



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

PERIODO APARENTE DE SISTEMAS NO LINEALES DURANTE EXCITACIONES
SÍSMICAS FUERTES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

ABRAHAM EDUARDO CEA FERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN BOROSCHECK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO
RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN

La estimación del período fundamental aparente o equivalente de un sistema no-lineal ha sido estudiada extensamente a partir de metodologías orientadas al diseño o a partir de técnicas de identificación de sistemas. Siguiendo lo propuesto por Katsanos y Sextos en el 2015, es posible reflejar de manera espectral la variación esperada del período aparente en función de las variables que definen la respuesta histerética del sistema y la demanda sísmica. En la presente investigación se hace una revisión crítica de este enfoque, utilizando en lugar de identificación en espacio-frecuencia, herramientas de identificación y linealización equivalente que otorgan una efectiva representatividad en términos de ajuste de respuesta de aceleraciones relativas.

Para llevar a cabo este análisis, se toma en consideración una base de datos de 300 registros sísmicos y los modelos histeréticos de un grado de libertad (modelo bilineal, multi-lineal con degradación leve y severa). Se utiliza OpenSEES para la obtención de la respuesta de los sistemas no-lineales tratados, la construcción de espectros de respuesta, y estimación de propiedades secantes. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos a partir de metodologías de identificación en espacio-frecuencia y linealización equivalente, con los obtenidos directamente de los modelos numéricos.

Se observan diversos problemas en la identificación frecuencial aplicada a sistemas de respuesta no-lineal de grandes amplitudes. Se propone una mejora para la obtención de espectros de elongación del período aparente mediante el uso de métodos de identificación basados en análisis Bayesiano para el ajuste de sistemas lineales equivalentes en el espacio del tiempo. Se comparan resultados obtenidos en modelos histeréticos que incorporan efectos de suavización emulando el comportamiento real estructural (Bouc Wen con y sin degradación). La metodología propuesta es aplicada a un set de registros sísmicos chilenos con el fin de postular espectros de elongación del periodo aparente para el contexto nacional.

Finalmente se proponen modelos de espectro de elongación probable del periodo aparente, basadas en un efectivo ajuste de la respuesta en aceleraciones relativas de sistemas no-lineales, y expresadas en función del modelo histórico, factor de reducción de la respuesta elástica R y periodo elástico inicial.

Palabras Clave: Elongación del periodo, identificación de sistemas, linealización equivalente, análisis bayesiano, respuesta de sistemas no lineales.

Agradecimientos

Con agradecimiento y cariño a los todos los profesores del programa de estudio que en su noble labor nos han transmitido lo mejor de sus experiencias y conocimientos, e inspirado a seguir adelante con nuestro desarrollo profesional en esta amplia y fascinante disciplina de la ingeniería civil estructural, sísmica y geotécnica. Ha sido una fuente de regocijo contar con un cuerpo docente de gran calidad profesional y humana en cada una de las materias cursadas.

Quisiera extender igualmente un especial agradecimiento a cada uno de los compañeros y amigos que estos años de estudio me han regalado, con quienes hemos mantenido excelentes lazos de amistad y apoyo mutuo en nuestro desarrollo personal y profesional.

Tabla de Contenido

Capítulo I. Introducción	1
Capítulo II. Identificación de Sistemas No-Lineales en Espacio-Frecuencia	7
II.1. Introducción	7
II.2. Experiencia a Escala Real	8
II.3. Experiencia en Laboratorio	15
II.4. Representación Analítica del Fenómeno	16
II.5. Predicción del Periodo Inelástico Aparente (Katsanos y Sextos 2015)	18
Capítulo III. Caracterización de un Sistema Dinámico Histerético	22
III.1. Introducción	22
III.2. Propiedades Secantes de un Sistema No Lineal	25
III.3. Periodo Aparente del Sistema	27
III.4. Linealización Equivalente	29
4.1. Análisis Bayesiano	30
4.2. Implementación para la Identificación	33
III.5. Elongación del Periodo Aparente del Sistema	34
Capítulo IV. Espectros de Elongación del Periodo Aparente	36
IV.1. Introducción	36
IV.2. Base de Datos de Registros Sísmicos	37
IV.3. Modelo No Lineal Histerético (SDOF)	39
3.1. Modelo “Multi-Linear Hysteretic Model” (IDARC-2D)	39
3.2. Modelo “uniaxialMaterial Hysteretic” (OpenSees)	42
3.3. Modelos Bouc-Wen (OpenSees)	45
IV.4. Identificación del Periodo Aparente	48
IV.5. Generación de Espectros de Elongación del Periodo	48
5.1. Fuerza de fluencia del sistema, F_y .	49
5.2. Rigidez post-fluencia, α_y .	49
5.3. Niveles de degradación.	49

Capítulo V. Identificación del Periodo Aparente de Sistemas Histeréticos	51
V.1. Introducción	51
V.2. Propiedades Secantes como Referencia para la Identificación	52
V.3. Identificación en base a Espectros de Frecuencia	53
3.1. Implementación del Espectrograma para la Identificación	53
3.2. Identificación en Modelo Bi-lineal sin Degradación	55
3.3. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Leve y Severa	59
3.4. Problemas Presentes en el Método de Identificación	64
3.5. Implementación del Funciones de Transferencia Empíricas	67
3.6. Identificación en Modelos con Suavización	70
V.4. Identificación en base a Análisis Bayesiano	79
4.1. Implementación del Método para Fase Fuerte de Respuesta	79
4.2. Implementación del Método para Seguimiento de Propiedades Efectivas	83
4.3. Identificación en Modelo Bi-lineal sin Degradación	87
4.4. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Leve	105
4.5. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Severa	122
4.6. Identificación en Modelos con Suavización	139
Capítulo VI. Espectros de Elongación del Periodo Aparente	143
VI.1. Introducción	143
VI.2. Espectros de Elongación en base Propiedades Secantes	144
VI.3. Espectros de Elongación en base Identificación en Espacio-Frecuencia	149
3.1. Sistemas Bi-lineal sin Degradación	149
3.2. Sistemas Multi-lineales con Degradación Leve y Severa	153
3.3. Problemas Presentes en la Identificación	156
3.4. Espectros de Elongación del Periodo	159
VI.4. Espectros de Elongación en base a Linealización Equivalente	161
4.1. Sistemas Bi-lineal sin Degradación	161
4.2. Sistemas Multi-lineales con Degradación Leve	168

4.3.	Sistemas Multi-lineales con Degradación Severa	171
4.4.	Espectros de Elongación del Periodo Aparente Finales	174
4.5.	Influencia del Tipo de Suelo	180
4.6.	Comparación de Resultados: Linealización Equivalente vs Propiedades Secantes	182
4.7.	Comparación de Resultados: Katsanos-Sextos 2015 y Linealización Equivalente	185
4.8.	Espectros de Elongación en Contexto Nacional	186
4.9.	Correlación de Elongación del Periodo	189
	Capítulo VII. Comentarios y Conclusiones	192
	Bibliografía	209

Capítulo I. Introducción

La estimación del período fundamental aparente de un sistema no-lineal ha sido estudiado extensamente [1-24] y de manera común a partir de metodologías de identificación en el espacio de la frecuencia. Siguiendo lo propuesto por Katsanos and Sextos [2] es posible reflejar de manera espectral la razón período aparente sobre período fundamental (lineal-elástico) en función de variables que definen la respuesta histerética del sistema y la demanda sísmica. Por otro lado, la definición de un período inelástico aparente carece de un sentido estrictamente físico y los métodos de identificación lineales simples, basados en la representación en frecuencia de la respuesta, tienden a no ser representativos [5]. En el presente estudio se evalúa en forma crítica el método de identificación del período característico de la respuesta no lineal del sistema (período aparente) y se amplían las alternativas para la estimación, con la finalidad de lograr representar efectivamente la respuesta del sistema inelástico. Igualmente, se desarrolla el análisis de Katsanos and Sextos [2] para una base de datos de sismos chilenos característicos.

Motivación

Bajo las suposiciones de que el comportamiento global de un sistema estructural real se comporta inicialmente de manera lineal elástica, con una masa invariante en el tiempo y una baja razón de amortiguamiento crítico inherente, es posible definir un periodo fundamental de vibración de la estructura que dominará en gran parte su respuesta dinámica ante excitaciones oscilantes, ya sean ambientales, de viento o sísmicas. Aplicando métodos de identificación sobre la respuesta de la estructura ante sollicitaciones aleatorias, puede estimarse casi directamente el o los períodos fundamentales de vibración (o frecuencias modales) principales de la estructura, contenidos en la respuesta.

Este período o frecuencia fundamental de la respuesta estructural pierde sentido físico cuando uno o más elementos estructurales desarrollan un comportamiento alejado de la linealidad, tal como ocurre en sistemas estructurales reales sometidos a movimientos sísmicos fuertes. A pesar del natural comportamiento no-lineal de los sistemas estructurales, en diversos estudios se ha explotado el uso de los mismos métodos de identificación teóricamente aplicables a sistemas lineales (Función de Transferencia Empírica, Transformada Rápida de Fourier [1-2, 4], Espectro

de Potencia “PSD”, Métodos de Sub-espacio “MOESP”, entre otros), logrando así identificar propiedades dinámicas “aparentes” del sistema. De la identificación en sistemas no-lineales se ha logrado observar en diversos estudios un fenómeno de reducciones en la magnitud de la frecuencia fundamental, así como variaciones también en la razón de amortiguamiento crítico de la estructura [1-4], sin embargo, la aplicabilidad de estos métodos de identificación en sistemas no-lineales continúa siendo cuestionable [5].

El interés de este estudio se centra en el análisis de cómo el período aparente de vibración de una estructura se ve afectado durante una fuerte excitación sísmica, y eventualmente correlacionar su tasa de cambio al grado de incursión inelástica global de la estructura. En el reciente estudio de Katsanos and Sextos [2] se aborda este problema de manera generalizada a partir de la respuesta de un oscilador de un grado de libertad de comportamiento no lineal, definido a partir de modelos constitutivos que incorporan diversos niveles de plastificación, rigideces de post-fluencia, efecto pinching y degradación. A partir de un set de 300 registros sísmicos seleccionados, los autores analizaron la respuesta en aceleración para determinar el período “inelástico” que definiría el comportamiento no lineal del sistema, basándose únicamente en la representación de la respuesta no lineal en el espacio de la frecuencia.

En el presente estudio, además de dar revisión a la investigación de Katsanos and Sextos [2], se evalúa el modo aplicado de identificación del periodo aparente, alegando consistentemente con Martínez, Boroschek y Bilbao [5] a que los resultados no son necesariamente representativos del sistema no lineal. Frente a esto se propondrán metodologías alternativas de identificación que favorezcan la representación del grado de incursión inelástica en el sistema. Por otro lado, siguiendo la línea de investigación de Katsanos and Sextos, se pretende obtener espectros inelásticos para la predicción del período aparente de estructuras, para una base de datos de eventos sísmicos chilenos y sus respectivas características.

Objetivos

La presente investigación tiene por objetivo principal estudiar la variación en el período aparente de sistemas no-lineales de un grado de libertad sometidos a excitaciones sísmicas de amplitud fuerte. Para esto se estudian las variables que influyen en la respuesta del modelo, tales como propiedades del modelo constitutivo y propiedades de la demanda sísmica, y por otro lado

se evalúa el método con el cuál la estimación del período aparente es efectivamente representativo del sistema no lineal.

Definiendo un apropiado método de estimación del período aparente, se busca desarrollar la investigación de Katsanos and Sextos [2] aplicada al contexto nacional, con una base de datos de eventos sísmicos chilenos característica.

Como objetivos secundarios se espera:

- Desarrollo de una herramienta eficiente y robusta para la generación de la respuesta dinámica no lineal de un modelo de un grado de libertad, así como también la obtención de espectros inelásticos de respuesta.
- Proponer una técnica alternativa y de fácil implementación para la estimación del período aparente del sistema no lineal, que logre ser representativo de la respuesta y del modelo.
- Estudiar la sensibilidad de las propiedades de modelos constitutivos no lineales en la respuesta y posterior identificación de período aparente.

Metodología

Inicialmente se lleva a cabo una revisión bibliográfica y un estudio del estado del arte con respecto a la materia. En base a las investigaciones que se han llevado a cabo, se intenta correlacionar estudios analíticos con estudios del ámbito empírico en los cuales se registran respuestas dinámicas a distintos estados de daño inducido en los especímenes.

Se analiza en detalle el estudio de Katsanos and Sextos [2], el cual en primer lugar se llevará a cabo de manera análoga bajo las mismas suposiciones y antecedentes. Para esto se desarrolla un modelo simplificado de un grado de libertad en OpenSEES, con el uso de los modelos constitutivos disponibles, con el fin de obtener la respuesta en el tiempo (aceleración, velocidad y deformación), curvas de respuesta fuerza-deformación e indistintamente obtener espectros de respuesta inelástica. Se selecciona el modelo constitutivo que más se ajuste al modelo del estudio original.

Se recopila una base de datos de eventos sísmicos, proveniente de PEER GMD, equivalente a la utilizada en el estudio original, y luego se generan rutinas en MATLAB para el análisis masivo de datos en los cuales se procesa la base de datos de eventos sísmicos y luego la identificación del período aparente sobre la respuesta en aceleraciones. La estimación del período aparente se realiza

en base a la representación de la respuesta en el espacio de la frecuencia, recogiendo sus fluctuaciones máximas, tal como lo desarrolla el estudio original.

Siguiendo la misma metodología del autor, se generan espectros de elongación del periodo (razón de periodo aparente sobre periodo elástico) en función de las variables que definen el sistema no lineal y la demanda sísmica. Estos resultados son posteriormente comparados con observados en el estudio original.

A partir de este punto se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros que definen el modelo constitutivo seleccionado originalmente. Se investiga la influencia en los resultados a partir del ajuste de las variables que definen niveles de fluencia, rigideces post fluencia, efectos pinching, degradación de la resistencia, suavización de la curva, entre otros.

Se estudian técnicas alternativas para la identificación del período aparente que puedan ofrecer una mejor representación del tipo de comportamiento no lineal y su grado de incursión en el rango no lineal.

Para la homologación del análisis en el contexto nacional, se selecciona un set de registros sísmicos chilenos característicos para la elaboración de espectros de elongación del período aparente, a partir de la metodología de identificación propuesta.

Finalmente se analizan resultados y se presentan las conclusiones del estudio.

Alcance

Capítulo II: Identificación de Sistemas No-Lineales en Espacio-Frecuencia

Se hace una revisión de investigaciones y casos en los que se ha estudiado el comportamiento no lineal de sistemas dinámicos reales o especímenes de laboratorio a partir de metodologías de identificación basadas en la representación frecuencial de la respuesta dinámica. Se correlacionan resultados de estudios experimentales y analíticos. Se estudian referencias, antecedentes y conclusiones, dando cuenta del alcance que han desarrollado estas técnicas de identificación.

Capítulo III: Caracterización de un Sistema Dinámico Histerético

Se analizan los enfoques posibles para la caracterización lineal de sistemas dinámicos histeréticos desde el punto de vista del diseño y análisis estructural. Se plantean definiciones y particularidades de los conceptos básicos tratados en el desarrollo del presente estudio y que guardan relación con el concepto de la elongación del periodo aparente.

Capítulo IV: Estimación de Espectro de Elongación del Periodo

Se lleva a cabo una revisión crítica del estudio Katsanos and Sextos [2] que aborda el problema de la “elongación del período aparente” generado por las incursiones inelásticas, presentando sus resultados a modo espectral y en función de las variables que definen el problema. Se hace una descripción de la metodología utilizada para la obtención de resultados, haciendo hincapié en la descripción de la base de datos de eventos sísmicos, descripción de los sistemas y leyes constitutivas utilizadas, y especialmente la metodología de identificación empleada.

Paralelamente se lleva a cabo un estudio equivalente al de Katsanos and Sextos [2] siguiendo la misma metodología y antecedentes. Se selecciona en equivalencia una base de datos de eventos sísmicos y modelos constitutivos no-lineales para alcanzar y evaluar los mismos resultados de espectros de elongación del periodo propuestos por el autor. Finalmente se comparan resultados obtenidos.

Capítulo V: Identificación del Período Aparente de Sistemas Histeréticos

A partir de lo observado y analizado en los capítulos previos, se aplican metodologías para la identificación de propiedades efectivas de sistemas histeréticos para la elaboración de espectros de elongación del periodo. En dos vías de estudio, se utiliza por un lado una metodología basada en espacio-frecuencia, y paralelamente una metodología basada en el ajuste de respuestas modeladas y medidas. Se estudian conceptos de linealización equivalente y diversos enfoques de aplicación para los sistemas histeréticos en estudio. Se comparan resultados obtenidos a partir de las formas alternativas de identificación. Como finalidad del capítulo se pretende consensuar la definición de las propiedades efectivas representativas, que luego dan paso a la definición de la elongación del periodo alcanzada por el sistema.

Capítulo VI: Espectros de Elongación del Periodo Aparente

Ampliando el análisis expuesto por Katsanos and Sextos [2], y a partir de lo observado en los capítulos anteriores, se generan espectros de elongación del periodo aparente basados en la identificación de las propiedades efectivas representativas de los sistemas histeréticos tratados, y sobre el set original de registros sísmicos.

Se presentan de manera general los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados. Se realizan comparaciones cuantitativas y cualitativas, discutiendo las mejores aproximaciones en función de la representatividad del comportamiento no lineal.

Se estudian espectros de elongación del periodo obtenidos para un set reducido de registros sísmicos nacionales, para los mismos modelos histeréticos evaluados.

Capítulo VII: Comentarios y Conclusiones

Se dan a conocer las conclusiones finales del estudio, análisis globales de resultados obtenidos y se proponen nuevas extensiones de la línea de investigación.

Capítulo II. Identificación de Sistemas No-Lineales en Espacio-Frecuencia

II.1. Introducción

Desde finales de los años sesenta se han llevado a cabo varios estudios de tipo experimental sobre estructuras reales monitoreadas, con el principal interés de estimar sus propiedades de respuesta dinámica y compararlas con algún modelo teórico equivalente [1, 6-9]. Las propiedades dinámicas de interés se reducen comúnmente a: frecuencias fundamentales de vibración, amortiguamiento del sistema y formas modales; siendo éstas esenciales para el entendimiento de la respuesta dinámica del sistema sometido a excitaciones de fuente sísmica, impacto, de viento u otro tipo.

A pesar de que las estructuras en general desarrollan propiedades estructurales no lineales y variantes en el tiempo, la mayor parte de los estudios de identificación de parámetros dinámicos asumen una pseudo-linealización del sistema estructural. Los métodos de identificación llevados a cabo desde entonces se basan recurrentemente en análisis frecuenciales de la respuesta vibratoria del sistema (Funciones de Transferencia, Espectros de Respuesta en Frecuencia, Espectros de Potencia, entre otros) ante excitaciones de baja y mediana amplitud, para la obtención de las respectivas propiedades aparentes del sistema en estudio.

En este capítulo se ofrece una revisión de algunas investigaciones experimentales y analíticas que se han desarrollado en torno al monitoreo y la identificación de tipo frecuencial sobre sistemas dinámicos de comportamiento no-lineal. Se hace énfasis en las observaciones obtenidas en cada investigación, visualizando el escenario global de la identificación en base a estas técnicas, y en cómo confluyen sus resultados.

II.2. Experiencia a Escala Real

En una estructura real como sistema oscilante se tiene un gran número de fuentes de no linealidad que determinan su respuesta dinámica. Tales fuentes pueden ser de carácter menor como: imperfecciones geométricas, apertura y cierre de grietas, acomodo de elementos conectores, interacción de estructura con elementos no estructurales, y también, de carácter mayor como: deformaciones de segundo orden, incursiones inelásticas de elementos estructurales, impactos secuenciales, colapsos locales, interacciones suelo-estructura, entre otros. Estos aspectos son directamente atribuibles a las propiedades de rigidez del sistema, cuya naturaleza impacta a su vez en las propiedades dinámicas que definen la respuesta oscilatoria.

En el campo de niveles de excitación de baja amplitud, manteniendo acotadas las fuentes de no-linealidad en la estructura, se ha demostrado mediante análisis frecuenciales empíricos que la respuesta dinámica puede ser adecuadamente caracterizada por un comportamiento cuasi-lineal invariante en el tiempo. Estas propiedades definen la respuesta lineal inicial del sistema. La ventaja de asumir este comportamiento de tipo lineal radica en que la respuesta dinámica puede ser fácilmente caracterizada mediante funciones de transferencia de la respuesta en frecuencia, determinada a partir de mediciones experimentales.

Una vez que la estructura es sometida a excitaciones de mayor amplitud se induce en el sistema una respuesta de tipo no lineal, gobernada por propiedades de rigidez, que pasan a ser variables en el tiempo. En estos casos, el concepto de función de transferencia o análisis frecuencial no es aplicable, y su aplicación forzada sobre la respuesta (función de transferencia “empírica” o “aparente”) refleja varios efectos de dispersión en los resultados. Los aspectos comúnmente observados en la mayoría de los estudios son los que se señalan a continuación [1].

- Las frecuencias fundamentales identificadas presentan una tendencia a la reducción (o aumento del período fundamental) de manera proporcional a los niveles de amplitud de la excitación.
- Los peaks de máxima potencia, asociados a frecuencias naturales del sistema, se ensanchan y se vuelven menos definidos.
- La indefinición en la forma de los peaks de frecuencia deriva en una poca confiable estimación de las razones de amortiguamiento crítico del sistema.
- En rangos de alta frecuencia, en ciertos casos los peaks se dividen en dos o tres distintos.

Estas observaciones han sido consistentes con variados estudios experimentales, desde los años setenta hasta la actualidad [4, 6, 7, 8]. Sin embargo, a pesar de que para sistemas no lineales el concepto de función de transferencia no es teóricamente aplicable, se han seguido desarrollado estudios y conclusiones usando esta metodología, correlacionando la perturbación de los resultados a niveles de degradación en la rigidez global del sistema y generando incluso indicadores del nivel de desempeño estructural [11, 12, 13, 18, 19, 23, 24].

[Wood \(1972\) \[9\]](#) presenta en su estudio una aplicación del análisis frecuencial experimental sobre una estructura sometida a excitaciones de alta amplitud. El autor estima las frecuencias naturales de un edificio durante el sismo de San Francisco (1971), a partir de la estimación de una función de transferencia empírica calculada como la razón entre el espectro de amplitud de Fourier de la respuesta en el techo del edificio versus el espectro de amplitud de Fourier del registro sísmico en la base.

El análisis realizado por [Wood \(1972\) \[9\]](#) considera una suavización de los espectros de amplitud de frecuencia antes de realizar la división salida-entrada (Figura II.1). La suavización aplicada es la recomendada por Trifunac y Udwadia para la minimización de los efectos de “leakage” en los resultados. Igualmente se define un límite horizontal mínimo en el espectro de frecuencia, que otorga la representatividad del sistema. Este límite está definido por el 90% de nivel de confianza.

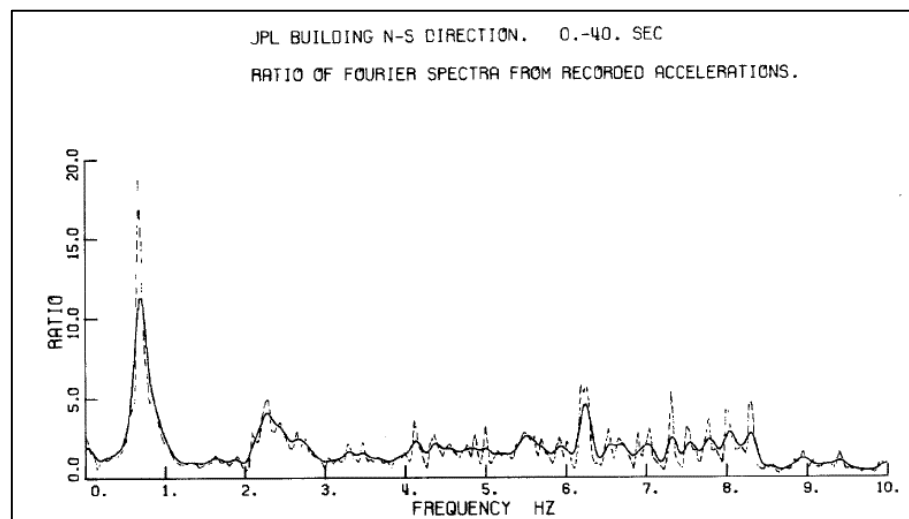


Figura II.1. Función de transferencia empírica (roof/basement) de la respuesta sísmica del edificio de acero de 9 pisos “JPL Building” para los 40 seg. iniciales del sismo. John H. Wood (1972).

Comparaciones entre los períodos fundamentales obtenidos por ensayos de vibraciones ambientales realizados posteriores al sismo, y los máximos períodos fundamentales obtenidos durante el sismo, indican un aumento del orden de un 30% para el primer modo de vibrar (Figura II.2). El autor observa que este aumento en el período fundamental se desarrolla de manera proporcional al aumento en las amplitudes del movimiento sísmico; y este efecto es asociado de manera directa con una degradación de la rigidez global de la estructura, a pesar de que ningún tipo de daño estructural fue observado a simple vista posterior al sismo.

Mode	0 - 40 sec periods	40 - 98 sec periods	Ambient test periods after earthquake
1 N-S	1.44	1.46	1.11
2 N-S	0.44	0.39	0.35
3 N-S	0.24	0.22	0.16
1 E-W	1.29	1.11	1.05
2 E-W	0.42	0.38	0.33

Figura II.2. Comparación de períodos fundamentales aparentes medidos en base a eventos sísmicos y vibraciones ambientales. Edificio de acero de 9 pisos “JPL Building”. John H. Wood (1972).

[Udwadia y Trifunac \(1974\) \[1\]](#), para el caso de sistemas no lineales proponen el uso del análisis frecuencial aplicado sobre ventanas móviles. De esta forma se obtiene una “función de transferencia aparente” que podría caracterizar la estructura en un corto intervalo de tiempo, cuando la no-linealidad es pequeña y tanto la amplitud como la frecuencia de la excitación son cuasi-constantes. Con este enfoque se evalúa un sistema lineal equivalente, despreciando las características de memoria del sistema. En este caso la función de transferencia empírica es obtenida a partir de la razón de espectros de frecuencia entrada-salida para intervalos acotados de tiempo.

Esta investigación realiza una identificación de los parámetros dinámicos de dos edificios, sobre los cuales se ha realizado un seguimiento mediante reiterativos ensayos (aproximadamente uno cada año), realizados en base a vibraciones forzadas, vibraciones ambientales y a partir de la respuesta registrada durante los sismos de Lytle Creek (1970) y San Fernando (1971) (Figura II.3). Una primera comparación entre la seguidilla de frecuencias fundamentales obtenidas a partir de los métodos de baja y mediana amplitud, refleja que tras un evento sísmico se estima una reducción del orden de un 10-20% en la frecuencia fundamental del primer modo de vibrar

de las estructuras. Este fenómeno es un claro indicio del impacto de un fuerte movimiento sísmico sobre el sistema, lo cual se traduce en degradación de la rigidez estructural.

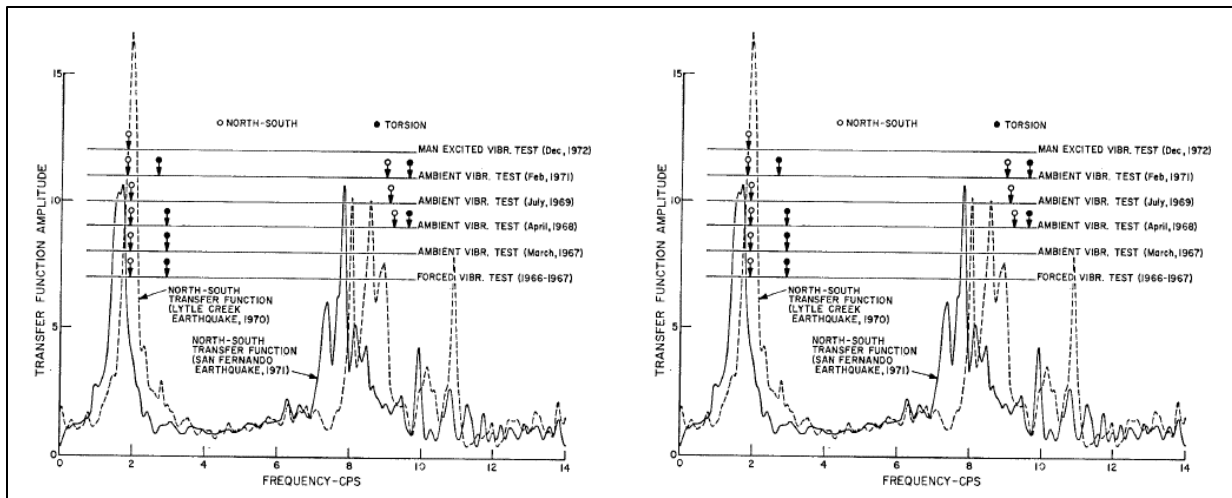


Figura II.3. Comparación de frecuencias fundamentales aparentes obtenidas en base a eventos sísmicos, vibración forzada y vibraciones ambientales, a partir de funciones de transferencia empíricas. Edificio “The Robert Millikan Library”, de 9 pisos en HA. Udwadia y Trifunac (1974).

A partir del análisis frecuencial por ventanas móviles, con longitudes de ventanas de 8 segundos y espaciadas 2 segundos, a lo largo de toda la duración del registro, el autor expone la “frecuencia aparente del sistema” y su fluctuación en el tiempo. A partir de este enfoque se logra apreciar de manera general en los resultados una frecuencia fundamental aparente inicialmente reducida con respecto a la frecuencia fundamental identificada previamente al sismo, la cual tiende a un aumento en magnitud, a medida que las amplitudes del movimiento sísmico se ven reducidas (Figura II.4). Si se correlaciona la reducción de la frecuencia fundamental aparente con una degradación de la rigidez global de la estructura, se estaría hablando de una recuperación parcial o total de dicha rigidez, al terminar el evento sísmico.

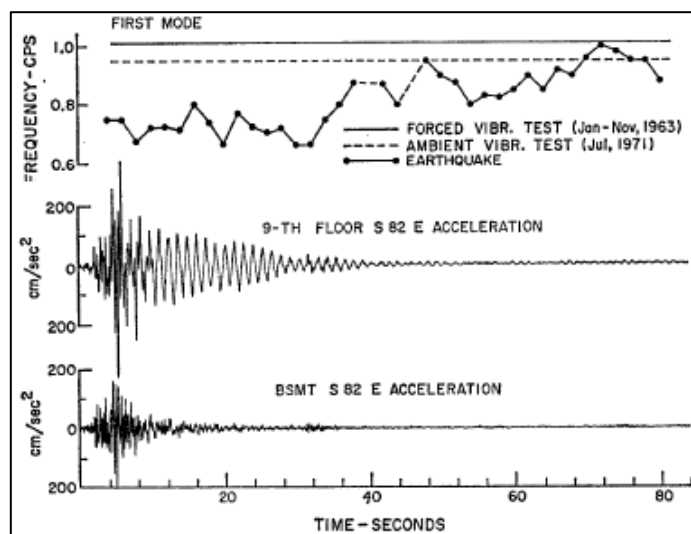


Figura II.4. Variación de la frecuencia aparente en el tiempo, medida de la respuesta sísmica estructural, y en comparación con frecuencias aparentes obtenidas en base a vibración forzada y vibraciones ambientales. Registro sísmico de San Fernando de 1971. Edificio “JPL Building”. Udwadia y Trifunac (1974).

Bajo el mismo enfoque, el análisis indica que para los casos de estudio las frecuencias fundamentales aparentes alcanzan reducciones de hasta un 50%, sin que el sistema estructural presente daño observable. Se observa igualmente que la recuperación de la rigidez estructural es instantánea para sismos de baja intensidad (Lytle Creek 1970), sin embargo, para sismos de mayor intensidad (San Fernando 1971), dicha recuperación no alcanzó a completarse.

Los autores igualmente sugieren que otra fuente de la no linealidad interpretada de los resultados puede deberse a la naturaleza inelástica de la interacción suelo-estructura, o bien, una combinación de esto último con las propiedades de rigidez de la estructura. La suavización de cualquier de estos dos sistemas pueden traducirse en reducciones de la frecuencia natural identificada a partir de los métodos frecuenciales.

Trifunac, Ivanovic y Todorovska (2001) [14, 15] estudian este problema de la variación de frecuencias fundamentales, analizando el problema desde el punto de vista suelo-estructura. Se determina la frecuencia aparente de un edificio HA monitoreado, a partir de registros de 12 eventos sísmicos distintos, de los cuales se registraron niveles de daño desde imperceptibles hasta irreparables. Se utilizan las metodologías de “Short Time Fourier Transform” ([Udwadia y Trifunac \(1974\)](#)) y “Zero Crossings”, obteniendo resultados consistentes (Figura II.5).

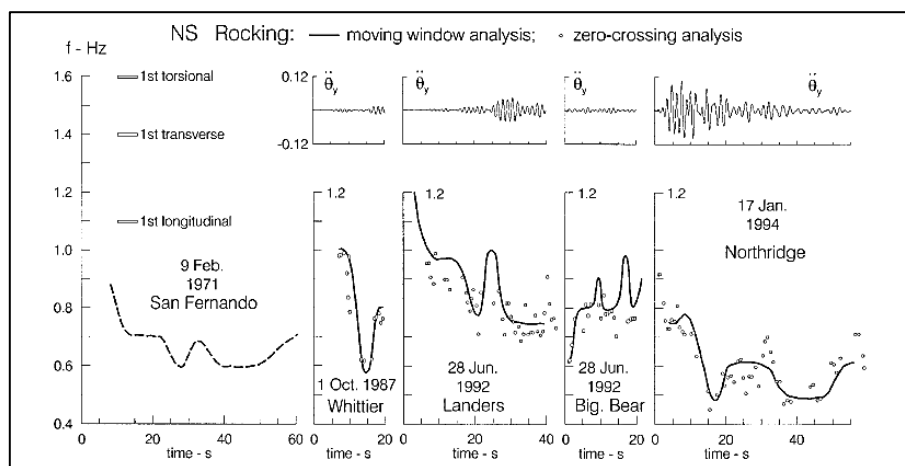


Figura II.5. Variación de la frecuencia aparente del sistema estructural en el tiempo calculada a partir de funciones de transferencia por ventanas móviles (Líneas sólidas) y Zero-Crossings (Círculos).

Para ambos métodos utilizados se logra estimar frecuencias aparentes dependientes del tiempo y de la amplitud del movimiento sísmico. La historia de frecuencia aparente cambia de un sismo a otro y nuevamente la tendencia general es a la reducción con el aumento en las amplitudes del movimiento sísmico.

En particular para este estudio se observaron grandes diferencias entre la identificación en base a movimientos sísmicos e identificaciones previas realizadas a partir de vibraciones ambientales (NS, $f = 1.4$ Hz). Motivo de estas grandes variaciones en la frecuencia aparente, los importantes niveles de daño sufrido por la estructura durante las mediciones, y los niveles de recuperación en la rigidez del sistema, los autores relacionan el fenómeno observado a un efecto combinado suelo-estructura, y principalmente asociado a la respuesta no lineal del suelo de fundación.

Para representar la naturaleza no lineal de sistemas en base a propiedades dinámicas aparentes se han abordado métodos cada vez más complejos y refinados. Este es el caso de la investigación de Dunand, Guéguen, Bard, Rodgers y Celebi (2006) [28] quienes realizan una comparación entre identificación en base a excitación de baja amplitud (vibraciones ambientales) y alta amplitud (eventos sísmicos), usando para este último caso métodos de ajuste polinomial para las funciones de transferencia empíricas obtenidas de la respuesta sísmica de la estructura (ARMA).

Para un edificio en particular (Alhambra LA County Services building Station 0482) se obtienen resultados de identificación para 16 eventos distintos. Se presentan gráficamente y de

manera cronológica las diferencias entre las frecuencias fundamentales aparentes del primer y segundo modo de vibrar para cada uno de los eventos (Figura II.6).

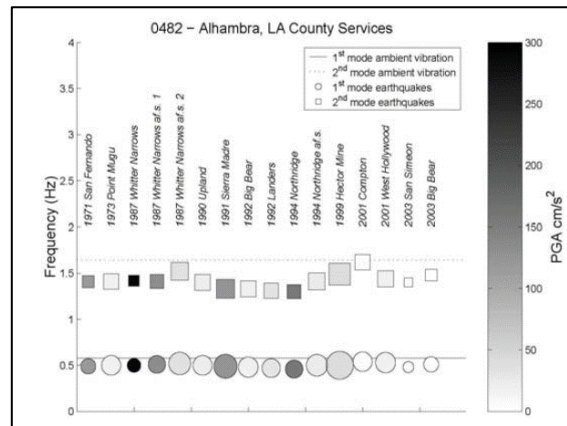


Figura II.6. Evolución de frecuencias fundamentales (Dir. 1: Círculos, Dir. 2: Cuadrados) en función de la secuencia sísmica. Edificio "Alhambra". Dunand, Guéguen, Bard, Rodgers y Celebi (2006).

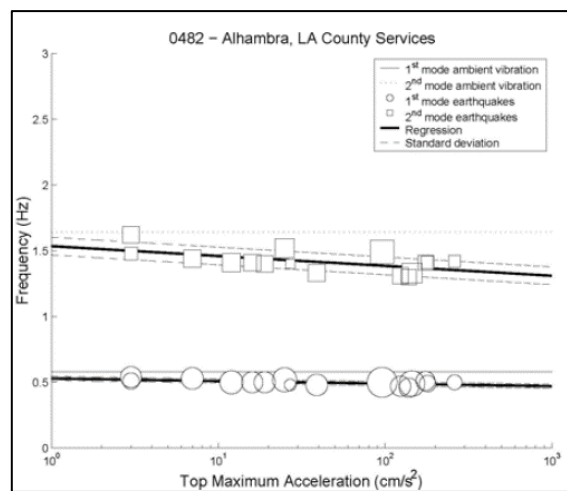


Figura II.7. Frecuencias fundamentales (Dir. 1: Círculos, Dir. 2: Cuadrados) identificadas a partir de registros sísmicos (ordenados según PGA), en comparación con identificación en base a vibraciones ambientales. Edificio "Alhambra". Dunand, Guéguen, Bard, Rodgers y Celebi (2006).

La identificación en base a movimientos sísmicos no presenta una correlación entre la disminución de frecuencia aparente y la vida útil de la estructura. Con esto, los autores concuerdan en que la estructura presenta un nivel de degradación constante a lo largo del período de tiempo analizado. Sin embargo, si se comparan las frecuencias aparentes identificadas versus aceleración máximas en la respuesta (Figura II.7), claramente se tiene la tendencia de disminución lineal de la frecuencia aparente con el aumento de la demanda de aceleraciones. En todos los casos, la frecuencia aparente identificada en base a vibraciones ambientales resulta ser de mayor magnitud.

II.3. Experiencia en Laboratorio

En el campo del monitoreo de edificios y estructuras reales, el fenómeno identificado de la variación del período fundamental aparente de estructuras durante excitaciones fuertes se encuentra relacionado con la naturaleza de la respuesta del sistema, en donde el sistema en su conjunto lo conforma la estructura, el suelo de fundación y su respectiva interacción. En el campo de la experimentación en laboratorio se ha analizado este mismo fenómeno aislando la respuesta asociada al sistema estructural, y las observaciones hechas por los autores confirman las tendencias generales.

Zembaty, Kowalski y Posposil (2006) [4] en su estudio ensaya en mesa sísmica una estructura de hormigón armado sometida por etapas a movimientos sísmicos en intensidades progresivas, induciendo igualmente daños progresivos en la estructura. Se lleva a cabo una identificación de propiedades dinámicas entre cada etapa de carga, finalizada con un cierto nivel de daño inducido en el sistema. Con sus resultados se observó la disminución gradual en la frecuencia fundamental aparente de la estructura desde el estado inicial sin daños y entre cada evento sísmico ingresado al sistema (Figura II.8).

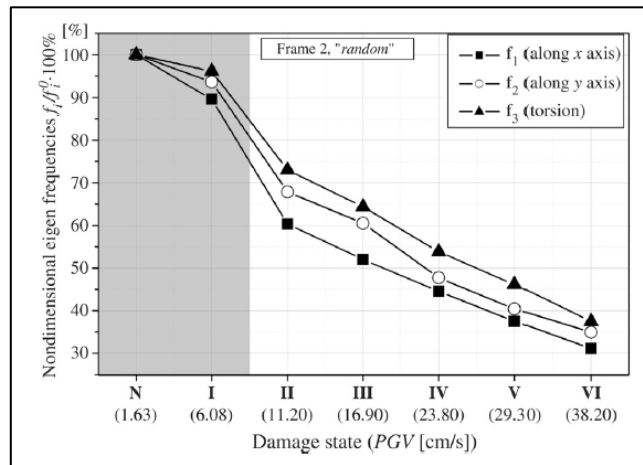


Figura II.8. Frecuencia fundamental aparente de estructura espécimen de laboratorio, identificada a partir de vibraciones ambientales, entre estados de daños progresivos inducidos. Zembaty, Kowalski y Posposil (2006).

En cada etapa del ensayo la estructura fue examinada en búsqueda de daños y fue identificada la frecuencia fundamental aparente usando métodos basados excitaciones de baja amplitud. Con este análisis se observó en la estructura ensayada que la caída en la frecuencia fundamental puede alcanzar una reducción de un 20% sin presentar daños evidentes, mientras

que al final de la secuencia la reducción de la misma alcanzó un 70%, con la presencia de importantes daños estructurales.

En este estudio igualmente fue desarrollada una estimación de la frecuencia fundamental aparente en base a la historia de respuesta durante la excitación sísmica. Esta identificación se realizó en base a un ajuste por mínimos cuadrados de la respuesta de un sistema de propiedades lineales definido por los parámetros de frecuencia, amortiguamiento y factores de participación modal. En este enfoque de identificación los autores observan que las frecuencias aparentes resultan siempre del orden de un 5%-15% inferior a las identificadas por vibraciones aleatorias en fase inmediatamente anterior al evento sísmico. Según se documentó, igualmente con este método se imposibilita la identificación del resto de modos de vibrar a medida que aumentan los niveles de daños en el sistema. El autor asocia este problema al hecho de no considerar la fuerte no-linealidad presente en los estados de avanzado daño en la estructura.

Otros autores (Hashemi y Mosalam (2005) [35], Pinho (2000) [A-31-11]) han reproducido estos resultados observando de manera consistente la disminución de las frecuencias fundamentales aparentes en proporción con el aumento del daño presente en el sistema.

II.4. Representación Analítica del Fenómeno

El análisis de la variación de frecuencias fundamentales aparentes observado en el campo experimental, se le ha acompañado recientemente de investigaciones analíticas que simulan el fenómeno observado para un mejor entendimiento [2, 3, 19, [36](#)].

Lin, Naumoski, Foo y Saatcioglu (2008) [3] llevan a cabo un estudio analítico sobre la correlación entre el período fundamental aparente identificado por la respuesta estructural y la intensidad de la excitación sísmica aplicada. Aquí se estudian analíticamente 3 estructuras planas (2D) de hormigón armado diseñadas en base a códigos de diseño sísmico canadiense, modeladas en su comportamiento no lineal en RUAUMOKO, considerando un set de 40 registros sísmicos de la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research). Para cada estructura analizada fue procesado el set de registros sísmicos en 5 niveles de intensidad progresiva, relacionados con niveles de demanda de ductilidad global de 1 a 5 respectivamente. En base a la respuesta de las estructuras en su nivel superior, fue identificado el período fundamental aparente del sistema durante la aplicación del registro sísmico.

En este estudio los autores dan cuenta de la complejidad en la identificación en base a espectros de Fourier de la respuesta completa de la estructura, principalmente debido a la presencia de múltiples períodos aparentes predominantes. Frente a esto los autores se centran en el análisis del período aparente identificado a partir de la vibración libre del sistema, observada al finalizar el movimiento sísmico de excitación. Con este enfoque, consistente a los resultados experimentales, se observó un aumento del período aparente proporcional el aumento en la intensidad de la excitación sísmica (Figura II.9).

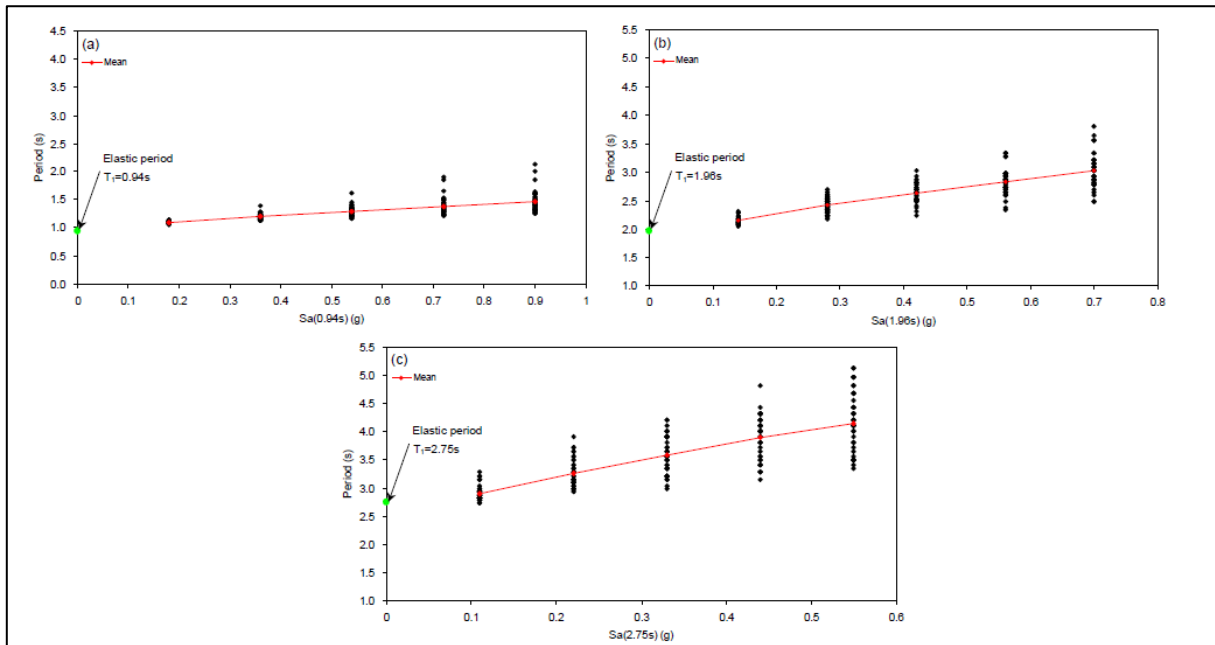


Figura II.9. Períodos fundamentales aparentes identificados post-excitación sísmica.

(a) Estructura de marcos y 4 pisos, (b) Estructura de marcos y 10 pisos y (c) Estructura de marcos y 16 pisos.

Lin, Naumoski, Foo y Saatcioglu (2008).

El aumento en el período aparente promedio (de 40 registros sísmicos) presentó un aumento lineal con respecto a la intensidad de los registros sísmicos, que a su vez puede ser directamente relacionado a un cierto nivel de demanda de ductilidad global. Para una demanda de ductilidad de 5.0 el periodo fundamental aparente alcanza un aumento de un 55% con respecto al identificado en estado inicial (cuasi-lineal-elástico).

Massumi y Moshtagh (2009 y 2013) [19], en su investigación van más allá, y analíticamente buscan correlacionar las variaciones del periodo aparente identificadas, a un nivel de daño alcanzado por el sistema. En este artículo los autores proponen un índice de daño, aplicado a edificios de hormigón armado de marcos y basado en mediciones de campo de frecuencias fundamentales aparentes, con la idea de controlar límites de desempeño estructural tal

como se realiza con el control de ductilidad, deformaciones relativas de entrepiso, rotaciones, etc. Para esto, se analizan modelos estructurales de comportamiento no-lineal, sometidos a un amplio set de registros sísmicos, correlacionando los niveles de daño alcanzados con las frecuencias aparentes identificadas.

II.5. Predicción del Periodo Inelástico Aparente (Katsanos y Sextos 2015)

Uno de los estudios de enfoque analítico que más se destaca y se analiza en detalle en la presente investigación es la de Katsanos & Sextos (2015) [1], quienes proponen una metodología para predecir la variación de la frecuencia fundamental aparente de un sistema estructural, en función de parámetros de base que definen la respuesta del sistema y/o características de la demanda sísmica. En términos generales, los autores establecen modelos histeréticos degradantes como representativos de la respuesta de un sistema estructural, se evalúa la respuesta del sistema para una extensa base de datos de registros sísmicos clasificados, y en base a un método de identificación específico se estiman las variaciones máximas del período fundamental aparente.

Los modelos histeréticos en sí están definidos por tantos parámetros como la complejidad de la ley constitutiva utilizada lo exige. Particularmente se usan modelos poligonales con dos niveles específicos de degradación (degradación leve y severa) y para múltiples niveles de incursión inelástica. Esto último se logra normalizando la respuesta inelástica con respecto a la máxima respuesta lineal elástica (de fuerzas) del sistema mediante el uso de factores de reducción de la respuesta, “R”.

A continuación, se describe de manera general el procedimiento realizado por este estudio, y en reconocimiento al gran aporte de este enfoque, le procederá posteriormente replicar el análisis, analizando el procedimiento y sus resultados para eventualmente proponer mejoras. Las bases de este estudio se establecen en la publicación de Katsanos, Sextos y Elnashai (2014) [18], utilizando el término de “elongación del periodo fundamental” de estructuras, orientando todos los análisis a sistemas estructurales de hormigón armado.

a) Base de Datos de Registros Sísmicos

Se selecciona de la base de datos del PEER-NGA un set de 300 registros sísmicos, de 43 eventos sísmicos distintos, registrados en diversas áreas del mundo. El criterio de selección de registros se realizó segregando por magnitud, mecanismo de ruptura, amplitud (PGA) y tipo de suelo (clasificación según Vs30).

Fueron usados sismos de campo lejano y cercano con el objetivo de abarcar demandas sísmicas con un amplio rango de contenido de frecuencias. En este último aspecto, se clasifican cuantitativamente los registros sísmicos a partir de un parámetro denominado “período promedio” o “ T_m ”, con el cual se clasifican rangos de contenidos de frecuencias altas, medias y bajas en la demanda.

b) Modelos Simplificados de Respuesta (SDOF)

Sistemas estructurales de múltiples grados de libertad (MDOF) diseñados para media y alta demanda sísmica son evaluados en su respuesta dinámica no lineal y representados por sistemas de un grado de libertad (SDOF) equivalentes con un comportamiento histerético no lineal y de características degradantes. Este proceso de transformación fue realizado mediante el método denominado “N2” y la respuesta de los modelos simplificados fueron determinadas mediante el uso de IDARC-2D.

Según describe el artículo, el proceso de transmisión MDOF-SDOF apunta a representar el sistema completo por medio de un sistema simplificado, ajustado a una ley constitutiva bilineal, definido por una rigidez inicial pseudo-lineal-elástica, un punto de fluencia (d_y, F_y) y una rigidez post-fluencia que se extiende hasta el punto de máxima capacidad. El comportamiento pseudo-lineal-elástico del sistema no necesariamente es consistente con un comportamiento puramente elástico de los elementos estructurales del sistema estructural completo. En otros términos, la rigidez inicial del sistema simplificado (SDOF) es a su vez una rigidez efectiva del sistema completo en su respuesta inicial, previa a un fuerte nivel de plastificación. Es por esto que los períodos de vibración de los sistemas simplificados (SDOF) tienen a ser mayores a los períodos fundamentales del sistema completo (MDOF).

Por otro lado, fue calibrada la equivalencia entre los sistemas SDOF y MSOF en términos de degradación y pinching. Ambos sistemas poseen distintos mecanismos de degradación y por lo tanto el análisis frecuencial de sus respuestas eventualmente derivaría en distintas estimaciones del período inelástico aparente. Por este efecto los autores realizan una validación del modelo simplificado comparando estimaciones del período inelástico aparente de la respuesta del SDOF y el MDOF, para una serie de registros (15 en total) y escalados a distintos niveles de amplitud. Con el ajuste de resultados de este análisis se calibraron los parámetros que definen los niveles de degradación y pinching en el modelo simplificado. En general, por esta equivalencia en la no-

linealidad del sistema simplificado y completo, se habla de una estimación de un período inelástico aparente “promedio” o “predominante”.

c) Ley Constitutiva de Modelos Simplificados

El modelo no lineal histerético degradante implementado por IDARC-2D de tipo multi-lineal, se define por cuatro parámetros de control que definen la degradación de rigidez (α), degradación de resistencia (β_1 y β_2) y efecto pinching (γ). Las propiedades de este modelo constitutivo y sus parámetros serán descritas en detalle en el capítulo siguiente.

En estos sistemas simplificados modelados en IDARC-2D, cinco valores discretos de “R” (2,3,4,5,6) fueron utilizados para considerar distintos niveles de incursión inelástica. Cuatro proporciones de rigidez post-fluencia fueron consideradas (0%, 1%, 3% y 10%). El ajuste de los niveles de degradación de interés es controlado mediante los parámetros α (4-15), β_1 (≥ 0.08), β_2 (≤ 0.60) y γ (0.05-0.40).

En base a una calibración de los parámetros de control anteriormente detallados, los autores enfocan su análisis a dos niveles de degradación. Un nivel de degradación leve y un nivel de degradación severa. En el estudio en cuestión, la estimación de las curvas para la predicción del período aparente se limita únicamente a estos dos niveles de degradación.

d) Identificación del Periodo Aparente

En el estudio en cuestión, se indica que la estimación del período fundamental aparente se realiza por medio de un análisis frecuencial, identificando las frecuencias de mayores amplitudes en el espectro de Fourier de la respuesta del sistema en aceleraciones relativas con respecto a la base. Según se indica, el período inelástico del sistema es definido como la máxima elongación del período aparente alcanzado durante la duración completa del registro sísmico ($T_{in} = \max(T_{in}(t))$).

e) Espectros Inelásticos en términos de Elongación del Periodo

En la publicación se describe en detalle la metodología utilizada para obtener curvas para la predicción del corrimiento o elongación del período fundamental aparente de la estructura. Estas curvas son denominadas como “period shift ratio”, equivalentes a la razón entre el período inelástico aparente sobre el periodo elástico del sistema (T_{in}/T_{el}) (Figuras II.10 y II.11).

La metodología para la obtención de estas curvas consiste en analizar variados modelos no lineales simplificados (SDOF) de período elástico inicial entre 0.1 y 2.5 sec, que son sometidos al set de registros sísmicos seleccionados, con la finalidad de identificar su respectivo período inelástico aparente. De manera general, en todo sistema simplificado (SDOF) fue considerado un amortiguamiento viscoso equivalente a una razón de amortiguamiento crítico de un 1%.

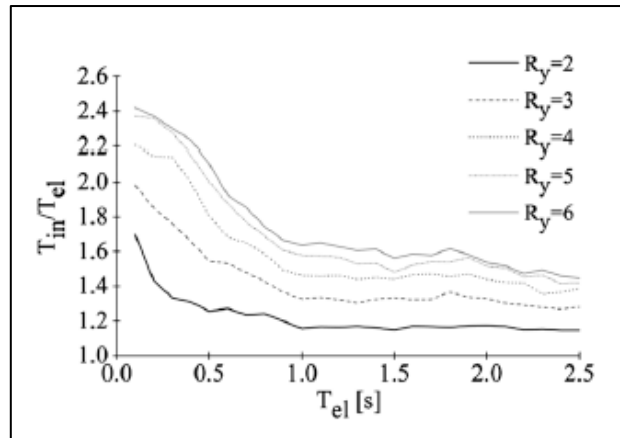


Figura II.10. Espectros de elongación del periodo aparente en función del factor de reducción de la respuesta elástica “ R_y ”. Modelo de degradación leve, y rigidez post-fluencia $\alpha_y = 3\%$. Katsanos & Sextos (2015).

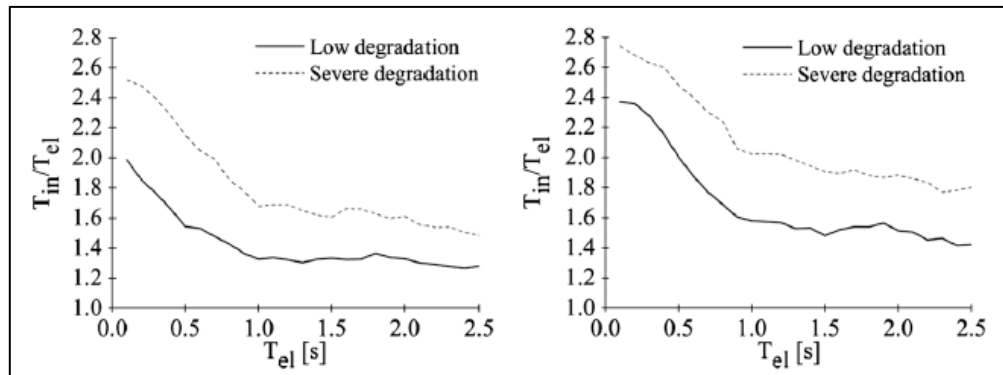


Figura II.11. Espectros de elongación del periodo aparente para un (a) $R_y = 3$ y (b) $R_y = 5$. Modelo de degradación leve y severa, y rigidez post-fluencia $\alpha_y = 3\%$. Katsanos & Sextos (2015).

Capítulo III. Caracterización de un Sistema Dinámico Histerético

III.1. Introducción

Desde el punto de vista del análisis y diseño sísmico convencional, el periodo fundamental de un sistema estructural se ha adoptado como la principal propiedad para la caracterización de su comportamiento dinámico ante excitaciones oscilatorias externas. Esto se ha convenido así debido al uso de metodologías simplificadas de análisis que se basan en el estudio de sistemas lineales y de amortiguamiento de tipo proporcional.

Haciendo la analogía con un oscilador lineal de un grado de libertad y de baja razón de amortiguamiento crítico, el periodo fundamental de vibración relaciona la masa y la rigidez del sistema según la siguiente expresión.

$$T_n = 2\pi\sqrt{m/k}$$

Llevado este aspecto al plano de sistemas estructurales reales, la respuesta dinámica ante una excitación oscilatoria se torna compleja y en función del comportamiento real de materiales, eventuales plastificaciones de componentes estructurales y magnitud de la excitación (vibraciones ambientales, vibraciones forzadas, movimientos sísmicos). Finalmente, las propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento del sistema, que fueron asumidas inicialmente lineales y constantes en la fase de diseño, en realidad desarrollan un comportamiento variante en el tiempo, de tipo no lineal y normalmente con características degradantes.

El enfoque estándar del diseño sísmico basado en fuerzas presente en el común de los códigos de diseño (fuerzas equivalentes por piso, análisis modal espectral) considera el comportamiento lineal-elástico inicial de la estructura para definir sus propiedades dinámicas, y por otro lado, la magnitud de la demanda sísmica elástica es reducida en proporción de la capacidad de ductilidad proporcionada a la estructura a través del diseño y detallamiento de los componentes estructurales. Esta filosofía de diseño supone que, a través de un factor de modificación de respuesta, “R”, asociado a un nivel de ductilidad objetivo, “μ”, es posible relacionar la demanda del sistema no-lineal con la respuesta de un sistema con las propiedades iniciales de rigidez y amortiguamiento, ambas de características lineales.

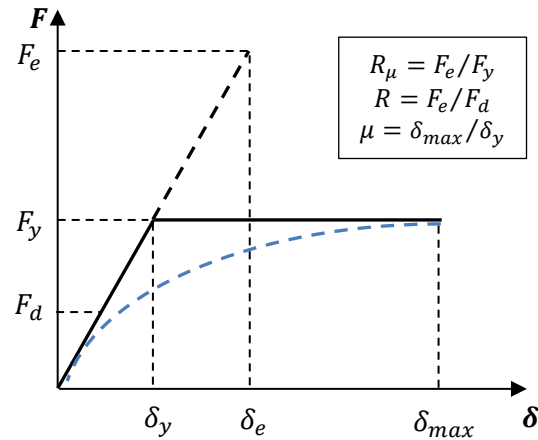


Figura III.1. Esquema general de diseño sísmico en base a fuerzas elásticas reducidas

El propósito de este tipo de análisis apunta a la simplificación del diseño sísmico mediante el uso de sistemas lineales en lugar de sistemas de mayor complejidad que involucren leyes constitutivas de materiales, caracterización no lineal de componentes estructurales, etc.

En el caso del análisis de respuesta en el tiempo, se han desarrollado otros enfoques igualmente aceptados por códigos de diseño para la caracterización y equivalencia lineal de sistemas no lineales, siempre en favor de la simplificación del problema y estimación de su respuesta para diseños preliminares. Dependiendo del criterio de equivalencia, se han propuesto varias metodologías de linealización de sistemas no lineales.

Varios estudios adoptan el uso de las propiedades secantes y amortiguamiento equivalente de sistemas dinámicos para su representación lineal de respuesta, asociada a la demanda máxima de deformaciones. En base a excitaciones sinusoidales aplicadas sobre sistemas bilineales, Rosenblueth y Herrera (1964) fueron los primeros en proponer una representación lineal a través de la rigidez secante del sistema, asociada a su máxima respuesta en deformación relativa, e incorporando un factor de amortiguamiento viscoso adicional en representación del amortiguamiento histerético del sistema no lineal.

Numerosos estudios se han desarrollado en base al enfoque de las propiedades secantes de un sistema no lineal, y ajustando esta metodología se ha extendido su alcance a sistemas de mayor complejidad (multi-lineales y con degradación) y abarcando casos de excitaciones de naturaleza sísmica [Gulkan & Sozen 1974, JPWRI 1992, Kowalsky 1995, Blandon & Priestley 2005, Jara & Casas 2006, Dicleli & Buddaram 2007, Jara et al. 2012].

En general, para el caso de excitaciones sísmicas resulta poco apropiado el uso de las propiedades secantes basadas en la respuesta máxima del sistema, siendo que, en la mayor parte de la duración del movimiento sísmico, el sistema desarrolla su respuesta en rangos de magnitud mucho más acotada, y por ende la metodología tiende a subestimar la rigidez secante del sistema, y sobreestimar su amortiguamiento viscoso equivalente.

Esta complicación ha llevado a desarrollar otro enfoque de linealización equivalente, orientado al ajuste de la respuesta en deformaciones o aceleraciones relativas del sistema no lineal versus el sistema lineal equivalente, así como también al ajuste de respuesta espectral en espacio tiempo (espectros de respuesta en aceleración y desplazamiento) y espacio frecuencia (funciones de transferencia, espectro de frecuencias de la respuesta, densidad espectral de potencia, entre otros). Los niveles de efectividad entre estas metodologías han sido ampliamente comparados [34]. De estas técnicas mencionadas se desglosan variadas técnicas de identificación de sistemas, que basan su efectividad en base a estudios analíticos y/o experimentales.

En el contexto anteriormente expuesto surge la necesidad de definir cuatro aspectos con los que es posible caracterizar un sistema no lineal en base a su respuesta. Estos aspectos, si bien representan el mismo fenómeno, describen enfoques distintos que podrían confundirse entre sí. Estos aspectos, propios de sistemas no lineales, son los siguientes.

- Propiedades secantes.
- Linealización equivalente.
- Período aparente.
- Elongación del período aparente.

III.2. Propiedades Secantes de un Sistema No Lineal

Las propiedades secantes de un sistema de respuesta no lineal es un concepto comúnmente utilizado en el diseño y análisis estructural, para la representación lineal de sistemas que no lo son. En términos de propiedades secantes, un sistema no lineal histerético puede ser definido en un ciclo “i” (Figura III.2) por una rigidez lineal dada por la razón entre la fuerza restitutiva desarrollada para la máxima deformación del sistema “ $f(x_i)$ ”, y la magnitud de dicha deformación máxima, “ x_i ” (Rosenblueth y Herrera 1964).

$$K_{sec} = \frac{f(x_{i,max})}{x_{i,max}}$$

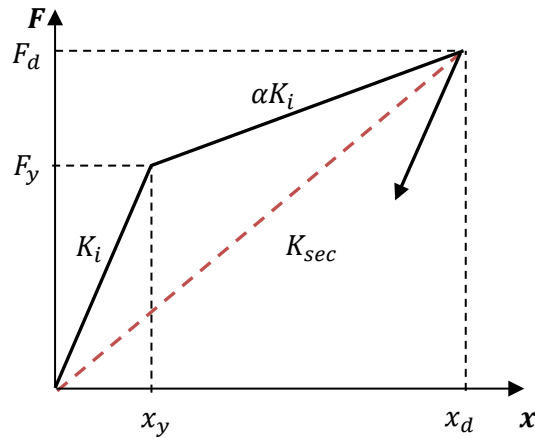


Figura III.2. Definición de rigidez secante o efectiva.

Adicionalmente, la energía disipada por el sistema histerético queda representada por un incremento del amortiguamiento viscoso. Así, el amortiguamiento efectivo total del sistema lineal queda determinado por la suma del amortiguamiento viscoso intrínseco del sistema, “ ζ_0 ”, y el amortiguamiento viscoso adicional asociado a la energía disipada en un ciclo histerético del sistema (Figura III.3). Esta aproximación es frecuentemente utilizada para la representación de sistemas de respuesta bilineal histerética, tal como dispositivos de aislación sísmica.

