



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS DE PLANTA LIBRE NOMINALMENTE SIMÉTRICOS USANDO ANFIS

CÉSAR RAÚL SEPÚLVEDA OVALLE

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN CARLOS DE LA LLERA M.

Santiago de Chile, Marzo, 2011

© 2011, César Sepúlveda Ovalle



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS DE PLANTA LIBRE NOMINALMENTE SIMÉTRICOS USANDO ANFIS

CÉSAR RAÚL SEPÚLVEDA OVALLE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN CARLOS DE LA LLERA M.

JOSÉ LUIS ALMAZÁN C.

ANDRÉS JACOBSEN P.

DIEGO JAVIER CELENTANO

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Marzo, 2011

*A mi familia, por su apoyo
incondicional a largo de los años
y Adriana por su ayuda durante
esta etapa.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que colaboraron para que este trabajo tuviera buen término.

A mi profesor supervisor Juan Carlos De la Llera por su paciencia y dedicación en el desarrollo de esta iniciativa.

Agradezco al Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico FONDECYT, el cual contribuyó a financiar esta investigación a través del proyecto 1085282. Incluyo también a la empresa Weir Minerals Vulco por la beca entregada como apoyo a la investigación.

Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
3. PARÁMETROS FÍSICOS	9
4. ESTIMACIÓN DE RESPUESTA.....	15
5. EJEMPLOS DE VALIDACIÓN	26
6. CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA	43

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1. Elementos utilizados en el modelo de la Figura 2-1 y sus grados de libertad local	7
Tabla 5-1. Variables de entrada y salida en sistema ANFIS, caso de validación	27
Tabla 5-2. Comparación de los periodos del edificio obtenidos por los modelos ETABS y PSM.....	29
Tabla 5-3. Resultados de historia de respuesta para movimientos sísmicos – Despl. de Techo.....	33
Tabla 5-4. Resultados de historia de respuesta para movimientos sísmicos – Corte basal	33
Tabla 5-5. Comparación del desplazamiento entre los modelos PSM y ETABS resultante para dos niveles de amortiguamiento.....	38
Tabla 5-6. Comparación del corte basal entre los modelos PSM y ETABS resultante para dos niveles de amortiguamiento.....	39
Tabla 5-7. Razón de tiempo computacional entre modelo PSM y FEM-ETABS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1. Descomposición de modelo estructural.....	6
Figura 2-2. (a) Modelo real; (b) Modelo flexural; (c) Modelo de corte.....	8
Figura 3-1. Razón entre la deformación lateral y deformación máxima del edificio en la altura (z) normalizada por la altura total (H), para distintos valores del parámetro α	12
Figura 3-2. Variación del parámetro α en función del número de pisos y $EI_{columna}/(EI)_{viga}$	13
Figura 3-3. Comparación del PSM con las soluciones exactas.....	14
Figura 4-1. Diagrama funcional ANFIS (Jang, 1993).....	15
Figura 4-2. Ejemplo de un modelo ANFIS para una estructura de pórtico-muro 2D.....	16
Figura 4-3. Procedimiento general construcción de base datos y entrenamiento ANFIS	19
Figura 4-4. Esquema general estructuración pórtico-muro 2D.....	21
Figura 4-5. RMSE en entrenamiento, estructuración pórtico-muro 2D.....	21
Figura 4-6. Funciones de membresía entrenadas, estructuración de pórtico-muro 2D....	22
Figura 4-7. Prototipo de plantas estructurales utilizadas en base de datos, planta libre ..	23
Figura 4-8. Aplicación ANFIS en predicción de respuesta estructural.....	24
Figura 5-1. Planta tipo de estructura de validación.....	26
Figura 5-2. Comparación de formas modales entre modelos FEM-ETABS y para edificio de validación	29

Figura 5-3. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM del desplazamiento de techo para edificio de validación sometido al registro de Melipilla: (a) Dirección X; (b) Dirección Y	30
Figura 5-4. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM del desplazamiento de techo para edificio de validación sometido al registro de Sylmar: (a) Dirección X; (b) Dirección Y	31
Figura 5-5. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM de esfuerzo de corte basal para edificio de validación sometido al registro de Melipilla: (a) Dirección X; (b) Dirección Y	31
Figura 5-6. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM de esfuerzo de corte basal para edificio de validación sometido al registro de Sylmar: (a) Dirección X; (b) Dirección Y	32
Figura 5-7. Ubicación y esquema de los amortiguadores en el edificio de validación	34
Figura 5-8. Desplazamiento del techo dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Melipilla.....	36
Figura 5-9. Desplazamiento del techo dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Sylmar.....	36
Figura 5-10. Esfuerzo de corte basal dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Melipilla.....	37
Figura 5-11. Esfuerzo de corte basal dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Sylmar.....	37

RESUMEN

Debido al presente interés en conocer el comportamiento estructural en etapas tempranas de diseño del nuevo concepto estructural de edificios, denominado planta libre, se presenta en este estudio un modelo empírico que proporciona una estimación preliminar de la respuesta estructural de este tipo de estructuración. La formulación del modelo planteado se basa en la descomposición de comportamientos estructurales (flexural y corte), representados mediante modelos simplificados basados en la teoría de vigas, donde el parámetro de combinación α , es determinado a partir de un sistema ANFIS (*Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System*), construido a partir del entrenamiento de bases de datos de las estructuras estudiadas. Se presentan los procedimientos de las etapas involucradas por los métodos de solución, al igual que su validación mediante ejemplos desarrollados, incluyendo la extensión del modelo propuesto a estructuras con sistemas de disipación de energía. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo empírico propuesto proporciona aproximaciones adecuadas para ser utilizadas en etapas tempranas de diseño respecto a desplazamientos de piso y esfuerzo de corte basal; también se muestran mejoras en el tiempo de cálculo proporcionado por el modelo propuesto en comparación con la práctica generalizada actual.

Palabras Claves: Edificio de planta libre, Modelo estructural empírico, Descomposición estructural, ANFIS.

ABSTRACT

Because of the increasing interest to understand the structural behavior in early stages of structural design of the new concept, called free-plan building, an empirical model that provides a preliminary estimate of the structural response of this type of structure is presented in this study. The formulation of the proposed model is based on the decomposition of structural behavior (flexural and shear), represented by simplified models based on beam theory, where the combination parameter α is determined from an ANFIS (Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference System) system, which is built from the training database of the structures studied. The procedures of the steps involved in solving methods are presented as validation by worked examples, including the extension of the model proposed to structures with energy dissipation systems. The results show that the empirical model proposed provides adequate approximations for its use in early stages of design regarding floor displacements and basal shear, and also showed improvements in computing time provided by the proposed model compared to current practice in Chile.

Keywords: Free-plan building, Structural empirical model, Structural decomposition, ANFIS.

1. INTRODUCCIÓN

La validación conceptual y numérica de una configuración de edificio de planta libre en las etapas tempranas de un proyecto permite un diseño final más eficiente, ya que genera un ahorro considerable en el trabajo que se presenta debido a los frecuentes ajustes necesarios en arquitectura e ingeniería durante el proceso final de diseño estructural. Por este motivo resulta necesario buscar y utilizar modelos empíricos que permitan realizar aproximaciones que ayuden a tomar decisiones en tiempos adecuados para determinar configuraciones estructurales iniciales más próximas al diseño final, eliminando iteraciones de reestructuración. Para esto el modelo empírico a utilizarse debe cumplir con ciertos requisitos con el fin de garantizar el correcto funcionamiento y precisión de éste. Dentro de las características que debe poseer un modelo simplificado están la robustez, simplicidad, aplicación al caso bidimensional y tridimensional, inclusión del efecto de la rigidez de la losa, obtención de respuestas en el diseño de sistemas de disipación de energía y extensión al caso de análisis inelástico.

Debido a que es muy ambicioso buscar un modelo empírico simplificado capaz de estimar con precisión la respuesta de un edificio arbitrario, este trabajo está dedicado a una tipología simple de edificios denominada edificios de planta libre, con una planta nominalmente simétrica. Este tipo de estructuración está compuesta principalmente por cuatro componentes: (i) un núcleo de muros de corte central destinado a escaleras y ascensores, (ii) marcos perimetrales, (iii) una losa de hormigón armado o postensado y (iv) varios subterráneos destinados a estacionamientos. Estos componentes engloban un tipo de arquitectura flexible que ha producido un interés creciente entre arquitectos y oficinas de cálculo, por lo cual se hace imprescindible utilizar estimaciones rápidas mediante modelos simplificados en la etapa de diseño preliminar de forma de evaluar si la estructuración satisface criterios de diseño globales, como por ejemplo, drift de entrepiso, esfuerzo de corte basal, etc.

El comportamiento sísmico de edificios de planta libre durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile, puede ser considerado como un éxito. Sin embargo, se observó que el efecto de acoplamiento de la losa fue bastante relevante en la respuesta del edificio y por lo tanto, los modelos empíricos deben considerarlo, dado que se ha demostrado que al despreciar la rigidez flexural de la losa, pueden generarse errores superiores al 50% en el periodo fundamental de una estructura de este tipo (Encina, 2011), generando grandes diferencias con el diseño estructural.

Una amplia gama de modelos estructurales simplificados 2D y 3D para respuestas de estimación sísmica de edificios está disponible en la literatura (Miranda et al., 1999, 2002 y 2005; Chajes, 1996; De la Llera et al., 1995 y 2000).

En investigaciones anteriores se han encontrado diferentes modelos simplificados bidimensionales, entre los cuales se destaca el trabajo realizado por Miranda (1999), donde se aproxima la demanda de deformación lateral sísmica en pórticos planos de múltiples pisos con rigidez uniforme, lo cual es representado mediante un modelo continuo equivalente bidimensional que consiste en una combinación de una viga flexural en voladizo y una viga de corte en voladizo, respectivamente. Se asume que ambas vigas están conectadas por elementos axiales rígidos que transmiten las fuerzas horizontales; por lo tanto, el sistema combinado se deforma lateralmente en la misma cantidad, obteniendo errores menores al 26% en la estimación del drift de entrepiso máximo para una estructura de pórtico bidimensional de 10 pisos.

Este estudio fue ampliado a pórticos de múltiples pisos con rigidez no uniforme en altura por Miranda y Reyes (2002), para determinar una aproximación de la demanda del drift lateral para el caso bidimensional de este tipo de estructuras, presentado errores inferiores al 30% en todos los casos.

A su vez, este modelo continuo simplificado basado en la teoría de vigas fue utilizado por Reinoso y Miranda (2005) para estimar la demanda de aceleración de pisos en diferentes rascacielos instrumentados durante un terremoto, de forma de evaluar el

poder predictivo del modelo realizando un estudio plano en cada una de las direcciones de análisis.

De manera similar, Chajes (1996) muestra el desarrollo de un modelo continuo lineal con reducción de orden para una estructuración de pórtico aplicable al caso de análisis bidimensional. Para validar este estudio se utilizó una estructura de pórtico real de 47 pisos, obteniendo errores menores al 8% en el cálculo de los periodos de vibración y un error menor al 2% a nivel de desplazamiento lateral máximo.

Por otro lado, De la Llera et al. (1995, 2000) muestra el desarrollo de un modelo simplificado aplicable a edificios en base a un macro-elemento por piso con el objetivo de realizar análisis elástico e inelástico de edificios de planta asimétrica y cuya aplicación está enfocada a estructuras que poseen un comportamiento predominante de corte por las hipótesis de modelación consideradas. El efecto de no-linealidad material es incorporado mediante la construcción de la superficie de fluencia con una constitutiva elasto-plástica perfecta, a través de la interacción entre los esfuerzos de corte en cada dirección y torque del piso. Basado en los elementos estructurales de la planta considerada del edificio, se obtuvieron errores inferiores al 20% en la respuesta inelástica de las estructuras estudiadas.

Este trabajo está basado en las siguientes observaciones: (i) debido a las diferentes arquitecturas externas, los edificios de planta libre presentan frecuentemente patrones de configuración estructural con la presencia de un núcleo de muros de corte central, un marco perimetral y una losa de acoplamiento entre ambos; (ii) si no fuera por el acoplamiento de la losa, el comportamiento lateral podría descomponerse en un comportamiento flexural y uno de corte para el núcleo de muros y marco perimetral respectivamente; y (iii) quizás el comportamiento acoplado más complejo entre los componentes puede ser estimado a través de una combinación lineal de un comportamiento simple desacoplado. Debido a estas observaciones (i) y (ii) y a la hipótesis (iii), se puede esperar que la respuesta de diferentes edificios dentro de un

espacio de estructuras determinadas pueda ser predicho por una red neuronal entrenada. El modelo es denominado empírico debido a que se basa en la descomposición lineal de comportamientos estructurales, donde el parámetro de combinación es determinado mediante un modelo de *Adaptive Network Based Fuzzy Inference System* - ANFIS (Jang, 1993).

Debido a que este modelo es una herramienta para discriminar si un modelo estructural es adecuado, la precisión, velocidad y auto-aprendizaje son características importantes. Relativo a lo anterior, los resultados de cada nuevo modelo analizado, pueden también ser utilizados para mejorar el conocimiento base de los modelos empleados en el entrenamiento. Además, la precisión en la predicción entregada por el modelo debe ser adecuada para permitir tomar decisiones sobre la configuración estructural. Por otra parte, la eficiencia del modelo de análisis es relevante para admitir pruebas rápidas para diferentes configuraciones de planta.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El concepto de planta libre se ha convertido en un concepto arquitectónico atractivo para edificios de oficinas debido principalmente a su flexibilidad en distribución y uso de espacios interiores. Tal flexibilidad es obtenida al proveer un esqueleto estructural, espacios comunes acabados arquitectónicamente y utilidades básicas en cada uno de los espacios de oficina. Desafortunadamente, estos proyectos son siempre desarrollados con poco tiempo para probar diferentes configuraciones estructurales.

Dada la necesidad de mayores espacios para la venta y costos directos menores, el arquitecto necesita soluciones estructurales rápidas, a su vez, el ingeniero estructural requiere tiempo para desarrollar un adecuado modelo estructural que produzca un apropiado diseño.

