

EL ANALISIS NO LINEAL DINAMICO Y SU APLICACION EN LA SIMULACION DE RESPUESTAS ESTRUCTURALES

Por: Adolfo Gálvez Villacorta, MSc.
ADGAVI y Asociados SAC

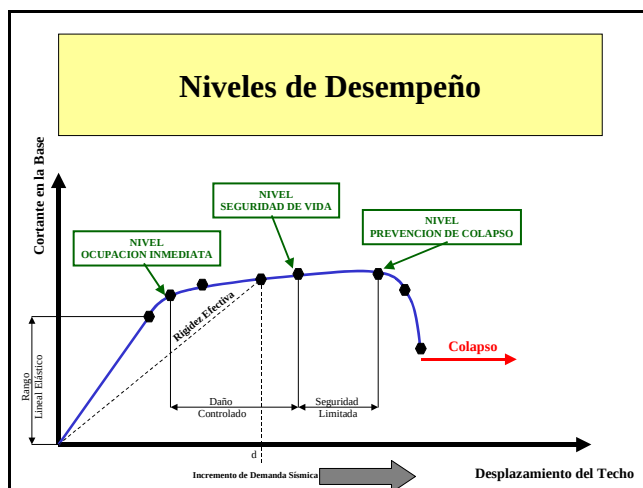
RESUMEN

El uso de procedimientos mas sofisticados, en el modelamiento inelástico de estructuras para simular comportamientos y predecir respuestas, se va a convertir en rutina de nuestras oficinas de ingeniería estructural, conforme el Diseño Sísmico Basado en Desempeño se abra paso en nuestro medio. Las herramientas disponibles, sin embargo, van a requerir para su uso de la interacción de diferentes profesionales, en este caso específico se requerirá el concurso de los Investigadores de los Laboratorios de Estructuras, que serán los encargados de proporcionar la data que es indispensable para una correcta aplicación de estas poderosas herramientas. Mostramos algunos ejemplos de ello.

1.- INTRODUCCION

El análisis sísmico de estructuras es una disciplina que se enmarca dentro del campo del Análisis Estructural y tiene como objetivo efectuar una apreciación de la respuesta de una estructura a la ocurrencia de un evento sísmico.

En un principio las respuestas que nos interesaban estaban basadas en resistencia, pero este criterio a evolucionado y actualmente nos interesan las que se encuentran basadas en desplazamientos, pues se ha llegado a la conclusión que son estos, los desplazamientos, los que dañan a las estructuras, adicionalmente se ha demostrado que nuestra capacidad de predicción de la demanda de resistencia (representada principalmente por el cortante en la base) es bastante superior a nuestras posibilidades de predecir los desplazamientos de nuestra estructura, siendo esto muy claro cuando vemos una curva de capacidad, donde se aprecia que pequeñas variaciones en el cortante basal pueden implicar sustanciales variaciones en el desplazamiento.



En términos estadísticos diríamos que la incertidumbre en la determinación de las acciones basadas en resistencia es inferior a la que se halla presente en las basadas en desplazamientos. Todo este razonamiento mas consideraciones económicas han creado el marco en el que se viene desarrollando el Diseño Sísmico Basado en Desempeño, (Jalayer y Cornell, 2003). Este enfoque aun no es incorporado en nuestras Normas, pero indefectiblemente ello ocurrirá en los próximos años. La realidad de nuestras estructuras es inelástica y aleatoria.

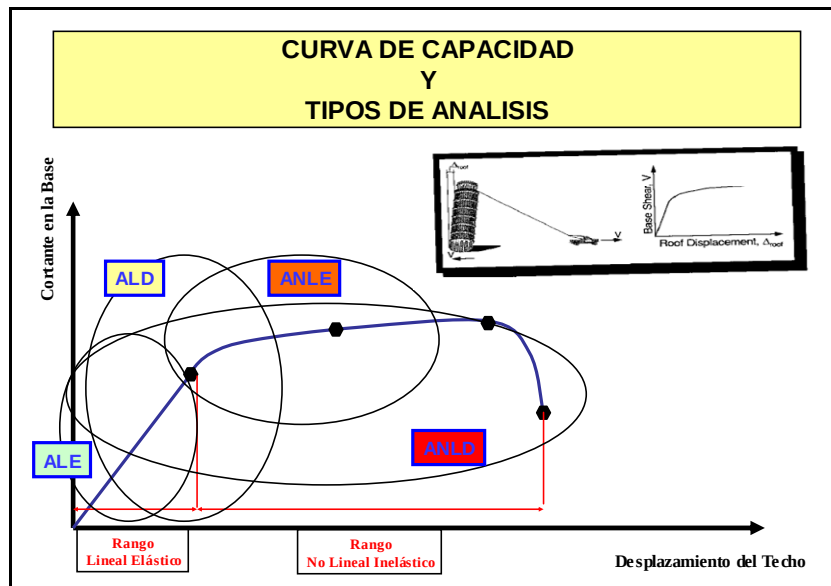
2.- PROCEDIMIENTOS DE ANALISIS SISMICO DE ESTRUCTURAS

Los principales procedimientos de análisis sísmico son los siguientes (FEMA, 1997):

1. Análisis Estáticos Lineales (ALE), conocidos como Estáticos Equivalentes, tal como se especifica en el artículo 17 de nuestra Norma E.030 (RNE, 2006).
2. Análisis Dinámicos Lineales (ALD), normados en nuestro reglamento por el artículo 18 de la mencionada Norma. Se usan dos tipos:
 - a. Tiempo Historia, cuando se usan registros de aceleración y las respuestas estructurales se conocen a lo largo de toda a duración del evento sísmico.
 - b. Espectro de Respuesta, cuando se trabaja con los espectros obtenidos de los registros de aceleración, combinando los aportes de cada modo, a fin de obtener un valor representativo de la respuesta, ya que la falta de simultaneidad de las máximas respuestas en cada modo de vibración implican la necesidad de combinarlas adecuadamente.
3. Análisis Estáticos No Lineales (ANLE), mas conocidos como Push – Over, por su nombre en inglés, cuya principal característica es la de usar sistemas equivalentes de un grado de libertad, para modelar una estructura de múltiples grados de libertad y que únicamente nos permiten apreciar respuestas globales de la estructura.
4. Análisis Dinámicos No Lineales (ANLD), cuando conociendo las propiedades de los materiales constitutivos de nuestra estructura y de los elementos de los sistemas estructurales, hacemos uso de registros de aceleración, en un cierto número de ellos, para predecir las respuestas de nuestro sistema, generalmente las basadas en desplazamientos. Las herramientas mas conocidas, desde la óptica de la discretización, son:
 - a. Elementos Finitos, sumamente poderoso, pero consumidor de ingentes recursos de hardware, que lo hace prohibitivo en su uso en la mayoría de los casos, de tal modo que solamente ciertas instituciones tienen los equipos y el software capaces de manejar en forma aceptable los requerimientos que implican el modelar una estructura. Permite predecir respuestas de resistencia y desplazamiento al detalle.
 - b. Macro Elementos, que usando las curvas esfuerzo – deformación y el método de las fibras por un lado e incorporando modelos histeréticos para diversos elementos (vigas, columnas, muros, rotulas, resortes, cables, etc.) por otro, permiten predecir de una forma no tan onerosa, la respuesta de nuestro sistema estructural. Ideal para respuestas de desplazamiento (rotaciones, curvaturas, deformaciones de entrepiso, etc.)