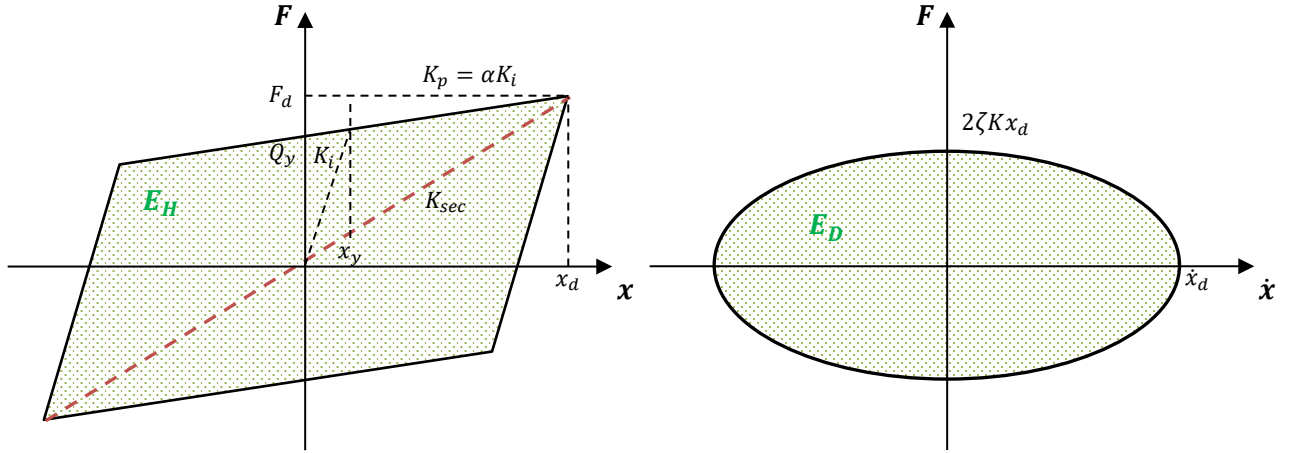


Figura III.3. Definición de amortiguamiento efectivo.

$$E_H = 4Q_y(x_d - x_y) = 4x_y(K_i - K_p)(x_d - x_y)$$

$$E_D = \pi x_d(2\zeta K_{sec} x_d) = 2\pi\zeta K_{sec} x_d^2$$

$$E_D = E_H \rightarrow \zeta_{eff} = \frac{E_H}{2\pi K_{sec} x_d^2}$$

$$\zeta_{total} = \zeta_0 + \zeta_{eff} = \zeta_0 + \frac{E_H}{2\pi K_{sec} x_d^2}$$

Esta caracterización lineal del sistema da paso a la definición de una respectiva frecuencia (o periodo) fundamental secante, en ocasiones igualmente denominado como “efectivo”, que para el caso de un sistema de un grado de libertad y de masa unitaria, está dado por la siguiente expresión.

$$\omega_{sec} = \sqrt{K_{sec}}; \quad T_{sec} = 2\pi/\omega_{sec}$$

Dado que la rigidez secante presenta una magnitud inferior a la rigidez inicial elástica del sistema, y en proporción con el nivel de incursión inelástica desarrollado, se deriva un periodo secante de vibración mayor, lo cual engloba la presunción de una flexibilización del sistema producto del efecto no-lineal.

Cabe señalar que este enfoque propuesto por Rosenblueth y Herrera (1964), basado originalmente en la respuesta de excitaciones armónicas, de amplitud constante, y sistemas bilineales sin degradación, se centra particularmente en capturar la respuesta máxima del sistema, pasando por alto su historia de respuesta durante la duración total de la excitación.

Varios estudios analíticos y empíricos han desarrollado y ajustado este enfoque, el cual ha sido ampliamente aplicado por el diseño basado en desplazamientos (Gulkan & Sozen 1974, Iwan 1979, Kowalsky 1995, Priestley 2003, Kwan 2003, Blandon & Priestley 2005, Dwaiti et al 2007).

III.3. Periodo Aparente del Sistema

El periodo fundamental de vibración es una propiedad dinámica propia de sistemas lineales y de propiedades invariantes en el tiempo. La designación “aparente” del período fundamental de un sistema no lineal se introduce de las técnicas de identificación de sistemas que analizan la respuesta, forzando indirectamente su ajuste a modelos lineales de respuesta. El ejemplo más directo es el uso de espectros de respuesta en frecuencia y funciones de transferencia empíricas, aplicadas a la respuesta de estructuras reales ante movimientos sísmicos. Este enfoque, teóricamente aceptado para sistemas lineales, permite que la respuesta dinámica estacionaria de un sistema sometido a una excitación externa sea pensada como el resultado de un proceso que opera sobre la misma variable de entrada [1].

Se puede demostrar fácilmente que la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad, de frecuencia natural “ ω_0 ” y razón de amortiguamiento crítico “ ζ ”, cuando es sometido a una excitación harmónica de frecuencia “ Ω ”, su función de respuesta en frecuencia “ $H(\omega)$ ” es de la siguiente forma.

$$H(\omega) = \frac{1}{-\Omega^2 + i2\zeta\omega_0\Omega + \omega_0^2}$$

Esta función de respuesta, cuya interpretación es tridimensional (frecuencia, amplitud y fase), relaciona directamente la historia de excitación externa “ $Y(t)$ ” con la historia de respuesta del sistema “ $X(t)$ ”, cuya representación en espacio de la frecuencia se denominan respectivamente como “ $Y(\omega)$ ” y “ $X(\omega)$ ”.

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$

Esta formulación puede ser aprovechada de manera inversa para estimar la función de respuesta en frecuencia a partir de historias de tiempo de excitación y respuesta obtenidas experimentalmente, sin un conocimiento detallado del sistema. Luego, las características de esta función de respuesta en frecuencia “ $H(\omega)$ ” dan señales de las propiedades dinámicas del sistema

(ω_0, ζ) . Este enfoque sería aplicable siempre y cuando sea comprobable que el sistema responde de manera cuasi-lineal. Sin embargo, visto desde el enfoque experimental, su implementación incluso puede ser forzada en sistemas no lineales. Es en este punto en que se comienza a hablar de propiedades “aparentes” del sistema, observando los resultados de la identificación y sus respectivas perturbaciones.

Como se ha visto en varios estudios experimentales [1, 6-9], sistemas altamente no-lineales sometidos a métodos de identificación, presentan una común perturbación de los resultados y una tendencia general al aumento de la magnitud del periodo fundamental identificado (periodo aparente, o indistintamente denominado “periodo inelástico”). Esta tendencia a la flexibilización del sistema, a veces permanente y otras transitoria, se ha visto comúnmente potenciada por el aumento en las amplitudes de la excitación, que a su vez inducen mayores niveles de no linealidad en el sistema. En estas investigaciones, consistentemente se concuerda en que las variaciones del período aparente se encuentran fundamentalmente relacionadas con los efectos de la degradación de las propiedades del sistema y sus niveles de incursión inelástica.

A pesar de que las variaciones del período fundamental aparente de un sistema están asociadas con la no linealidad de la respuesta, su magnitud no necesariamente conduce a las propiedades secantes del sistema, ni mucho menos a las propiedades de un sistema lineal que sea representativo en términos de ajuste de respuestas. Los resultados de metodologías tradicionales de identificación, aplicados a sistemas altamente no lineales, describen mayormente las propiedades iniciales más que las propiedades efectivas del sistema (Martínez, Boroschek y Bilbao 2015) [5].

III.4. Linealización Equivalente

Los métodos de linealización basados en las propiedades efectivas (o secantes) se encuentran referidos exclusivamente a las demandas máximas de desplazamientos o ductilidad en el sistema. Sin embargo, durante la mayor parte de la respuesta sísmica de un sistema, el nivel de demanda en desplazamiento o aceleraciones se encontrará por debajo de la respuesta máxima. En este sentido, variadas técnicas de identificación apuntan hacia una caracterización lineal de sistemas, asociada a la minimización del error entre la respuesta del sistema real (observada) y la respuesta del modelo lineal equivalente.

En definitiva, se entiende la linealización equivalente de un sistema como la búsqueda de un modelo lineal de parámetros tales que ajusten de manera óptima su respuesta a la respuesta del sistema real (Beck J. 1978, [31]). A diferencia del enfoque de las propiedades secantes que ponen énfasis en la respuesta extrema del sistema, la linealización equivalente busca la representatividad de un modelo simplificado para la respuesta completa del sistema. El problema de determinar modelos lineales equivalentes de sistemas estructurales a partir de su excitación (en este caso, movimientos sísmicos), es abordado utilizando conceptos teóricos de la identificación de sistemas.

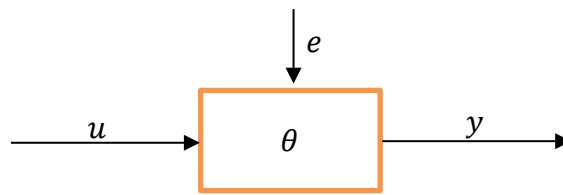


Figura III.4. Esquema de Entrada-Salida de un Sistema.

En la Figura III.4 se presenta la clásica representación esquemática del problema de la identificación de sistemas. Considerando el sistema como una caja negra, con la capacidad de transformación una señal de entrada “ u ”, en una señal de salida “ y ” afecta a la distorsión producto de una componente de error “ e ” en el modelo. Comúnmente las señales de entrada y salida del sistema son observables, y a pesar de no conocer a priori las propiedades del sistema, estas señales otorgan información suficiente como para construir modelos matemáticos que describan las propiedades de transformación del sistema.

Estos modelos de ajuste al sistema pueden ser desarrollados por técnicas como funciones de transferencia, modelos espacio-estado, modelos de series de tiempo, espectros de frecuencia, espectros de densidad de potencia, entre otros modelos paramétricos y no paramétricos.

En general, el problema de la identificación de sistemas se encuentra descrito por tres componentes: un set de datos entrada-salida observados, un modelo propuesto para su ajuste a las propiedades de transformación del sistema, y un criterio mediante el cual se evalúa el nivel de ajuste del modelo al sistema real.

Para el problema particular atinente a la presente investigación, el modelo de ajuste propuesto corresponde a un modelo lineal definido por propiedades de rigidez y amortiguamiento viscoso, del cual se espera una representación en base a un criterio de ajuste de respuesta en aceleraciones relativas. Finalmente, teniendo definido matemáticamente el modelo y el respectivo criterio de ajuste, el problema de identificación se reduce a un problema de optimización y minimización del error.

4.1. Análisis Bayesiano

Asumiendo conocidos los datos de entrada (excitación, $u(t)$) y salida (respuesta, $z(t)$) de un sistema dinámico, este puede entenderse como una caja negra de propiedades en principio desconocidas, pero de tipo determinista (sin la existencia de incertidumbres).



Figura III.5. Esquema de Entrada-Salida de un Sistema Determinista con Componente de Error.

La respuesta de este sistema es comúnmente modelada con una componente de error, el cual se asume de tipo Gaussiano, de media nula y una desviación estándar. Por lo tanto, la salida del sistema definida como la suma de la respuesta determinista del modelo, $f(\theta, u)$, y el error Gaussiano $e \sim N(0, \sigma_e^2)$, pasa a ser una variable de tipo probabilística igualmente Gaussiana, de media determinista y de desviación estándar igual a la del error.

$$y = f(\theta, u) + e$$

$$p(y|\theta, u) \sim N(f(\theta, u), \sigma_e^2)$$

$$p(y|\theta, u) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}} e^{(-\frac{1}{2\sigma_e^2}(y-f(\theta, u))^2)}$$

Contando con un conjunto de mediciones de entrada (\hat{U}) y de salida (\hat{Y}) de un sistema dado, evaluando cada una de las mediciones se puede construir una función de densidad de probabilidad (PDF) esperada para la variable de salida. En la medida que los parámetros del modelo (θ) asumidos se aproximen a los reales, la diferencia entre medición (y) y predicción determinista del modelo ($f(\theta, u)$) será mínima, mientras que la función de densidad de probabilidad será máxima para todas las mediciones.

Para encontrar los parámetros θ que definen el sistema dinámico se debe maximizar su PDF construido en base a las mediciones entrada-salida. Asumiendo un set de M mediciones no correlacionadas, la expresión a maximizar está dada por la siguiente expresión (conocida como función de verosimilitud o likelihood).

$$p(\hat{Y}|\theta, \hat{U}) = \prod_{i=1}^M p(\hat{y}_i|\theta, \hat{u}_i)$$

$$p(\hat{Y}|\theta, \hat{U}) = \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}}\right)^M e^{(-\frac{1}{2\sigma_e^2}\sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2)}$$

En este planteamiento del problema, para la identificación de sistemas se tiene principal interés en encontrar las propiedades del modelo (θ), en conocimiento de los datos de entrada y salida del mismo. Para esto se utiliza el teorema de Bayes, y su planteamiento queda definido por la siguiente expresión.

$$p(\theta|\hat{Y}, \hat{U}) = \frac{p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})p(\theta)}{\int p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})p(\theta)d\theta}$$

En esta formulación del teorema de Bayes, cada expresión tiene la siguiente denominación.

$p(\hat{Y} \theta, \hat{U})$:	“likelihood”
$p(\theta)$:	“prior”
$\int p(\hat{Y} \theta, \hat{U})p(\theta)d\theta$:	“evidence”
$p(\theta \hat{Y}, \hat{U})$:	“posterior”

El “prior” concierne al conocimiento previo que se tiene de las propiedades del sistema y que se define en base al criterio o experiencia. Este “prior” es actualizado en base al “likelihood”, para obtener el “posterior”. El “posterior” corresponde a la función de densidad de probabilidad de los parámetros inciertos del sistema que presentan el mejor ajuste a las mediciones realizadas. En este caso, la “evidence” corresponde únicamente a una constante de normalización de la función de densidad de probabilidad obtenida, por lo que su magnitud es de poca relevancia para el problema.

La identificación de los parámetros de interés corresponde a determinar el valor máximo del numerador de la expresión anterior, que por problemas numéricos conviene expresarlo en términos de logaritmo.

$$\theta^* = \operatorname{argmax}\{\log[p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})p(\theta)]\}$$

Trabajando esta ecuación se tiene:

$$\begin{aligned}\theta^* &= \operatorname{argmax}\{\log[p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})] + \log[p(\theta)]\} \\ \theta^* &= \operatorname{argmax}\left\{\log\left[\left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}}\right)^M e^{\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}\sum_{i=1}^M(\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2\right)}\right] + \log[p(\theta)]\right\} \\ \theta^* &= \operatorname{argmax}\left\{-\frac{M}{2} \cdot \log[\sigma_e^2 2\pi] - \frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2 + \log[p(\theta)]\right\}\end{aligned}$$

Definiendo el error cuadrático medio como:

$$J(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2$$

La ecuación queda como:

$$\theta^* = \operatorname{argmax}\left\{-\frac{M}{2} \cdot \log[\sigma_e^2 2\pi] - \frac{M}{2\sigma_e^2} J(\theta) + \log[p(\theta)]\right\}$$

Considerando el error de aproximación como estacionario se puede decir lo siguiente.

$$\frac{\partial\left(-\frac{M}{2} \cdot \log[\sigma_e^2 2\pi] - \frac{M}{2\sigma_e^2} J(\theta) + \log[p(\theta)]\right)}{\partial(\sigma_e^2)} = 0$$

Con lo anterior se demuestra fácilmente que $J(\theta) = \sigma_e^2$. Finalmente, la expresión queda como:

$$\theta^* = \operatorname{argmax} \left\{ -\frac{M}{2} \cdot \log[J(\theta)2\pi] - \frac{M}{2} + \log[p(\theta)] \right\}$$

Dado que la función sigue una distribución Gaussiana, se puede decir que la covarianza Σ del “posterior” $p(\theta|\hat{Y}, \hat{U})$ está dado por:

$$\Sigma = \{ \operatorname{Hess}[-\log(p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})p(\theta))] \}^{-1}$$

$$\Sigma = \left\{ \operatorname{Hess} \left[\frac{M}{2} \cdot \log[J(\theta)2\pi] + \frac{M}{2} - \log[p(\theta)] \right] \right\}^{-1}$$

Finalmente, la función “posterior” queda definido por una función de densidad de probabilidad Gaussiana de la siguiente forma.

$$p(\theta|\hat{Y}, \hat{U}) \rightarrow N(\theta^*, \Sigma)$$

Este esquema ha sido implementado en MATLAB para la obtención de los parámetros representativos de cada sistema no-lineal analizado, y en función de las señales de entrada y salida segmentadas por ventanas de tiempo. Esta aproximación asume que el “posterior” es Gaussiano, condición que no siempre es asegurada, sin embargo se ha demostrado que bajo un número significativo de mediciones la aproximación funciona de manera adecuada (Beck J. 2013) [37].

4.2. Implementación para la Identificación

Para el caso práctico implementado en la identificación de sistemas, las variables del modelo (θ) consisten en las propiedades de rigidez y amortiguamiento del modelo lineal de ajuste, y las condiciones iniciales del sistema en desplazamiento y velocidad. Para un sistema no-lineal, de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, el modelo lineal equivalente de un segmento de tiempo “i” acotado, se define por sus respectivas variables óptimas, específicas para ese segmento de tiempo.

$$\theta_i = [k_i, c_i, x_i, \dot{x}_i], \quad i = 1..N$$

Cabe señalar que, de las cuatro variables en cuestión, las dos primeras (rigidez y amortiguamiento viscoso del sistema lineal) cubren la identificación del sistema como tal, y los

dos restantes (condiciones iniciales en desplazamiento y velocidad del sistema) son variables de apoyo que definen las condiciones de borde del problema, y respaldan la correcta identificación.

Para la aplicación del método se debe definir la función “prior” ($p(\theta)$), correspondiente al conocimiento previo tentativo de las variables θ . En un caso práctico, se puede asumir que las propiedades de rigidez inicial elástica y amortiguamiento viscoso pueden ser estimadas a partir de métodos de identificación basados en vibraciones ambientales de baja amplitud. Este aspecto puede favorecer bastante la eficacia del método.

III.5. Elongación del Periodo Aparente del Sistema

Con el aumento del periodo aparente de un sistema con respecto a sus propiedades iniciales, en investigaciones y literatura se ha acuñado el término de “elongación del periodo” (“period elongation”) [2, 3, 10, 12, 18, 21, 36], asociado a un factor de amplificación del periodo del sistema, y definido como la razón entre el periodo aparente (inelástico) y el periodo inicial elástico. La magnitud de esta elongación, por consiguiente, da cuenta de un cierto nivel de degradación o incursión inelástica que ha alcanzado el sistema entre dos puntos de referencia.

Esta elongación del periodo aparente puede tener implicaciones directas en el diseño de estructuras. Las más obvias se pueden percibir de los espectros de diseño de aceleración y de desplazamiento.

- Un espectro de diseño de aceleraciones normalmente describe mayores aceleraciones para periodos bajos, con una fuerte reducción para periodos altos. En este caso, un diseño basado en un periodo menor al efectivo implicará finalmente mayores niveles de sobre-resistencia de la estructura.
- Por otro lado, en un espectro de desplazamientos se tiene mayores demandas de desplazamientos para periodos altos. En este caso, un diseño basado en un periodo menor sub-estimaría los niveles de demanda de desplazamiento sobre el sistema.

Dado que existe una relación directa entre el aumento del período aparente y el aumento en niveles de incursión inelástica en el sistema, la magnitud de la elongación del periodo puede ser útil además como un indicador de la demanda inelástica ingresada al sistema e incluso como un indicador de niveles de daños inducidos. Este es el caso de Massumi y Moshtagh (2013) [19] que en su investigación proponen un índice de daño estructural basado en la elongación del periodo

aparente. Este indicador se basa en una correlación entre el indicador de daño de Park-Ang (1985) y la identificación de periodos aparentes, a partir de progresivos niveles de daño en modelos estructurales. En general, la metodología consiste en comparar los niveles del elongación del periodo con una magnitud límite, y establecer si la estructura dañada califica como reparable o no.

Capítulo IV. Espectros de Elongación del Periodo Aparente

IV.1 Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión detallada del estudio [Katsanos y Sextos \(2015\)](#) [2], que aborda el fenómeno de la elongación del periodo aparente de sistemas no lineales con respecto al periodo fundamental elástico inicial, presentando sus resultados con un enfoque espectral y en función de las variables que definen el problema. Se hace una descripción de la metodología utilizada para la obtención de los espectros de variación del periodo, haciendo hincapié en la descripción de la base de datos de eventos sísmicos, propiedades de los modelos constitutivos utilizados y metodología de identificación empleada.

Paralelamente se lleva a cabo un seguimiento de la metodología propuesta con la intención de replicar el proceso para la obtención de resultados equivalentes. Se trabaja con la misma base de datos de registros sísmicos y leyes constitutivas equivalentes a los utilizados por los autores. En un posterior capítulo se describirá con mayor detalle la implementación del método de identificación originalmente propuesto, para dar paso finalmente a una comparación de resultados.

IV.2 Base de Datos de Registros Sísmicos

Para validar una representación de tipo espectral, la metodología en estudio propuesta requiere de un vasto set de registros sísmicos, cuya selección cubre un amplio rango de magnitudes de parámetros tales como magnitud del sismo (M), tipología de suelo superficial, distancia a la fuente (R), aceleraciones superficiales máximas (PGA), contenido de frecuencias en la demanda (en base a un periodo promedio T_m [1]), entre otros. La base de datos utilizada por los autores es extraída del PEER-NGA y consta de 300 registros sísmicos, de 43 eventos distintos. En la Figura IV.1 se observa por ejemplo la distribución semi-uniforme de los parámetros R , PGA y T_m en función del rango de magnitudes (M) contenidas en los 300 registros sísmicos utilizados.

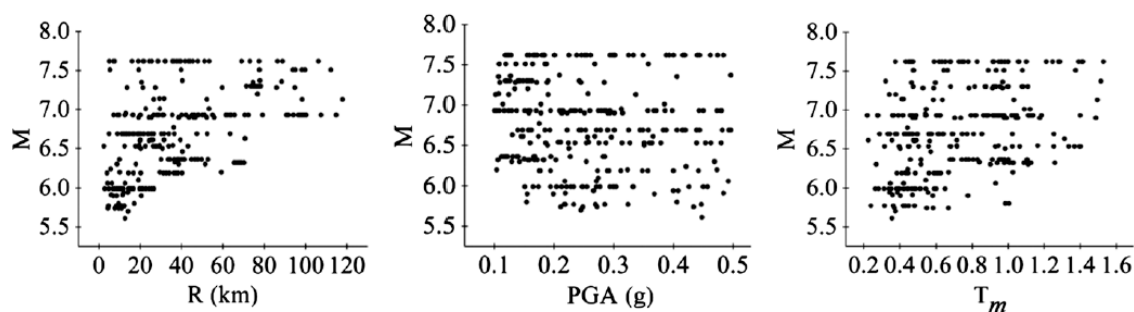


Figura IV.1. Distribución de registros sísmicos en términos de magnitud (M), distancia a la fuente (R), aceleración superficial máxima (PGA) y periodo promedio (T_m). (Fuente: Katsanos y Sextos (2015))

Para la reproducción de esta metodología un total de 290 registros sísmicos fueron rescatados de la base de datos original. Actualizaciones en el sistema de almacenamiento y correcciones en valores de metadata fueron factores que complicaron encontrar el set completo de registros sísmicos, sin embargo, gran parte de la selección fue considerada (96,7%), y se estima que esta falta de información no debería impactar de manera importante en los resultados. A continuación, se detalla la base de datos utilizada, comparada con la base de datos del estudio original.

Tabla IV.1. Eventos sísmicos utilizados en el estudio de [Katsanos y Sextos \(2015\)](#) y porción de registros sísmicos encontrados en base de datos. (Fuente: Elaboración Propia)

GROUND MOTION DATA BASE							
#	Earthquake name (Date)	Magnitude	Distance	Records	Site Class	Completed	
1	Kern County (1952.07.21)	7.36	88.39	1	C(1)	1	100%
2	Northern California (1954.12.21)	6.5	30.79	1	D(1)	1	100%
3	Parkfield (1966.06.28)	6.19	32.56-40.26	3	C(1) + D(2)	3	100%
4	Borrego Mountain (1968.04.09)	6.63	70.75	1	D(1)	1	100%
5	San Fernando (1971.02.09)	6.61	20.04-39.49	5	C(4) + D(1)	5	100%
6	Managua, Nicaragua (1972.12.23)	6.24	5.68	1	D(1)	0	0%
7	Friuli, Italy (1976.05.06)	6.5	20.23	1	C(1)	1	100%
8	Tabas, Iran (1978.09.16)	7.35	20.63-74.66	2	C(1) + D(1)	2	100%
9	Coyote Lake (1979.08.06)	5.74	4.37-10.94	4	C(1) + D(3)	4	100%
10	Imperial Valley (1979.10.15)	6.53	2.47-43.15	18	D(18)	17	94%
11	Livermore (1980.01.24)	5.8	17.13	1	D(1)	1	100%
12	Mammoth Lakes (1980.05.25)	5.94	5,90 - 14,19	7	D(7)	7	100%
13	Victoria, Mexico (1980.06.09)	6.33	36.67	1	D(1)	1	100%
14	Trinidad and Tobago (1980.11.08)	7.2	76.75	2	D(2)	2	100%
15	Corinth, Greece (1981.02.24)	6.6	19.92	1	D(1)	1	100%
16	Westmorland (1981.04.26)	5.9	7,02 - 20,47	3	D(3)	3	100%
17	Coalinga (1983.05.02)	6.36	4,60 - 52,86	22	C(9)+D(13)	22	100%
18	Morgan Hill (1984.04.24)	6.19	3,94 - 38,20	5	C(2)+D(3)	5	100%
19	Taiwan-SMART1-40 (1986.05.20)	6.32	65,48 - 70,27	8	D(8)	8	100%
20	North Palm Springs (1986.07.08)	6.06	4,24 - 6,28	2	D(2)	2	100%
21	Chalfant Valley (1986.07.20)	6.19	10,54 - 31,25	4	D(4)	4	100%
22	San Salvador, El Salvador (1986.10.10)	5.8	9.54	1	D(1)	1	100%
23	Taiwan-SMART1-45 (1986.11.14)	7.3	71,35 - 78,21	15	C(1)+D(14)	15	100%
24	New Zealand (1987.03.02)	6.6	24.23	1	C(1)	1	100%
25	Whittier Narrows (1987.10.01)	5.99	2,86 - 26,55	25	C(11)+D(14)	25	100%
26	Superstition Hills (1987.11.24)	6.54	19,51 - 35,83	3	D(3)	3	100%
27	Spitak, Armenia (1988.12.07)	6.77	36.19	1	D(1)	1	100%
28	Loma Prieta (1989.10.18)	6.93	7,17 - 114,87	42	B(1)+C(19)+D(17)+E(5)	42	100%
29	Manjil, Iran (1990.06.20)	7.37	40,43 - 77,84	2	C(1)+D(1)	2	100%
30	Sierra Madre (1991.06.28)	5.61	12.64	1	C(1)	1	100%
31	Erzincan, Turkey (1992.03.13)	6.69	8.97	1	D(1)	1	100%
32	Cape Mendocino (1992.04.25)	7.01	22,64 - 53,34	3	C(1)+D(2)	2	67%
33	Landers (1992.06.28)	7.28	13,67 - 91,77	6	C(2)+D(4)	6	100%
34	Big Bear (1992.06.28)	6.46	40.46	1	D(1)	0	0%
35	Northridge (1994.01.17)	6.69	4,85 - 63,53	33	A(1)+B(1)+C(16)+D(15)	29	88%
36	Kobe, Japan (1995.01.16)	6.9	16,25 - 55,81	10	A(1)+D(9)	10	100%
37	Northwest China (1997.04.11)	6.1	19.11	1	D(1)	1	100%
38	Kocaeli, Turkey (1999.08.17)	7.51	5,31 - 112,26	9	B(1)+C(1)+D(6)+E(1)	9	100%
39	Chi-Chi, Taiwan-1 (1999.09.20)	7.62	4,96 - 106,20	39	C(31)+D(8)	37	95%
40	Chi-Chi, Taiwan-2 (1999.09.20)	6.2	10,10 - 59,29	3	C(2)+D(1)	3	100%
41	Chi-Chi, Taiwan-3 (1999.09.25)	6.3	8,80 - 51,51	4	C(2)+D(2)	4	100%
42	Hector Mine (1999.10.16)	7.13	26,53 - 117,88	4	C(2)+D(2)	4	100%
43	Duzce, Turkey (1999.11.12)	7.14	29,27 - 31,56	2	C(1)+D(1)	2	100%

IV.3 Modelo No Lineal Histerético (SDOF)

Modelos histeréticos no lineales y degradantes fueron utilizados para representar de manera simplificada el comportamiento global de sistemas estructurales complejos de hormigón armado diseñados bajo normativas sísmicas convencionales [18]. Originalmente, estos sistemas de un grado de libertad fueron modelados en el software IDARC-2D usando una ley constitutiva definida por un modelo poligonal denominado “Multi-Linear Hysteretic Model”, parte del “SET C” (Hysteretic Modeling Rules) de IDARC-2D.

Estos modelos fueron definidos como multi-lineales, sin suavización entre ramas histeréticas, y con un comportamiento degradante controlados por los parámetros α , β_1 , β_2 , y γ que incluyen efectos de degradación de rigidez, degradación de resistencia y efecto “pinching” en proporciones según se explica más adelante. Distintos niveles de rigidez post-fluencia, α_y , igualmente fueron analizados.

En un primer alcance, en el presente estudio se reproduce el modelo histerético utilizado por los autores [2], y para evaluar la equivalencia entre modelos a continuación se describen en detalle los parámetros que controlan la respuesta histerética degradante. Posteriormente, la misma metodología implementada es aplicada sobre modelos constitutivos de mayor complejidad que consideran efectos de suavización entre ramas histeréticas, tal como modelos tipo Bouc-Wen, para evaluar el impacto correspondiente en los resultados. Para abordar el primer objetivo de análisis, a continuación se compara el modelo originalmente utilizado: “Multi-Linear Hysteretic Model” de IDARC-2D y el modelo utilizado en este estudio: “uniaxialMaterial Hysteretic” de OpenSees.

3.1. Modelo “Multi-Linear Hysteretic Model” (IDARC-2D)

El modelo histerético poligonal utilizado corresponde a una curva de tipo bi-lineal, con un comportamiento cíclico de tipo “yield-oriented”. Una primera sección de la respuesta es de tipo lineal-elástica definida por su rigidez inicial, K_0 . Este comportamiento se extiende hasta alcanzar el punto de fluencia definido por la fuerza de fluencia F_y , y la deformación de fluencia d_y (F_y / K_0). En esta parte de la respuesta, el sistema oscilatorio de un grado de libertad, de masa unitaria ($m = 1$), relaciona directamente la rigidez inicial K_0 con período fundamental de vibración (T_{el}).

$$K_0 = m \cdot \omega_0^2 = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T_{el}}\right)^2 = \frac{4\pi^2}{T_{el}^2}$$

Posterior al punto de fluencia, la respuesta histerética pasa a una segunda sección, cuyo comportamiento durante el ciclo de carga pasa a ser un comportamiento lineal definido por una rigidez residual o rigidez post-fluencia. Esta nueva rigidez está dada por una proporción de la rigidez inicial del sistema, $\alpha_y K_0$. En ciclos de descarga la respuesta en cambio sigue la pendiente de rigidez inicial K_0 . Una vez que la respuesta del sistema entra en esta segunda sección, se habla de una plastificación o incursión inelástica del sistema.

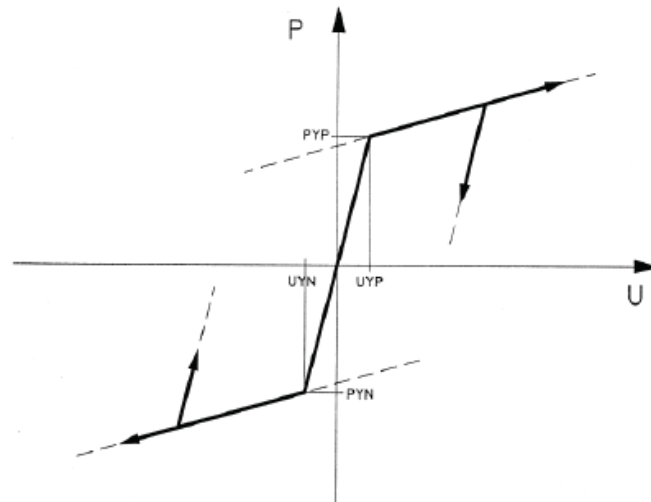


Figura IV.2. Diagrama base del modelo histerético multi-lineal. (Fuente: Modelo genérico)

El comportamiento cíclico tipo “yield-oriented” implica que al momento en que la carga cíclica sea revertida, la relación fuerza-deformación sigue transitoriamente una proyección lineal hasta los puntos de fluencia.

El parámetro α incorpora el efecto de degradación de rigidez inducido por efectos geométricos, y degrada con respecto a la rigidez inicial K_0 en los ciclos de descarga post-fluencia. Esta degradación sigue la regla del pivote con respecto al punto de encuentro de pendiente de rigidez inicial (K_0) y αF_y (Park et al. 1987). La rigidez en el instante “i” está dada por la siguiente expresión.

$$K_i = R_K \cdot K_0 = \frac{F_i + \alpha F_y}{K_0 d_i + \alpha F_y} K_0$$

Donde R_K es la razón de rigidez, y F_i , d_i , respectivamente la fuerza y desplazamiento del sistema en instante “i”.

La degradación de la capacidad resistente del sistema está controlada por los parámetros β_1 y β_2 . El parámetro β_1 está asociado al nivel de degradación inducido por la ductilidad alcanzada por la respuesta previa, mientras que el parámetro β_2 se asocia a la degradación en proporción de la energía histerética disipada por el sistema (H) en el ciclo histerético. La regla de degradación está dada por la siguiente expresión.

$$F_{y,i} = F_y \left[1 - \left(\frac{d_{max}}{d_u} \right)^{1/\beta_1} \right] \left[1 - \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \frac{H}{H_u} \right]$$

En esta expresión, d_u corresponde a la deformación última del sistema, y H_u , a la energía disipada por el sistema cuando es cargado monótonicamente hasta alcanzar la deformación última.

El efecto “pinching” en la respuesta histerética se encuentra controlado por el parámetro γ . Este fenómeno presente en los ciclos de carga incorpora un cambio abrupto de rigidez en torno a un punto definido por F_γ y d_γ . Estos niveles de fuerza y desplazamiento se determinan en función del parámetro γ bajo las siguientes expresiones (Figura IV.3).

$$F_\gamma = \gamma F_y$$

$$d_{\gamma y} = \gamma d_y$$

$$d_\gamma = \gamma d_{\gamma y} + (1 - \gamma) d_{\gamma u}$$

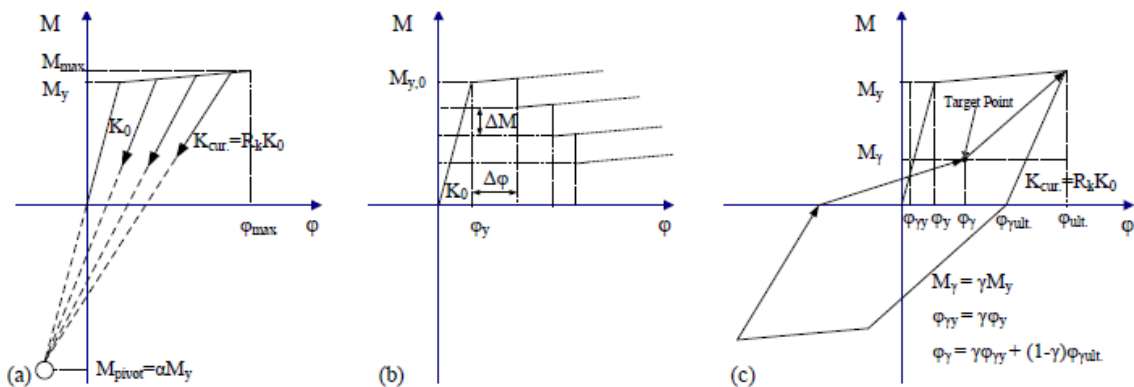


Figura IV.3. Esquemas de degradación de rigidez (a), resistencia (b) y efecto pinching (c) del modelo histerético multi-lineal. (Fuente: [18])

3.2. Modelo “uniaxialMaterial Hysteretic” (OpenSees)

El modelo utilizado en el presente estudio es parte de la biblioteca de herramientas de OpenSees, lleva por nombre “uniaxialMaterial Hysteretic” y posee similares propiedades para la consideración de degradación de rigidez, degradación de capacidad resistente y “pinching”. La ley constitutiva es igualmente de tipo poligonal, en este caso definida como bi-lineal.

Siendo que la definición de esta curva bi-lineal se basa en la especificación de puntos $[F_i, d_i]$, a través de estos es posible controlar tanto la resistencia de fluencia como la rigidez (pendiente) post-fluencia.

De manera similar al modelo usado originalmente, en este caso la degradación de rigidez en ciclos de descarga es proporcional a la demanda de ductilidad en el sistema. Este efecto se encuentra por el parámetro denominado β (β).

$$K_i = \mu^{-\beta} \cdot K_0$$

La degradación de la capacidad resistente del sistema está controlada por los parámetros $\beta_{damage1}$ y $\beta_{damage2}$, los cuales son análogos a los parámetros β_1 y β_2 en IDARC-2D. El parámetro $\beta_{damage1}$ incorpora la degradación en proporción a la demanda de ductilidad en el sistema, mientras que el parámetro $\beta_{damage2}$ en proporción a la energía disipada por el sistema.

El efecto “pinching” es incorporado por los parámetros β_{pinchX} y β_{pinchY} , los cuales guardan cierta equivalencia con el parámetro γ de IDARC 2D. Igualmente se define un punto objetivo para controlar el efecto “sliding”. En este caso, el punto se encuentra definido por las siguientes expresiones.

$$F_p = p_y F_y$$

$$d_{py} = p_y d_y$$

$$d_p = p_x (d_{pu} - d_{py}) + d_{py}$$

De acuerdo con estas definiciones, la equivalencia entre los modelos de IDARC 2D y OpenSees se determina de la siguiente forma.

$$F_p = F_y$$

$$\gamma F_y = p_y F_y$$

$$p_y = \gamma$$

$$p_x(d_{Pu} - d_{Py}) + d_{Py} = \gamma d_{Py} + (1 - \gamma)d_{Pu}$$

$$p_x(d_{Pu} - d_{Py}) = -(\gamma - 1)d_{Py} + (1 - \gamma)d_{Pu}$$

$$p_x(d_{Pu} - d_{Py}) = (1 - \gamma)(d_{Py} - d_{Pu})$$

$$p_x = (1 - \gamma)$$

En OpenSees, a diferencia de IDARC 2D, para considerar el efecto “pinching” en la respuesta histerética, es posible aplicar de manera independiente los ponderadores para las coordenadas de desplazamiento y fuerza en el punto objetivo.

Finalmente se llega a una equivalencia cualitativa entre los modelos originales utilizados por los autores en IDARC 2D, y modelos de OpenSees en base a los parámetros anteriormente descritos. A continuación, se presentan los parámetros de control de la respuesta histerética para las condiciones de degradación leve y severa. La equivalencia de estos parámetros se realizó analíticamente y mediante una comparación gráfica de los resultados expuestos por los autores en su publicación.

A continuación, se presentan los parámetros de control para representar en OpenSees (uniaxialMaterial Hysteretic) un modelo de degradación leve y un modelo de degradación severa, y más adelante se presentan gráficamente su comportamiento histerético para un caso en particular de respuesta en las figuras Figura IV.4 y Figura IV.5.

- Parámetros de control para caso de degradación leve:
 - \$pinchX = 0.60;
 - \$pinchY = 0.40;
 - \$damage1 = 0.00;
 - \$damage2 = 0.05;
 - \$pBeta = 0.35;
- Parámetros de control para caso de degradación severa:
 - \$pinchX = 0.95;
 - \$pinchY = 0.05;
 - \$damage1 = 0.00;
 - \$damage2 = 0.20;
 - \$pBeta = 0.15;

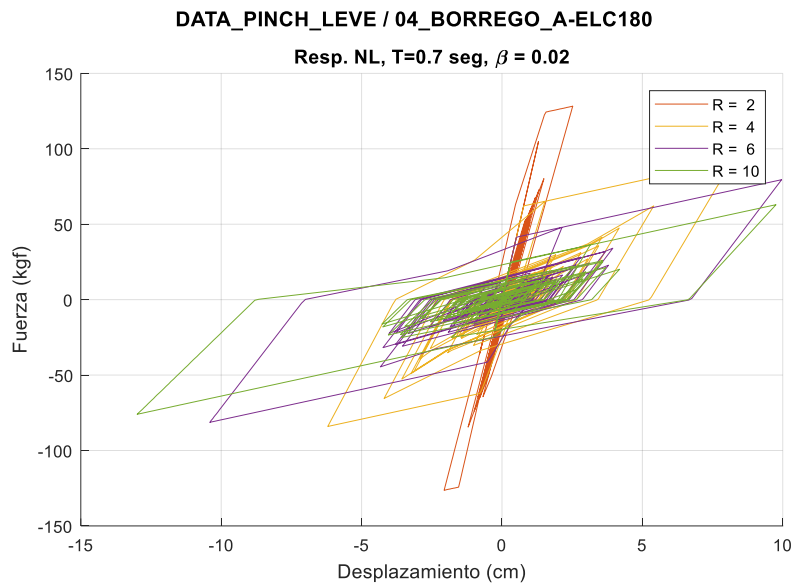


Figura IV.4. Respuesta histerética de modelo multi-lineal de degradación y pinching caso leve, de período fundamental (fase inicial) de 0.7 seg, razón de amortiguamiento modal de un 2.0 % y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10, para el registro sísmico Borrego Mountain (1968). (Fuente: Elaboración propia).

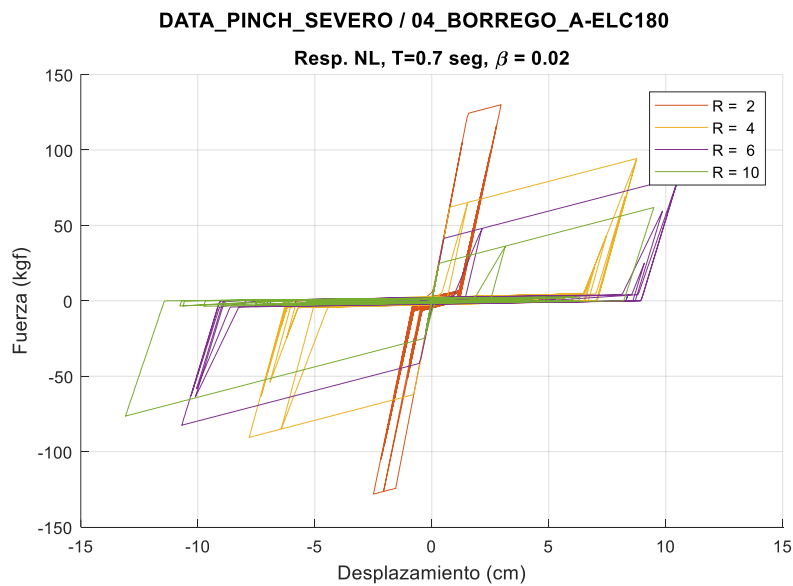


Figura IV.5. Respuesta histerética de modelo multi-lineal de degradación y pinching caso severo, de período fundamental (fase inicial) de 0.7 seg, razón de amortiguamiento modal de un 2.0 % y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10, para el registro sísmico Borrego Mountain (1968). (Fuente: Elaboración propia).

3.3. Modelos Bouc-Wen (OpenSees)

Del estudio desarrollado por Katsanos y Sextos (2015) [2] se levanta una discusión en cuanto a los modelos constitutivos considerados como representativos de la respuesta global de una estructura real. En el presente estudio se hace especial énfasis a los métodos de identificación y el tipo de caracterización de los sistemas no lineales en base a su respuesta registrada, sin embargo, las limitaciones de los modelos constitutivos que son usados como objeto de caracterización pueden bien limitar o moldear los resultados percibidos por la identificación [5].

Este aspecto ha sido percibido con anterioridad por Martínez, Boroschek y Bilbao (2015) [5], en que la caracterización lineal de sistemas no lineales en base a métodos de espacio-frecuencia difieren para sistemas bi-lineales con y sin transición suavizada entre ramas de comportamiento elástico y rigidez post-fluencia. En este estudio se muestra que, para los modelos de transición abrupta entre ramas, los resultados de la identificación de la rigidez representativa del sistema presentan una tendencia general hacia a la rigidez inicial del sistema, sin importar el nivel de incursión inelástica alcanzado en la respuesta ni el nivel de rigidez post-fluencia. Por otro lado, en modelos de mayor suavización se logra capturar de mejor manera la reducción en la rigidez equivalente del sistema.

A pesar del mejor ajuste de modelos de respuesta suavizada, del mismo estudio se concluye que en general las técnicas de identificación tradicionales (FFT, PSD, SSI-COV) aplicadas a sistemas no lineales arrojan resultados no representativos, que tienden hacia las propiedades iniciales del sistema dinámico, y a la vez, alejadas de las propiedades secantes del mismo (Efecto que se percibe mayormente en la estimación de la rigidez lineal equivalente que en la estimación del amortiguamiento modal equivalente del sistema). De este punto se desprende otro aspecto de discusión del estudio original [2], en relación directa con la metodología de identificación utilizada.

A continuación, se presenta la respuesta histerética Fuerza-Deformación de un modelo bilineal y un modelo equivalente de tipo Bouc-Wen con una componente de suavización entre las ramas de rigidez pre y post-fluencia (ambos casos sin degradación alguna), para el registro sísmico de Borrego Mountain 1968 ($M = 6,24$) (Figuras Figura IV.6 y Figura IV.7). Para este caso presentado los sistemas no lineales de un grado de libertad desarrollan una rigidez inicial asociada a un período fundamental de 0.7 segundos, con una razón de amortiguamiento modal de

un 2.0 %, y sus niveles de resistencia de fluencia se encuentran normalizados con respecto a la repuesta lineal máxima por medio de un factor de reducción R de 2, 4, 6 y 10.

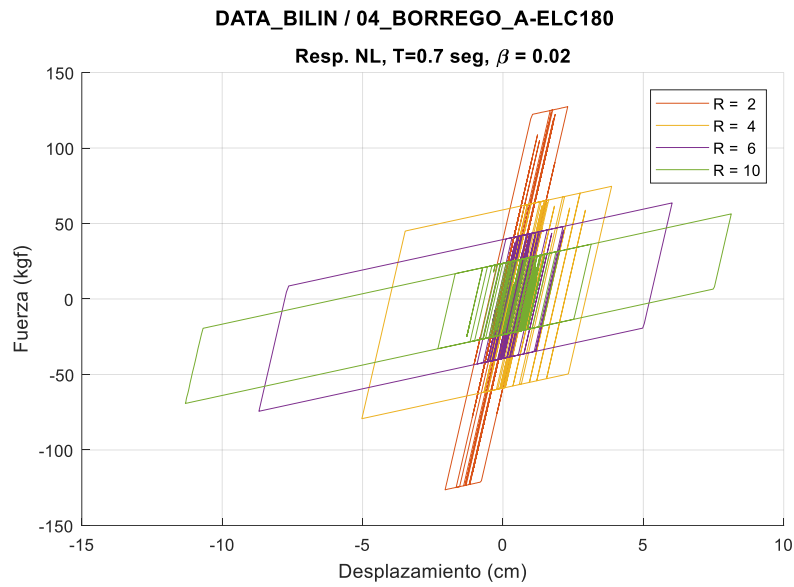


Figura IV.6. Respuesta histerética de modelo bilineal sin degradación, de período fundamental (fase inicial) de 0.7 seg, razón de amortiguamiento modal de un 2.0 % y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10, para el registro sísmico Borrego Mountain (1968). (Fuente: Elaboración propia).

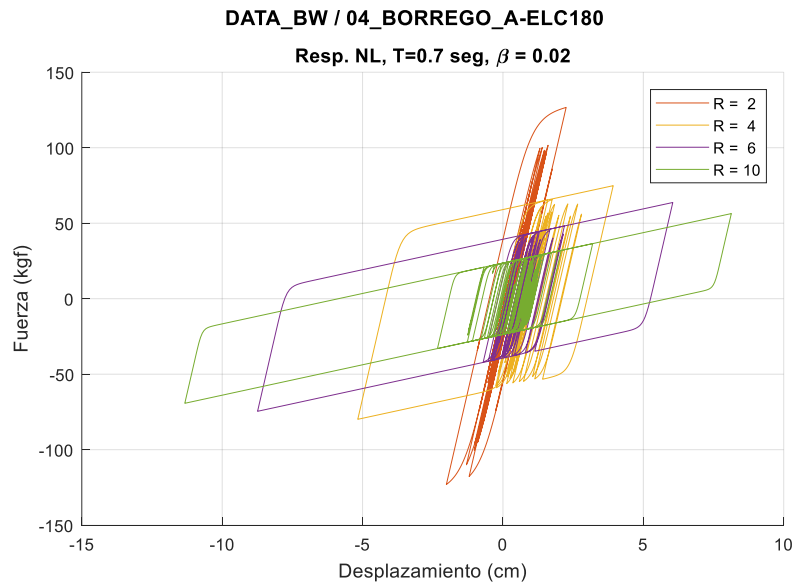


Figura IV.7. Respuesta histerética de modelo Bouc-Wen sin degradación, de período fundamental (fase inicial) de 0.7 seg, razón de amortiguamiento modal de un 2.0 % y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10, para el registro sísmico Borrego Mountain (1968). (Fuente: Elaboración propia).

Los efectos de suavización entre las ramas de la respuesta histerética se considera un efecto realístico para el tipo de sistema que se desea representar. De aquí nace el interés de evaluar los resultados de la identificación para estos tipos de modelos, incluyendo o no efectos de degradación y pinching. En particular se analizan modelos de respuesta suavizada con y sin degradación, ambos grupos definidos por los mismos parámetros base (Figura IV.8).

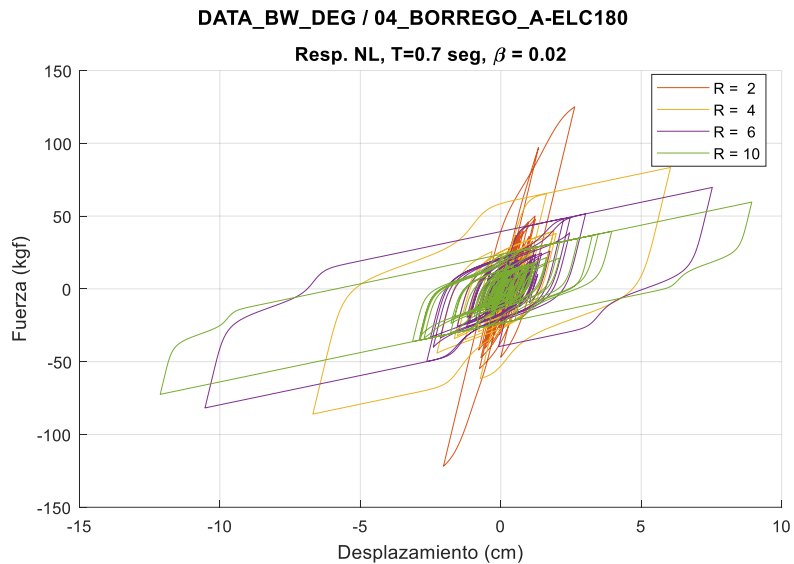


Figura IV.8. Respuesta histerética de modelo Bouc-Wen con degradación, de período fundamental (fase inicial) de 0.7 seg, razón de amortiguamiento modal de un 2.0 % y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10, para el registro sísmico Borrego Mountain (1968). (Fuente: Elaboración propia).

IV.4 Identificación del Periodo Aparente

La metodología descrita por Katsanos y Sextos (2015) aspira a estimar el máximo periodo aparente contenido en la respuesta del sistema no lineal (elongación del período) a partir de una identificación en base a las máximas amplitudes del espectro frecuencial de la respuesta en aceleraciones relativas del sistema con respecto a la aceleración de la base. Específicamente se define el periodo inelástico del sistema como el máximo estimado durante la duración completa del registro sísmico, lo cual se implementa en base ventanas móviles de duración constante.

Con un primer objetivo de percibir los resultados descritos por Katsanos y Sextos (2015), en primera instancia se adopta la misma metodología de identificación planteada. Se aborda así la selección de amplitudes máximas en el espectro de frecuencias de la señal de respuesta en aceleración relativa del sistema. Mediante una transformación rápida de Fourier (FFT) de la señal, aplicada en ventanas de corta duración, y de longitud y traslape constante, es posible estimar las variaciones en el tiempo del periodo aparente del sistema no lineal. En adelante se denomina esta técnica como “STFT” por sus siglas en ingles “Short Time Fourier Transform”.

Como es de mayor interés en el presente estudio, posterior a los trabajos de identificación descritos anteriormente se hace principal hincapié en analizar si los resultados logran caracterizar efectivamente el sistema no-lineal y en qué grado se ajusta su respuesta al sistema lineal equivalente.

IV.5 Generación de Espectros de Elongación del Periodo

Una vez implementada la identificación que logre caracterizar linealmente un sistema de respuesta altamente no-lineal, es posible sistematizar la identificación de períodos aparentes y representar los resultados en un plano de tipo espectral. El gran aporte de Katsanos y Sextos (2015) culmina en parametrizar el problema de la caracterización de sistemas no lineales en forma de un “espectro inelástico de elongación del periodo”.

En base a este tipo de espectro es teóricamente posible estimar cuánto aumentaría el periodo predominante en la respuesta de un sistema no lineal dado, y sometido a acciones sísmicas de cierto tipo. Para obtener este tipo de espectro inelástico es necesario propagar un sistema no-lineal de ciertas características previamente establecidas, en un arreglo de propiedades dinámicas iniciales graduadas. Así, la curva espectral presentaría una amplitud de acuerdo a la

razón (o porcentaje) de elongación del periodo aparente con respecto a su propia magnitud en fase inicial (lineal-elástica), T_{in}/T_{el} , y en su eje coordenado la curva se extiende en el rango considerado de periodos de vibración en su fase lineal elástica inicial, T_{el} .

Finalmente, cada curva espectral se encuentra asociada un modelo histerético específico, definido por los parámetros que controlan el máximo esfuerzo de fluencia (F_y), rigidez post-fluencia (α_y) y/o nivel de degradación.

5.1. Fuerza de fluencia del sistema, F_y .

Las curvas espectrales de estiramiento del periodo se encuentran principalmente diferenciados por grupos de menor a mayor nivel de incursión inelástica en la respuesta; esperando que los periodos aparentes estimados aumenten proporcionalmente con el nivel de incursión inelástica. Este aspecto se ajusta definiendo modelos no lineales de resistencias a la fluencia, F_y graduales, definidas como la fuerza máxima del sistema lineal-elástico, F_o , con un factor divisor, R , de magnitud ascendente.

5.2. Rigidez post-fluencia, α_y .

De manera similar, es posible obtener curvas espectrales para sistemas con diversas magnitudes de rigidez post-fluencia.

5.3. Niveles de degradación.

Tal como fue descrito en secciones anteriores, otro factor de gran implicancia son las características degradantes con que son definidos los sistemas, lo cual vendría a impactar fuertemente en los resultados. En la lógica que asocia la elongación del periodo del sistema a los efectos de degradación de rigidez y resistencia, se espera que el fenómeno reflejado en las curvas espectrales se intensifique para sistemas definidos con mayor degradación.

Estos tres aspectos que describen a grandes rasgos el comportamiento no-lineal de cada sistema son considerados de manera similar para la reproducción de sus resultados. En base a lo descrito por Katsanos y Sextos (2015) a continuación se describe mediante un diagrama de flujo la metodología implementada (Figura IV.9).

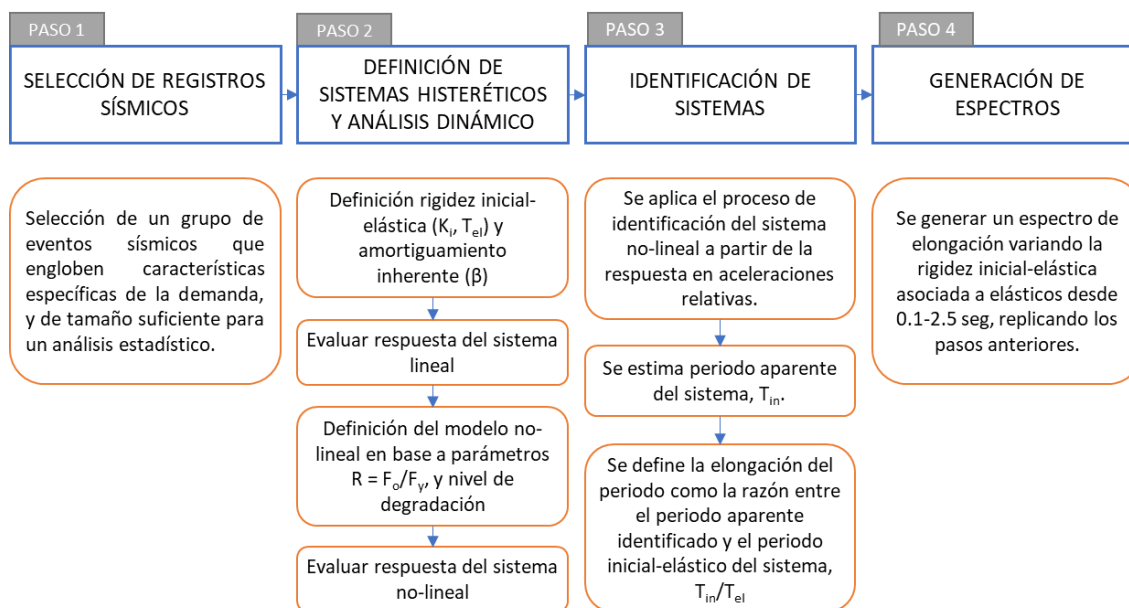


Figura IV.9. Procedimiento para la obtención de espectros de la elongación del periodo aparente de sistemas histeréticos. Katsanos y Sextos (2015) [2].

Para la reproducción de la metodología descrita, algunos de los parámetros son simplificados o corregidos en función de los resultados obtenidos por los autores originales. Se mantiene el rango de periodos elásticos, T_{el} , considerando sistemas de 0.1 seg hasta 2.5 seg, separados cada 0.1 seg. Igualmente se adoptó un rango de factores de modificación de respuesta, R , de 2, 4, 6 y 10. En vista de su poca influencia en los resultados de identificación, una razón de rigidez de post-fluencia única de un 5% se utilizó para todos los análisis. A continuación, se presenta una tabla comparativa de los parámetros base considerados por el estudio original de Katsanos y Sextos (2015) y la presente investigación (Tabla IV.2).

Tabla IV.2. Tabla comparativa de parámetros base considerados para la elaboración de espectros de elongación del periodo aparente. (Fuente: Elaboración propia)

TABLA COMPARATIVA		
	Katsanos y Sextos 2015	Cea 2018
Registros Sísmicos	300	290
Rango de Periodos Elásticos	0.1:0.1:2.5 seg	0.1:0.1:2.5 seg
Factor de Reducción de Respuesta Elástica	2, 3, 4, 5, 6	2, 4, 6, 10
Cociente de Rigidez Post-Fluencia	0, 1, 3, 10 %	5 %
Nivel de Degradación	Leve, Severa	Leve, Severa
Razón de Amortiguamiento Crítico	1 %	2 %

Capítulo V. Identificación del Periodo Aparente de Sistemas Histeréticos

V.1. Introducción

Hasta ahora se han descrito de manera general varios estudios experimentales de campo, de laboratorio y analíticos que abordan el fenómeno de las variaciones aparentes de frecuencias (o periodos) contenidas en la respuesta de sistemas oscilantes no lineales sometidos excitaciones sísmicas fuertes. En el conjunto de estudios descritos, independiente de la técnica de identificación utilizada, se observa una tendencia común hacia el aumento del periodo aparente del sistema conforme a las magnitudes de la excitación, y de manera habitual se asocia este fenómeno a la naturaleza no lineal de la respuesta y en particular a los efectos de degradación de algún tipo en el sistema estructural.

En el capítulo anterior se ha descrito detalladamente una metodología para estimar el estiramiento del periodo de un sistema en función de ciertos parámetros de diseño adoptados. Esta metodología considera un procedimiento de identificación de espacio-frecuencia, en base al uso de una transformación de Fourier segmentada de la respuesta en aceleraciones relativas del sistema. Y sobre la tesis de que para sistemas dinámicos que incurren ampliamente en rangos no lineales las técnicas de identificación de espacio-frecuencia no logran capturar propiedades dinámicas representativas, se discutirá a continuación el uso de técnicas orientadas a cuantificar con otros métodos la distorsión de la propiedad dinámica de mayor interés, siendo en este caso el periodo aparente del sistema.

V.2. Propiedades Secantes como Referencia para la Identificación

Las propiedades efectivas o secantes de sistemas hysteréticos (Figura V.1) son ampliamente utilizadas en metodologías simplificadas para el diseño sísmico o análisis dinámico de algún tipo. A sabiendas de que las propiedades efectivas no necesariamente representan una linealización del sistema no-lineal complejo, comúnmente estas se establecen como una referencia para la identificación de propiedades dinámicas aparentes.

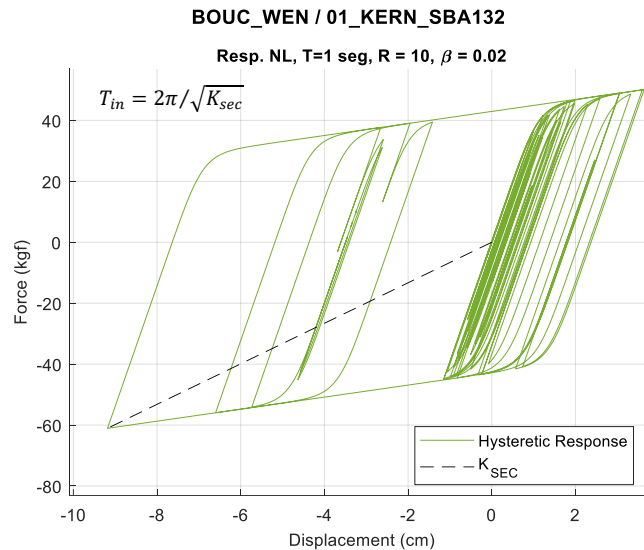


Figura V.1. Periodo secante o efectivo de un sistema bilineal (Bouc-Wen) sin degradación.

Registro sísmico de 01_KERN_SBA132

Siguiendo este esquema, y gracias a la base de datos generada por el análisis de múltiples sistemas no-lineales y regímenes de degradación, es posible comparar los resultados de los (próximos) procesos de identificación directamente con espectros de elongación del periodo aparente obtenidos a partir de las respectivas propiedades secantes. En base a las respuestas hysteréticas fuerza-deformación de los sistemas no-lineales se estima el período efectivo (o inelástico) y se obtiene un espectro de elongación del periodo para los registros sísmicos considerados, y para cada nivel de incursión inelástica analizado.

V.3. Identificación en base a Espectros de Frecuencia

Para la estimación de la elongación del periodo, Katsanos y Sextos proponen una identificación de espacio-frecuencia analizando la amplitud frecuencial contenida en la respuesta de aceleraciones relativas del sistema con respecto a su base. Mediante una transformada rápida de Fourier (FFT) de la respuesta en aceleraciones segmentada en ventanas de tiempo de igual duración, es posible conocer la evolución del contenido de frecuencias en el tiempo. Identificando las frecuencias de máxima amplitud en cada ventana de tiempo, se construye una curva evolutiva del periodo aparente, y de esta se define el máximo estiramiento del período asociado a la menor frecuencia identificada a lo largo de toda la respuesta.

Esta metodología de identificación de sistemas corresponde a la descrita originalmente por Udwadia y Trifunac (1974) [1], y en lugar de ser aplicado al espectro de frecuencias de la salida del sistema, el método realiza la identificación sobre funciones de transferencia empíricas. En la investigación de campo de Udwadia y Trifunac, esta metodología es aplicada a estructuras reales y afectas a movimientos de mediana intensidad y en base a sus conclusiones, su alcance de aplicabilidad es acotado a sistemas de no-linealidad baja, cuyas propiedades dinámicas varían levemente dentro de una misma ventana de tiempo. En vista de estas limitaciones de la metodología de identificación, y consecuentemente con lo observado en los resultados de Martínez, Boroschek y Bilbao (2015) [5], la aceptabilidad de sus resultados es sujeto a discusión e investigación.

3.1. Implementación del Espectrograma para la Identificación

En una primera instancia, adoptando la metodología de identificación de Katsanos y Sextos, la identificación fue implementada en base a espectrogramas de la respuesta de aceleración relativa del sistema. Las etapas para la confección de estos espectrogramas se resumen a continuación.

- a) Selección de tamaño, traslapo y tipo de ventana a aplicar en la serie de tiempo a analizar.
 - El tamaño de ventana fue definido por segmentos de tiempo de 4 seg, pero no menores a 2 veces el periodo elástico del sistema analizado.
 - El traslapo entre ventanas es fijado de un 90%.
 - Cada segmento de tiempo fue multiplicado por una ventana de tipo Hanning.
- b) Transformada de Fourier en cada ventana de análisis con 2^{14} puntos de discretización.

- c) Identificación de frecuencia aparente para cada ventana.
- d) Resultados en gráfico 3D tiempo-frecuencia-amplitud.
- e) A la curva de identificación de frecuencias se incorporó una suavización basada en una media móvil para evadir problemas numéricos asociados.

A modo de ejemplificación y validación de resultados, se aplica el método de identificación para la respuesta de un sistema lineal-elástico, masa unitaria, razón de amortiguamiento crítico de un 2.0% y un periodo fundamental de 1.0 seg, para el sismo de San Fernando 1971 registrado en la estación FSF172.

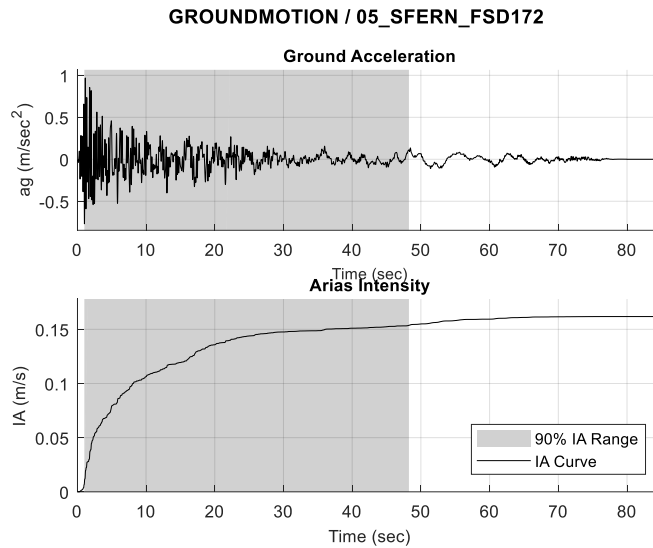


Figura V.2. Registro sísmico de aceleraciones 05_SFERN_FSD172 (arriba) y curva acumulada de Intensidad de Arias.