En general, los modelos simplificados disponibles (Miranda et al., 1999, 2002 y 2005; Chajes, 1996; De la Llera et al., 1995 y 2000) no son capaces de representar con precisión la respuesta sísmica de edificios de planta libre, ya que este tipo de estructura combina el comportamiento flexural del núcleo de muros de corte y el comportamiento tipo corte del marco perimetral, junto con el efecto de acoplamiento producido por la losa.

Para introducir el concepto del modelo usado en este documento, se considera el modelo simplificado de pórtico de un piso presentado en la Figura 2-1. La idea central es descomponer el modelo de edificio en un modelo dominado por flexión y un modelo dominado por corte, donde el parámetro α captura la contribución de los dos comportamientos en la respuesta de la estructura. La consideración de realizar una descomposición de comportamientos se debe a la imposibilidad de obtener un modelo

simplificado único basado en la teoría de vigas, dada la dificultad de calcular los parámetros equivalentes que reflejen el comportamiento estructural adecuadamente.

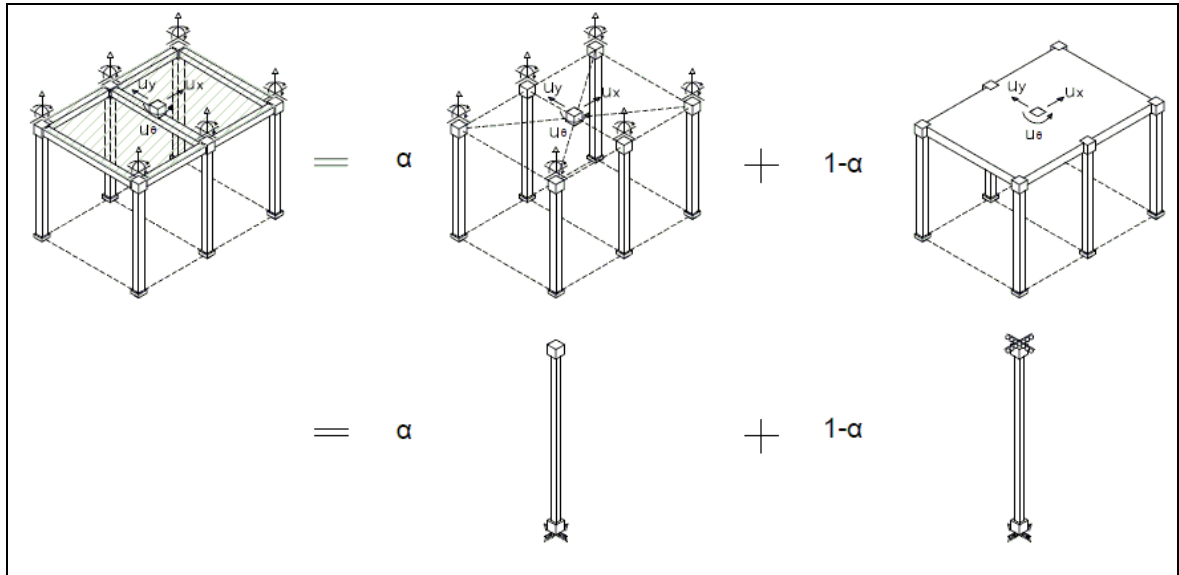
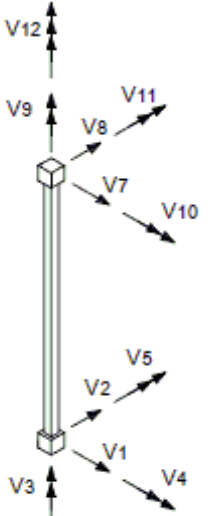


Figura 2-1. Descomposición de modelo estructural

La Tabla 2-1 muestra los tipos de elemento utilizados en el modelo de la Figura 2-1. En el caso del modelo dominado por el comportamiento flexural se utiliza un elemento de tipo Timoshenko (Timoshenko, 1951), incorporando el efecto de Saint-Venant y Alabeo en la rigidez torsional (McGuire et al., 2000) para el caso de estructuras tridimensionales, de forma de capturar correctamente la respuesta torsional, lo cual no es posible si es despreciada la rigidez al alabeo del elemento. Para el caso del modelo dominado por el comportamiento de corte se utiliza un elemento de tipo Timoshenko considerando restringidos los grados de libertad de giro fuera del plano de la losa, de forma de eliminar el aporte flexural del elemento en el modelo. En el caso tridimensional este modelo considera solamente el efecto de Saint-Venant para estimar

la rigidez torsional (McGuire et al., 2000), dado que el supuesto de losa infinitamente rígida para caracterizar el comportamiento de corte no permite el alabeo de los elementos estructurales verticales.

Tabla 2-1. Elementos utilizados en el modelo de la Figura 2-1 y sus grados de libertad local

	2D element	3D element		2D element	3D element
Flexural model			Shear model		

Una extensión de este procedimiento se presenta para un edificio nominalmente simétrico de n-pisos, con un núcleo de muros de corte y marco perimetral (Figura 2-2a). El modelo flexural (Figura 2-2b) de la estructura es construido mediante la liberación de todas las restricciones flexurales entre las columnas y muros con las vigas y losas de piso. Por otro lado, el modelo de corte (Figura 2-2c) es construido mediante la restricción de las rotaciones a través de un diafragma y vigas infinitamente rígidas. Las consideraciones utilizadas en la construcción de los modelos flexural y de corte permiten

representarlos en modelos equivalentes utilizando la teoría de vigas, concepto fundamental del modelo empírico planteado mediante los elementos propuestos en la Tabla 2-1.

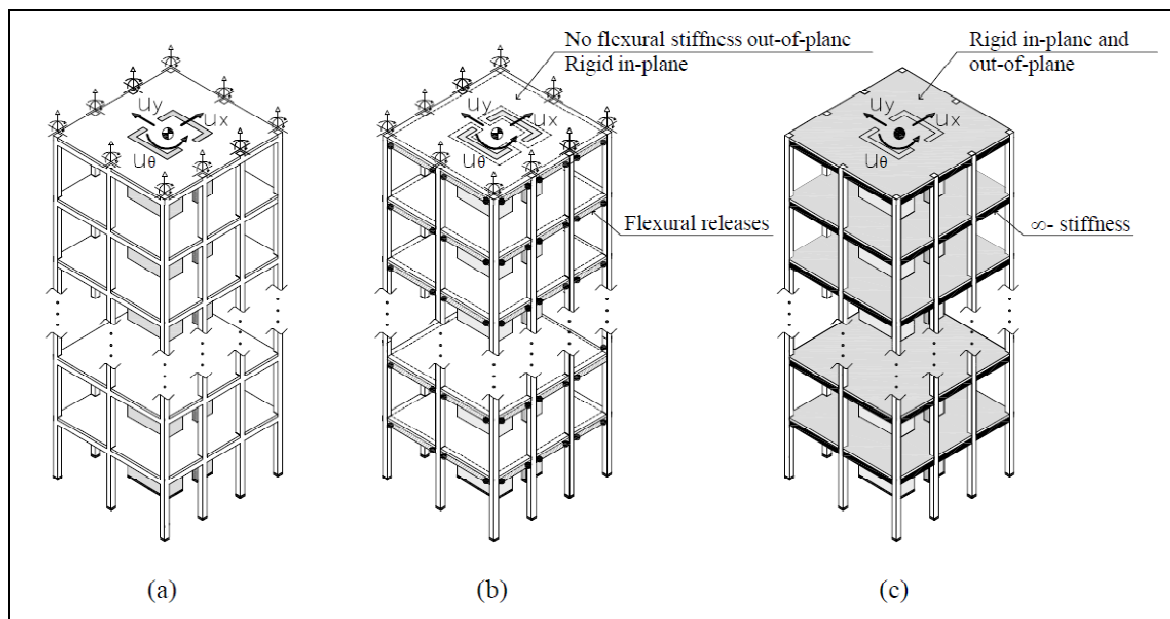


Figura 2-2. (a) Modelo real; (b) Modelo flexural; (c) Modelo de corte

En cualquiera de los casos anteriores, el comportamiento del marco perimetral puede ser considerado como una combinación lineal de dos comportamientos extremos. Uno con losa infinitamente flexible y el otro con la losa infinitamente rígida. La misma descomposición es apropiada para el núcleo de muros de corte.

La ventaja de esta descomposición es que el comportamiento de la estructura para estos dos casos extremos es muy simple de calcular y la única incertidumbre presente es la proporción que posee cada uno de estos modelos en la respuesta combinada.

3. PARÁMETROS FÍSICOS

Un aspecto clave del modelo presentado es la definición de los parámetros de entrada. Para este propósito, un gran número de optimizaciones fueron realizadas utilizando MATLAB en una gran cantidad de modelos con el objetivo de observar patrones en los resultados. Sin embargo, la estimación óptima para los parámetros falló debido a que estos eran siempre dependientes de varios factores, entre ellos, la altura del edificio.

Esto fue solucionado mediante la descomposición del modelo en modelos predominantes en flexión y corte, donde los parámetros óptimos presentaron una estabilización y se convirtieron esencialmente en los parámetros nominales que cualquier diseñador puede calcular.

La distorsión del valor de los parámetros en el proceso de optimización se debía al incremento de la influencia de la flexión de la losa, el cual era creciente en la altura.

A continuación se muestran las fórmulas para calcular los parámetros de construcción óptimos de un diseño determinado, dada la descomposición de los modelos de flexión y de corte descritos anteriormente. La inercia (I_x , I_y) y el área de corte (A_{sx} , A_{sy}) están dadas por la suma de las inercias individuales y áreas de corte, respectivamente, de cada uno de los elementos verticales (columnas y muros de corte), es decir:

$$I_x^{(eq)} = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} I_x^{(i)} ; I_y^{(eq)} = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} I_y^{(i)} \quad (1)$$

$$A_{sx}^{(eq)} = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} A_{sx}^{(i)} ; A_{sy}^{(eq)} = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} A_{sy}^{(i)} \quad (2)$$

Los parámetros torsionales del edificio son también esenciales para obtener la correcta deformada de la estructura para los análisis estático y dinámico. Para esto se hace necesario incluir el efecto de Saint-Venant y alabeo, ya que conducen a los parámetros torsionales J y C_w , respectivamente, para el macro-elemento equivalente. En el modelo flexural, los parámetros torsional (J) y alabeo (C_w) son derivados a partir de la rigidez torsional de la planta de un edificio, la cual puede ser estimada mediante:

$$K_{\theta}^{(F)}(L) = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \left(\frac{3EI_{xo}^{(i)}}{L^3} \right) \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \left(\frac{3EI_{yo}^{(i)}}{L^3} \right) \cdot y_i^2 + \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \frac{720C_{wo}^{(i)2}E^2 + 312C_{wo}^{(i)}EGJ_o^{(i)}L^2 + 9G^2J_o^{(i)2}L^4}{8J_o^{(i)}GL^5 + 240C_{wo}^{(i)}EL^3} \quad (3)$$

Donde E corresponde al módulo de Young; G el módulo de corte y L la longitud del modelo equivalente.

A continuación se muestra el sistema de ecuaciones para resolver los parámetros $J_f^{(eq)}$ y $C_{wf}^{(eq)}$:

$$\begin{cases} K_{\theta}^{(*)}(C_w, J, L_1) = \frac{720C_w^2E^2 + 312C_wEGJL_1^2 + 9G^2J^2L_1^4}{8GJL_1^5 + 240C_wEL_1^3} \\ K_{\theta}^{(*)}(C_w, J, L_2) = \frac{720C_w^2E^2 + 312C_wEGJL_2^2 + 9G^2J^2L_2^4}{8GJL_2^5 + 240C_wEL_2^3} \end{cases} \rightarrow J_f^{(eq)} \text{ y } C_{wf}^{(eq)} \quad (4)$$

Donde L_1 y L_2 representan dos longitudes arbitrarias requeridas para determinar los parámetros torsionales J y C_w asociados a la estructura. Estos parámetros son únicos e independientes de la altura del modelo.

En el caso del modelo de corte, dada la rigidez flexural del diafragma, el alabeo no está permitido, por lo cual el parámetro torsional es obtenido a partir de la rigidez torsional incluyendo el aporte proveniente de la flexión de los elementos verticales y el efecto de Saint-Venant, a través de la ecuación (5).

$$K_{\theta}^{(c)} = \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \left(\frac{12EI_{xo}^{(i)}}{L^3} \right) \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \left(\frac{12EI_{yo}^{(i)}}{L^3} \right) \cdot y_i^2 + \sum_{i=1}^{n_{col}+n_{sw}} \frac{GJ_o^{(i)}}{L} \quad (5)$$

Lo que conduce a una constante torsional equivalente para el modelo de corte:

$$J_c^{(eq)} = \frac{K_{\theta}^{(c)} \cdot L}{G} \quad (6)$$

Así, en el Modelo Simplificado Propuesto (PSM, por sus siglas en inglés), todos los parámetros son obtenidos usando las propiedades nominales del edificio, evitando la necesidad de calibración de parámetros caso a caso. Sin embargo, aún se tiene como incógnita en el PSM la contribución del parámetro de combinación denominado α , el cual representa la proporción del comportamiento predominante flexural y de corte de la estructura y el efecto de la losa. Después de algunas iteraciones de la selección de un funcional óptimo (parámetros modales, respuesta lateral, etc), el parámetro α es obtenido mediante la minimización del error de la deformada del edificio para un patrón de fuerzas laterales (F), es decir:

$$\text{Min} \|d_{FEM} - d_{PSM}\|_2^2 \quad (7)$$

Donde,

$$d_{PSM} = (\alpha \cdot K_F + (1 - \alpha) \cdot K_C)^{-1} \cdot F \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

El efecto de este parámetro es mejor entendido en la deformada de un edificio de pórtico de 20 pisos, mostrado en la Figura 3-1 para diferentes valores de α . Se puede observar que la deformada para $\alpha=1$ representa un comportamiento de tipo flexural, mientras que $\alpha=0$ representa a un comportamiento de corte; valores de α entre 0 y 1 representan comportamientos de tipo intermedio, correspondientes a estructuras reales, dado que los comportamientos extremos no pueden ser materializados estructuralmente, ya que son casos idealizados.