El rango de aplicación de los diversos tipos de análisis, superpuesto a una curva de capacidad, se muestra en la siguiente figura, es interesante ver que los

procedimientos dinámicos no lineales cubren toda la gama de respuestas estructurales.



3.- ANALISIS NO LINEAL DINAMICO

Los procedimientos Dinámicos No Lineales implican respuestas estructurales que son muy sensibles a los parámetros que sirven para modelar los distintos tipos de comportamiento histerético de los diversos elementos estructurales, constituidos por los diferentes materiales que se encuentran disponibles. Asimismo, son estos procedimientos los que (por mucho) representan mejor el comportamiento estructural y permiten predecir sus respuestas ante eventos sísmicos (que hacen incursionar a las estructuras en el rango inelástico y hacen que se comporten no linealmente), con niveles de incertidumbre aceptables.

Para poder hacer uso de procedimientos Dinámicos No Lineales, es indispensable previamente calibrar los parámetros del programa que estemos usando, a fin de que las características histeréticas de los elementos estructurales reflejen la realidad de los mismos. Queremos hacer hincapié en el hecho de que estos procedimientos podrían dar resultados incorrectos, aunque precisos, si no se selecciona adecuadamente los parámetros de control, que se usan para modelar los distintos tipos de histéresis que los elementos estructurales pueden exhibir. Asimismo, la selección de los registros a usar, que durante mucho tiempo fue complicada, pues se carecía de un conjunto apropiado de acelerogramas, generando en los Ingenieros Estructurales una dependencia crítica con otras disciplinas, en la actualidad gracias a conceptos como el del Análisis Dinámico Incremental, permite que la selección de los registros ya no sea una tarea tan compleja (Jalayer, 2003).

En este punto es donde los aportes de los investigadores en los Laboratorios de Estructuras, cobran un nivel de importancia que muchas veces no es reconocido por la comunidad profesional. La necesidad de contar con un banco de datos de los diversos modos que las estructuras responden ante ensayos cíclicos es importante y por ello cualquier esfuerzo que se aplique en lograr este objetivo es loable y requerirá de un trabajo conjunto de las Universidades con sus Investigadores, de la

Industria con el aporte de los fondos necesarios y de los estudiosos del tema, con su iniciativa académica, de tal modo que el conjunto de esfuerzos permitan crear un valioso patrimonio tecnológico (NISEE, 2007).

4.- EJEMPLOS DE CALIBRACION

El inicio en el uso de procedimientos Dinámicos No Lineales se da en el proceso denominado “Calibración”, que simplemente consiste en replicar mediante nuestra herramienta de análisis (llámelo software, programa, código, etc.) ensayos monotónicos o cíclicos, tratando de que nuestra simulación replique los siguientes hechos:

- La Rigidez elástica.
- La Rigidez luego del agrietamiento, tanto de carga como de descarga (para el concreto armado).
- La Rigidez luego de la fluencia, en la carga y la descarga.
- La Resistencia, de preferencia la última.
- Finalmente, lo más difícil, la disipación de la energía representada por las proporciones de los lazos histeréticos.

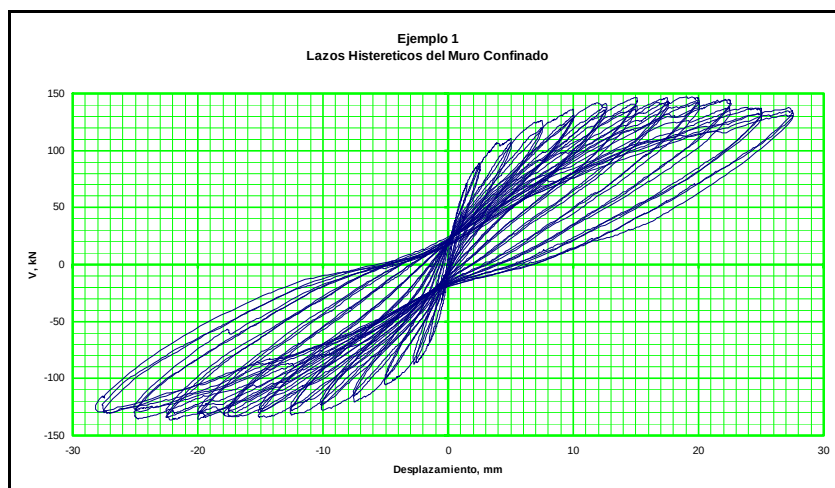
Si somos capaces de modelar los ensayos de laboratorio, es aceptable suponer que nuestra capacidad de predecir el comportamiento de una estructura dada, que está compuesta por elementos que son simulados por modelos que han sido “calibrados” con ensayos realizados, será adecuada.

Mostraremos a continuación algunos ejemplos de procedimientos de calibración, realizados con un software de Análisis Inelástico No Lineal, (CANNY, 2007).

Los ensayos que se han usado en la calibración, han sido gentilmente proporcionados por el Ingeniero Ángel San Bartolomé de la PUCP y el Dr. Carlos Zavala del CISMID de la UNI.

Ejemplo 1

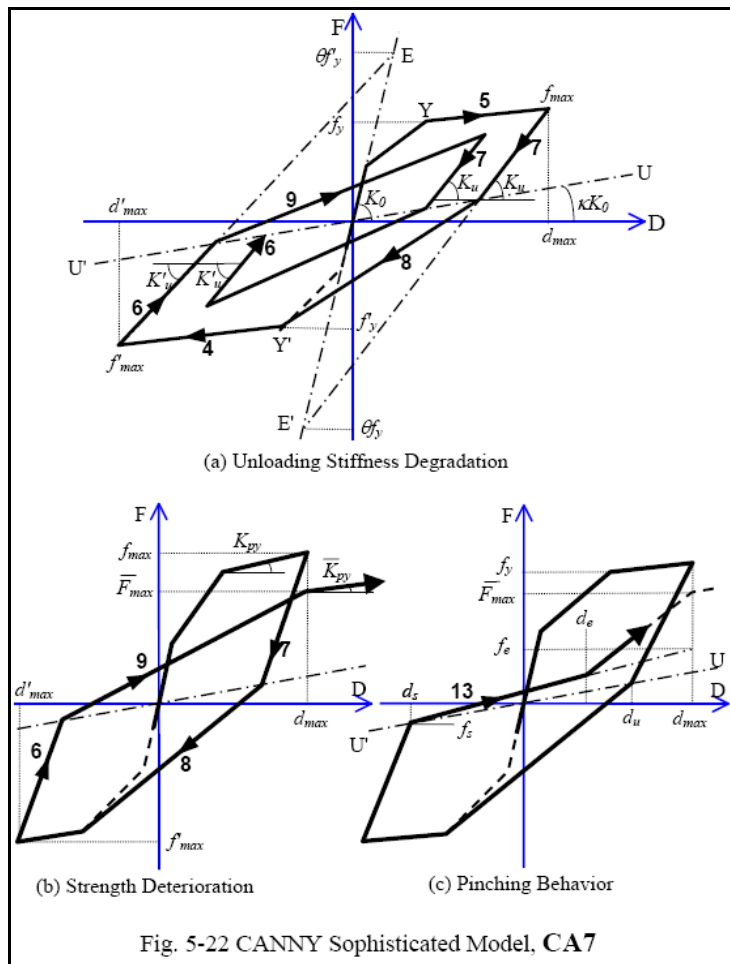
Muro ensayado en la PUCP, por el Ing. San Bartolomé, las características del mismo en la bibliografía (San Bartolomé, 2007). Se muestra a continuación el resultado del ensayo:



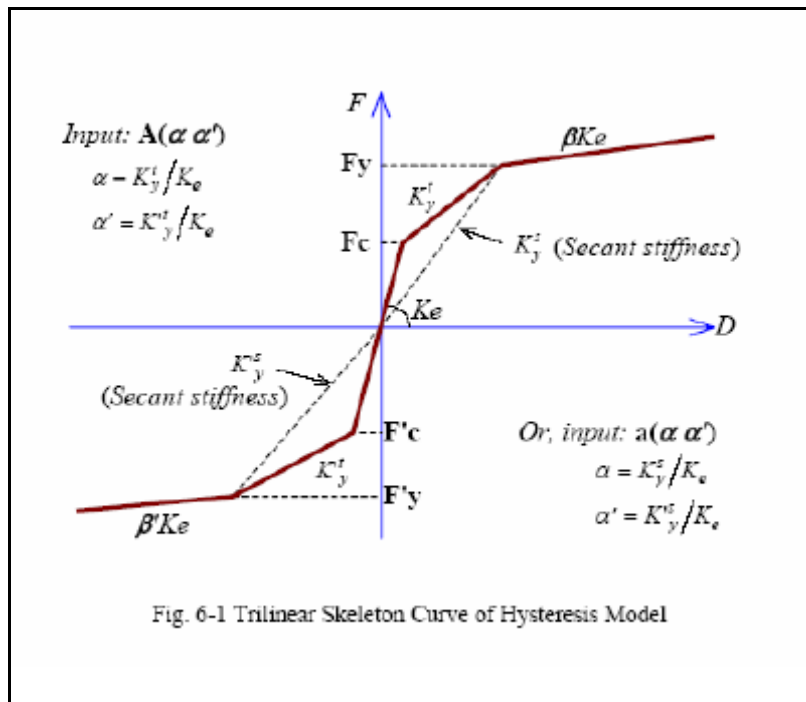
Para apreciar el proceso de calibración, primeramente mencionaremos de manera sucinta las características del modelo a usar:

- Respuesta por Corte: Usaremos un modelo histerético que refleja la degradación de rigidez, el deterioro de la resistencia y el efecto de angostamiento de los lazos.
- Respuesta por Flexión: Usaremos un modelo en base a fibras, por ello haremos uso de las curvas esfuerzo - deformación unitaria tanto del acero de refuerzo como del concreto.
- Respuesta Axial: Supondremos un comportamiento lineal.
- Modelaremos en dos dimensiones.

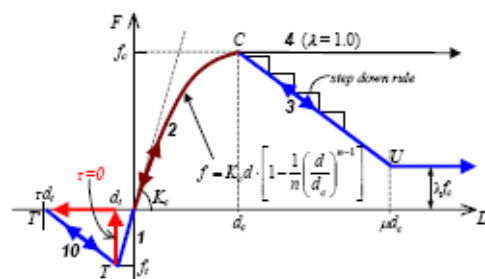
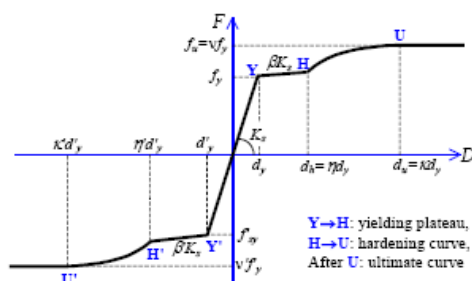
A continuación mostramos las características del modelo que usaremos para simular el comportamiento histerético:



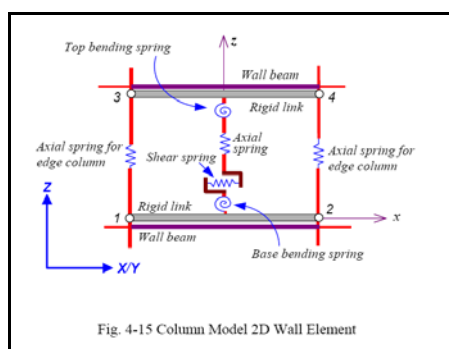
Asimismo mostramos las características que definirán la envolvente de los lazos:



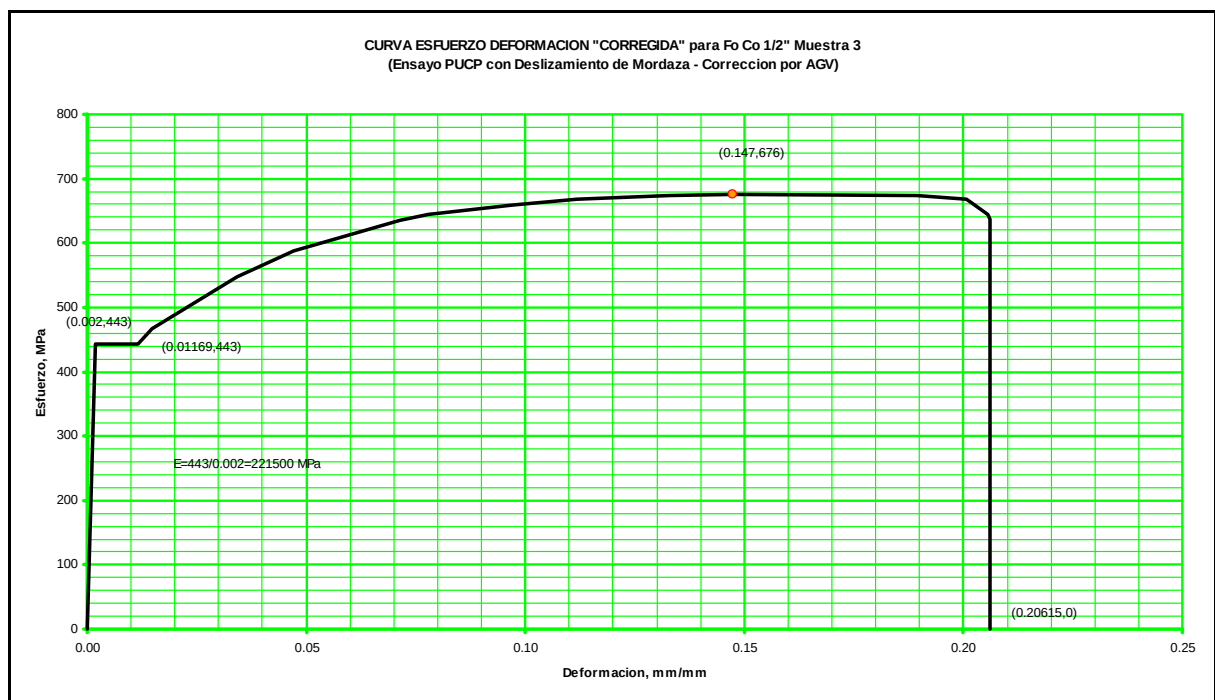
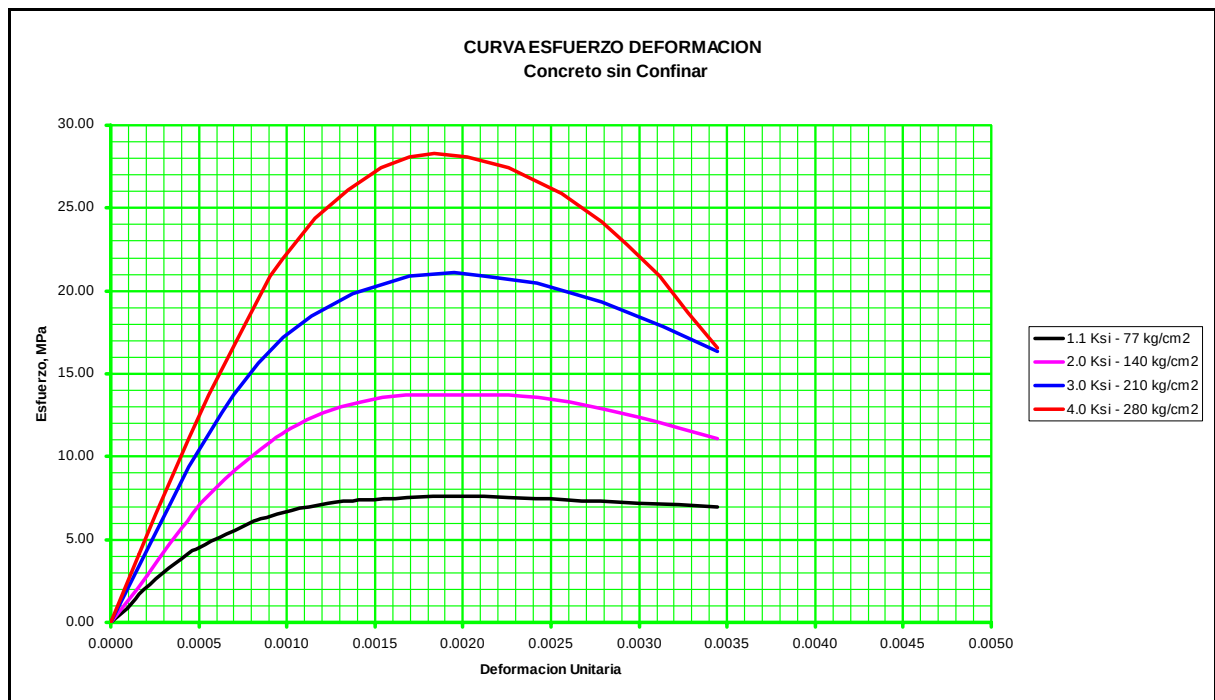
Este modelo de histéresis, CA7, será usado para las respuestas en corte y en flexión para definir las características de los lazos en la carga y descarga, pues los niveles de resistencia se obtendrán por el método de las fibras, simulando el concreto y el acero de refuerzo por resortes, donde las características de los modelos de los materiales son las siguientes:



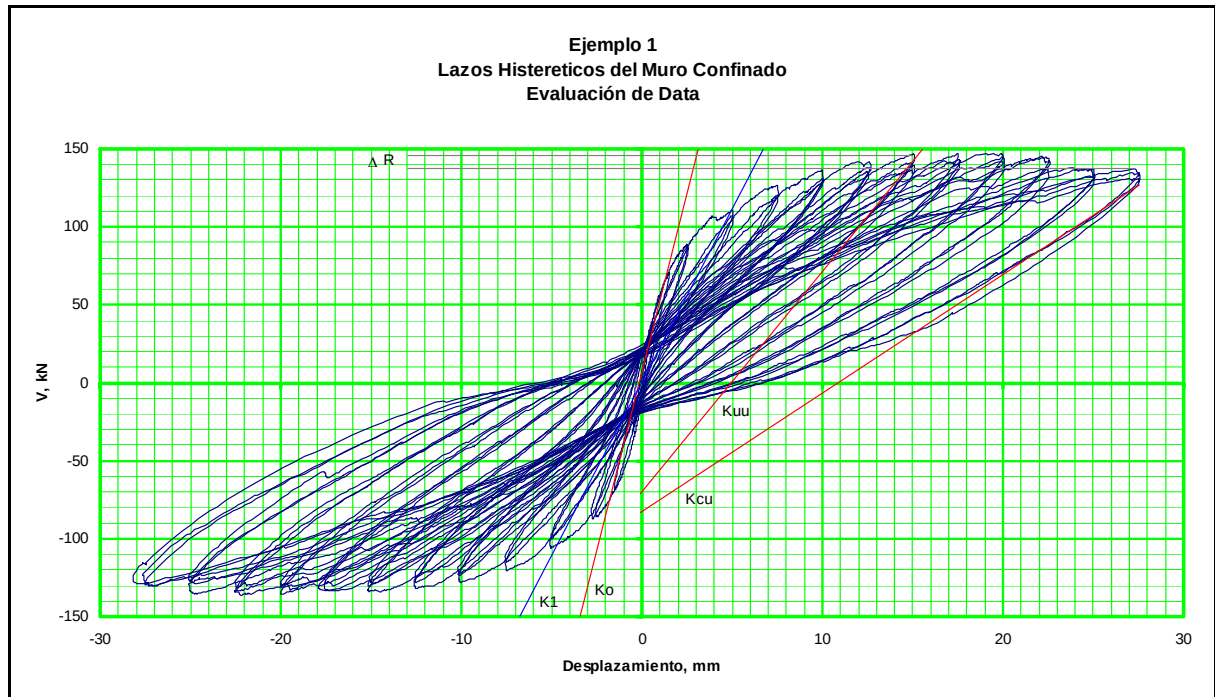
El macro elemento que usaremos para el elemento muro, se muestra a continuación:



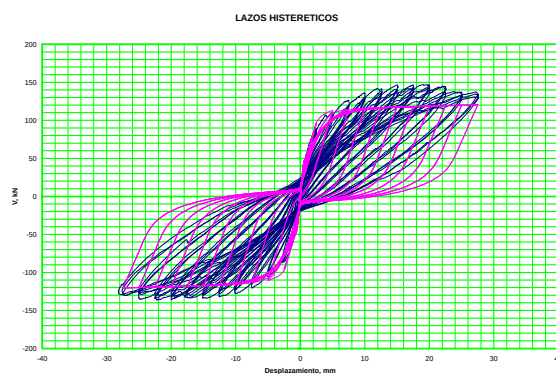
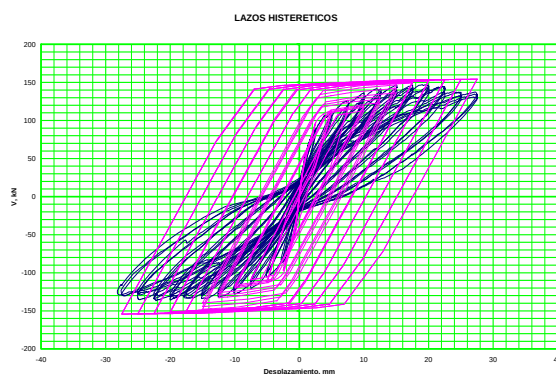
En las siguientes figuras mostramos las características de los materiales:



Sobre la curva del laboratorio, de acuerdo a los modelos seleccionados, procedemos a trazar las rigideces u otras características, como el deterioro de la resistencia, con el fin de evaluar los parámetros respectivos (Varela, 2003):

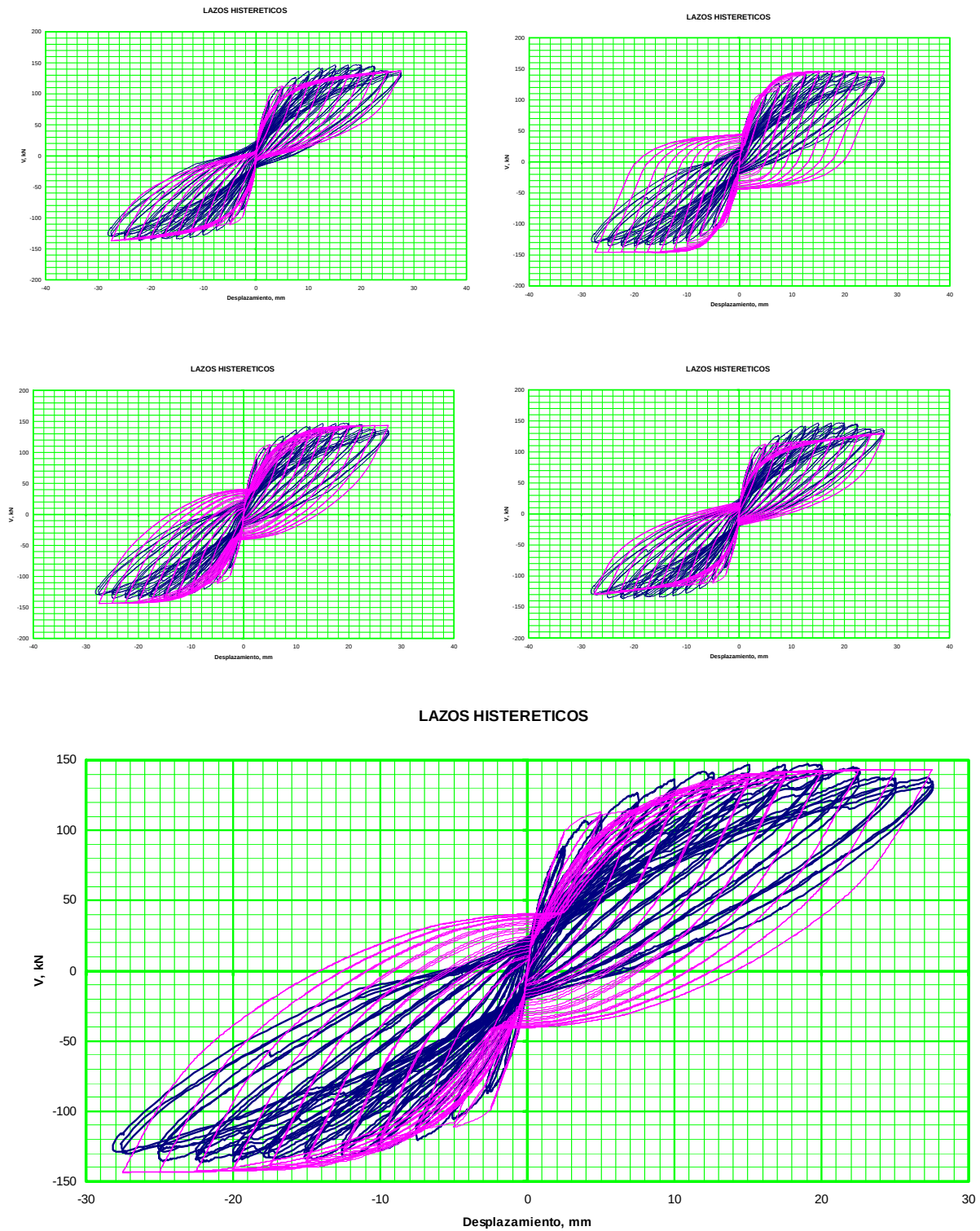


Si no hacemos ninguna calibración y usamos los valores por defecto de los parámetros, obtendríamos la simulación que aparece en el lado izquierdo, si empezamos a calibrar el del derecho:



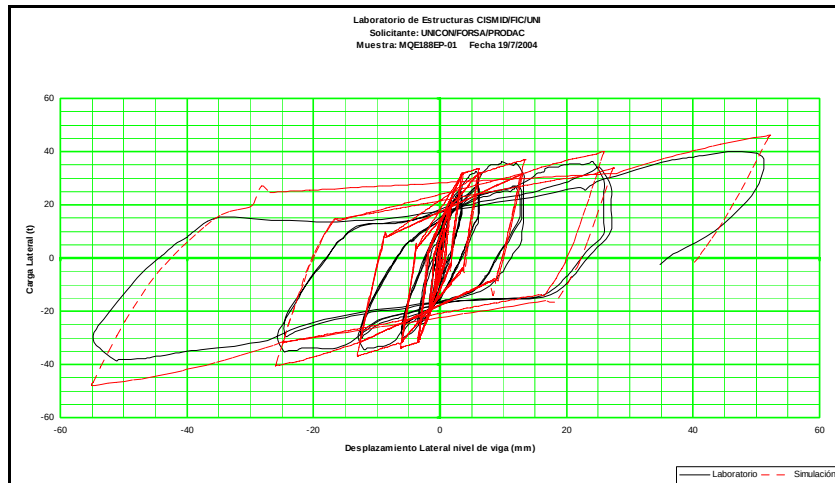
En este caso, la evaluación de la data, por tratarse de un muro esbelto en el que modelamos los efectos de flexión por el método de las fibras, no resulta muy incidente, aportando mejores aproximaciones los parámetros que definen las características histeréticas del acero y del concreto, que desgraciadamente no se conocen, pues los ensayos de laboratorio nos aportan solamente las curvas envolventes, esto nos obliga a "buscar" los valores adecuados.