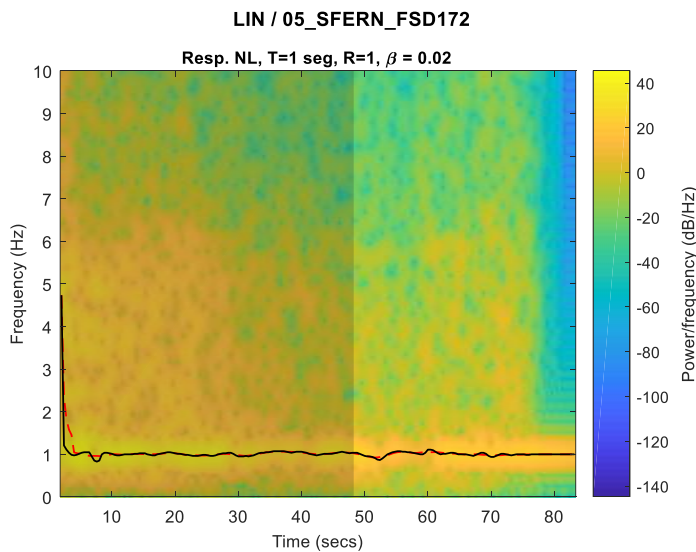


Figura V.3. Espectrograma (STFT($a_r(t)$)) y curva de identificación de frecuencia aparente del sistema. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

En el espectrograma presentado, con fines netamente referenciales, se destaca en gris el segmento de tiempo de respuesta en que se concentra el 90% de la energía ingresada por el registro sísmico según el cálculo acumulativo de la intensidad de Arias (IA). La respuesta del sistema lineal presenta una frecuencia predominante, aproximadamente constante, a lo largo de todo el registro igual a 1 Hz (equivalente a 1 seg. de periodo), lo cual valida la identificación del sistema.

A pesar de tratarse de un sistema de propiedades invariantes en el tiempo, se observan leves distorsiones en los resultados del espectrograma, lo que hace razonable considerar algún tipo de suavización de la curva de identificación. Se estima que estas perturbaciones presentes, que en su mayoría se concentran en los primeros segundos de la respuesta, se encuentran asociadas a la respuesta forzada impuesta por el registro sísmico y no representan las propiedades dinámicas del sistema.

3.2. Identificación en Modelo Bi-lineal sin Degradación

En primera instancia se aplica el método de identificación en espacio-frecuencia sobre la respuesta de modelos bi-lineales sin degradación. Para el mismo registro sísmico y propiedades del sistema considerados anteriormente se definen cuatro modelos bi-lineales diferenciados por magnitudes del factor de reducción de la máxima fuerza elástica, “R”. Las respectivas respuestas histeréticas de Fuerza-Desplazamiento se presentan a continuación.

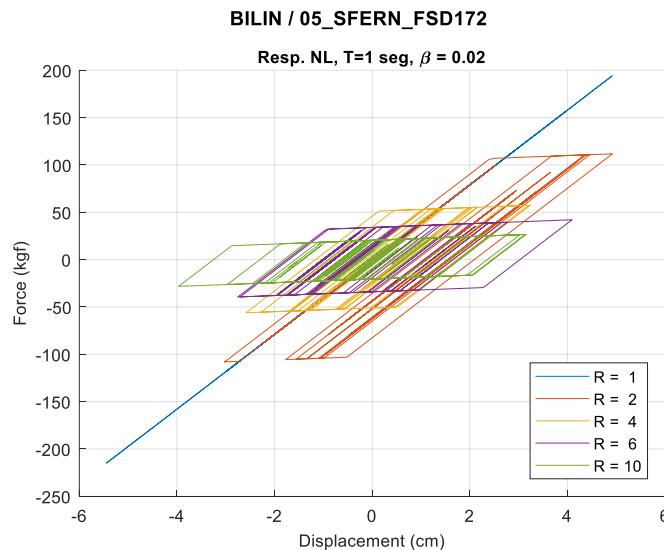


Figura V.4. Respuesta histerética de sistemas bilineales sin degradación.

Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

A continuación, se presentan los espectrogramas para la identificación de los cuatro sistemas no-lineales de interés, destacando en gris, con fines netamente referenciales, el segmento de tiempo de respuesta en que se concentra el 90% de la energía ingresada por el registro sísmico según el cálculo del balance de energía ingresada al sistema dinámico.

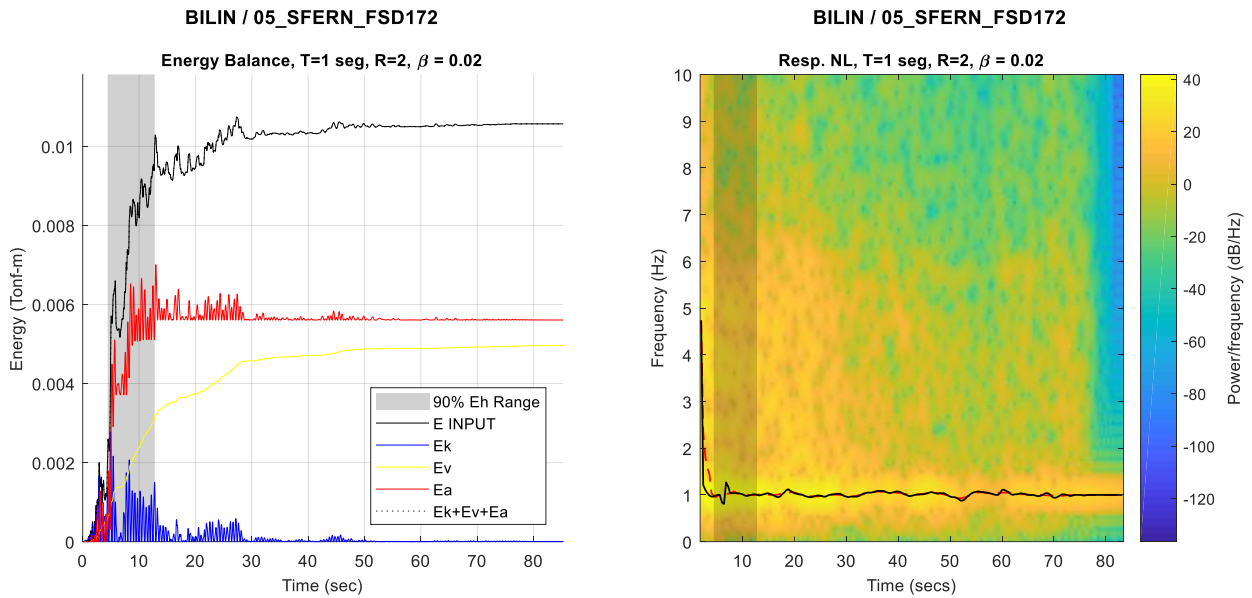


Figura V.5. Identificación espacio-frecuencia de sistema bilineal sin degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2.0$, $\beta = 2.0\%$). Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).

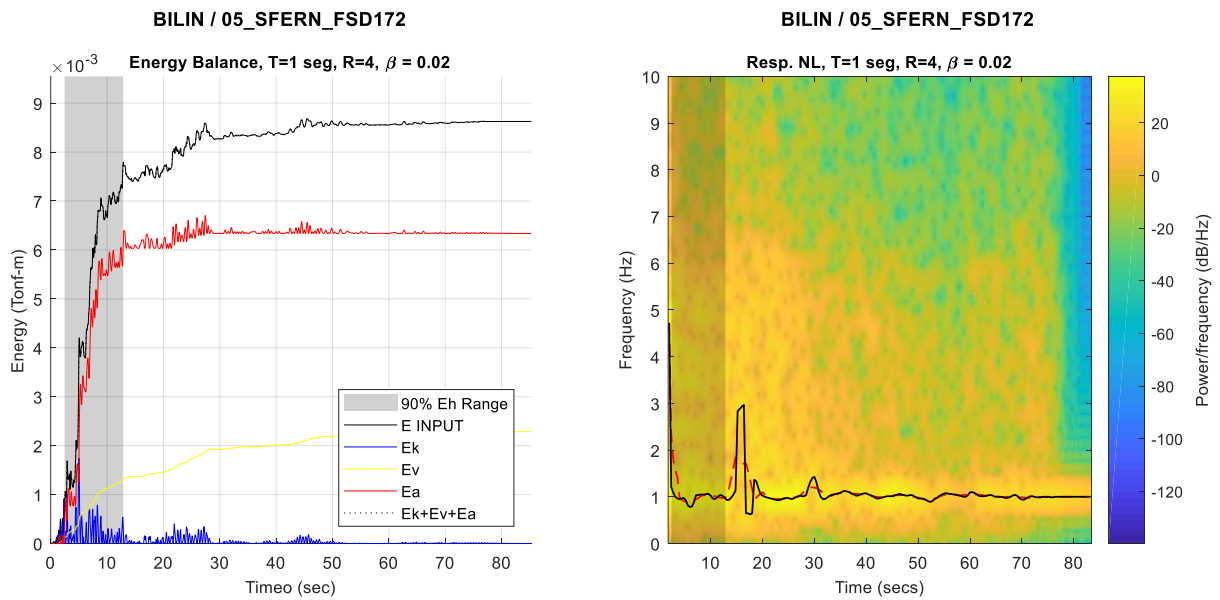
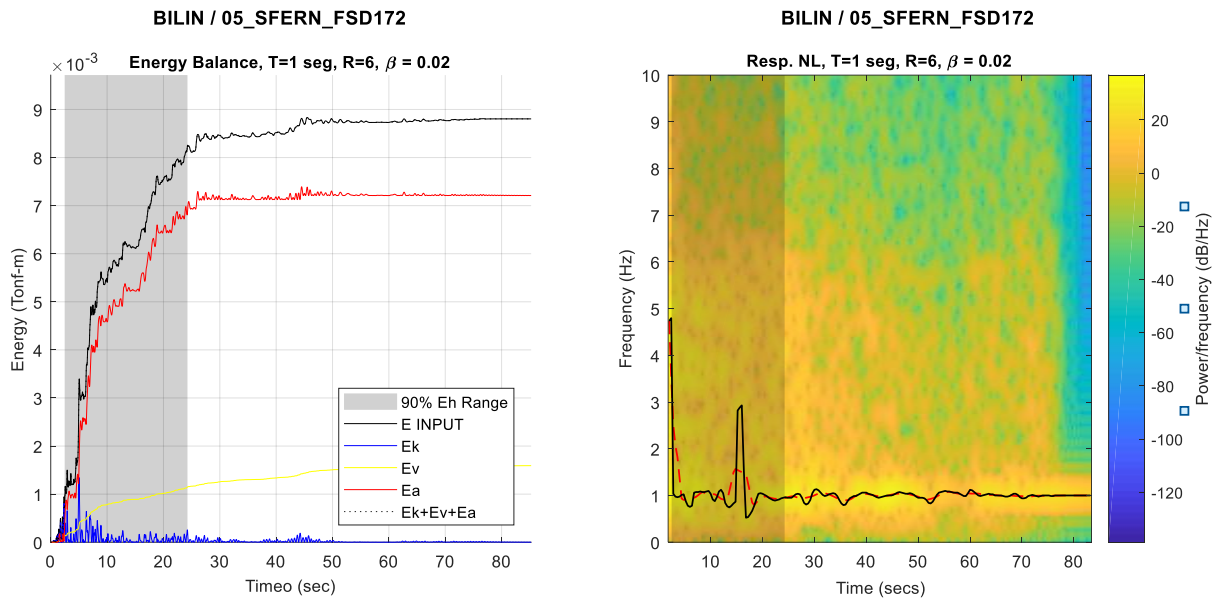
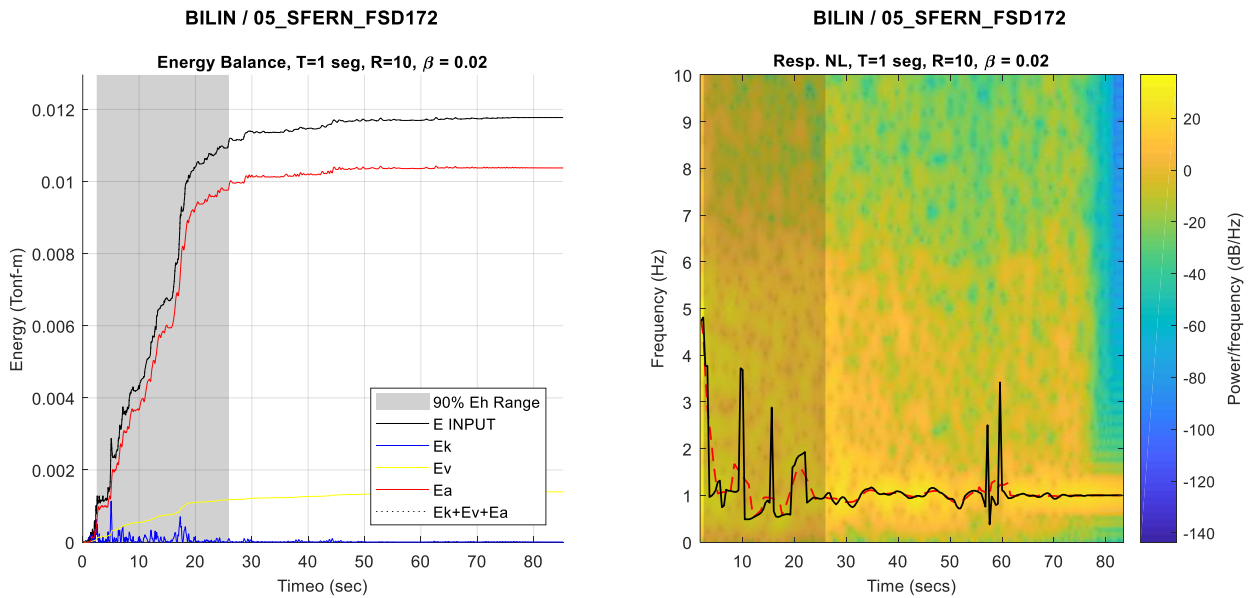


Figura V.6. Identificación espacio-frecuencia de sistema bilineal sin degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4.0$, $\beta = 2.0\%$). Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).



**Figura V.7. Identificación espacio-frecuencia de sistema bilineal sin degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 6.0$, $\beta = 2.0\%$).
Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).**



**Figura V.8. Identificación espacio-frecuencia de sistema bilineal sin degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 10.0$, $\beta = 2.0\%$).
Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).**

En general, los análisis dinámicos fueron validados manteniendo en cualquier caso un error del balance de energía menor a un 0.1 %. Algunas observaciones de los resultados expuestos anteriormente son:

- a) De las curvas histeréticas y curvas de balance de energía entrada-salida, se observa que, con el aumento progresivo del parámetro de modificación de respuesta elástica (“R”) efectivamente se generan mayores niveles de energía disipada y mayores niveles de incursión inelástica desarrolladas por el sistema.
- b) Con el progresivo aumento de “R” los espectros de frecuencia presentan una mayor dispersión de la curva de frecuencias de máxima amplitud. Estas distorsiones se encuentran mayormente concentradas en los segmentos de tiempo en que se cubre el 80% de energía disipada por el sistema. El grado de distorsión de la curva de interés aumenta proporcionalmente con nivel de incursión inelástica del sistema.
- c) En principio, se espera que en proporción de los niveles de incursión inelástica la frecuencia predominante reduzca su magnitud, sin embargo, a simple vista no es posible establecer una relación directa entre ambos aspectos.
- d) Se puede concluir que, para el modelo constitutivo estudiado, el método implementado no logra estimar una frecuencia aparente representativa del nivel de incursión inelástica del sistema.

3.3. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Leve y Severa

Para el caso de los modelos constitutivos con degradación y pinching, los resultados de la identificación en espacio-frecuencia son distintos. A continuación, se presentan las histéresis de respuesta (fuerza-deformación) para los casos de degradación leve y severa, siguiendo el enfoque de la metodología originalmente propuesta, para el mismo sistema lineal de referencia ($T = 1.0$ seg, $\beta = 2.0\%$) y sometidos al mismo registro sísmico analizado previamente.

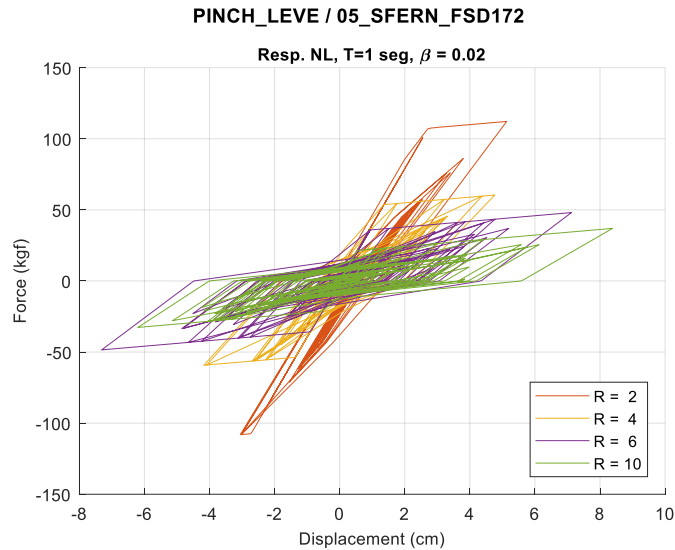


Figura V.9. Respuesta Histerética de sistemas multi-lineales con degradación leve.
Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

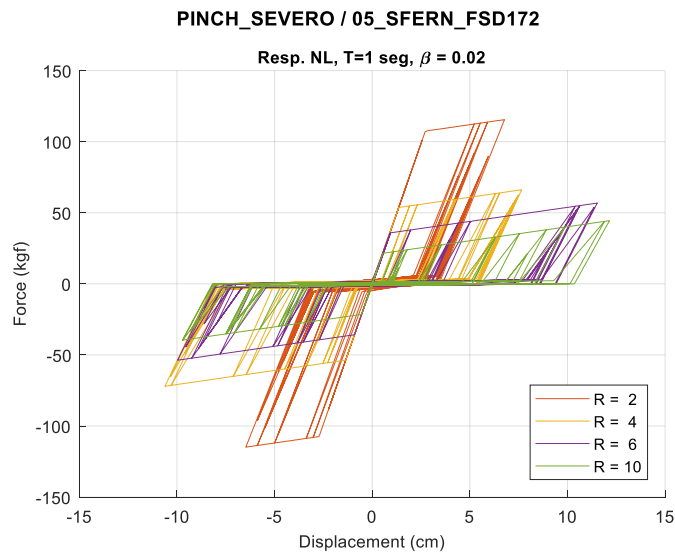


Figura V.10. Respuesta Histerética de sistemas multi-lineales con degradación severa.
Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

A continuación, se presentan los resultados de la identificación en espacio-frecuencia para el caso de los modelos con degradación, nuevamente junto con sus respectivas curvas de balance de energía ingresada y disipada por el sistema.

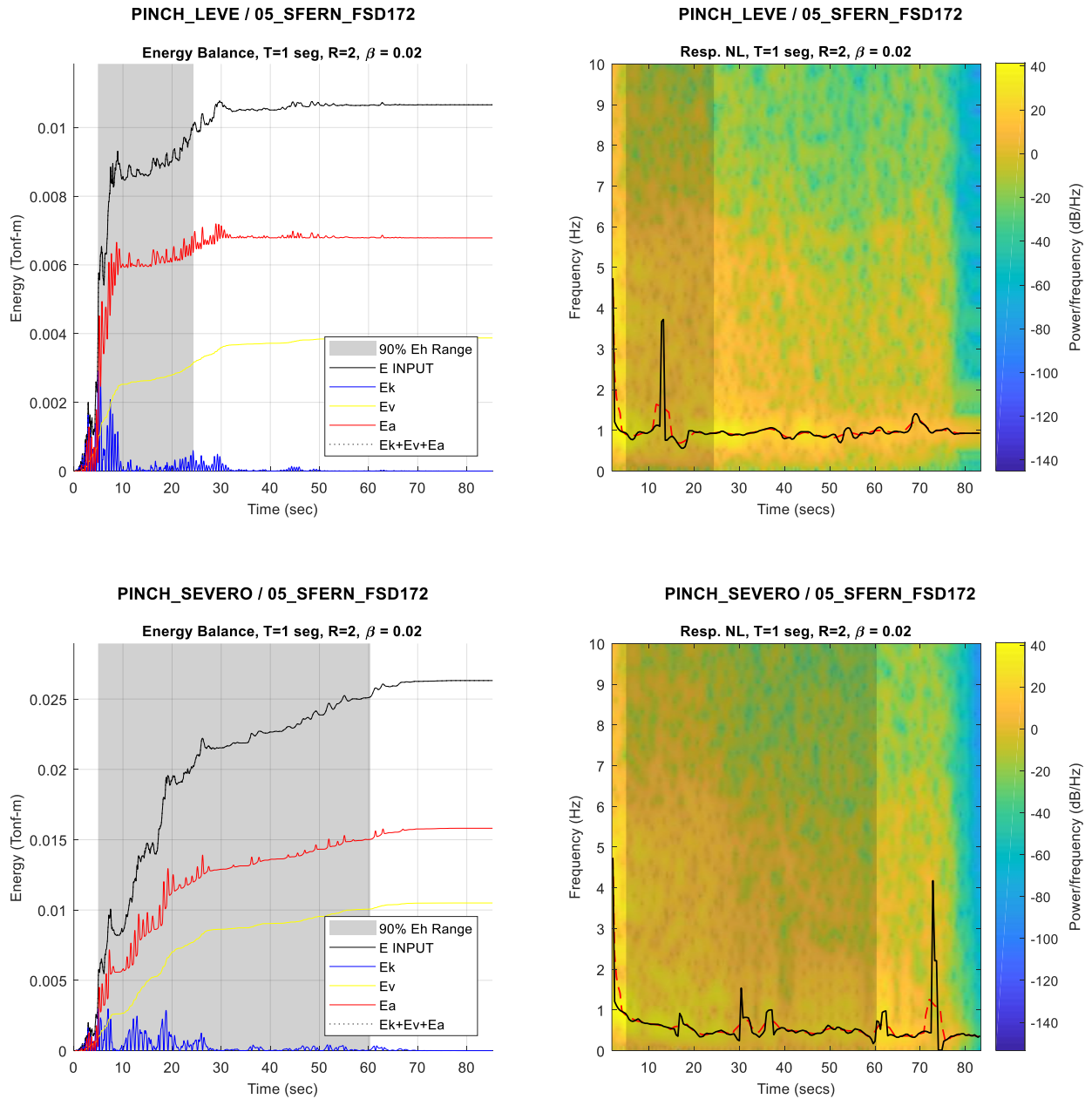


Figura V.11. Identificación espacio-frecuencia de sistema multi-lineal con degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2.0$, $\beta = 2.0\%$).

Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT(a_r(t)).

Arriba: Modelo de degradación LEVE, Abajo: Modelo de degradación SEVERA.

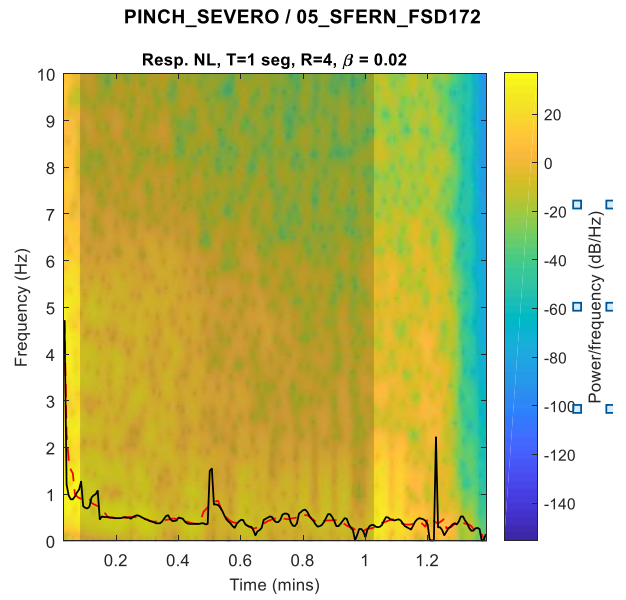
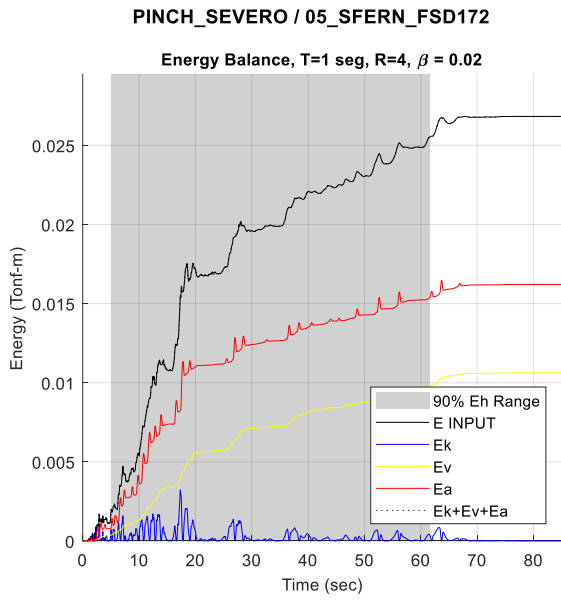
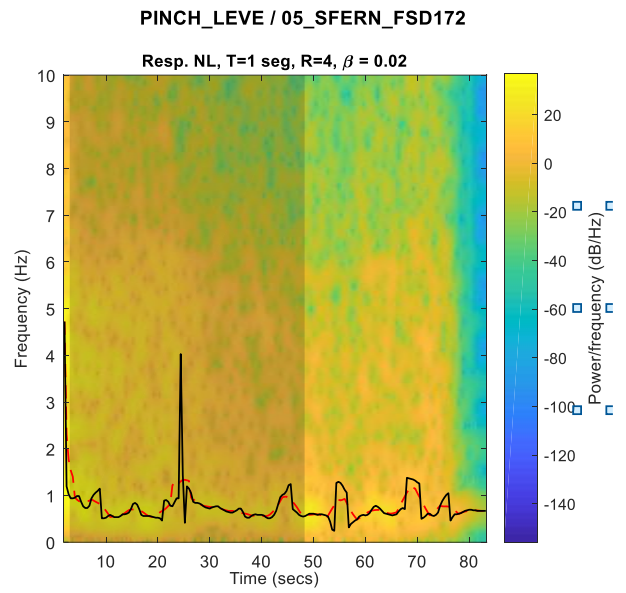
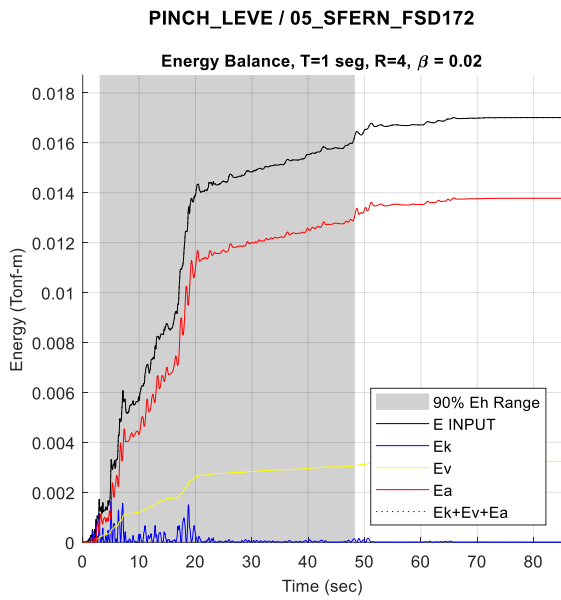


Figura V.12. Identificación espacio-frecuencia de sistema multi-lineal con degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4.0$, $\beta = 2.0\%$).
Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).
Arriba: Modelo de degradación LEVE, Abajo: Modelo de degradación SEVERA.

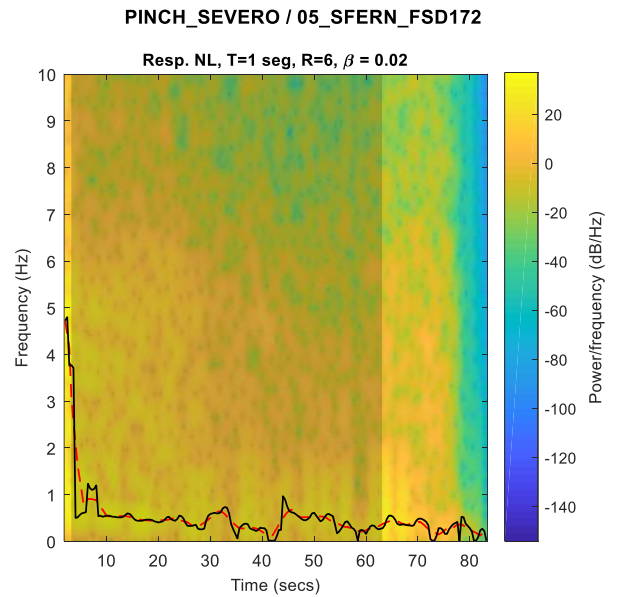
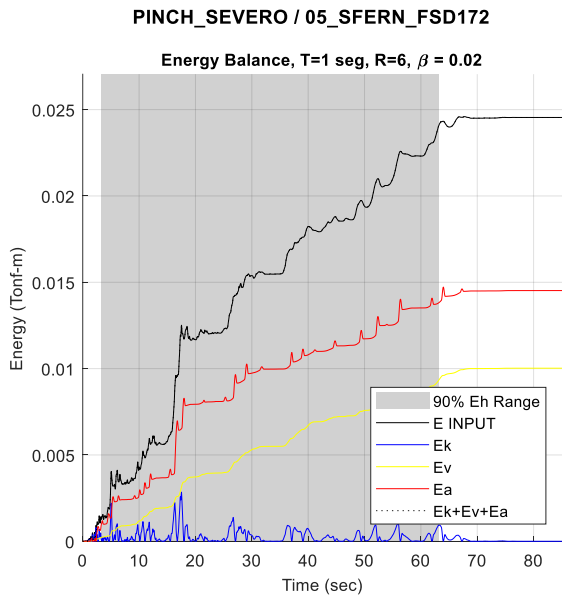
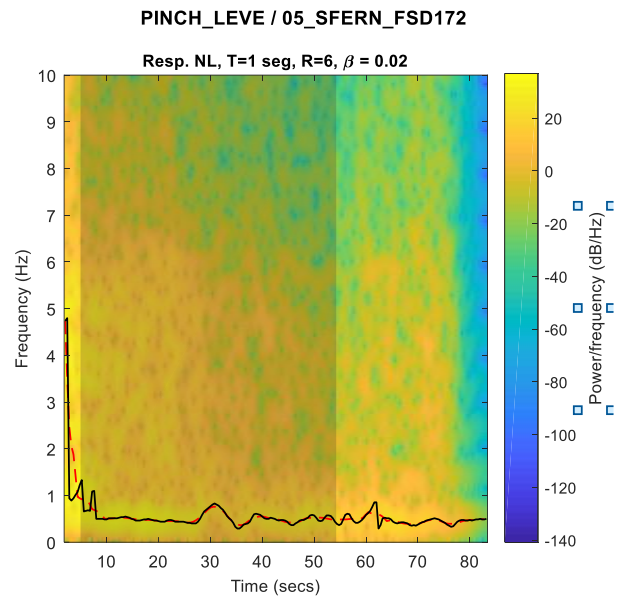
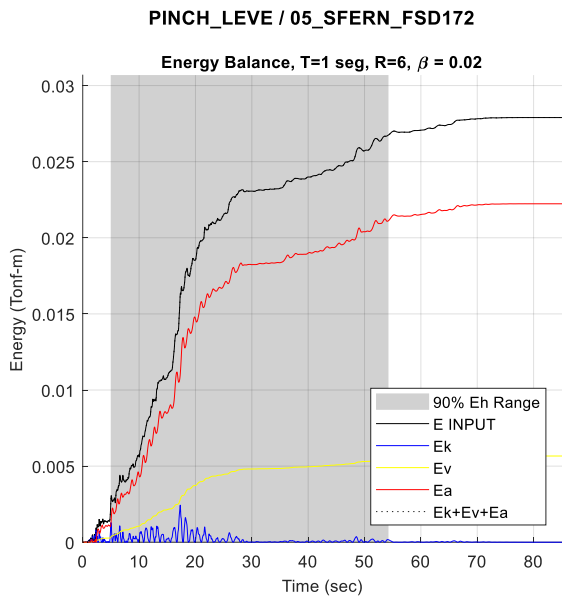


Figura V.13. Identificación espacio-frecuencia de sistema multi-lineal con degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 6.0$, $\beta = 2.0\%$).
Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).
Arriba: Modelo de degradación LEVE, Abajo: Modelo de degradación SEVERA.

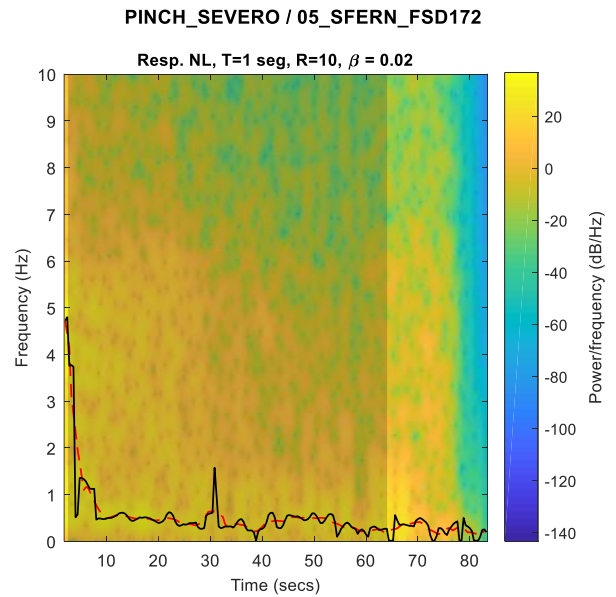
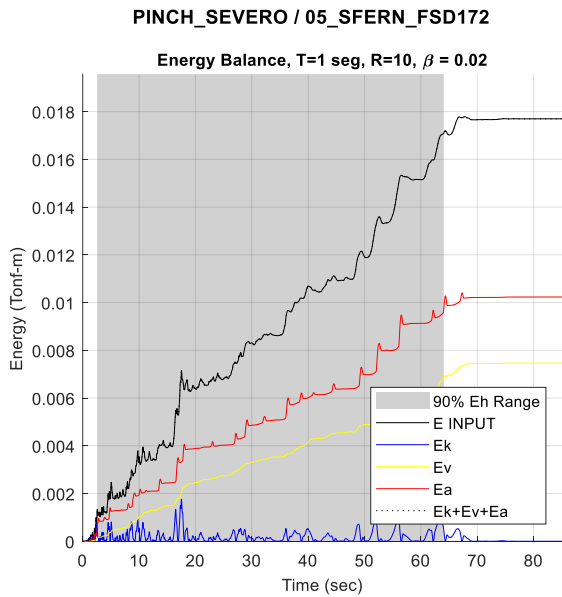
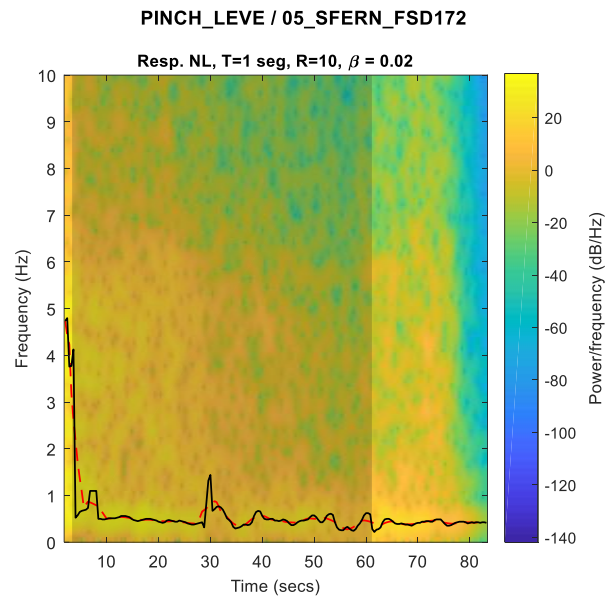
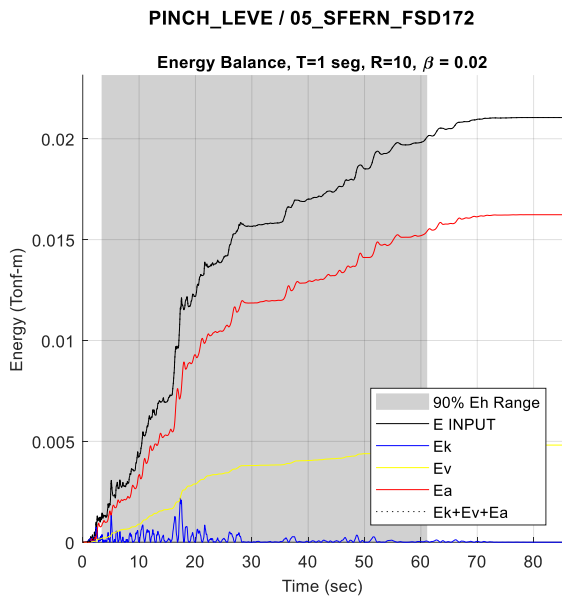


Figura V.14. Identificación espacio-frecuencia de sistema multi-lineal con degradación ($T_{el} = 1.0$ seg, $R = 10.0$, $\beta = 2.0\%$).
Izquierda: Balance de Energía de la Respuesta Dinámica, Derecha: Espectrograma de Identificación, STFT($a_r(t)$).
Arriba: Modelo de degradación LEVE, Abajo: Modelo de degradación SEVERA.

A diferencia de los resultados de identificación del modelo bi-lineal sin degradación, en este caso sí se observa una leve tendencia a la reducción de magnitud de las frecuencias aparentes del sistema. Algunas observaciones generales son:

- a) Comparando los resultados de identificación de los modelos de degradación leve y severa, se observan razonables diferencias en cuanto a la tendencia de frecuencias aparentes. Para el caso del modelo de degradación severa, la frecuencia aparente del sistema presenta generalmente una mayor reducción en su magnitud.
- b) Centrándose en los segmentos de tiempo en que se cubre el 80% de energía disipada por el sistema, para ambos modelos constitutivos la reducción de frecuencias aparente es progresiva con el aumento de “R”.
- c) Se puede concluir que, para modelos degradantes, la frecuencia aparente identificada efectivamente puede dar indicios del nivel de degradación alcanzado por el sistema no lineal, sin embargo, no necesariamente mantiene relación con la demanda de ductilidad en el mismo (como se ve en caso de modelo bi-lineal sin degradación).

Lo observado en las figuras anteriormente expuestas corresponde al panorama general obtenido para la mayoría de los registros sísmicos analizados. Sin embargo, se ha detectado en varios casos problemas y limitaciones en la metodología aplicada, que derivan en imprecisiones y errores en la identificación y construcción de espectros, especialmente en el análisis de sistemas de degradación severa. Estos problemas se comentan detalladamente en la sección 3.4.

3.4. Problemas Presentes en el Método de Identificación

Recurrente es el caso en que los resultados obtenidos del espectrograma se ven fuertemente distorsionados por aspectos como la fase forzada de respuesta del sistema, baja energía de la respuesta del sistema frente a las frecuencias presentes en la excitación, más de una frecuencia de alta amplitud en la respuesta, etc. Estos efectos se observan especialmente en sistemas de baja rigidez inicial (periodos altos), en que incluso para sistemas lineales-elásticos los resultados de identificación presentan grandes distorsiones en la identificación.

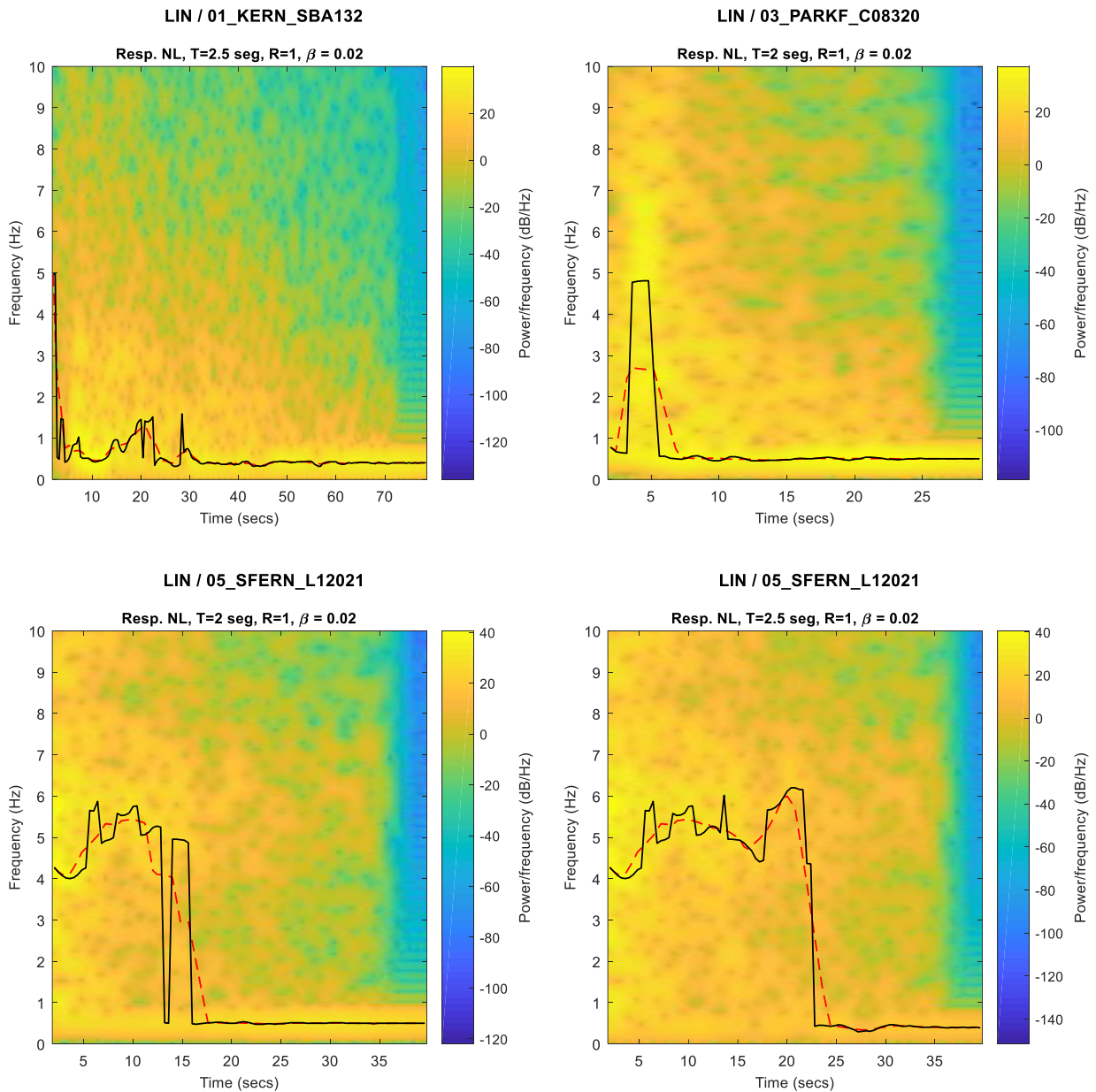


Figura V.15. Casos de problemas en la identificación STFT($a_r(t)$) para sistemas puramente lineales ($R=1$)

(a) 01_KERN_SBA132, T = 2.5 seg. (b) 03_PARKF_C08320, T = 2.0 seg

(c) 05_SFERN_L12021, T = 2.0 seg. (d) 05_SFERN_L12021, T = 2.5 seg

Este fenómeno presente en la respuesta de sistema puramente lineales ($R=1$) en principio no afecta el cálculo de los espectros de estiramiento del periodo ya que estos últimos se basan en los resultados de identificación de los sistemas no-lineales ($R>1$). Sin embargo, resultados que deberían validar el método dan muestra de que la representatividad del sistema no está asegurada.

Este problema, asociado a que el contenido de frecuencia de la excitación prima frente a la potencia de la respuesta del sistema, se presenta mayormente cuando se analizan sistemas de fuertes no-linealidades. En la Figura V.16 se aprecia por ejemplo el caso de sistemas de degradación leve y severa, de periodo inicial (elástico) igual a 2.5 seg, y un factor R igual a 4, en que sus respectivas frecuencias fundamentales (0.4 Hz) casi no se ven presentes a lo largo de toda la respuesta.

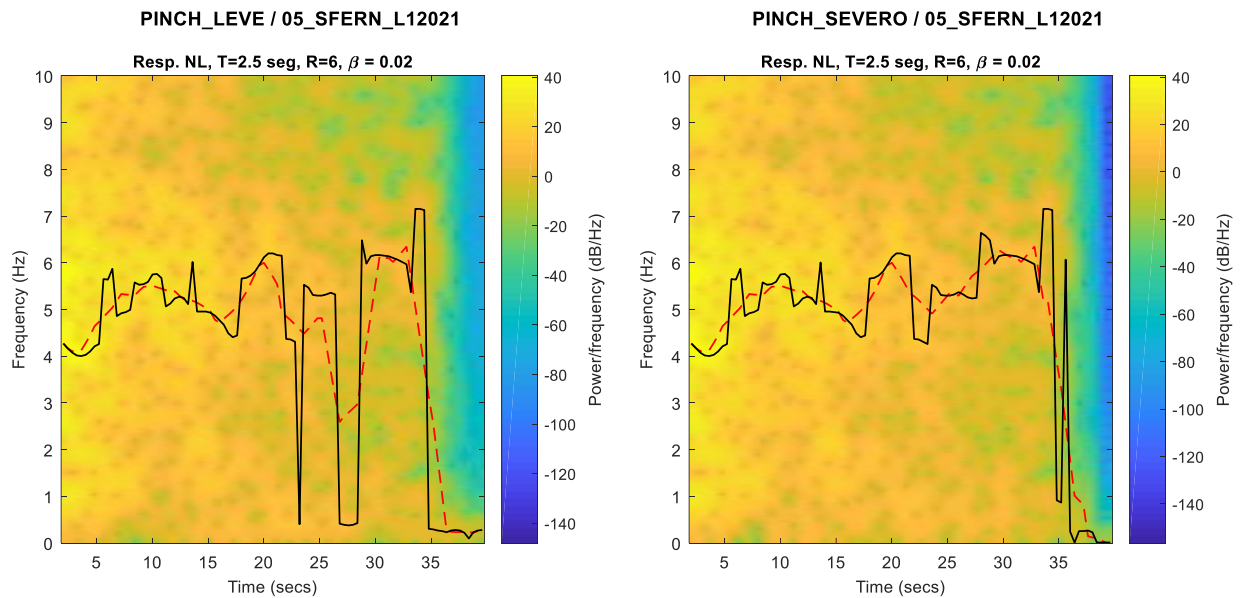


Figura V.16. Casos de problemas en la identificación STFT($a_r(t)$) en sistemas no-lineales ($R>1$)

(a) 05_SFERN_L12021, T = 2.5 seg, R = 6, Modelo de degradación leve

(b) 05_SFERN_L12021, T = 2.5 seg, R = 6, Modelo de degradación severa

Estos problemas expuestos repercuten fuertemente en la construcción de los espectros de elongación del periodo aparente, tanto numéricamente como en el objetivo principal de buscar representatividad del sistema no lineal.

3.5. Implementación del Funciones de Transferencia Empíricas

En esta sección se implementa una identificación del periodo aparente en base a funciones de transferencia empíricas con el objetivo de evaluar posibles mejoras en la metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015), manteniendo el enfoque de identificación en el espacio de la frecuencia. Estas mejoras van dirigidas a reducir los problemas observados anteriormente en relación a la fuerte presencia de la excitación en la respuesta del sistema.

La función de transferencia empírica, definida como la razón entre el valor absoluto de la transformada rápida de Fourier de la respuesta del sistema (aceleración relativa) y el valor absoluto de la transformada de la excitación (registro de aceleración basal), provee una caracterización media del sistema no lineal durante el tiempo del registro, y esta es interpretada como la función de transferencia del sistema lineal equivalente (McVerry 1980). Esta razón entre espectros de Fourier funciona como una suerte de filtro de amplitudes de frecuencia, indicando para un arreglo de frecuencias de excitación los niveles de amplificación o reducción entre los dos puntos de referencia.

Las consideraciones para la implementación de funciones de transferencia empíricas se resumen a continuación.

- a) Selección de tamaño, traslapo y tipo de ventana a aplicar en las series de tiempo a analizar.
 - El tamaño de ventana fue definido por segmentos de tiempo de 4 seg, pero no menores a 4 veces el periodo elástico del sistema analizado.
 - El traslapo entre ventanas es fijado de un 90%.
 - Cada segmento de tiempo fue filtrado por una ventana de tipo Hanning.
- b) Para el registro de entrada y señal de respuesta se aplica un filtro pasa-alto de orden 3, y de frecuencia de corte de 0.2 Hz.
- c) Transformada de Fourier en cada ventana de análisis con 2^{14} puntos de discretización para señales de entrada y salida del sistema.
- d) Se estima la función de transferencia como el valor absoluto de la razón entre los espectros de frecuencia obtenido para entrada y salida.
- e) Identificación de frecuencia aparente para cada ventana según máxima amplitud en función de transferencia.

- f) A los resultados evolutivos de la identificación se incorporó una suavización basada en una regresión local, considerando el 10% de los datos aledaños, y sin ponderación de datos particulares de mayor dispersión.

Comparando los resultados obtenidos aplicando espectrogramas y funciones de transferencia empírica, se observa en general que para este último caso los problemas de distorsión en los resultados disminuyen considerablemente.

Los casos de sistemas puramente lineales (Figura V.15), mediante la aplicación de una función de transferencia empírica se obtienen ahora resultados relativamente estables y coherentes con las propiedades del sistema. En Figura V.17 se observa una comparación directa entre los resultados del espectrograma y la función de transferencia empírica aplicada por ventanas móviles. En ambos casos presentados, se estabilizan los resultados en torno a las propiedades lineales del sistema analizado.

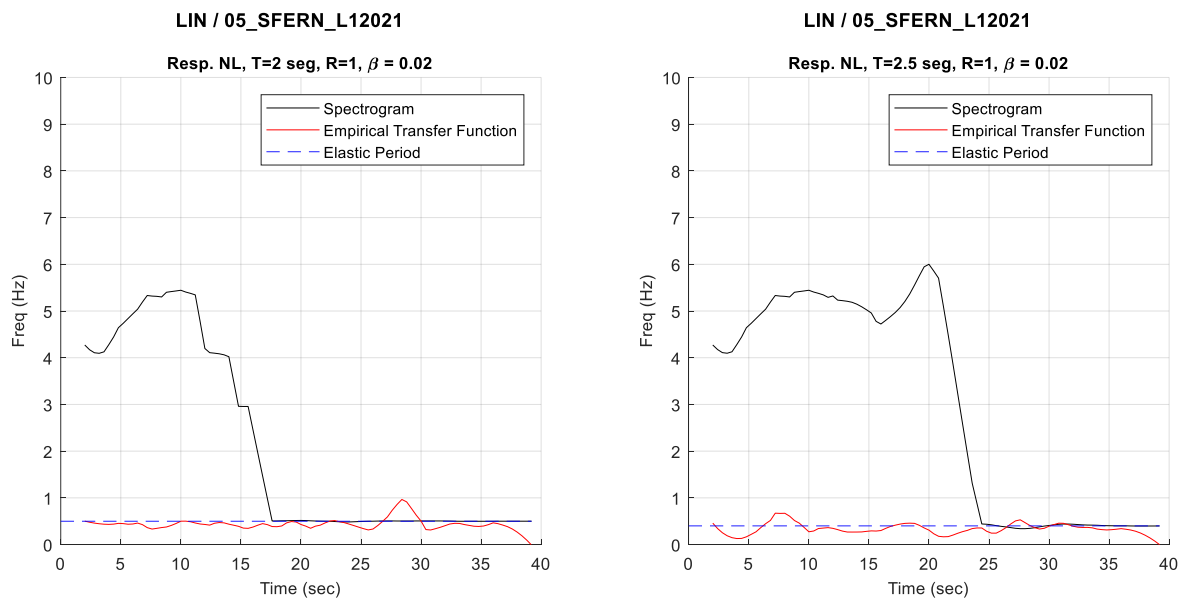


Figura V.17. Comparación de identificación en base a STFT y ETF para sistemas puramente lineales (R=1)
(a) 05_SFERN_L12021, T = 2.0 seg. (b) 05_SFERN_L12021, T = 2.5 seg

Otros casos de distorsiones en los resultados de espectrograma fueron observados para sistemas de periodo largo y de alto nivel de incursión inelástica, tal como se presentan los casos de Figura V.16. De manera similar, con la aplicación de una función de transferencia empírica resultan curvas de identificación en el tiempo de magnitudes coherentes con las propiedades del

sistema identificado. Se compara a continuación la curva de identificación en el tiempo para tres sistemas de igual periodo elástico y factor de reducción, y distintos modelos de degradación

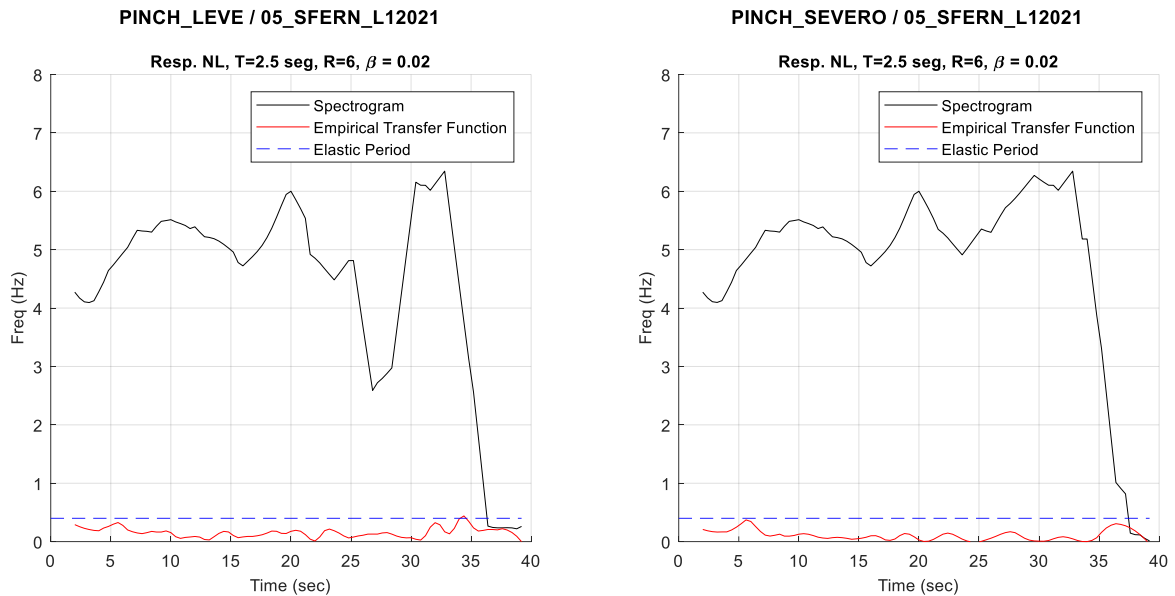


Figura V.18. Comparación de identificación en base a STFT y ETF para sistemas no lineales ($R > 1$)

(a) 05_SFERN_L12021, $T = 2.5$ seg, $R = 6$, Modelo multi-lineal con degradación leve

(b) 05_SFERN_L12021, $T = 2.5$ seg, $R = 6$, Modelo multi-lineal con degradación severa

En estos espectrogramas que presentaban gran similitud en sus resultados para los tres modelos constitutivos analizados, se observa que, para la identificación en base a funciones de transferencia empírica, los resultados de la identificación guardan mayor coherencia, rondando la magnitud de la frecuencia inicial elástica del sistema (0.4 Hz).

Se observa que el uso de la FRF elimina la sensibilidad del espectrograma a la respuesta forzada y captura de mejor manera la frecuencia relativa presente. Sin embargo, en algunos casos la implementación realizada genera una inestabilidad dando como resultado variaciones importantes de la frecuencia resultante. Este aspecto no fue profundizado en este trabajo.

3.6. Identificación en Modelos con Suavización

En esta sección se analizan los resultados de la identificación sobre modelos que incorporan una componente de suavización en la respuesta histerética fuerza-desplazamiento. Este modelo se basa en la histéresis Bouc-Wen descrita en el capítulo IV, con el que se busca observar su impacto en los resultados de identificación en función del grado de suavización presente entre las ramas de respuesta elástico y post-fluencia.

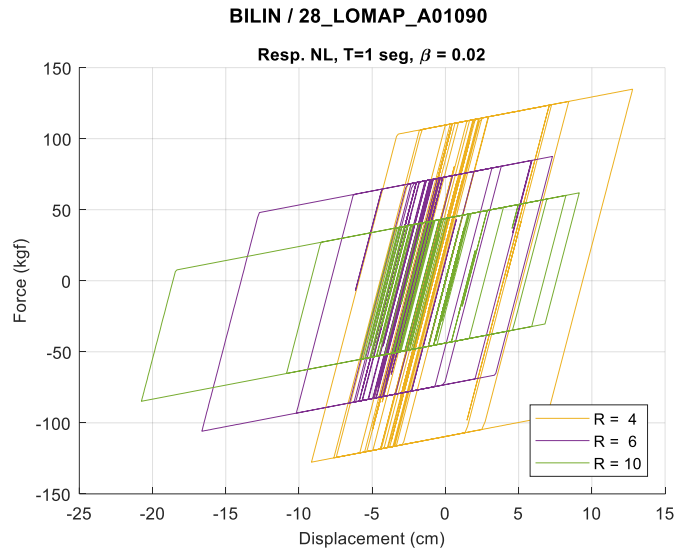


Figura V.19. Respuesta Histerética de sistema bi-lineal sin degradación, R = 4, 6 y 10.
Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

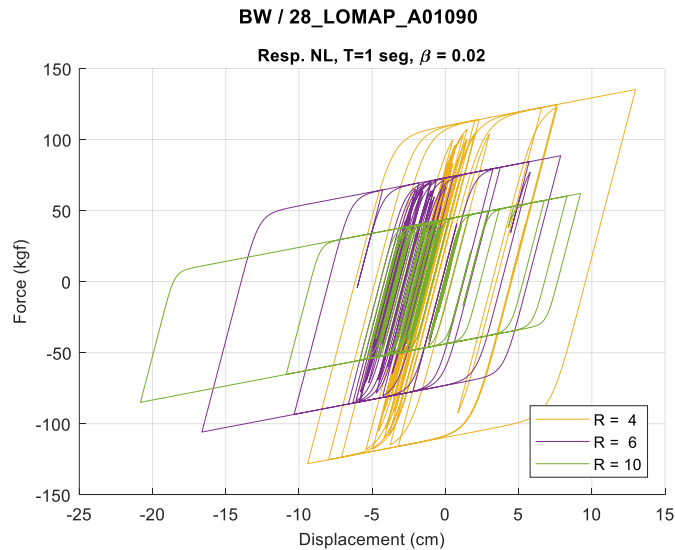


Figura V.20. Respuesta Histerética de sistema Bouc-Wen (n = 5) sin degradación, R = 4, 6 y 10.
Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

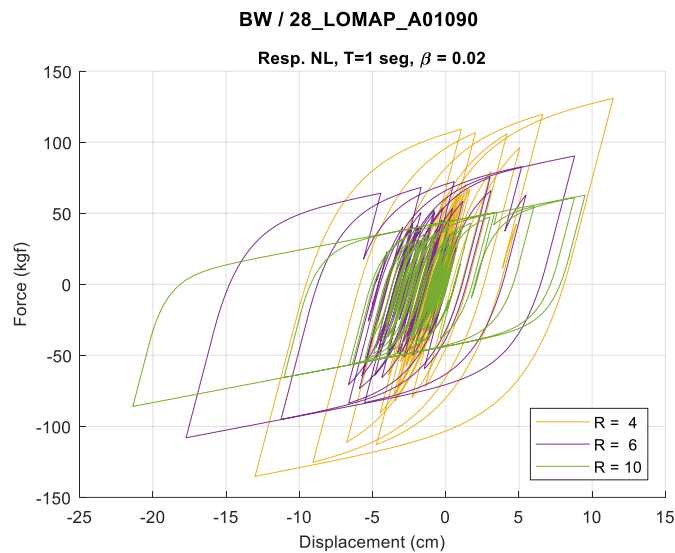


Figura V.21. Respuesta Histerética de sistema Bouc-Wec ($n = 1$) sin degradación, $R = 4, 6$ y 10 . Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

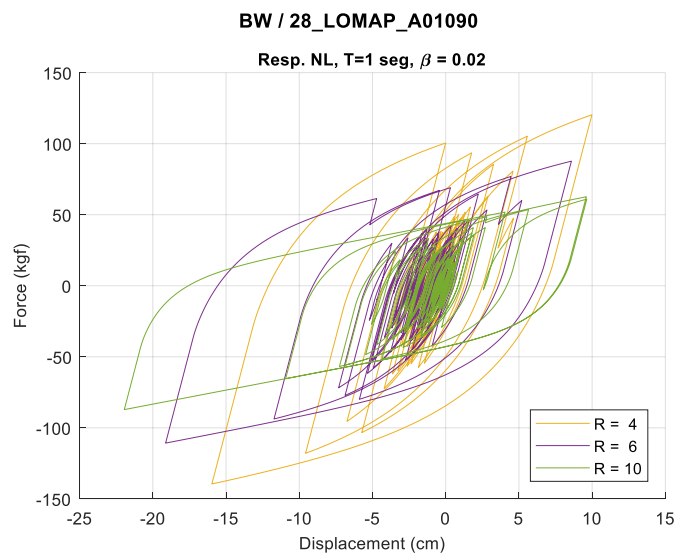


Figura V.22. Respuesta Histerética de sistema Bouc-Wec ($n = 0.5$) sin degradación, $R = 4, 6$ y 10 . Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

En una primera comparación entre el sistema bilineal sin degradación y el modelo Bouc-Wen sin degradación, con baja componente de suavización ($n = 5$), de manera general no se observan diferencias en la identificación, obteniendo curvas de espectrograma muy similares entre sí.