Las deformadas posibles de obtener poseen una gran sensibilidad al parámetro de combinación lineal α , dado que pequeños cambios en valores próximos al comportamiento flexural generan grandes variaciones en la respuesta estructural, por lo cual, se requiere que el modelo empírico planteado posea la capacidad y precisión adecuada en la estimación de dicho parámetro.

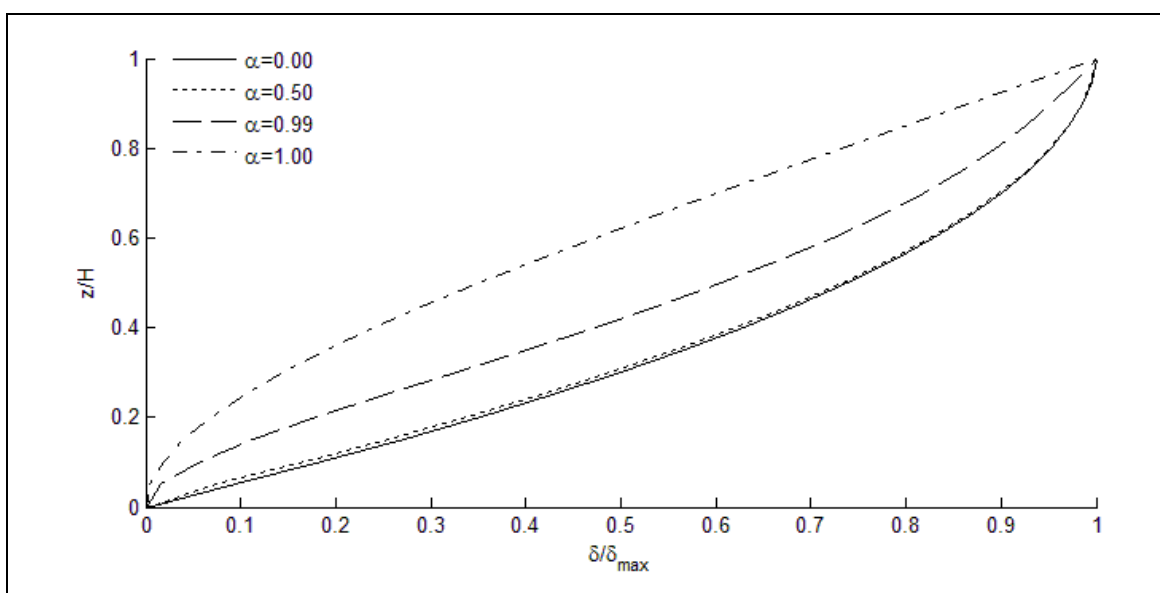


Figura 3-1. Razón entre la deformación lateral y deformación máxima del edificio en la altura (z) normalizada por la altura total (H), para distintos valores del parámetro α

También es interesante relacionar el parámetro α con el parámetro físico de rigidez columna-viga ($(EI)_{columna}/(EI)_{viga}$), mostrado en la Figura 3-2 para estructuras de pórtico 2D con diferente número de pisos. Grandes valores de este parámetro representan el comportamiento flexural o de tipo voladizo de las columnas en relación a las vigas, debido a que la viga proporciona una rigidez prácticamente nula al giro y al desplazamiento de la columna, efecto considerado en el modelo base

denominado flexural (en el cual las vigas fueron rotuladas en sus extremos); por otro lado valores pequeños representan un comportamiento de tipo corte, producto de que las columnas poseen una mayor restricción al giro debido a la gran rigidez proporcionada por las vigas, concepto fundamental del modelo base denominado de corte. También se puede observar la importancia de la variable número de pisos, dado que al aumentarla se presenta un comportamiento similar al flexural requiriendo disminuir el parámetro $(EI)_{columna}/(EI)_{viga}$ para obtener comportamientos más próximos al corte.

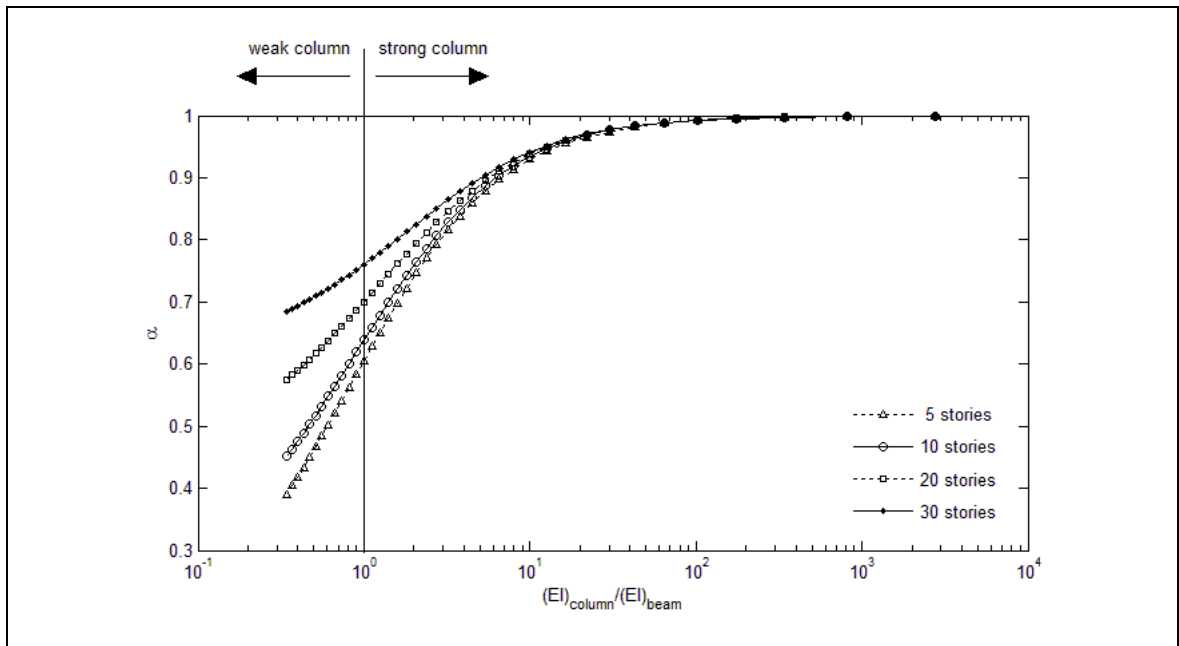


Figura 3-2. Variación del parámetro α en función del número de pisos y $(EI)_{columna}/(EI)_{viga}$

La Figura 3-3 muestra el resultado de aplicar el PSM a dos diferentes marcos planos con las elevaciones indicadas y dos estructuras 3D con plantas indicadas en la gráfica. También se presentan los valores óptimos del parámetro α resultantes de la calibración. En ambos casos del ejemplo 2D la solución es prácticamente exacta. En el caso 3D, la estimación del PSM es adecuada pero se observan errores mayores como

resultado del efecto más complejo producto del acoplamiento generado por la losa, dada la rigidez fuera del plano que se presenta al realizar la modelación de la misma en un modelo de elementos finitos, la cual no puede ser despreciada en estructuras que presentan deformaciones de tipo flexural significativas, como es el caso de la estructuración de planta libre. El PSM captura el efecto de la rigidez de la losa mediante el parámetro de combinación α , es decir, no utiliza un modelo físico de la losa como en el caso del modelo de elementos finitos disponible en el software ETABS (2008).

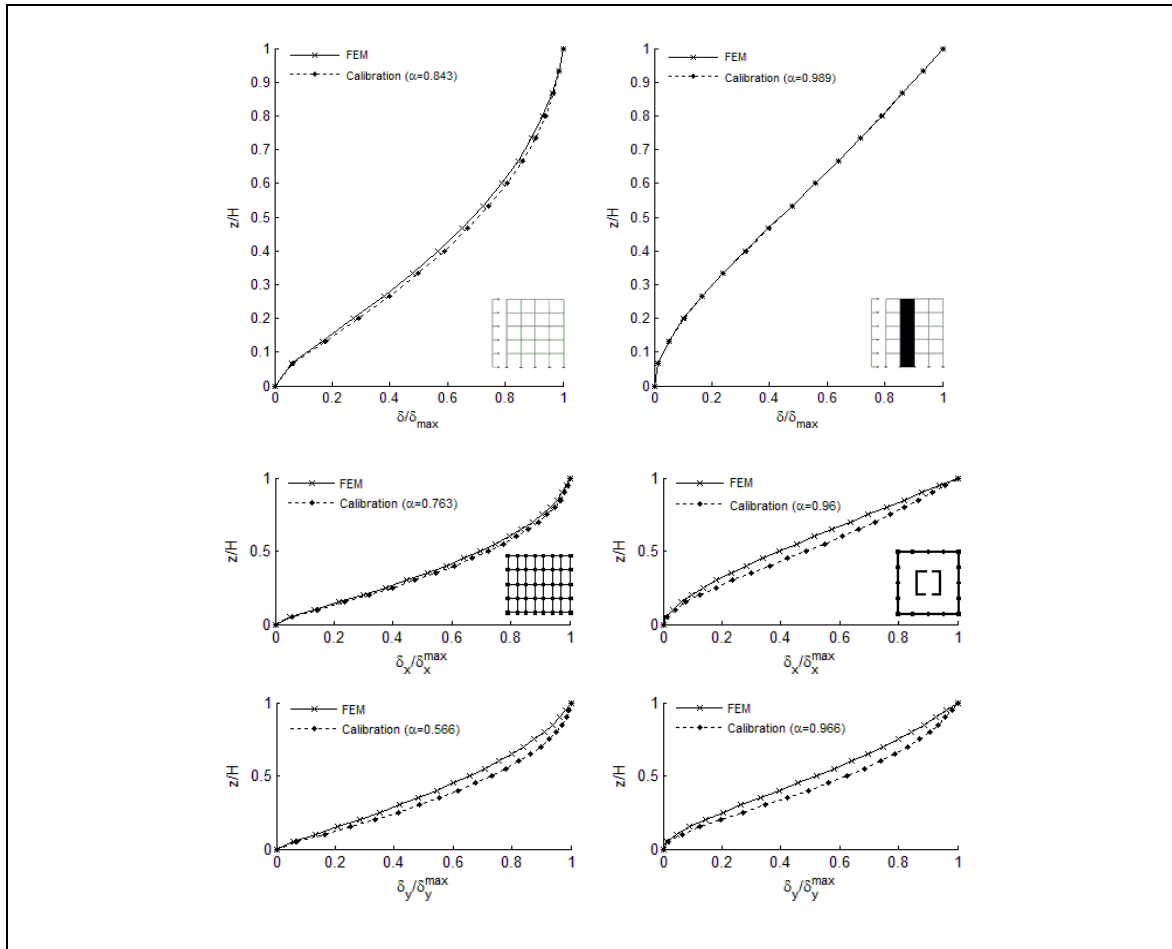


Figura 3-3. Comparación del PSM con las soluciones exactas

4. ESTIMACIÓN DE RESPUESTA

Antes de continuar con el uso del PSM, se presenta en esta sección la estrategia de estimación del parámetro α , la cual se basa en el uso de un Sistema de Inferencia Neuronal Difusa Adaptativa conocida como ANFIS, por sus siglas en inglés. Un sistema ANFIS está caracterizado por cinco bloques funcionales (Figura 4-1): (i) la base de reglas que contiene las reglas difusas del tipo SI-ENTONCES; (ii) la base de datos que define las funciones de membresía difusas del sistema usadas en las reglas; (iii) la unidad de decisión que ejecuta las operaciones de inferencia en las reglas; (iv) la interfaz difusa de transformación de entradas en valores lingüísticos de las funciones de membresía; y (v) la interfaz de "defuzzification" que implica la transformación de variables difusas en valores de salida.

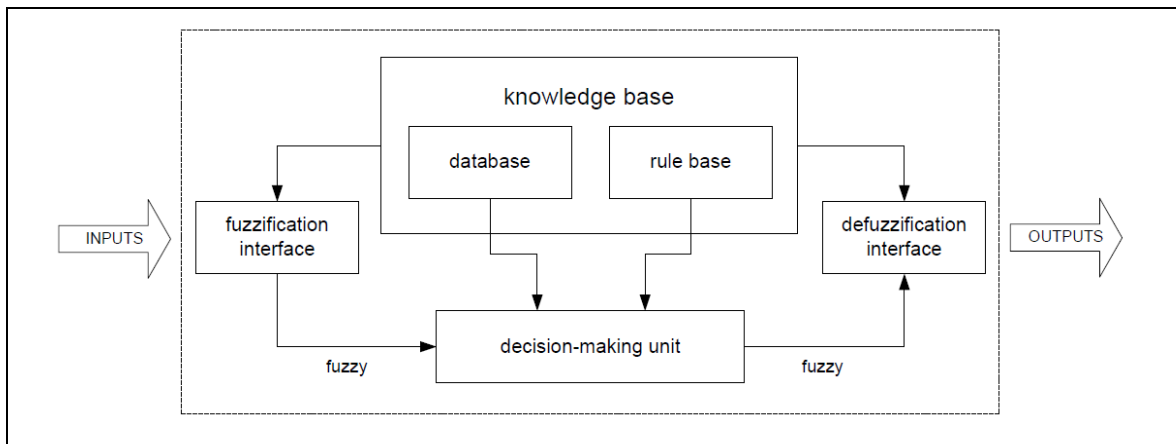


Figura 4-1. Diagrama funcional ANFIS (Jang, 1993)

Una red neuronal adaptativa está compuesta por multicapas de nodos conectados, los cuales pueden ser nodos de operaciones fijas (nodos circulares) o nodos adaptativos (nodos cuadrados) que poseen parámetros que varían durante el entrenamiento (Jang, 1993; Hassoun, 1995; Kung, 1993; Zadeh, 1994). En la Figura 4-2 se muestra un esquema de una red adaptativa considerando cuatro entradas y una salida, correspondiente al caso bidimensional con estructuración de pórtico-muro.