Conforme vamos "Calibrando" obtenemos mejores aproximaciones en unas características y lamentablemente vamos perjudicando otras, finalmente la elección es un compromiso que tratará de conciliar entre resistencia, rigideces y disipación de energía, reflejada en la proporción de los lazos:



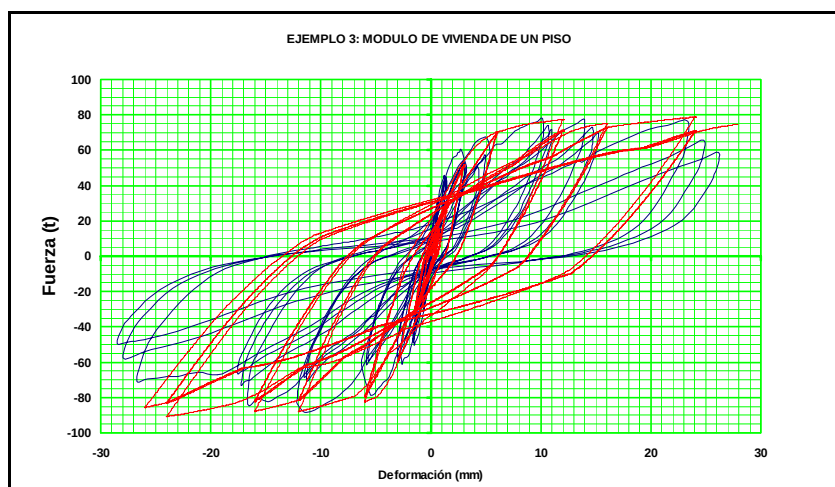
Ejemplo 2

El siguiente caso ha sido proporcionado por el Dr. Alberto Zavala del CISMID de la UNI, las características del muro ensayado están en la bibliografía (Medina, 2006), sin embargo mencionaremos que este espécimen refleja las realidades de los Muros de Ductilidad Limitada: Acero concentrado en los extremos, espesores de 0.10 metros y el uso de Malla Electro Soldada como refuerzo en el alma, clásico elemento que cae bajo los denominados Muros Chatos Ligeramente Reforzados.



Ejemplo 3

Usando los parámetros derivados para el ejemplo 2, se modeló un módulo de vivienda de dos ambientes y un piso, con 16.45 m² de área techada, formado por cinco muros, que también fue ensayado dentro del trabajo de investigación mencionado. En este caso resulta interesante comprobar que la respuesta del conjunto de muros puede ser pronosticada, aceptablemente, mediante el ensamble de muros que son modelados con las propiedades derivadas de un espécimen ensayado en laboratorio en un rango de respuestas que llega con holgura hasta la resistencia última.



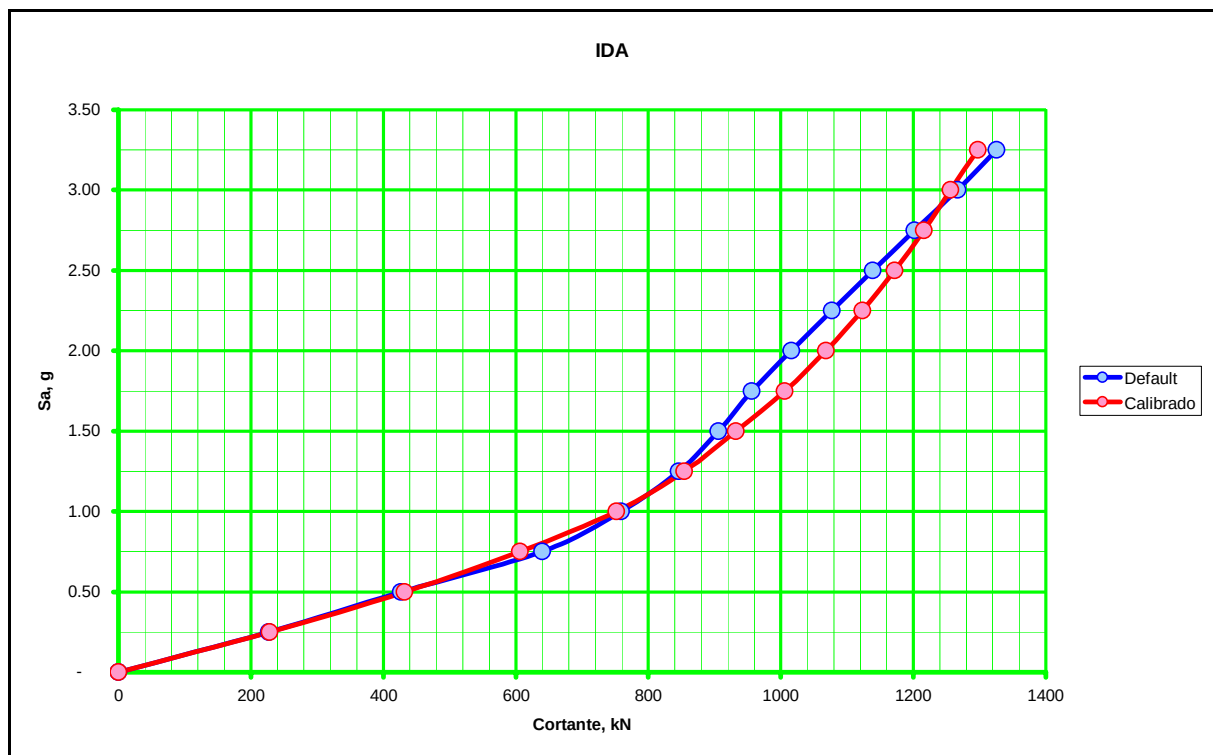
5.- SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA AL MODELO HISTERETICO

Para apreciar la importancia del proceso de Calibración, consideremos una estructura de cinco niveles, en base a Muros de Concreto Armado de Ductilidad Limitada, de características similares al Ejemplo 2, en este caso el periodo fundamental es de 0.25 segundos y la densidad de muros en el sentido del análisis es de 2.50 %.

Sometamos nuestra estructura a la acción del sismo del 03-10-1974, componente N82W, este registro es uno de los usados para desarrollar el espectro de la Norma E.030.

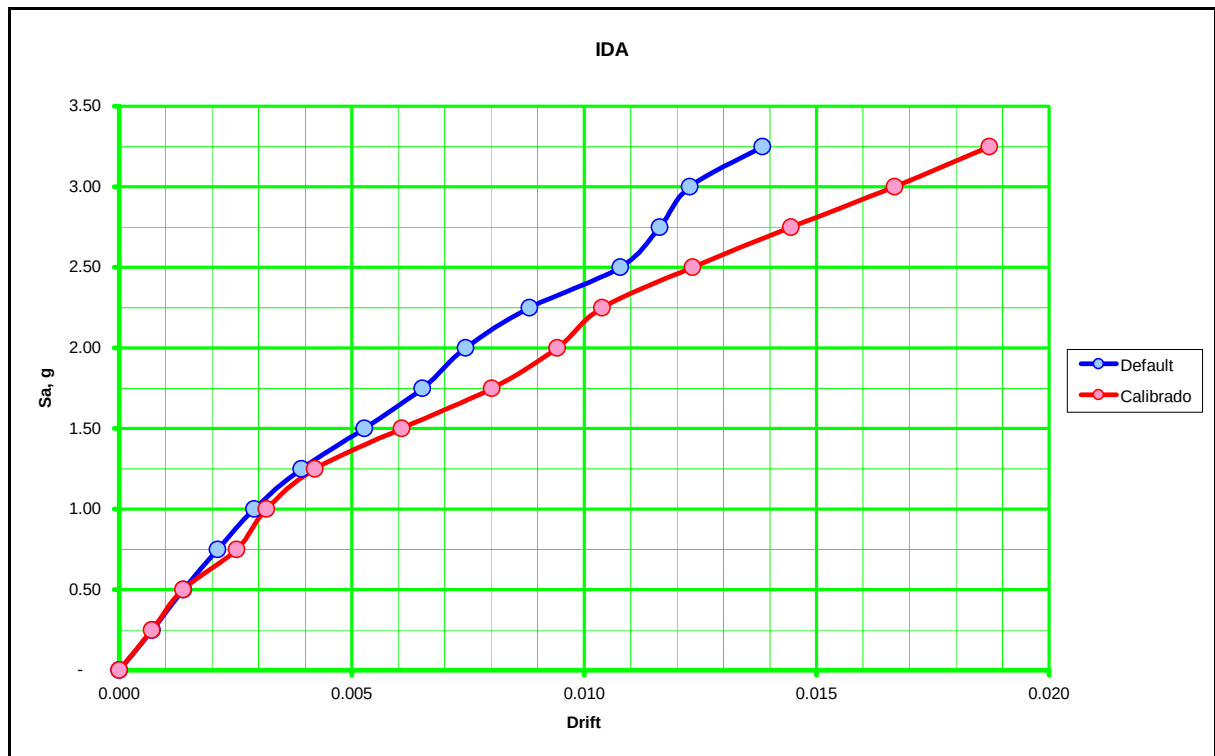
Si vamos incrementando la aceleración pico del suelo, en sucesivos pasos, estamos realizando lo que se denomina un Análisis Dinámico Incremental. Apliquemos este procedimiento a nuestra estructura pero usemos dos variantes: En la primera usaremos los valores de los parámetros de control tal como vienen en el software, llamemos a esto valores por defecto o default y en la segunda usemos los valores determinados por el procedimiento de Calibración del Ejemplo 2 que también se usaron en los resultados del Ejemplo 3.