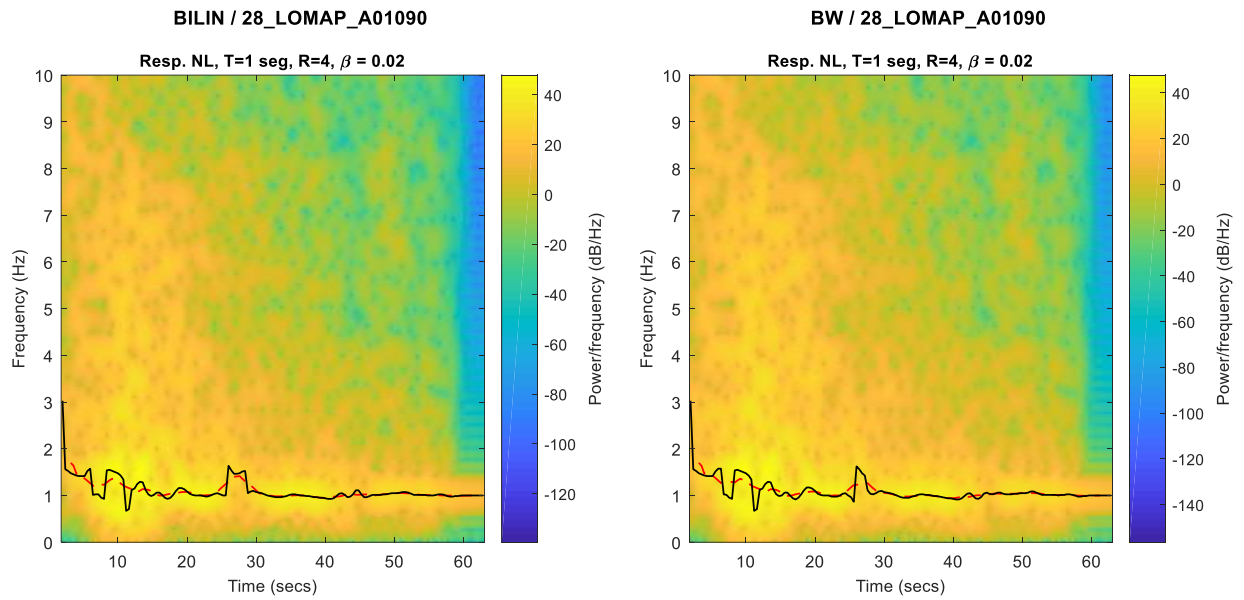


Figura V.23. Comparación de identificación sistemas Bi-Lineal (a) y Bouc-Wen $n=5$ (b) sin degradación. $R = 4$. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

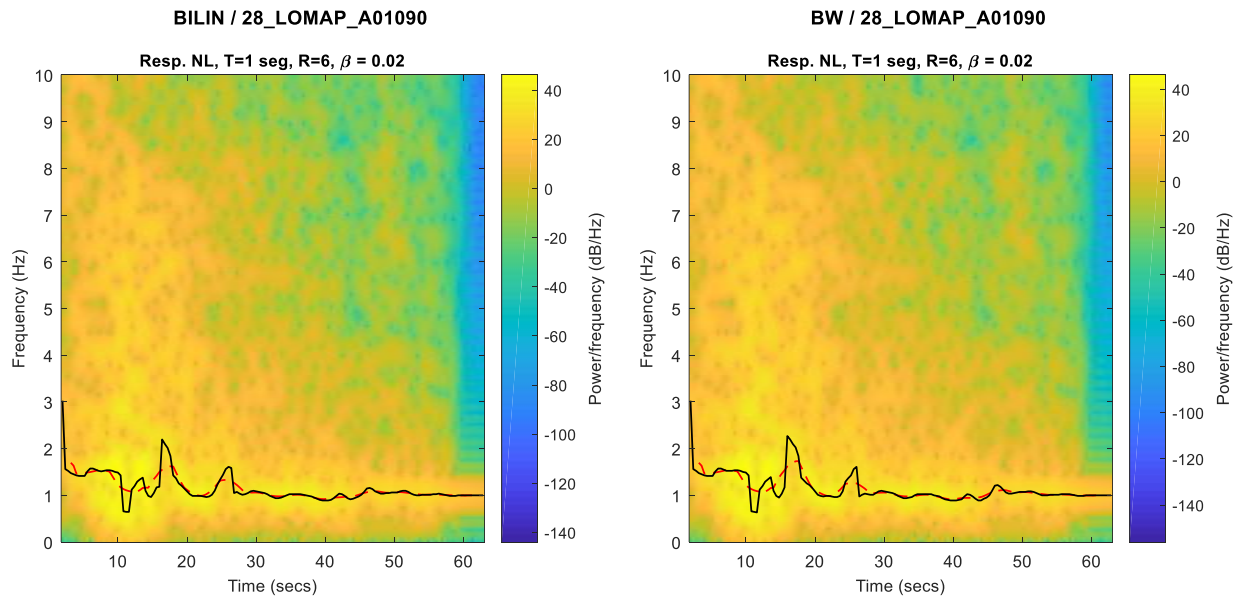


Figura V.24. Comparación de identificación sistemas Bi-Lineal (a) y Bouc-Wen $n=5$ (b) sin degradación. $R = 6$. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

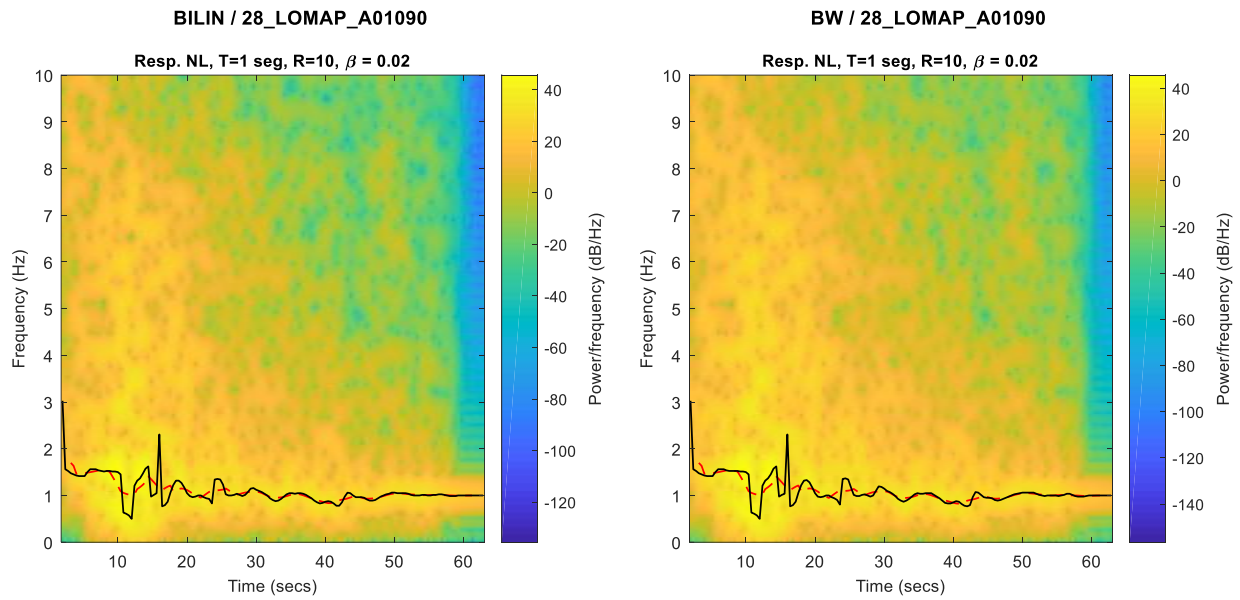


Figura V.25. Comparación de identificación sistemas Bi-Lineal (a) y Bouc-Wen $n=5$ (b) sin degradación. $R = 10$. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

En la identificación de sistemas sin degradación y con suavización persisten las observaciones descritas en la sección 3.2 asociadas al aumento en la distorsión errática de la curva del espectrograma con el aumento progresivo de “R”, y tampoco es posible asociar los resultados a una frecuencia aparente que sea representativa del nivel de incursión inelástica del sistema.

Comparando los espectrogramas obtenidos para los modelos Bouc-Wen para los distintos niveles de suavización entre ramas de respuesta ($n = 5, 1$ y 0.5) es posible observar una progresiva sensibilidad a los efectos de no-linealidad en términos del periodo aparente obtenido (menor frecuencia de espectrograma) para transiciones con mayor suavidad. Este fenómeno es igualmente observado por Martínez, Boroschek y Bilbao (2015), quienes evaluaron la influencia del nivel de suavización de un modelo Bouc-Wen en los resultados de la identificación de frecuencias aparentes a partir de espectros de potencia (PSD).

En Figura V.26, Figura V.27 y Figura V.28 se observa para distintos valores de R la influencia del parámetro “ n ” del modelo Bouc-Wen en los resultados del espectrograma, capturando de mejor manera la reducción de la frecuencia dominante de la respuesta para valores menores de “ n ”.

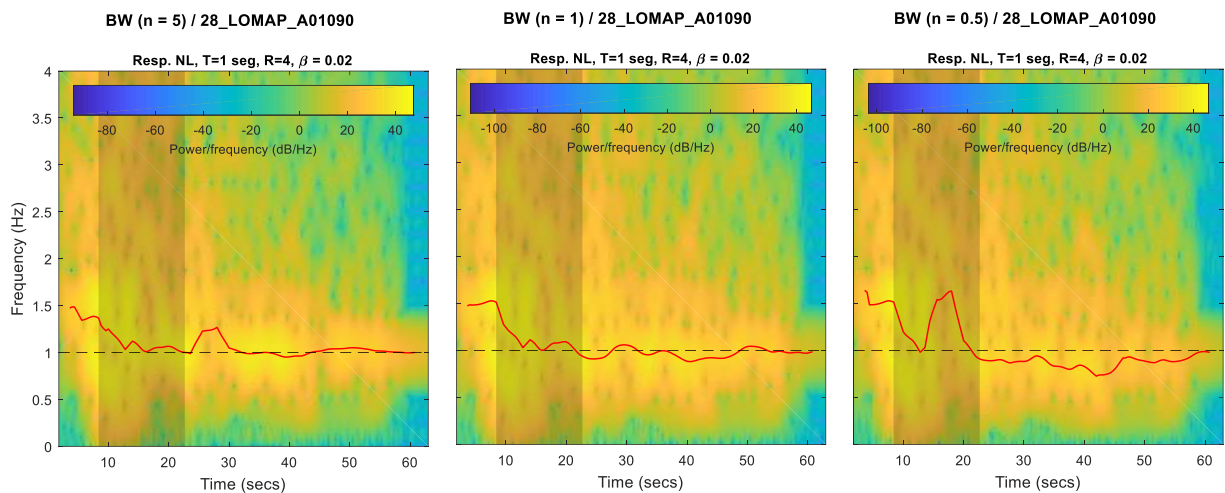


Figura V.26. Comparación de identificación sistemas Bouc-Wen sin degradación, con $n=5$ (a), $n=1$ (b) y $n=0.5$ (c). $R = 4$. $T_{el} = 1.0$ seg, $\beta = 2.0$ %. GM: 28_LOMAP_A01090. Línea roja continua: Identificación del Espectrograma.

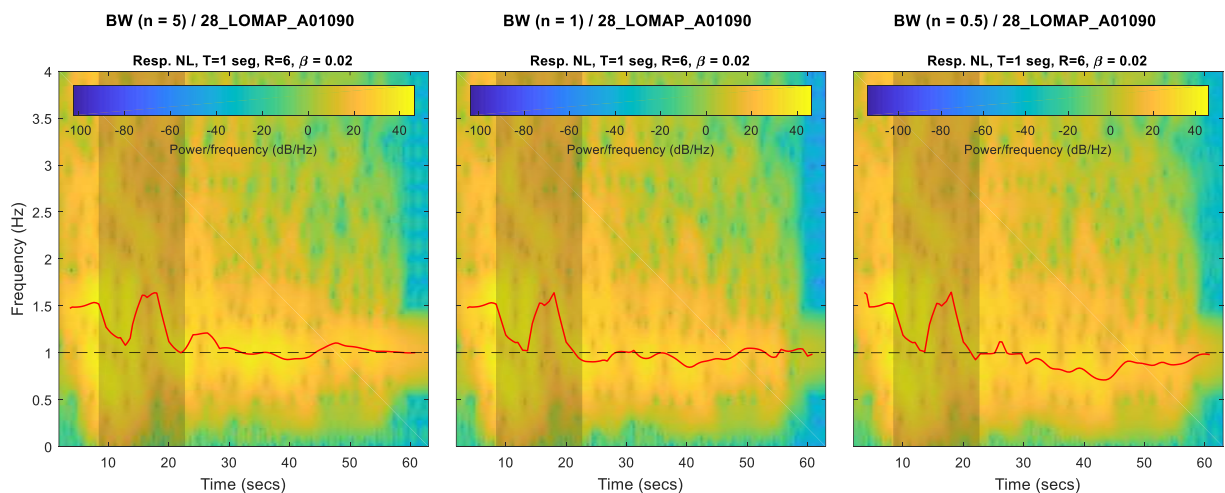


Figura V.27. Comparación de identificación sistemas Bouc-Wen sin degradación, con $n=5$ (a), $n=1$ (b) y $n=0.5$ (c). $R = 6$. $T_{el} = 1.0$ seg, $\beta = 2.0$ %. GM: 28_LOMAP_A01090. Línea roja continua: Identificación del Espectrograma.

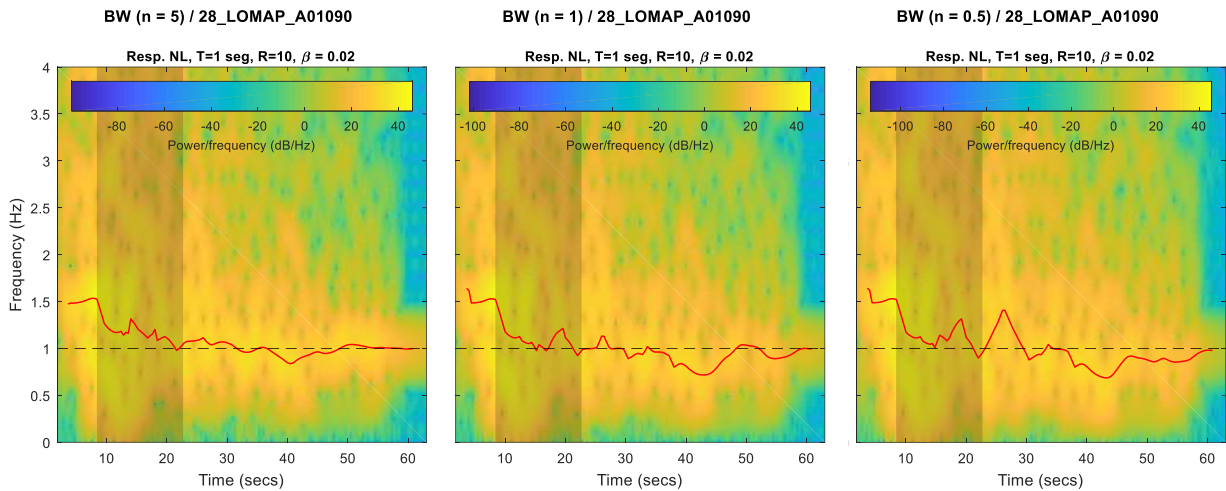


Figura V.28. Comparación de identificación sistemas Bouc-Wen sin degradación, con $n=5$ (a), $n=1$ (b) y $n=0.5$ (c). $R = 10$. $T_{el} = 1.0$ seg, $\beta = 2.0$ %. GM: 28_LOMAP_A01090. Línea roja continua: Identificación del Espectrograma.

Analizando modelos suavizados con componentes de degradación de rigidez y efecto “pinching” (Figura V.30 y Figura V.31), se observan resultados similares a los obtenidos con los modelos multi-lineales. La identificación en base a metodologías de espacio-frecuencia resultan ser especialmente sensibles ante los efectos de degradaciones de rigidez del sistema con una clara reducción en la frecuencia predominante en la respuesta (Figura V.32), al contrario de los efectos no-lineales abruptos como los fuertes cambios de rigidez de los modelos bi-lineal sin degradación, o el modelo con fuerte componente de “pinching” (Figura V.31), que reflejan en los resultados únicamente mayores niveles de distorsión y fluctuaciones en torno a la frecuencia asociada a las propiedades iniciales-elásticas.

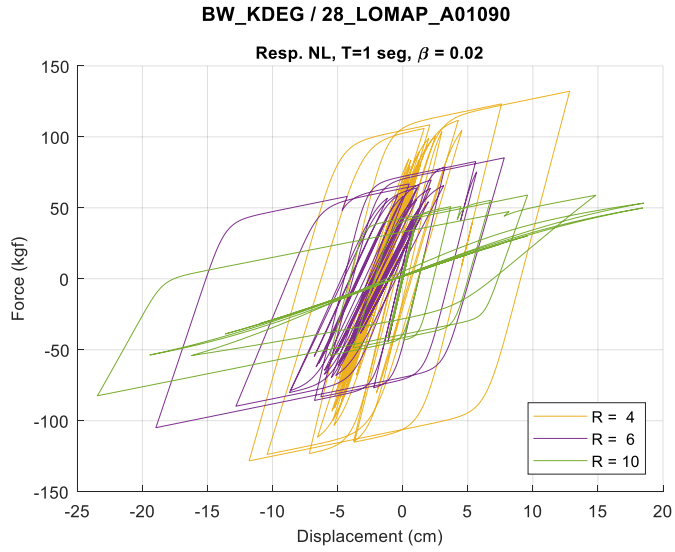


Figura V.29. Respuesta Histerética de sistema Bouc-Wec con degradación de rigidez, R = 4, 6 y 10. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

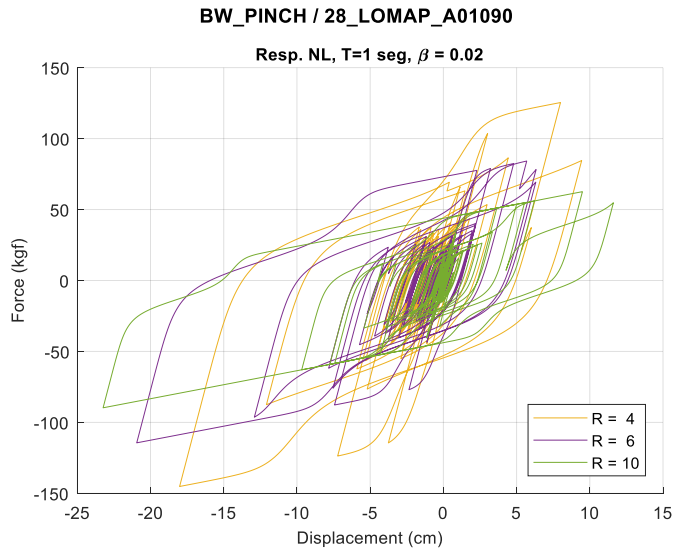


Figura V.30. Respuesta Histerética de sistema Bouc-Wen con pinching, R = 4, 6 y 10. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

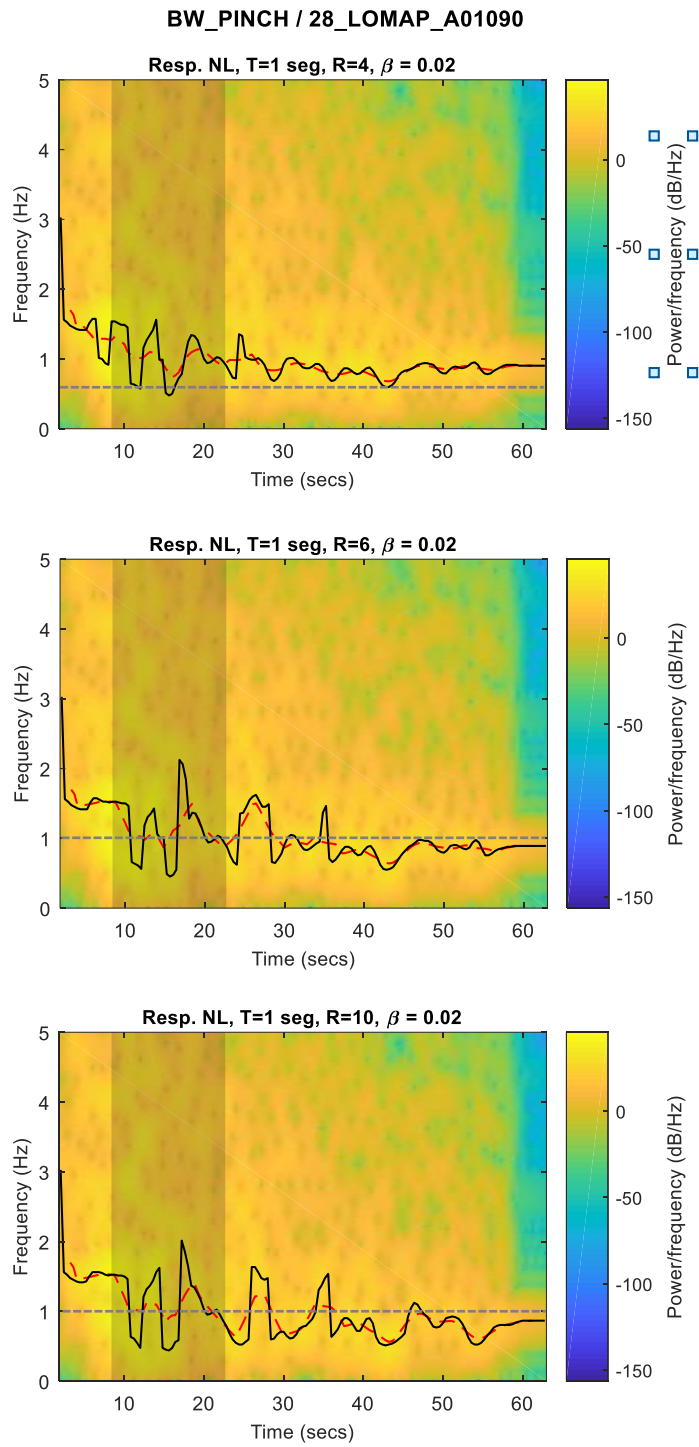


Figura V.31. Identificación de sistemas Bouc-Wen con componente de “pinching”. (a) R = 4, (b) R = 6, (c) R = 10. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

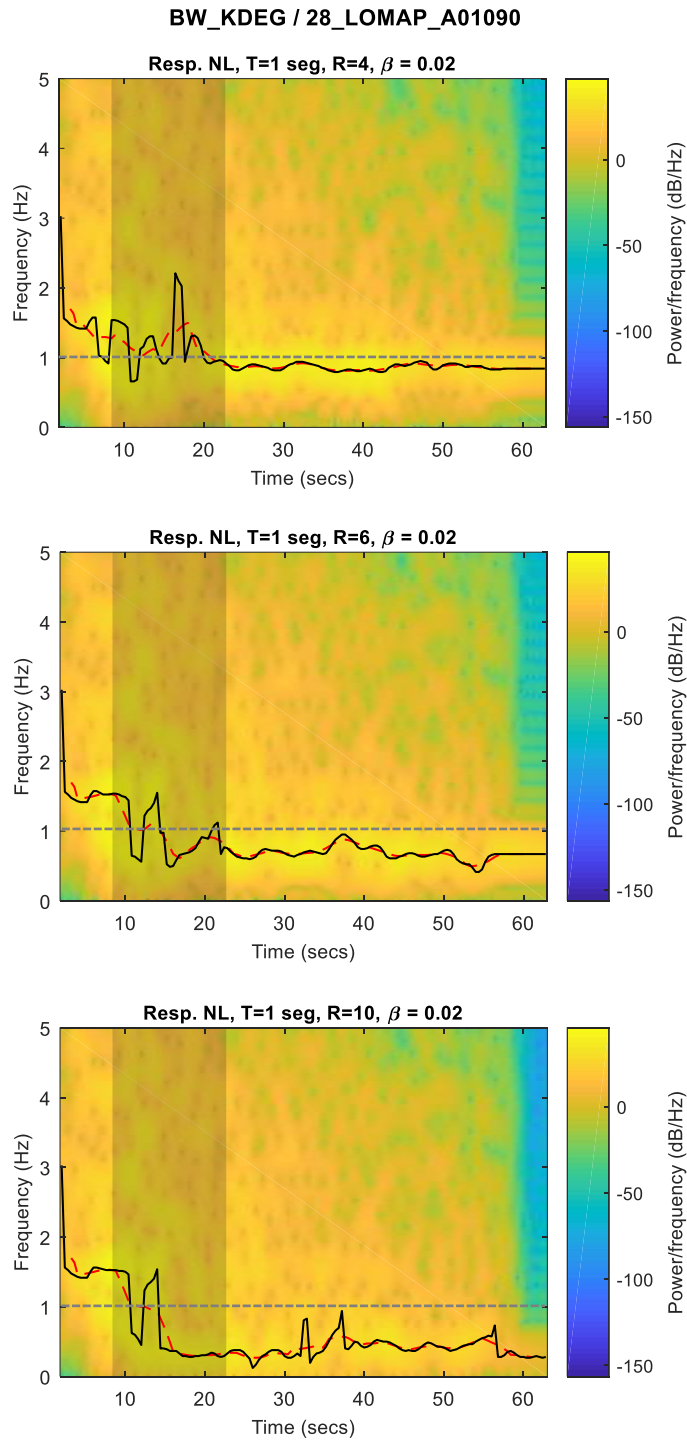


Figura V.32. Identificación de sistemas Bouc-Wen con degradación de rigidez. (a) R = 4, (b) R = 6, (c) R = 10. Periodo elástico de 1.0 seg, razón de amortiguamiento crítico de 2.0 %. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

V.4. Identificación en base a Análisis Bayesiano

En esta sección se implementan análisis de tipo bayesiano orientados a ajustar modelos lineales-elásticos a la respuesta de los sistemas no-lineales en estudio.

Hay dos enfoques de aplicación de este método en el presente estudio. Por una parte, se tiene por objetivo estimar la elongación del periodo aparente en base a una identificación de un sistema lineal cuyas propiedades dinámicas efectivas sean representativas de la respuesta no-lineal. Para esto, el ajuste bayesiano se realiza sobre la fase fuerte de la respuesta del sistema definida por el segmento de respuesta que concentre una porción importante de la energía ingresada al sistema, calculada en base a la Intensidad de Arias acumulativa.

Por otro lado, y acorde con el enfoque abordado por los métodos de identificación de espacio-frecuencia, se implementa el método de ajuste bayesiano por ventanas móviles, con el objetivo de analizar la evolución de las propiedades dinámicas efectivas en el tiempo.

4.1. Implementación del Método para Fase Fuerte de Respuesta

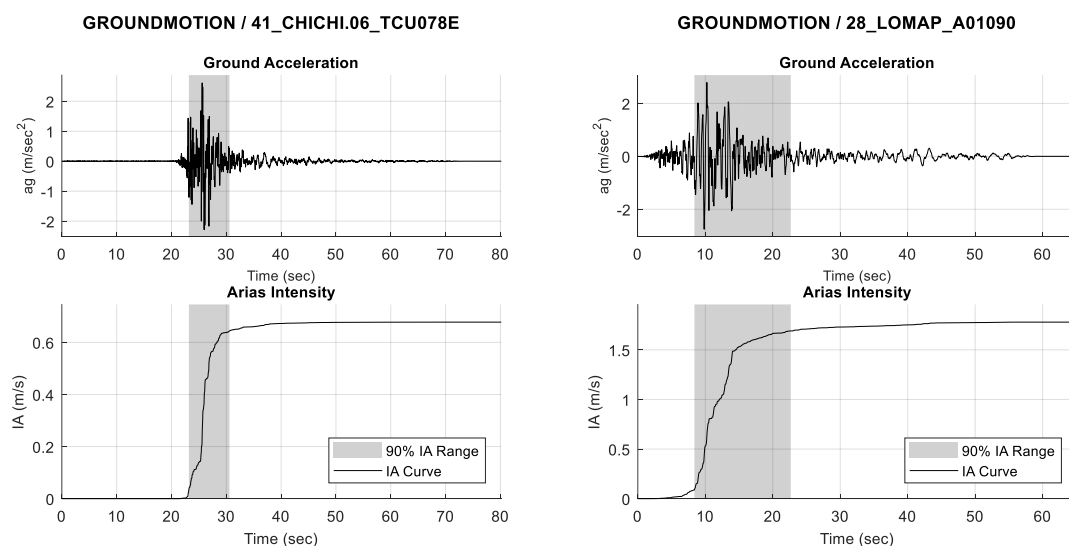
En este enfoque la idea principal se centra en la linealización equivalente de la respuesta no-lineal en términos del ajuste de la respuesta en aceleraciones relativas. Esta representatividad se desea que sea garantizada en la fase de la respuesta en que el comportamiento no-lineal se encuentre mayormente presente. Para esto, se define la fracción de respuesta de interés como el segmento de tiempo que logra acumular el 90% de la Intensidad de Arias total medido del registro sísmico, dejando porciones iguales de un 5% por cada lado. Este segmento de respuesta es denominado como “Fase Fuerte” de la respuesta, y se encuentra asociado al periodo del registro en que se ingresa la mayor cantidad de energía al sistema.

Para la implementación de este método se toman en consideración los aspectos descritos a continuación.

- a) Se calcula la Intensidad de Arias acumulativa del registro sísmico, dando un corte al segmento de excitación que cubre el 90% de su magnitud máxima, dejando fuera porciones iguales de un 5% antes y después de la denominada “Fase Fuerte”.
Se espera que este segmento contenga la mayor parte de incursiones inelásticas del sistema no-lineal a priori desconocido.

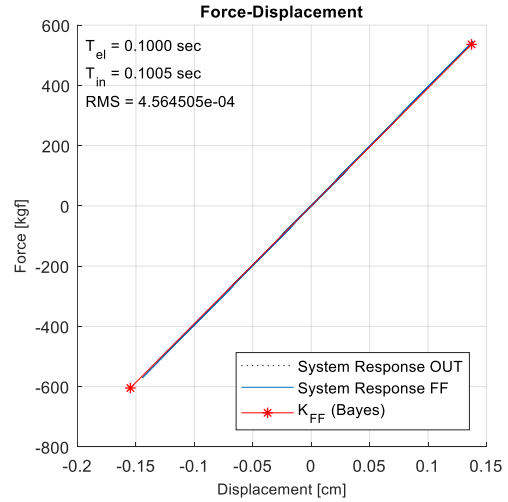
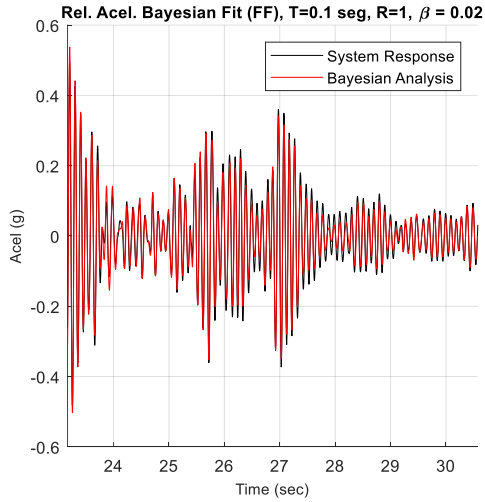
- b) Se realiza un primer ajuste a los 0.5 seg iniciales del registro sísmico, segmento de respuesta en que la excitación es menor. Con esto se espera determinar los parámetros dinámicos que representen la respuesta inicial (lineal-elástica) con la idea se definir una función de probabilidad acotada de cada variable como conocimiento previo a la identificación en fase fuerte (funciones “prior”).
- c) Del paso anterior se definen las funciones de densidad de probabilidad que describen cada variable del sistema. Esta se define por una media (estimada en punto anterior) y por una desviación en primera instancia muy grande para dar un amplio rango de búsqueda para el método. Para el caso de las variables que definen las condiciones iniciales en desplazamiento y velocidad del sistema, se asumen cercanas a cero, igualmente con dispersión amplia.
- d) Mediante el análisis Bayesiano se determina las propiedades de rigidez y amortiguamiento efectivo de un sistema-lineal que minimice el error cuadrático medio entre la respuesta medida y modelada en aceleraciones relativas.

A modo de ejemplificación y validación de resultados se aplica este método para la respuesta de sistemas lineal-elásticos, masa unitaria, razón de amortiguamiento crítico de un 2.0% y un periodo fundamental de 0.1, 1.0 y 2.5 seg, para el sismo de Chi-Chi, Taiwan del 25 de septiembre del 1999, registrado en la estación TCU078E (41_CHICHI.06_TCU078E), y para el sismo de Loma Prieta del 18 de agosto del año 1989, registrado en la estación A01090 (28_LOMAP_A01090).

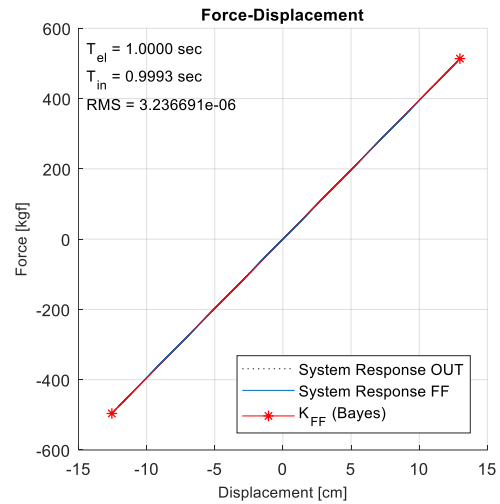
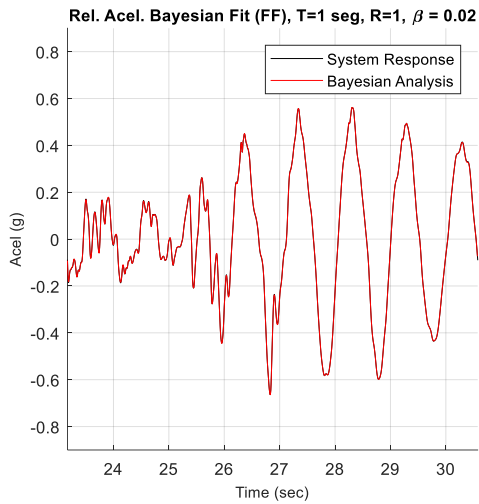


**Figura V.33. Registro de aceleraciones sísmicas (arriba) y curva acumulada de Intensidad de Arias (abajo).
Izquierda: Chi-Chi Taiwan 25-09-1999, Derecha: Loma Prieta 18-10-1989.**

DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E



DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E



DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E

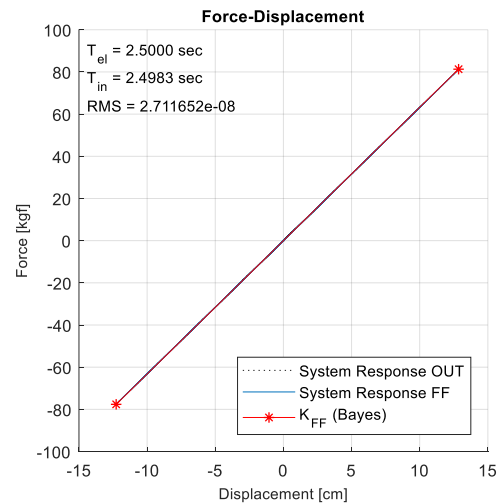
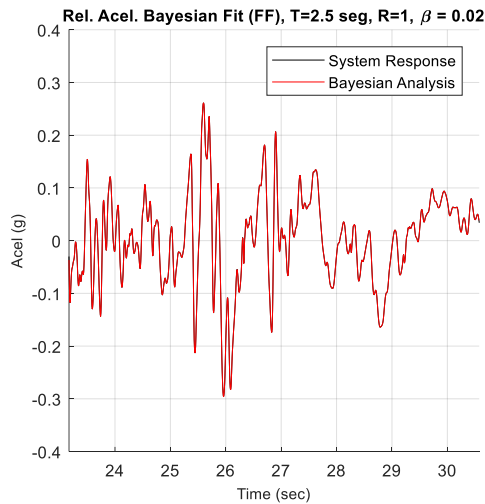
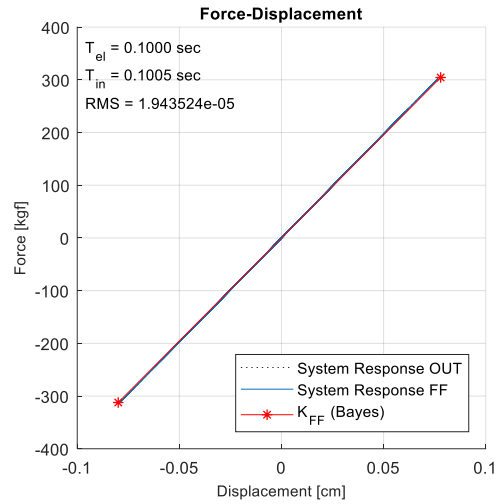
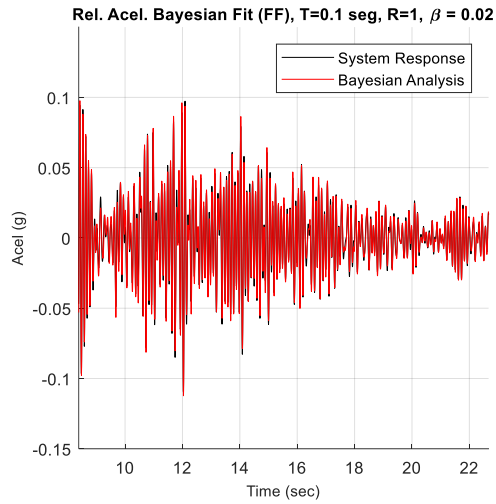
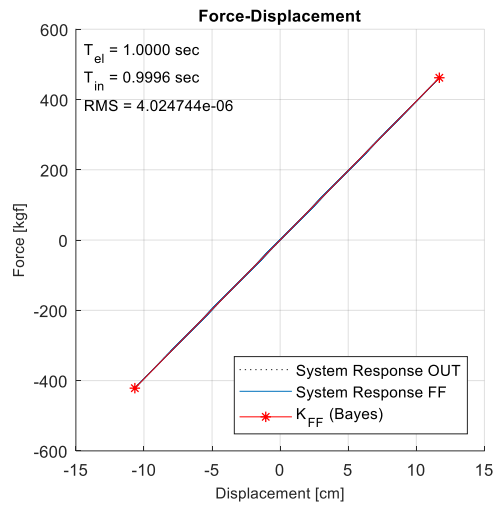
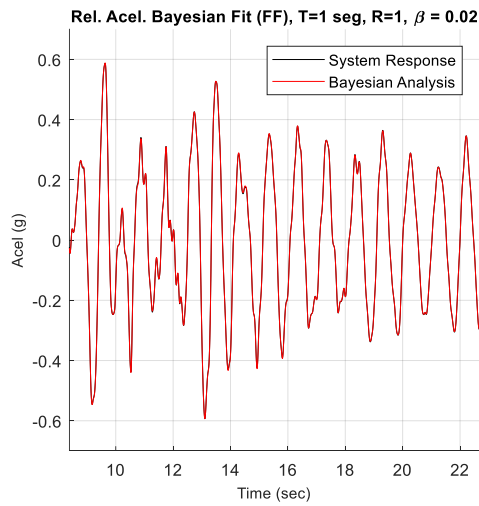


Figura V.34. Ajuste Bayesiano de fase fuerte de sistemas $T_{el} = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg.
Registro Sísmico 41_CHICHI.06_TCU078E.

DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090



DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090



DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090

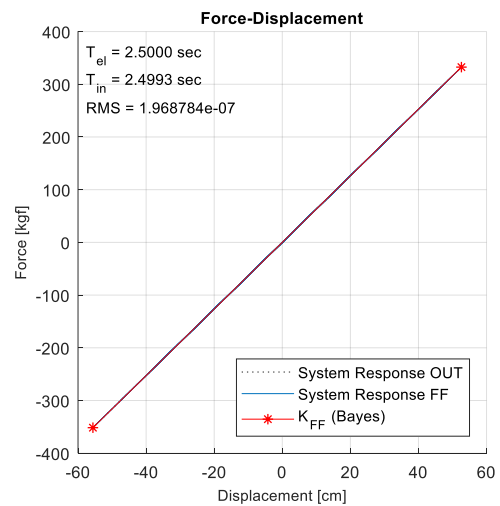
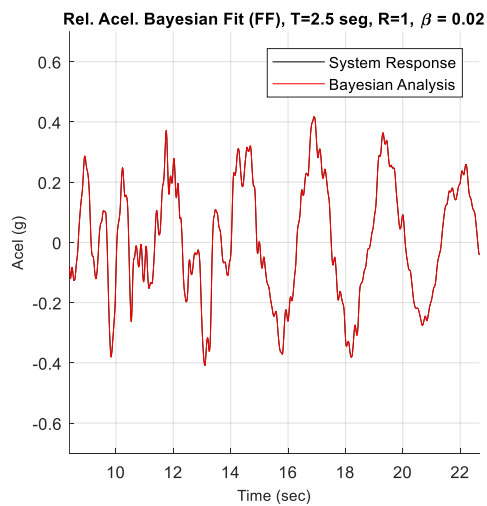


Figura V.35. Ajuste Bayesiano de fase fuerte de sistemas $T_{el} = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg.
 Registro Sísmico 28_LOMAP_A01090.

De este primer proceso de identificación sobre sistemas puramente lineales es posible validar su efectividad para los casos tratados (Figura V.34 y Figura V.35), cubriendo un abanico de casos en que el sistema es muy rígido ($Tel = 0.1$ seg), hasta sistema de elevada flexibilidad ($Tel = 2.5$ seg). Para todos estos casos se demostró un gran acercamiento a las propiedades reales del sistema.

Fueron seleccionados dos registros sísmicos para esta primera demostración, cuya diferencia radica en la longitud del segmento de tiempo (fase fuerte de la respuesta) a ajustar por la metodología de identificación. En casos en que la fase fuerte de la respuesta se extiende por mayores segmentos de tiempo, normalmente el sistema cursa intermitentemente procesos en respuesta lineal y no-lineal. Cuando los segmentos de respuesta lineal son mayoritarios dentro de la fase fuerte, las propiedades lineales se hacen ponderantes, y los resultados de la identificación adoptan una tendencia hacia dichas propiedades.

4.2. Implementación del Método para Seguimiento de Propiedades Efectivas

La diferencia técnica entre los dos enfoques de aplicación del método radica en que para el primer caso se aplica un único proceso de identificación, mientras que, en caso de contar con ventanas de tiempo, se realiza una identificación sucesiva en que se alternan las variables identificadas pasando de función “posterior” a función “prior”. Las etapas de aplicación se resumen a continuación.

- a) El tamaño de ventana fue definido por un segmento de tiempo de longitud constante considerado de 4.0 seg, y el traslapo entre ventanas igualmente constante es fijado en un 50%. Estas definiciones fueron ajustadas en función de los modelos no-lineales estudiados, y la calidad y resolución de los resultados obtenidos del análisis.
- b) Independientemente de la longitud de las ventanas definidas, se realiza un primer ajuste a los 0.5 seg iniciales del registro sísmico, segmento de respuesta en que la excitación es menor. Con esto se espera determinar los parámetros dinámicos que representen la respuesta inicial (lineal-elástica).
- c) Para la primera ventana de tiempo analizada, se define para cada variable del problema una función de probabilidad (“prior”) a partir de los datos identificados en el punto anterior.
 - Las variables de rigidez y amortiguamiento se definen como una distribución gaussiana, con una amplia dispersión del orden de 10 veces la media.

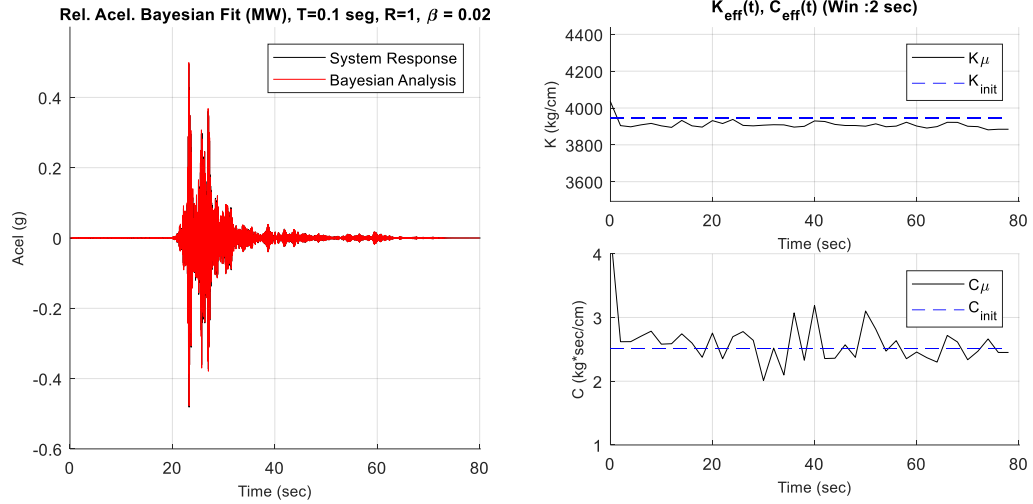
- El sistema se considera en reposo, con desplazamiento y velocidad inicial nulos, y definidos con un rango menor de dispersión.
- d) En cada ventana de identificación se obtienen las propiedades del sistema lineal equivalente (rigidez y amortiguamiento) que más se ajustan su respuesta a las mediciones del sistema no lineal, y las magnitudes de las condiciones iniciales (desplazamiento y velocidad) asociadas (“posterior”).
- e) Para cada identificación de un segmento de tiempo siguiente, se toman como parámetro previamente conocido las variables de ajuste del segmento anterior. Así, para este nuevo segmento, las funciones “prior” se definen por la función “posterior” del segmento de identificación anterior.

El nivel de dispersión de estas nuevas funciones “prior” son artificialmente aumentadas con la idea de evitar la convergencia en óptimos locales y anteponerse además a las variaciones de las propiedades óptimas en el tiempo.

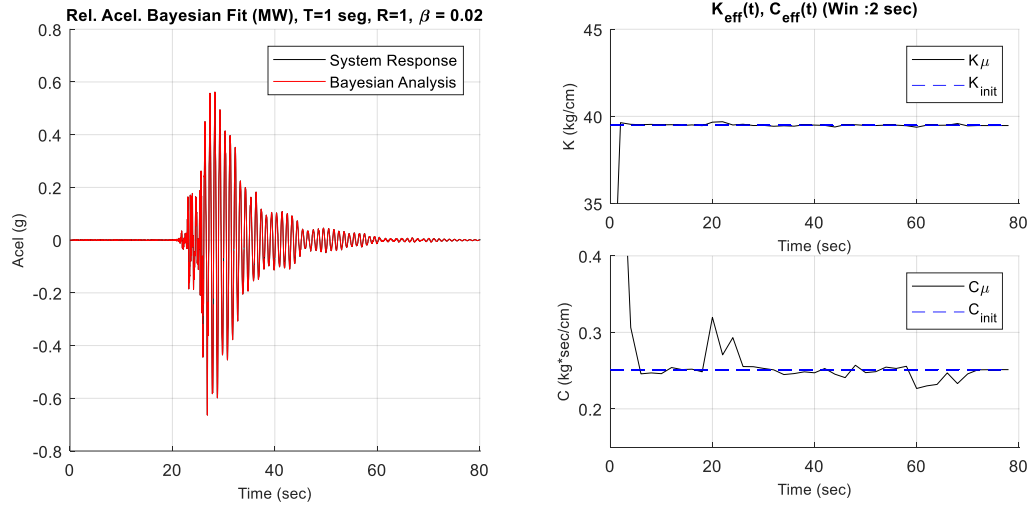
Se ejemplifica nuevamente en base a los mismos casos analizados anteriormente. Se aplica este método para la respuesta de sistemas lineal-elásticos, masa unitaria, razón de amortiguamiento crítico de un 2.0% y un periodo fundamental de 0.1, 1.0 y 2.5 seg, para el sismo de Chi-Chi, Taiwan del 25 de septiembre del 1999, registrado en la estación TCU078E (41_CHICHI.06_TCU078E), y para el sismo de Loma Prieta del 18 de agosto del año 1989, registrado en la estación A01090 (28_LOMAP_A01090).

De estos primeros resultados expuestos se observa un buen nivel de ajuste de la respuesta del sistema en aceleraciones relativas, al igual que la identificación de las propiedades reales del sistema lineal. Mayor ruido se observa en el seguimiento del amortiguamiento del sistema, fluctuando en el peor de los casos a magnitudes del orden de un 20% de las reales. En general, para el uso práctico de este enfoque de identificación, se recomienda el uso de algún tipo de suavización de los resultados con el fin de reducir estas fluctuaciones erráticas, con el cuidado de no intervenir fuertemente en las variaciones identificadas eliminando la información de interés.

DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E



DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E



DATA_ALL_BILIN / 41_CHICHI.06_TCU078E

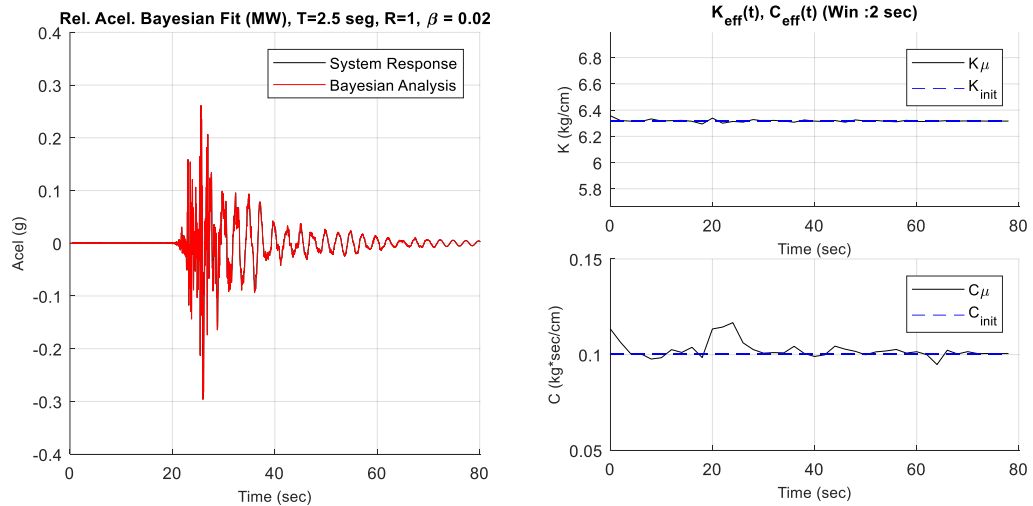
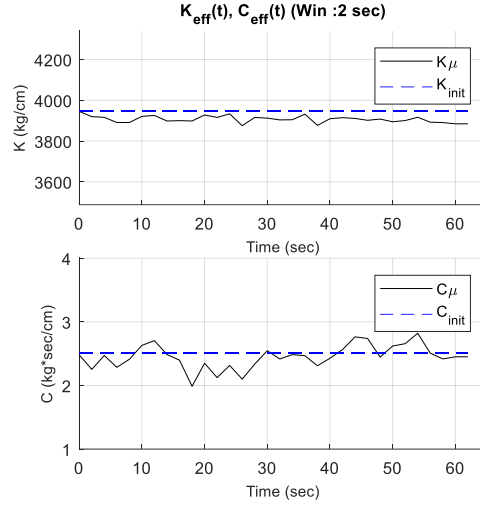
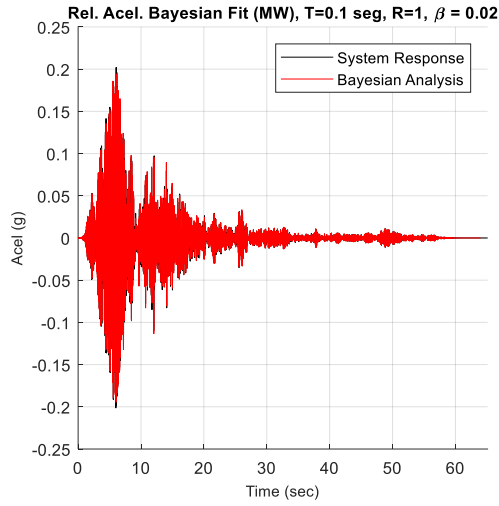
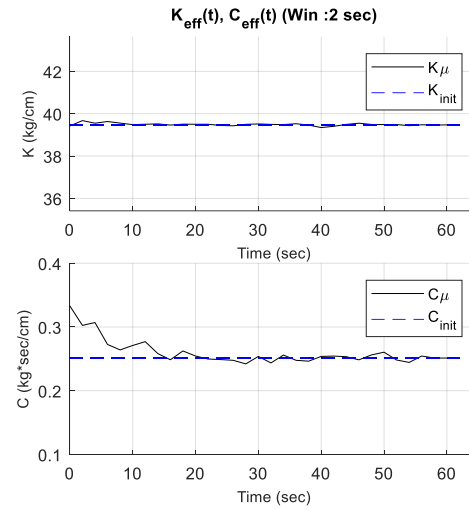
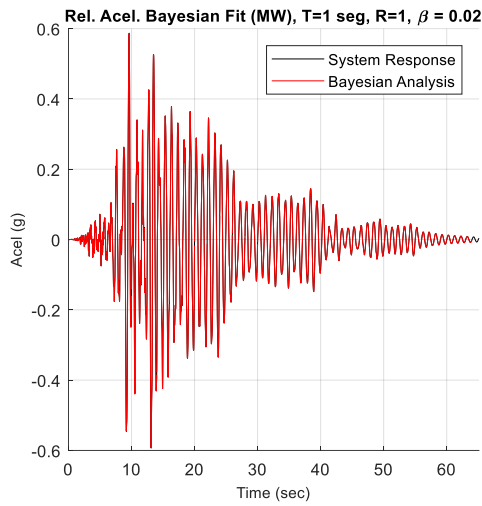


Figura V.36. Ajuste Bayesiano por ventanas móviles de sistemas $Tel = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg.
Registro Sísmico 41_CHICHI.06_TCU078E.

DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090



DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090



DATA_ALL_BILIN / 28_LOMAP_A01090

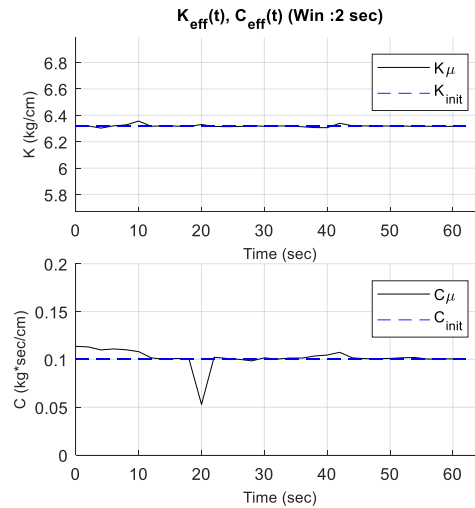
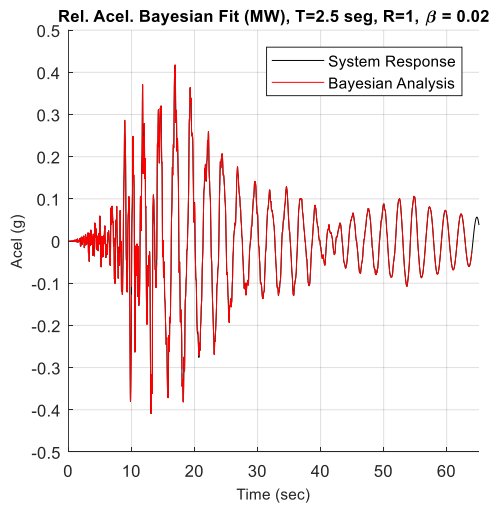


Figura V.37. Ajuste Bayesiano por ventanas móviles de sistemas $Tel = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg.
Registro Sísmico 28_LOMAP_A01090.

4.3. Identificación en Modelo Bi-lineal sin Degradación

En primer lugar, se revisa la aplicación del método sobre la respuesta de modelos bi-lineales sin degradación. Para los mismos registros sísmicos y sistema considerados anteriormente se definen cuatro modelos bi-lineales diferenciados por magnitudes del factor de reducción de la máxima fuerza elástica, “R”. Las respectivas respuestas histeréticas de Fuerza-Desplazamiento se presentan a continuación.

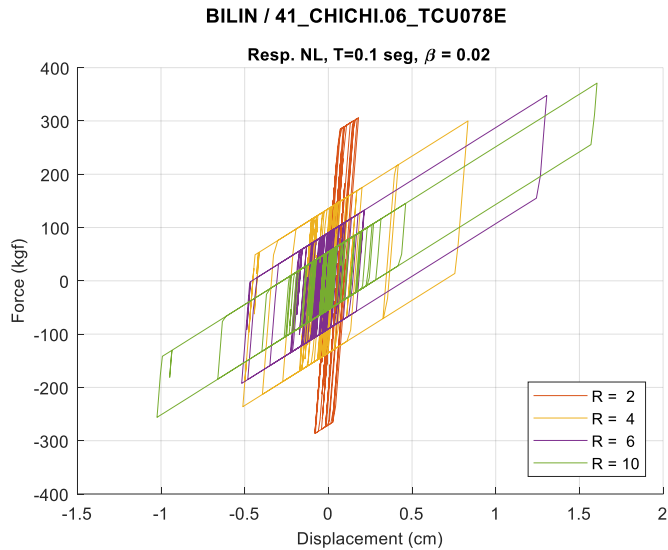


Figura V.38. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 0.1 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

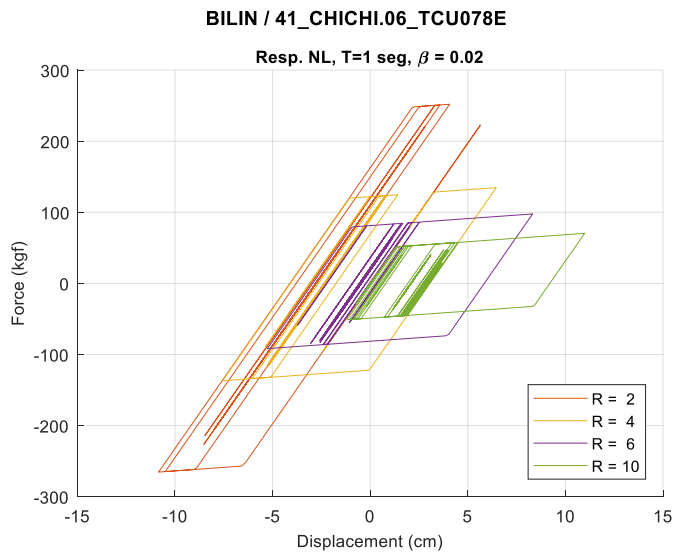


Figura V.39. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 1.0 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

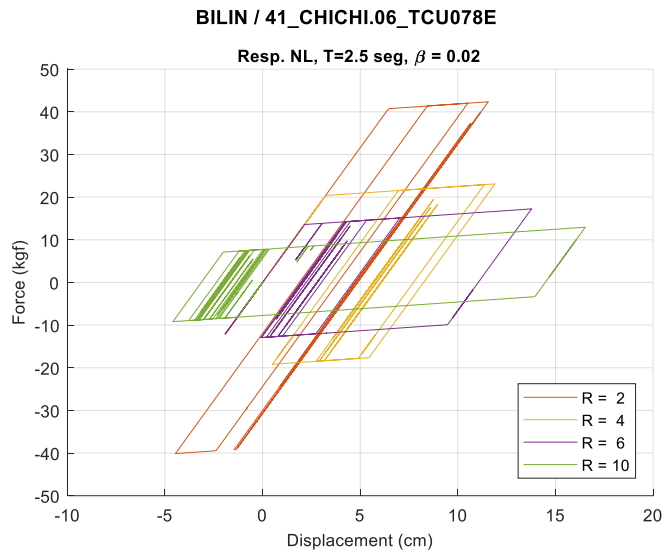


Figura V.40. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 2.5 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

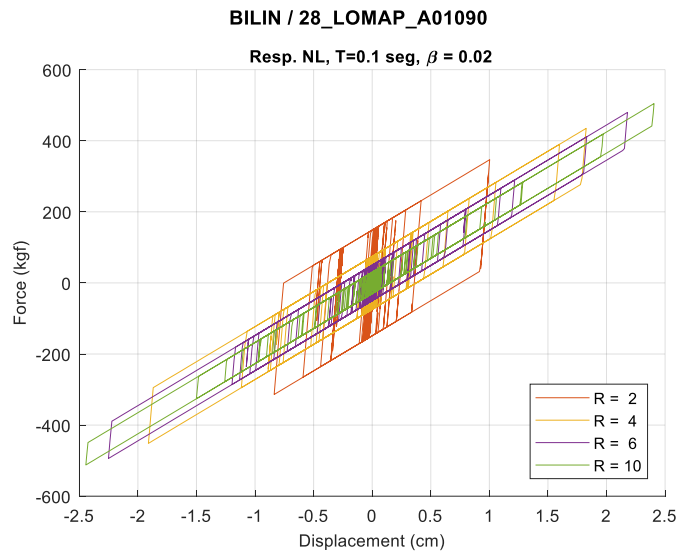


Figura V.41. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 0.1 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

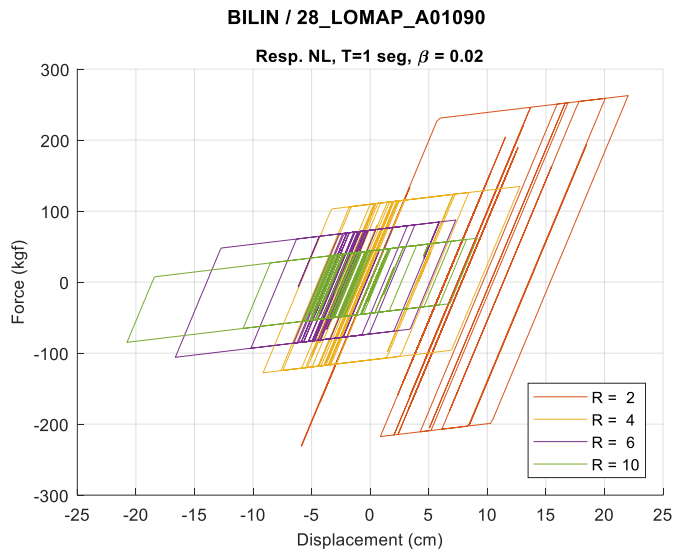


Figura V.42. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 1.0 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

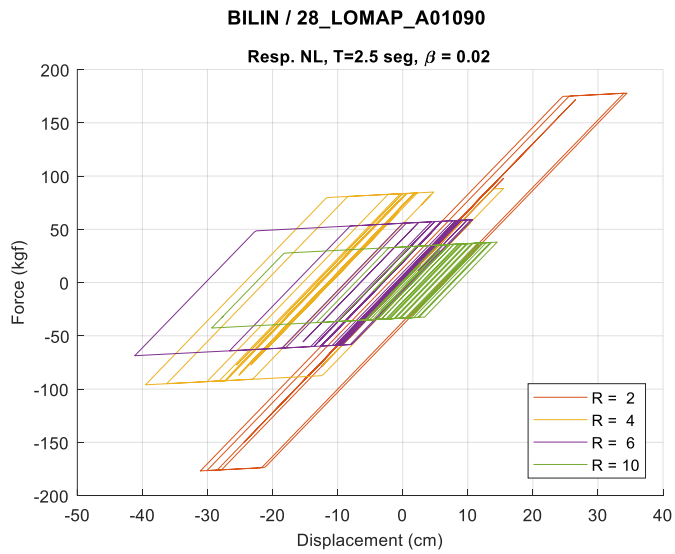


Figura V.43. Respuesta histerética de sistema bilineal sin degradación. Tel = 2.5 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

A continuación, se presentan los resultados del ajuste Bayesiano para la identificación de cada uno de los sistemas no-lineales presentados.

4.3.1 Identificación en Fase Fuerte

(a) 41_CHICHI06_TCU078E, Tel = 0.1 seg.

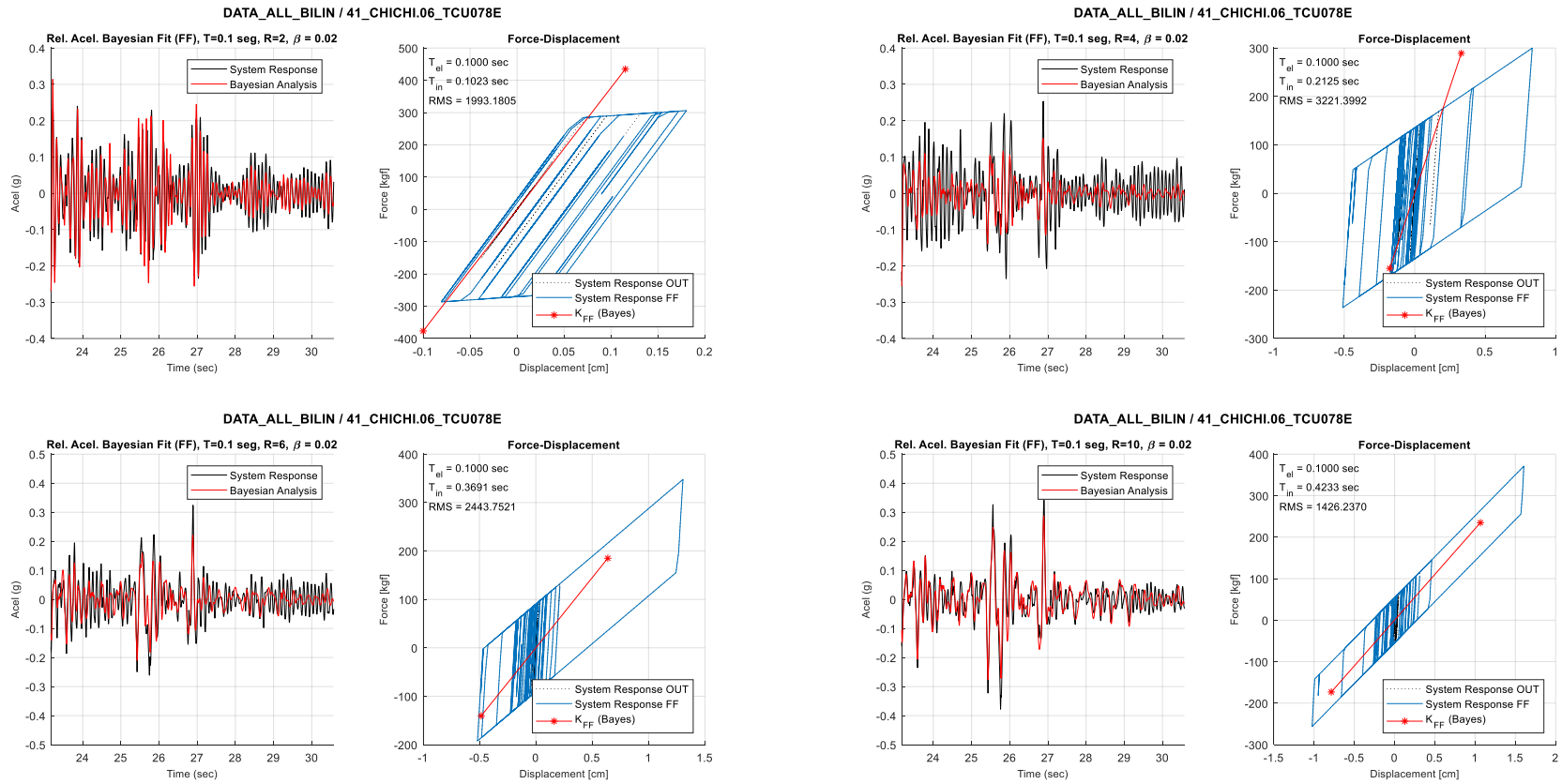


Figura V.44. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 0.1 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E, $T_{el} = 1.0$ seg.

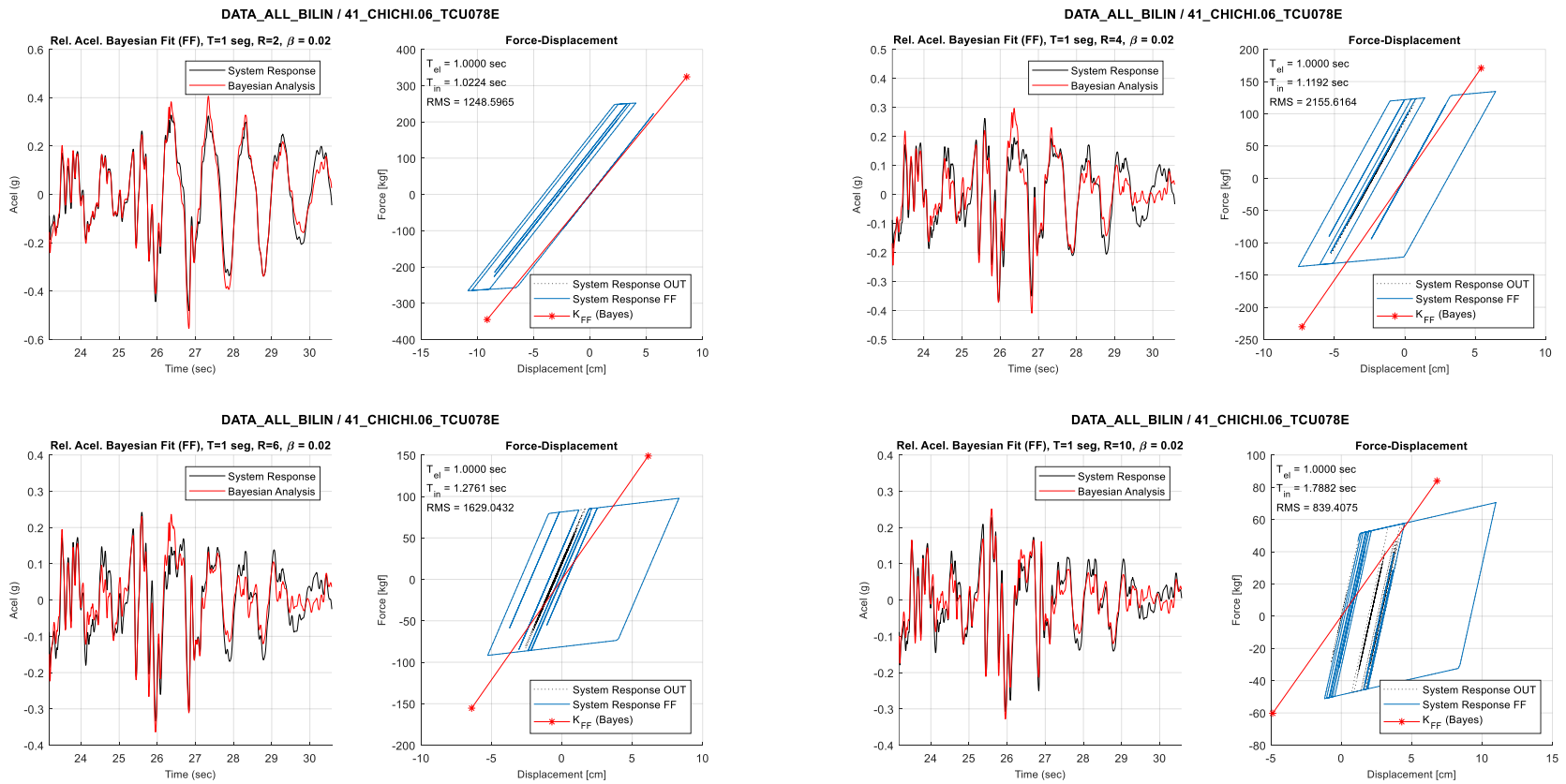


Figura V.45. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E, $T_{el} = 2.5$ seg.