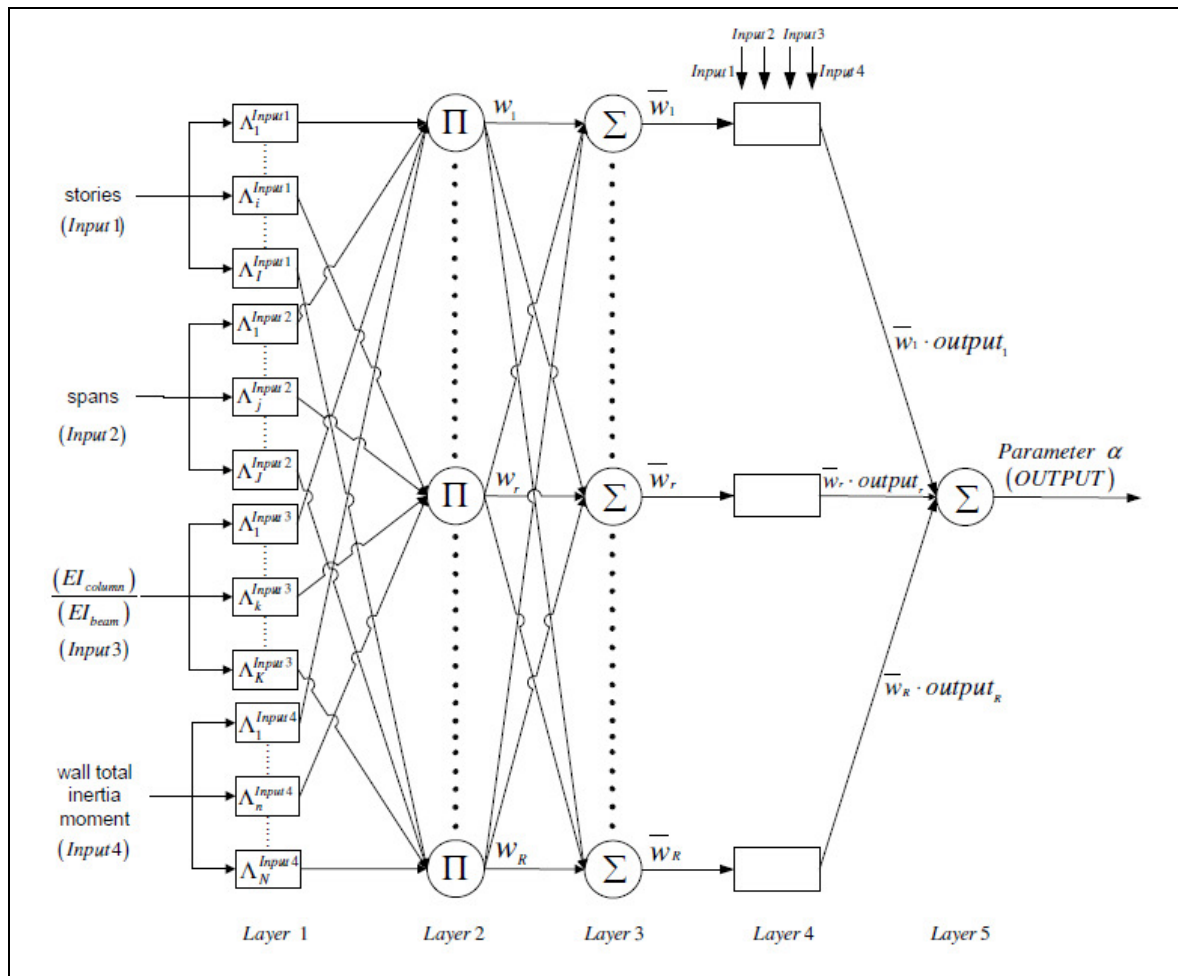


Figura 4-2. Ejemplo de un modelo ANFIS para una estructura de pórtico-muro 2D

Cada nodo de la capa 1 representa una función de membresía denominada por $\Lambda_i^{Input\ 1}$, $\Lambda_j^{Input\ 2}$, $\Lambda_k^{Input\ 3}$ y $\Lambda_n^{Input\ 4}$, que corresponden a las funciones de membresía i , j , k y n para el número de pisos, número de vanos, cuociente de rigidez (EI) entre columnas y vigas y momento de inercia de los muros, respectivamente. La cantidad de funciones de membresía de cada input en primera instancia es arbitraria; esta arbitrariedad puede ser usada de forma tal de obtener una configuración que genere resultados óptimos. Existe una variedad de formas en las funciones de membresía, en esta oportunidad se utilizaron funciones de membresía con forma de campana, ya que proporcionaron los mejores resultados. Dicha representación posee tres parámetros que controlan su forma, los que se denominan parámetros premisos y deben ser ajustados mediante el entrenamiento de la red ANFIS.

Además, los nodos de la segunda capa corresponden a nodos fijos que realizan la multiplicación (Π) (representado por el operador lógico ‘Y’) de los valores obtenidos al evaluar las funciones de membresía que llegan al nodo con las salidas ingresadas. El producto se denota como w_r y es igual a:

$$w_r = \Lambda_i^{Input\ 1} \cdot \Lambda_j^{Input\ 2} \cdot \Lambda_k^{Input\ 3} \cdot \Lambda_n^{Input\ 4} \quad (9)$$

La capa 3 está formada por nodos de operación fijos (denotados por Σ), donde se obtienen los ponderados de cada regla conformada mediante la razón entre el peso de cada regla y la suma de todos los pesos de las reglas existentes, es decir, cada nodo presenta la siguiente expresión:

$$\bar{w}_r = \frac{w_r}{\sum_{s=1}^R w_s} \quad (10)$$

Donde R representa el número de reglas.

En la capa 4, los valores de salida de cada regla se obtienen de los nodos adaptativos, mediante una combinación lineal de las entradas más una constante, es decir, se tiene en cada nodo una expresión del tipo:

$$Output_r = a_r^{Input\ 1} \cdot Input_1 + b_r^{Input\ 2} \cdot Input_2 + c_r^{Input\ 3} \cdot Input_3 + d_r^{Input\ 4} \cdot Input_4 + e_r$$

$$r = 1, \dots, R \quad (11)$$

Donde los parámetros $a_r^{Input\ 1}, b_r^{Input\ 2}, c_r^{Input\ 3}, d_r^{Input\ 4}$ y e_r son denominados parámetros consecuentes de cada regla y deben ser determinados mediante el entrenamiento de la red adaptativa (Jang, 1993; Hassoun, 1995; Kung, 1993; Zadeh, 1994).

Por último, la capa 5 es la responsable de componer la salida del modelo de evaluación de α a través de la sumatoria de las salidas de cada regla multiplicada por el ponderador correspondiente a cada una de ellas, es decir:

$$OUTPUT = \sum_{r=1}^R (\bar{w}_r \cdot Output_r) \quad (12)$$

El algoritmo de ANFIS establece un procedimiento de entrenamiento híbrido (Jang, 1993), compuesto de dos pasos convencionalmente llamados entrenamientos hacia adelante (“*forward*”) y hacia atrás (“*backward*”). En el paso hacia adelante los parámetros consecuentes ubicados en la capa 4 ($a_r^{Input\ 1}, b_r^{Input\ 2}, c_r^{Input\ 3}, d_r^{Input\ 4}$ y e_r) son determinados usando el método de mínimos cuadrados (Jang, 1993; Hassoun, 1995; Kung, 1993), mientras que en el paso hacia atrás se actualizan los parámetros premisos de la capa 1 ($\Lambda_i^{Input\ 1}, \Lambda_j^{Input\ 2}, \Lambda_k^{Input\ 3}$ y $\Lambda_n^{Input\ 4}$) mediante el gradiente decreciente (Jang, 1993; Hassoun, 1995; Kung, 1993), ya que se busca minimizar la medida de error dada por la suma de los errores al cuadrado, obtenidos durante el entrenamiento.

El propósito del modelo ANFIS es ser capaz de predecir el valor del parámetro α para nuevos edificios que se describen tan sólo con un determinado conjunto de planos

estructurales, sin ningún tipo de modelo de elementos finitos del modelo de construcción o de calibración. Por lo tanto, se requiere de una base de datos que permita realizar el entrenamiento del modelo ANFIS en los modelos 2D (pórtico puro y pórtico-muro) y 3D (pórtico y planta libre).

Para lograr este objetivo, se creó el procedimiento mostrado en la Figura 4-3 para obtener las bases de datos correspondientes a cada tipo de estructuración investigada, el cual consiste en crear un inventario de estructuras mediante la programación ANSYS-APDL (2009), obteniendo parámetros globales de la estructuración (número de pisos, espesor de losa, área de muros, etc.), considerados como variables de entrada del modelo ANFIS y el parámetro de combinación lineal α obtenido mediante calibración dado por las ecuaciones (7) y (8).

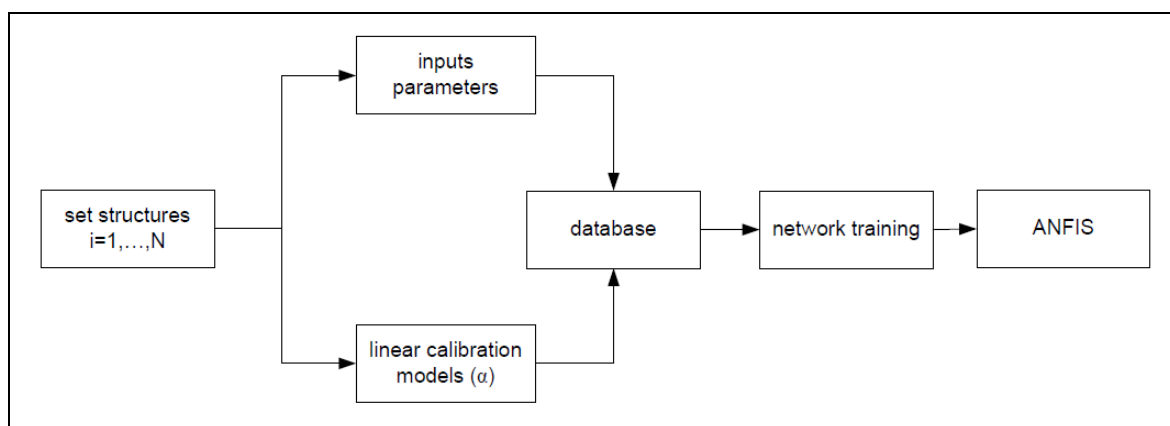


Figura 4-3. Procedimiento general construcción de base datos y entrenamiento ANFIS

La base de datos de estructuras 2D utilizada en el entrenamiento se basa en el modelo paramétrico pórtico-muro presentado en la Figura 4-4. Las variables que definen el modelo estructural son el número de pisos, número de vanos, altura de entrepiso, ancho del vano y dimensiones de columnas, vigas y muros.

Para la generación de la base de datos se construyeron automáticamente 20592 modelos de elementos finitos, mediante programación en el lenguaje APDL del software ANSYS para distintas combinaciones de las variables especificadas.

Los parámetros de entrada considerados en el entrenamiento del modelo ANFIS implementado son el número de pisos, número de vanos, $(EI)_{columna}/(EI)_{viga}$ y momento total de inercia de muros; mientras que el parámetro de salida corresponde al valor α que define el grado de participación de los modelos base con la descomposición planteada.

Un resultado típico del modelo α -ANFIS para la configuración 2D de pórtico-muro se presenta en la Figura 4-4, y corresponde a la raíz cuadrada del error al cuadrado (RMSE), error asociado a los datos utilizados para entrenamiento y validación para las distintas épocas del entrenamiento. La Figura 4-5 presenta la curva RMSE correspondiente a los datos de entrenamientos amplificados cien veces, de forma de obtener un resultado visual comparable al RMSE de los datos utilizados como validación.

