

DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO



Ingeniería Estructural Moderna

Diseño Sísmico por Desempeño (Performance-Based Seismic Design – PBSD). Ingeniería Estructural Moderna

Índice de Contenidos

Infografías

1. Introducción
2. Marco Conceptual del Diseño Sísmico por Desempeño
3. Evolución Histórica y Marco Normativo
4. Principios Fundamentales del PBSD
5. Niveles de Desempeño y Estados Límite
6. Modelado, Análisis y Simulación
7. Criterios de Evaluación y Métodos de Verificación
8. Comparación con el Diseño Tradicional Basado en Fuerzas
9. Aplicaciones Reales y Estudios de Caso
10. Desafíos Técnicos y Consideraciones de Implementación
11. Tendencias Futuras y Tecnología Aplicada
12. Conclusiones Estratégicas
13. Bibliografía Técnica Especializada

DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO

INTRODUCCIÓN

Este sexto introduce al Diseño Sísmico por desempeño como un enfoque importante para la evaluación y gestión del riesgo sísmico relacionado a edificaciones.

¿QUÉ ES EL DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO?

Es una metodología para el diseño estructural que establece objetivos en base en respuesta a la edificación a difeando los diferentes niveles de demanda sísmica y viando daños.

OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

 SEGURIDAD PARA VIDA Significado damage prevenigan riesgos mayores	 SEGURIDAD PARA V FUNCIONALIDAD Daños moderados con mínima interrupciones funcionales	 PREVENCIÓN DE COLAPSO Sísmica damage incremento el riesgo de colapso	 OPERACIÓN INMEDIATA Daños limitado del edificio se establecental
--	---	---	---

VENTAJAS PARA EL SECTOR ASEGURADOR

 EVALUACIÓN PRECISA DEL RIESGO Estimacion de riesgo y de daños	 TARIFAS ADAPTADAS Premios baseados en el desempeño esperado	 INCENTIVO A EDIFICIOS SEGUROS Edificios diseñados por desem peño, sor relleados en el costo de aseguro	 INFORMACIÓN ROBUSTA Tenendo datos detallados para a suscripores y afirman decisioes informados
--	--	---	---

DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO

ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

- Evaluación de peligrosidad sísmica específica del sitio
- Consideración de la incertidumbre en la estimación del peligro

MODELACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL AVANZADO

- Utilización de modelos no lineales para simular la respuesta ante terremotos
- Capacidad de capturar la respuesta dinámica del edificio
- Inclusión de variabilidad en análisis para reflejar incertidumbres

ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE DESEMPEÑO

- Definición de niveles de desempeño en términos de seguridad y funcionalidad
- Consideración de diferentes niveles de peligrosidad sísmica
- Evaluación de daño esperado en terremotos de diversas intensidades
- Criterios alineados con expectativas de las partes interesadas



DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO

Aplicación práctica para los procesos de seguro

Etapas de Aplicación

Puede implementarse en diversas etapas del proceso asegurador, incluyendo la suscripción, inspección, evaluación y pago de indemnizaciones.

Selección de Niveles de Desempeño

Definir niveles de desempeño deseados, como ocupación inmediata, seguridad de vida, o prevención de colapso. Estos deben establecerse considerando el tipo, la antigüedad y la categoría del edificio, así como alas exigencias normativas relacionadas, en caso de haberlas.

Descripción de los Niveles de Desempeño

Ofrecer descripciones claras de los niveles de desempeño estructural y no estructural, para una mejor transparencia y comprensión.

Evaluación de la Amenaza Sísmica

Es necesario evaluar la amenaza sísmica utilizando métodos probabilistas referentes a la ubicación y

1. Introducción



DAÑO O PERDIDA

NIVEL OPERACIONAL



- DAÑO Estructural y No Estructural DESPRECIABLE.
- Ocupantes Seguros durante Evento.
- Líneas de Vida disponibles.
- Listo para usar, algo de limpieza.
- Perdidas < 5% V. Reposición.

Ref: uDocz

El Diseño Sísmico por Desempeño (PBSD) representa un cambio de paradigma en la ingeniería estructural, al permitir que los diseñadores no solo aseguren la vida humana, sino que establezcan metas explícitas de desempeño post-sismo, alineadas con los objetivos funcionales y económicos de los propietarios de las estructuras. Este enfoque ofrece una ruta más racional, personalizada y eficaz para enfrentar la amenaza sísmica en regiones de alta actividad tectónica.