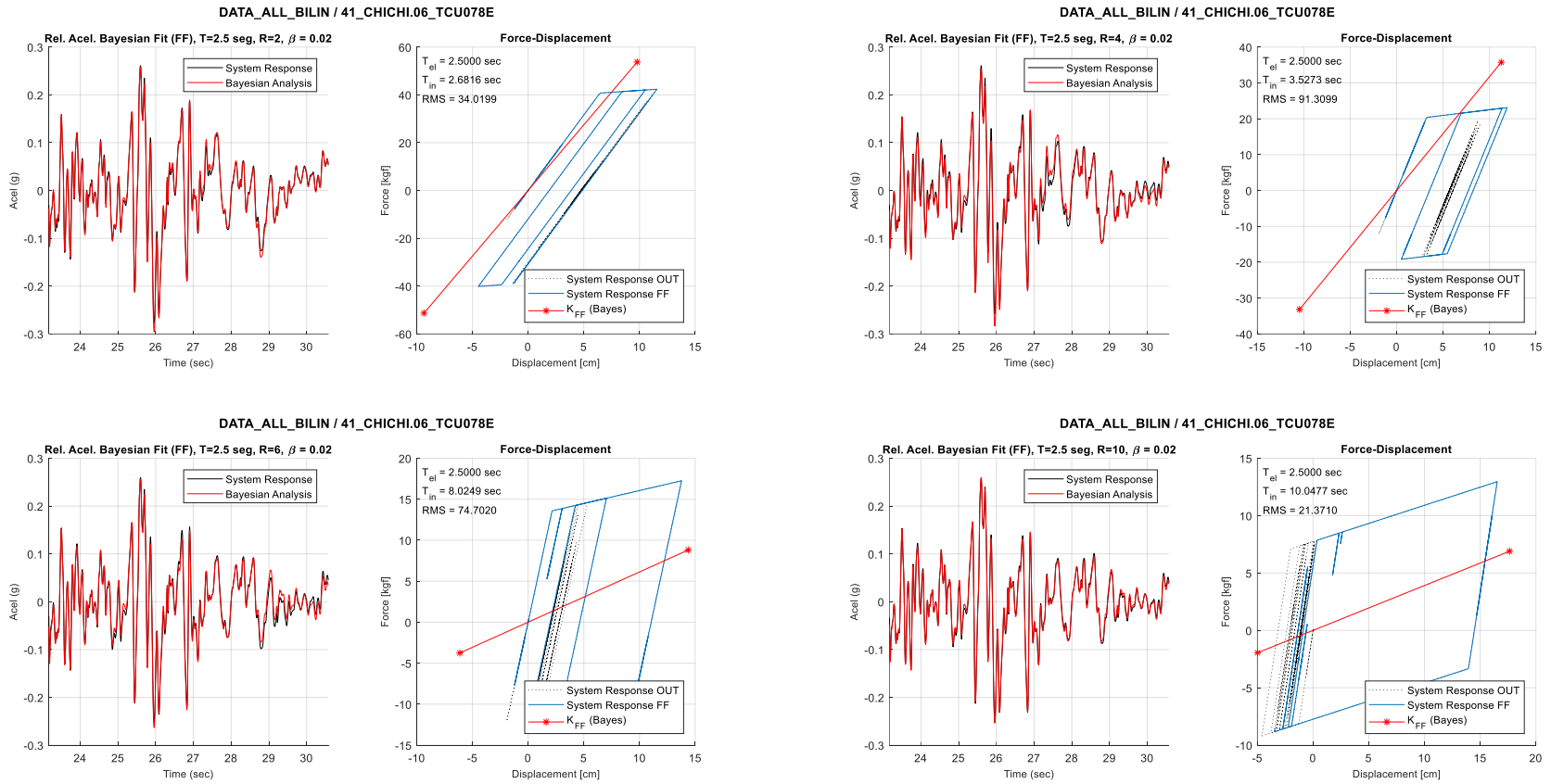


Figura V.46. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090, Tel = 0.1 seg.

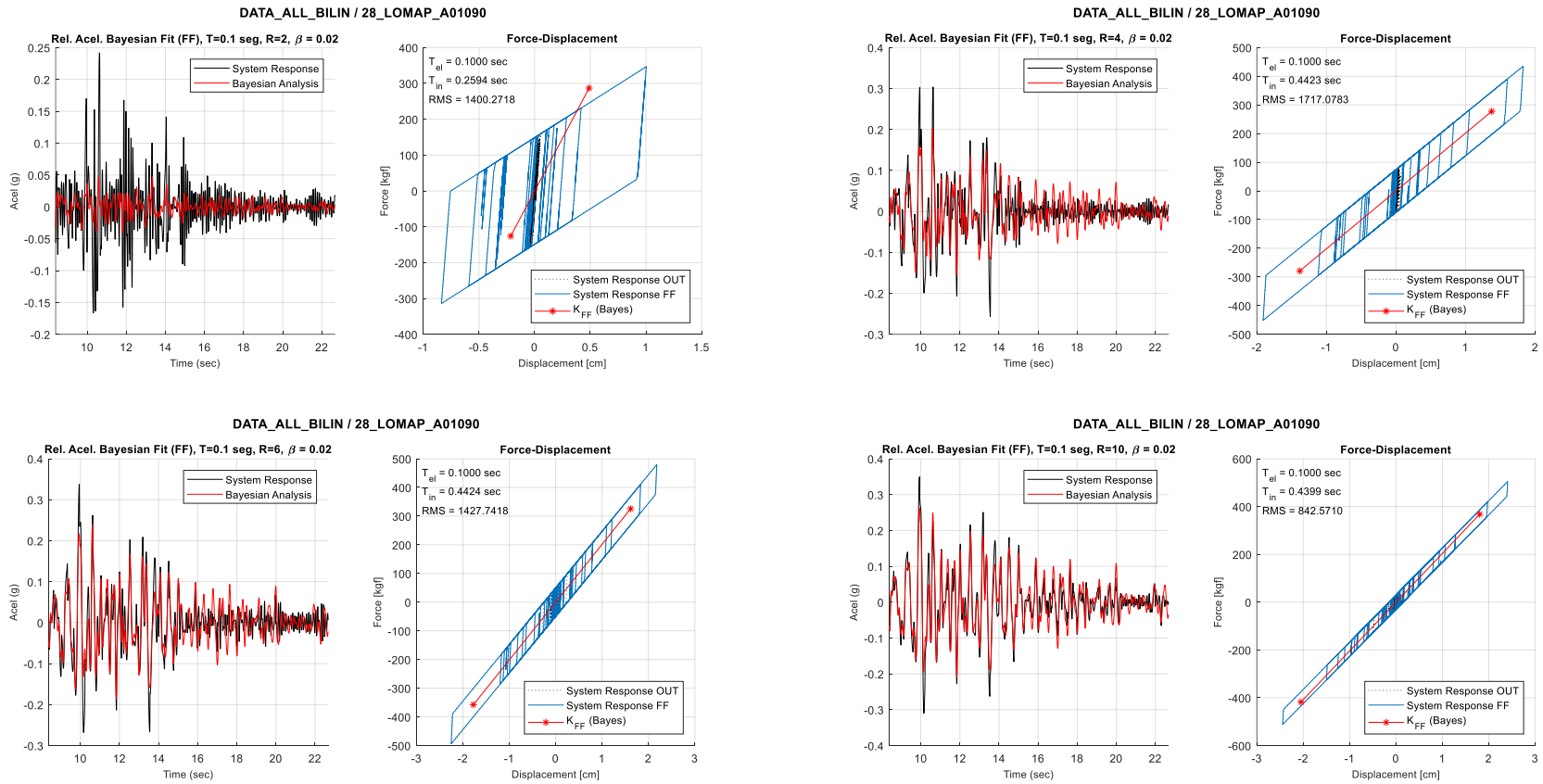


Figura V.47. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 0.1 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090, $T_{el} = 1.0$ seg.

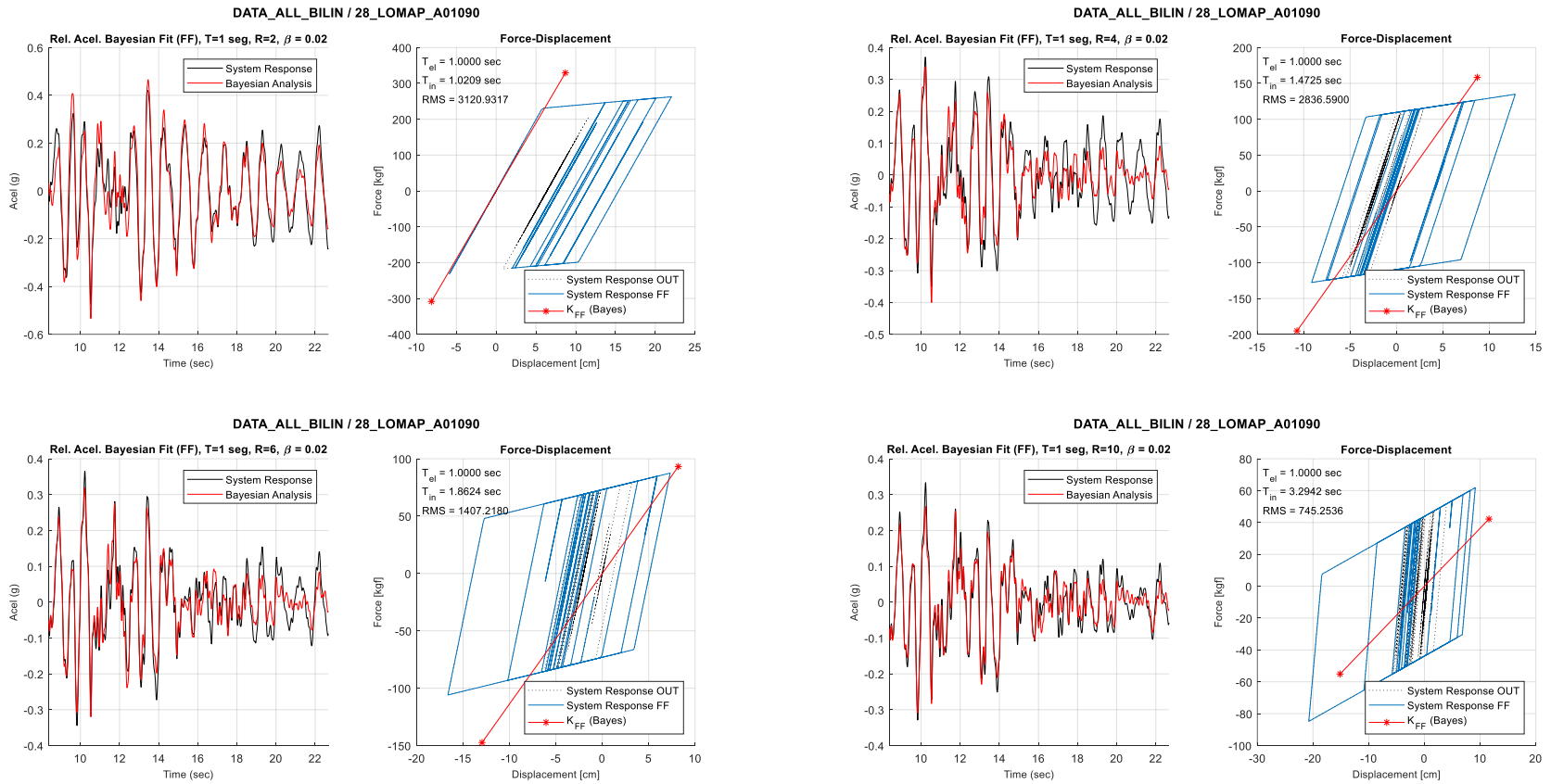


Figura V.48. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090, Tel = 2.5 seg.

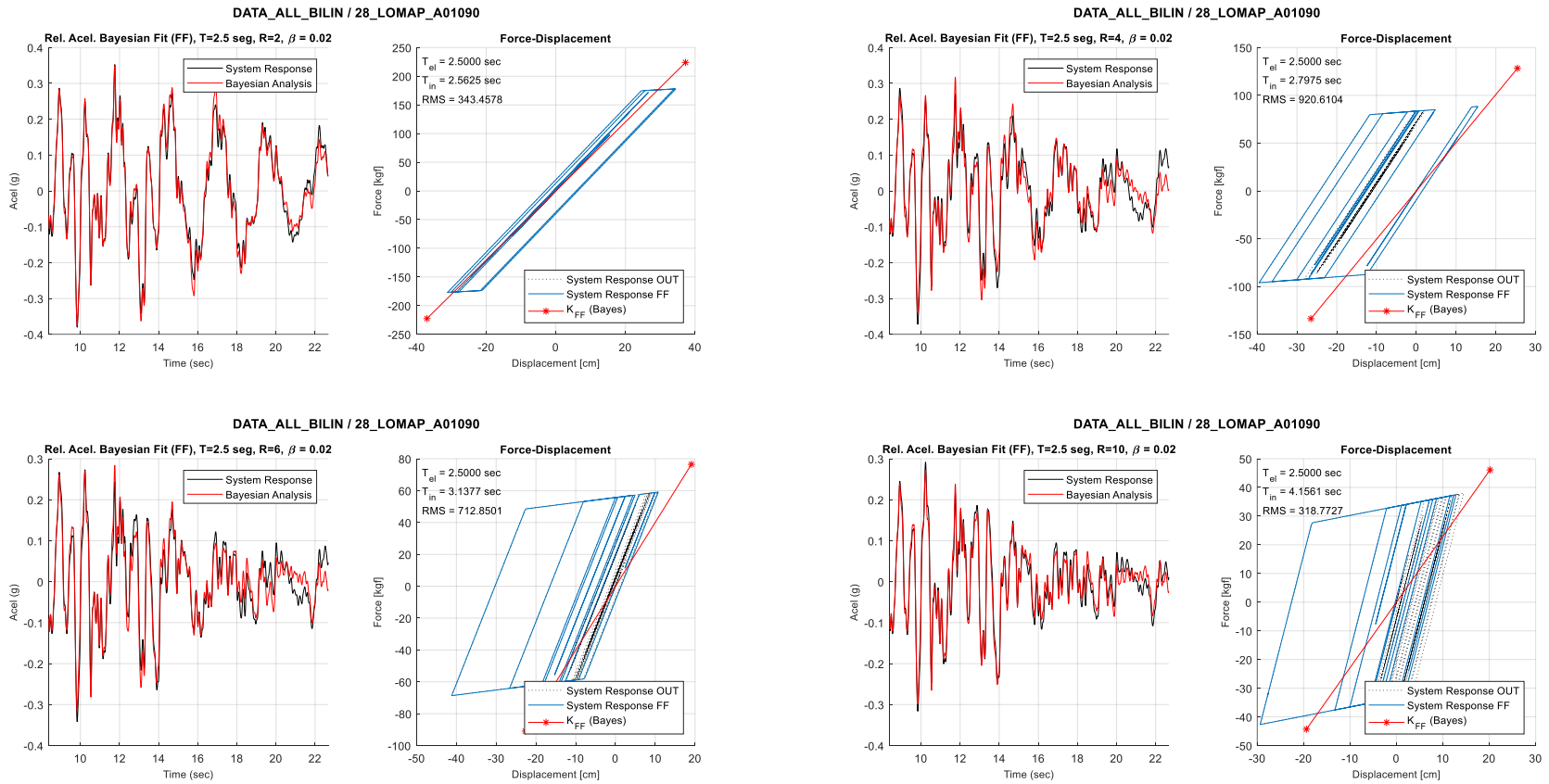


Figura V.49. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 2.5 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 28_LOMAP_A01090.

4.3.2 Identificación por Ventanas Móviles

(a) 41_CHICHI06_TCU078E, Tel = 0.1 seg.

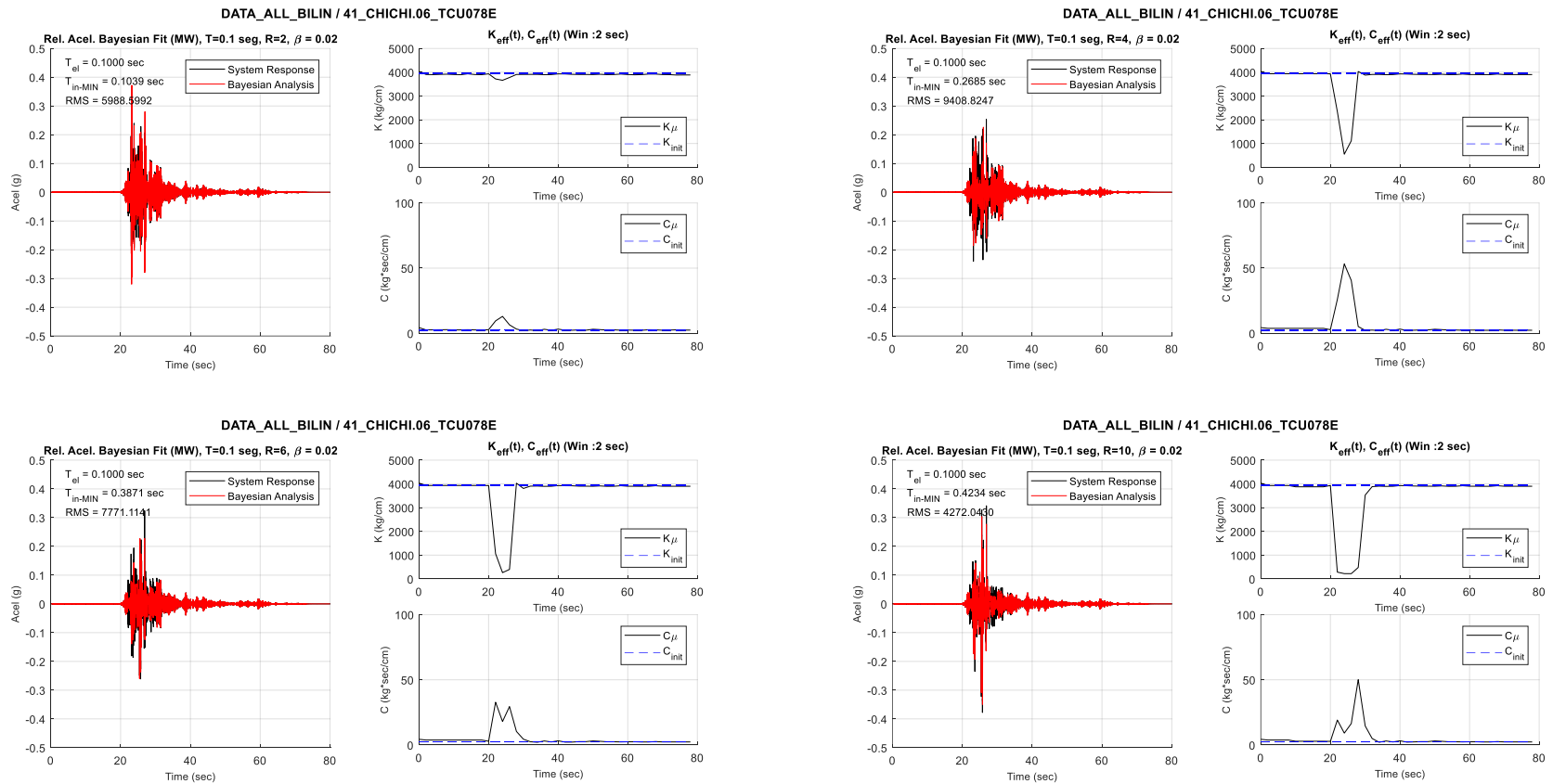


Figura V.50. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 0.1 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E, Tel = 1.0 seg.

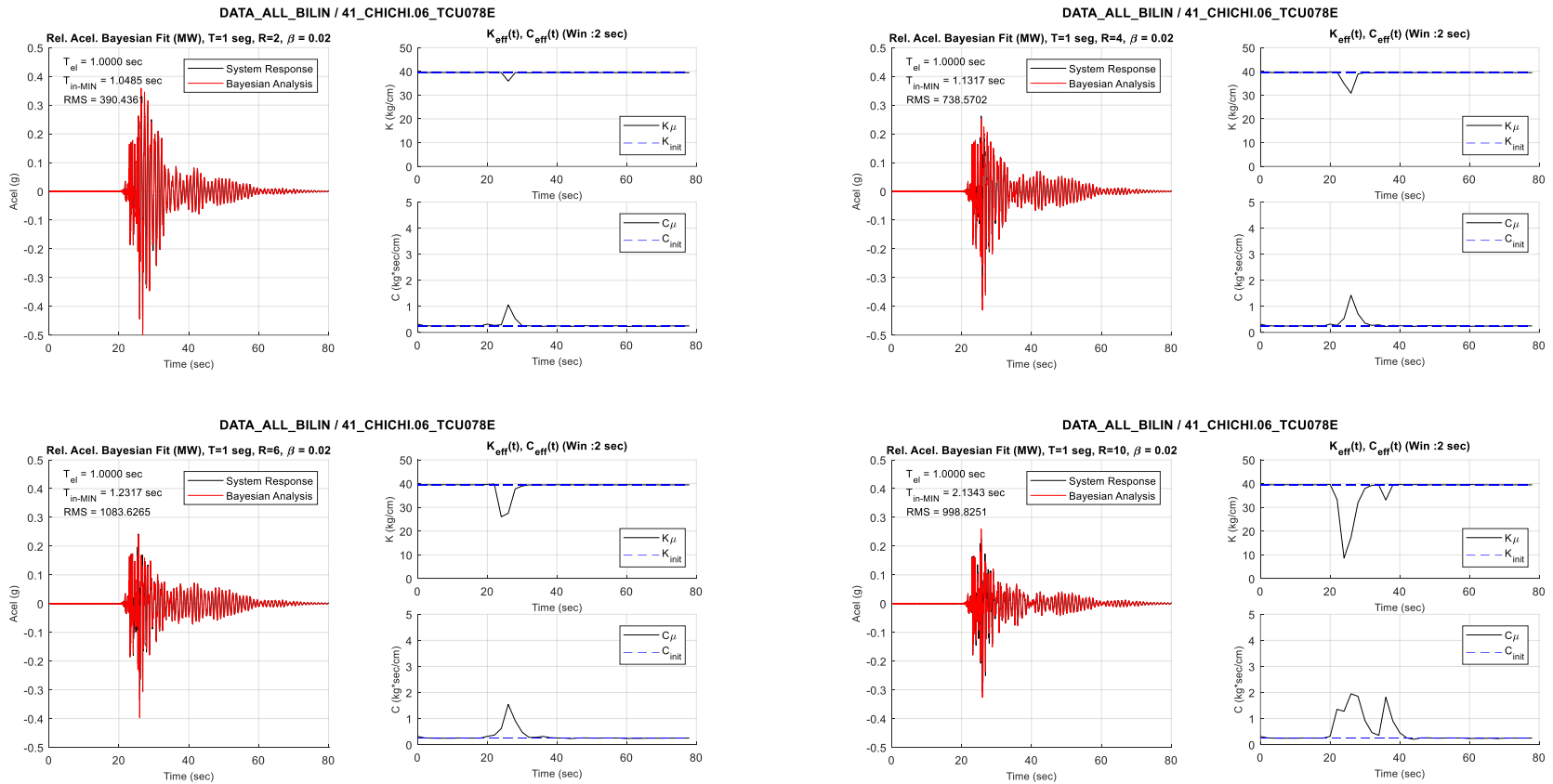


Figura V.51. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 1.0 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E, $T_{el} = 2.5$ seg.

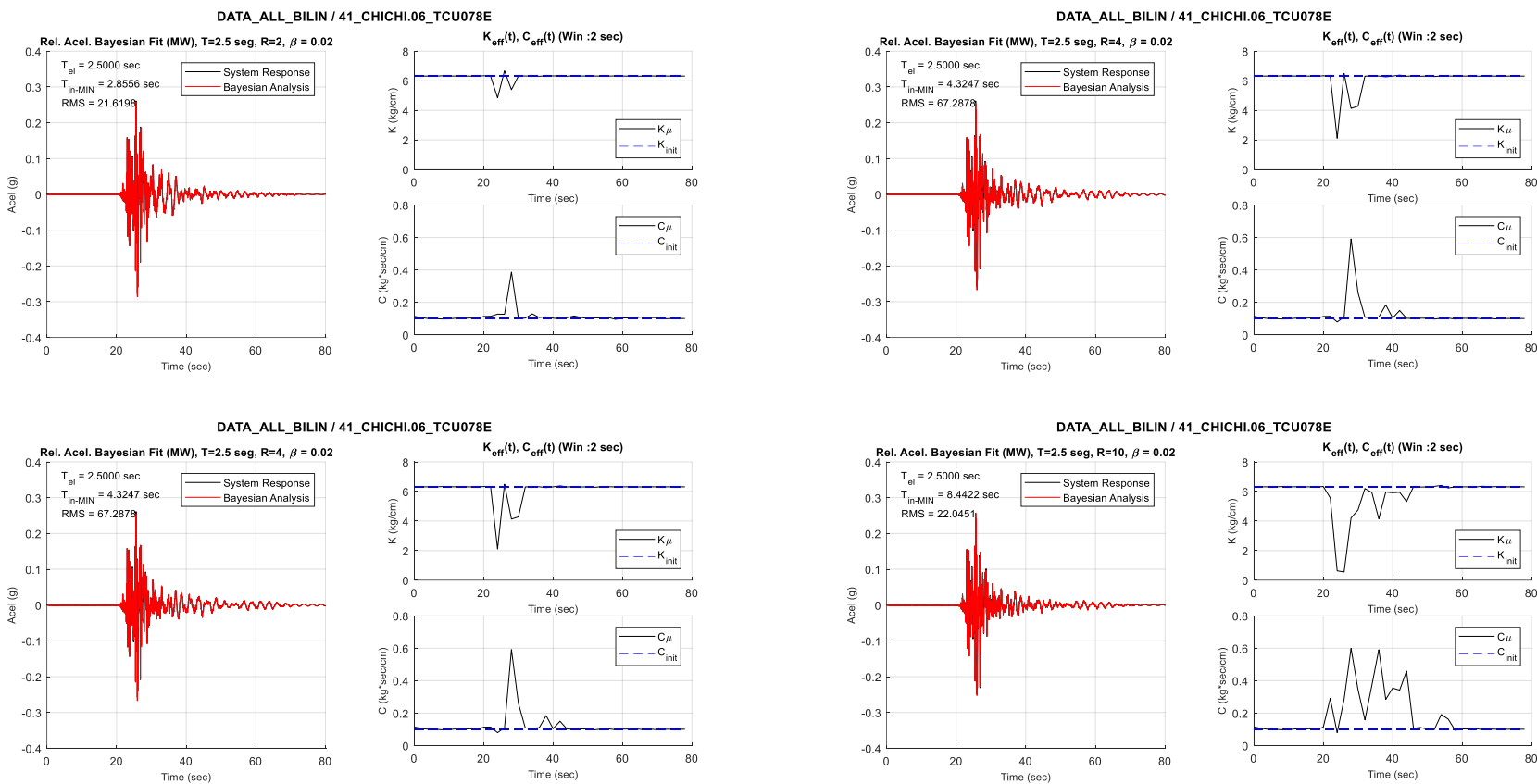


Figura V.52. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090, $T_{el} = 0.1$ seg.

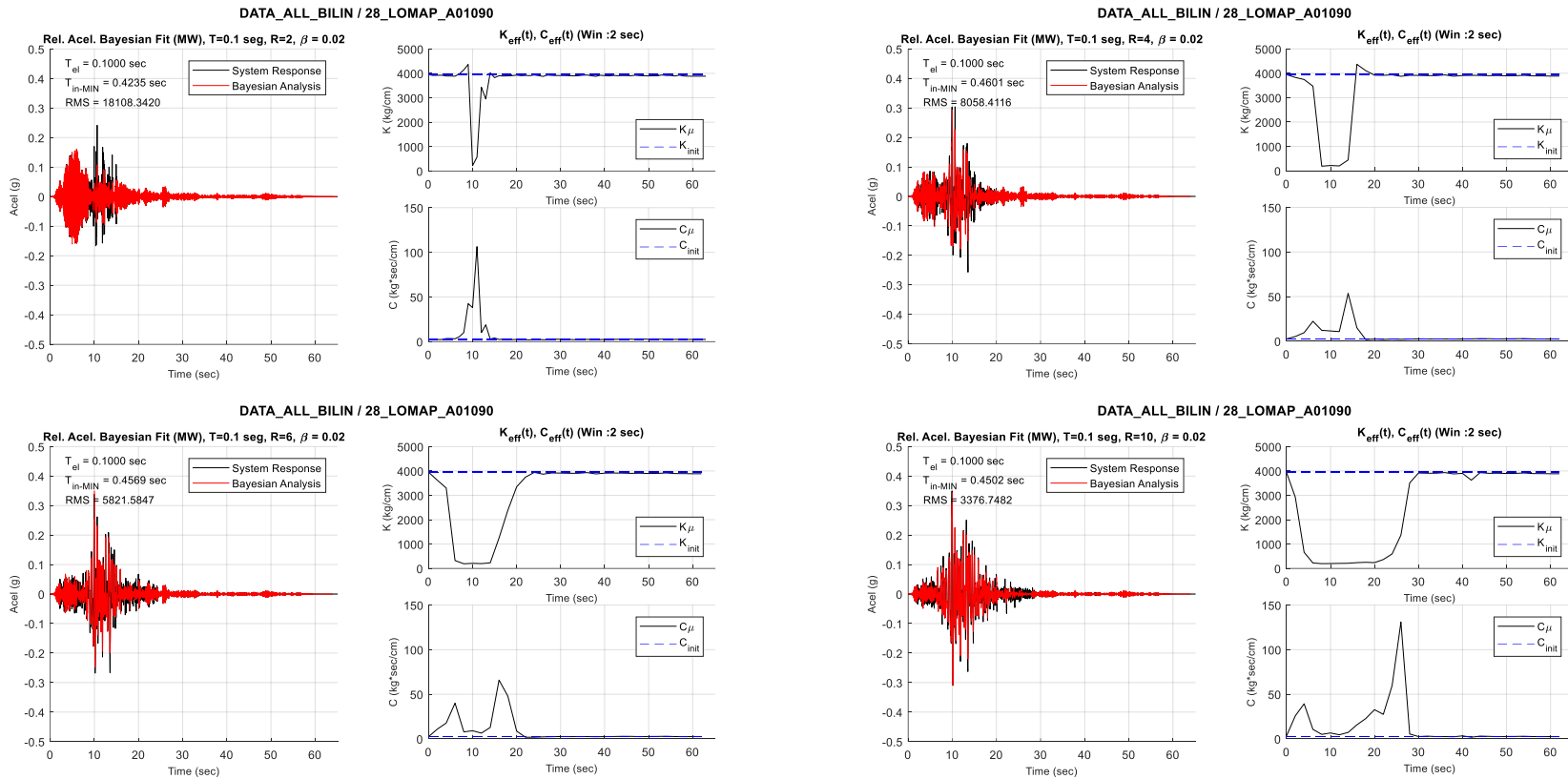


Figura V.53. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090, Tel = 1.0 seg.

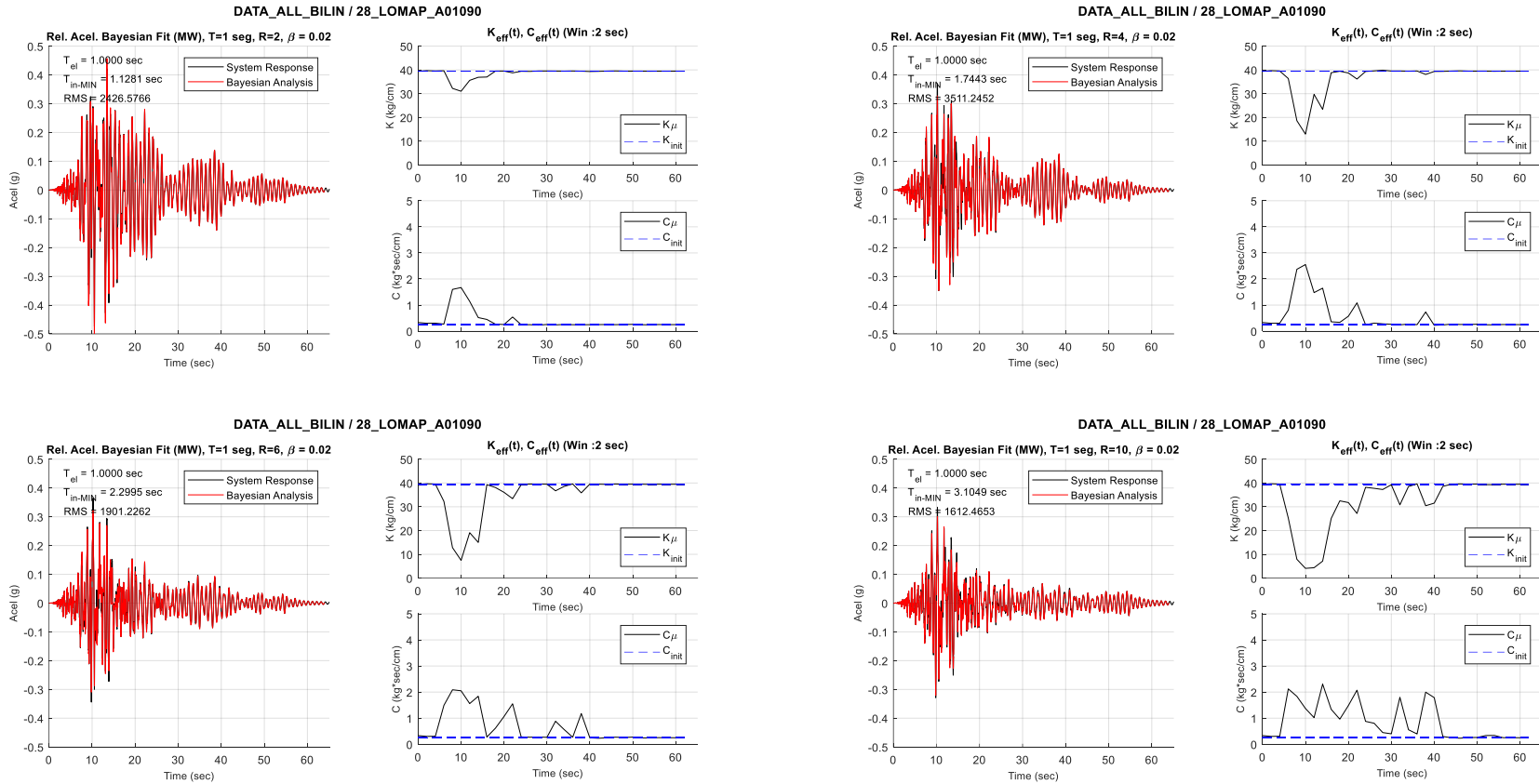


Figura V.54. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. Tel = 1.0 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090, $T_{el} = 2.5$ seg.

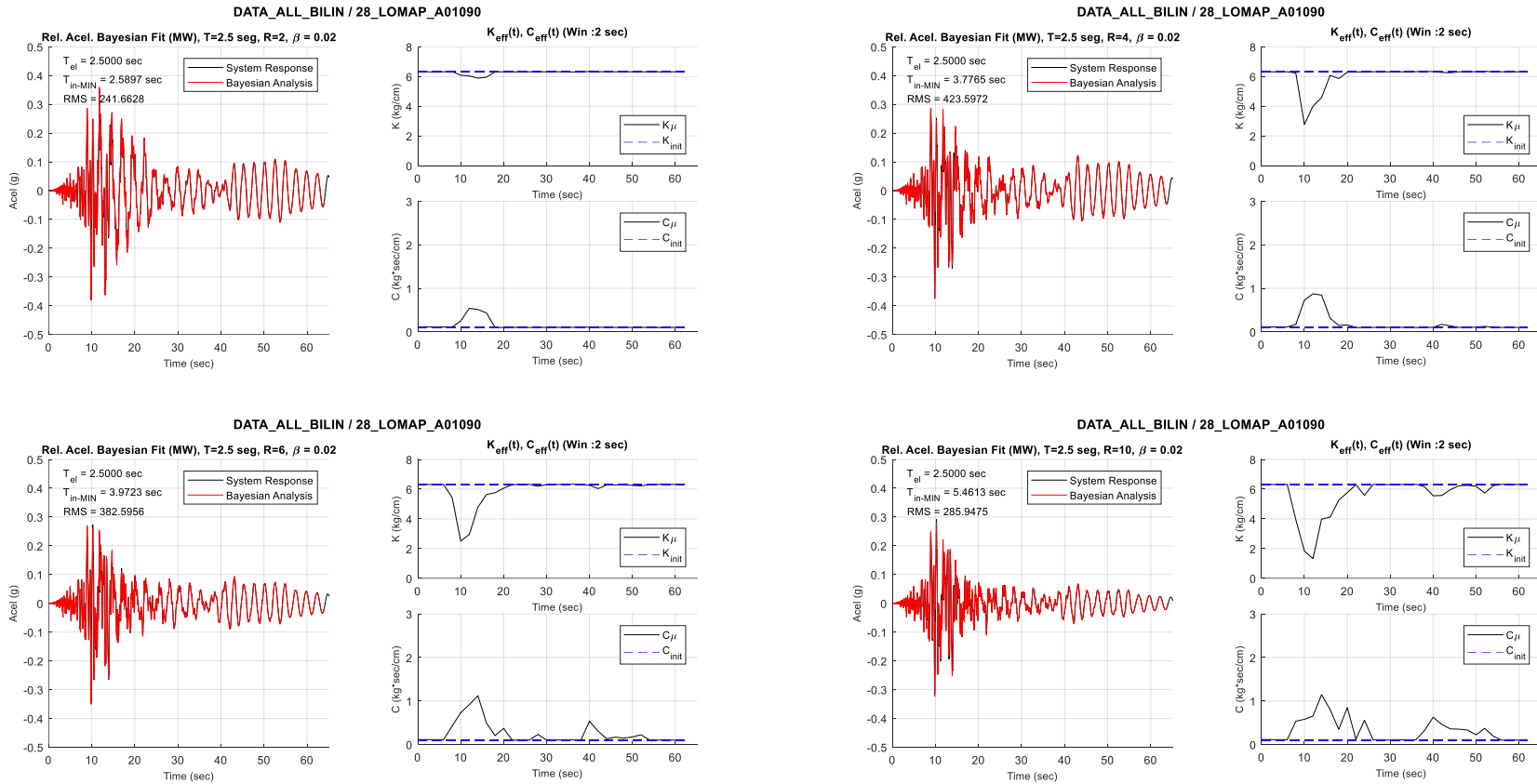


Figura V.55. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas bilineales sin degradación. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

4.3.3 Análisis de Resultados

Los análisis dinámicos fueron validados manteniendo en todos los casos un error del balance de energía menor a un 0.1 %. Algunas observaciones de los resultados expuestos anteriormente se presentan a continuación.

(a) Ajuste de Respuesta en Fase Fuerte

- Se logra de manera efectiva determinar un sistema lineal equivalente representativo de la fase fuerte de la respuesta para cada uno de los sistemas no-lineales tratados. Esta representatividad se logra en función del ajuste de respuesta en aceleraciones relativas.
- Como se esperaba, con el aumento del factor de reducción de la respuesta elástica, “R”, los sistemas lineal-equivalente de mejor ajuste presentan propiedades de rigidez efectiva cada vez menores, de las cuales es posible deducir un periodo aparente del sistema no-lineal.
- En general, englobando todos los registros sísmicos analizados, los sistemas más flexibles (de periodo elástico mayor a 1.0 seg) logran un mejor ajuste en términos de error cuadrático medio (RMS). Por otro lado, los sistemas inicialmente muy rígidos (periodo elástico menor a 0.5 seg), presentan los niveles de ajuste de menor calidad.
- Los modelos bilineales con factor de reducción “R” igual a 2.0, presentan en general un mal ajuste de propiedades efectivas, obteniendo resultados que tienen a las propiedades iniciales del sistema no-lineal. Este fenómeno se atribuye a dos aspectos.
 - La respuesta no-lineal en aceleraciones relativas no es suficientemente sensible para las incursiones inelásticas presentes en estos casos. En las figuras anteriores se aprecia el buen ajuste de respuestas en términos de amplitudes, sin embargo, las propiedades efectivas no se diferencian de las propiedades iniciales elásticas.
 - Durante el segmento de fase fuerte predomina la respuesta elástica y el método de optimización converge en favor del ajuste de su respuesta. Esto se presenta en sistemas de baja incursión inelástica ($R = 2.0$), y sistemas muy rígidos ($T_{el} < 0.3$ seg), en que la respuesta no lineal suele ser muy concentrada. Esta concentración de la incursión inelástica es más fuerte es el caso de modelos puramente bilineales en que el nivel de disipación histerética es alto.

Este problema se puede confirmar, y evadir, evaluando las propiedades efectivas mediante ventanas móviles de tiempo, obteniendo resultados más sensibles gracias al ajuste de segmentos de tiempo de menor duración.

- En particular, para los modelos constitutivos de tipo bi-lineal (con transición brusca entre ramas de rigideces inicial, K_1 , y post-fluencia, K_2), los resultados de las propiedades efectivas presentan una bi-polaridad en sus resultados. Dependiendo de cuál sea la rama de rigidez mayormente recorrida durante la respuesta, ya sea una fuerte presencia del rango lineal-elástico, o una fuerte influencia en las incursiones inelásticas a través de la rigidez de post-fluencia, los resultados de propiedades efectivas óptimas oscilan entre K_1 y K_2 .
- El método utilizado presenta una leve sensibilidad a la longitud del segmento de respuesta definido como fase fuerte, o bien, la cantidad de datos seleccionados para el ajuste. En general, fueron obtenidos ajustes de mejor calidad (en términos de RMS) para segmentos de respuesta de menor longitud.
- El ajuste de la respuesta en aceleraciones relativas es un aspecto logrado, sin embargo, este ajuste no conversa con el objetivo de representar los desplazamientos máximos del sistema no-lineal tal como se encuentra dirigido el uso de las propiedades secantes de respuestas histeréticas.
- Para evitar óptimos locales en los resultados del método de ajuste, fue muy efectivo mantener un rango limitado de la variable estado inicial del segmento de identificación, necesario para construir la respuesta del sistema lineal-equivalente.

(b) Ajuste de Respuesta por Ventanas Móviles

- Este enfoque, y sus resultados, no logran definir un sistema lineal representativo de la respuesta histerética, sin embargo, proporciona un panorama dinámico de las instancias en que el sistema incursiona en rangos inelásticos, presentando un seguimiento de propiedades efectivas de rigidez y amortiguamiento. Este enfoque, a su vez, se aproxima más la implementación desarrollada por Katsanos y Sextos (2015).
- En general, los niveles de ajuste alcanzados en términos de error cuadrático medio (RMS) son de mejor calidad en comparación con los obtenidos ajustando la fase fuerte completa de la respuesta.

- En los resultados presentados se observa claramente cómo el nivel de incursión inelástica del sistema impacta en las propiedades de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo identificados. Con el aumento progresivo del factor de reducción de la respuesta elástica (“R”), la historia de rigidez efectiva presenta cada vez mayores reducciones en su magnitud.
- La simultánea reducción de rigidez efectiva y aumento del amortiguamiento efectivo se mantienen correlacionadas en favor del ajuste de la respuesta en aceleración relativa del sistema. Este fenómeno es equivalente a la formulación clásica de las propiedades secantes de un sistema histerético.
- Los sistemas no-lineales tratados no cuentan con propiedades de degradación, y esto es percibido por el seguimiento de las propiedades efectivas. Se observa que, posterior a las respectivas fases fuertes de respuesta, las propiedades dinámicas identificadas tienden a sus magnitudes iniciales de estado lineal-elástico.

Las reducciones en rigideces efectivas presentan probablemente el mejor indicador de la elongación del periodo contenido a lo largo de toda la respuesta del sistema. Sin embargo, hay que estar consciente de que las propiedades efectivas representativas de una de las ventanas de análisis no necesariamente se relacionan de manera directa con las propiedades de un sistema lineal-equivalente asociado a la respuesta completa del sistema no-lineal.

4.4. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Leve

En esta sección se aplica el método de linealización equivalente sobre modelos constitutivos que incluyen efectos de degradación y “pinching” en grado leve. Para los mismos registros sísmicos y sistema considerados se definen cuatro modelos diferenciados por magnitudes del factor de reducción de la máxima fuerza elástica, “R”. Las respectivas respuestas histeréticas de Fuerza-Desplazamiento se presentan a continuación.

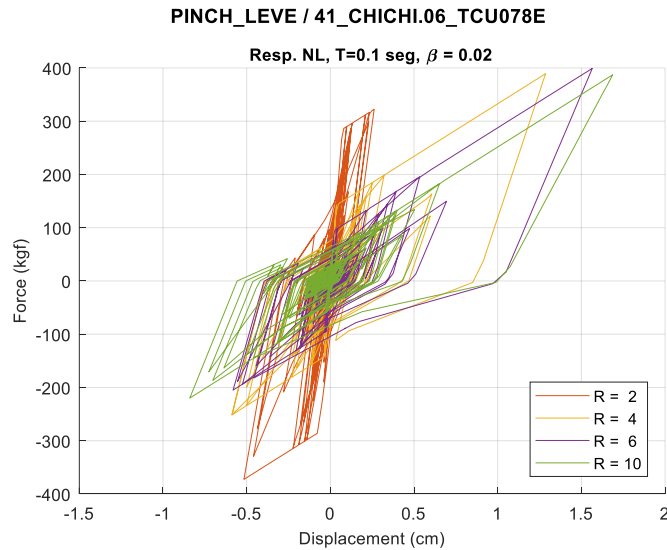


Figura V.56. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 0.1 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

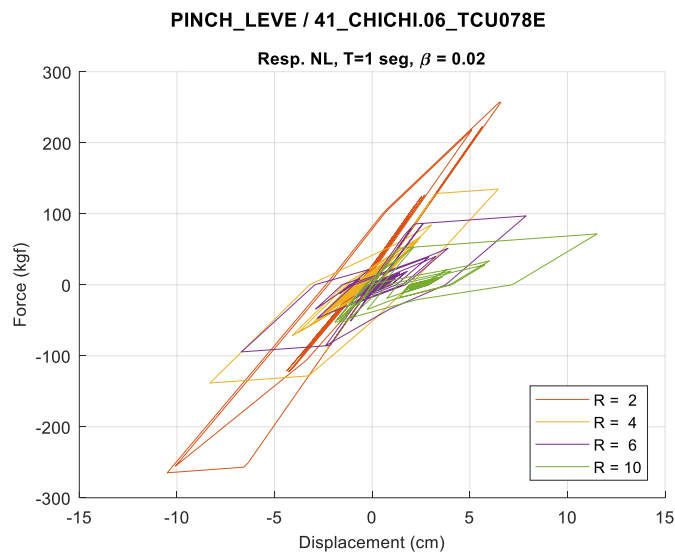


Figura V.57. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 1.0 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

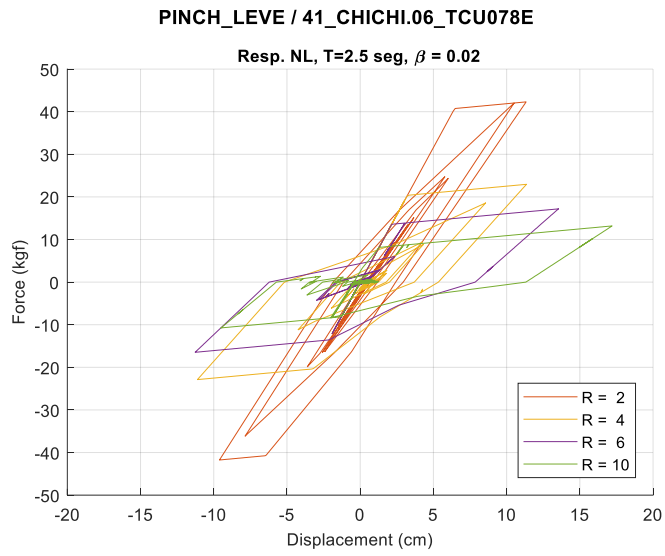


Figura V.58. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 2.5 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

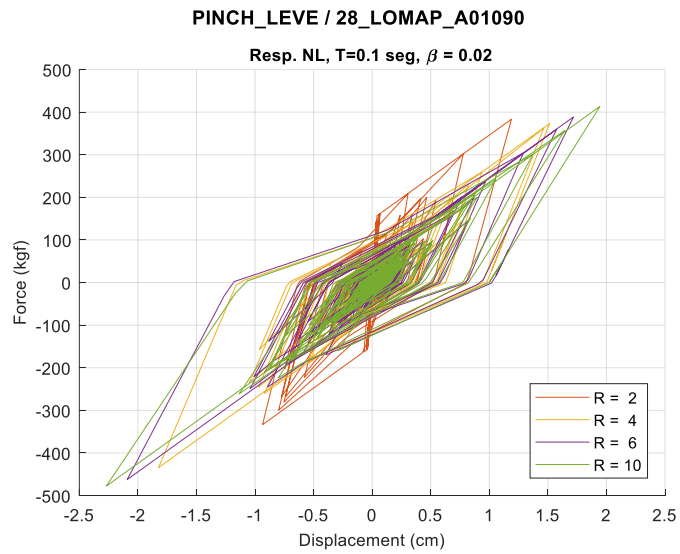


Figura V.59. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 0.1 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

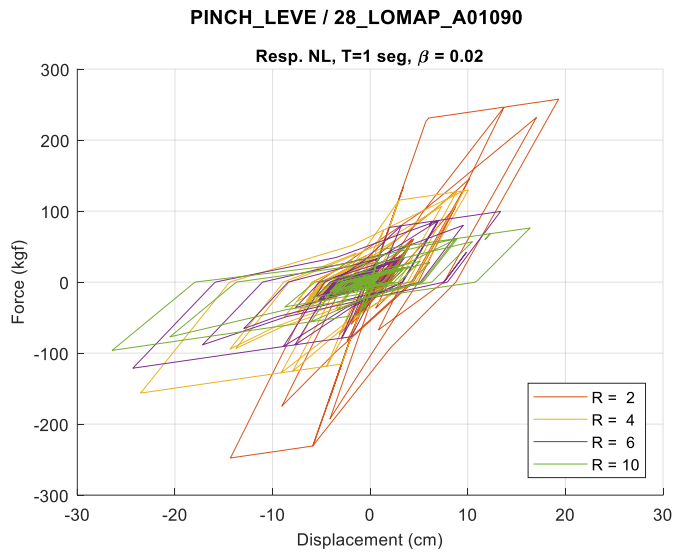


Figura V.60. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 1.0 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

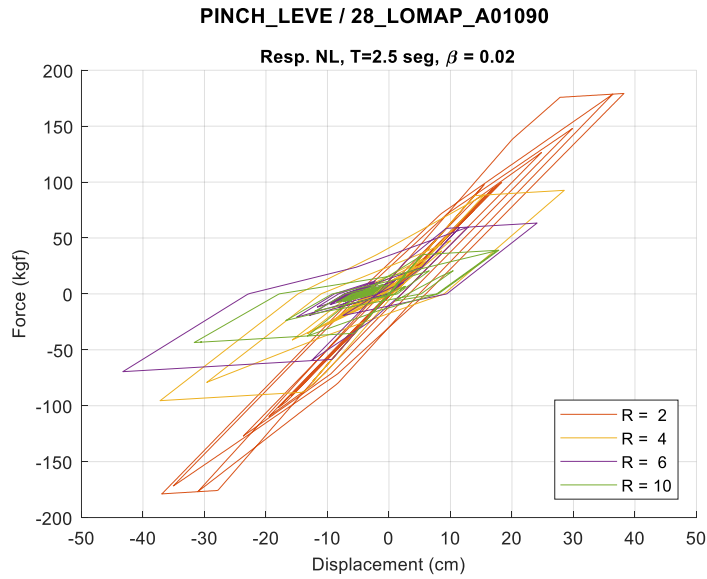


Figura V.61. Respuesta histerética de sistema de degradación leve. Tel = 2.5 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

A continuación, se presentan los resultados del ajuste Bayesiano para la identificación de cada uno de los sistemas no-lineales presentados.

4.4.1 Identificación en Fase Fuerte

(a) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 0.1$ seg.

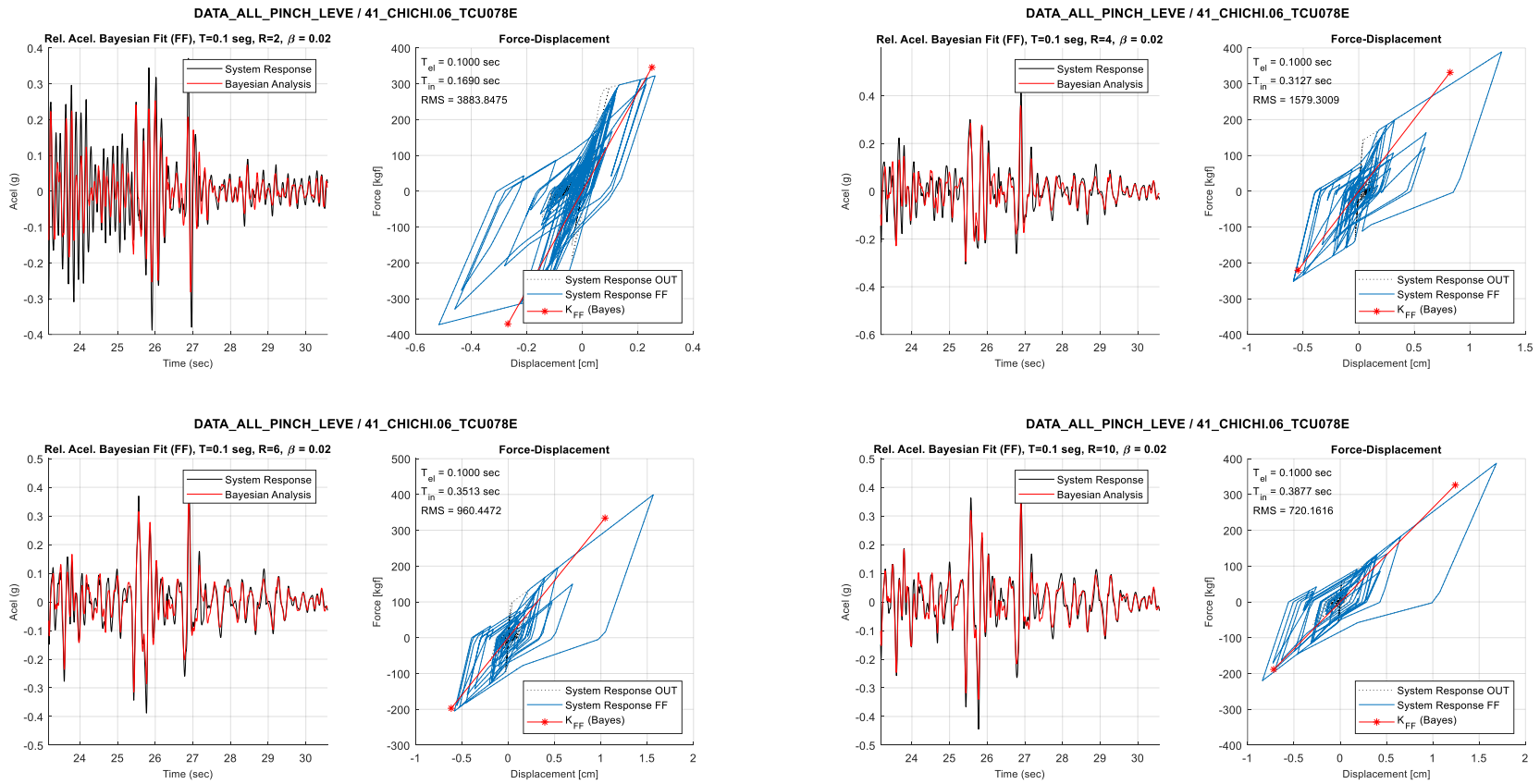


Figura V.62. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 1.0$ seg.

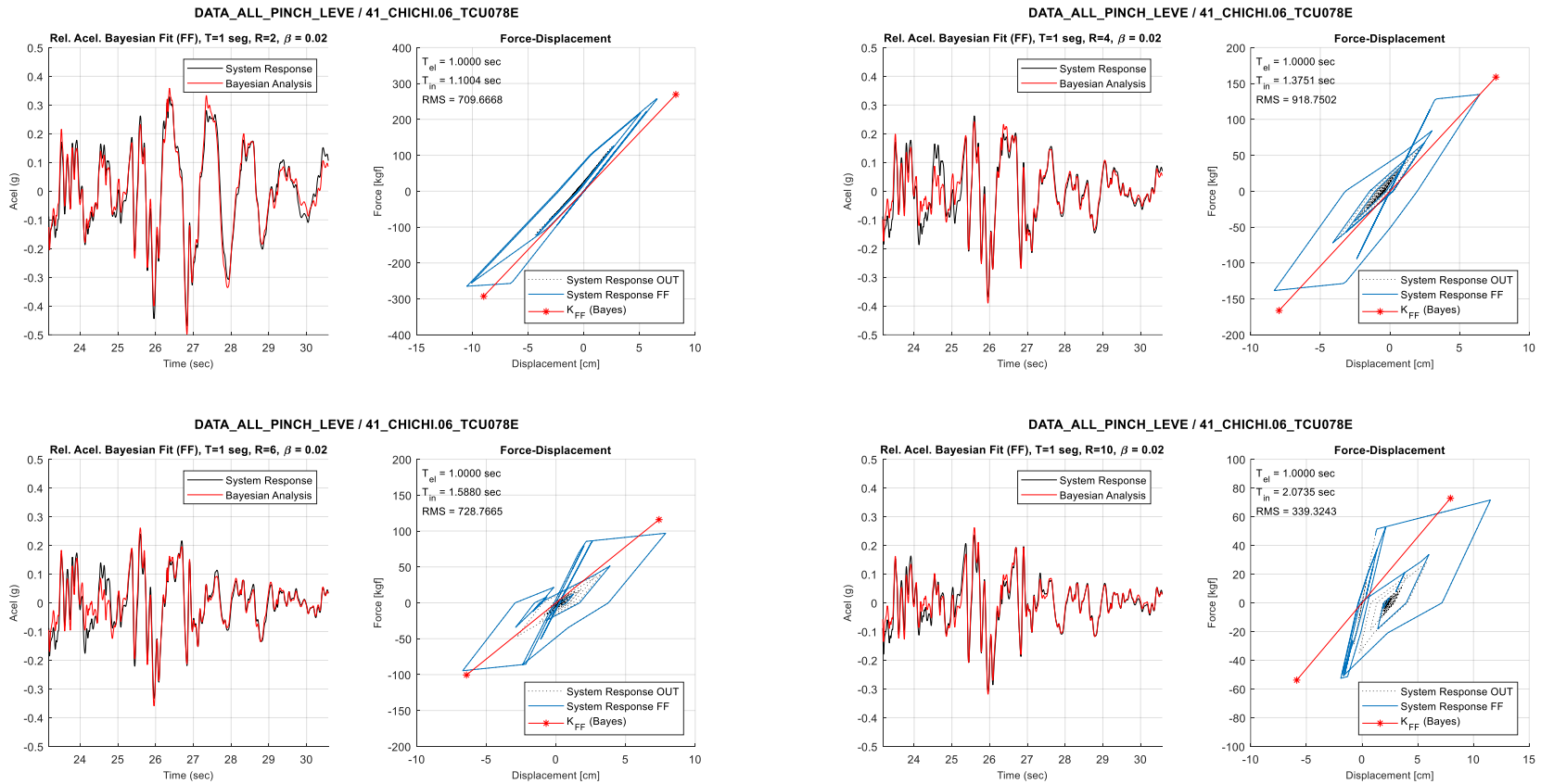


Figura V.63. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 2.5$ seg.

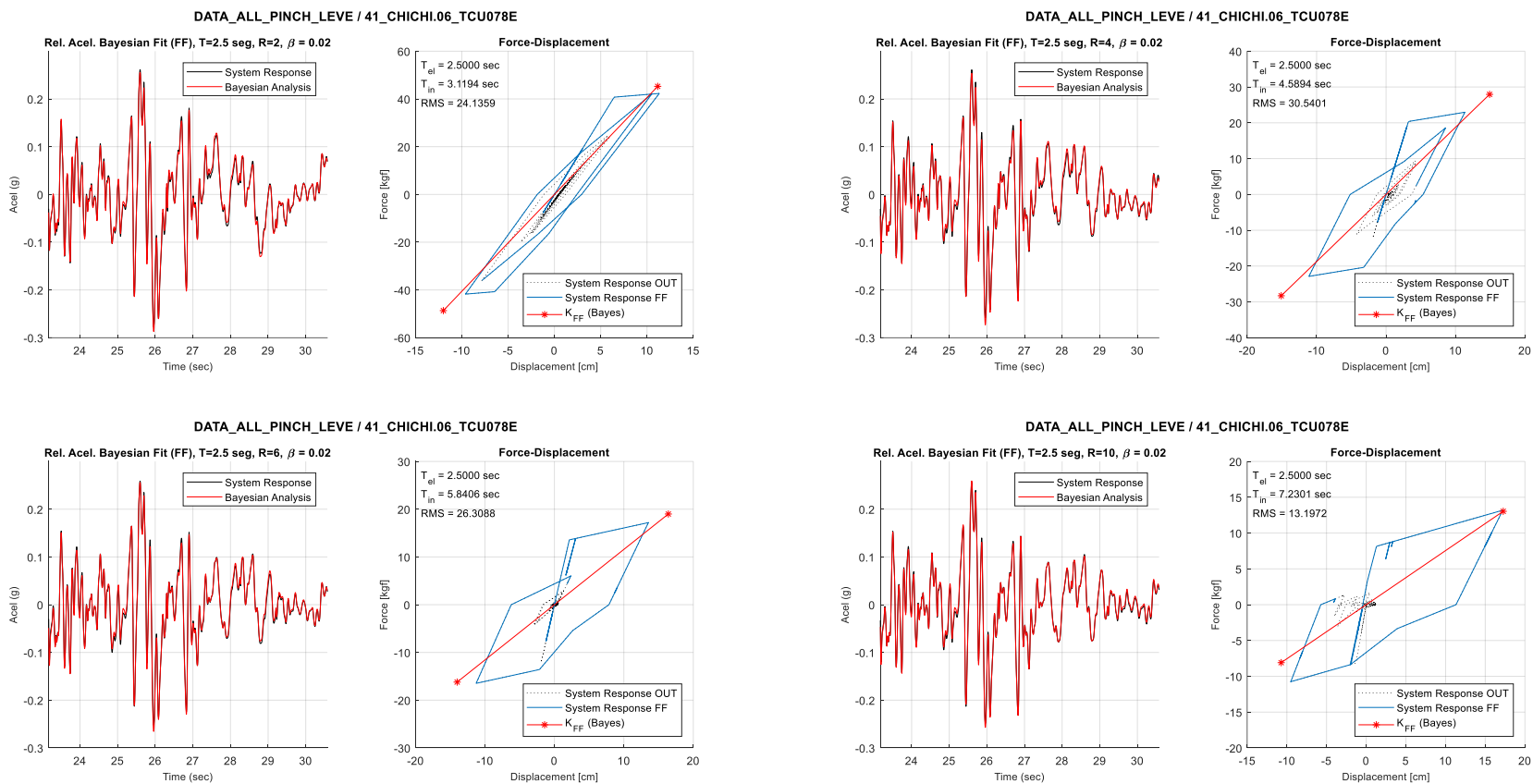


Figura V.64. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 0.1$ seg.