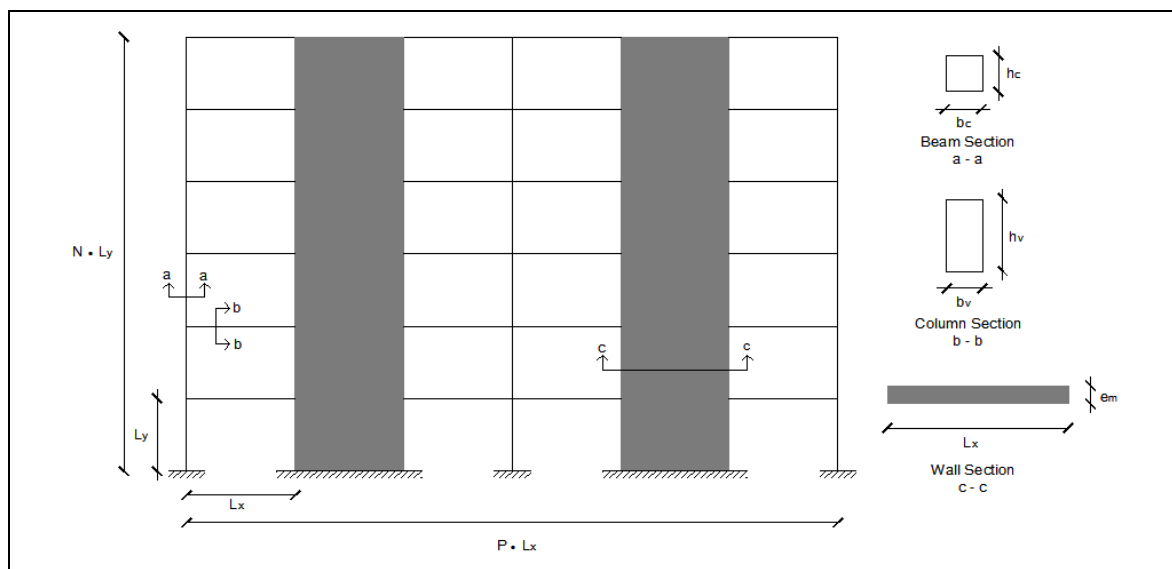


Figura 4-4. Esquema general estructuración pórtico-muro 2D

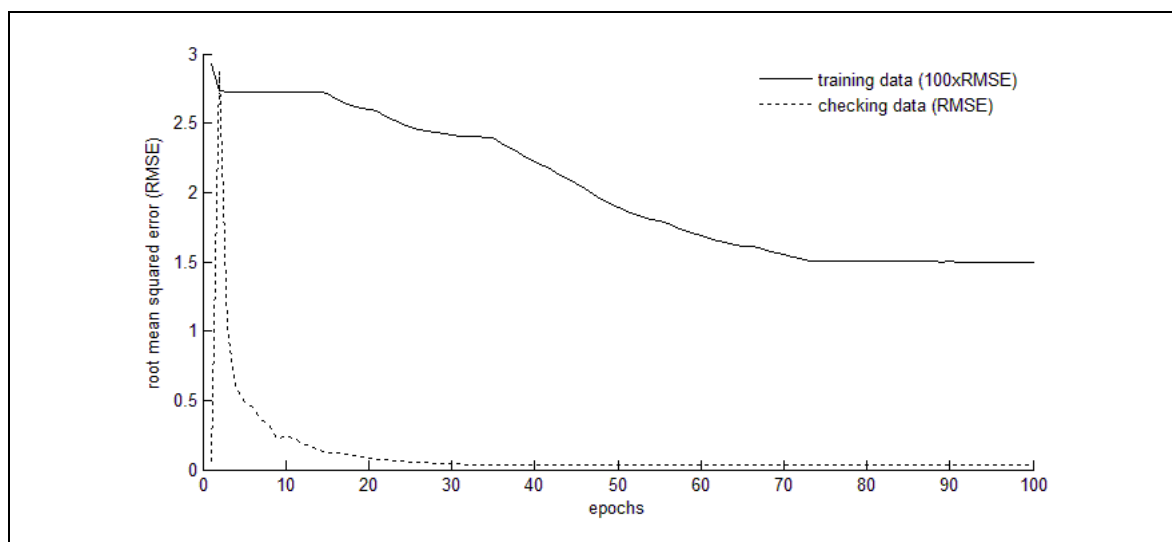


Figura 4-5. RMSE en entrenamiento, estructuración pórtico-muro 2D

Análogamente, las funciones de membresía obtenidas mediante el entrenamiento de una configuración de pórtico-muro son presentadas en la Figura 4-6, en la cual se puede observar que la variable $(EI)_{columna}/(EI)_{viga}$ presenta importantes modificaciones producto del entrenamiento con respecto a las funciones de membresía iniciales, dado que esta variable posee gran participación en la predicción del parámetro α , lo cual no es tan evidente en las variables número de pisos, número de vanos y momento total de inercia de muros, dado que las formas de las funciones de membresía poseen una mejor distribución posterior al entrenamiento en el intervalo considerado.

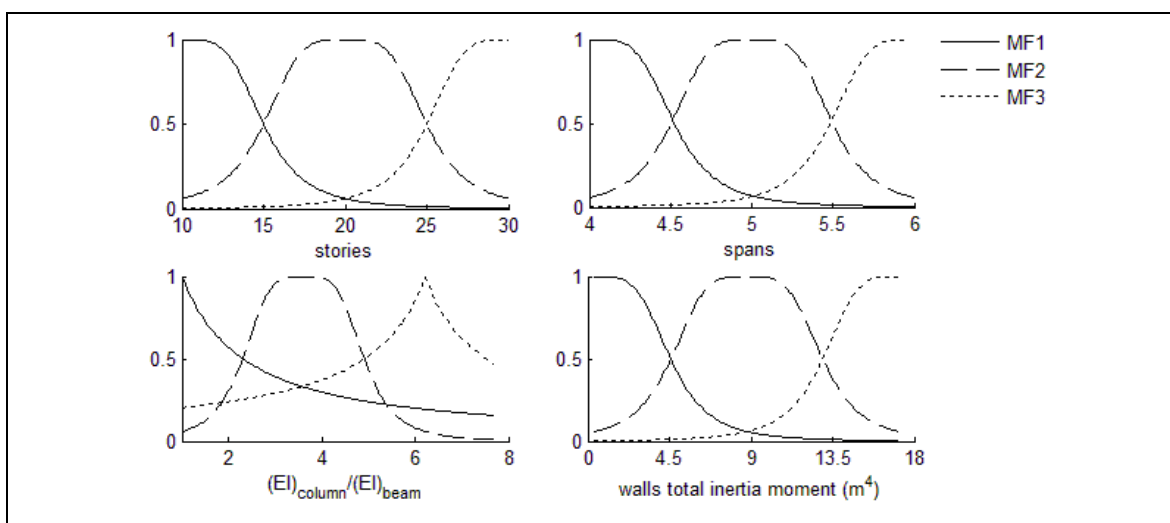


Figura 4-6. Funciones de membresía entrenadas, estructuración de pórtico-muro 2D

Un procedimiento análogo fue empleado para la base de datos del entrenamiento para el caso 3D para estructuras con marcos resistentes en base a pórticos y edificios de planta libre. Para este último caso, las cinco plantas base (“kernel”), las cuales son presentadas en la Figura 4-7, fueron utilizadas para generar un total de 18000 modelos

estructurales. Los 5 modelos seleccionados representan las tipologías más comunes de edificios de planta libre utilizados en la práctica actual chilena. Sin embargo, otros modelos pueden ser incorporados en cualquier instante a esta base de datos con el objetivo de ampliar el alcance del PSM. Los parámetros variados para generar el espacio muestral de estructuras fueron el número de pisos, altura de entrepiso, espesor de losa y las dimensiones que definen las secciones de columnas, vigas y muros. La construcción de los modelos de elementos finitos para crear la base de datos fue realizada automáticamente mediante la programación en el lenguaje APDL del software ANSYS.

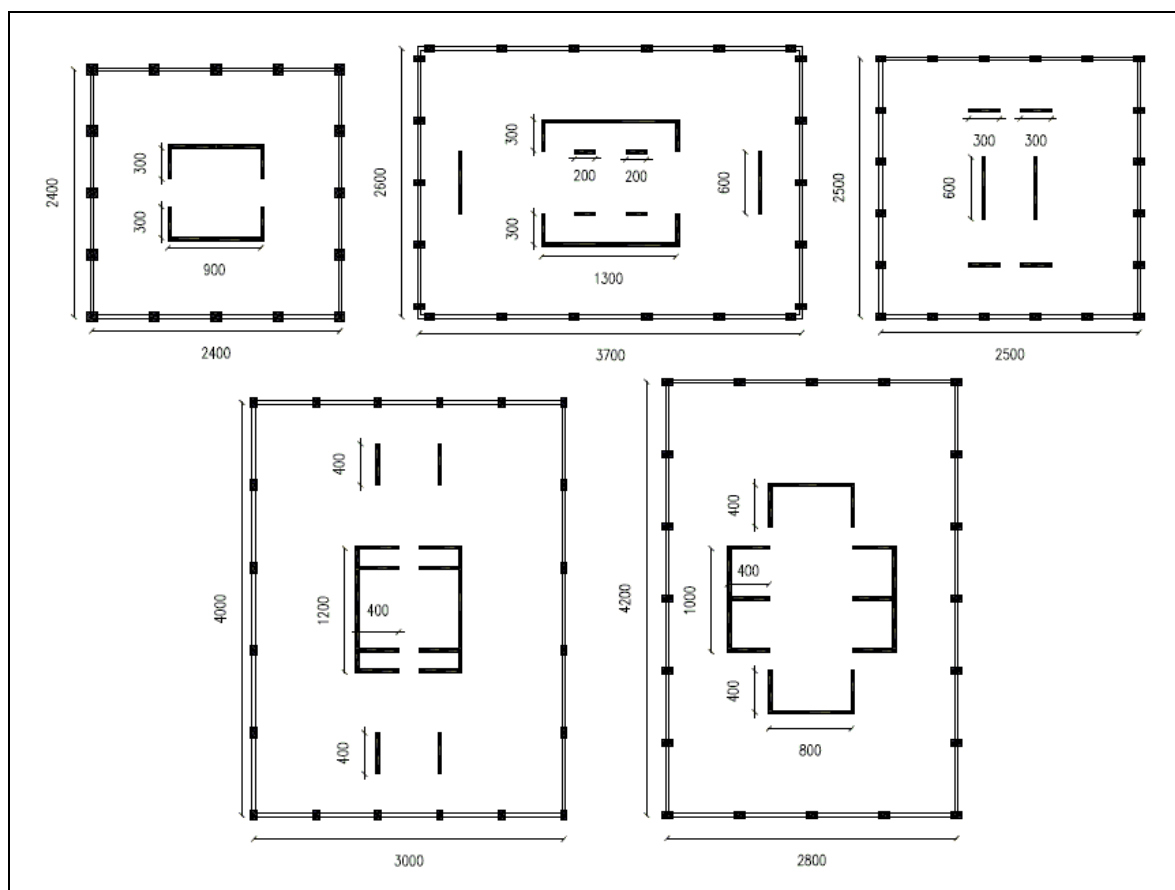


Figura 4-7. Prototipo de plantas estructurales utilizadas en base de datos, planta libre

El procedimiento del PSM utilizado para estimar la respuesta de un edificio es esquematizado en la Figura 4-8. El modelo se inicia con la información básica estructural provista en los dibujos iniciales (arquitectónicos) con una estimación de las dimensiones de los miembros estructurales. Estas dimensiones son usadas para calcular los parámetros necesarios para el ensamble de los modelos simplificados flexural y de corte basado en un elemento barra (“*stick model*”), descrito en las ecuaciones (1) a (6), y los parámetros de entrada necesarios de la red ANFIS para la estimación de α . Mediante la combinación lineal de las matrices de rigidez de los modelos simplificados a través del parámetro α , se ensambla la matriz de rigidez aproximada del modelo que se desea construir.

Para la estimación de análisis modal y tiempo historia, se utiliza una matriz de masas concentradas asociada a los grados de libertad maestros de pisos correspondiente a la traslación en la dirección X e Y y la rotación en torno al eje Z, calculada en base a los elementos estructurales de cada piso.

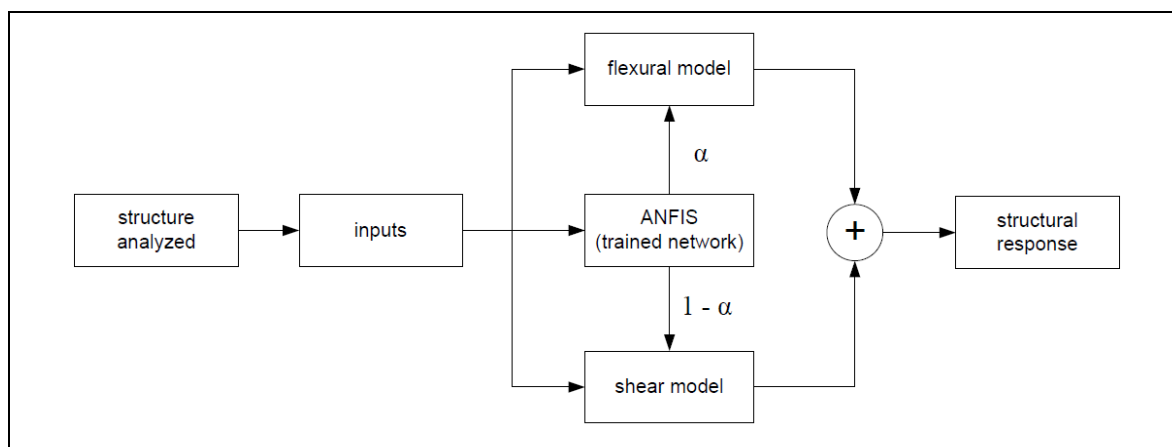


Figura 4-8. Aplicación ANFIS en predicción de respuesta estructural

Como cualquier modelo simplificado, el PSM tiene algunas deficiencias que deben ser identificadas. En primer lugar, su aplicación debe limitarse a la creación de plantas que sean variaciones de la base de datos considerada en el entrenamiento ANFIS.

Sin embargo, dado que el modelo es híbrido, es decir, utiliza modelos simplificados de barra para predecir la respuesta en conjunto con el modelo ANFIS, su uso puede extenderse más allá de la base de datos, pero siempre teniendo en cuenta que modelos cercanos a las plantas utilizadas en el entrenamiento proporcionarán mejores estimaciones.

En segundo lugar, los modelos considerados idealmente deben ser nominalmente simétricos y regulares en altura, dado que las plantas que conforman la base de datos para realizar el entrenamiento ANFIS poseen estas características, aunque el PSM tiene el potencial de extenderse para considerar otras variables, como por ejemplo, el efecto de plantas asimétricas puede llegar a ser modelado mediante un PSM que incluya la variable excentricidad como parámetro de entrada en el modelo ANFIS y en el ensamble de los modelos simplificados de descomposición.

5. EJEMPLOS DE VALIDACIÓN

En esta sección se consideran dos ejemplos del uso del PSM. Estos modelos son seleccionados arbitrariamente para proveer un buen sentido de la precisión alcanzada por la metodología propuesta. El primer ejemplo consiste en una planta libre típica de edificio de 20 pisos de altura y dimensiones en planta de 35 m x 20 m. Los muros poseen un espesor constante de 0.35 m; las columnas tienen una sección de 0.5 m x 0.3 m; las vigas de los marcos perimetrales tienen una altura y ancho de 0.3 m; y la losa posee un espesor de 0.18 m. La altura de entrepiso considerada es de 2.8 m. Se utilizó como único material hormigón con módulo de elasticidad E_c igual a 2.34×10^4 MPa, con coeficiente de Poisson 0.2, peso específico 24.52 KN/m^3 y resistencia característica $f'_c = 24.53 \text{ MPa}$. La planta estructural se muestra en la Figura 5-1.

