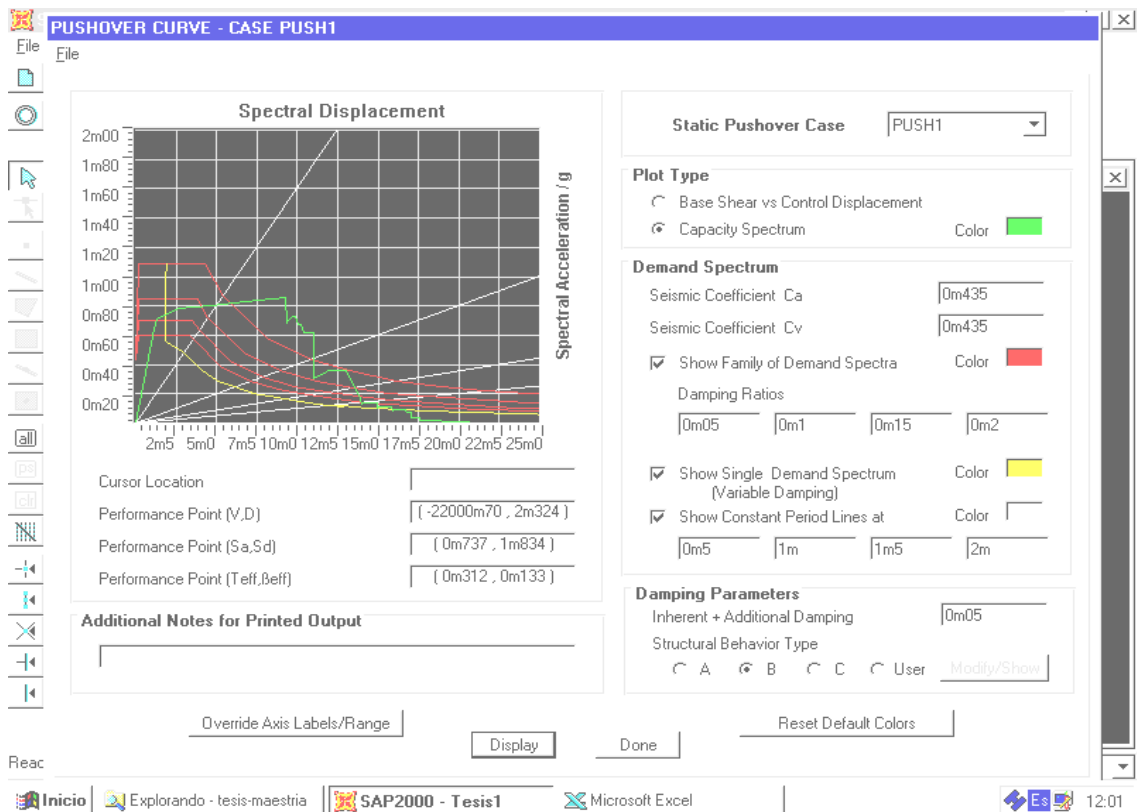
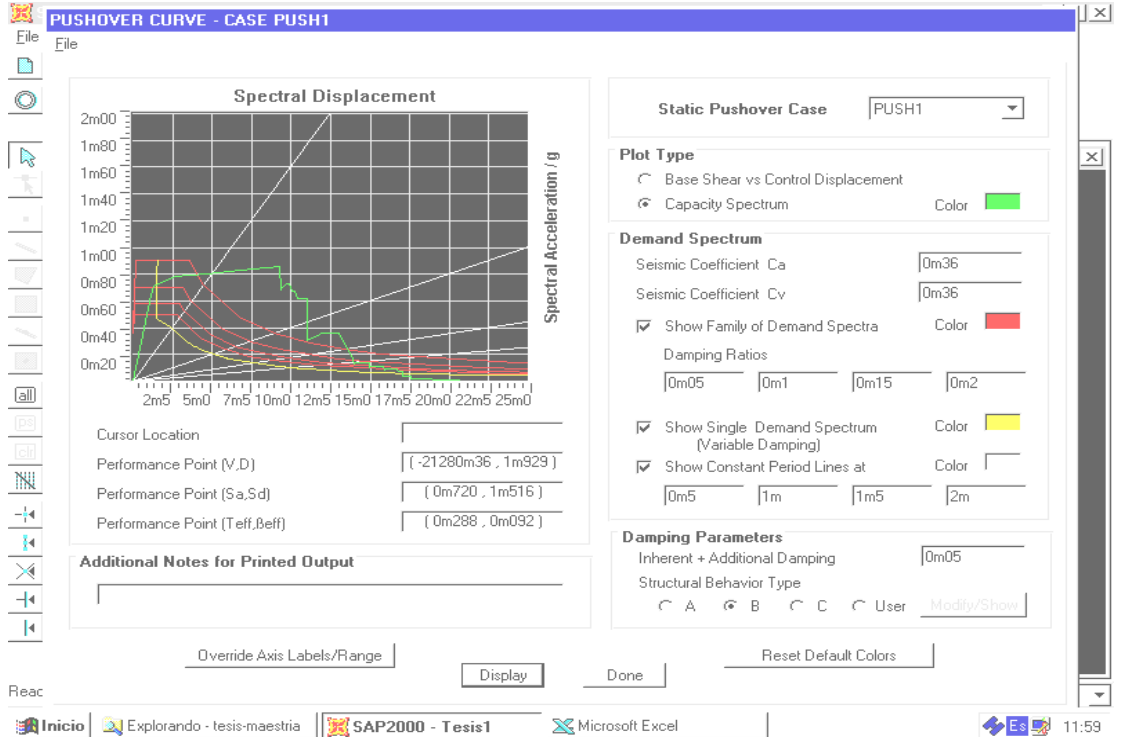






DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE

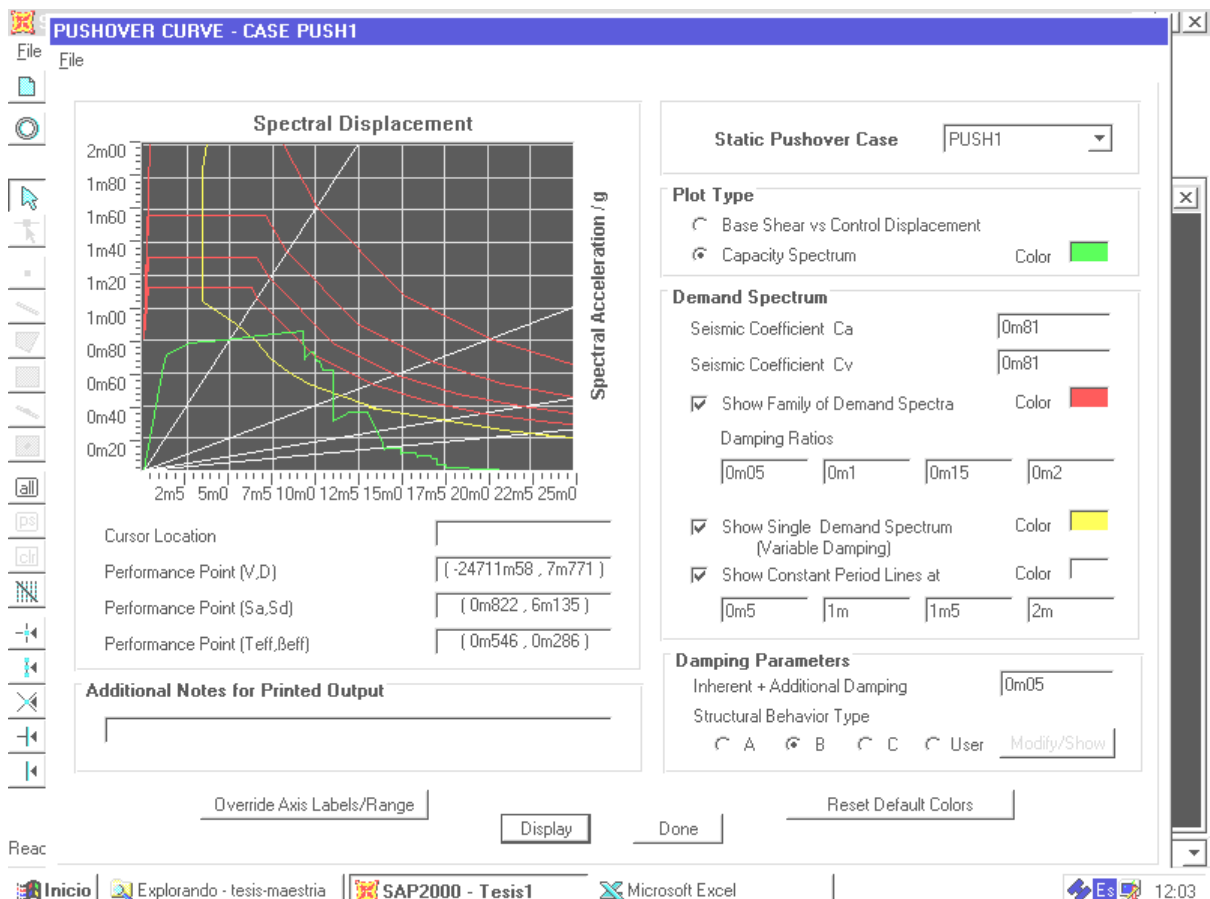
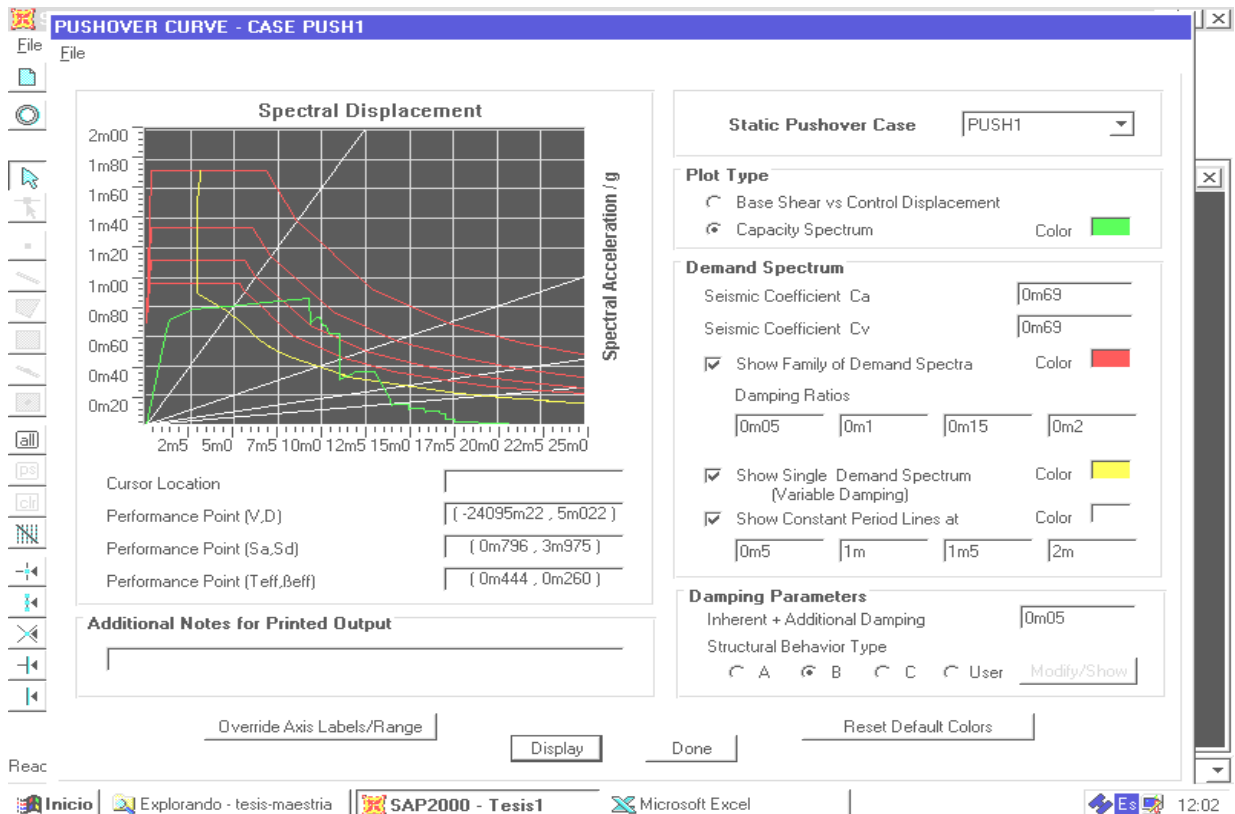
PROCEDIMIENTO DEL ATC-40