Resulta especialmente revelador el análisis técnico del comportamiento estructural frente a eventos sísmicos, particularmente cuando se comparan los distintos tipos de sistemas estructurales y su respuesta dinámica durante movimientos telúricos. Este tipo de análisis no solo permite comprender las vulnerabilidades específicas de las

estructuras según su tipología, materiales y configuración geométrica, sino que también pone en evidencia los límites del enfoque tradicional basado en la resistencia. En este contexto, la *Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)* ha representado un avance significativo, al incorporar criterios de diseño por resistencia que han contribuido notablemente a la mitigación del riesgo sísmico en el país. Dicho enfoque ha permitido establecer mínimos normativos que garantizan que las edificaciones no colapsen ante eventos sísmicos severos, preservando ante todo la vida humana.

No obstante, la experiencia acumulada tras décadas de eventos sísmicos relevantes ha llevado a una reflexión profunda en la comunidad internacional de ingeniería estructural. Países con alta sismicidad y un robusto desarrollo tecnológico como Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda, han venido migrando progresivamente hacia un enfoque más integral y sofisticado: el diseño sísmico basado en desempeño (Performance-Based Seismic Design, PBSDD). Este paradigma no se limita a asegurar que la estructura resista las cargas sísmicas hasta cierto umbral, sino que plantea una serie de niveles de desempeño deseables y cuantificables frente a diferentes intensidades sísmicas, abarcando desde eventos frecuentes de baja magnitud hasta terremotos extremos poco probables.

La motivación detrás de esta transición se fundamenta en evidencias empíricas contundentes. Terremotos como los de Loma Prieta (1989, magnitud 7.1) y Northridge (1994, magnitud 6.7) demostraron que incluso eventos de intensidad moderada pueden generar pérdidas económicas severas y un número significativo de víctimas, aún en países con códigos de diseño robustos. Lo anterior se explica en gran medida por el hecho de que el diseño por resistencia, aunque eficaz para prevenir el colapso, no necesariamente garantiza niveles aceptables de daño funcional, económico o reparabilidad. En otras palabras, las estructuras diseñadas solo para resistir cargas pueden sobrevivir al sismo, pero quedar inutilizables, incurrir en costos de reparación prohibitivos o comprometer funciones esenciales en contextos críticos como hospitales o centros de comando.

El diseño sísmico por desempeño, en cambio, permite predecir el comportamiento estructural con mayor precisión, ya que introduce el concepto de desplazamiento y deformación como variable clave, en lugar de concentrarse exclusivamente en fuerzas internas. A través de metodologías avanzadas de modelación no lineal, análisis incremental dinámico y criterios de aceptación específicos por nivel de desempeño (como "ocupación inmediata", "uso restringido", "prevención de colapso", entre otros), este enfoque permite estimar con mayor realismo el daño esperado ante distintos niveles de amenaza sísmica. Así, los ingenieros pueden establecer objetivos explícitos para cada tipo de edificación, según su uso, criticidad y valor económico o social.

En términos prácticos, el diseño por desempeño se traduce en una herramienta poderosa no solo para los ingenieros estructurales, sino también para planificadores urbanos, autoridades de gestión del riesgo, aseguradoras y tomadores de decisiones en general. Al anticipar los niveles de daño y las consecuencias funcionales ante diversos escenarios sísmicos, se facilita la priorización de intervenciones, la definición de políticas de reconstrucción resiliente y la inversión estratégica en medidas de mitigación costo-efectivas.

En definitiva, el paso del diseño por resistencia al diseño por desempeño no representa simplemente una evolución normativa o metodológica: implica un cambio de mentalidad profundo en la concepción de la seguridad estructural. Supone pasar de preguntarse si la estructura colapsará, a preguntarse cómo funcionará antes, durante y después del sismo, cuál será su nivel de daño aceptable, y qué grado de resiliencia es necesario para garantizar la continuidad de las actividades humanas, sociales y económicas en escenarios de desastre.

2. Marco Conceptual del Diseño Sísmico por Desempeño

El Diseño Sísmico Basado en Desempeño (PBSD, por sus siglas en inglés) constituye un enfoque avanzado e integral en la ingeniería estructural moderna, que replantea los paradigmas tradicionales del diseño sismorresistente al centrarse en la predicción y control del desempeño real de las estructuras frente a movimientos sísmicos de distintas intensidades. A diferencia del diseño convencional basado en resistencia, que prioriza la prevención del colapso mediante el cumplimiento de requisitos normativos asociados a una carga sísmica representativa (típicamente la fuerza base o cortante basal), el PBSD incorpora de forma explícita las variables de daño esperado, funcionalidad post-evento, vulnerabilidad económica y aceptabilidad social del riesgo.