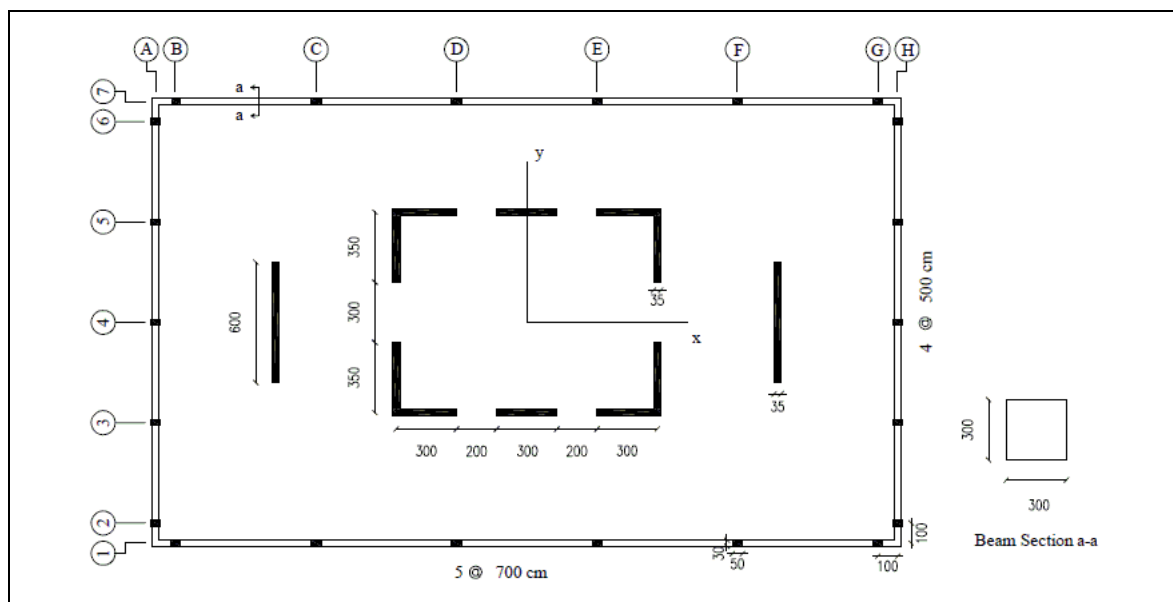


Figura 5-1. Planta tipo de estructura de validación

De la estructuración definida se determinaron las variables de entrada de los sistemas ANFIS entrenados en la dirección X, Y y θ respectivamente, de forma de determinar el parámetro de combinación lineal α que define el grado de participación de los modelos base utilizados. Los valores obtenidos son mostrados en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Variables de entrada y salida en sistema ANFIS, caso de validación

	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Input 6	Output
Direction	stories	$(EI_c)/(EI_b)$	structure height (m)	slab thickness (m)	wall total inertia (m^4)	-	α
X	20	4.63	56	0.18	3.66	-	0.960
Y	20	1.67	56	0.18	14.46	-	0.982
	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Input 6	Output
Direction	stories	$(EI_c)_x/(EI_b)_x$	$(EI_c)_y/(EI_b)_y$	slab thickness (m)	wall total inertia X (m^4)	wall total inertia Y (m^4)	α
θ	20	4.63	1.67	0.18	3.66	14.46	0.969

Los variables finales derivadas de este modelo son los parámetros α en las direcciones principales de análisis correspondientes a los grados de libertad del diafragma de piso, los cuales son determinados utilizando el módulo de lógica difusa incluido en el software MATLAB, usando solamente las variables de entradas aplicables en cada caso y la arquitectura ANFIS anteriormente entrenada para dichas variables.

De la Tabla 5-1, se observa que el parámetro α en la dirección X obtenido es 0.96, en la dirección Y es 0.98 y en la dirección θ es 0.97; esto muestra que el comportamiento del edificio estudiado está dominado principalmente por el comportamiento flexural, dada su proximidad al valor unitario, lo cual representaría un PSM solo con el modelo base dominado por comportamiento flexural, pero cabe

destacar que el aporte del modelo denominado de corte, dado por el factor $1-\alpha$ (el cual en este caso es menor a 0.04 en las direcciones estudiadas), es necesario para lograr una precisión adecuada en la respuesta estructural.

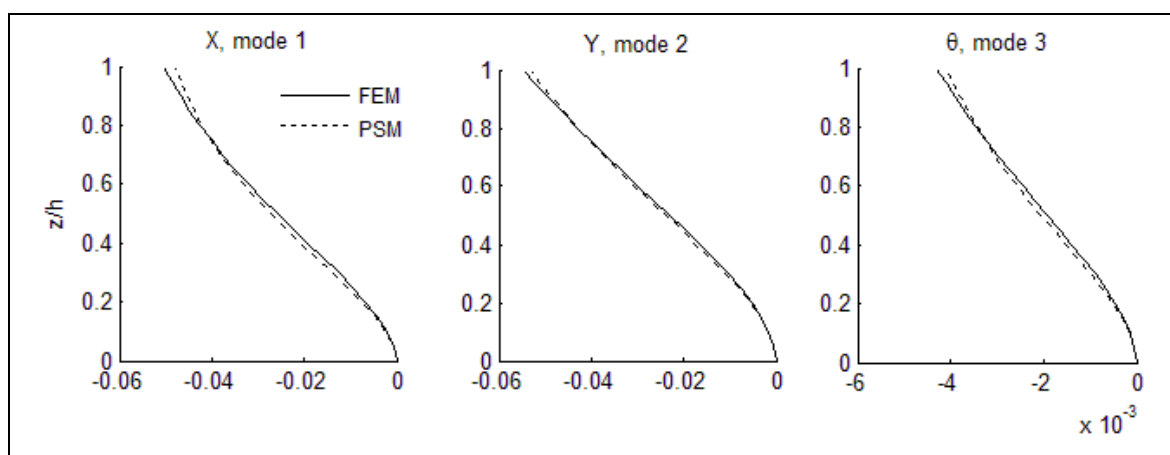
Los resultados obtenidos del edificio del PSM son comparados con los resultados de un modelo ETABS 3D, basado en el método de elementos finitos (FEM).

Los resultados presentados corresponden a un análisis modal y a un análisis tiempo historia considerando registros sísmicos de tipo subducción e impulsivos (superficiales). Dentro del análisis modal fueron comparados los periodos, porcentaje de masa efectiva y formas modales; en el caso del análisis tiempo historia se estudiaron las variables desplazamiento de techo y esfuerzo de corte basal en la estructura. Adicionalmente se establecieron comparaciones de los tiempos de cálculo empleados por el modelo ETABS y el PSM, incluyendo ambos análisis.

La Tabla 5-2 muestra una comparación de los 6 primeros periodos del edificio obtenidos por los modelos PSM y FEM ETABS, donde se observa que el PSM entrega una adecuada aproximación. Los errores en los tres primeros modos (fundamentales) son 2.08% (X), 1.60% (Y) y 3.01% (θ), respectivamente, para el resto de los modos, la máxima diferencia es 9.01% (X) dada en el modo 4. Otra información que puede ser obtenida de la Tabla 5-2 es la precisión del PSM en el porcentaje de masa traslacional asociada a cada modo. Los errores en los tres primeros modos son 3.84% (X), 2.94% (Y) y 4.53% (θ), mientras que para el resto de los modos la máxima diferencia es 17,16% (θ) dada en el modo 5. De los resultados mostrados se puede observar que los máximos errores están principalmente asociados a los modos torsionales.

Tabla 5-2. Comparación de los periodos del edificio obtenidos por los modelos ETABS y PSM

	FEM-ETABS				PSM			
	T (s)	$U_x(\%)$	$U_y(\%)$	$U_\theta(\%)$	T (s)	$U_x(\%)$	$U_y(\%)$	$U_\theta(\%)$
Mode 1	1.986	79.86	0	0	2.027	82.93	0	0
Mode 2	1.942	0	75.1	0	1.911	0	77.31	0
Mode 3	1.892	0	0	76.65	1.835	0	0	80.12
Mode 4	0.562	14.16	0	0	0.613	11.75	0	0
Mode 5	0.483	0	0	16.55	0.515	0	0	13.71
Mode 6	0.466	0	17.82	0	0.494	0	15.88	0

**Figura 5-2.** Comparación de formas modales entre modelos FEM-ETABS y para edificio de validación

Las formas modales del edificio de ejemplo son presentadas en la Figura 5-2. Se puede observar que son muy similares a las del modelo de referencia, en particular la forma del modo de torsional, que siempre es más difícil de captar correctamente, la cual se presenta bien aproximada. Debido a que el modelo tiene dos planos de simetría, se presentan en la figura sólo las coordenadas asociadas a la dirección modal.

Las historias de respuesta también muestran una adecuada precisión, lo cual puede ser observado en las Figuras 5-3 y 5-4 para el desplazamiento de techo en las direcciones X e Y para un registro de subducción y otro superficial, como es el caso de los registros de Melipilla (Chile, 1985) y Sylmar (Northridge, 1994), respectivamente. También en las Figuras 5-5 y 5-6 se muestran las comparaciones del PSM con el resultado obtenido mediante ETABS para el corte basal en las direcciones de análisis. El nivel de precisión observado por el PSM muestra su robustez, por lo menos para los propósitos de etapas preliminares de diseño. Este modelo además puede proveer mejores aproximaciones para el desplazamiento de techo que para el esfuerzo de corte basal, debido a una menor precisión del modelo representando los modos más altos.

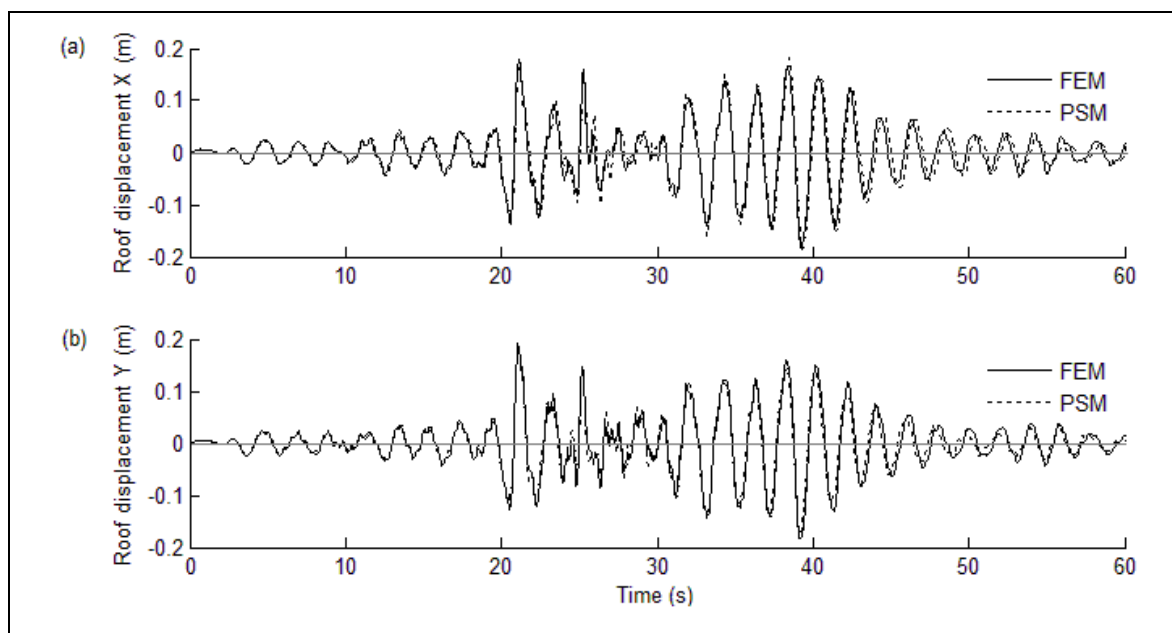


Figura 5-3. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM del desplazamiento de techo para edificio de validación sometido al registro de Melipilla: (a) Dirección X; (b) Dirección Y

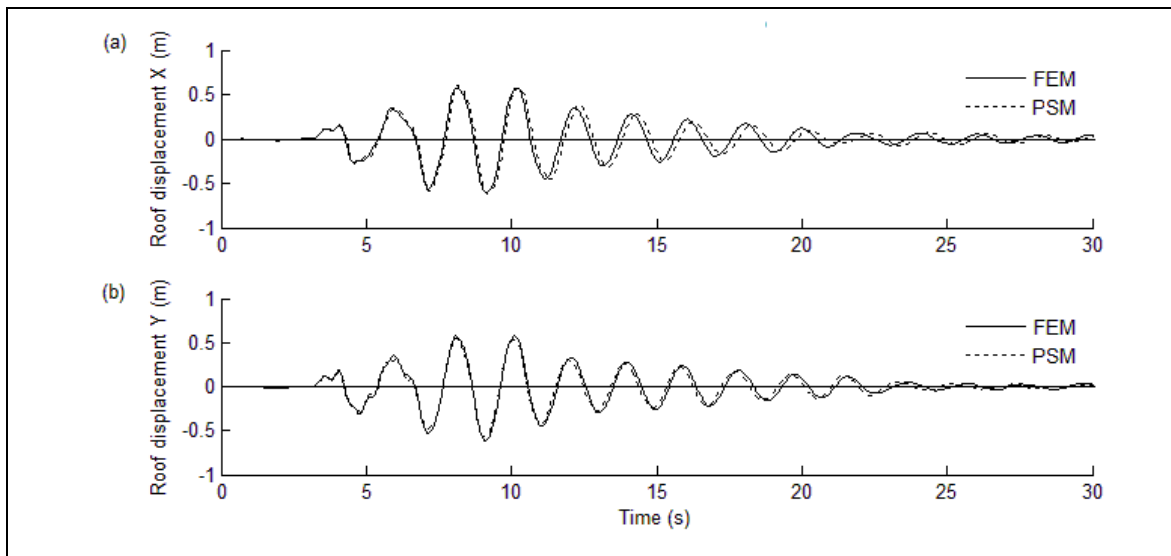


Figura 5-4. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM del desplazamiento de techo para edificio de validación sometido al registro de Sylmar: (a) Dirección X; (b) Dirección Y