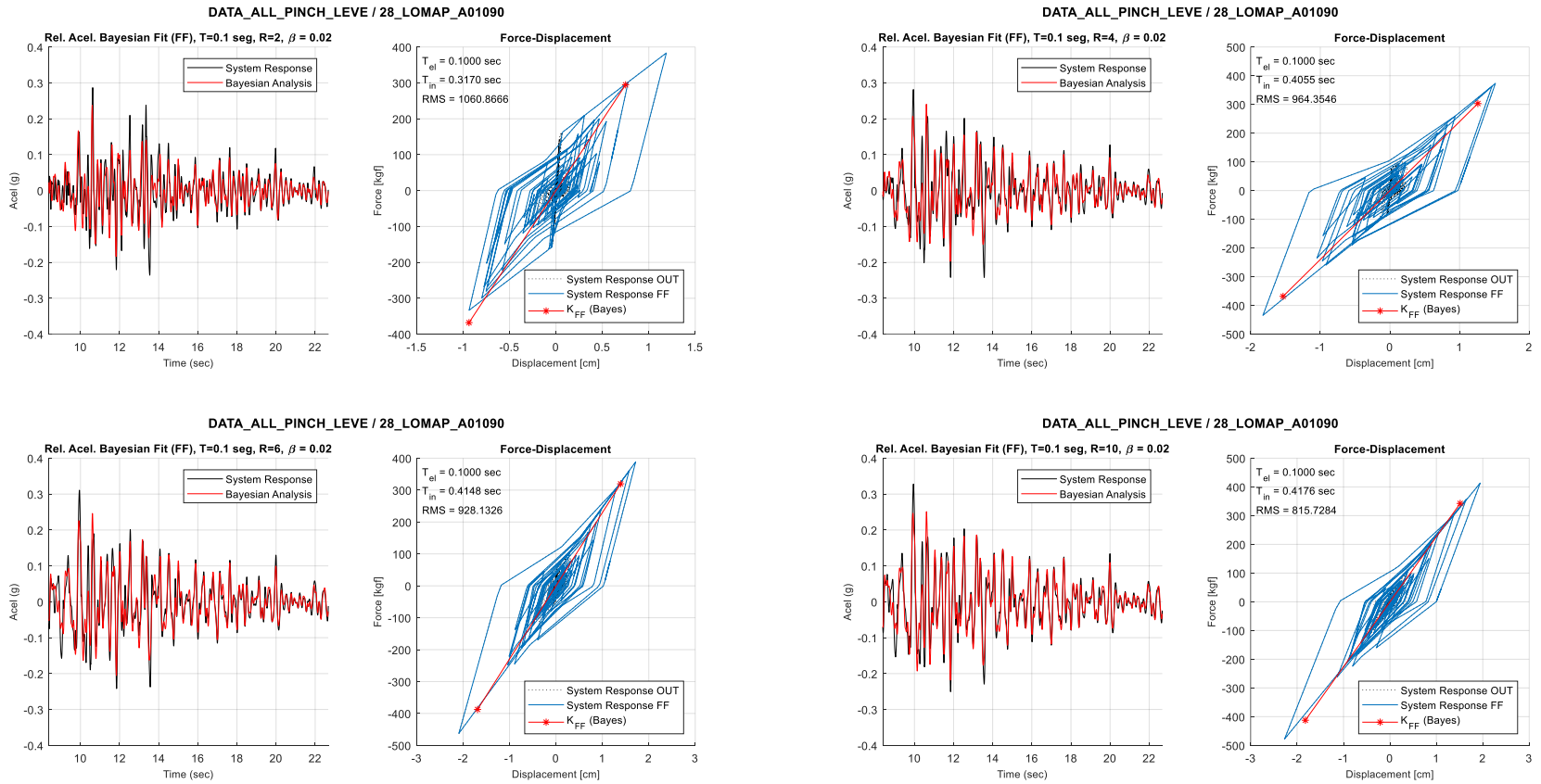


Figura V.65. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 1.0$ seg.

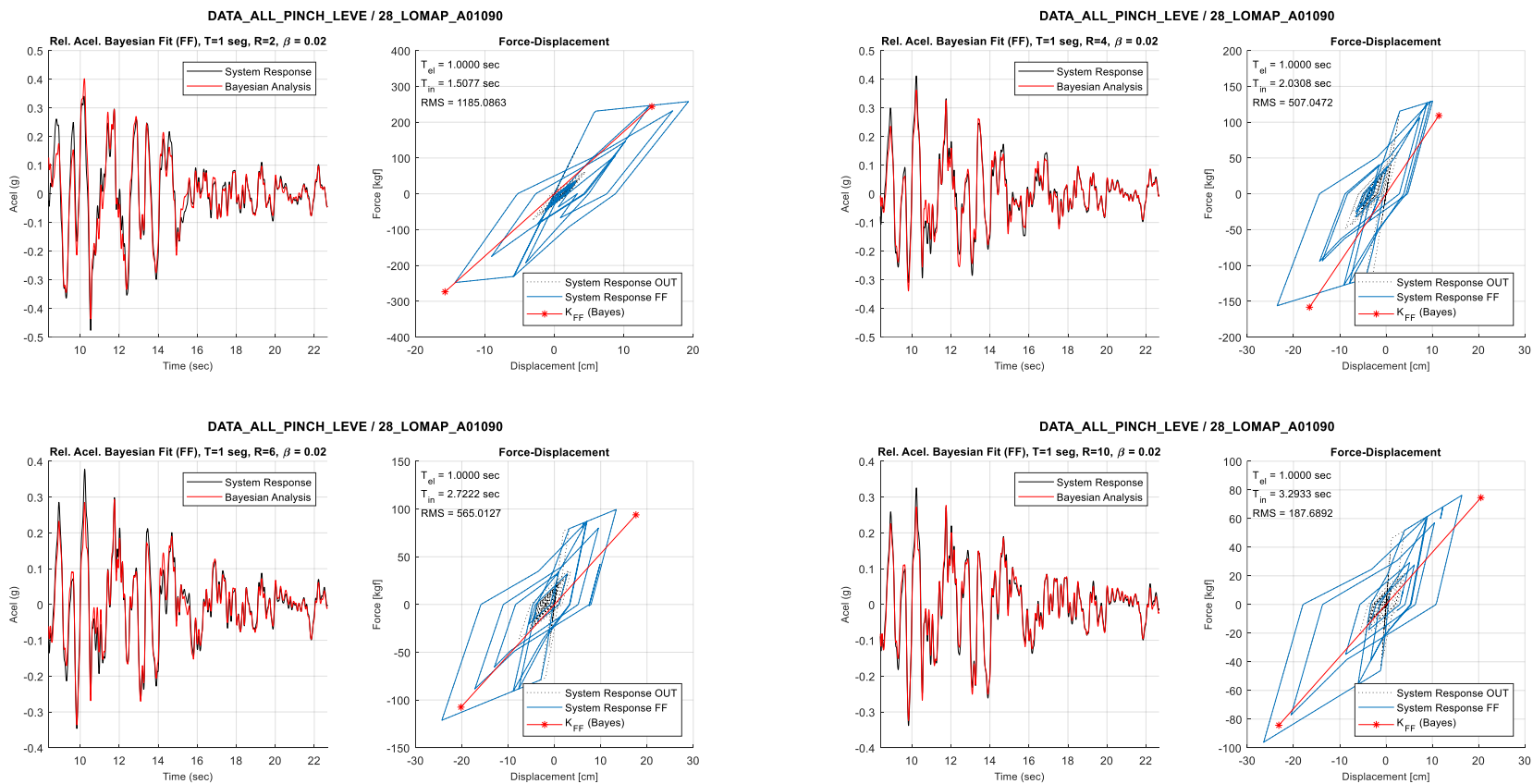


Figura V.66. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 2.5$ seg.

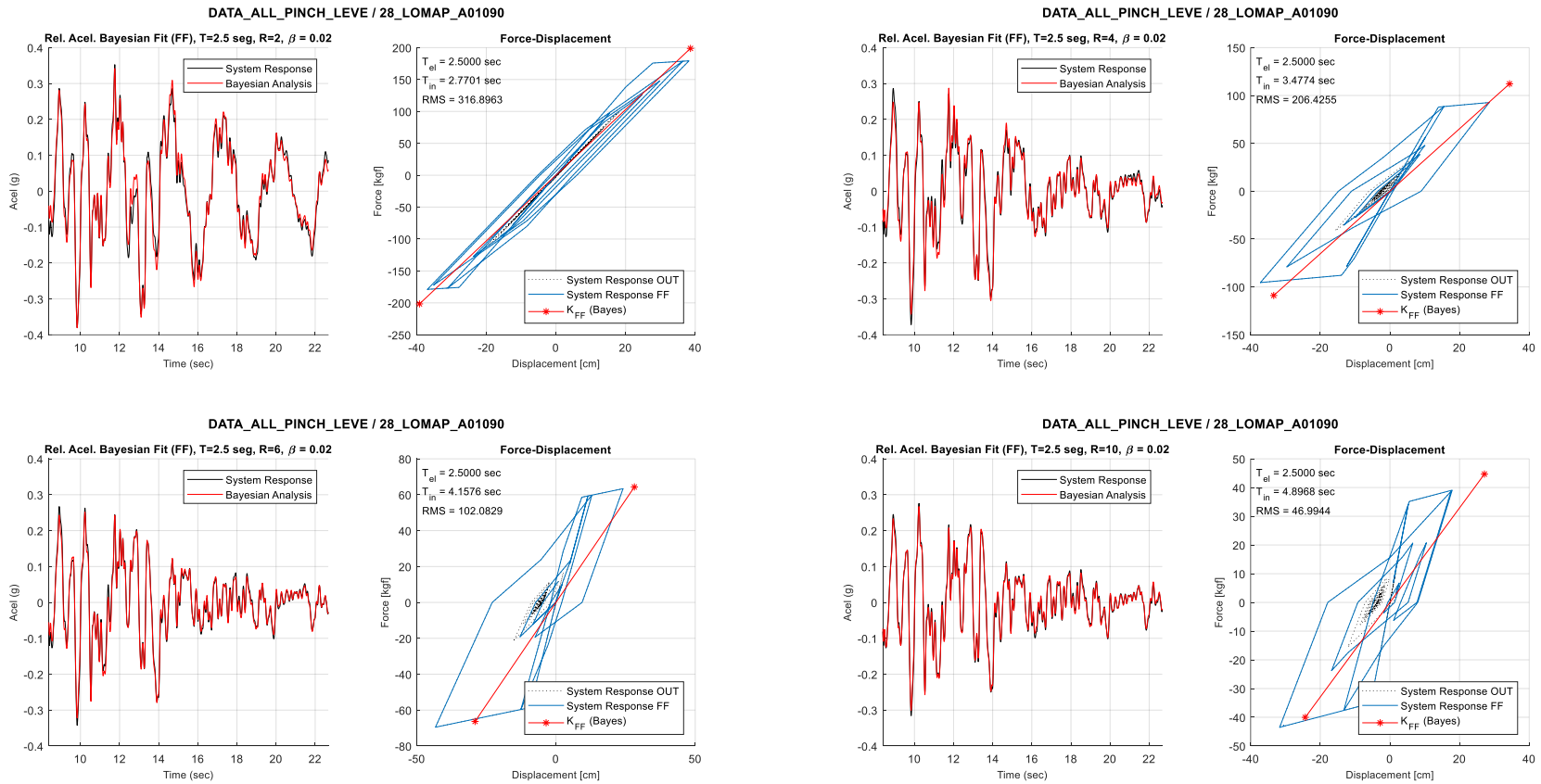


Figura V.67. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

4.4.2 Identificación por Ventanas de Tiempo

(a) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 0.1$ seg.

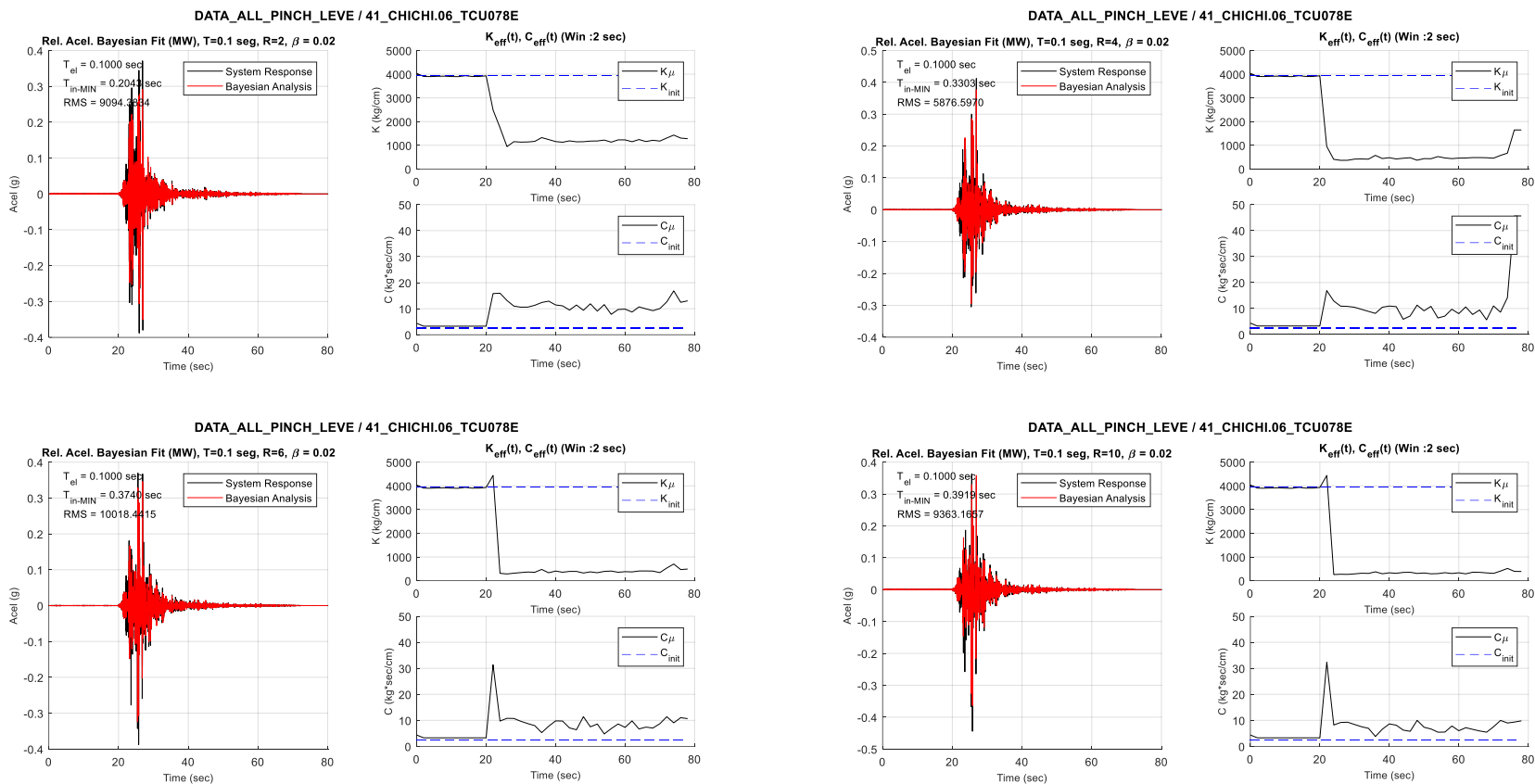


Figura V.68. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 1.0$ seg.

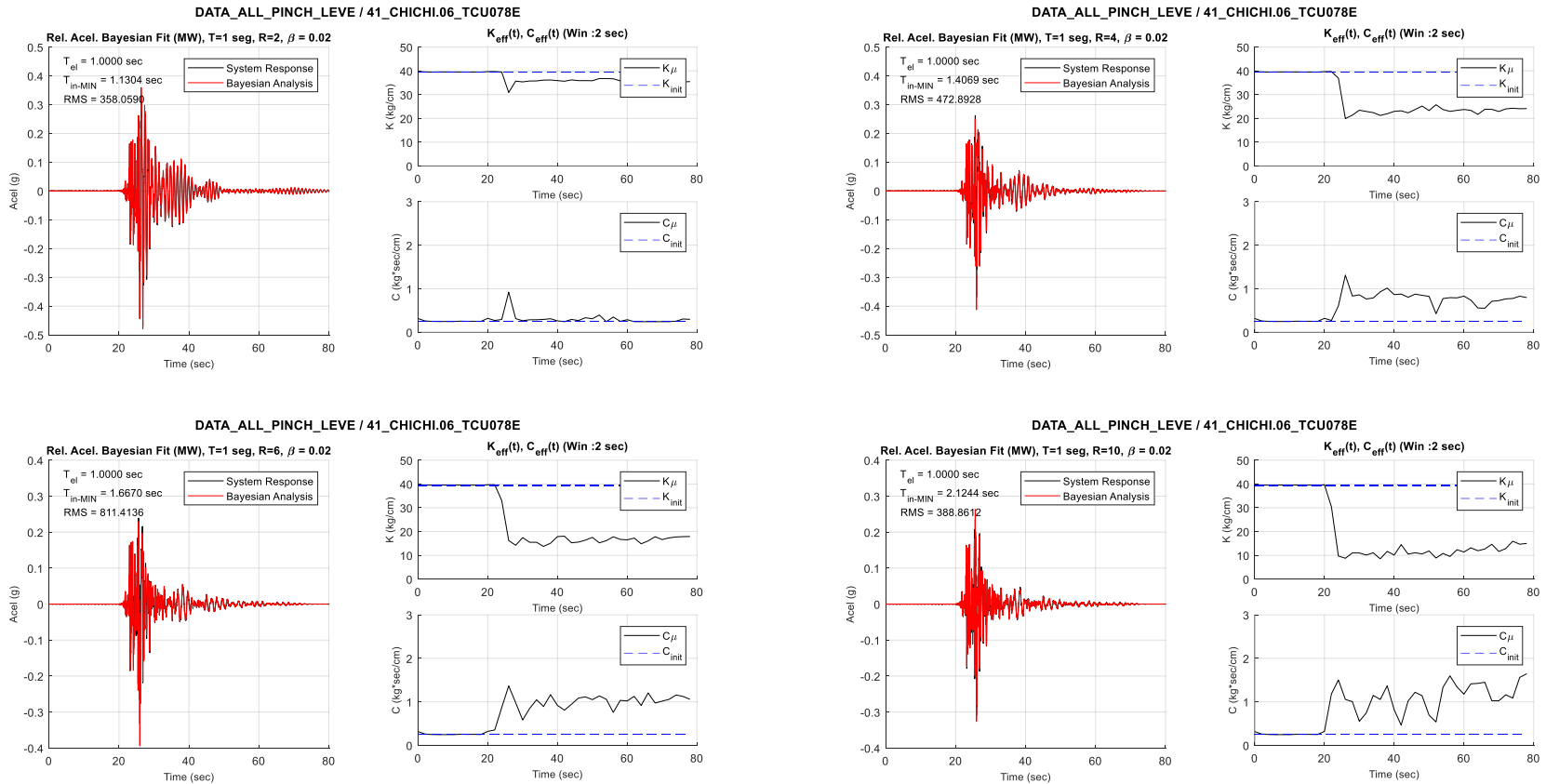


Figura V.69. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Leve, $T_{el} = 2.5$ seg.

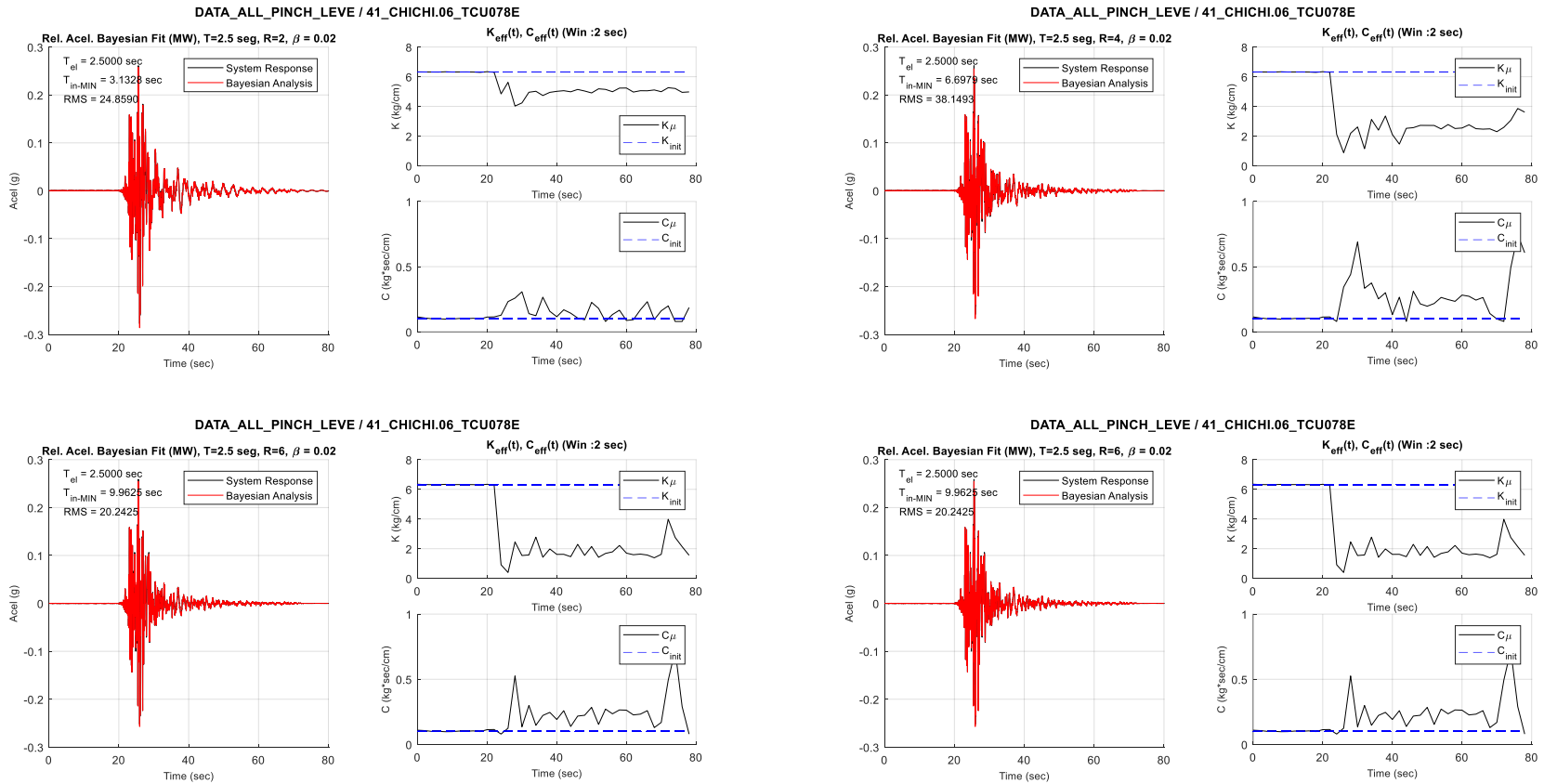


Figura V.70. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 0.1$ seg.

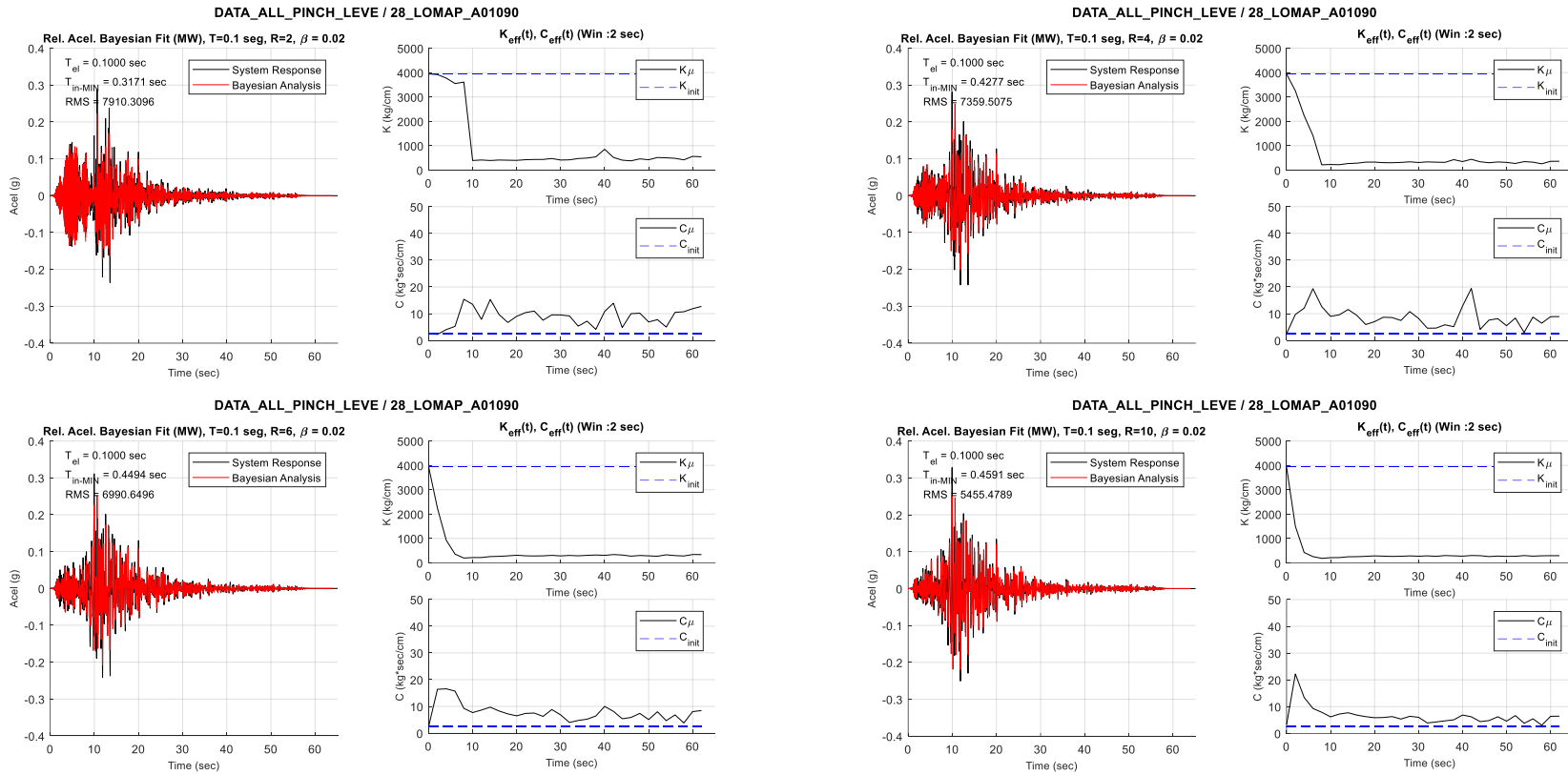


Figura V.71. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 1.0$ seg.

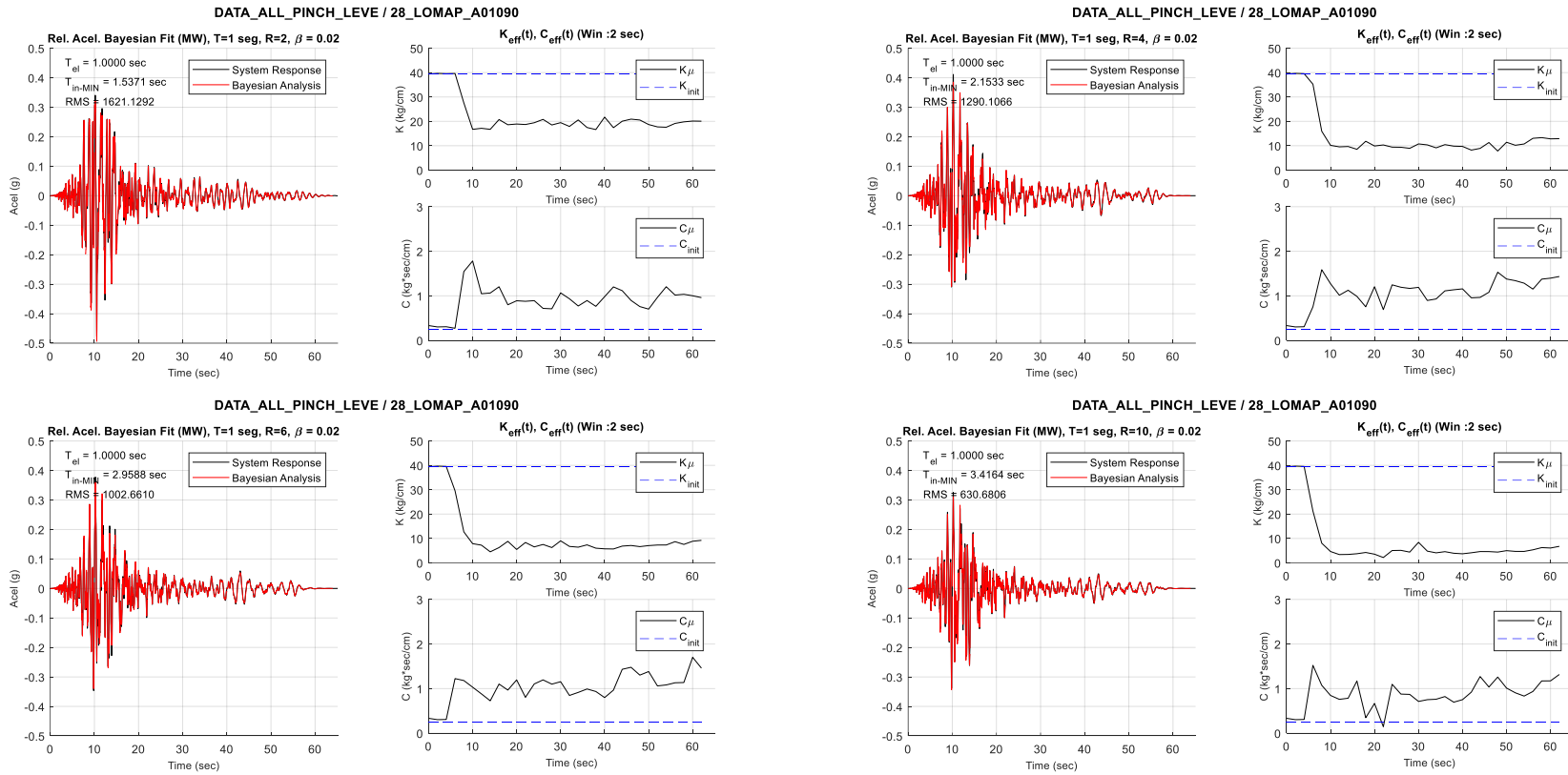


Figura V.72. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Leve, $T_{el} = 2.5$ seg.

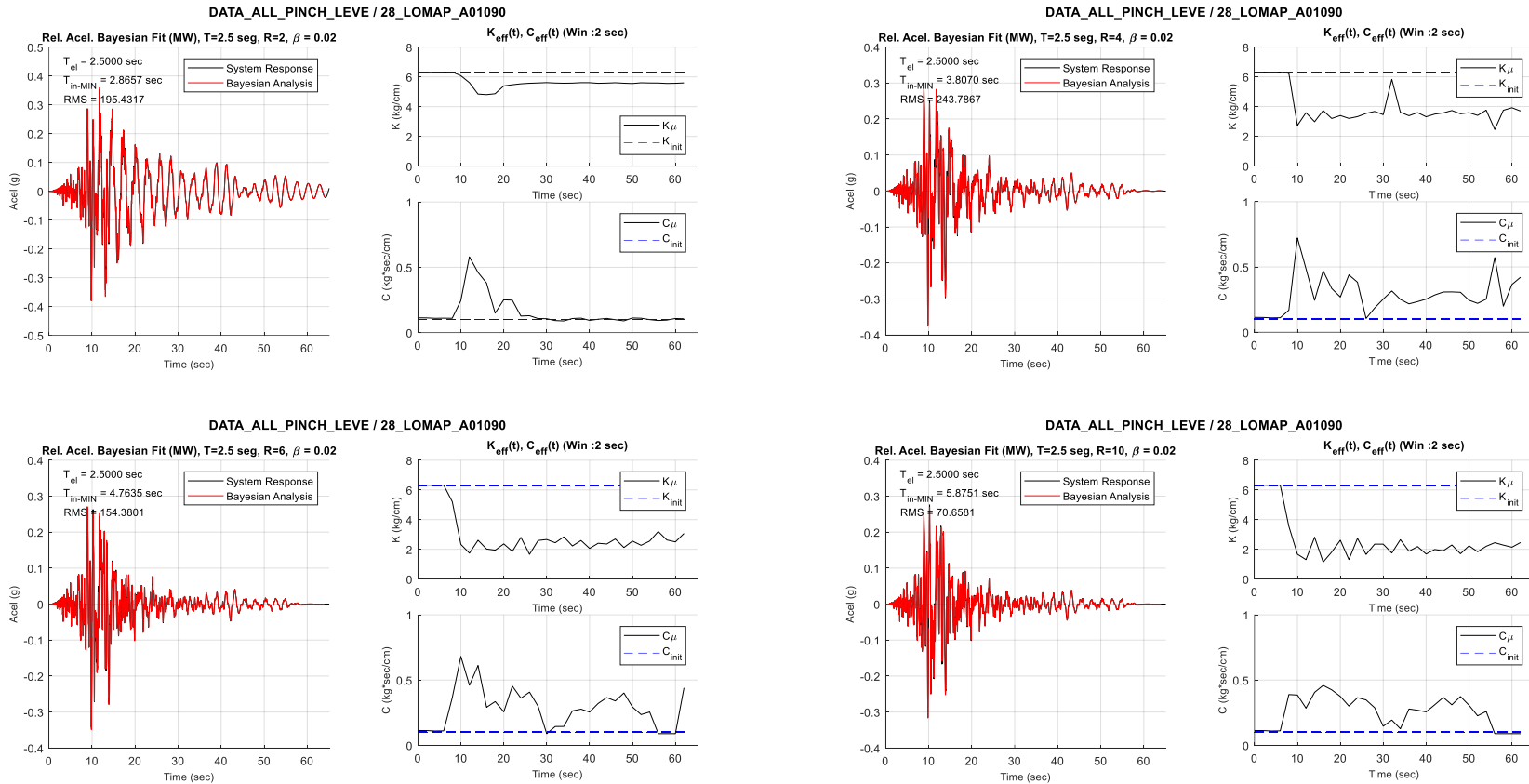


Figura V.73. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación leve. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

4.4.3 Análisis de Resultados

Los análisis dinámicos fueron validados manteniendo en todos los casos un error del balance de energía menor a un 0.1 %. Algunas observaciones de los resultados expuestos anteriormente se presentan a continuación.

(a) Ajuste de Respuesta en Fase Fuerte

- En general, permanecen las observaciones realizadas para los resultados de identificación obtenidos de sistemas bilineales sin degradación.
- Se logra de manera efectiva determinar un sistema lineal equivalente representativo de la fase fuerte de la respuesta para cada uno de los sistemas no-lineales tratados. Esta representatividad se logra en función del ajuste de respuesta en aceleraciones relativas.
- Como se presuponía, con el aumento del factor de reducción de la respuesta elástica, “R”, los sistemas lineal-equivalente de mejor ajuste presentan propiedades de rigidez efectiva cada vez menores, de las cuales es posible deducir un periodo aparente del sistema no-lineal.
- Para el caso de los sistemas con degradación leve se ha observado que los resultados de rigidez efectiva presentan una ligera tendencia hacia las propiedades secantes que podrían obtenerse de las respectivas curvas histeréticas. Las deformaciones máximas de los sistemas lineales-equivalentes mantienen el orden de magnitud de las deformaciones máximas de los sistemas no lineales.
- Los modelos con factor de reducción “R” igual a 2.0, presentan un mejor nivel de ajuste que el observado para el caso de modelo bilineales. Esta misma observación fue realizada comparando los resultados de la identificación en base a espectrogramas. Esto se atribuye a que las respuestas en aceleraciones relativas son especialmente sensibles a las degradaciones de rigidez y por lo tanto de fácil identificación.

(b) Ajuste de Respuesta por Ventanas Móviles

- En general permanecen las observaciones realizadas para los resultados de identificación obtenidos de sistemas bilineales sin degradación.
- Este enfoque, y sus resultados, no logran definir un sistema lineal representativo de la respuesta histerética, sin embargo, proporciona un panorama dinámico de las instancias

en que el sistema incursiona en rangos inelásticos, presentando un seguimiento de propiedades efectivas de rigidez y amortiguamiento. Este enfoque a su vez se aproxima más la implementación desarrollada por Katsanos y Sextos (2015).

- En general, los niveles de ajuste alcanzados en términos de error cuadrático medio (RMS) son de mejor calidad en comparación con los obtenidos ajustando la fase fuerte completa de la respuesta.
- En los resultados presentados se observa claramente cómo el nivel de incursión inelástica del sistema impacta en las propiedades de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo identificados. Con el aumento progresivo del factor de reducción de la respuesta elástica (“R”), la historia de rigidez efectiva presenta cada vez mayores reducciones en su magnitud.
- Los sistemas tratados en esta sección presentan una componente de degradación, y esto es percibido por el seguimiento de las propiedades efectivas. Se observa que a partir de las primeras incursiones inelásticas el sistema presentan una baja en sus magnitudes, la cual no se ve restituida en lo que resta de la respuesta. De manera similar, esta baja en la rigidez efectiva se ve compensada con un aumento del amortiguamiento efectivo.

4.5. Identificación en Modelos Multi-lineales con Degradación Severa

En esta sección se aplica el método de linealización equivalente sobre modelos constitutivos que incluyen efectos de degradación y pinching en grado severo. Para los mismos registros sísmicos y sistema considerados se definen cuatro modelos diferenciados por magnitudes del factor de reducción de la máxima fuerza elástica, “R”. Las respectivas respuestas histeréticas de Fuerza-Desplazamiento se presentan a continuación.

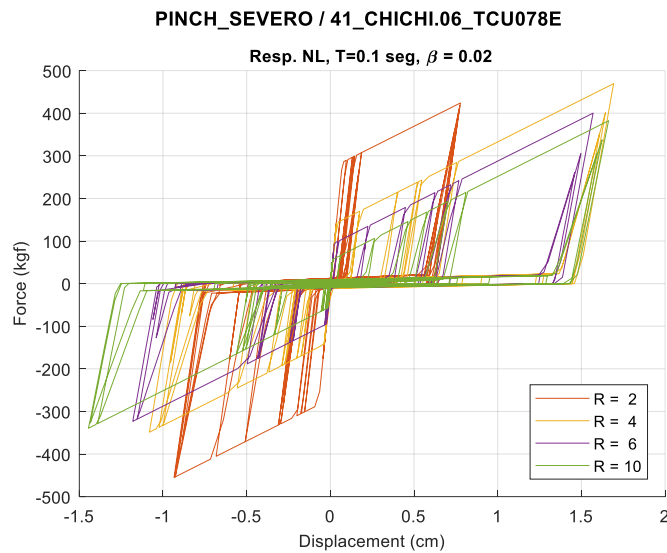


Figura V.74. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 0.1 seg. GM: 41_CHICHL06_TCU078E.

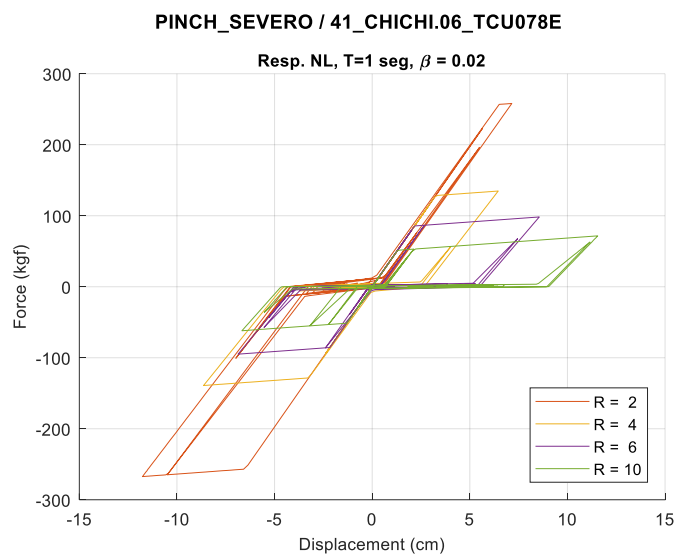


Figura V.75. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 1.0 seg. GM: 41_CHICHL06_TCU078E.

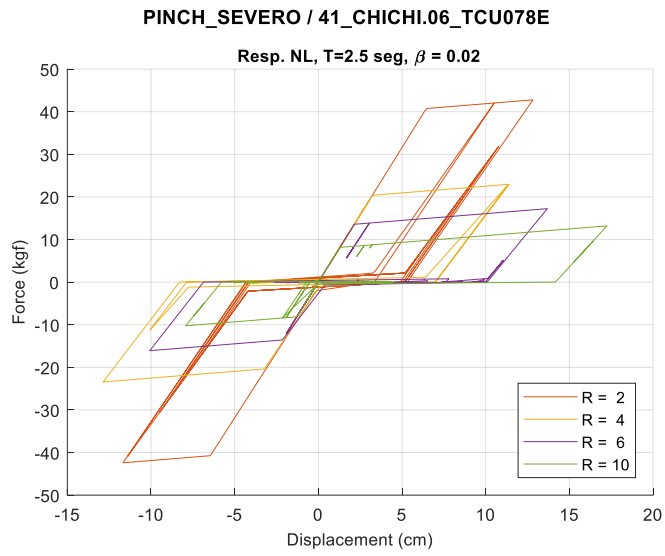


Figura V.76. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 2.5 seg. GM: 41_CHICHI.06_TCU078E.

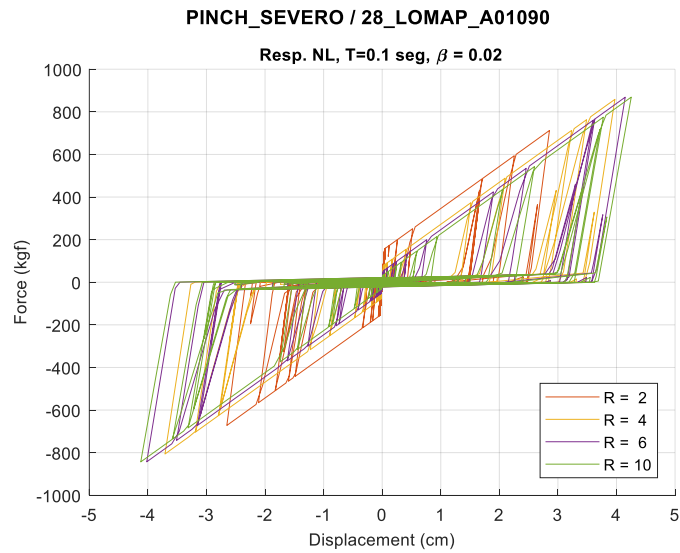


Figura V.77. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 0.1 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

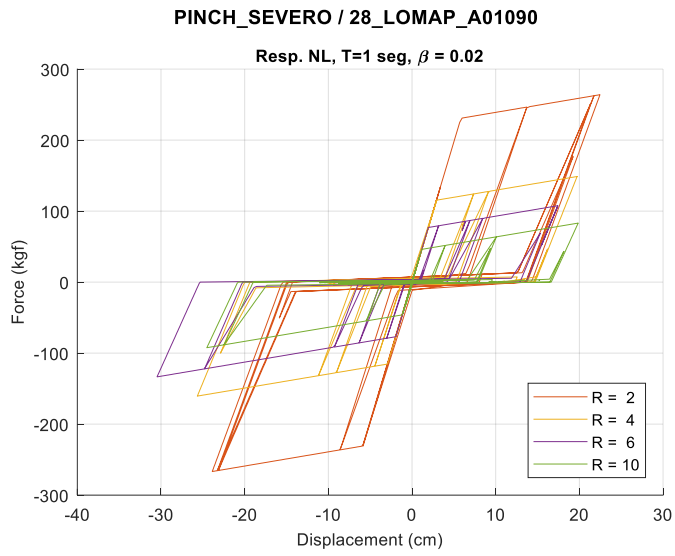


Figura V.78. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 1.0 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

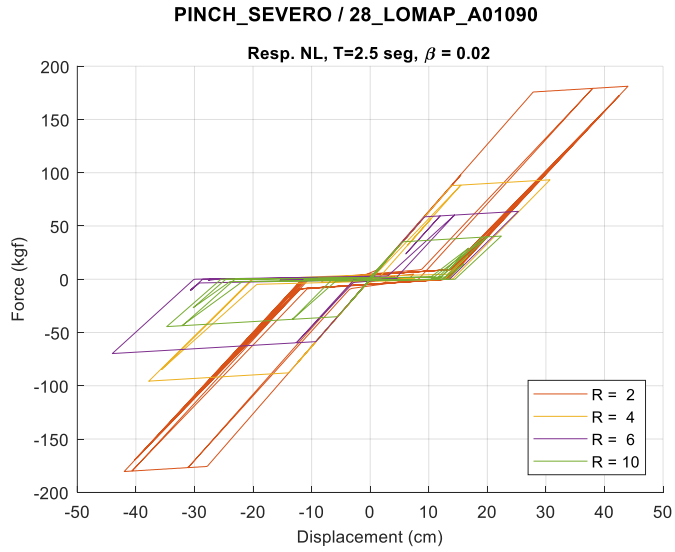


Figura V.79. Respuesta histerética de sistema de degradación severa. Tel = 2.5 seg. GM: 28_LOMAP_A01090.

A continuación, se presentan los resultados del ajuste Bayesiano para la identificación de cada uno de los sistemas no-lineales presentados.

4.5.1 Identificación en Fase Fuerte

(a) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 0.1$ seg.

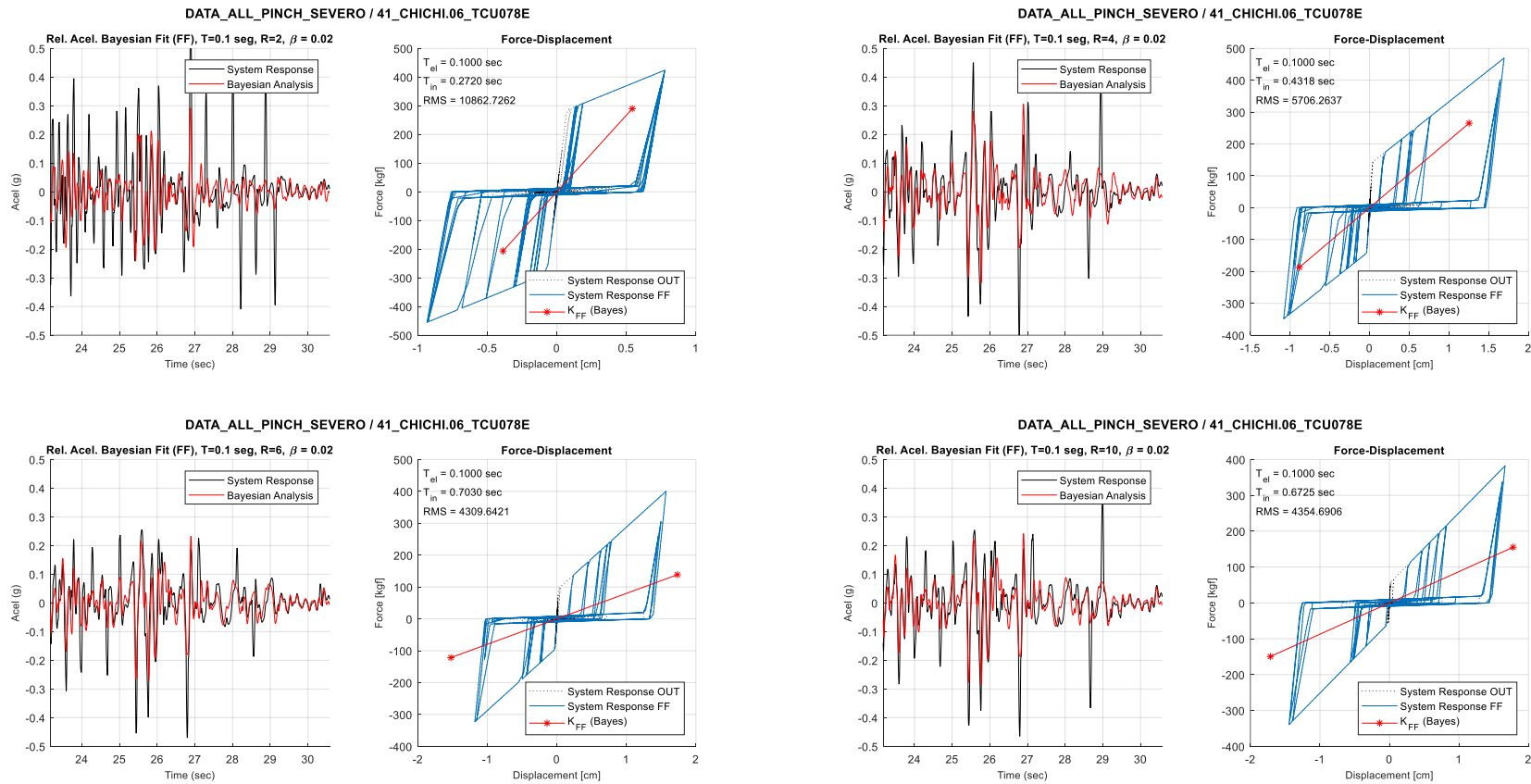


Figura V.80. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 1.0$ seg.

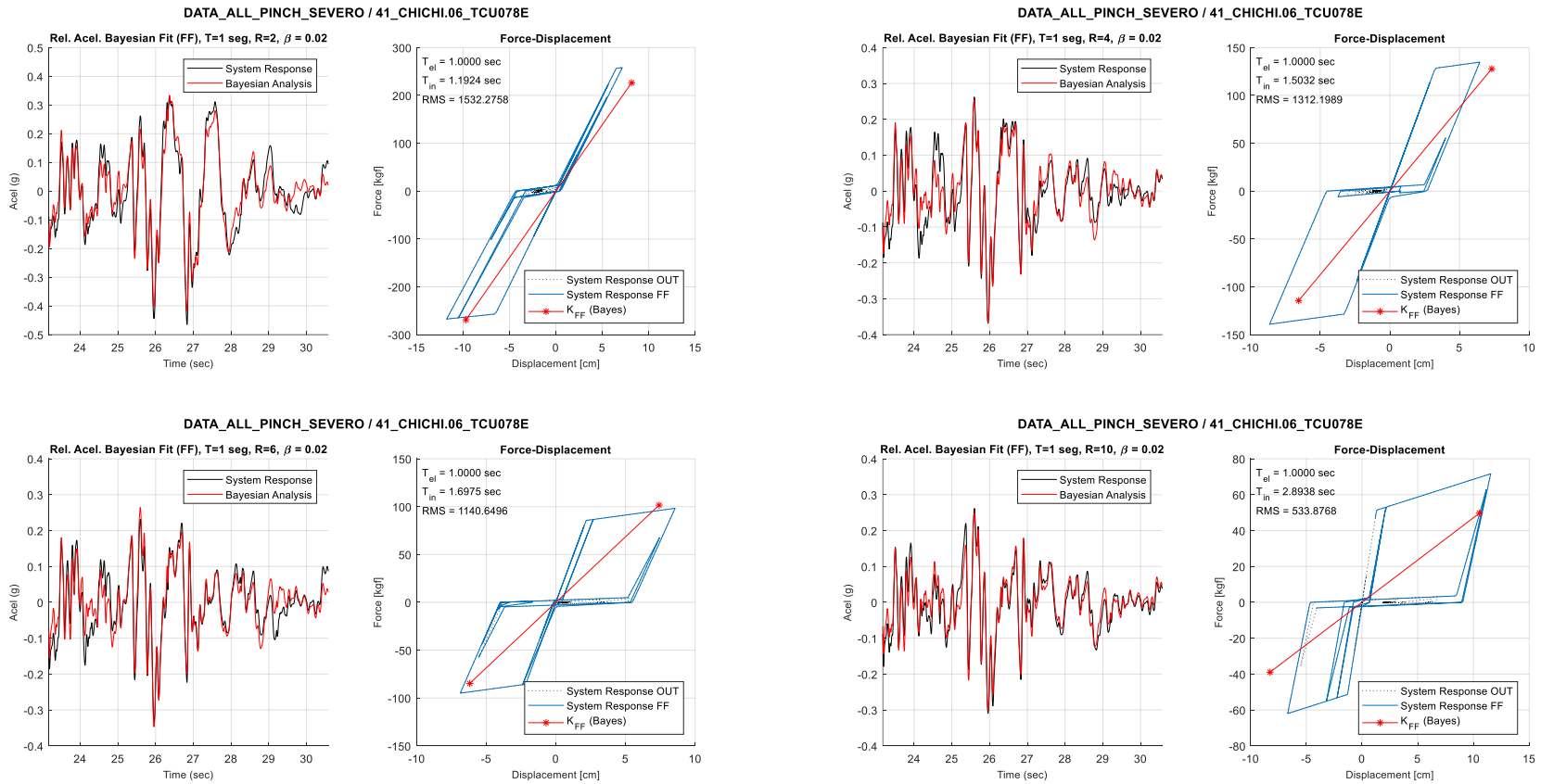


Figura V.81. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 2.5$ seg.

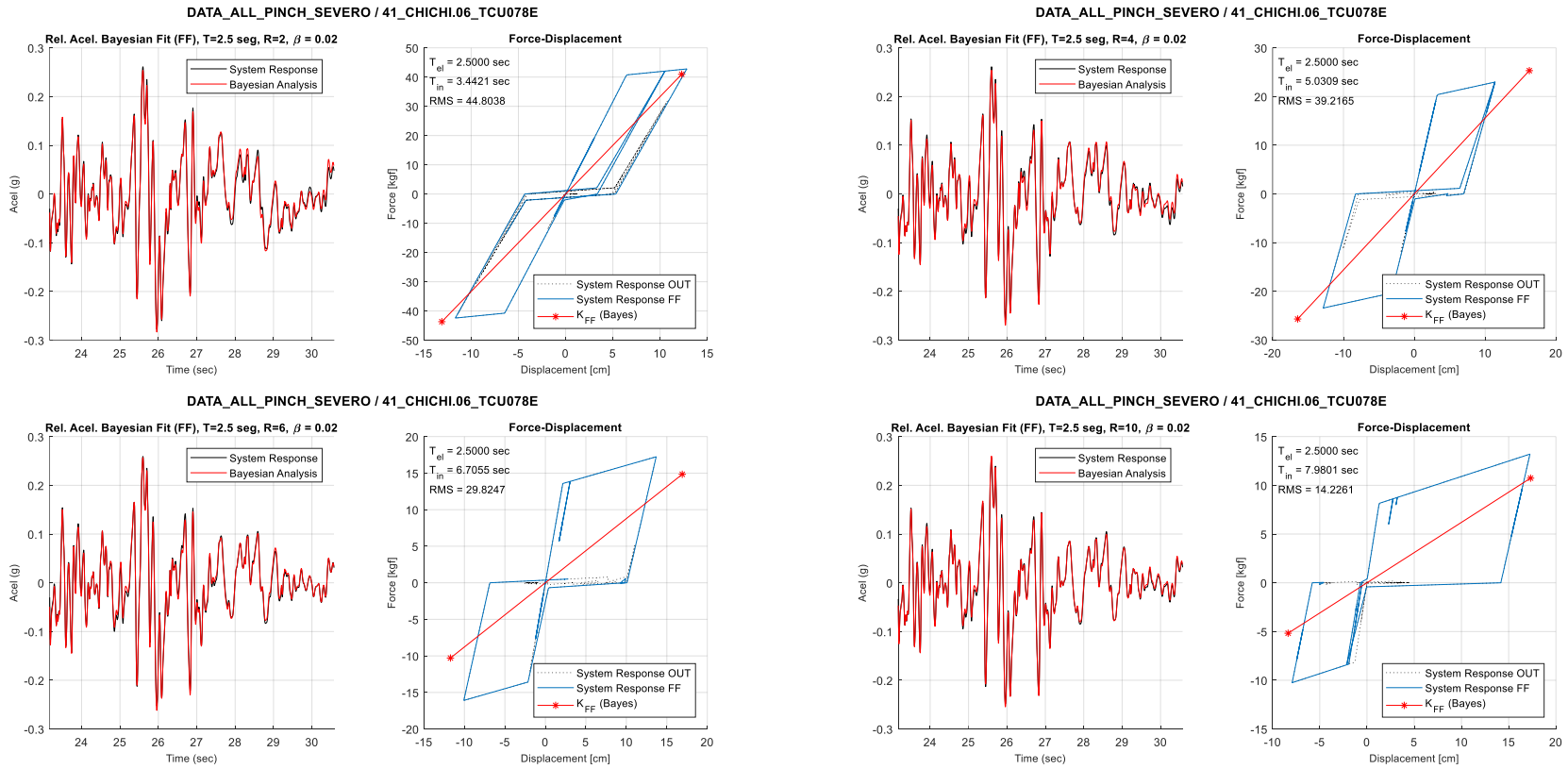


Figura V.82. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, $T_{el} = 0.1$ seg.

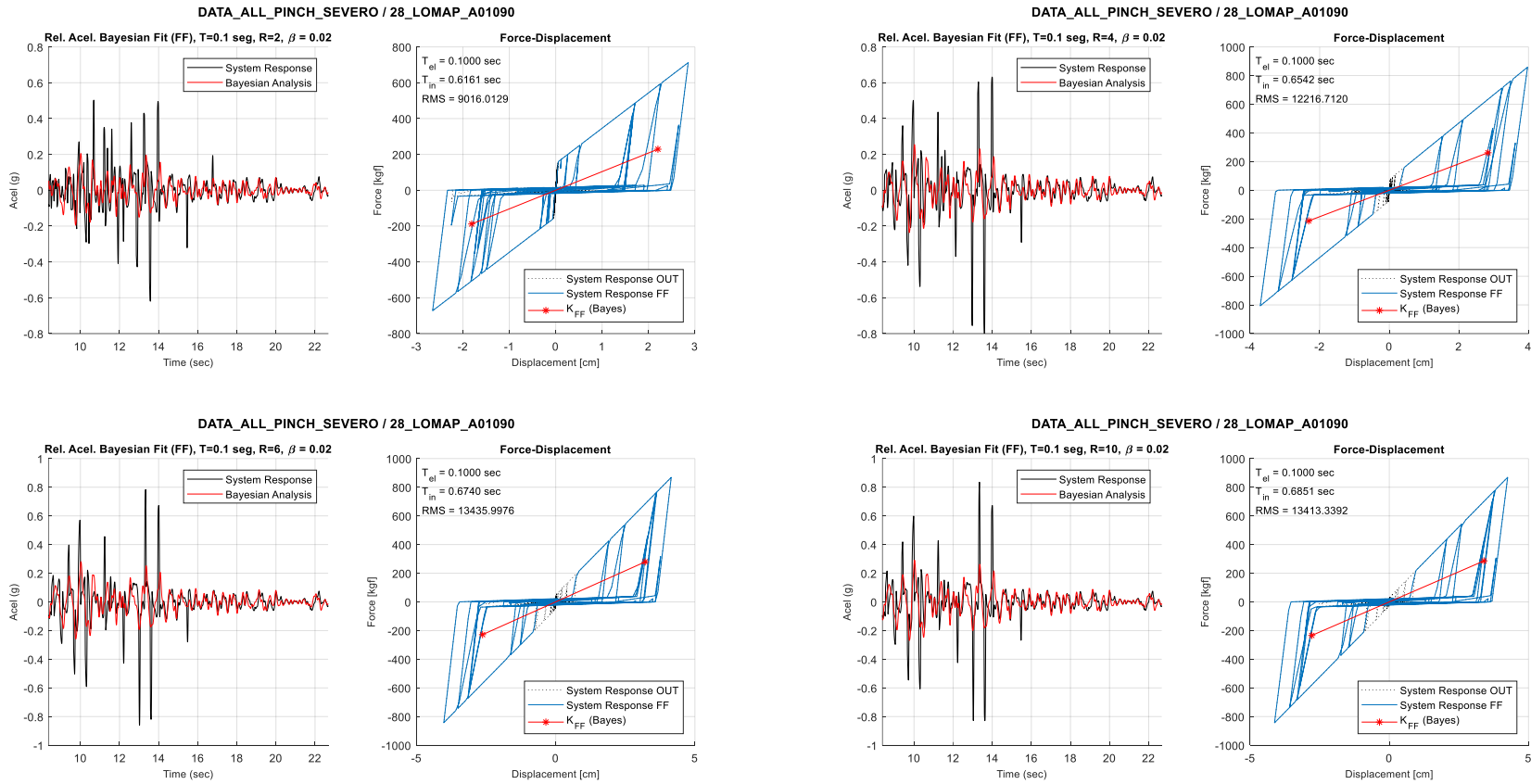


Figura V.83. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, $T_{el} = 1.0$ seg.

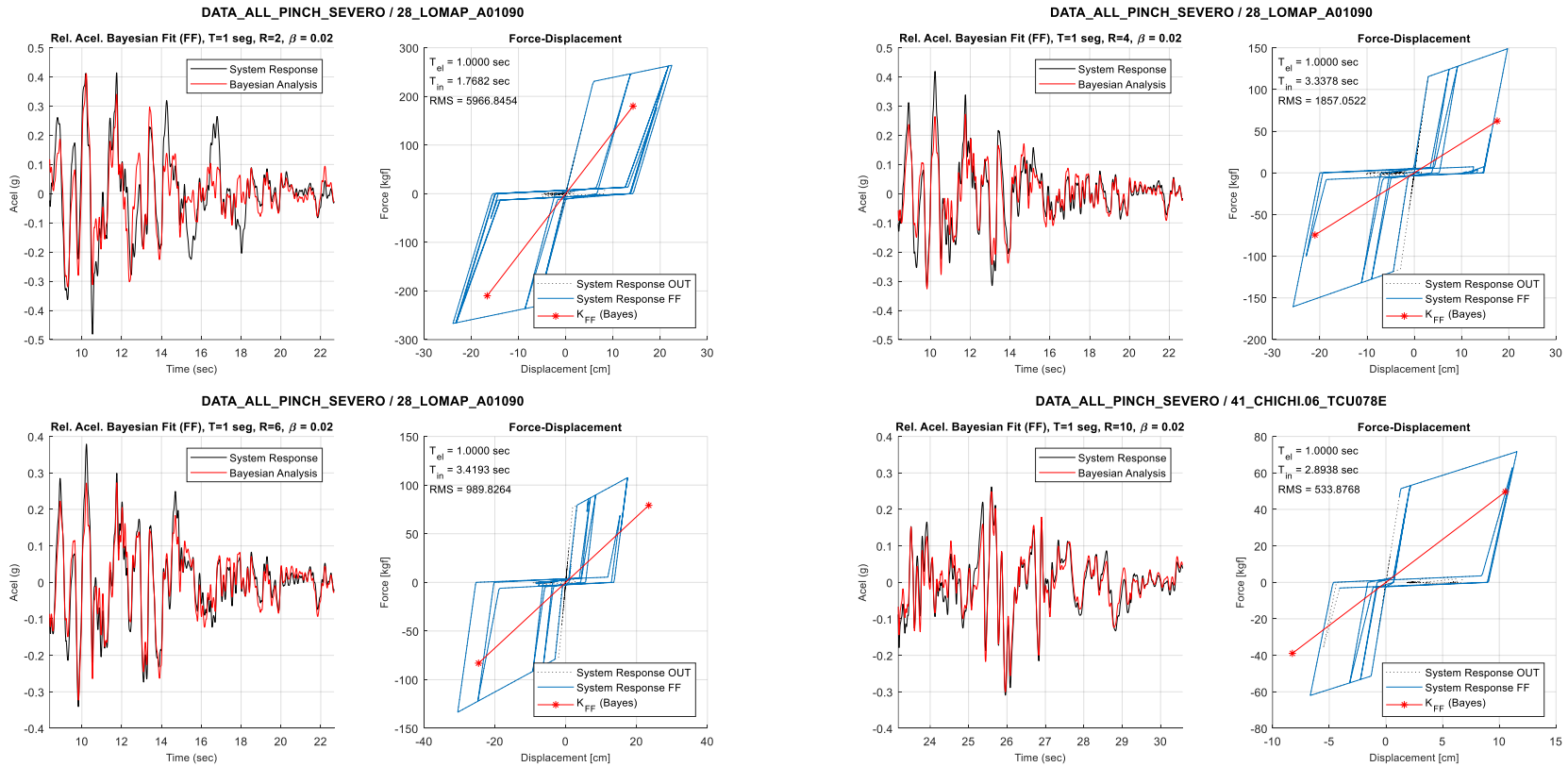


Figura V.84. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, $T_{el} = 2.5$ seg.

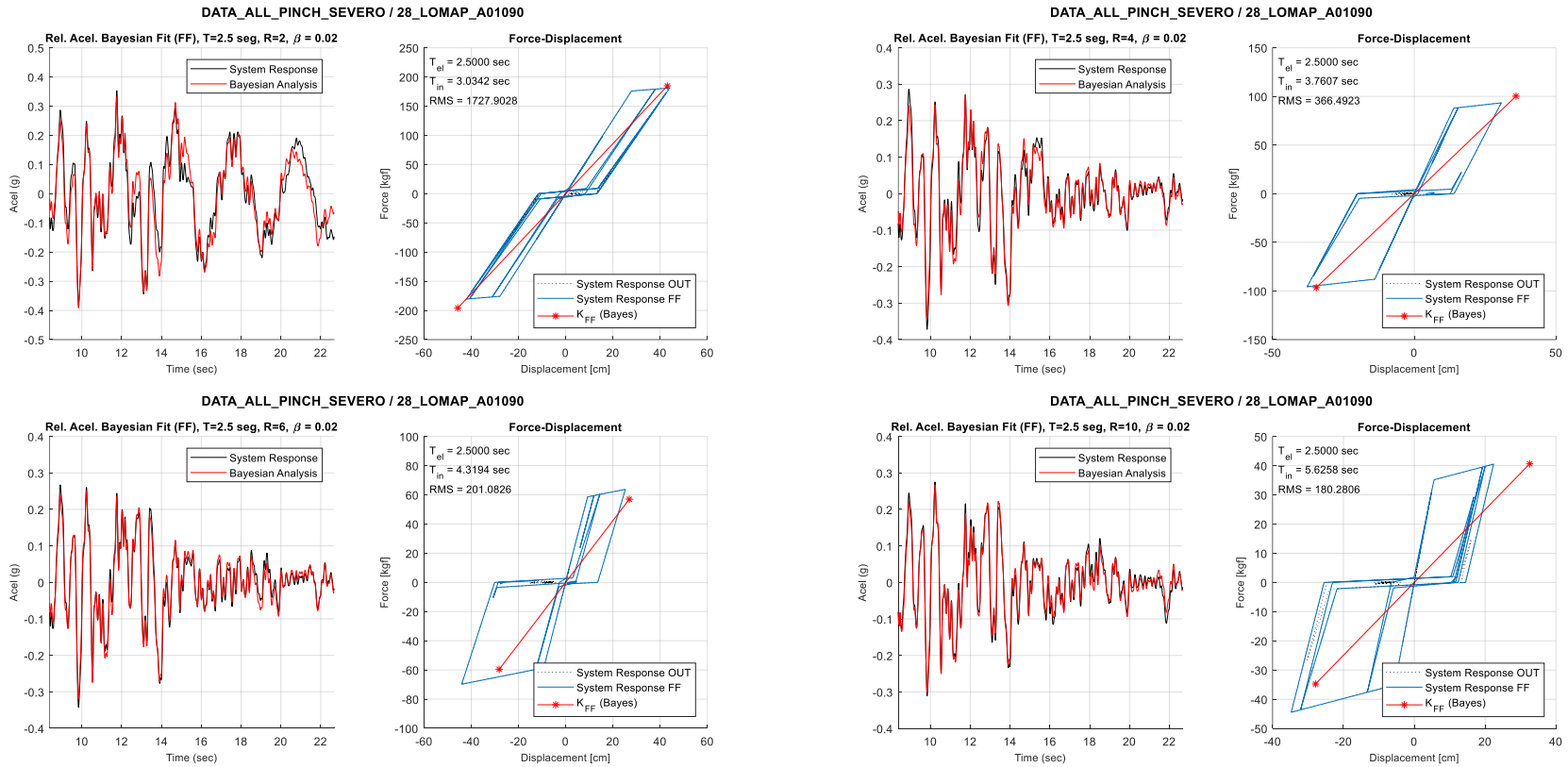


Figura V.85. Ajuste bayesiano en fase fuerte a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

4.5.2 Identificación por Ventanas de Tiempo

(a) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 0.1$ seg.