2.1 Fundamentos Filosóficos y Técnicos del PBSD

El PBSD parte de un principio esencial: no todos los sismos son iguales y no todas las estructuras deben responder igual ante ellos. Por tanto, su filosofía reconoce que existen diferentes niveles de amenaza sísmica (frecuente, ocasional, rara y muy rara) y, a su vez, diferentes niveles de desempeño esperados por parte de la estructura (ocupación inmediata, uso restringido, prevención de colapso, entre otros). El objetivo no es simplemente que la estructura "resista" el sismo, sino que se comporte de acuerdo con criterios funcionales previamente establecidos, evaluados en términos de desplazamientos, deformaciones, capacidad de disipación de energía, daño acumulado y consecuencias colaterales (como caídas de elementos no estructurales, interrupciones operativas o pérdidas económicas).

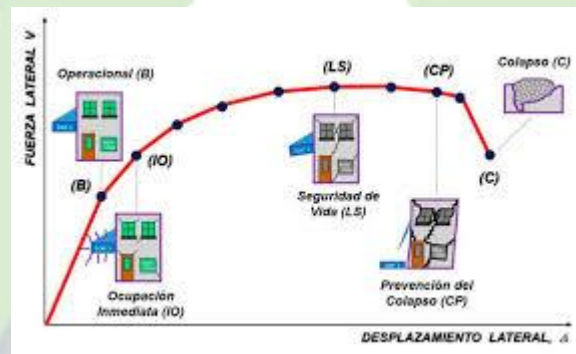
Este marco conceptual exige una cuantificación explícita de los daños estructurales y no estructurales, así como una evaluación probabilística de los escenarios sísmicos. Para ello, se utilizan técnicas avanzadas como el análisis

pushover no lineal, el análisis incremental dinámico (IDA), y métodos de simulación que permiten capturar la respuesta inelástica realista de los componentes estructurales y su interacción dinámica con el suelo.

2.2 De la Fuerza a la Deformación: Un Cambio de Paradigma

Uno de los cambios paradigmáticos más relevantes del PBSB radica en el abandono del enfoque puramente elástico lineal basado en fuerzas, en favor de un enfoque centrado en la demanda de desplazamiento y deformación inelástica. Esto implica asumir que la estructura ingresará en un régimen no lineal durante eventos severos, y que su comportamiento post-elástico debe ser cuidadosamente modelado y controlado. Se diseñan las estructuras no sólo para resistir, sino para dañar controladamente bajo ciertos escenarios, y seguir funcionando o ser rápidamente reparables en función de su criticidad.

El desplazamiento lateral máximo, la distorsión de entrepiso, la plasticidad acumulada y los mecanismos de falla previstos se convierten en los indicadores clave de desempeño. Estos se comparan con límites de aceptabilidad definidos por los ingenieros y las partes interesadas (stakeholders), lo que introduce una dimensión contractual y estratégica en el diseño estructural, especialmente en edificaciones esenciales, infraestructura crítica o desarrollos con alto impacto económico.



Ref: Sismica Institue

2.3 Diseño Multiescenario y Evaluación del Riesgo

El PBSB promueve un enfoque de diseño multiescenario, donde se evalúa la respuesta estructural frente a varios niveles de amenaza sísmica, típicamente definidos como:

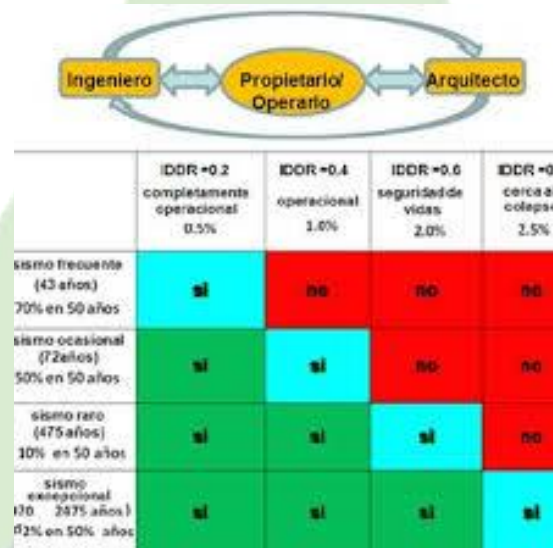
- Sismo Frecuente (Nivel de Servicio): Se espera que la estructura permanezca esencialmente elástica, con daño nulo o muy limitado. Ideal para garantizar continuidad operativa sin interrupciones.
- Sismo de Diseño (Nivel de Seguridad de Vida): La estructura puede experimentar daño significativo, pero no debe colapsar. Las reparaciones son viables, y la seguridad humana está protegida.