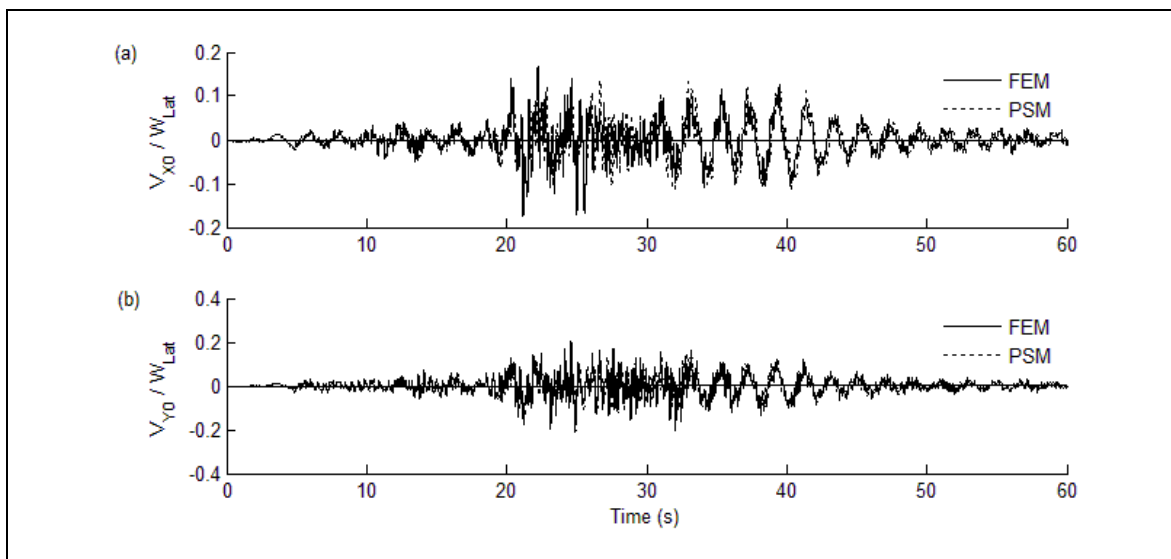


Figura 5-5. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM de esfuerzo de corte basal para edificio de validación sometido al registro de Melipilla: (a) Dirección X; (b) Dirección Y

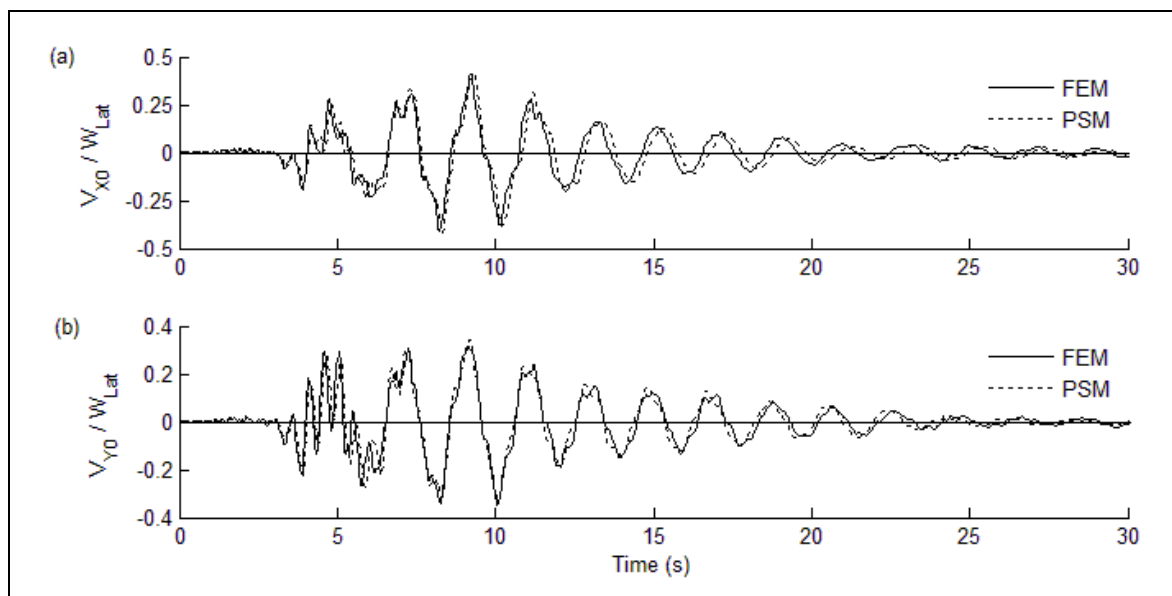


Figura 5-6. Comparación entre modelos FEM-ETABS y PSM de esfuerzo de corte basal para edificio de validación sometido al registro de Sylmar: (a) Dirección X; (b) Dirección Y

Una extensión de los resultados previos para otros registros es presentada en las Tablas 5-3 y 5-4.

La Tabla 5-3 muestra la comparación de los máximos desplazamientos de techo en la dirección X e Y considerando el error entre el modelo FEM-ETABS y el PSM; de la tabla podemos observar que los errores obtenidos son inferiores al 8% para los cinco registros considerados. Estos resultados son muy adecuados para realizar estimaciones en etapas de prediseño, para las cuales se ha propuesto esta herramienta de análisis.

La Tabla 5-4 muestra el esfuerzo de corte basal máximo normalizado por el peso de la estructura para los modelos construidos en conjunto con los errores obtenidos, y de la cual se puede observar que existe una mayor variación de éstos, dado que, a pesar de que para algunas direcciones y registros los errores no superan el 10%, en el caso de Corralitos (California, 1989) y Viña (Chile, 1985) se producen errores de 28% y 15%,

respectivamente, en la dirección X, dado que el contenido de frecuencias de estos registros excitan los modos superiores en esta dirección, los cuales no fueron correctamente representados por el PSM, ya que los mayores errores en los periodos de vibración ocurren en la dirección X de análisis.

Tabla 5-3. Resultados de historia de respuesta para movimientos sísmicos – Despl. de Techo

Record		U_{roof}^{max} (Direction X)			U_{roof}^{max} (Direction Y)		
		FEM (m)	PSM (m)	Error (%)	FEM (m)	PSM (m)	Error (%)
Sylmar	Northridge, 1994	0.600	0.613	-2.06	0.611	0.570	6.72
Melipilla	Chile, 1985	0.184	0.186	-1.31	0.186	0.196	-5.25
Corralitos	California, 1989	0.249	0.235	5.43	0.233	0.229	1.85
Viña	Chile, 1985	0.181	0.174	4.16	0.196	0.201	-2.34
J.M.A.	Kobe, 1995	0.504	0.530	-5.06	0.538	0.580	-7.75

Tabla 5-4. Resultados de historia de respuesta para movimientos sísmicos – Corte basal

Record		V_{X0}/W_{Lat} (Direction X)			V_{Y0}/W_{Lat} (Direction Y)		
		FEM	PSM	Error (%)	FEM	PSM	Error (%)
Sylmar	Northridge, 1994	0.411	0.421	-2.43	0.348	0.343	1.35
Melipilla	Chile, 1985	0.174	0.166	4.54	0.211	0.203	3.78
Corralitos	California, 1989	0.259	0.187	27.87	0.215	0.226	-5.10
Viña	Chile, 1985	0.158	0.135	14.73	0.166	0.169	-1.79
J.M.A.	Kobe, 1995	0.349	0.364	-4.29	0.448	0.407	9.23

El segundo ejemplo incluye una aplicación para prediseño de una solución de protección sísmica, con sistemas de disipación de energía en edificios de planta libre.

El diseño del sistema de disipación de energía requiere en general de varias iteraciones, las cuales son un inconveniente de hacer en un modelo 3D completo, consistente en miles de grados de libertad.

El edificio seleccionado se presenta esquemáticamente en la Figura 5-7, la cual considera la misma estructuración al ejemplo mostrado anteriormente, agregando entre los 20 pisos disipadores viscosos ($c_d = 392.27 \text{ KN}\cdot\text{s/cm}$) en la dirección Y de análisis, los cuales trabajan producto de la deformación de entrepiso. Los disipadores fueron ubicados en el eje A de la planta señalada con la finalidad de aumentar las deformaciones de éstos, de forma de amplificar la eficiencia del sistema de disipación.

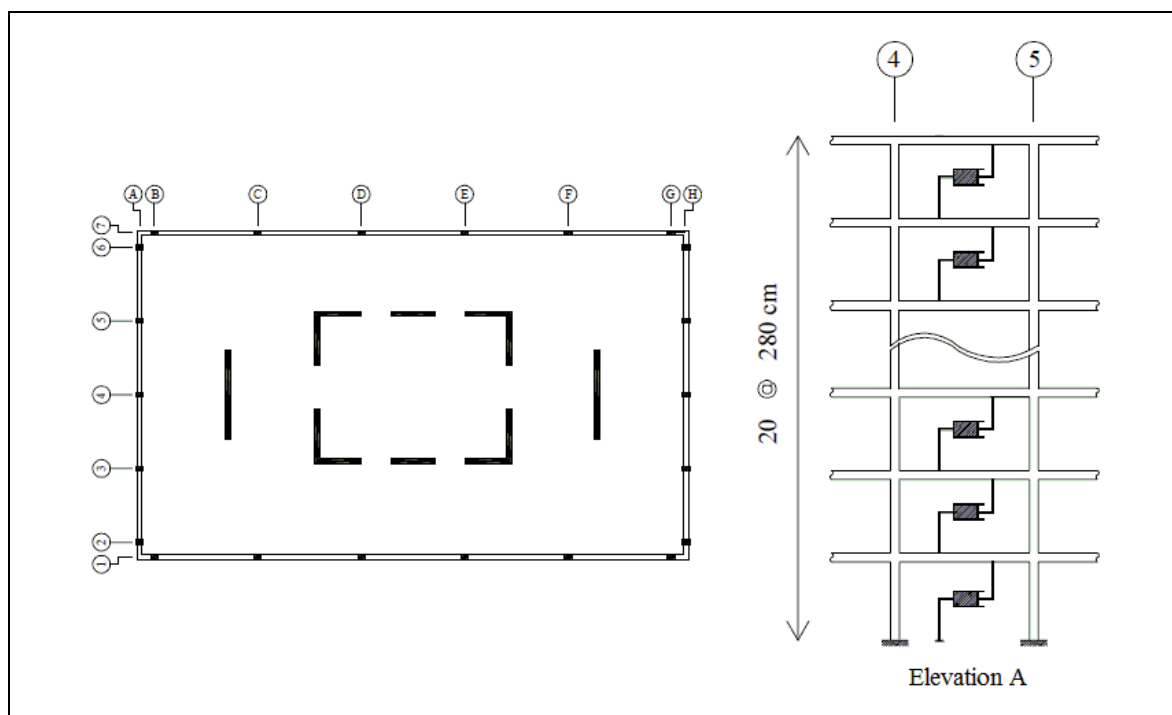


Figura 5-7. Ubicación y esquema de los amortiguadores en el edificio de validación

La respuesta seleccionada para la validación de la estimación de la respuesta del PSM corresponde a la historia de desplazamiento de techo y corte basal en la dirección de análisis en la cual actúa el sistema de disipación.

Estas respuestas son comparadas con las obtenidas mediante el modelo ETABS 3D del edificio, en el cual, el sistema de disipación viscoso es modelado mediante elementos “link”, debiendo solicitar un análisis de tipo no lineal de forma de obtener las respuestas tiempo-historia solicitadas. Por otro lado, el PSM incorpora el sistema de disipación por medio de la construcción de la matriz de amortiguamiento mediante la relación cinemática y acción-deformación de los disipadores con los grados de libertad maestros de cada piso.

Los desplazamientos del edificio obtenidos del PSM sometido al registro de Melipilla, ocurrido en el año 1985, en Chile, (movimiento de subducción), y al registro de Sylmar, ocurrido en el año 1994, en Northridge, (registro superficial); son comparados con los resultados del modelo ETABS en las Figuras 5-8 y 5-9, en la dirección de análisis Y, en la cual está ubicado el sistema de reducción de vibraciones (SRV).

Se puede observar un ajuste razonable para los desplazamientos de techo, dado que las historias de deformaciones obtenidas por el PSM son similares al modelo ETABS, permitiendo una adecuada aproximación en el prediseño de este tipo de estructuración.

Para el registro de Melipilla los máximos desplazamientos son 0.159 m y 0.163 m para los modelos ETABS y PSM, respectivamente, lo cual provoca un error de 2.21%. En el caso de Sylmar los máximos desplazamientos obtenidos son 0.461 m y 0.421 m, respectivamente, lo cual conlleva un error de 8.68%.

Análogamente el corte basal del edificio analizado con los mismos registros es comparado con el corte basal del modelo ETABS en las Figuras 5-10 y 5-11, obteniendo

nuevamente curvas bastante aproximadas en forma, pero presentando un aumento en los errores a nivel de máximos debido a la influencia de modos altos en el cálculo del esfuerzo de corte basal, los cuales no fueron capturados correctamente por el PSM. Por ejemplo, para el registro de Melipilla se obtuvo un error de 14.05% a nivel de máximos y para el caso del registro de Sylmar dicho error fue de 10.17%.