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE

Javier Francisco Taípe Carbajal

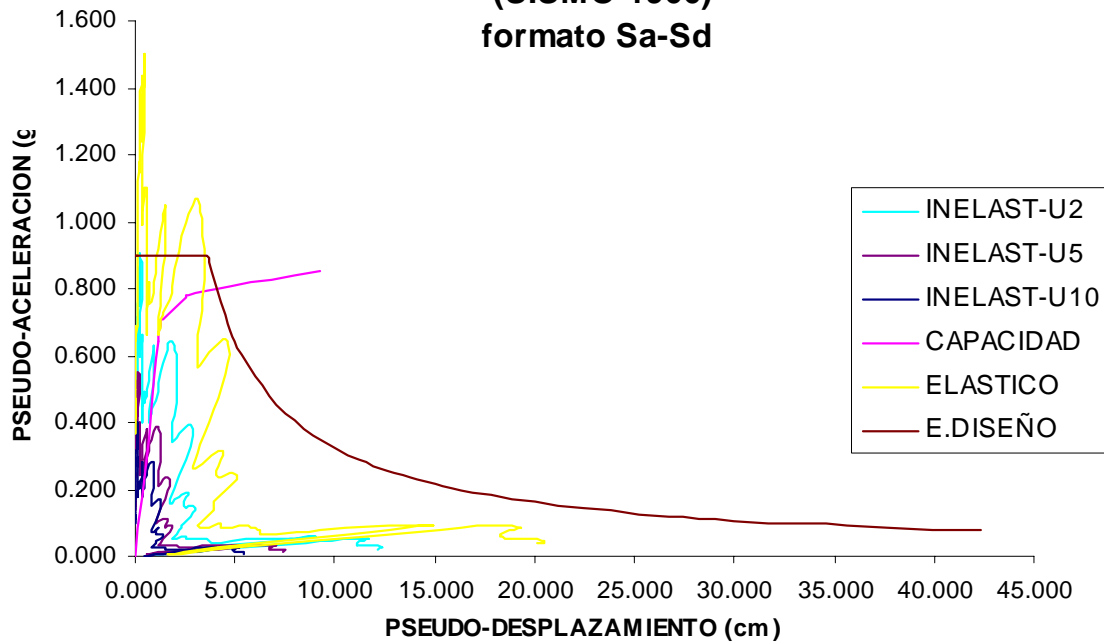




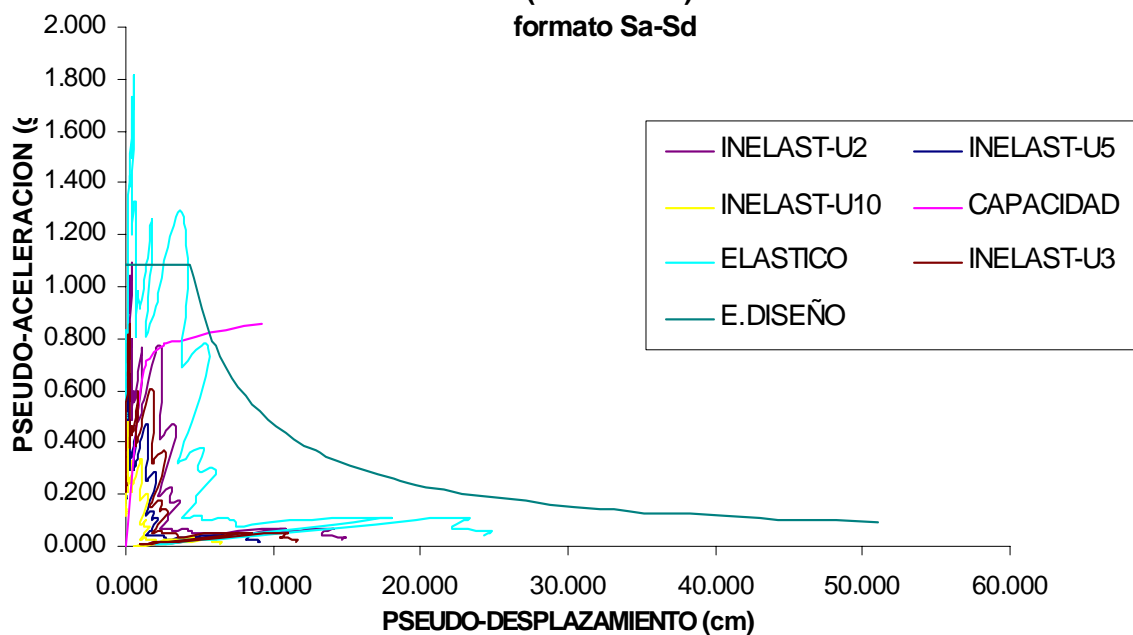
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE

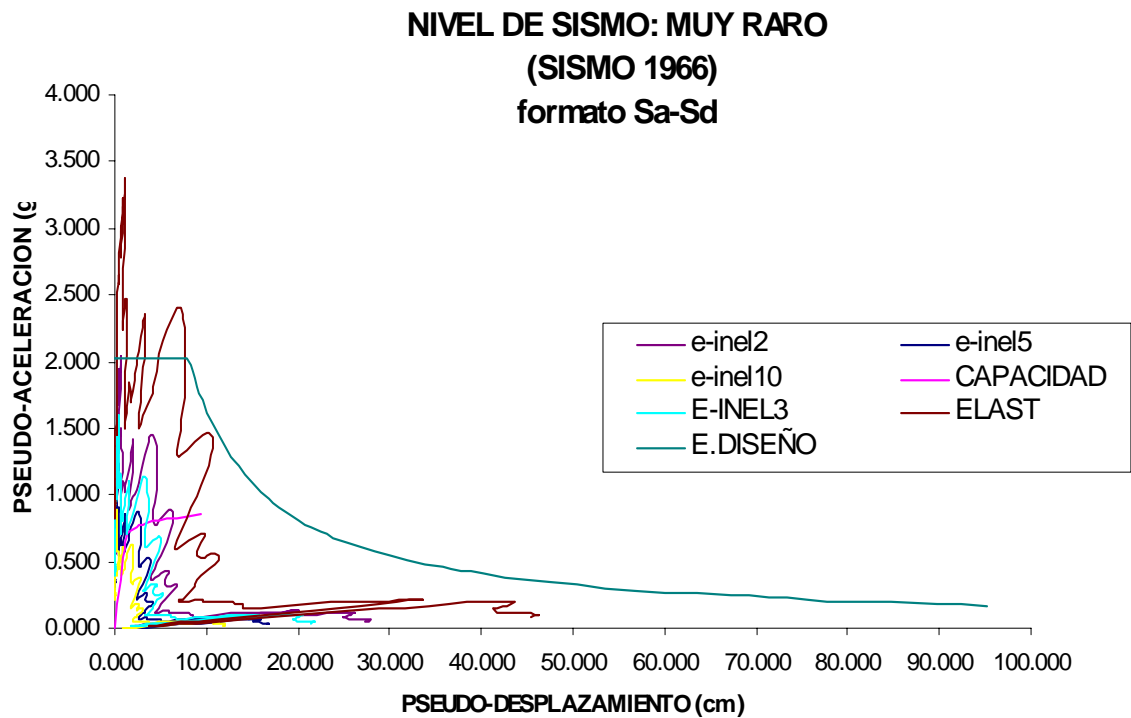
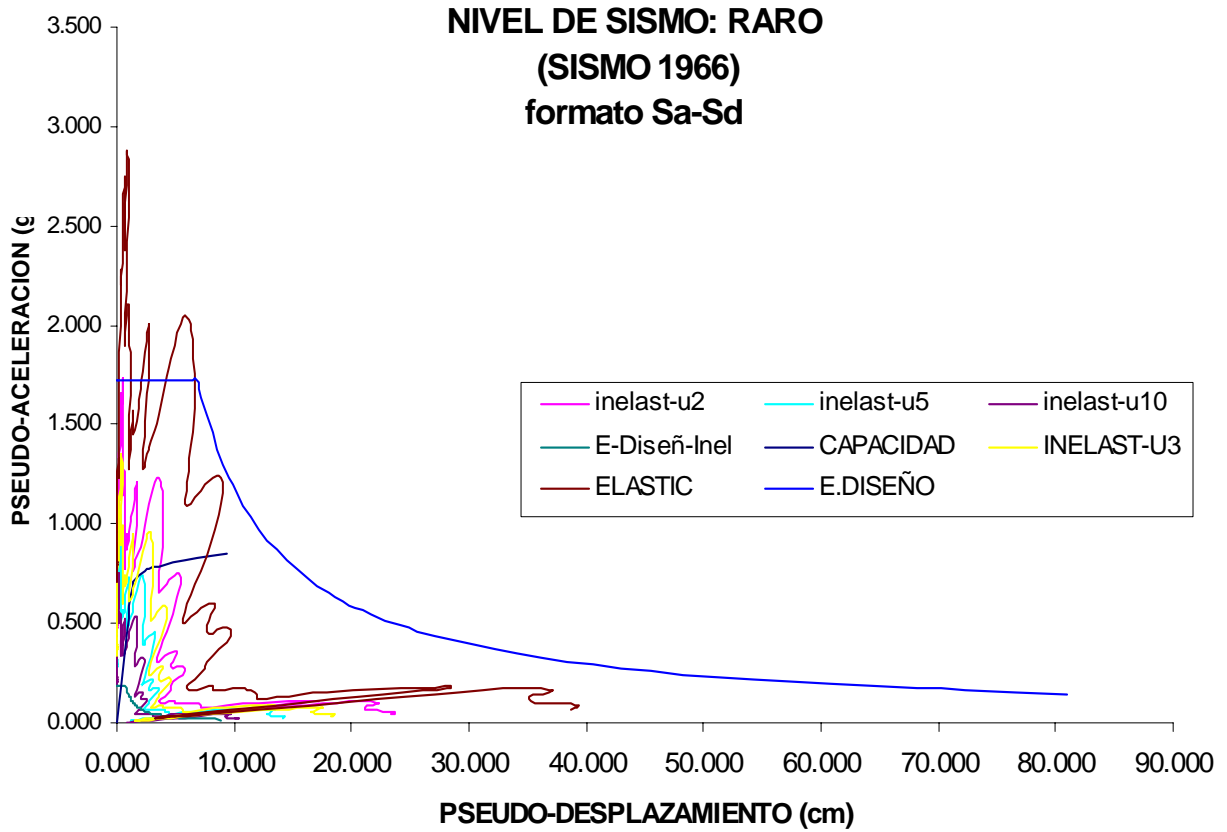
PROCEDIMIENTO DIRECTO (GRAFICO)

NIVEL DE SISMO: FRECUENTE (SISMO 1966) formato Sa-Sd



NIVEL DE SISMO: OCASIONAL (SISMO 1966) formato Sa-Sd







PROCEDIMIENTO DIRECTO-GRAFICO

Pseudo-Aceleración correspondiente a deformación de fluencia

Ay= 0.77g

Pseudo-Desplazamiento correspondiente a la fluencia

Dy= 1.51cm

SISMO FRECUENTE

ductilidad	Sd (gráfico)	
10.00		0.32
5.00		0.39
2.00		0.71
1.00		1.18

D= **1.50cm**

Es directo por estar en el rango elástico

SISMO OCASIONAL

ductilidad	Sd (gráfico)	Duct. Calc.	
10.00		0.37	0.25
5.00		0.52	0.35
3.00		0.67	0.45
2.00		2.39	1.59
1.00		3.79	2.52

D= **3.04cm**

SISMO RARO

ductilidad	Sd (gráfico)	Duct. Calc.	
10.00		0.72	0.48
5.00		0.73	0.48
3.00		3.11	2.07
2.00		3.63	2.41
1.00		7.42	4.93

D= **4.61cm**

SISMO MUY RARO

ductilidad	Sd (gráfico)	Duct. Calc.	
10.00		0.84	0.56
5.00		0.85	0.57
3.00		3.59	2.38
2.00		4.26	2.83
1.00		8.05	5.34

D= **5.41cm**



PROCEDIMIENTO DIRECTO-NUMERICO

Procedimiento directo -Método del Diagrama de Capacidad-Solicitud Sísmica

Para nivel de Sismo de Diseño: FRECUENTE

Propiedades del sistema				
T (s)	A (g)	Ay (g)	Dy (cm)	Ry (A/Ay)
0.27	0.67	0.77	1.51	0.87

Las propiedades del sistema se obtienen de la curva de capacidad y espectro de respuesta:

- T: Periodo natural
- A: Pseudo aceleración para el sistema elástico lineal
- Ay: Pseudo aceleración correspondiente a la deformación de fluencia
- DY: Deformación de fluencia
- Ry: Factor de reducción de fluencia

Ecuación de Newmark-Hall 7.33

Para el espectro de Newmark-Hall

Ta = 1/33 s

Tb = 0,125 s

Tc = 0,6634 s

Si empleamos la tercera ecuación

Ductilidad = 0.88 implica

$$Tc'' = Tc \times \sqrt{(2\mu - 1) / \mu}$$

Tc'' = 0.58
que cumple con la condición.

$$Tb < T < Tc''$$

Ecuación de Krawinkler-Nassar 7.34

Para un comportamiento fuerza-deformación elastoplástico a=1, b=0,42; luego:

c = $T / (1 + T) + 0,42 / T =$ 1.77

u = 0.88

Ecuación de Vidic, Fajfar y Fishchinger 7.35

Asumimos To = Tc = 0,6634 s; T = 0,27 menor que To; entonces

$$T < To$$

u = #¡NUM!

Newmark-Hall		Krawinkler-Nassar		Vidic et al.	
u (7,33)	D (uDy) (cm)	u (7,34)	D (uDy) (cm)	u (7,35)	D (uDy) (cm)
0.88	1.33	0.88	1.32	#¡NUM!	#¡NUM!



Para nivel de Sismo de Diseño: OCASIONAL

Propiedades del sistema				
T (s)	A (g)	A _y (g)	D _y (cm)	R _y (A/A _y)
0.27	0.81	0.77	1.51	1.05

Las propiedades del sistema se obtienen de la curva de capacidad y espectro de respuesta:

- T: Periodo natural
- A: Pseudo aceleración para el sistema elástico lineal
- A_y: Pseudo aceleración correspondiente a la deformación de fluencia
- D_y: Deformación de fluencia
- R_y: Factor de reducción de fluencia

Ecuación de Newmark-Hall 7.33

Para el espectro de Newmark-Hall

T_a = 1/33 s

T_b = 0,125 s

T_c = 0,6634 s

Si empleamos la tercera ecuación

Ductilidad = $T_c'' = T_c \times \sqrt{(2\mu - 1) / \mu}$ 1.05 implica

T_c'' = 0.70
que cumple con la condición.

$T_b < T < T_c''$

Ecuación de Krawinkler-Nassar 7.34

Para un comportamiento fuerza-deformación elastoplástico a=1, b=0,42; luego:

c = $T / (1 + T) + 0,42 / T =$ 1.77

u = 1.05

Ecuación de Vidic, Fajfar y Fishchinger 7.35

Asumimos T_o = T_c = 0,6634 s; T = 0,27 menor que T_o; entonces

$T < T_o$

u = 1.08438846

Newmark-Hall		Krawinkler-Nassar		Vidic et al.	
u (7,33)	D (uD _y) (cm)	u (7,34)	D (uD _y) (cm)	u (7,35)	D (uD _y) (cm)
1.05	1.59	1.05	1.59	1.08	1.63



Para nivel de Sismo de Diseño: RARO

Propiedades del sistema				
T (s)	A (g)	Ay (g)	Dy (cm)	Ry (A/Ay)
0.27	1.29	0.77	1.51	1.67

Las propiedades del sistema se obtienen de la curva de capacidad y espectro de respuesta:

- T: Periodo natural
- A: Pseudo aceleración para el sistema elástico lineal
- Ay: Pseudo aceleración correspondiente a la deformación de fluencia
- DY: Deformación de fluencia
- Ry: Factor de reducción de fluencia

Ecuación de Newmark-Hall 7.33

Para el espectro de Newmark-Hall

Ta = 1/33 s

Tb = 0,125 s

Tc = 0,6634 s

Si empleamos la tercera ecuación

Ductilidad = $Tc'' = Tc \times \sqrt{(2\mu - 1) / \mu}$ 1.90 implica

Tc'' = 1.11
que cumple con la condición.