- Sismo Máximo Considerado (Prevención del Colapso): Se aceptan daños severos e irreparables, pero el colapso global debe evitarse. Representa el límite último de la capacidad estructural.

Este enfoque se complementa con una evaluación detallada de las consecuencias, que puede incluir:

- Costos estimados de reparación.
- Tiempo de inhabilitación funcional.
- Impacto sobre las operaciones críticas.
- Riesgo de pérdidas humanas, financieras o reputacionales.

De este modo, el diseño deja de ser una tarea exclusivamente técnica para convertirse en una estrategia de gestión integral del riesgo sísmico, con impacto directo sobre la planificación urbana, las inversiones inmobiliarias, la resiliencia institucional y la sostenibilidad económica post-desastre.



Ref: ResearchGate

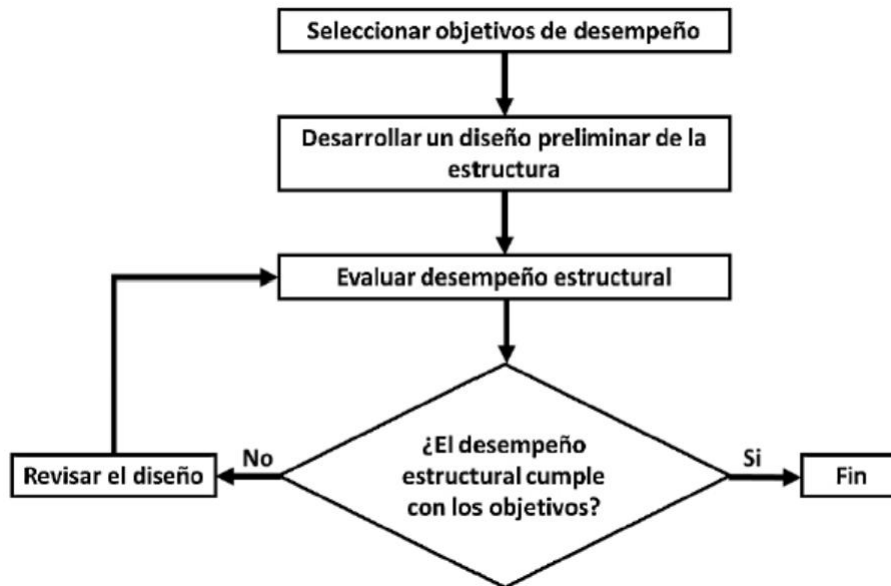
2.4 Implicaciones para la Toma de Decisiones

El PBSB introduce una cultura de toma de decisiones informadas. Al permitir que los diseñadores, propietarios, aseguradores, reguladores y comunidades acuerden explícitamente los niveles de desempeño deseados y los riesgos aceptables, se logra una mayor transparencia, responsabilidad compartida y alineación de expectativas. Esto es especialmente relevante en proyectos de infraestructura crítica, edificaciones hospitalarias, instalaciones estratégicas y desarrollos urbanos sostenibles.

Asimismo, el PBSB permite integrar variables como:

- Valor presente neto de los daños esperados (Expected Annual Loss - EAL).
- Reducción del riesgo residual post-reforzamiento estructural.

- Costos de ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis).
- Modelos de continuidad operativa y recuperación funcional.



Ref: ResearchGate

2.5 PBSD y el Futuro de la Regulación Sísmica

La implementación plena del PBSD requiere una transformación normativa, metodológica y cultural. Algunos códigos internacionales como el ASCE 41, FEMA P-58 y NZSEE han avanzado en su adopción, mientras que otros países inician fases de transición o exploración académica y experimental. Para contextos latinoamericanos, incluida Colombia, el reto consiste en adaptar gradualmente la NSR-10 u otras normativas locales hacia modelos más flexibles, basados en desempeño, que articulen criterios de seguridad estructural, funcionalidad post-evento y sostenibilidad socioeconómica.