Veamos los resultados para las respuestas estructurales basadas en resistencia, tal como el cortante en la base:



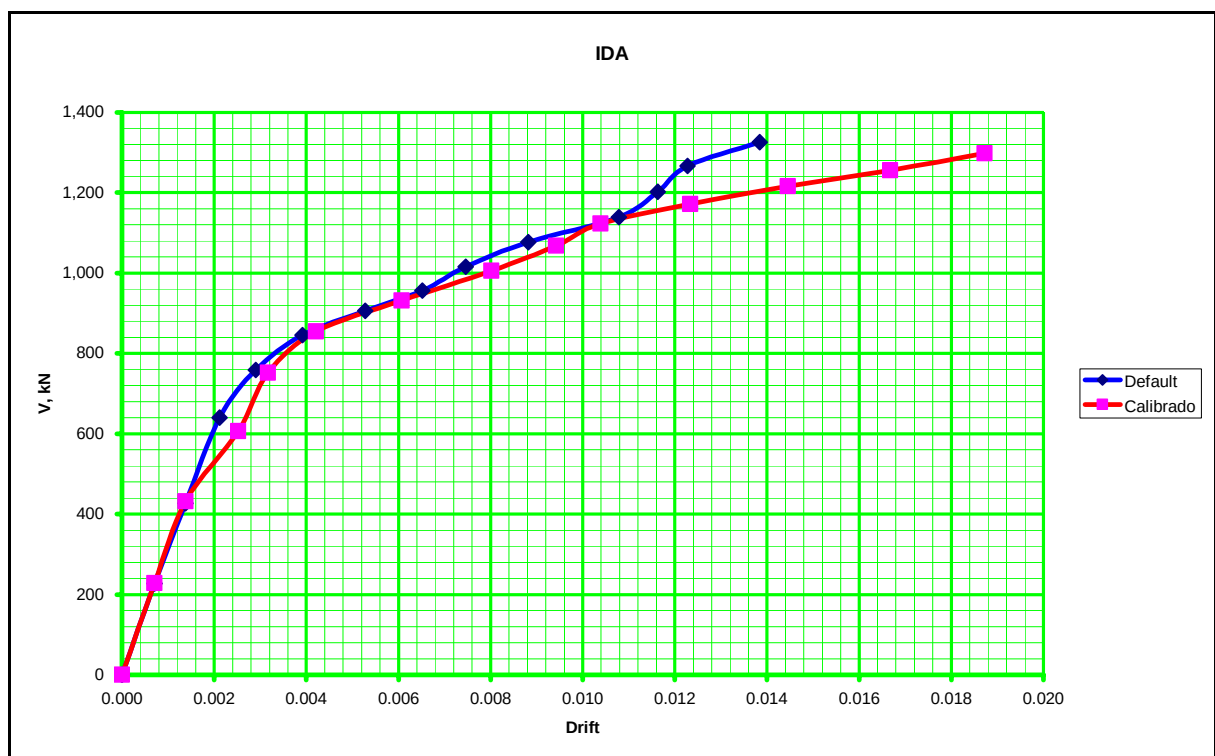
Como podemos observar ambas curvas siguen trazos muy similares, incluso hasta valores de S_a de 0.60g son coincidentes, denotando un comportamiento lineal del sistema.

Ahora veamos las respuestas basadas en desplazamientos, tal como la distorsión global (desplazamiento del último nivel entre altura total):

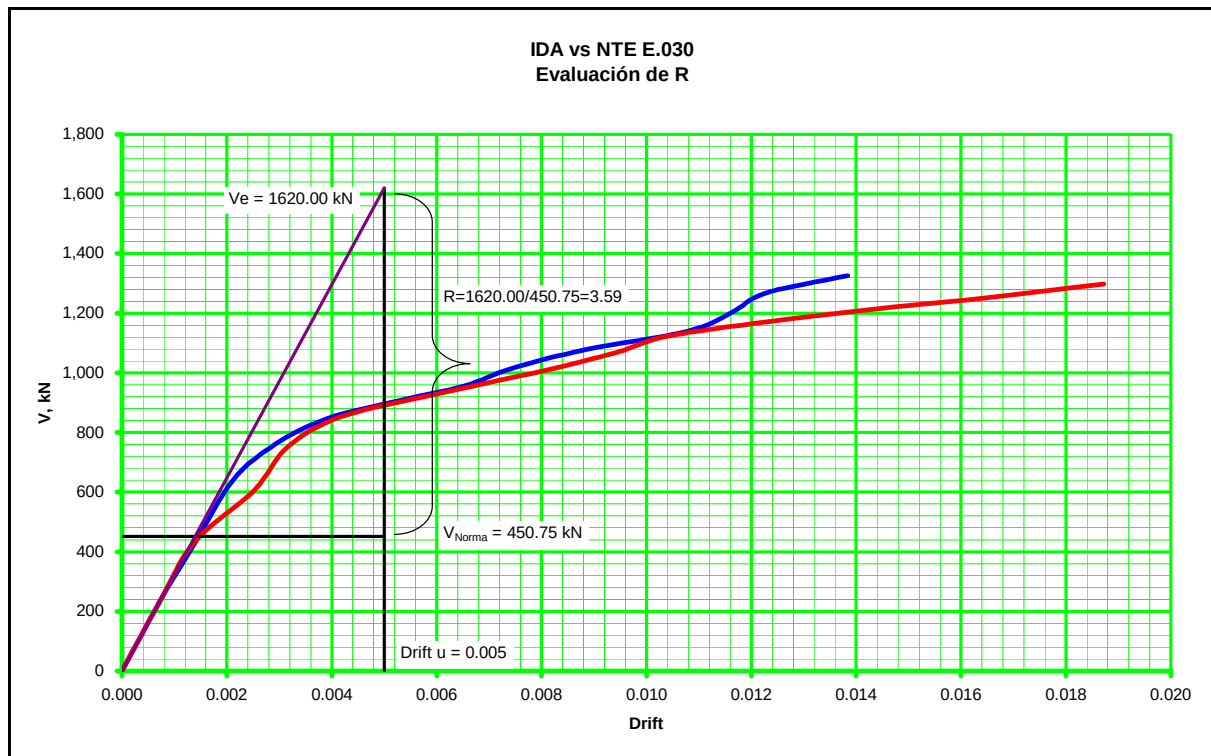


La diferencia en los trazos es mínima hasta un S_a de 0.6g, incrementándose conforme aumenta la intensidad de la demanda.