$Tb < T < Tc''$

Ecuación de Krawinkler-Nassar 7.34

Para un comportamiento fuerza-deformación elastoplástico a=1, b=0,42; luego:

c = $T / (1 + T) + 0,42 / T =$ 1.77

u = 1.84

Ecuación de Vidic, Fajfar y Fishchinger 7.35

Asumimos To = Tc = 0,6634 s; T = 0,27 menor que To; entonces

$T < To$

u = 2.2316746

Newmark-Hall		Krawinkler-Nassar		Vidic et al.	
u (7,33)	D (uDy) (cm)	u (7,34)	D (uDy) (cm)	u (7,35)	D (uDy) (cm)
1.90	2.85	1.84	2.76	2.23	3.36



Para nivel de Sismo de Diseño: MUY RARO

Propiedades del sistema				
T (s)	A (g)	A _y (g)	D _y (cm)	R _y (A/A _y)
0.27	1.51	0.77	1.51	1.96

Las propiedades del sistema se obtienen de la curva de capacidad y espectro de respuesta:

- T: Periodo natural
- A: Pseudo aceleración para el sistema elástico lineal
- A_y: Pseudo aceleración correspondiente a la deformación de fluencia
- D_y: Deformación de fluencia
- R_y: Factor de reducción de fluencia

Ecuación de Newmark-Hall 7.33

Para el espectro de Newmark-Hall

T_a = 1/33 s

T_b = 0,125 s

T_c = 0,6634 s

Si empleamos la tercera ecuación

Ductilidad = $T_c'' = T_c \times \sqrt{(2\mu - 1) / \mu}$ 2.42 implica

T_c'' = 1.30
que cumple con la condición.

$T_b < T < T_c''$

Ecuación de Krawinkler-Nassar 7.34

Para un comportamiento fuerza-deformación elastoplástico a=1, b=0,42; luego:

c = $T / (1 + T) + 0,42 / T =$ 1.77

u = 2.30

Ecuación de Vidic, Fajfar y Fishchinger 7.35

Asumimos T_o = T_c = 0,6634 s; T = 0,27 menor que T_o; entonces

$T < T_o$

u = 2.79987698

Newmark-Hall		Krawinkler-Nassar		Vidic et al.	
u (7,33)	D (uD _y) (cm)	u (7,34)	D (uD _y) (cm)	u (7,35)	D (uD _y) (cm)
2.42	3.65	2.30	3.46	2.80	4.22



PROCEDIMIENTO DEL FEMA-273
(METODO DE COEFICIENTE DE DESPLAZAMIENTO)

Periodo efectivo

Se toma de la curva de capacidad

Te= 0.27s

Factor de Modificación: Co.

Para dos niveles de una edificación

Co= 1.20

Factor de Modificación: C1.

Para Te menor que Tp (0,4s)

C1	1.29	frecuente
C1	1.66	ocasional
C1	2.00	raro
C1	2.00	muy raro

Factor de Modificación: C2.

C2	1.00	frecuente
C2	1.00	ocasional
C2	1.10	raro
C2	1.20	muy raro

Pseudo-Aceleración: Sa

Corresponde a Te.

Sa	0.67	frecuente
Sa	0.81	ocasional
Sa	1.29	raro
Sa	1.51	muy raro

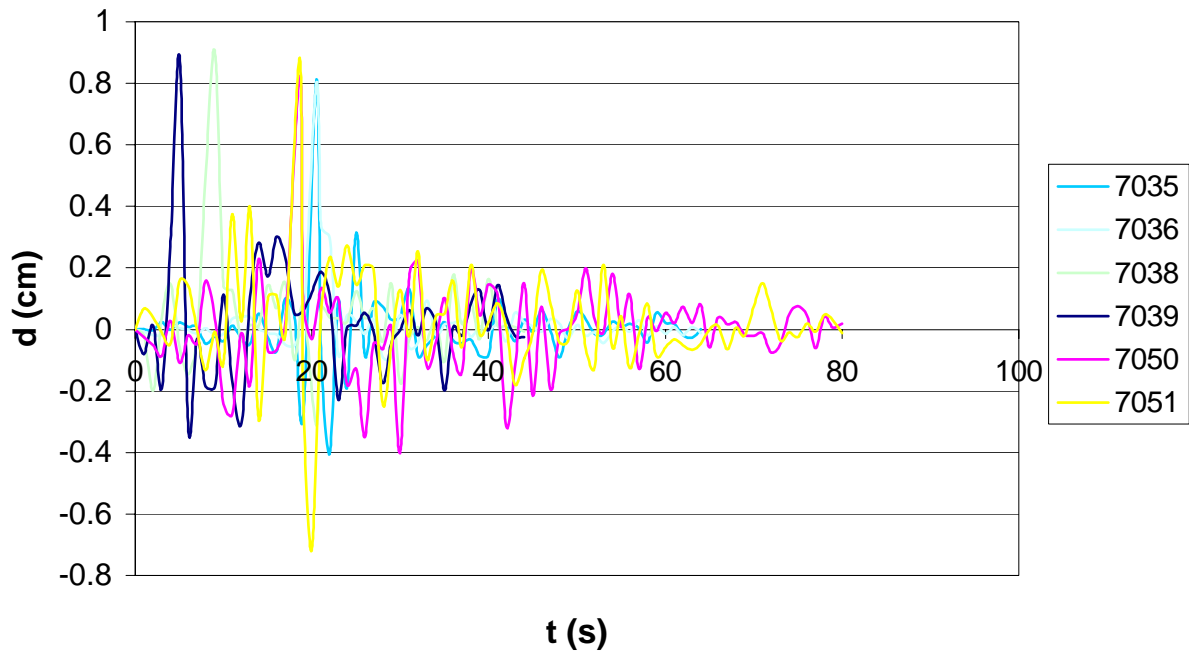
Desplazamiento Ec. (7,36)