El PBSD no es sólo una evolución técnica: es una necesidad estratégica en territorios con amenaza sísmica significativa y creciente urbanización. Permite diseñar estructuras no sólo para que "sobrevivan" al sismo, sino para que resistan con propósito, funcionen con resiliencia y se recuperen con eficiencia, en línea con los principios de construcción sustentable, desarrollo resiliente y gestión integral del riesgo.

2.6 Niveles de Desempeño y Escenarios de Demanda

El PBSD incorpora niveles de desempeño estructural y los asocia a niveles de amenaza sísmica, lo que permite una matriz de diseño multifactorial:

Nivel de amenaza sísmica	Frecuencia esperada	Nivel típico de desempeño
Bajo (frecuente)	Cada 50 años	Ocupación inmediata
Moderado (ocasional)	Cada 100-200 años	Uso restringido
Alto (raro)	Cada 475 años	Seguridad de vida
Muy alto (extremo)	Cada 2,475 años	Prevención de colapso

		Niveles de daño			
		Despreciable	Leve	Moderado	Severo
Niveles de Sismos	Ocasional (43 años)	a	d	c	d
	Servicio (72 años)	e	f	g	h
	Diseño (475 años)	i	j	k	l
	Máximo Considerado (970 años)	m	n	o	p
		Operacional (0)	Ocupación Inmediata (10)	Seguridad de Vida (LS)	Prevención de Colapso (CP)
		Niveles de desempeño			

Ref: UCC

En esta matriz, el ingeniero debe establecer límites de desplazamiento, distorsión, deformación plástica y daño, según el uso de la edificación, su importancia estratégica y el nivel de riesgo aceptable definido por el propietario o la normativa aplicable.

2.7 Ejemplos Aplicados en Colombia

En Colombia, aunque la implementación normativa del PBSD aún es incipiente, existen casos concretos donde se ha aplicado este enfoque de manera parcial o integral, sobre todo en proyectos de infraestructura crítica, edificaciones esenciales y obras con altos requisitos funcionales post-sismo:

a) Hospital Universitario de Santander (HUS), Bucaramanga

Este hospital, ubicado en una zona de amenaza sísmica alta, ha sido objeto de estudios con enfoque PBSD para evaluar su capacidad de continuar operando después de un sismo moderado o severo. Los análisis estructurales se centraron en simular distintos escenarios de daño y establecer estrategias de refuerzo y protección sísmica que prioricen la continuidad funcional, no solo la integridad estructural (Universidad Industrial de Santander, 2018).

b) Edificio de Control de la Central Hidroeléctrica de San Carlos, Antioquia

En este proyecto de infraestructura crítica energética, se aplicó un enfoque PBSB para evaluar la respuesta de elementos estructurales clave ante un sismo máximo considerado. Se incorporaron sistemas de disipación de energía y aislamientos sísmicos como parte de una estrategia para garantizar la resiliencia operativa del sistema eléctrico nacional (ISAGEN, 2017).

c) Torres empresariales en Bogotá y Medellín (empresas financieras y tecnológicas)

Edificaciones con inversiones millonarias en tecnología y procesos digitales han optado por exigir a sus proyectistas estudios de desempeño frente a eventos sísmicos.

En estos casos, se han establecido criterios de ocupación inmediata o uso restringido como mínimo aceptable, debido a los costos potenciales de interrupción de servicios y pérdidas por inactividad de servidores.

2.8 Aplicación en Edificaciones Críticas

Las edificaciones críticas (hospitales, estaciones de bomberos, centros de comando, plantas de tratamiento, data centers, etc.) son candidatas naturales para el PBSB. Estas estructuras no solo deben evitar el colapso, sino mantener su operatividad inmediata o rápida recuperación funcional después de un sismo. Esto ha llevado al desarrollo de sistemas estructurales especializados, como:

- Aislamiento sísmico de base (base isolation).
- Disipadores de energía tipo fluido viscoso o histéresis.
- Sistemas duales de resistencia (marcos especiales + muros).
- Modelos de redundancia estructural y rutas de carga alternativas.

Un ejemplo internacional es el Hospital de UC Davis, California, diseñado bajo PBSB para asegurar operatividad post-sismo con una distorsión inter-piso menor al 0.5%. Este tipo de criterios está siendo replicado en el diseño de hospitales como parte del Plan Nacional de Infraestructura Hospitalaria en Colombia.