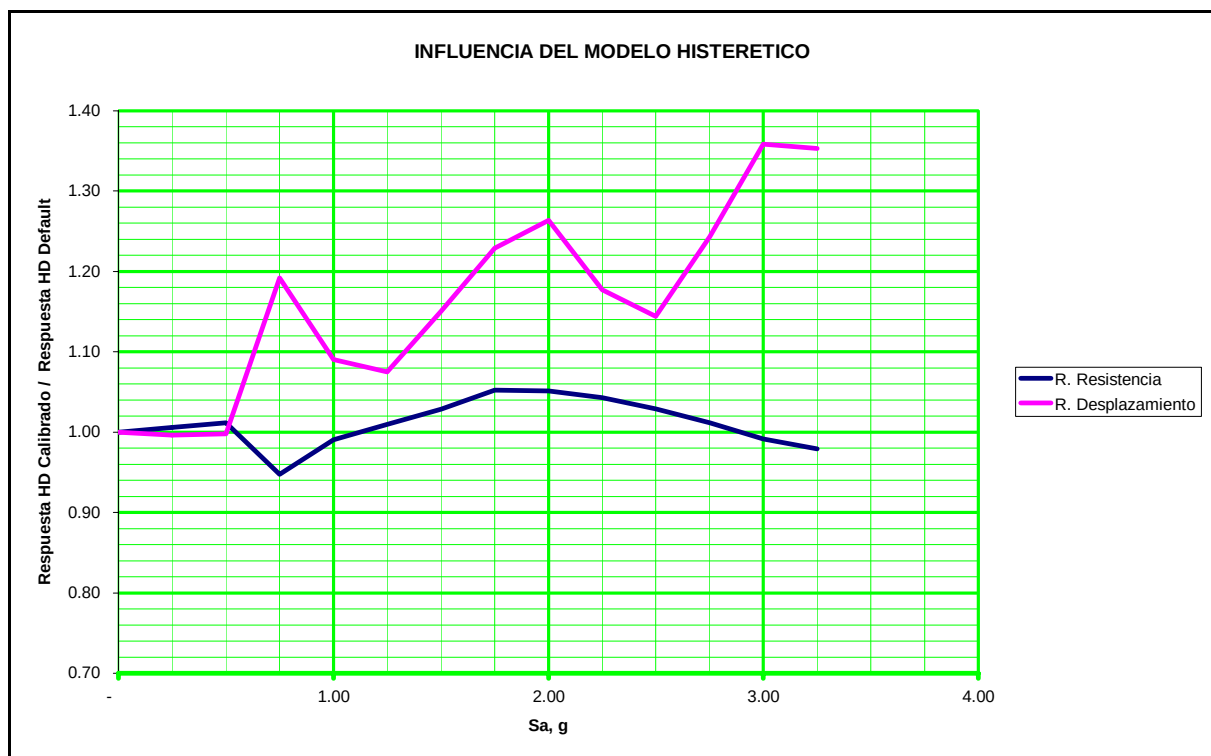
Veamos ahora como se comparan las curvas de capacidad respectivas:



Adicionalmente podemos evaluar que R, de acuerdo a la Norma E.030, se encuentra implícito en el comportamiento estructural:



Por último, el siguiente grafico nos compara la sensibilidad de las respuestas por resistencia y por desplazamiento con la intensidad de la demanda:



6.- COMENTARIOS FINALES

Como hemos podido observar, la información de los ensayos es indispensable para el proceso de calibración, asimismo el uso de herramientas de análisis, no lineales e inelásticas, sin el debido cuidado en la determinación de los parámetros de control, puede arrojar resultados incorrectos que no necesariamente están del lado de la seguridad, hemos observado que las respuestas por resistencia se incrementan en un 5% mientras que las respuestas por desplazamiento pueden ser mayores hasta en un 36%, dependiendo esto del nivel de intensidad de la demanda sísmica.

La generación de una base de datos, de uso público, con los resultados de ensayos realizados en los Laboratorios de Estructuras nos permitirá calibrar los parámetros de control que nos ayudarán a predecir la respuesta de estructuras diversas, en albañilería, concreto armado, adobe, acero y cualquier otro material que pueda ser ensayado y cuyo comportamiento estructural representado por sus lazos histeréticos pueda ser modelado.

Una aplicación deseable de esto y que podría ser inmediata, consiste en la determinación de los valores “R” de modificación de respuesta sísmica (Klingner, 2007), en el marco de la investigación que el ATC viene desarrollando en su trabajo # 63 (ATC, 2004). Estas investigaciones permitirían, a los miembros de los comités respectivos, tener mejores elementos de juicio para definir los valores de “R” adecuados a ser usados en la Norma E.030 para los diversos sistemas estructurales hechos en distintos materiales.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ATC-63 Project; “QUANTIFICATION OF BUILDING SYSTEM PERFORMANCE AND RESPONSE PARAMETERS”, Applied Technology Council, 2004.
2. CANNY Consultants; “3D NONLINEAR STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM”, Kangning Li, 2007.
3. FEMA 273; “NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS”, BSSC + ATC + FEMA, 1997.
4. Jalayer, Fatemeh; “DIRECT PROBABILISTIC SEISMIC ANALYSIS: IMPLEMENTING NON-LINEAR DYNAMIC ASSESSMENT”, PhD Thesis, Stanford University, 2003.
5. Jalayer, F., and C. A. Cornell; “A TECHNICAL FRAMEWORK FOR PROBABILITY-BASED DEMAND AND CAPACITY FACTOR DESIGN (DCFD) SEISMIC FORMATS”. Report PEER 2003/08. Berkeley, Calif.: University of California.
6. Klingner, Richard; “COMENTARIOS SOBRE EDIFICIOS DE DUCTILIDAD LIMITADA”, Lima, 2007.
7. Medina, Gabriela; “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL A ESCALA NATURAL DE MUROS Y MODULO DE CONCRETO REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, UNI, 2005.
8. NISEE Base de datos de Desempeño Estructural, <http://nisee.berkeley.edu/spd/>, 2007.
9. Reglamento Nacional de Edificaciones; “NORMA E.030: DISEÑO SISMORRESISTENTE”, El Peruano, Mayo 2006.

10. San Bartolomé, Angel y Otros; "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS DOS CRITERIOS DEL ACI EMPLEADOS PARA CONFINAR LOS BORDES DE LOS MUROS DE CONCRETO ARMADO", PUCP, 2007.
11. Varela, Jorge; "DEVELOPMENT OF R AND Cd FACTORS FOR THE SEISMIC DESIGN OF AAC STRUCTURES", PhD Thesis, University of Texas, Austin 2003.