frecuente	1.86cm
ocasional	2.89cm
raro	6.06cm
muy raro	7.76cm

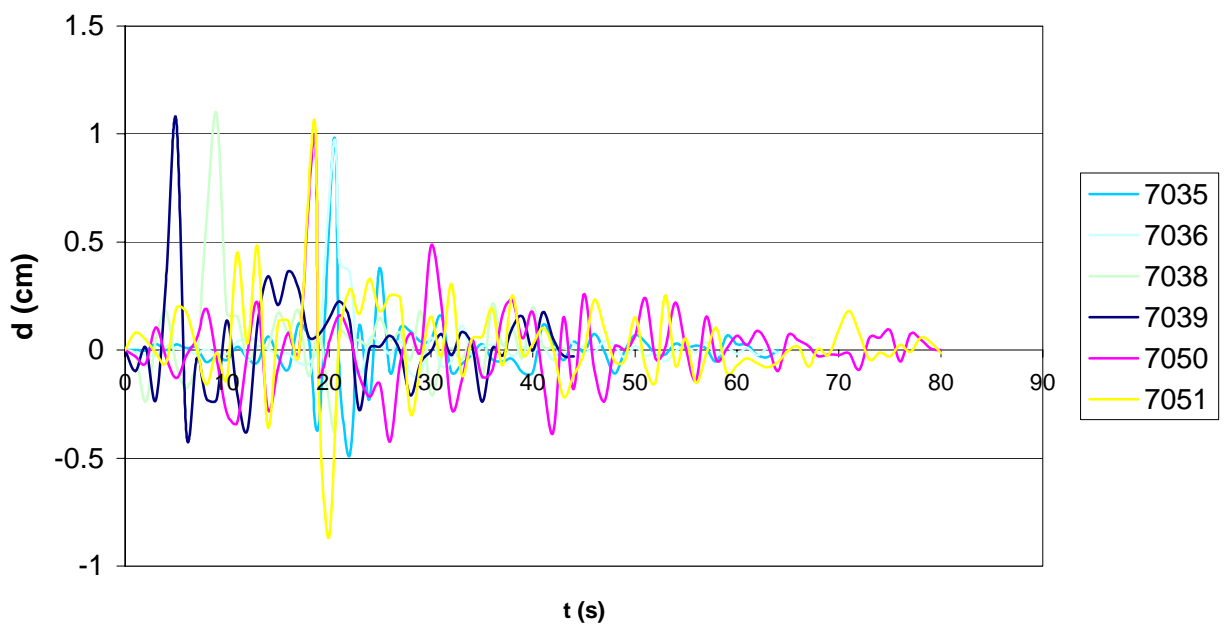


b.2.2. Procedimiento No Lineal Dinámico

DESPLAZAMIENTO MAXIMO SISMO DE DISEÑO: FRECUENTE

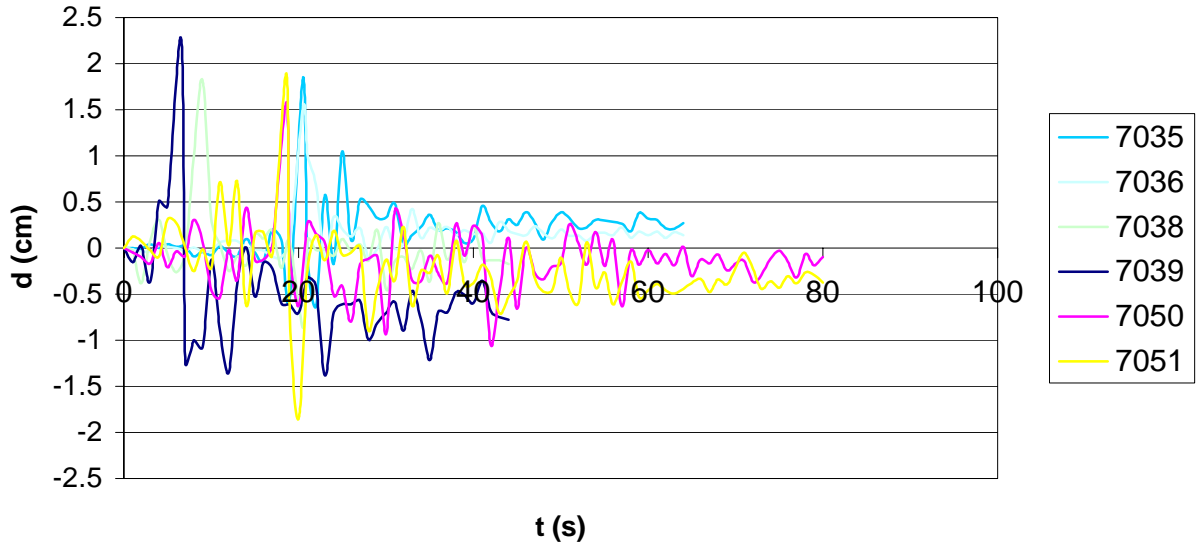


DESPLAZAMIENTO MAXIMO SISMO DE DISEÑO: OCASIONAL

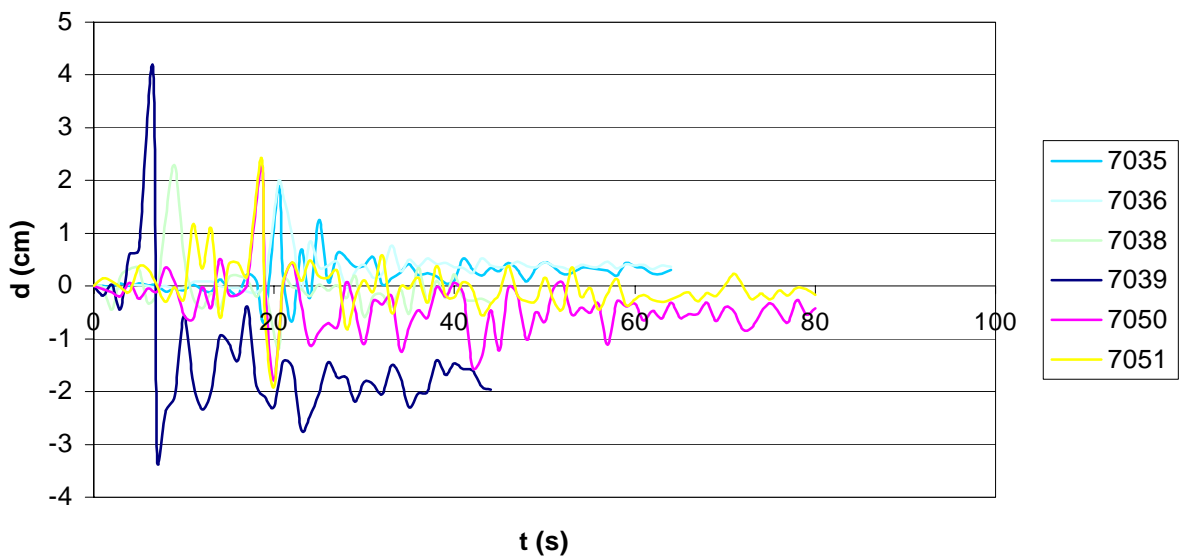




DESPLAZAMIENTO MAXIMO SISMO DE DISEÑO: RARO

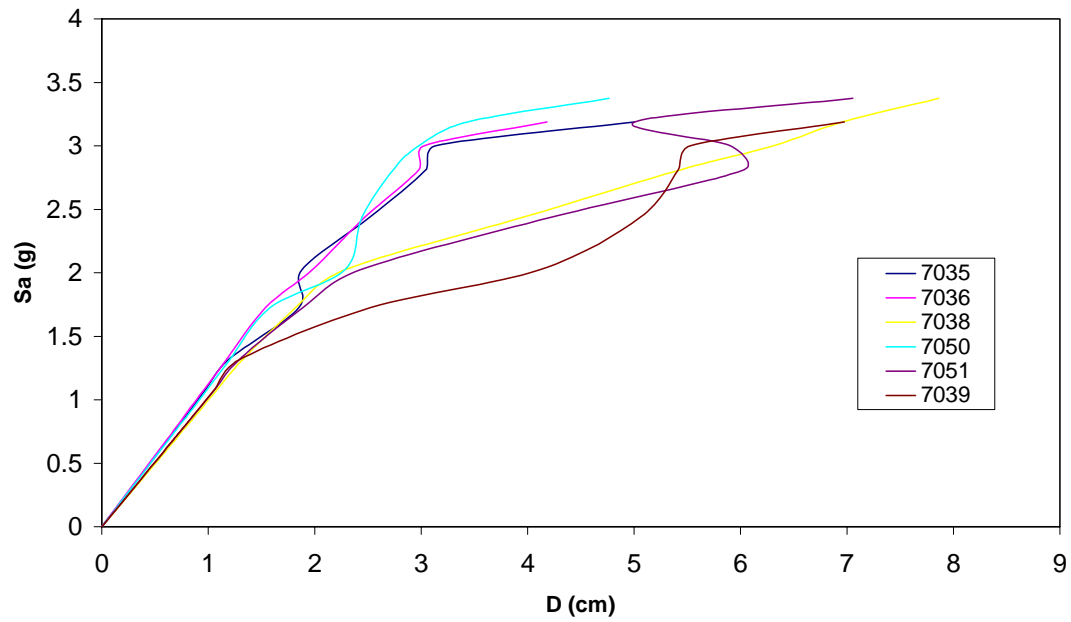


DESPLAZAMIENTO MAXIMO SISMO DE DISEÑO: MUY RARO

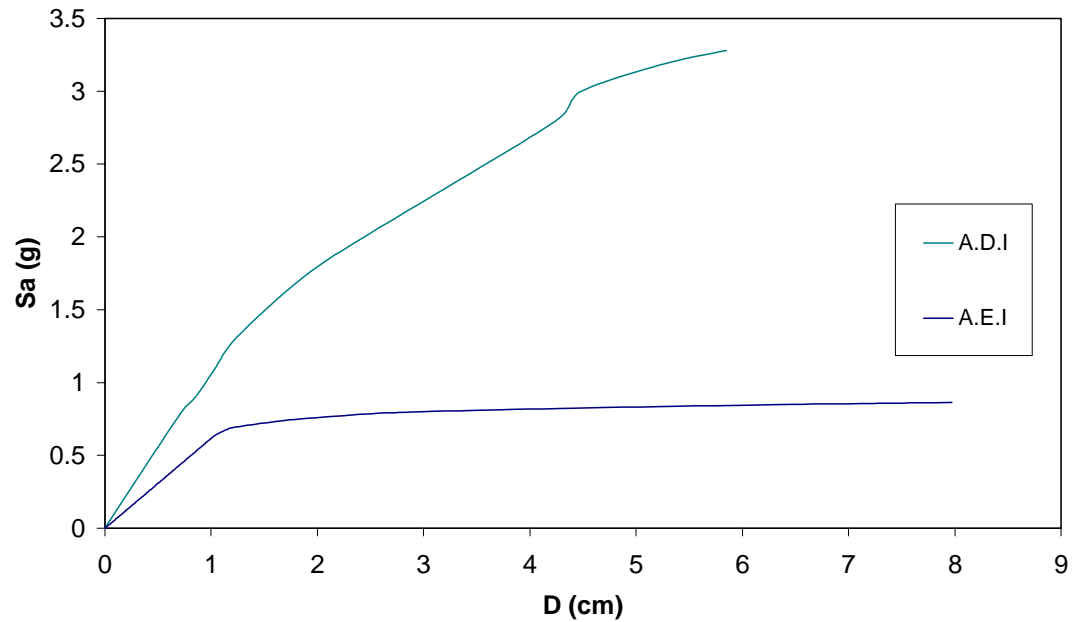




ANALISIS DINAMICO INCREMENTAL



ANALISIS DINAMICO INCREMENTAL & ANÁLISIS ESTÁTICO INCREMENTAL





Del análisis dinámico incremental se obtiene, el promedio de los valores de desplazamiento máximo.

$$C= 5.9736 \text{ cm}$$

Igualmente el Factor de Resistencia ϕ ; para los seis registros sísmicos; para aceleraciones máximas de 0.60g y 0.46g correspondientes a Probabilidades de Excedencia de 2% en 50 años y 10% en 50 años respectivamente; resulta:

$$\phi=0.9327$$

por lo que $\phi C=5.5715$

con estos resultados y con las distorsiones calculadas, estimaremos el parámetro o índice de confiabilidad:

$$\lambda = \frac{[1.2-1.8] \times [0.90-1.30] \times [(.904-1.93)^{(1.21-3.08)}]}{5.5715}$$

Aproximadamente para un análisis estático; los resultados son:

$$\lambda = \frac{[1.2-1.8] \times [0.90-1.30] \times [(.904-1.93)^{(1.21-3.08)}]}{5.5715}$$

$$\lambda=0.30$$

que corresponde a un nivel de confianza de 95% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño frecuente

$$\lambda=0.40$$

que corresponde a un nivel de confianza de 90% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño ocasional

$$\lambda=1.40$$

que corresponde a un nivel de confianza de 40% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño raro

$$\lambda=1.88$$

que corresponde a un nivel de confianza de 30% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño muy raro.