Ref: Sismica Institue

2.9 Herramientas de Simulación y Evaluación

Las herramientas más utilizadas en la implementación del PBSD incluyen:

- PERFORMANCE-BASED DESIGN METHODS (FEMA P-58): Metodología integral que incluye cuantificación de pérdidas, análisis de desempeño no lineal y evaluación probabilística.
- ASCE/SEI 41-17: Estándar para la evaluación sísmica y rehabilitación de estructuras existentes basado en desempeño.
- OpenSees, Perform 3D, ETABS-NL, SAP2000-NL: Plataformas para modelación dinámica no lineal, análisis pushover y evaluación de daño progresivo.

2.10 Perspectiva Estratégica y Normativa

Desde una perspectiva institucional y estratégica, el PBSD representa una herramienta de planificación del riesgo que permite a gobiernos, empresas y aseguradoras:

- Estimar pérdidas anuales esperadas (Expected Annual Loss, EAL).
- Calcular índices de retorno sobre inversiones en mitigación sísmica.
- Priorizar intervenciones en función del riesgo y criticidad.
- Establecer políticas de seguros y primas basadas en riesgo real.

En Colombia, la inclusión progresiva del PBSD como alternativa de diseño dentro de la NSR-10 permitiría una gestión más eficiente de los recursos públicos y privados, alineándose con estándares internacionales y estrategias de desarrollo resiliente.

Referencias Bibliográficas

- ASCE/SEI 41-17 (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers.
- FEMA P-58 (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Homeland Security.
- PEER (2020). *Performance-Based Earthquake Engineering: A Summary of Research*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Universidad Industrial de Santander (UIS). (2018). *Evaluación estructural del HUS bajo criterios de desempeño*. Departamento de Ingeniería Civil.
- ISAGEN (2017). *Informe técnico de evaluación sísmica del edificio de control de la central San Carlos*.
- Miranda, E. (2005). *Overview of existing performance-based seismic design guidelines and methodologies*. Proceedings of the 2005 SEAOC Convention.

- NZSEE (2017). *The Seismic Assessment of Existing Buildings: Technical Guidelines for Engineers*. New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Ministerio de Salud y Protección Social – Colombia. (2021). *Lineamientos para el diseño sismorresistente de hospitales en el marco del Plan Nacional de Infraestructura Hospitalaria*.

3. Evolución Histórica y Marco Normativo

- Orígenes: Surge en los años 90, liderado por organizaciones como ATC (Applied Technology Council), PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), y FEMA (Federal Emergency Management Agency).
- Documentos clave:
 - FEMA 273/356 → Precursor del PBSO.
 - FEMA P-58 → Metodología moderna basada en pérdidas.
 - ASCE 41 y ASCE 7 → Códigos de referencia.
 - ACI 369, NEHRP, y documentos normativos de países como Japón, Nueva Zelanda y Chile han adoptado y adaptado este enfoque.

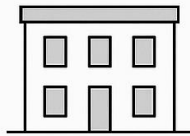
4. Principios Fundamentales del PBSO

- Definición de niveles de desempeño deseado: desde "ocupación inmediata" hasta "prevención de colapso".
- Especificación de niveles de amenaza sísmica: frecuente, ocasional, raro y extremo.
- Relación directa entre capacidad de la estructura y demanda sísmica esperada.
- Integración de modelado no lineal, análisis pushover y simulaciones dinámicas.
-

5. Niveles de Desempeño y Estados Límite

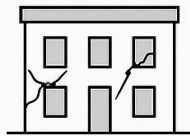
Nivel de Desempeño	Estado de la Estructura	Funcionalidad Esperada
Ocupación Inmediata (IO)	Daño mínimo, continua operativa	Operación post-sismo
Vida Segura (LS)	Daño moderado, sin colapso	Evacuación segura
Prevención de Colapso (CP)	Daño severo, sin colapso total	Protección de vidas humanas
Desempeño Operacional	Sin interrupciones funcionales	Plena operación

Niveles de Desempeño y Estados Límite VALUATIVE



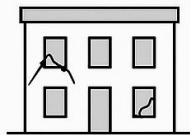
Ocupación Inmediata (IO)

Daño mínimo, continua operativa
Operación post-sismo



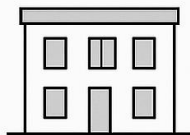
Vida Segura (LS)

Daño moderado, sin colapso
Evacuación segura



Prevención de Colapso (CP)