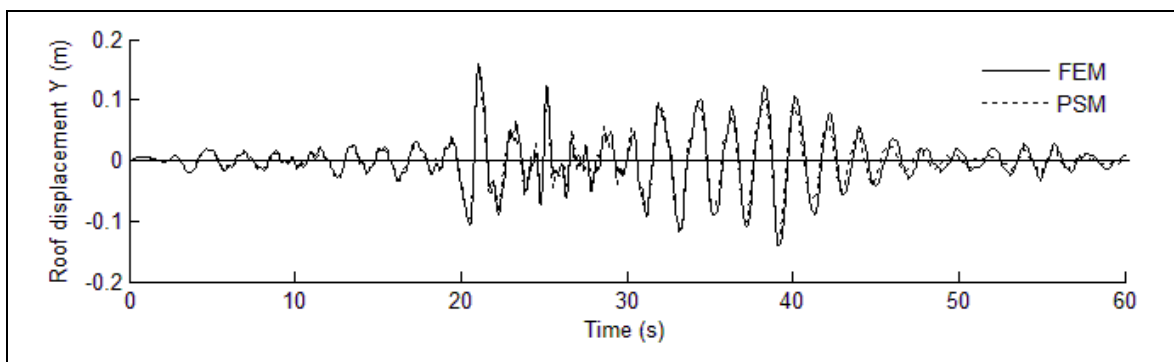


Figura 5-8. Desplazamiento del techo dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Melipilla

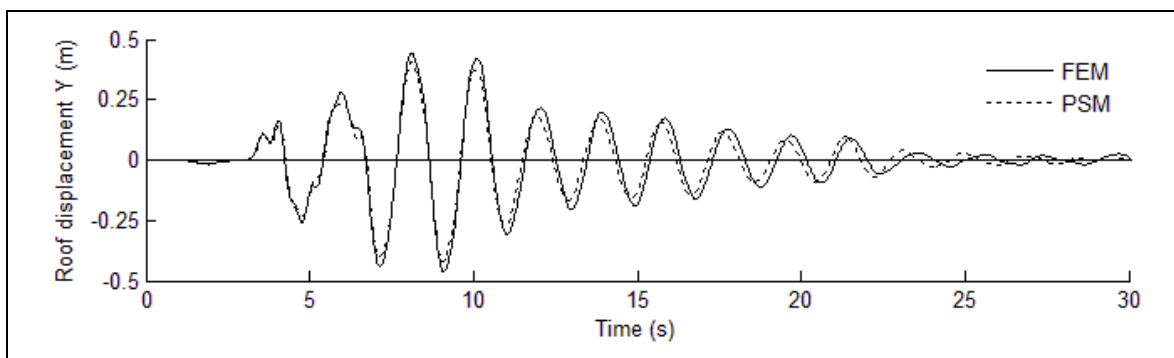


Figura 5-9. Desplazamiento del techo dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Sylmar

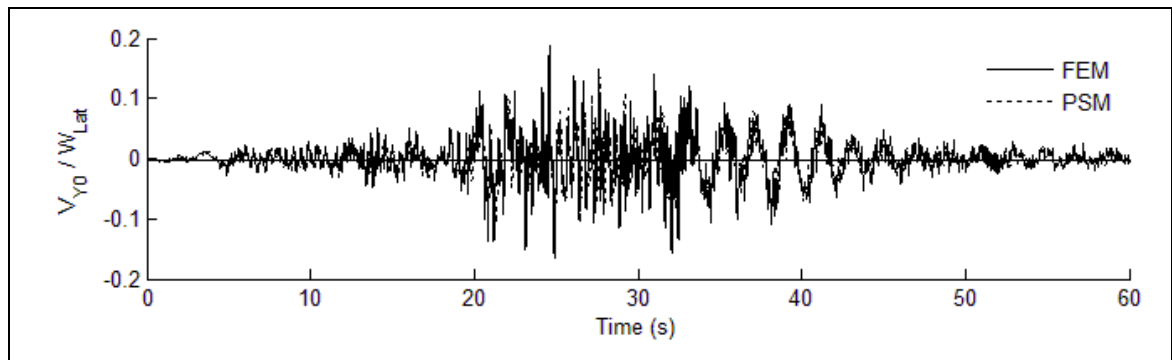


Figura 5-10. Esfuerzo de corte basal dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Melipilla

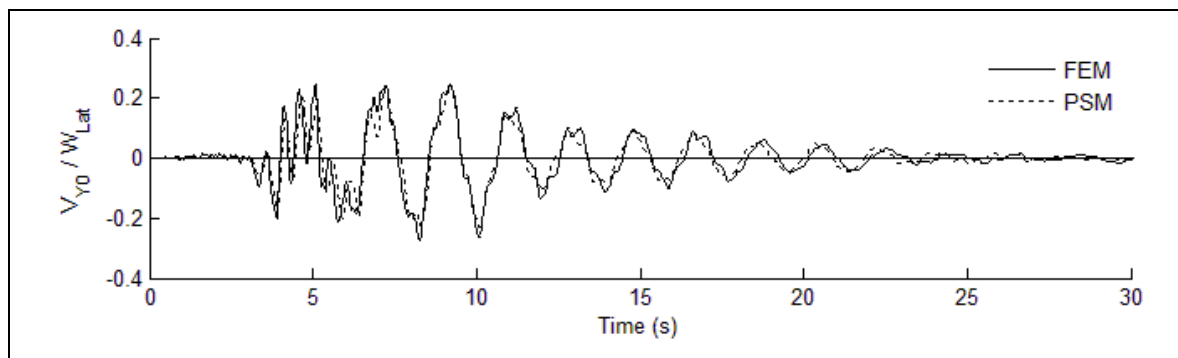


Figura 5-11. Esfuerzo de corte basal dirección Y para edificio de validación con amortiguadores sometido al registro de Sylmar

La Tabla 5-5 muestra las comparaciones del desplazamiento para un conjunto de movimientos sísmicos, de forma de comparar los desplazamientos máximos de techo obtenidos considerando o no la existencia de un sistema de disipación de energía. Los errores máximos obtenidos son 8,68% y 6,74% en la estructura con y sin disipación,

respectivamente, los cuales ocurren para el caso del registro de Sylmar. De los resultados se observa que el error considerando disipación en algunos registros es menor en comparación a los resultados obtenidos no considerando estos dispositivos. Por otro lado, se puede apreciar la disminución en los desplazamientos de la estructura, alcanzando una reducción máxima de 24.48% para el registro de Sylmar y un mínimo de 12.65% para el caso del registro de Viña. Esto se debe a que el sistema de disipación es más eficiente en movimientos sísmicos de tipo impulsivos en comparación a movimientos provocados por un fenómeno de subducción, debido a que estos últimos generan menores deformaciones en estas estructuras.

La Tabla 5-6 muestra las comparaciones de corte basal para un conjunto de movimientos sísmicos, donde pueden observarse errores en el esfuerzo de corte basal máximo de 15.66% y 9.23% para el caso con y sin disipación, respectivamente, en los registros de J.M.A.-Kobe y Viña. Considerando el sistema de disipación se genera un aumento en la magnitud de los errores entre el modelo ETABS y PSM en todos los registros utilizados. Además, producto de éste se alcanza una reducción máxima en el esfuerzo de corte basal de 21.28% para el registro de Sylmar y un mínimo de 6.08% en el caso del registro de Corralitos.

Tabla 5-5. Comparación del desplazamiento entre los modelos PSM y ETABS resultante para dos niveles de amortiguamiento

Record		U_{roof}^{max} (without SRV)			U_{roof}^{max} (with SRV)		
		FEM (m)	PSM (m)	Error (%)	FEM (m)	PSM (m)	Error (%)
Sylmar	Northridge, 1994	0.611	0.569	6.74	0.461	0.421	8.68
Melipilla	Chile, 1985	0.186	0.196	-5.31	0.159	0.163	-2.21
Corralitos	California, 1989	0.233	0.228	1.92	0.186	0.176	5.36
Viña	Chile, 1985	0.196	0.201	-2.32	0.172	0.172	-0.47
J.M.A.	Kobe, 1995	0.558	0.580	-3.82	0.453	0.473	-4.28

Tabla 5-6. Comparación del corte basal entre los modelos PSM y ETABS resultante para dos niveles de amortiguamiento

Record		V_{Y0}/W_{Lat} (Without SRV)			V_{Y0}/W_{Lat} (With SRV)		
		FEM	PSM	Error (%)	FEM	PSM	Error (%)
Sylmar	Northridge, 1994	0.348	0.343	1.35	0.274	0.246	10.17
Melipilla	Chile, 1985	0.211	0.203	3.78	0.188	0.162	14.05
Corralitos	California, 1989	0.215	0.226	-5.10	0.202	0.181	10.67
Viña	Chile, 1985	0.166	0.169	-1.79	0.148	0.124	15.66
J.M.A.	Kobe, 1995	0.448	0.407	9.23	0.359	0.303	15.53

Otra variable de análisis considerada fue el tiempo computacional registrado en los análisis desarrollados, los cuales son mostrados en la Tabla 5-7.

Los resultados muestran la razón del tiempo computacional entre los modelos PSM y ETABS (software de análisis estructural compilado), obteniendo una razón de 1:623 en el caso del registro de Corralitos, aunque existen algunos casos donde el PSM presenta solamente un pequeño aumento en la velocidad de la solución, como es en el caso del registro de Viña (1:9), el cual posee la mayor cantidad de puntos en el registro sísmico.

Esta comparación considera la solución del análisis modal y tiempo-historia del registro correspondiente, es decir, no se incluye el tiempo requerido en la construcción del modelo del edificio 3D versus el PSM, lo cual ocasionaría un aumento en los valores de razón presentados.

Tabla 5-7. Razón de tiempo computacional entre modelo PSM y FEM-ETABS

Record		Ratio PSM / ETABS	
Sylmar	Northridge, 1994	1 :	428
Melipilla	Chile, 1985	1 :	19
Corralitos	California, 1989	1 :	623
Viña	Chile, 1985	1 :	9
J.M.A.	Kobe, 1995	1 :	83

Finalmente el PSM puede ser fácilmente extendido al caso inelástico, dada la descomposición planteada, considerando por ejemplo el análisis de plasticidad concentrada y distribuida desarrollado por Dides et al. (2005). Esto permitiría representar de manera simple el comportamiento inelástico en modelos complejos que poseen miles de grados de libertad, reduciendo el esfuerzo computacional y la capacidad de análisis en etapas de diseño preliminar.

6. CONCLUSIONES

La respuesta lateral de edificios de planta libre puede ser estimada con una precisión razonable para el propósito de prediseño, utilizando el modelo simplificado propuesto (PSM), el cual combina el comportamiento flexural y de corte de un edificio representado por un modelo simplificado de barra (*stick model*) con los parámetros nominales, a través del denominado parámetro α , el cual considera indirectamente el comportamiento de la losa y ha sido estimado usando ANFIS (*Adaptive Neural Network Fuzzy Inference System*).

Los resultados de estructuras 2D son notables en cuanto a la precisión obtenida en la estimación de errores máximos promedio de desplazamiento, dado que son inferiores al 5%. Al tratar con estructuras 3D, basadas en una estructuración de pórticos, los resultados son todavía precisos, con errores menores al 6%. En el caso de edificios de planta libre 3D, las estimaciones de respuesta son satisfactorias, aunque los errores de las estimaciones de los desplazamientos máximos se incrementan hasta alrededor del 8%. A pesar de esta discrepancia el PSM es capaz de capturar con adecuada precisión el comportamiento de estas estructuras dominadas por el acoplamiento entre el comportamiento flexural del núcleo de muros de corte y el comportamiento de tipo corte del marco perimetral.

La mayor ventaja del PSM es su simplicidad de construcción y velocidad de análisis. Ambos efectos son relevantes debido a que el objetivo del modelo es intervenir en etapas tempranas del diseño de edificios de planta libre, con un modelo capaz de facilitar la toma rápida de decisiones acerca de la configuración estructural y detección de sus aspectos más críticos. La capacidad de probar diferentes configuraciones estructurales sin caer en modelos 3D complejos, es un aspecto crítico para obtener una configuración óptima para el diseño.

También se ha demostrado que el PSM puede ser usado eficientemente para soluciones de disipación de energía para estas estructuras, las cuales usualmente requieren varias iteraciones del modelo e incluir efectos tales como el comportamiento inelástico de los dispositivos. De hecho, el PSM representado mediante un modelo de barra, puede ser fácilmente extendido para incluir aproximadamente el comportamiento inelástico de la estructura mediante los conceptos de plasticidad concentrada y distribuida, sin caer en la complejidad de modelos inelásticos de elementos finitos 3D.

Gracias al esquema de adaptación ANFIS, el modelo puede ser entrenado para incluir otras configuraciones que no han sido consideradas en esta investigación, como lo es irregularidad en planta y en altura. Aunque el uso de plantas nominalmente simétricas parece ser una limitación del PSM, dos aspectos deben tenerse en cuenta antes de extenderlo a configuraciones de planta libre irregulares. En primer lugar, se debe notar que esencialmente todas las estructuras de los edificios dañados durante el terremoto de Chile del 27 de febrero del 2010 presentaban algún grado de irregularidad en planta y/o altura, lo que implica que este tipo de configuraciones debieran ser severamente castigadas en el diseño. Y en segundo lugar, que la mayoría de los edificios de planta libre que inspiró este estudio son esencialmente regulares en planta y altura lo que hace que el caso irregular sea más bien una excepción, que una regla.

BIBLIOGRAFÍA

ANSYS Tutorials, (2009). "APDL Programmer's Guide", "Modeling and Meshing Guide" and "Structural Analysis Guide". ANSYS Inc version 12.1.

Chajes, M.J., Zhang, L. and Kirby, J.T. (1996). Dynamic analysis of tall building using reduced-order continuum model. *Journal of Structural Engineering*, vol 122, n°11, pp 1284-1291.

Computers and Structures, Inc. (2008). ETABS version 9.5 user interface reference manual, Berkeley, California.

De La Llera, J.C. and Chopra, A. (1995). A simplified model for analysis and design of asymmetric-plan building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol 24, pp 573-594.

De La Llera, J.C., Vásquez, J., Chopra, A. and Almazán, J.L. (2000). A macro-element model for inelastic building analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. vol 29, pp 1725-1757.

Dides, M. and De La Llera, J.C. (2005). A comparative study of concentrated plasticity models in dynamic analysis of building structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol 34, pp 1005-1026.

Encina, J. (2011). Modelación simplificada de edificios altos de planta libre incluyendo el efecto flexural de la losa. *Master Thesis, Engineering Faculty. Pontificia Universidad Católica de Chile*.

Hassoun, M. (1995). Fundamentals of artificial neural network. *The MIT Press*.

Jang, J.S.R. (1993). ANFIS: Adaptive-Neural-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol 23, n°3, pp 665-685.

Kung, S.Y. (1993). Digital neural networks. *Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J.*

MATLAB. Fuzzy logic toolbox. *The Mathworks Inc.*

McGuire W, Gallagher R. and Ziemian R. (2000). Matrix Structural Analysis. *John Wiley & Sons, Inc.*

Miranda, E. (1999). Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, vol 124, n°4, pp 417-425.

- Miranda, E. and Reyes, C. (2002). Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness. *Journal of Structural Engineering*, vol 128, No. 7, pp 840-849.
- Ortiz, R. (2006). Torsional balance of structures with mr-dampers. *Master Thesis. Engineering Faculty. Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- Reinoso, E. and Miranda, E. (2005). Estimation of floor acceleration demands in high-rise building during earthquakes. *Struct. Design Tall Spec. Build.*, vol 14, pp 107-130.
- Reinoso, E. and Miranda, E. (2005). Estimation of floor acceleration demands in high-rise building during earthquakes. *Struct. Design Tall Spec. Build.*, vol 14, pp 107-130.
- Schurter, K and Roschke, P. (2000). Neuro-fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS. *Proc. 9th IEEE Int. Conf. on Fuzzy System* (San Antonio. TX), pp 122-127.
- Timoshenko S. and Goodier J.N. (1951). Theory of elasticity. *McGraw-Hill Book Company, Inc.*
- Zadeh, Y. (1994). Fuzzy sets neuronal networks and soft computing. *Van Nostrand Reinhold*, New York.