Aproximadamente para un análisis dinámico; los resultados son:

$$\lambda=0.30$$

que corresponde a un nivel de confianza de 95% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño frecuente

$$\lambda=0.30$$

que corresponde a un nivel de confianza de 95% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño ocasional

$$\lambda=0.81$$

que corresponde a un nivel de confianza de 70% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño raro

$$\lambda=1.33$$

que corresponde a un nivel de confianza de 40% aproximadamente, para un nivel de sismo de diseño muy raro.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE**
Javier Francisco Taipe Carbajal



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE**
Javier Francisco Taipe Carbajal



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
**CRITERIOS DE DISEÑO POR DESEMPEÑO PARA LA NORMA PERUANA DE DISEÑO
SISMORRESISTENTE**
Javier Francisco Taipe Carbajal



Capítulo 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- 1 Los efectos del fenómeno sísmico en las obras civiles aún no pueden ser controladas totalmente, pese a la existencia de códigos de diseño sismorresistente, como demuestran las consecuencias sociales y económicas de los sismos ocurridos a lo largo de la historia.
- 2 Los requerimientos de los códigos de diseño no interpretan el desempeño sismorresistente de las obras civiles.
- 3 Los procedimientos de diseño “clásicos” o convencionales no interpretan la filosofía de diseño sismorresistente(denominado Filosofía y Principios de Diseño, en el acápite 1.2 de nuestro código).
- 4 El marco de desarrollo o estructura conceptual del Diseño por Desempeño es integral: etapa de proyecto, etapa de construcción y etapa de mantenimiento.
- 5 La mayoría de investigaciones consultadas para la Evaluación de Desempeño, desarrollan procedimientos de análisis estático no lineal-inelástico, principalmente basados en el método de espectro de capacidad.
- 6 Los parámetros de respuesta para definir criterios de aceptabilidad pueden ser: distorsión, desplazamiento, resistencia, demanda de ductilidad, demanda de energía, aceleración y velocidad. Generalmente la distorsión o desplazamiento de entrepiso es el que mayormente se emplea.
- 7 La metodología de Diseño por Desempeño puede ser aplicable para todas las obras civiles.



- 8 El Diseño por Desempeño interpreta la filosofía de diseño sismorresistente de la mayoría de códigos; en tal sentido se plantea Niveles de Desempeño: Habitabilidad Inmediata, Reparabilidad y Prevención del Colapso; Sismo de Diseño: Frecuente, Ocasional, Raro y Muy Raro; Objetivos de Desempeño: para obras civiles comunes, obras civiles esenciales y para obras civiles críticas.
- 9 La distorsión única especificada en nuestro código, equivale aproximadamente a un nivel de Sismo de Diseño Raro.
- 10 Los resultados del análisis lineal-elástico para niveles de Sismo de Diseño: Frecuente y Ocasional; discrepan en 150% aproximadamente. La mayor discrepancia se da en los resultados obtenidos por los procedimientos dinámicos (análisis espectral y tiempo-historia). El procedimiento estático discrepa del análisis espectral en 70% aproximadamente y; 48% con el procedimiento lineal dinámico (tiempo-historia).
- 11 Los resultados del análisis no lineal-inelástico para nivel de Sismo de Diseño: Raro, discrepan en 139% aproximadamente. Los resultados del procedimiento estático discrepan en 70% aproximadamente.
- 12 Los resultados del análisis no lineal-inelástico para nivel de Sismo de Diseño: Muy Raro, discrepan en 88% aproximadamente. Los resultados del procedimiento estático discrepa en 75% aproximadamente.
- 13 Los resultados de distorsión o desplazamiento de entrepiso del análisis no lineal-inelástico dinámico son menores que los resultados del análisis no lineal-inelástico estático; sin embargo a nivel de resultados de cortante en la base la discrepancia es menor.
- 14 La forma de distribución de la fuerza lateral en un análisis estático incremental influye principalmente en el desplazamiento máximo.



8.2 RECOMENDACIONES

- 1 Los criterios recomendados deben complementarse con trabajos experimentales y analíticos en nuestro medio.
- 2 Los trabajos experimentales deben estar orientados principalmente a la evaluación cualitativa de los Niveles de Desempeño propuestos; a nivel de sistema estructural, sistema no estructural y contenido de una obra civil.
- 3 Los trabajos analíticos deben orientarse principalmente a la reducción de la discrepancia de los resultados entre procedimientos de análisis estático y dinámico; mediante la definición apropiada de aspectos como: forma de histéresis, factor de amortiguamiento, entre otros aspectos que influyen en el tamaño o valor de los resultados.



REFERENCIA

1. BERTERO, R. BERTERO V. 2001 "Ingeniería Sísmica basada en el Desempeño de las Construcciones", 2° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España
2. HAMBURGER, R.O. 1996, "Performance-Based Seismic Engineering: The Next Generation of Structural Engineering Practice", EQE Reference Center. USA
3. PIQUE DEL POZO, J. 1995 "Reglas de Buena Práctica. Norma: Norma Peruana", Cuzco -Perú
4. SEAOC, 1995, "Performance Based Seismic Engineering of Buildings", SEAOC-Vision 2000- California
5. COLLINS, K. R., 1998, " Reliability-Based Design in the Context of Performance-Based Design " Structural Engineering World Wide", SEI-ASCE
6. HAMBURGER, R.O. 2001, "State of Performance Based-Engineering in the United States", EQE Internacional, Inc. USA
7. OKADA, T. HIRAISHI, H. OHASHI Y. FUJITANI, H. AOKI, Y. AKIYAMA, H. YANO, K. 2000, " A New Framework for Performance-Based Design of Building Structures " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2098. New Zealand
8. AOKI, Y. OHASHI, Y. FUJITANI, H. SAITO, T. KANDA, J. EMOTO, T. KOHNO, M. 2000, " Target Seismic Performance Levels in Structural Design for Buildings " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 0652. New Zealand
9. FUJITANI H., TANI, A. AOKI, Y. TAKAHASHI, I. 2000, " Performance Levels of Buildings Structures Against the Earthquake (Concept of Performance-Based Design Standing on Questionnaires) " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 1682. New Zealand
10. TAKAHASHI, I. FUJITANI, H. TANI, A. 2000, " Opinion Of User and Owners About Safety Performance of Buildings Structure (Concept of Performance-Based Design Standing on Questionnaires) " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 1976. New Zealand



11. AKIYAMA, H. TESHIGAWARA, M. FUKUYAMA, H. 2000, " A Framework of Structural Performance Evaluation System for Buildings in Japan " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2171. New Zealand
12. MIDORIKAWA, M. TESHIGAWARA, M. GOJO, W. OKAWA, I. 2000, " Performance-Based Building Code of Japan -Framework of Seismic and Structural Provisions " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2293. New Zealand
13. YANO, K. HIRANO, Y. GOJO, W. 2000, " Social System For Performance Based Design (P.B.D.) Of Building Structures - Its Perspective And Key Elements " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 0688. New Zealand
14. NORMA TECNICA DE EDIFICACION E-030, 1997. "Diseño Sismorresistente", MTC, Lima - Perú
15. KRAWINKLER, H. 1999, "Challenges and Progress in Performance-Based Earthquake engineering", Internacional Seminar on Seismic Engineering for tomorrow - In honor of Profesor Hirohi Akiyama, Tokio, Japan
16. SAC JOINT VENTURE 2000, "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Building", Report. No.FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
17. KRAWINKLER, H. 1998, "Issues and Challenges in Performance-Based Seismic Design", Structural Engineering World Wide", SEI-ASCE
18. CEE 227- Earthquake Engineering, "Seismic Performance Goals", U.C. Berkeley
19. BERTERO, V. 2000, " Performance-Based Seismic Engineering: convencional vs innovative approaches " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2074. New Zealand
20. SAHPIRO, D. REAVELY, L.D. ROJAHN, C. HOLMES W.T. MOEHLE, J. HAMBURGER, R.O. MEHRAN, M 1998, "Performance Based Engineering Design for Seismic Rehabilitation of existing Buildings", Structural Engineering World Wide", SEI-ASCE
21. COLLINS, K. R STOJADINOVIC B., 2000, " Limit State for Performance-Based Design " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 0716. New Zealand



22. ELLINGWOOD B. R., 1998, " Reliability-Based Performance Concept for Building Construction" Structural Engineering World Wide", SEI-ASCE
23. AKKAR, S. GULKAN, P. 2000, "Comparative Performance Evaluacion of Displacement Basic Design Procedures for Near Field Earthquakes", Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 0444. New Zealand
24. MIDORIKAWA, M. HIRAIISHI, H. OKAWA, I. HBA M. TESHIGAWARA, M. ISODA, H.. 2000, "Development of Seismic Performance Evaluation Procedures in Building Code of Japan", Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2215. New Zealand
25. MATSUSHIMA, Y. TESHIGAWARA, M. KATO, M. SUGAYA, K. 2000, " Seismic Performance Evaluation Method for a Building with Center Core Reinforced Concrete Walls and Exterior Steel Flame", Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2143. New Zealand
26. KURAMOTO, H. TESHIGAWARA, M. OKUZONO, T. KOSHIKA, N. TAKAYAMA, M. HORI, T. 2000, " Predicting the Earthquake Response of Building Using Equivalent Single Degree of Freedom System", Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 1039. New Zealand
27. VAMVATSIKOS, D. CORNELL, C.A. 2001 " The Incremental Dynamic Analysis and its Application to Performance-Based Earthquake Engineering", 12th European Conference on Earthquake Engineering
28. RODRIGUEZ, M. RODRIGUEZ, V. 2000 " Performance-Based Earthquake-Resistant Design of Confined Masonry Walls" Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 1955. New Zealand
29. PRIESTLEY, M.J.N. 2000 "Performance Based Seismic Design" Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 2831. New Zealand
30. COURT, A.B. KOWALSKY, M.J. 1998, " Performance-Based Engineering of Building - A Displacement Design Approach" Structural Engineering World Wide", SEI-ASCE
31. YAMAWAKI, K. KITAMURA, H. TSUNEKI, Y. MORI, N. FUKAI, S. 2000, " Introduccion of a Performance-Based Design " Thuelve Conference on Earthquake Engineering. Paper 1511. New Zealand



32. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC) 1997, "NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Building", Report. No.FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
33. OTANI, S. (2001) "New Seismic Design Provision in Japan". Departament of Architecture. University of Tokyo, Japan.
34. SEUNG-YUL YUN, HAMBURGER, R. CORNELL, A. FOUTCH, D. (2001) "Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frame". Members, ASCE
35. ILEVEN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, 11WCEE, méxico.
36. THUELVE CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING 12WCEE, 2000, New Zeland
37. STRUCTURAL ENGINEERING WORLD WIDE, 1998. SEI ASCE
38. EVANS REIS, 2001 "the changing Face of Structural Engineering".CEE-100 Stanford University
39. HAMBURGER R, FOOUTH D., CORNELL C.,2000 "Performance Basis of Guidelines for Evaluation, Upgrade and Design of Moment-Resistant Steel Frames" Thuelve Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, paper 2543
40. BERTERO V., 1992 "Lecciones Aprendidas de Terremotos Catastróficos Recientes y otras Investigaciones". Primera Conferencia Internacional Torroja-Madrid, Monografía 410 - 411.
41. PATRICIA GIBU, CÉSAR SERIDA; 1993 "muro de Albañilería Confinada Sujeto a Carga Lateral".FIC-UNI
42. GALLEGOS H,. 1991 "Albañilería Estructural".PUCP
43. ATC-40, 1996 "Seismic Evaluation and Retrofit of Concret Buildings". Seismic Safety Comission. California.
44. USA ARMY CORP OF ENGINEERS,1998 "Seismic Design for Buildings". USA
45. CHOPRA A.K., GOEL R.K.; 1999 "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems". Report No. PEER 1999/02, University of California, Berkeley.
46. CLOUGH R.W., PENZIEN J. "Dynamic of Structures", Mc Graw-Hill USA 1975



47. VASQUEZ CH. G., 1992 "Análisis y Diseño Inelástico de Estructuras Aporticadas". FIC.UNI
48. VALDIVIA N.J. 1992 "Análisis Sísmico Inelástico Simplificado de Edificios".FIC.UNI
49. COMPUTERS OF STRUCTURES INC. SAP2000. Berkeley.
50. ALVA H., CASTILLO J., 1994 "Peligro Sísmico en el Perú". FIC.UNI
51. BOZZO, L.; BARBAT, AL. 1995 "técnicas Avanzadas de Diseño Sismorresistente". CAPECO, Lima-Perú.
52. SARRIA, A. 1995 "Ingeniería Sísmica". Universidad de los Andes-Bogotá-Colombia.
53. GOEL, R; CHOPRA, A. 2001 "Improved Direct Displacement- Based Design Procedure for Performance-Based Seismic Design of Structures". California,Berkeley.
54. NORMA TECNICA DE EDIFICACION E-030, 2001. "Diseño Sismorresistente", MTC, Lima – Perú
55. TAIPE J, F. 1996 "Apuntes de Clase de Ingeniería Sismorresistente". Posgrado Ingeniería Estructural-FIC-UNI.



ANEXO A

DESCRIPCIONES GENERALES DE DAÑO POR NIVELES DE DESEMPEÑO DEL SEAO (1995)

En las tablas (Tabla 1.1, Tabla 1.2, Tabla 1.3, Tabla 1.4, tabla 1.5, Tabla 1.6) que a continuación se ilustra se describen los rangos de daño permisible para los sistemas y subsistemas de la edificación, componentes estructurales de resistencia de fuerza lateral, elementos horizontales de resistencia de fuerza lateral, sistemas de arquitectura, mecánico, eléctrico, sistema de amortiguamiento, y contenidos de una edificación, respectivamente.

Tabla 1.1 Descripciones de Daño General por Niveles de Desempeño

DESCRIPCIÓN	NIVEL DE DESEMPEÑO				
	Funcionamiento completo	Operativo o en Funcionamiento	Protección de Vida	Cerca al Colapso	Colapso
Daño en edificación	Insignificante	Ligero	moderado	severo	total
Distorsión transitoria	<0.2% +/-	<0.5% +/-	<1.5% +/-	<2.5% +/-	>2.5% +/-
Distorsión permanente	Insignificante	Insignificante	<1.5% +/-	<2.5% +/-	>2.5% +/-
Daño por carga vertical	Insignificante	Insignificante	Ligero a moderado	Moderado a más de lo normal	Pérdida parcial a total
Daño por carga lateral	Insignificante	Ligero	Moderado	Rigidez y resistencia residual insignificante	Colapso parcial o total
Daño en arquitectura	Insignificante	Ligero a moderado	moderado a severo	Daño severo	Riesgo de falla altamente peligroso
Circulación	No deteriorado	Sin mayores obstrucciones en salida de corredores	Sin obstrucciones en los corredores. Elevadores fuera de servicio	Circulación puede ser obstruido	Circulación puede ser completamente obstruido
Sistema mecánico/ eléctrico/ amortiguamiento	En funcionamiento	Equipo esencial en función, otros sistemas requieren reparación	Equipos volcados, muchos sistemas interrumpidos	Daños severos e interrupción permanente de sistemas	Permanente interrupción de sistemas
Daño a contenidos	Algún daño ligero. Están seguros los	Daño ligero. Están seguros los contenidos	Daño moderado a severo de	Daños severos en contenidos	Pérdida total de contenidos



	contenidos críticos y materiales en riesgo y sin daño	críticos y materiales en riesgo	contenidos		
Reparaciones	Ninguno	Conveniencia del propietario	Posible, con fuera de uso	No práctico probablemente	imposible
Efecto en la ocupación	Ninguno	Ocupación continua	corto tiempo de pérdida de uso	Pérdida casi permanente de uso	Pérdida permanente de uso

Tabla 1.2 Niveles de Desempeño y Daño Estructural Permissible-Elementos Verticales

Elementos	tipo	NIVEL DE DESEMPEÑO			
		Funcionamiento o completo	Operativo o en funcionamiento	Protección de Vida	Cerca de Colapso
Pórticos de concreto	primario	Insignificante	Fisuras menores (0.02")	Daño extensivo en vigas	Daño extensivo y rótulas plásticas
	Secundario	Insignificante	Como el primario	Daño extensivo y rótulas en elementos dúctiles	Daño severo en juntas. Refuerzos pandeados
Pórticos de acero	primario	Insignificante	Fluencia local menor en algunos elementos	Formación de rótulas, pandeo local en algunos elementos	Distorsión excesiva de vigas y columnas, muchas fracturas en conexiones
	Secundario	Insignificante	Fluencia local menor en algunos elementos	Distorsión excesiva de vigas y columnas	Distorsión excesiva de vigas y columnas, muchas fracturas en conexiones
Pórticos de acero arriostrados	primario	Insignificante	Fluencia menor o pandeo de los tirantes o arriostres	Muchos arriostres fluyen o se pandean, pero no fallan totalmente	Fluencia extensiva y pandeo. Muchas conexiones pueden fallar
	Secundario	Insignificante	Como el primario	Como el primario	Como el primario
Muros de corte de concreto	primario	Insignificante	Menor fisuras (0.02")	Inclinaciones en juntas, daños en vanos..	Mayores fisuras de corte y de flexión
	Secundario	Insignificante	Fisuramientos menores	Mayores fisuras de corte y de flexión	Paneles virtualmente desintegrados



Albañilería	primario	Insignificante	Menores fisuramientos (menor 1/8")	Fisuramiento extensivo	Fisuramiento extensivo y aplastamiento
	Secundario	Insignificante	Como el primario	Como el primario	Fisuramiento extensivo
Muros URM	primario	Insignificante	Fisuramiento menor (menor 1/8")	Fisuramiento extensivo	Fisuramiento muy extensivo, aderas despegadas
	Secundario	Insignificante	Como el primario	Como el primario	Como el primario
Albañilería reforzada	primario	Insignificante	Fisuramiento menor (menor 1/8")	Fisuramiento extensivo (menor 1/4")	Fisuramiento excesivo, daño en aberturas y esquinas
	Secundario	Insignificante	Como el primario	Fisuramiento excesivo, daño en aberturas y esquinas	Paneles virtualmente desintegrados
Madera	primario	Insignificante	Fisuras menores	Pérdidas menores de conexiones e inclinaciones de miembros	Pérdida de conexiones, salida parcial de clavos, algunas inclinaciones de paneles
	Secundario	Insignificante	Como primario	Pérdida de conexiones, ruptura de paneles	Muros y pórticos fracturados y pandeados
cimentación	general	Insignificante	Inclinación despreciable	Asentamiento total menor de 6" i asentamiento diferencial menor de 1/2" en 30 pies	Mayores asentamientos, e inclinaciones

Tabla 1.3 Niveles de Desempeño y Daño Estructural Permissible-Elementos Horizontales

Sistema	NIVEL DE DESEMPEÑO			
	Funcionamiento completo	Operativo o en funcionamiento	Protección de Vida	Cerca de Colapso
Diagramas de metal	insignificante	Conexiones intactas. Distorsiones menores	Algunas fallas en conexiones; menores pandeos locales	Grandes distorsiones y pandeos



Diagramas de madera	insignificante	Pérdidas no visibles	Algunas rajaduras en conexiones	Distorsiones grandes permanente con rajaduras de elementos
Diagramas de concreto	insignificante	Pequeñas fisuras (menor 1/8")	Grandes fisuras (menor 1/4") y aplastamiento locales	Grandes aplastamientos y muchas grietas

Tabla 1.4 Niveles de Desempeño y Daño Permissible-Elementos de Arquitectura

Elemento	NIVEL DE DESEMPEÑO			
	Funcionamiento completo	Operativo o en funcionamiento	Protección de Vida	Cerca de Colapso
Ropero	Insignificante	Conexiones fluyen; algunas fisuras	Distorsión severa en conexiones, fisuras, pandeos, aplastamientos	Daño severo en conexiones; algunos paneles fallan
Vidriería	Generalmente ningún daño. Posible fisuras aisladas	Algunos vidrios se rompen	Se rompen muchos vidrios; algo de riesgo de falla	Destrucción general de vidrios, riesgo de falla
Tabiques	Daño insignificante, algunas fisuras	Fisuras 1/16" en aberturas y esquinas	Algunas fisuras severas, aplastamiento en algunas áreas	Daño severos en muchas áreas
Techo	Generalmente ningún daño. Posible aplastamientos aislados	Daño menor	Daño extenso	Mayoría del techo dañado