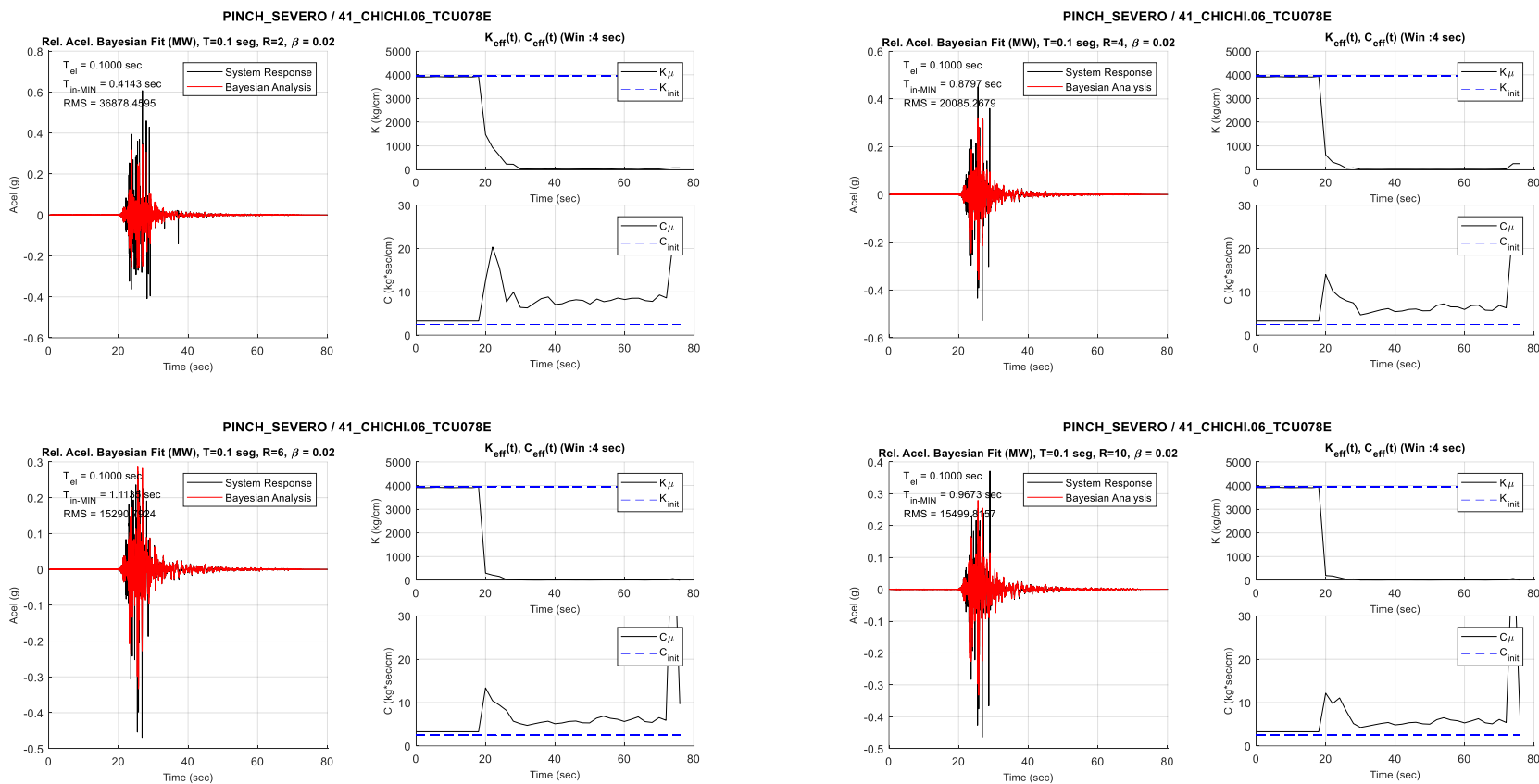


Figura V.86. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(b) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 1.0$ seg.

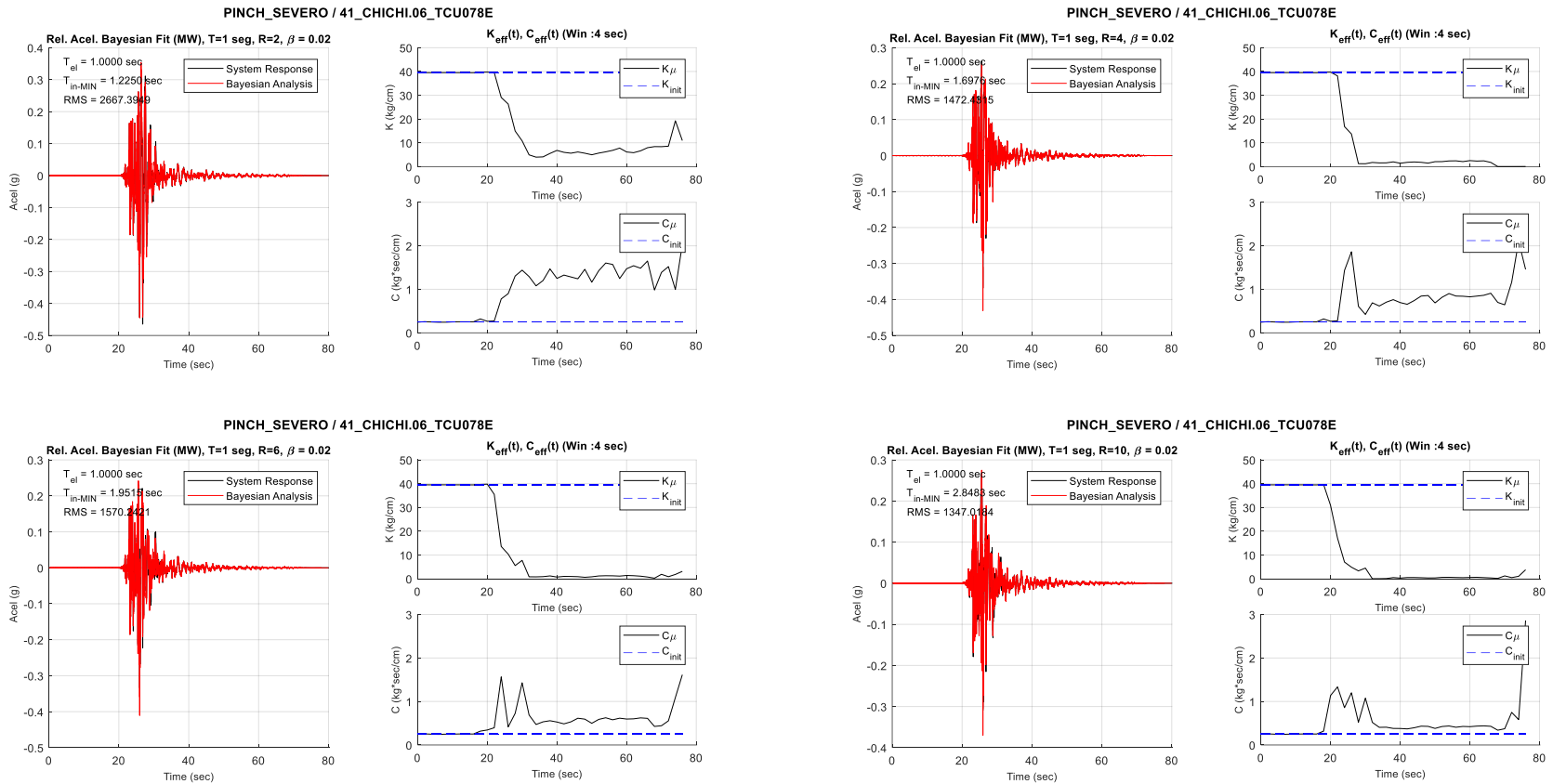


Figura V.87. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(c) 41_CHICHI06_TCU078E – Degradación Severa, $T_{el} = 2.5$ seg.

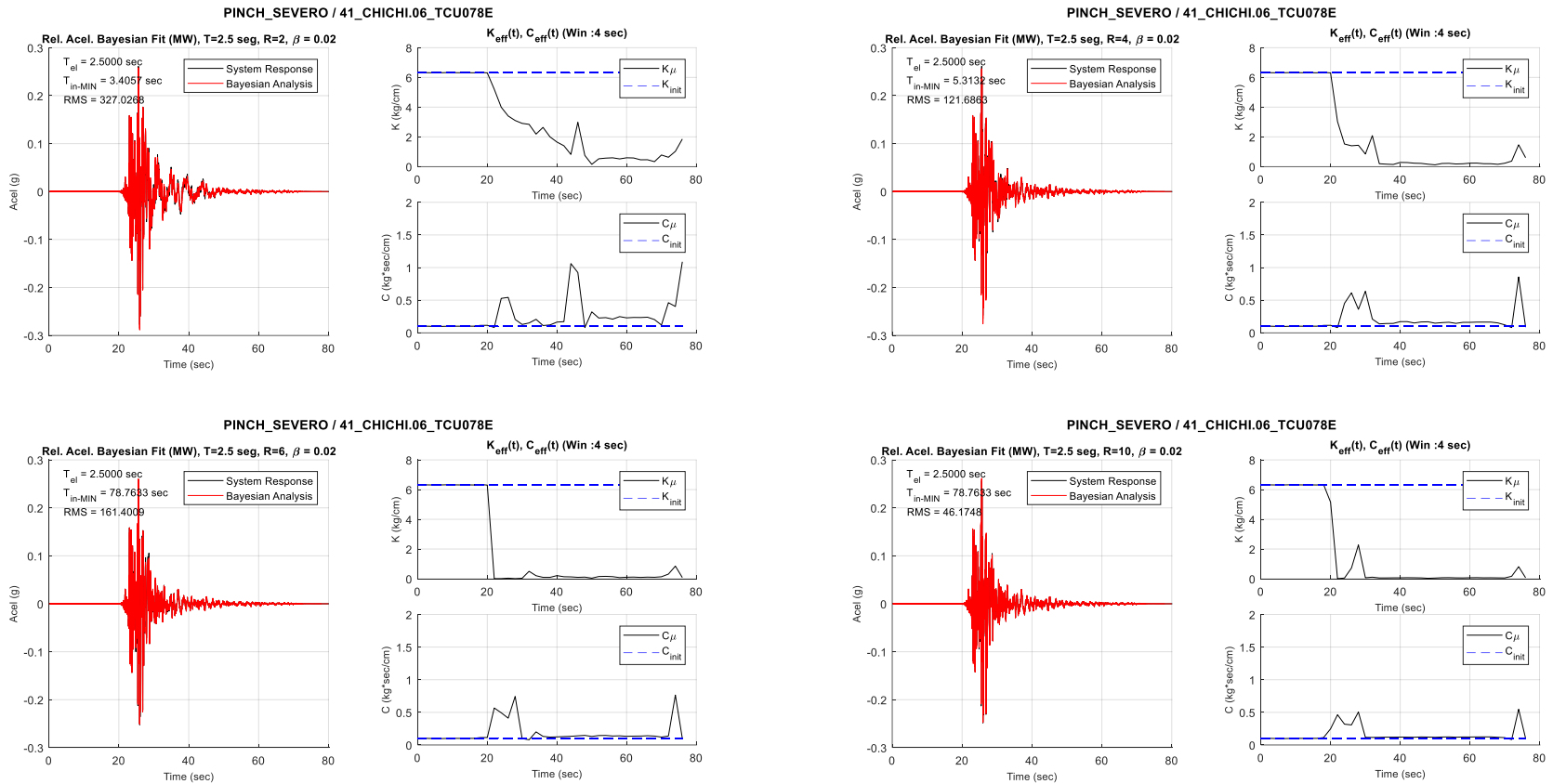


Figura V.88. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 2.5$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 41_CHICHI06_TCU078E.

(d) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, $T_{el} = 0.1$ seg.

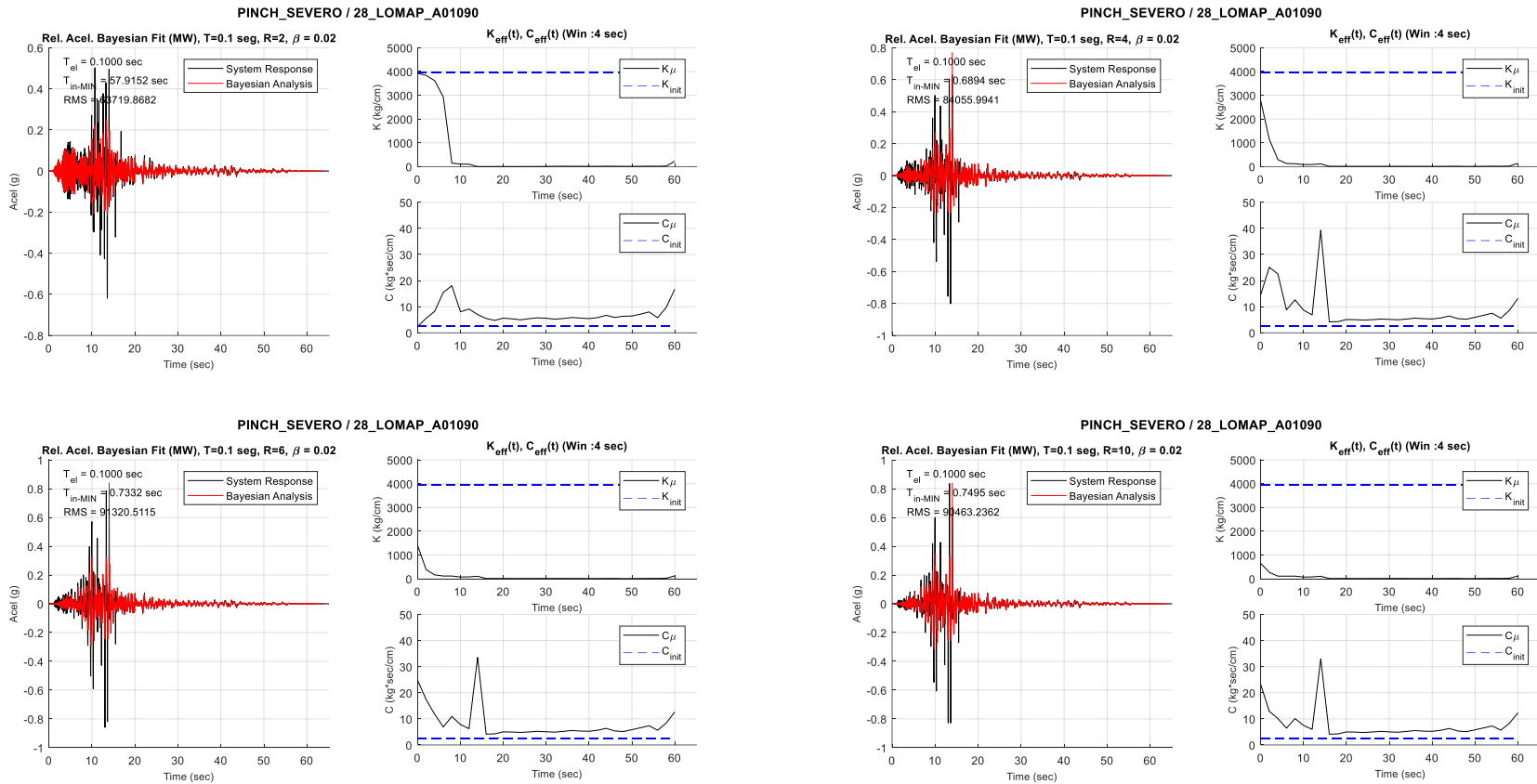


Figura V.89. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 0.1$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(e) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, $T_{el} = 1.0$ seg.

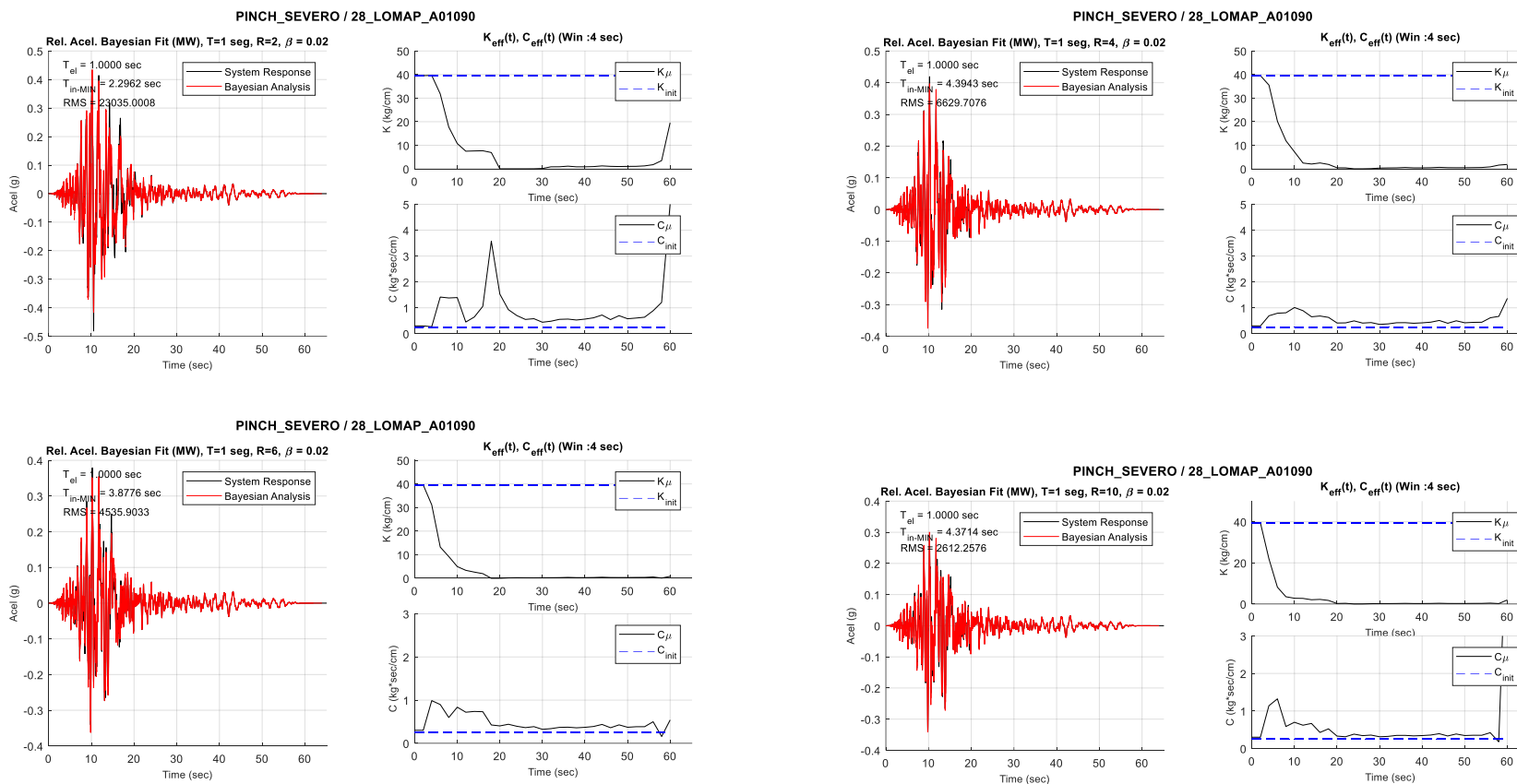


Figura V.90. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 2, 4, 6$ y 10 . GM: 28_LOMAP_A01090.

(f) 28_LOMAP_A01090 – Degradación Severa, Tel = 2.5 seg.

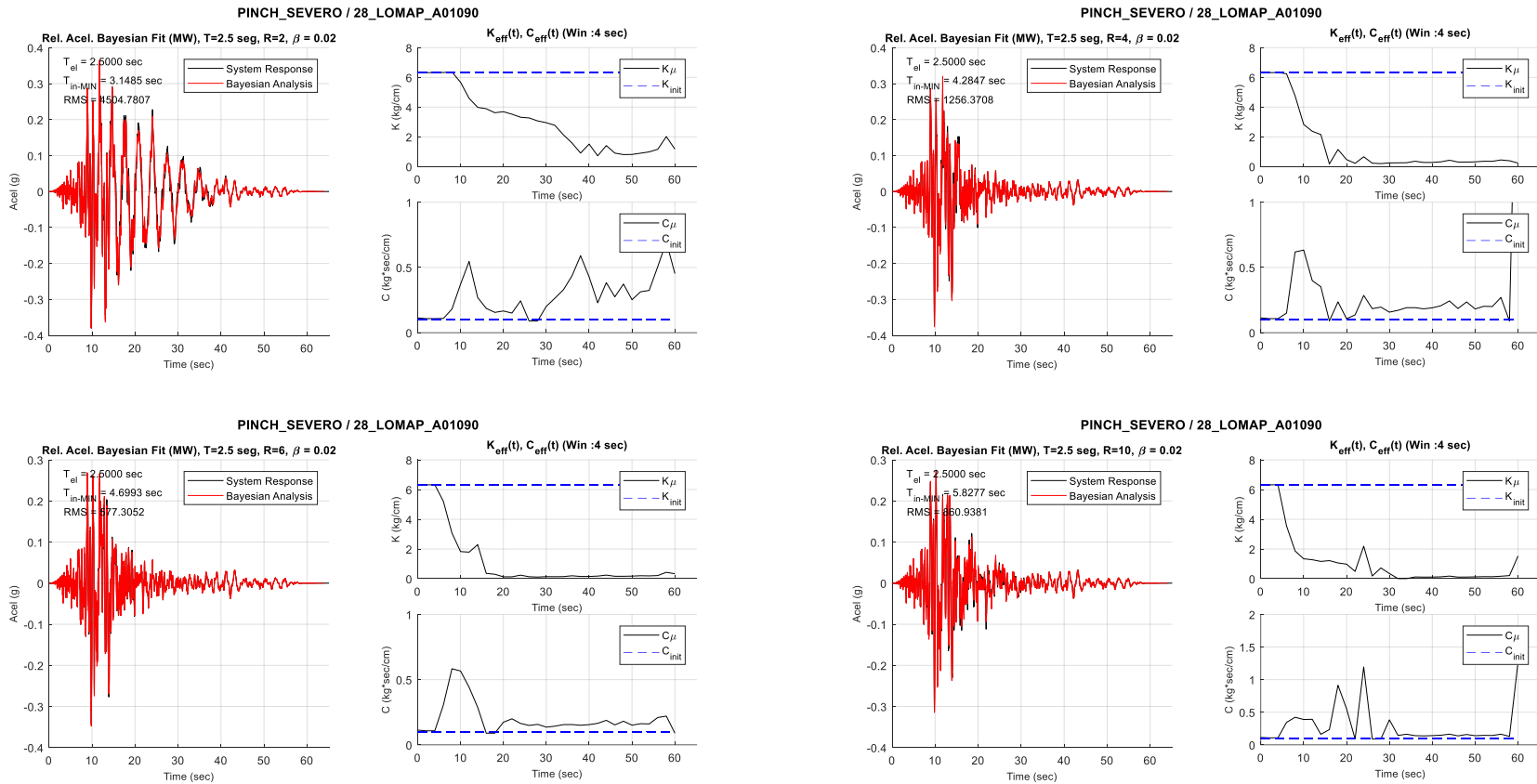


Figura V.91. Ajuste bayesiano por ventanas móviles a sistemas de degradación severa. Tel = 2.5 seg, R = 2, 4, 6 y 10. GM: 28_LOMAP_A01090.

4.5.3 Análisis de Resultados

Los análisis dinámicos fueron validados manteniendo en todos los casos un error del balance de energía menor a un 0.1 %. Algunas observaciones de los resultados expuestos anteriormente se presentan a continuación.

(a) Ajuste de Respuesta en Fase Fuerte

- En general, permanecen las observaciones realizadas para los resultados de identificación obtenidos de sistemas anteriormente tratados.
- Se logra de manera efectiva determinar un sistema lineal equivalente representativo de la fase fuerte de la respuesta para cada uno de los sistemas no-lineales tratados. Esta representatividad se logra en función del ajuste de respuesta en aceleraciones relativas.
- Como se presuponía, con el aumento del factor de reducción de la respuesta elástica, “R”, los sistemas lineal-equivalente de mejor ajuste presentan propiedades de rigidez efectiva cada vez menores, de las cuales es posible deducir un periodo aparente del sistema no-lineal.
- En particular, para los sistemas con degradación severa se ha observado que en casos en que se presentan pocos ciclos de recarga, pasando por pocos procesos de “sliding”, los resultados de rigidez efectiva presentan una ligera tendencia hacia las propiedades secantes que podrían obtenerse de las respectivas curvas histeréticas, y magnitudes comparables de deformaciones máximas (28_LOMAP_A01090 $T_{el} = 2.5$ seg, 41_CHICHI06_TCU078E $T_{el} = 2.5$ seg, 41_CHICHI06_TCU078E $T_{el} = 1.0$ seg). Por otro lado, cuando el efecto “pinching” y ciclos de “sliding” se hacen ponderantes en la fase fuerte de respuesta (28_LOMAP_A01090, $T_{el} = 0.1$ seg), se observa que las propiedades efectivas de rigidez obtenidas tienden progresivamente a cero.
- En casos en que el efecto “pinching” se encuentra fuertemente presente en la respuesta (28_LOMAP_A01090, $T_{el} = 0.1$ seg), se observa de manera común un problema de ajuste de los sistemas lineales-equivalentes para los efectos de “golpeteo” presentes en la respuesta, posterior a las zonas de “sliding” en que se recupera la fuerza restitutiva del sistema. Estos efectos en que la no-linealidad se presenta de manera abrupta en la respuesta concentran la mayoría de los casos en que los métodos de ajuste de respuesta reducen su efectividad.

(b) Ajuste de Respuesta por Ventanas Móviles

- En general, permanecen las observaciones realizadas para los resultados de identificación obtenidos de sistemas anteriormente tratados.
- Este enfoque, y sus resultados, no logran definir un sistema lineal representativo de la respuesta histerética, sin embargo, proporciona un panorama dinámico de las instancias en que el sistema incursiona en rangos inelásticos, presentando un seguimiento de propiedades efectivas de rigidez y amortiguamiento. Este enfoque a su vez se aproxima más la implementación desarrollada por Katsanos y Sextos (2015).
- En general, los niveles de ajuste alcanzados en términos de error cuadrático medio (RMS) son de mejor calidad en comparación con los obtenidos ajustando la fase fuerte completa de la respuesta.
- En los resultados presentados se observa claramente cómo el nivel de incursión inelástica del sistema impacta en las propiedades de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo identificados. Con el aumento progresivo del factor de reducción de la respuesta elástica (“R”), la historia de rigidez efectiva presenta cada vez mayores reducciones en su magnitud.
- Los sistemas tratados en esta sección presentan una componente de degradación, y esto es percibido por el seguimiento de las propiedades efectivas. Se observa que a partir de las primeras incursiones inelásticas el sistema presentan una baja en sus magnitudes, la cual no se ve restituida en lo que resta de la respuesta. De manera similar, esta baja en la rigidez efectiva se ve compensada con un aumento del amortiguamiento efectivo.
- De manera característica para este modelo de degradación severa se observa que para las primeras incursiones inelásticas se presenta un aumento puntual del amortiguamiento efectivo, seguido por una baja instantánea en su magnitud. Este fenómeno se encuentra directamente relacionado con el modelo histerético, que en un primer ciclo de carga responde con una amplia disipación histerética, seguido por ciclos de rigidez degradada incluyendo el efecto “pinching”, que reducen fuertemente esta componente de disipación.
- Los sistemas con degradación severa analizados incluyen una fuerte componente de “pinching”, que en ocasiones lleva la respuesta del sistema a trascurrir periodos de rigidez muy baja (“sliding”) hasta alcanzar el punto de recuperación de la fuerza restitutiva. Con el uso del ajuste de respuesta por ventanas móviles de corta duración, se

corre el riesgo de que las propiedades efectivas representativas se vean fuertemente influenciadas por este rango de respuesta, alejándose a las propiedades efectivas asociadas las magnitudes máximas de fuerza y desplazamientos alcanzados por el sistema. En este sentido, para este tipo de sistemas con una fuerte componente de “pinching”, conviene desarrollar el análisis con ventanas de mayor duración.

4.6. Identificación en Modelos con Suavización

Aplicando este enfoque de identificación y linealización equivalente a modelos constitutivos con características de suavización (histéresis tipo Bouc-Wen descritas en el Capítulo IV) se obtienen resultados similares a los ya descritos, alcanzando gradualmente niveles menores de error cuadrático medio (RMS) respecto a la respuesta modelada. Esto se logra tanto para la aplicación del método por ventanas móviles como su aplicación en fase fuerte.

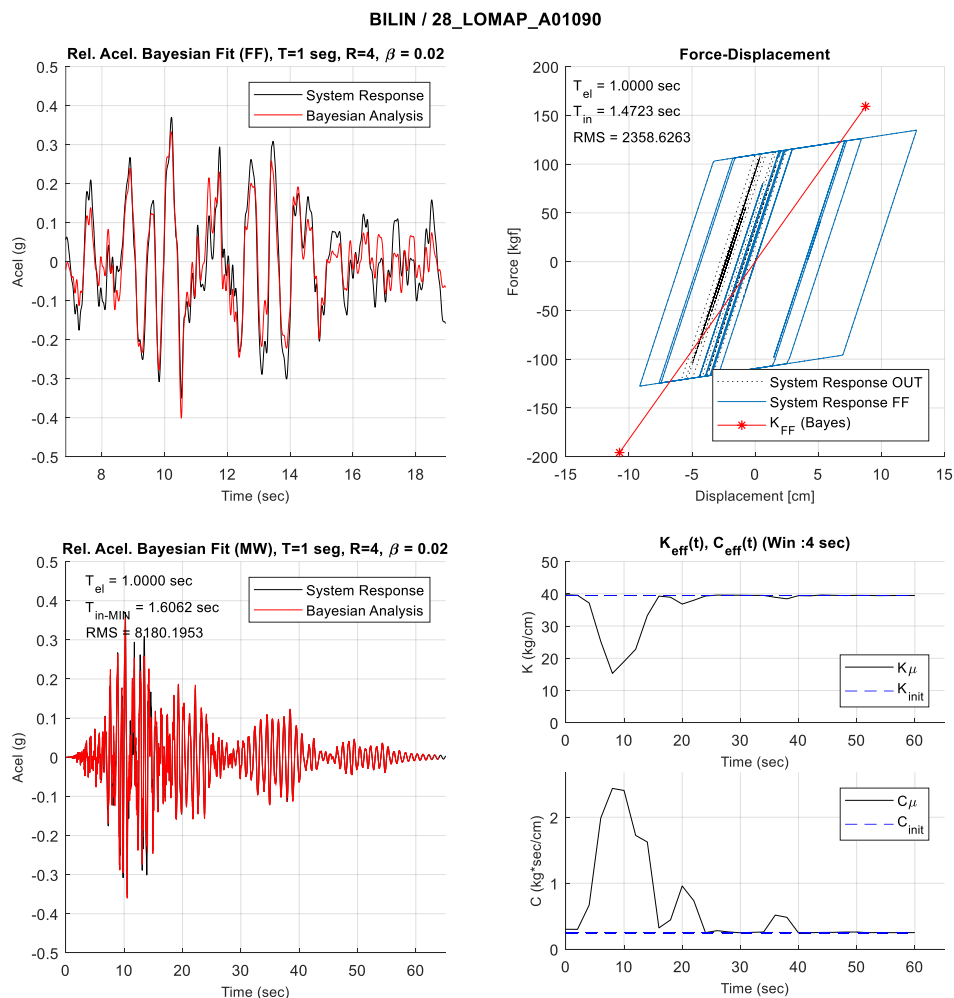


Figura V.92. Ajuste bayesiano en (a) fase fuerte y (b) por ventanas móviles, a sistema bi-lineal sin degradación.

$T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4$. GM: 28_LOMAP_A01090.

BW / 28_LOMAP_A01090

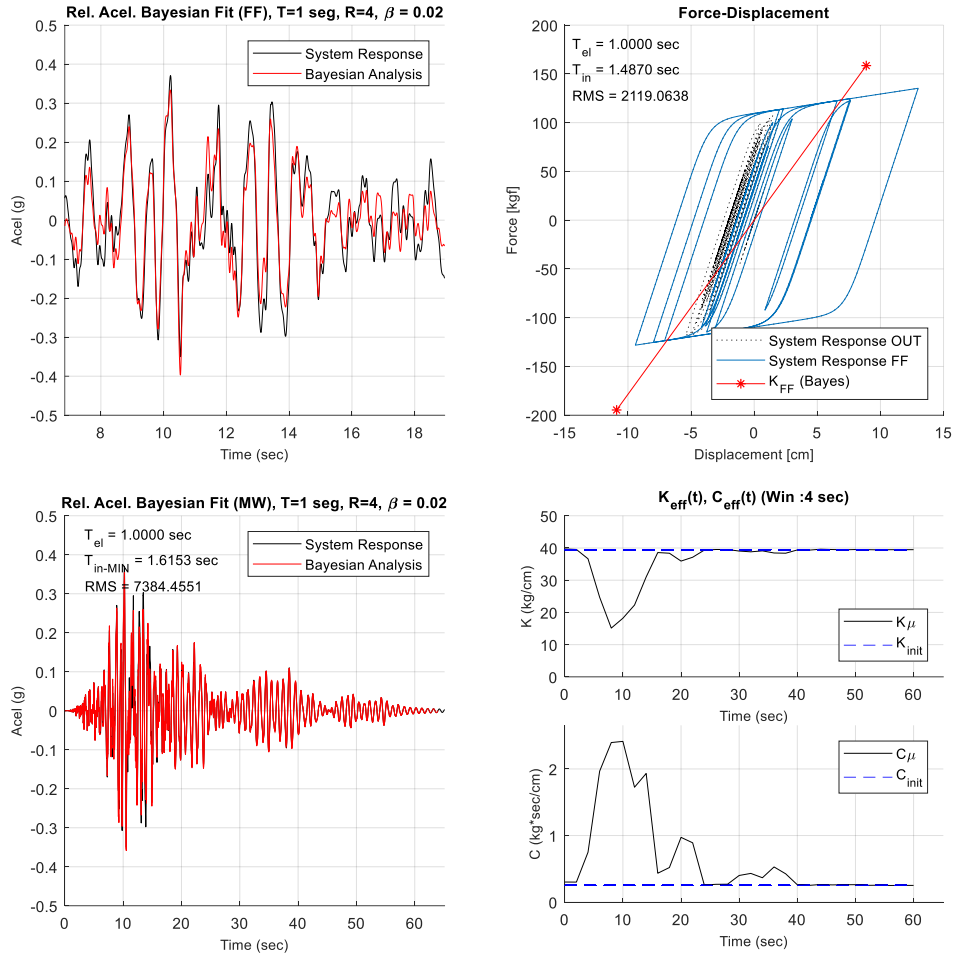


Figura V.93. Ajuste bayesiano en (a) fase fuerte y (b) por ventanas móviles, a sistema Bouc-Wen ($n = 5$) sin degradación. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4$. GM: 28_LOMAP_A01090.

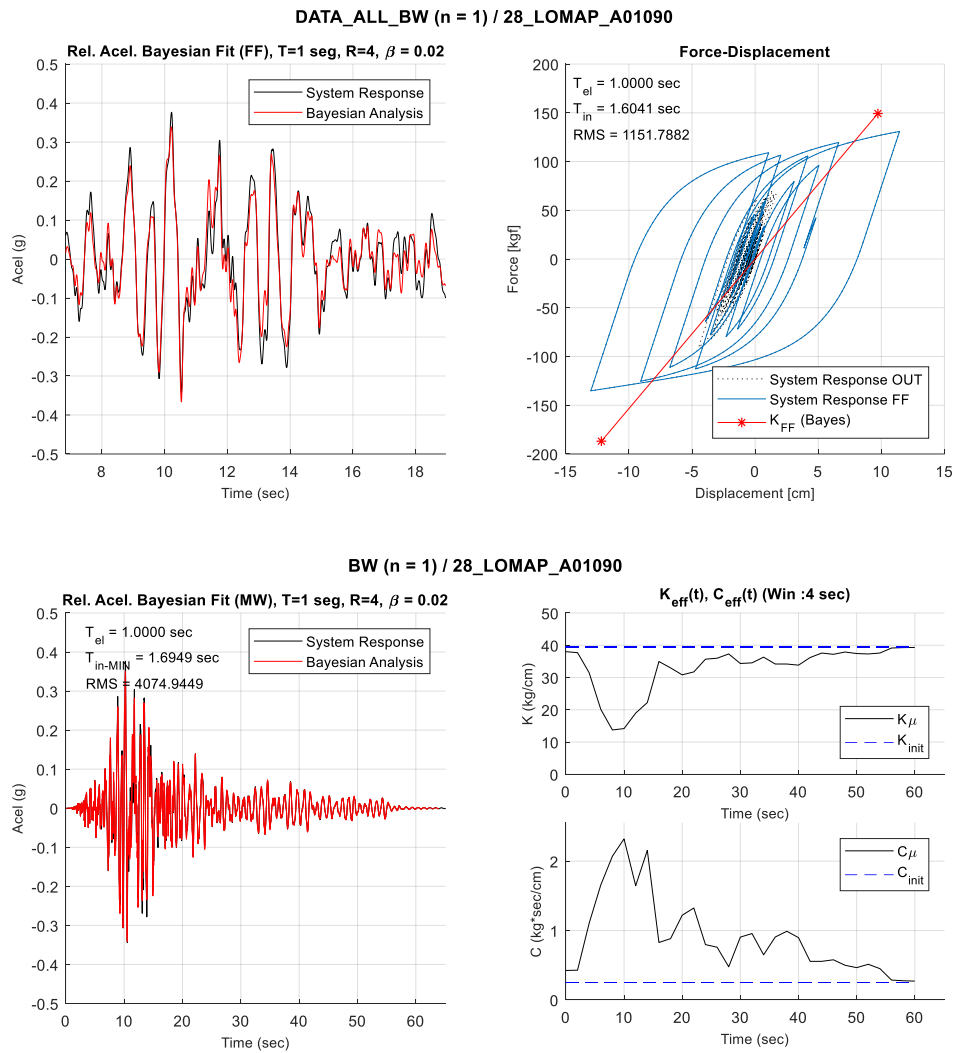


Figura V.94. Ajuste bayesiano en (a) fase fuerte y (b) por ventanas móviles, a sistema Bouc-Wen ($n = 1$) sin degradación. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4$. GM: 28_LOMAP_A01090.

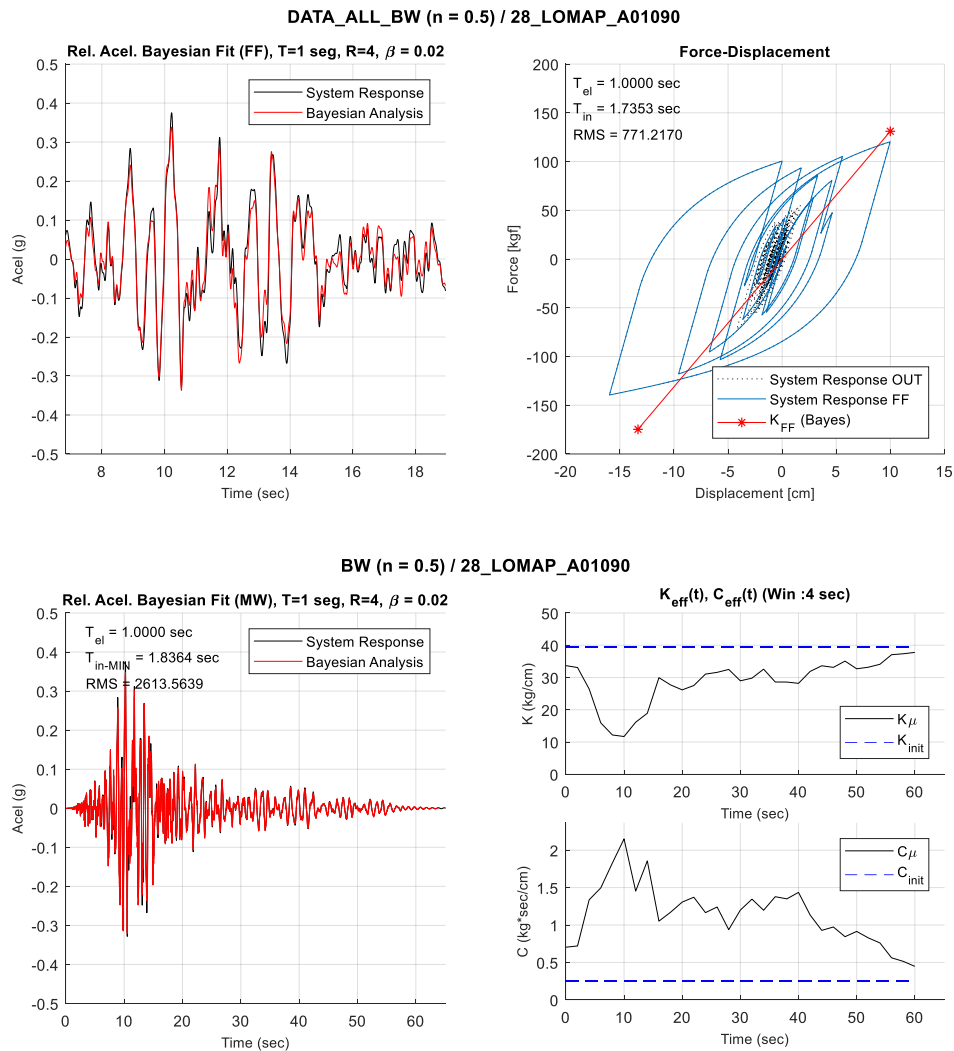


Figura V.95. Ajuste bayesiano en (a) fase fuerte y (b) por ventanas móviles, a sistema Bouc-Wen ($n = 0.5$) sin degradación. $T_{el} = 1.0$ seg, $R = 4$. GM: 28_LOMAP_A01090.

Como se muestra en las figuras Figura V.92, Figura V.93, Figura V.94 y Figura V.95, la componente de suavización en la respuesta histerética del sistema, que es un aspecto comúnmente presente en respuestas de sistemas reales, repercute en una mejora del ajuste del sistema lineal-equivalente (en términos de RMS) al disminuir los cambios abruptos de rigideces tangentes, facilitando la estabilidad y calidad del ajuste lineal. Con mayores grados de suavización entre ramas de respuesta, los resultados de identificación de propiedades lineales-equivalentes en fase fuerte, tienden a parecerse a las propiedades secantes, desarrollando deformaciones máximas similares.

Capítulo VI. Espectros de Elongación del Periodo Aparente

VI.1. Introducción

Para la construcción de espectros de elongación del periodo, Katsanos y Sextos (2015) se basan en una identificación de propiedades aparentes a partir de un método de espacio-frecuencia, y evaluado por ventanas de tiempo móviles a lo largo de la respuesta sísmica completa del sistema.

Con la intención de estimar espectros de elongación del periodo cuyas magnitudes se encuentren respaldadas por la representatividad de sistemas lineales-equivalentes, para su construcción se utilizaron las propiedades lineales-equivalentes identificadas a partir del Análisis Bayesiano realizado para las fases fuertes de la respuesta sísmica. Para estimar el periodo aparente (o periodo inelástico) se hará una transformación directa a partir de la rigidez efectiva identificada, considerando la masa del sistema conocida.

A continuación, se presentan y discuten los espectros de elongación del periodo obtenidos bajo esta perspectiva y para los sistemas tratados a lo largo de este estudio.

VI.2. Espectros de Elongación en base Propiedades Secantes

Tal como se ha descrito en el capítulo anterior, se considerarán los espectros de elongación del periodo aparente obtenidos a partir de las propiedades secantes como un primer elemento de referencia y comparación de resultados, debido a su amplio uso en materias del diseño y análisis estructural. Se hace hincapié en que las propiedades secantes de un sistema no-lineal no necesariamente se encuentran asociadas a la definición de un sistema lineal-equivalente en términos de similitud de la respuesta. Las propiedades secantes se encuentran específicamente definidas a partir de la demanda máxima de desplazamiento del sistema, y no dan cuenta del régimen histerético o modelo constitutivo del sistema no-lineal.

Se presenta a continuación algunos de los espectros de elongación obtenidos del set completo de registros sísmicos que fue analizado.

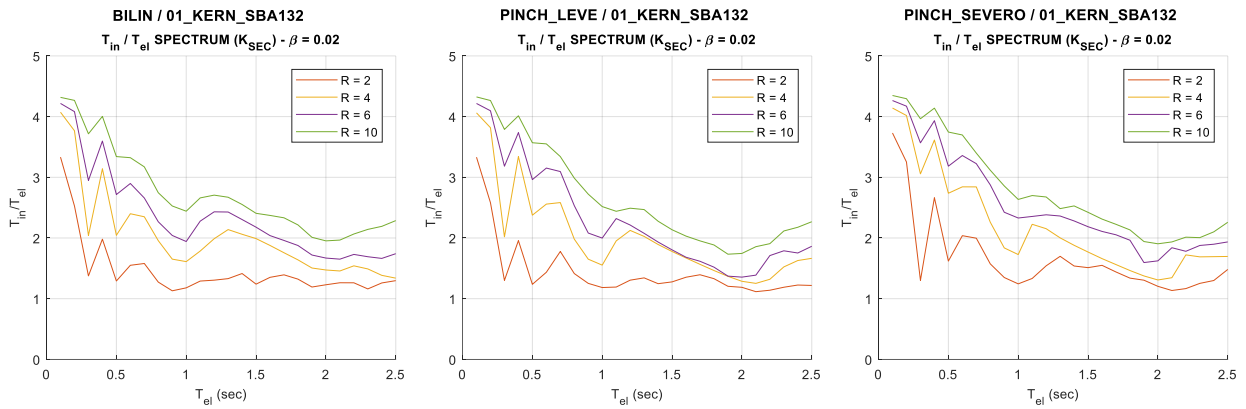


Figura VI.1. Espectros de Elongación del Periodo (Propiedades Secantes). Modelos (a) Bilineal, (b) Degradación Leve, (c) Degradación Severa. GM: 01_KERN_SBA132.

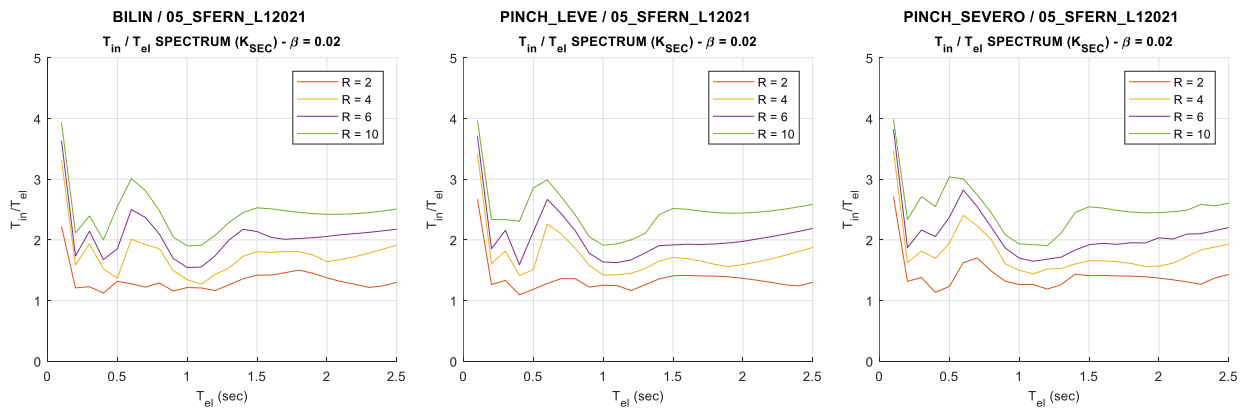


Figura VI.2. Espectros de Elongación del Periodo (Propiedades Secantes). Modelos (a) Bilineal, (b) Degradación Leve, (c) Degradación Severa. GM: 05_SFERN_L12021.

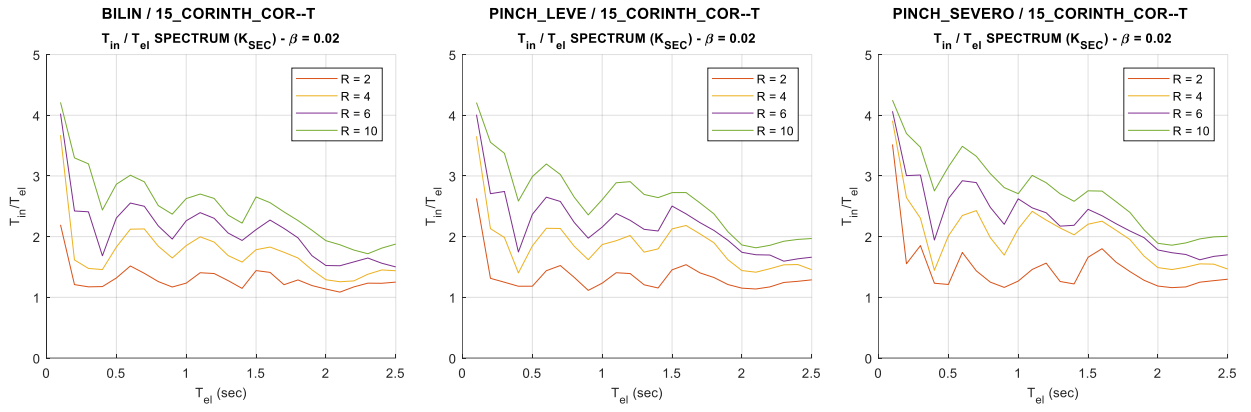


Figura VI.3. Espectros de Elongación del Periodo (Propiedades Secantes). Modelos (a) Bilineal, (b) Degradación Leve, (c) Degradación Severa. GM: 15_CORINTH_COR--T.

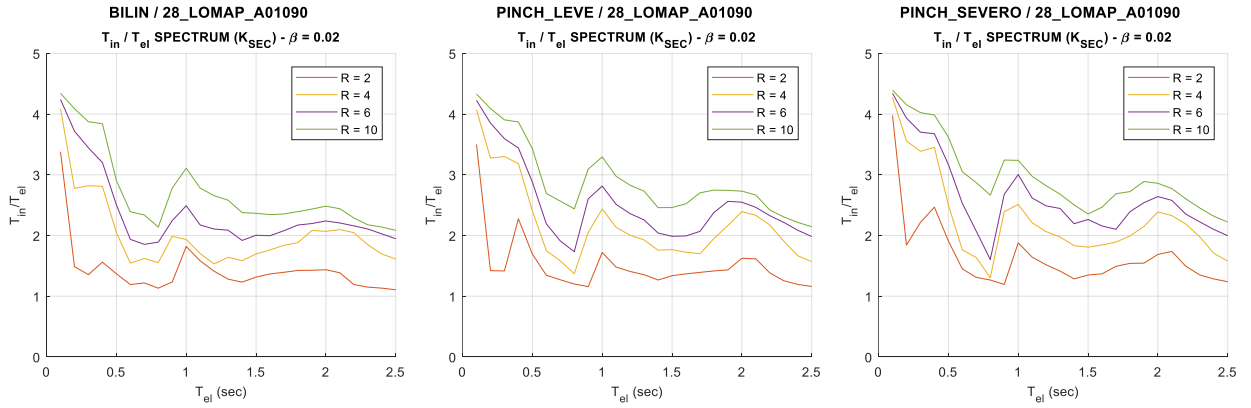


Figura VI.4. Espectros de Elongación del Periodo (Propiedades Secantes). Modelos (a) Bilineal, (b) Degradación Leve, (c) Degradación Severa. GM: 28_LOMAP_A01090.

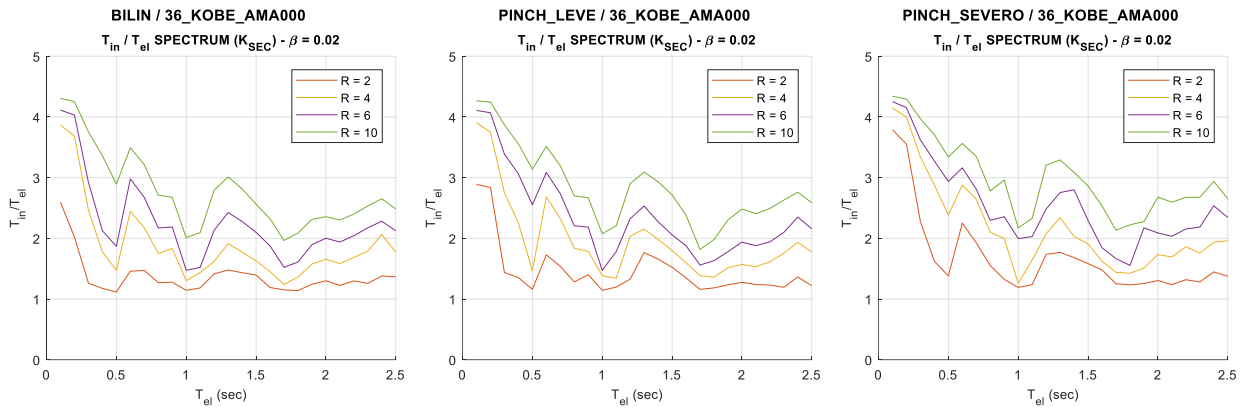


Figura VI.5. Espectros de Elongación del Periodo (Propiedades Secantes). Modelos (a) Bilineal, (b) Degradación Leve, (c) Degradación Severa. GM: 36_KOBE_AMA000.

De manera generalizada se obtiene que la elongación del periodo aparente aumenta proporcionalmente con la magnitud del factor de reducción de la respuesta elástica “R”, aspecto que se mantiene constante para todo el abanico de periodos iniciales.

Una gran parte de los espectros de elongación presenta mayores amplitudes en periodos elásticos bajos (0.1 a 0.5 seg.), y un decaimiento en magnitud hacia sistemas más flexibles. Sin embargo, es común observar espectros que presentan elongaciones mayores en torno a periodos elásticos particulares. Este fenómeno se atribuye a la particularidad y naturaleza de cada registro sísmico en términos de contenido de frecuencia, características del suelo, etc.

En general, para un mismo registro sísmico no se observan grandes diferencias entre los espectros de elongación obtenidos para cada modelo constitutivo (Figura VI.1-Figura VI.5). En este caso, con el uso de las propiedades secantes, los niveles de elongación del periodo se encuentran directamente relacionadas con la demanda máxima de desplazamiento de cada sistema hysterético. Por consecuencia, la similitud entre los espectros obtenidos únicamente da cuenta de la ligera equivalencia en términos de demanda de deformaciones entre sistemas sin degradación y amplios rangos de amortiguamiento hysterético, versus sistemas con degradación de rigidez y bajo amortiguamiento hysterético.

A continuación, se presenta el espectro resultante para el conjunto de 290 registros sísmicos considerados.

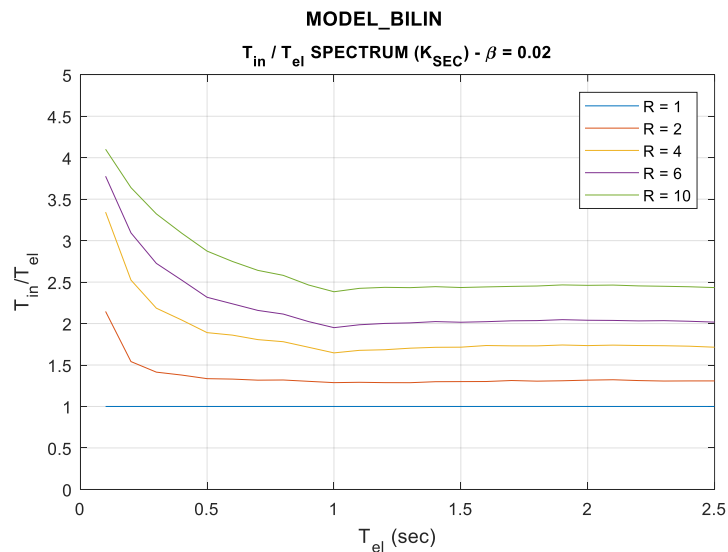


Figura VI.6. Espectro de Elongación del Periodo Aparente (En base a Propiedades Secantes) para el conjunto de 290 registro sísmicos. Modelo Bilineal Sin Degradación.

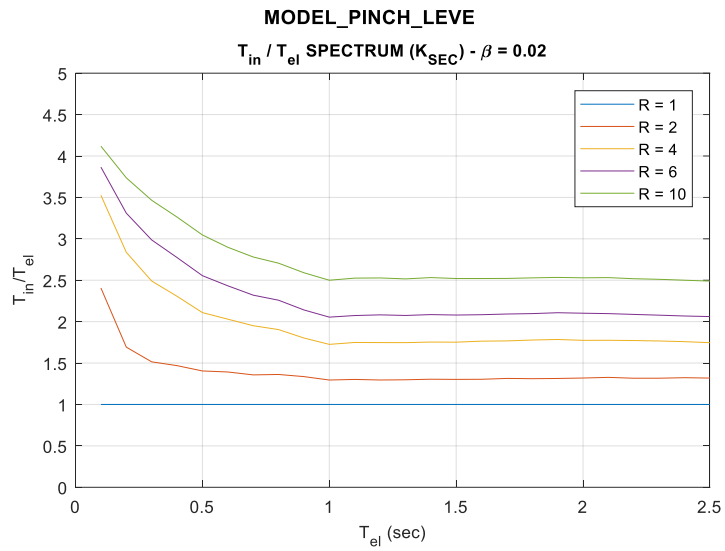


Figura VI.7. Espectro de Elongación del Periodo Aparente (En base a Propiedades Secantes) para el conjunto de 290 registro sísmicos. Modelo Multi-lineal de Degradación Leve.

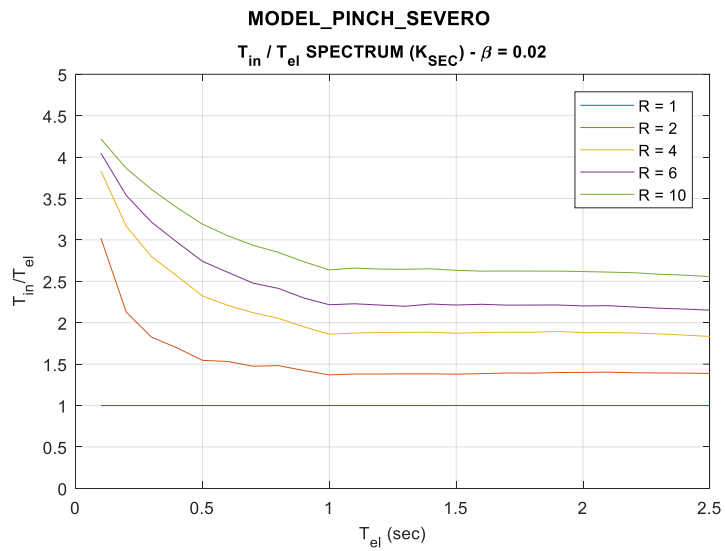


Figura VI.8. Espectro de Elongación del Periodo Aparente (En base a Propiedades Secantes) para el conjunto de 290 registro sísmicos. Modelo Multi-lineal de Degradación Severa.

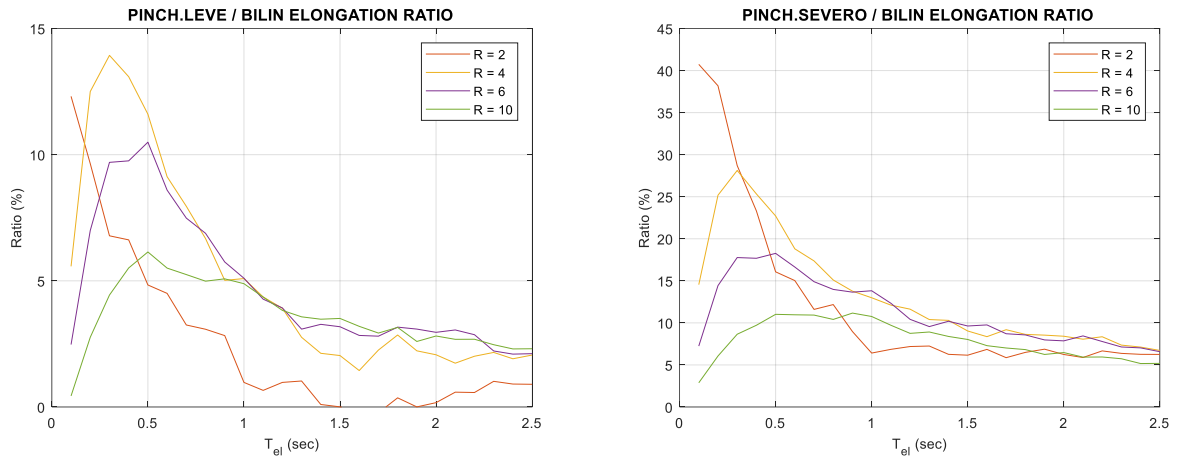


Figura VI.9. Razón de amplitudes de elongación del periodo entre modelos degradantes y no degradante.

Los resultados globales indican que las componentes de degradación en los modelos histeréticos amplifican la elongación del periodo aparente principalmente en rangos de periodos elásticos bajos, de 0.1 a 0.7 segundos, con un máximo de un 14% (degradación leve, $R = 4$) y un 40% (degradación severa, $R = 2$). Mientras que, para periodos elásticos mayores, reflejan un aumento máximo del orden de un 5% (degradación leve) y 15% (degradación severa), e independientes del factor de reducción de respuesta elástica.

De manera global, persiste y se confirma que las propiedades secantes no dan un confiable indicio de la respuesta del sistema ni del grado de degradación del sistema. Sin embargo, sí presentan una clara diferenciación de resultados en función de la magnitud del factor de reducción de la respuesta elástica (R), lo cual puede plantearse como una línea base para la comparación de los resultados de identificación.

VI.3. Espectros de Elongación en base a Identificación en Espacio-Frecuencia

Se presentan a continuación los espectros de elongación del periodo aparente obtenidos a partir de una identificación basada en la representación en espacio-frecuencia de la respuesta en aceleraciones relativas de los sistemas histeréticos (STFT). Este enfoque se aproxima a la implementación de los autores Katsanos y Sextos (2015), por lo que otorga una comparación directa con sus resultados.

Siguiendo la metodología original propuesta (descrita en Capítulo III) la frecuencia aparente del sistema se define como la menor identificada a lo largo de la respuesta, a pesar de lo errático de los resultados de la identificación (Capítulo V.3.2).

3.1. Sistemas Bi-lineal sin Degradación

A continuación, se presenta algunos de los espectros de elongación del periodo (T_{in}/T_{el}) obtenidos para sistemas bi-lineales sin degradación, en comparación directa con los espectros obtenidos en base a propiedades secantes.

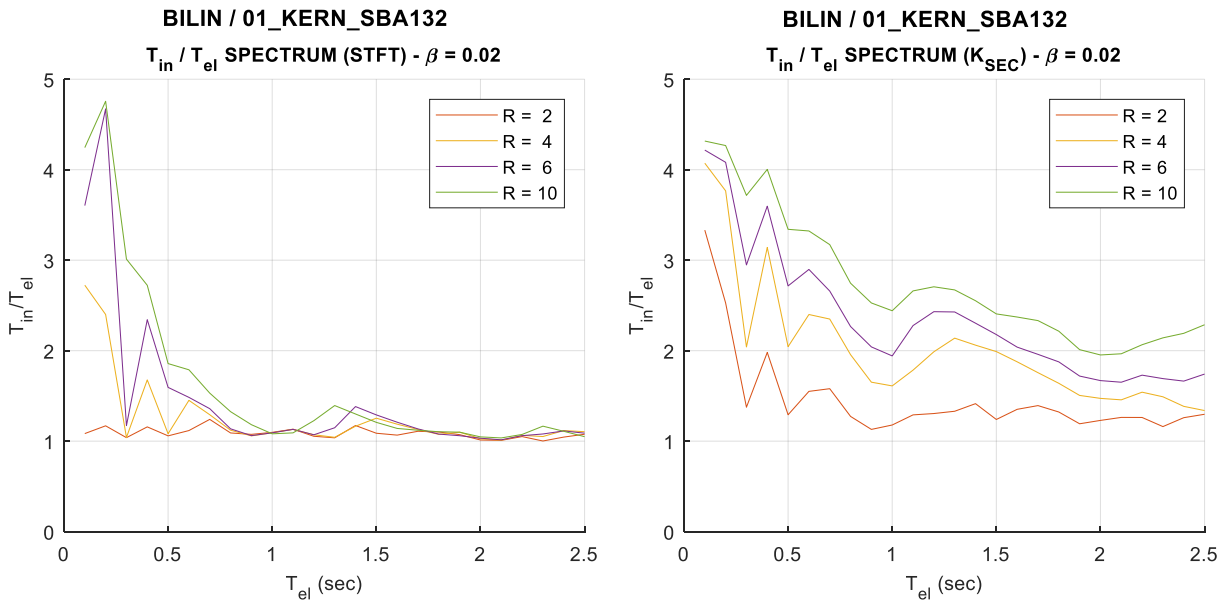


Figura VI.10. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) STFT y (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 01_KERN_SBA132.