Daño severo, sin colapso total
Protección de vidas humanas

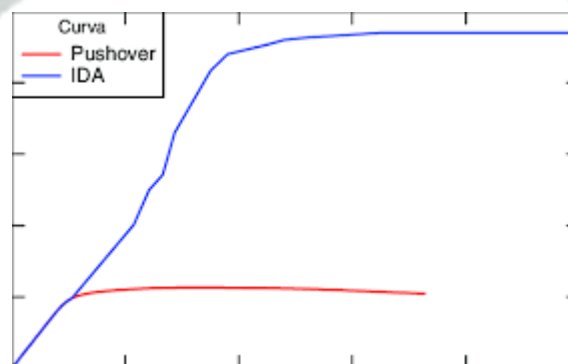


Desempeño Operacional

Sin interrupciones funcionales
Plena operación

6. Modelado, Análisis y Simulación

- Modelos no lineales: integran curvas capacidad-demanda y parámetros de plastificación.
- Métodos de análisis:
 - Estático no lineal (pushover)
 - Dinámico no lineal (time-history)
 - Incremental Dynamic Analysis (IDA)
- Consideración de efectos P- Δ , interacción suelo-estructura, disipadores y aisladores sísmicos.



Ref: ResearchGate

7. Criterios de Evaluación y Métodos de Verificación

El análisis por desempeño exige métodos de verificación que combinen rigor científico, modelación numérica avanzada y evaluación probabilística del riesgo. Los criterios más relevantes incluyen:

7.1 Enfoque Probabilístico y Curvas de Fragilidad

- Curvas de fragilidad estructural: Relacionan la probabilidad de alcanzar o superar un estado límite de daño con la intensidad sísmica (PGA, Sa(T)).
 - En suscripción de seguros, permiten definir primas diferenciales por tipología estructural y zona sísmica.
 - En indemnización, facilitan la estimación de pérdidas esperadas condicionadas al evento.
- Funciones de pérdida (Loss Functions): Expresan la relación entre daño físico y pérdidas económicas, incorporando componentes estructurales, no estructurales y contenidos.
 - Para aseguradoras, estas funciones permiten calcular el Expected Annual Loss (EAL) y el Probable Maximum Loss (PML).

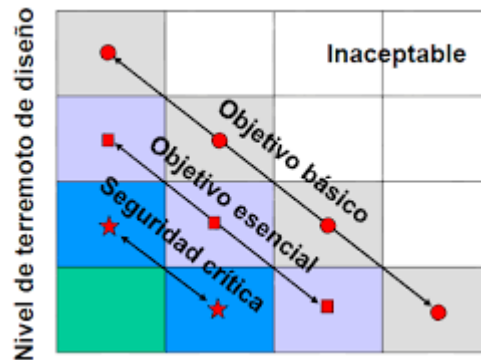
7.2 Métricas de Desempeño Relevantes

- SDR (Story Drift Ratio): Índice de distorsión entrepiso que se correlaciona con daño estructural y no estructural.
- IDR (Interstory Drift Ratio): Métrica más específica para daños en elementos no estructurales críticos, como fachadas o tabiques.
- Residual Drift: Deformación residual tras el sismo; si excede 0.5-1%, se considera que la estructura es irreparable.

7.3 Evaluación Integrada para el Sector Asegurador

- Pre-evento: Modelos PBSB para estimar pérdidas máximas probables por cartera de pólizas.
- Post-evento: Aplicación de inspecciones rápidas con criterios PBSB para determinar habitabilidad e indemnización proporcional.
- Métodos probabilísticos basados en:
 - Fragility curves
 - Funciones de pérdida
 - Análisis costo-beneficio de desempeño
- Evaluación mediante métricas como:
 - Índices de desempeño estructural (SDR, IDR)
 - Probabilidad de colapso

- Daño funcional y pérdida económica estimada (FEMA P-58)



Ref: srt..snet.gob.sv

8. Comparación con el Diseño Tradicional Basado en Fuerzas

Característica	Diseño Tradicional	Diseño por Desempeño
Basado en	Fuerzas sísmicas	Nivel de daño aceptable
Resultado	Seguridad ante colapso	Continuidad operativa
Evaluación	Elástica o lineal	No lineal, estado límite
Nivel de decisión	Código normativo	Propietario/Stakeholders

Un enfoque PBSD representa un cambio sustancial en la lógica del diseño estructural y en la gestión del riesgo asegurador.