Accesorios fijos	Insignificante	Daño menor	Muchos accesorios rotos	Daño extenso
Puertas	Insignificante	Daño menor	Daño distribuido	Daño distribuido; muchas obstrucciones en puertas
Ascensor	En funcionamiento con excepciones aisladas	En funcionamiento. La mayoría puede ser restablecida	Algunos están fuera de servicio	Muchos están fuera de servicio

Tabla 1.5 Niveles de Desempeño y Daño Permisible-sistema eléctrico/mecánico/amortiguamiento

Elemento	NIVEL DE DESEMPEÑO			
	Funcionamiento completo	Operativo o en funcionamiento	Protección de Vida	Cerca de Colapso
Equipo mecánico	Daño insignificante	Daño menor	Muchas unidades no están en funcionamiento	Muchas unidades no están en funcionamiento
Ductos	Daño insignificante	Daño menor	Ruptura en algunos ductos	Muchos sistemas están fuera de servicio. Algunos ductos fallan
Cañería	Daño insignificante	Daño menor	Ruptura en conexiones de las cañerías	Muchas rupturas cañerías.
Sistema de alarma de incendio	En funcionamiento	En funcionamiento	No está en funcionamiento	No está en funcionamiento
Sistema de emergencia	En funcionamiento	En funcionamiento	En funcionamiento	No está en funcionamiento



Equipo eléctrico	Daño insignificante	Daño menor	Daño moderado	Daño extenso y pérdida de servicio
------------------	---------------------	------------	---------------	------------------------------------

Tabla 1.6 Niveles de Desempeño y Daño Permisible-contenidos

Elemento	NIVEL DE DESEMPEÑO			
	Funcionamiento completo	Operativo o en funcionamiento	Protección de Vida	Cerca de Colapso
Muebles	Efecto insignificante	Daño menor	Daño extenso	Daño extenso
Equipos de oficina	Efecto insignificante	Daño menor	Daño extenso	Daño extenso
Sistemas de computación	En funcionamiento	Daño menor	Daño extenso	Daño extenso
Armarios	Daño insignificante	Daño menor	Daño extenso	Daño extenso
Estante para libros	Daño insignificante	Daño menor	Daño extenso	Daño extenso
Almacenes & armarios	Daño insignificante	Daño moderado	Daño extenso	Daño extenso
Trabajos de arte, colecciones	Daño menor	Daño moderado	Daño extenso	Daño extenso
Materiales riesgosos	Daño insignificante	Daño insignificante	Daño menor	Daño severo



Anexo B

TABLAS EMPLEADAS PARA EL CALCULO DE ANALISIS DE ACEPTABILIDAD POR EL FEMA-350

Tabla 1: Niveles de confianza para varios valores de λ , dado β_{UT} (factor de incertidumbre asociado con la evaluación de la capacidad de los parámetros antes definidos local y global).

Nivel de confianza	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99
$\beta_{UT} = 0.2$											
Λ	1.37	1.26	1.18	1.12	1.06	1.01	0.96	0.90	0.82	0.76	0.67
$\beta_{UT} = 0.3$											
Λ	1.68	1.48	1.34	1.23	1.14	1.06	0.98	0.89	0.78	0.70	0.57
$\beta_{UT} = 0.4$											
Λ	2.12	1.79	1.57	1.40	1.27	1.15	1.03	0.90	0.76	0.66	0.51
$\beta_{UT} = 0.5$											
Λ	2.76	2.23	1.90	1.65	1.45	1.28	1.12	0.95	0.77	0.64	0.46
$\beta_{UT} = 0.6$											
Λ	3.70	2.86	2.36	1.99	1.72	1.48	1.25	1.03	0.80	0.64	0.43

Niveles de confianza mínimos recomendados

Comportamiento	Niveles de desempeño	
	habitabilidad inmediata	Prevención de colapso
Comportamiento global limitado por distorsión de entre pisos	50%	90%
Comportamiento de conexión local limitado por distorsión de entre piso	50%	50%
Comportamiento de compresión de columna	50%	90%
Comportamiento de columna en tracción	50%	50%



Tabla 2: Factor de incertidumbre en el análisis de ángulo de distorsión de entrepiso

Procedimiento de análisis	de del sistema	LSP		LDP		NSP		NDP	
		IO	CP	IO	CP	IO	CP	IO	CP
Pórtico de Momento Especial									
Baja (menor 04 pisos)		.94	.7	1.03	.83	1.13	.89	1.02	1.03
Media (4-12 pisos)		1.15	.97	1.14	1.25	1.45	.99	1.02	1.06
Alta (mayor 12 pisos)		1.12	1.21	1.21	1.14	1.36	.95	1.04	1.1
Pórtico de Momento Ordinario									
Baja (menor 04 pisos)		.79	.98	1.04	1.32	.95	1.31	1.02	1.03
Media (4-12 pisos)		.85	1.14	1.1	1.53	1.11	1.42	1.02	1.06
Alta (mayor 12 pisos)		.8	.85	1.39	1.38	1.36	1.53	1.04	1.1

Tabla 3: Factor de variabilidad de demanda de ángulo de distorsión de entrepiso

Altura de edificación	Y	
	IO	CP
Pórtico de Momento Especial		
Baja (menor 04 pisos)	1.5	1.3
Media (4-12 pisos)	1.4	1.2
Alta (mayor 12 pisos)	1.4	1.5
Pórtico de Momento Ordinario		
Baja (menor 04 pisos)	1.4	1.4
Media (4-12 pisos)	1.3	1.5
Alta (mayor 12 pisos)	1.6	1.8

Tabla 4: Capacidad de ángulo de distorsión de entrepiso global C y factor de resistencia O para SMF regular y OMF

Altura de edificación	Nivel de desempeño			
	IO		CP	
	Capacidad de ángulo de distorsión entrepiso C	Factor de resistencia O	Capacidad de ángulo de distorsión entrepiso C	Factor de resistencia O
Pórtico de momento especial (SMF)				
Baja (menor 04 pisos)	.02	1	.1	.9
Media (4-12 pisos)	.02	1	.1	.85
Alta (mayor 12 pisos)	.02	1	.085	.75
Pórtico de momento ordinario (OMF)				
Baja (menor 04 pisos)	.01	1	.1	.85



pisos)				
Media (4-12 pisos)	.01	.9	.08	.7
Alta (mayor 12 pisos)	.01	.85	.06	.6

Tabla 5: Coeficiente de incertidumbre B_{ut} para evaluación de distorsión entrepiso global

Altura de edificación	Nivel de desempeño	
	IO	CP
Pórtico de momento especial (SMF)		
Baja (menor 04 pisos)	.2	.3
Media (4-12 pisos)	.2	.4
Alta (mayor 12 pisos)	.2	.5
Pórtico de momento ordinario (OMF)		
Baja (menor 04 pisos)	.2	.35
Media (4-12 pisos)	.2	.45
Alta (mayor 12 pisos)	.2	.55

Tabla 6: Capacidad de ángulo de distorsión C (Q_{io} , Q_u) para conexiones precalificadas como limitadas por respuesta de conexión local

Tipo de conexión	Resistencia de degradación de ángulo de distorsión límite (radianes) Q_{sd}	IO		CP	
		ángulo de distorsión límite (radianes) Q_{io}	Factor de reducción de capacidad α	ángulo de distorsión límite (radianes) Q_u	Factor de reducción de capacidad α
WUF-B	.031-.0003db	.015	.9	.06-.006db	.9
WUF-W	.051	.02	.9	.064	.9
FF	.061-.00064db	.02	.9	.08-.00064db	.9
RBS	.06-.0003db	.02	.9	.08-.0003db	.9
WFP	.04	.02	.9	.07	.9
BUPE	.071-	.015	.9	.081-	.9



	.0013db			.0013db	
BSEP	.071- .0013db	.015	.9	.081- .0013db	.9
BFP	.12-.002db	.015	.9	.1-.001db	.9
DST	.12-.0032db	.015	.9	.14-.0032db	.9

Tabla 7: Coeficiente de incertidumbre B_{ut} para la evaluación de distorsión de entrepiso local

Altura de edificación	Nivel de desempeño	
	IO	CP
Pórtico de momento especial (SMF)		
Baja (menor 04 pisos)	.3	.3
Media (4-12 pisos)	.3	.35
Alta (mayor 12 pisos)	.3	.4
Pórtico de momento ordinario (OMF)		
Baja (menor 04 pisos)	.3	.35
Media (4-12 pisos)	.3	.4
Alta (mayor 12 pisos)	.3	.4

Tabla 8: estados de comportamiento para evaluación de desempeño de conexiones ensambladas

Ángulo de distorsión	Nivel de desempeño	Descripción
Q_{io}	IO	Ángulo de distorsión más baja en el cual ocurre alguno de los comportamiento 1,2,3
Q_{cp}	CP	Ángulo de distorsión en el cual ocurre el comportamiento 4
Q_{sd}	-	Ángulo de distorsión más baja en el cual ocurre alguno de los comportamiento 2,3 o 4

1. Inicio de pandeo de ala local de vigas
2. Degradación de la capacidad resistente de momento del ensamblado para evaluar por debajo de la capacidad de resistencia de momento nominal.
3. Iniciación de la fractura de pernos, soldadura, o base de metal que resulta en una degradación de la resistencia significativa del ensamblado.
4. Falla completa de la conexión



Tabla 9: *Análisis de factor de incertidumbre Y_a y coeficiente de incertidumbre total But para la evaluación de demanda de compresión de columna*

Procedimiento analítico	Análisis de factor de incertidumbre Y_a	Coficiente de incertidumbre total But
Análisis estático lineal o Dinámico	1.15	0.35
Análisis plástico	1	.15
Análisis estático no lineal	1.05	.2
Análisis dinámico no lineal	form	Form