Característica	Diseño Tradicional	Diseño por Desempeño
Base del diseño	Fuerzas sísmicas estáticas equivalentes	Niveles de desempeño cuantificados
Objetivo principal	Prevenir colapso	Controlar daño y funcionalidad
Evaluación	Análisis elástico	Análisis no lineal y probabilístico
Impacto en seguros	Primas basadas en zonificación sísmica	Primas basadas en riesgo real medido
Resultado tras sismo	Posible inutilización de la estructura	Continuidad operativa o rápida recuperación

Implicación clave para aseguradoras:

Con PBSD, el valor residual de la estructura tras el sismo es cuantificable y predecible, lo que reduce incertidumbre en la suscripción y mejora la equidad en las indemnizaciones.

9. Aplicaciones Reales y Estudios de Caso

- Edificio Federal de Los Ángeles – PBSB permitió reducir significativamente costos de reparación previstos.
- Hospitales y centros de datos – Se diseñan para ocupación inmediata u operación continua.
- Proyectos en Chile y Japón – Uso masivo de sistemas de aislamiento sísmico bajo criterios PBSB.

Los edificios PBSB con criterios de “ocupación inmediata” pueden recibir modelos de póliza diferenciados y cláusulas de “menor deducible” por bajo riesgo funcional.

10. Desafíos Técnicos y Consideraciones de Implementación

- Necesidad de modelos computacionales robustos y personal altamente capacitado.
- Falta de normativas armonizadas en algunos países.
- Resistencia cultural al cambio por parte de diseñadores tradicionales.
- Costo inicial más elevado, pero con TCO (Total Cost of Ownership) mucho más favorable.

10.1 Barreras Técnicas

- Complejidad de modelación no lineal e integración con datos geotécnicos.
- Necesidad de personal con experiencia en simulaciones avanzadas.

10.2 Retos para el Sector Asegurador

- Estandarización de métricas: Falta de un marco común PBSB en pólizas.
- Verificación post-evento: Requerimiento de peritos capacitados en evaluación por desempeño.

10.3 Oportunidades

- Integrar PBSB en inspecciones previas a la suscripción.
- Implementar seguros paramétricos basados en sensores estructurales que activen indemnizaciones automáticas.

11. Tendencias Futuras y Tecnología Aplicada

- **Digital Twins:** Réplicas virtuales que simulan el comportamiento de la estructura en tiempo real ante sismos.
- **IoT y sensores MEMS:** Monitoreo continuo de desplazamientos y aceleraciones para gestión activa del riesgo.

- **Machine Learning:** Predicción de daños e impacto económico con base en grandes bases de datos sísmicos.
- Diseño generativo: optimización del comportamiento sísmico con algoritmos evolutivos.
- Blockchain para trazabilidad de cumplimiento normativo y contratos de seguros paramétricos. Certificación inmutable de inspecciones y evaluaciones PBSB para uso en reclamaciones.

12. Conclusiones Estratégicas

El Diseño Sísmico por Desempeño no solo representa una evolución técnica, sino una verdadera revolución en la toma de decisiones estratégicas para la planificación urbana, la protección de activos y la sostenibilidad post-desastre. Adoptarlo es ir un paso más allá de la ingeniería: es pensar en resiliencia, continuidad y eficiencia de largo plazo. Su implementación progresiva será clave para las ciudades del futuro.

El PBSB redefine la forma en que aseguradoras y reaseguradoras pueden:

- Valorar riesgos de forma más precisa.
- Optimizar primas y deducibles con base en riesgo medido.
- Reducir siniestralidad a largo plazo al incentivar edificaciones más resilientes.
- Implementar seguros paramétricos vinculados a niveles de desempeño verificados.

Recomendación estratégica:

Integrar el PBSB como requisito técnico en edificaciones aseguradas de alto valor o criticidad, especialmente hospitales, data centers, infraestructura energética y sedes corporativas.

13. Bibliografía Técnica Especializada

- PEER, “Performance-Based Seismic Design”, Technical Report Series.
- FEMA P-58, “Seismic Performance Assessment of Buildings”.
- ASCE/SEI 41-17, “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”.
- ATC-58 y ATC-72: Guidelines y Manuales Técnicos.
- Chopra, A.K. “Dynamics of Structures”.
- Paulay & Priestley, “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”.



**Juan Carlos Lancheros Rueda – CILA, BC’s Mech Eng, BC’s B.A, M.I.A, P.M.S, F.M.S.
C.E.O.**