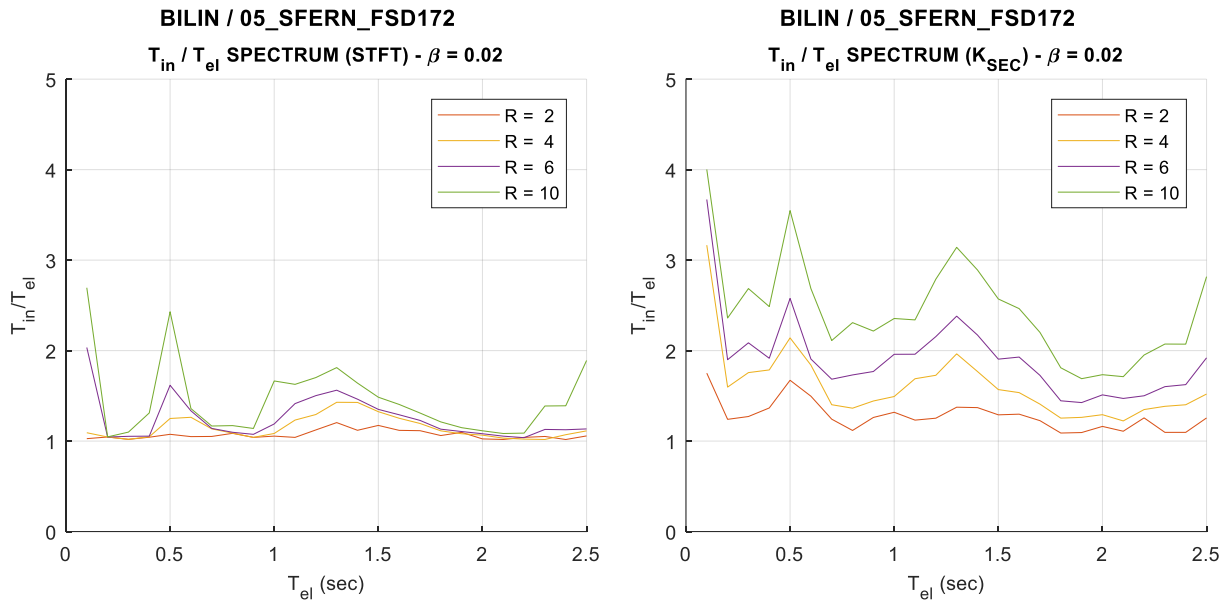


Figura VI.11. Espectro de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) STFT y (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

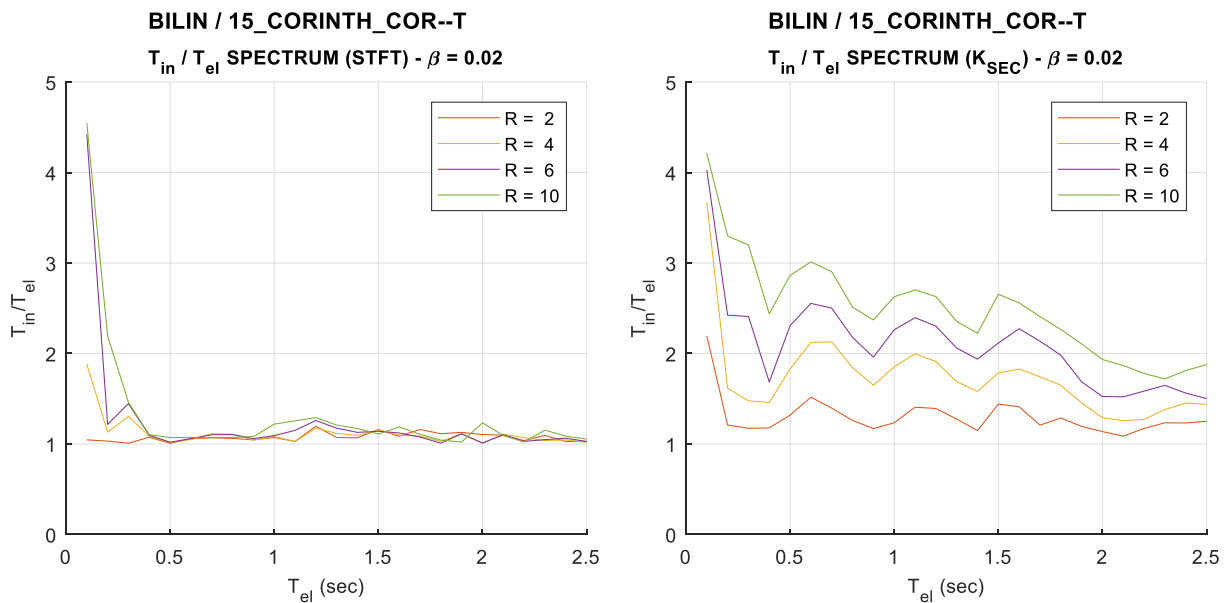


Figura VI.12. Espectro de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) STFT y (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 15_CORINTH_COR--T.

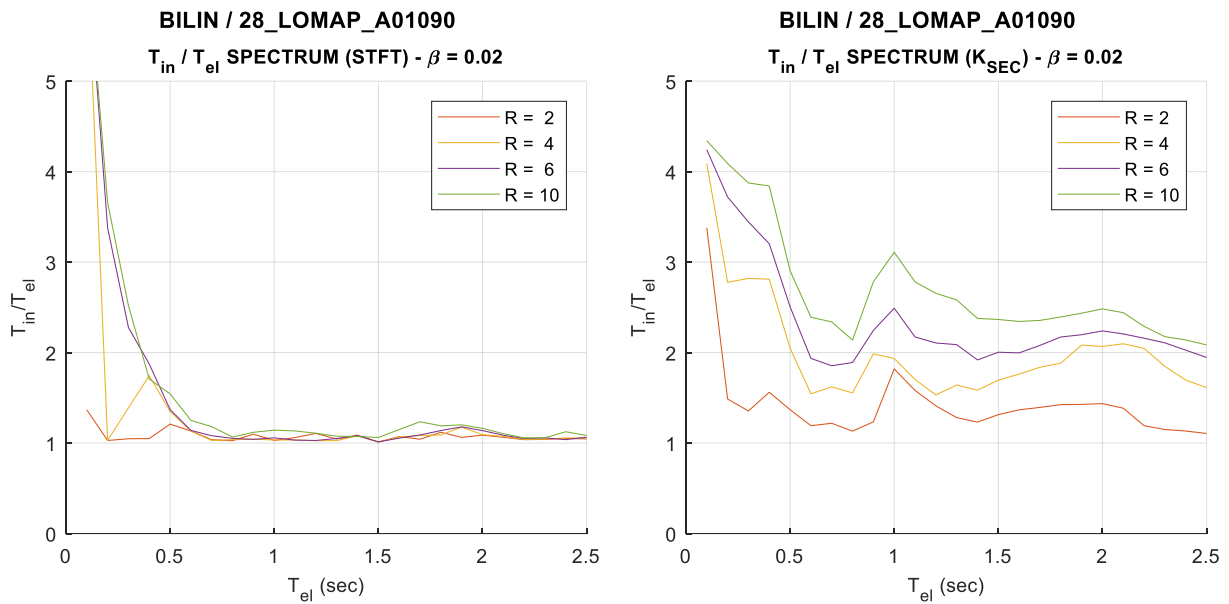


Figura VI.13. Espectro de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) STFT, (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

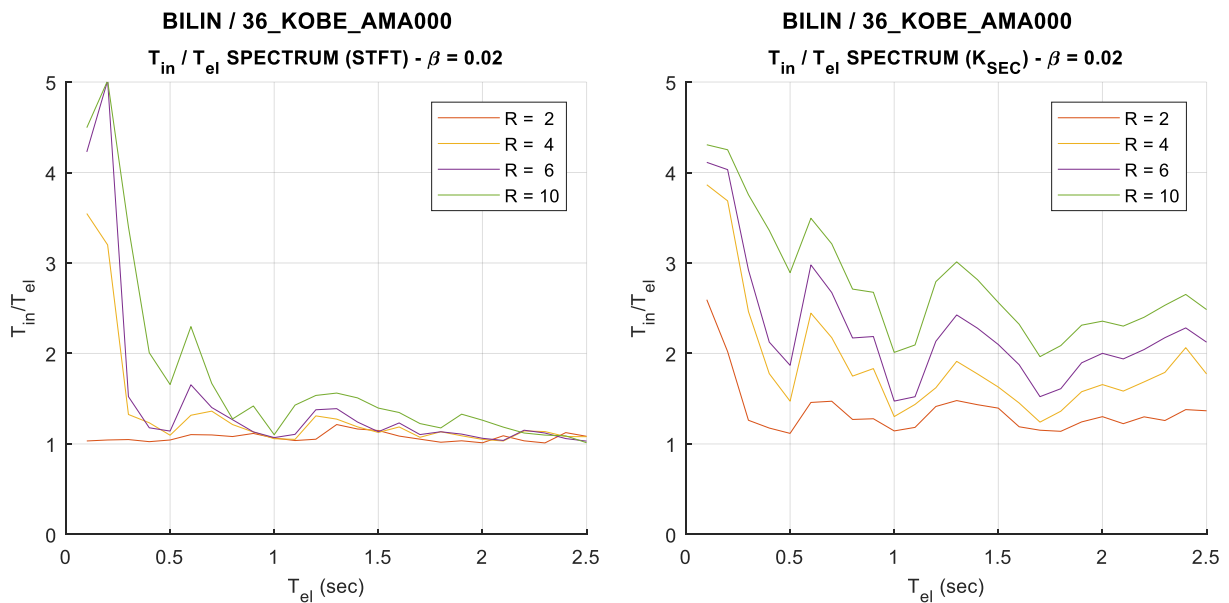


Figura VI.14. Espectro de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) STFT y (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 36_KOBE_AMA000.

En el capítulo anterior se ha mostrado la dudosa calidad de los resultados de este tipo de identificación aplicado a modelos histerético con abruptos cambios de rigidez (como es el caso del sistema bi-lineal sin degradación). Se vio que las curvas de espectrograma no presentaban claramente una reducción en la frecuencia predominante de la respuesta, sino que, progresivamente con el aumento del nivel de no-linealidad, aumenta el nivel de distorsión de los

resultados (Capítulo V.3.2). Estos aspectos se ven ahora reflejados en los espectros de elongación del periodo obtenidos para los sistemas bi-lineales, en que en la mayoría de los casos la elongación estimada no resulta representativa de las incursiones inelásticas alcanzadas.

Para el modelo constitutivo tratado se observa que las magnitudes de elongación resultantes para eventos sísmicos individuales permanecen concentradas en torno a la unidad, y en comparación con los espectros obtenidos en base a propiedades secantes, se concluye que los resultados de la identificación utilizando el espectrograma se encuentran muy lejos de representar la respuesta del sistema histerético o máximas demandas de desplazamiento.

Como es sabido, los resultados de este tipo de identificación se basan en el contenido de frecuencia de mayor presencia en la respuesta dinámica. De los casos analizados y presentados en el capítulo anterior, para sistemas lineales se ha observado que la frecuencia de vibración fundamental respectiva es claramente diferenciable del resto de frecuencias presentes asociadas a la demanda sísmica (Figura V.3). Por otro lado, con la componente de bi-linealidad (sin degradación) en la respuesta histerética, la presencia de la frecuencia fundamental del sistema es fuertemente debilitada, pasando a segundo plano frente al contenido de frecuencia de la demanda sísmica y la respuesta forzada, originando una convergencia del método de identificación a frecuencias no representativas (Figura V.6-8). Las magnitudes de elongación del periodo obtenidas para estos sistemas bi-lineales sin degradación se encuentran relacionadas directamente a este fenómeno, que en ningún caso describe las propiedades efectivas del sistema.

Una elongación del periodo igual a 1.0 implica que el método de identificación desarrolla una convergencia hacia las propiedades elásticas (iniciales) del respectivo sistema histerético. Cuando las incursiones inelásticas son concentradas y acotadas respecto a la longitud de la ventana de tiempo considerada, eventualmente la frecuencia de vibración asociada a la rigidez inicial-elástica (pre-fluencia) continúa siendo dominante en el segmento de respuesta analizado, dando paso a magnitudes de elongación del periodo aparente en torno a la unidad. Este fenómeno es aún más considerable cuando el sistema histerético es puramente bi-lineal, con ciclos de descarga y recarga que siguen las mismas propiedades de rigidez iniciales.

Este problema es el que igualmente fue observado por Martínez, Boroschek y Bilbao (2015) [5], en donde se concluye que este tipo de métodos de identificación no son aplicables para sistemas de no-linealidades abruptas, y sus resultados no son representativos ni en términos de ajuste de respuesta, ni de propiedades secantes.

3.2. Sistemas Multi-lineales con Degradación Leve y Severa

Para el caso de los sistemas con degradación leve y severa, los espectros de elongación del periodo aparente resultantes siguen tendencias distintas a las descritas en la sección anterior.

Además de obtener un aumento proporcional de amplitudes de elongación para mayores factores de reducción de respuesta elástica (R), de manera común se observa que los espectros obtenidos para el modelo de degradación leve siguen una forma y magnitudes bastante cercanas a las obtenidas a partir de propiedades secantes. En cuanto a los espectros del modelo de degradación severa, estas resultan con amplitudes aún mayores y con una errática fluctuación a lo ancho del espectro de periodos.

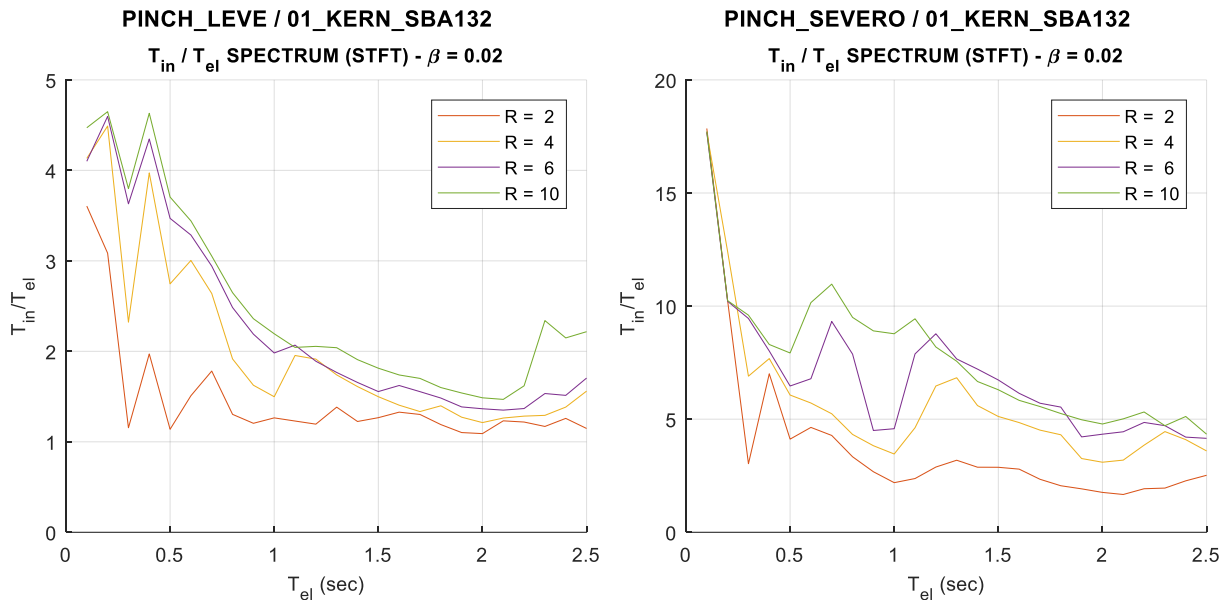


Figura VI.15. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 01_KERN_SBA132.

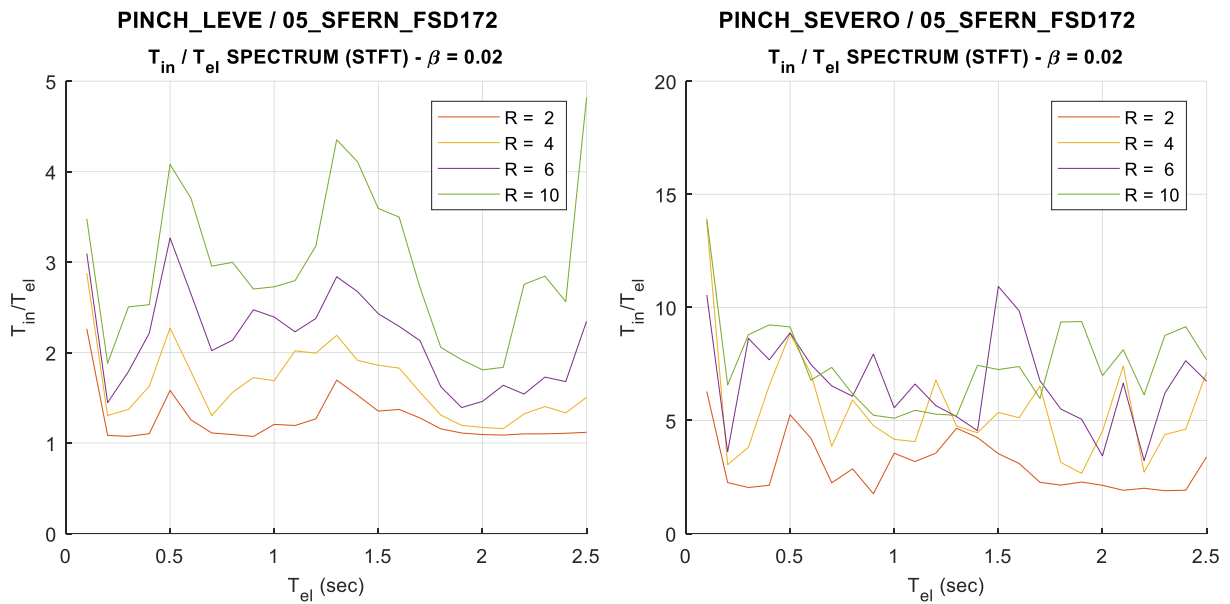


Figura VI.16. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

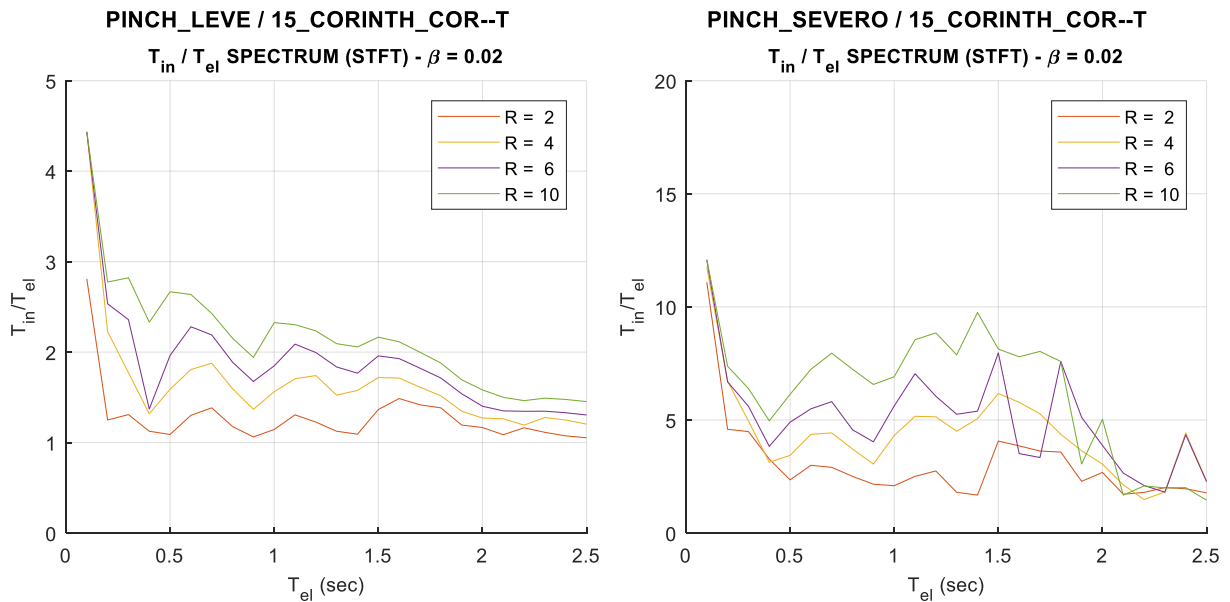


Figura VI.17. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 15_CORINTH_COR--T.

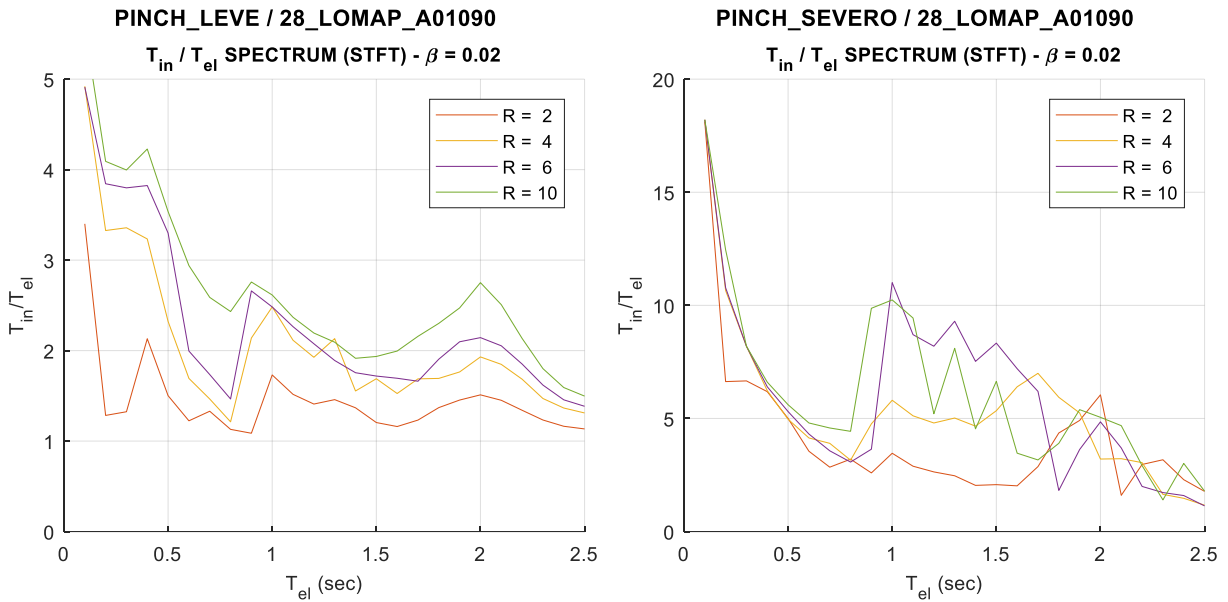


Figura VI.18. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

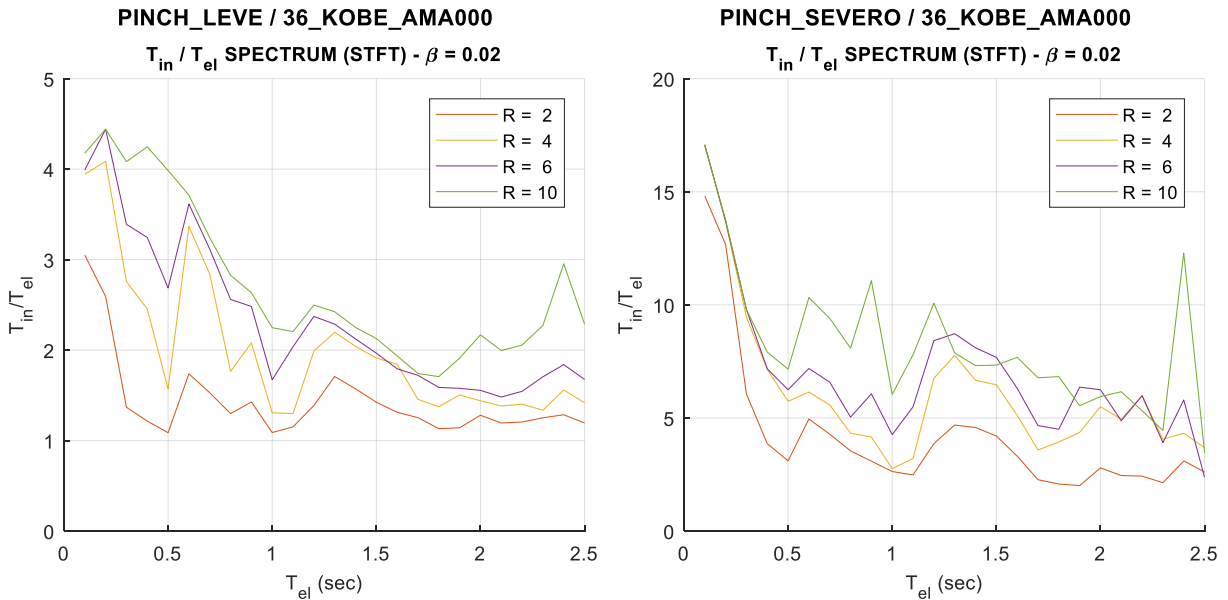


Figura VI.19. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 36_KOBE_AMA000.

Claramente, los espectros de elongación del periodo obtenidos de los modelos de degradación leve resultan mucho más razonables que los obtenidos para los otros modelos, y a su vez, representativos si se compara con los espectros obtenidos de las propiedades secantes (y demandas máximas de desplazamiento). Esta ventaja en los resultados se atribuye a las características y limitaciones propias del modelo histerético analizado.

Tal como fue descrito en el Capítulo IV, el modelo de degradación leve posee principalmente una componente de degradación de rigidez y en menor grado una componente de efecto “pinching”. Por otro lado, el modelo de degradación severa incorpora un importante efecto “pinching” que logra distorsionar fuertemente los resultados de la identificación producto de ciclos de carga y recarga con cambios abruptos de rigidez, de manera similar a lo observado en los resultados de sistemas bi-lineales sin degradación.

Finalmente se puede concluir que, a pesar de las fuertes amplitudes de la demanda y amplias incursiones inelásticas, la identificación en espacio-frecuencia es especialmente sensible y asertiva en casos de no-linealidades controladas por la degradación de la rigidez tangente del sistema. No así en el caso de sistemas que incorporan en su respuesta cambios abruptos.

En cualquier caso, persiste el problema de que los resultados de la identificación no garantizan representatividad efectiva de los sistemas no lineales en términos de ajuste de respuesta del sistema lineal equivalente en desplazamientos o aceleraciones. Cabe señalar que los espectros resultantes, en particular las amplitudes de elongación, mantienen una dependencia al nivel de suavización aplicado a las curvas de identificación en el tiempo de respuesta (espectrogramas). Esto incide principalmente para el modelo histerético que incorpora un fuerte efecto “pinching” (degradación severa), mientras que para el caso de degradación leve se obtienen curvas espectrales más regulares y estables respecto al nivel de suavización aplicado.

3.3. Problemas Presentes en la Identificación

Como fue observado en el capítulo anterior (V.3.4), la identificación basada en espacio-frecuencia ha presentado varios problemas numéricos, repercutiendo de manera importante en la construcción de los espectros de elongación del periodo. A continuación, se presentan los principales problemas presentes, y cómo influyen en los espectros de elongación del periodo.

(a) Dependencia de la suavización de la curva de frecuencia aparente.

Tal como se describe anteriormente, las magnitudes de elongación del periodo obtenidas resultan ser sensibles al nivel de suavización utilizado (Figura VI.21). Esto es considerado un problema, pues la suavización es un aspecto necesario para mitigar problemas numéricos tales como distorsiones en la curva de identificación, desviaciones puntuales a magnitudes extremadamente elevadas o desviaciones puntuales a magnitudes cercanas a cero.

(b) La frecuencia aparente del sistema no es predominante.

Estos problemas tienen que ver principalmente con que el contenido de frecuencias del movimiento sísmico prima en términos de potencia frente a las frecuencias representativas del sistema y su respuesta.

Casos como el presentado en la Figura V.16, las frecuencias asociadas a la demanda sísmica son en todo momento predominantes respecto a la frecuencia aparente representativa del sistema hysterético. Finalmente, la menor frecuencia de la curva de identificación resulta inevitablemente mayor a la inicial-elástica, y la elongación toma una magnitud menor a uno (Figura VI.20).

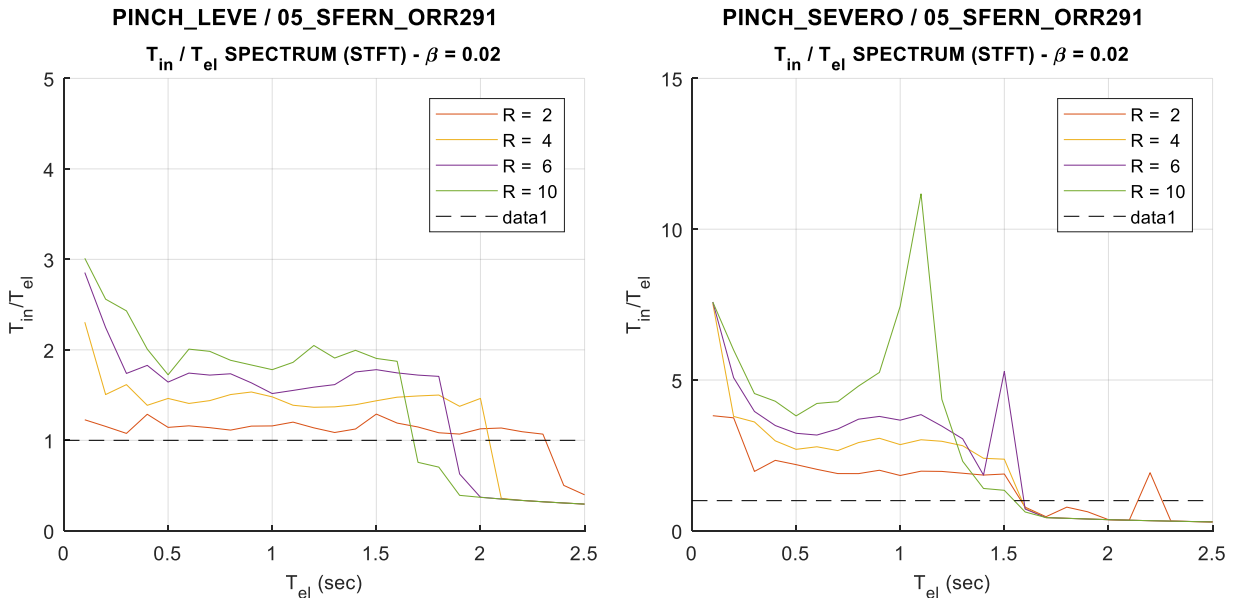


Figura VI.20. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de (a) Degradación Leve y (b) Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_ORR291.

(c) Tendencia a cero de la frecuencia predominante en la respuesta.

Estos problemas tienen relación con lo errático y ruidoso de las curvas de identificación de espectrogramas, y a pesar de los trabajos de suavización de la misma y regulación de las longitudes de ventanas de tiempo para el análisis frecuencial, en ciertos segmentos de tiempo el método recae en la identificación de frecuencias no representativas, muy cercanas a cero, lo cual se traduce tendencias a magnitudes muy altas de elongación del periodo. Para aminorar este problema en ciertos casos es requerido extremar en casos particulares la suavización de la curva de espectrograma obtenida hasta obtener espectros de elongación razonables y representativos (Figura VI.21).

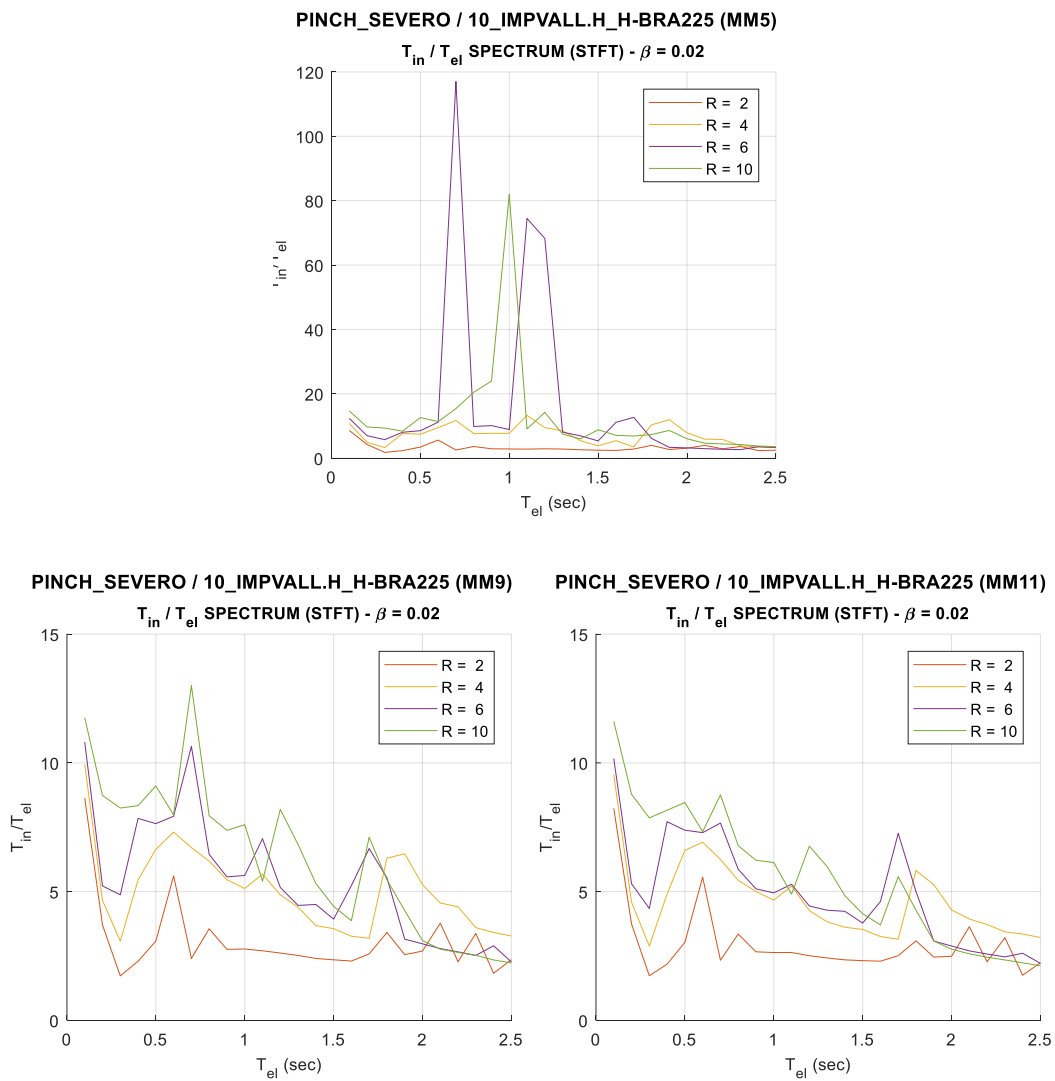


Figura VI.21. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. Modelo de Degradación Severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 10_IMPVAL.L.H_H-BRA225. Suavización de Espectrograma en base a Media Móvil de (a) 5 datos, (b) 9 datos y (c) 11 datos.

3.4. Espectros de Elongación del Periodo

Resultados no representativos como los presentados en la sección anterior fueron omitidos para el cálculo de los espectros finales. A continuación, se presentan los espectros obtenidos para los dos niveles de suavización de espectrogramas, cubriendo el set completo de 290 registros sísmicos.

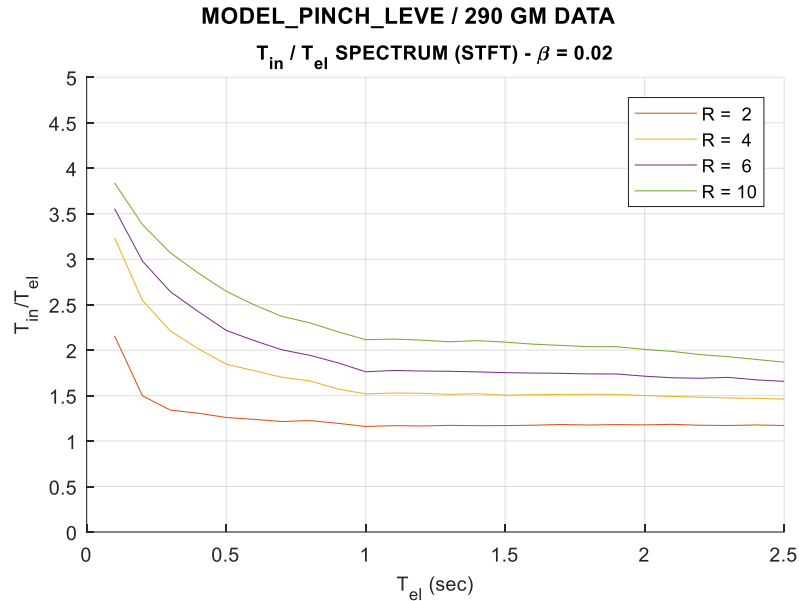


Figura VI.22. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. 290 registros sísmicos.
Modelo multi-lineal de degradación leve.

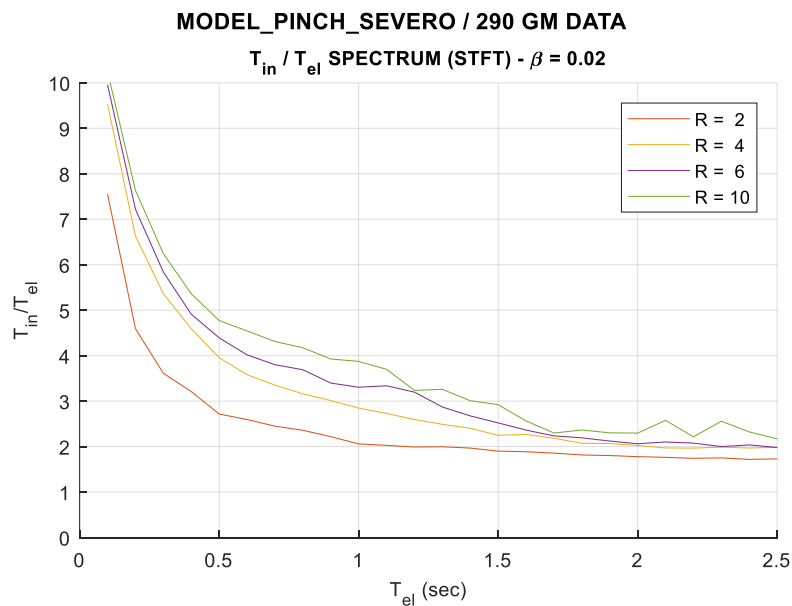


Figura VI.23. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. 290 registros sísmicos.
Modelo multi-lineal de degradación severa.

Los espectros obtenidos presentan una distribución lógica de amplitudes en función de R, siguiendo el mismo decaimiento observado por Katsanos y Sextos (2015) desde sistemas rígidos ($T_{el} < 0.5$ seg), y con una estabilización en su magnitud hacia sistemas flexibles ($T_{el} > 1.5$ seg).

Respecto al estudio citado, el nivel de magnitudes de elongación resulta en la mayoría de los casos mayor. Esta diferencia puede deberse a varios factores, en que el más influyente podría estar asociado a que las características de degradación utilizadas en esta investigación son en general más fuertes que las consideradas por el estudio original. A pesar de estas diferencias, los resultados estadísticos confirman el fenómeno de la elongación del periodo, y su presencia en proporción de las incursiones inelásticas desarrolladas por los respectivos sistemas.

Coincidente a las observaciones de Katsanos y Sextos (2015) se destaca la fuerte influencia de las componentes de degradación en la amplitud de la elongación del periodo aparente, sin embargo, se detecta una gran variabilidad en los resultados obtenidos. Esta dispersión en los resultados es aún mayor en los resultados del modelo de degradación severa y para mayores magnitudes de R (Figura VI.24).

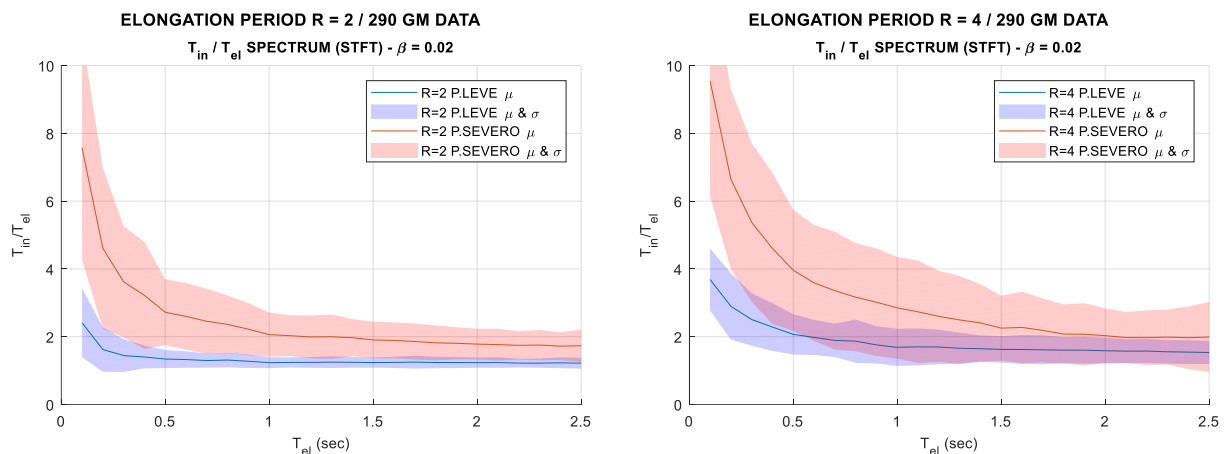


Figura VI.24. Espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a STFT. 290 registros sísmicos. Modelo multi-lineal de degradación severa.

Dando cuenta de las características del método de identificación utilizado (método espacio-frecuencia), en consideración de su limitación en cuanto a representatividad de la respuesta de los sistemas no-lineales, y en vista de los problemas numéricos documentados a lo largo de este estudio, se cuestiona la utilización de los resultados numéricos de este enfoque, otorgando créditos netamente cualitativos del fenómeno estudiado.

VI.4. Espectros de Elongación en base a Linealización Equivalente

Se presentan a continuación los espectros de elongación del periodo aparente obtenidos a partir de una identificación orientada a la linealización de la respuesta medida. Como ha sido descrito en secciones anteriores, el ajuste lineal se realiza mediante un análisis Bayesiano para la búsqueda de modelos lineales equivalentes, optimizando el ajuste de las respuestas en aceleraciones relativas, y aplicado a la fase fuerte del registro sísmico. Este enfoque, a diferencia del propuesto originalmente por Katsanos y Sextos (2015), otorga a los espectros de elongación una representatividad efectiva del periodo aparente y su elongación.

4.1. Sistemas Bi-lineal sin Degradación

A continuación, algunos de los espectros de elongación del periodo para sistemas bi-lineales sin degradación obtenidos a partir de la implementación detallada en el capítulo V.4.1, y en comparación directa con los espectros en base a propiedades secantes.

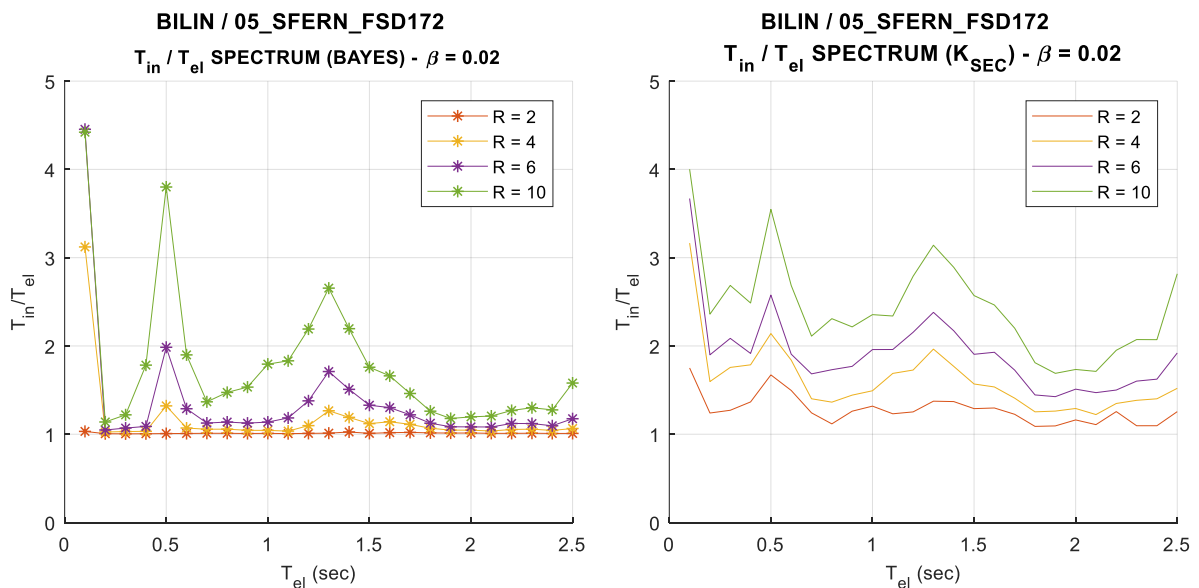


Figura VI.25. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a

(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

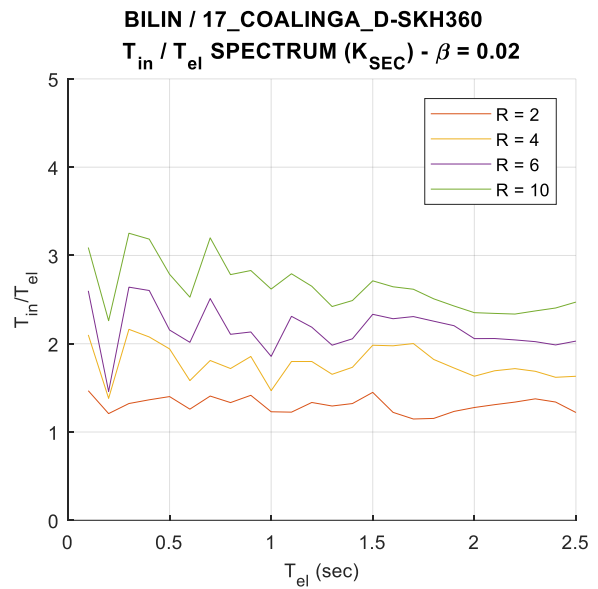
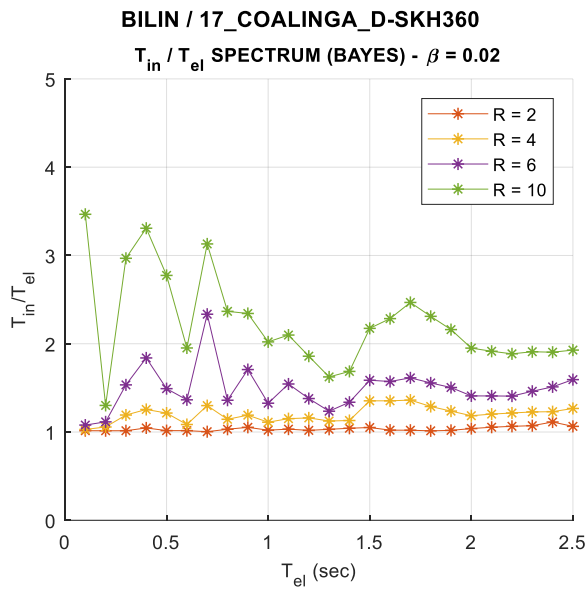


Figura VI.26. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 17_COALINGA_D-SKH360.

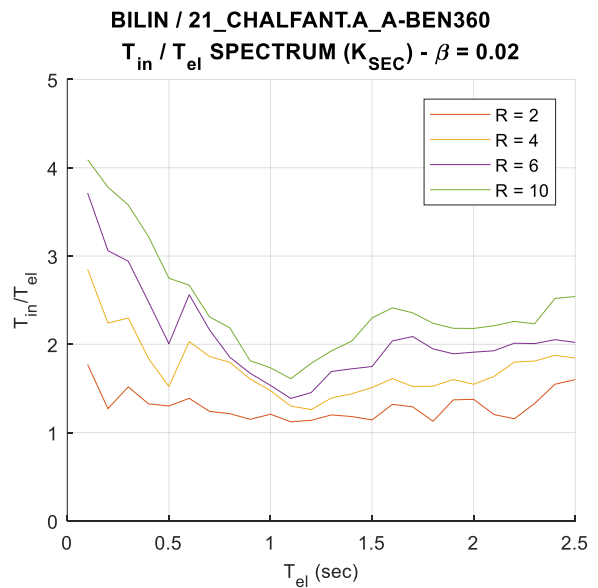
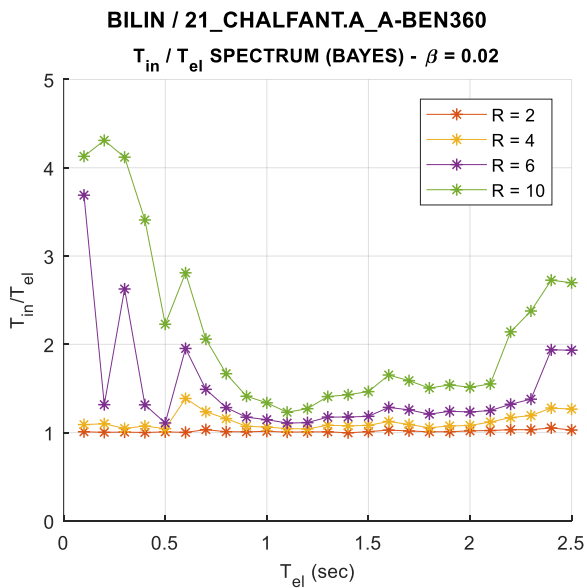


Figura VI.27. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 21_CHALFANT.A_A-BEN360.

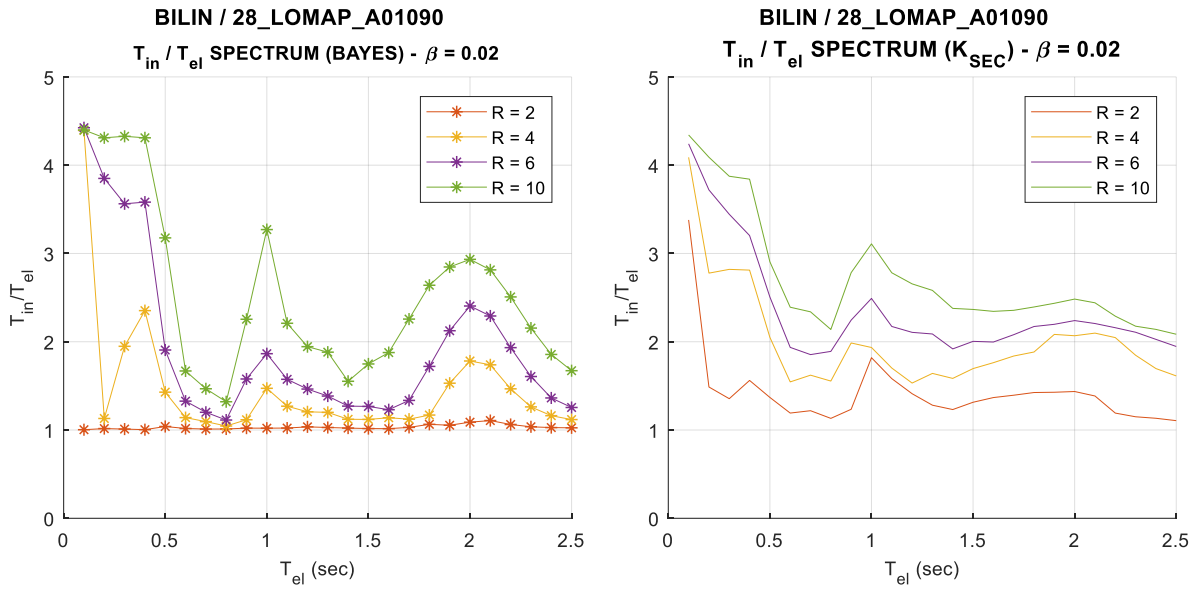


Figura VI.28. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

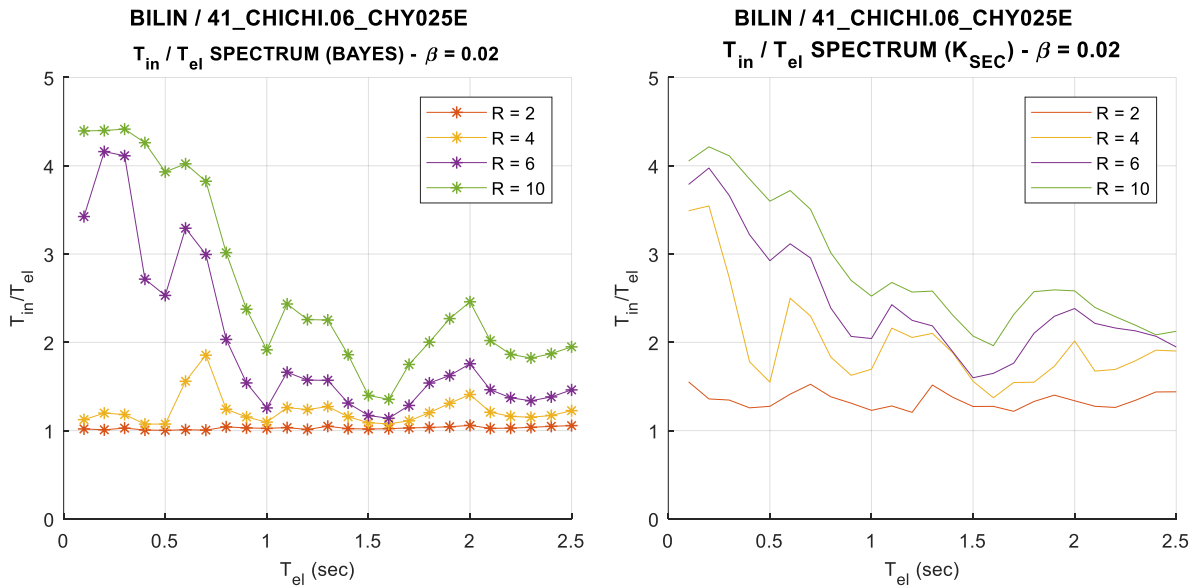


Figura VI.29. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

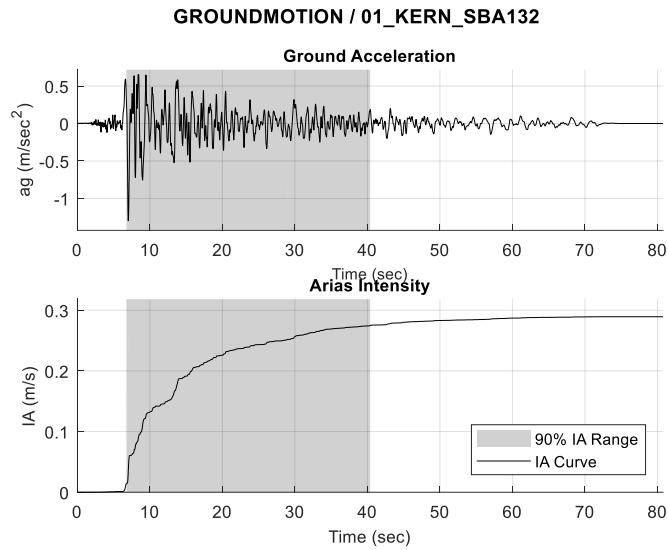
Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 41_CHICHI.06_CHY025E.

Para todos los registros analizados se observa que los espectros de elongación obtenidos del ajuste de respuesta siguen las tendencias generales de las curvas obtenidas en base a propiedades secantes (lo cual valida en cierto grado la efectividad de la identificación). Igualmente se presenta una común inclinación a alcanzar menores magnitudes de elongación para las curvas asociadas a factores “R” bajos. Esto es particularmente imponente para el caso de R igual a 2.0 en que las magnitudes de elongación permanecen muy cercanas a la unidad (Figura VI.25-Figura VI.29).

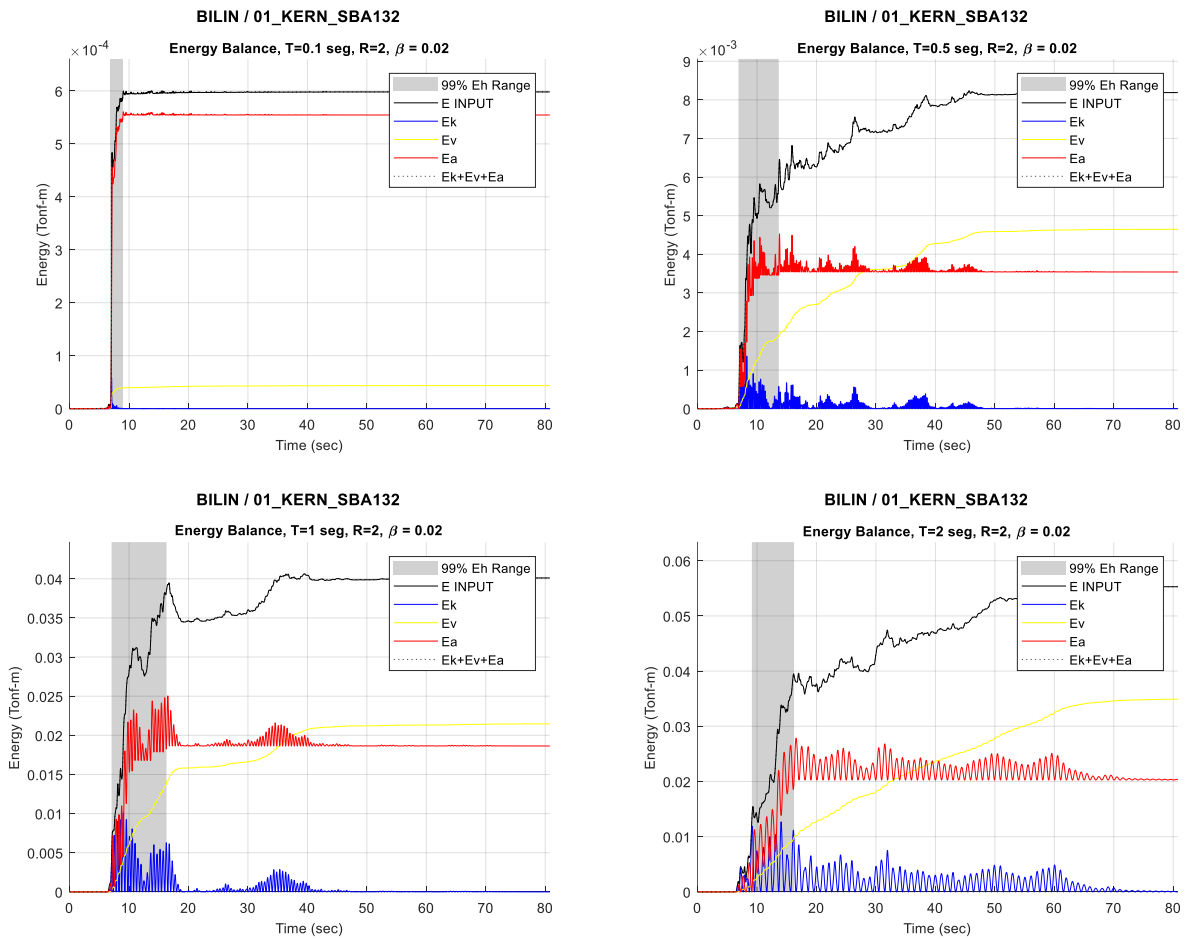
La anterior observación confirma desde la globalidad el fenómeno observado en la sección V.4.3.3 para casos particulares ($T_{el} = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg), en que se atribuyen estos resultados a los siguientes aspectos.

- **La respuesta no-lineal en aceleraciones relativas (en donde se basa la linealización aplicada) no es especialmente sensible a las incursiones inelásticas bajas ($R = 2.0$).** Se observó anteriormente que en estos casos se mantiene un buen ajuste entre respuestas incluso a partir de un modelo lineal de propiedades cercanas a las elásticas iniciales.
- **Predominio de la respuesta elástica durante el segmento definido como fase fuerte.** Se observó igualmente en el capítulo anterior que, si a lo largo del segmento de identificación la incursión inelástica es concentrada, el método de ajuste no lo considera influyente frente a una respuesta lineal predominante en el resto del segmento, y por lo tanto se genera una convergencia hacia las propiedades lineales-elásticas. Este aspecto podría mitigarse definiendo segmentos de fase fuerte de menor duración con la idea de concentrar aún más la respuesta no-lineal.

Estos aspectos pueden comprobarse si se redefine la fase fuerte de la respuesta sísmica como el segmento de respuesta que concentra una determinada fracción de la energía histerética liberada. Tal como se observa en las Figuras Figura VI.30 y Figura VI.31, los segmentos de tiempo que cubren la totalidad de incursiones inelásticas son comúnmente más reducidos que el segmento que cubre el 80% de la Intensidad de Arias del registro sísmico. Ajustando entonces la respuesta acotada a estos segmentos de incursión inelástica, la influencia de la respuesta elástica es reducida y el ajuste de las propiedades efectivas dan cuenta de una elongación mayormente representativa (Figura VI.32).



**Figura VI.30. Registro de aceleraciones sísmicas (arriba) y curva acumulada de Intensidad de Arias (abajo).
Kern County 21-07-195.**



**Figura VI.31. Balance de energía acumulado. (a) $T_{el} = 0.1$ seg. (b) $T_{el} = 0.5$ eg. (c) $T_{el} = 1.0$ seg. (d) $T_{el} = 2.0$ seg.
Modelo bilineal sin degradación, $R = 2$, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico: Kern County 21-07-195.**

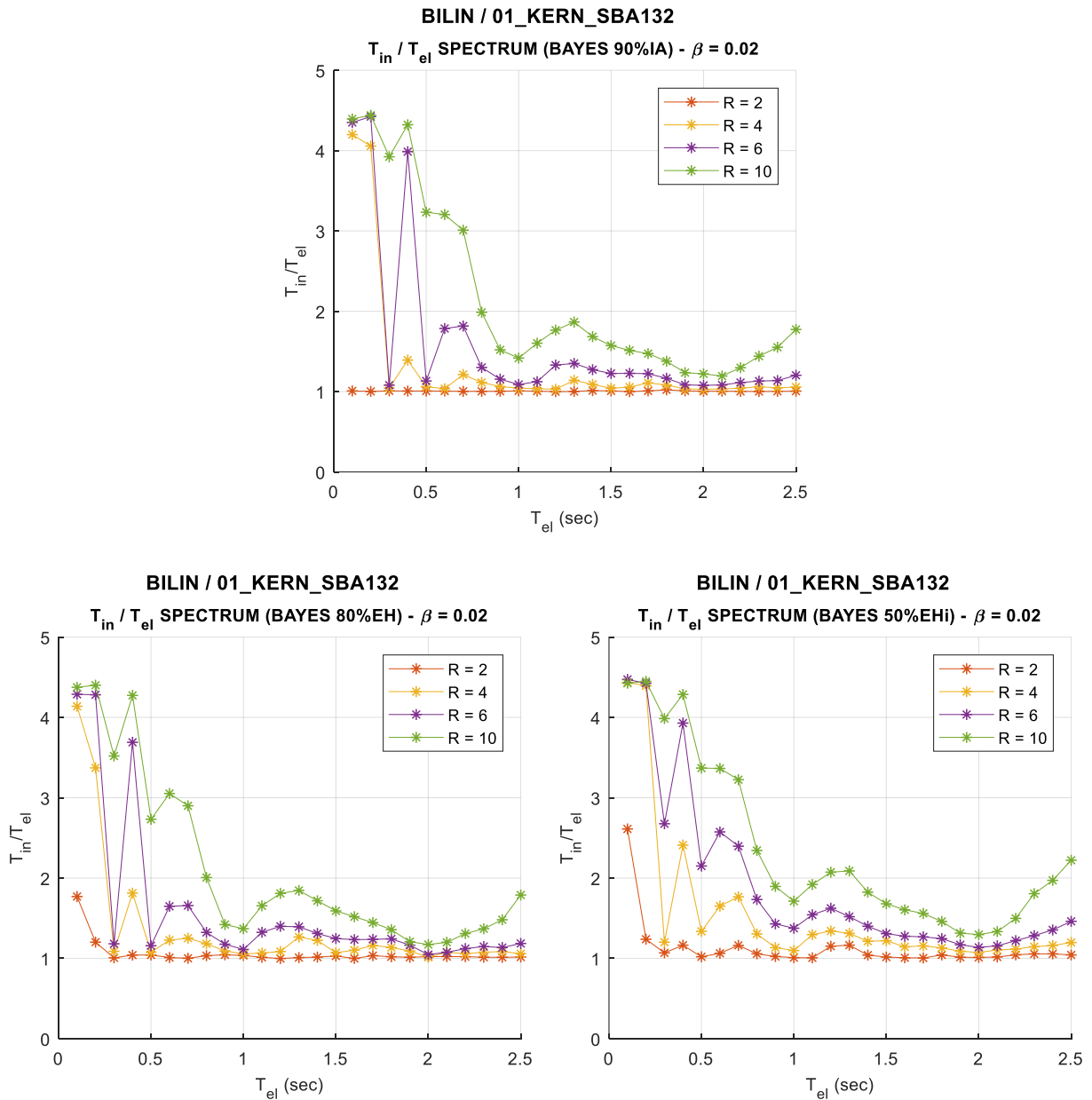


Figura VI.32. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base al Ajuste Bayesiano de:
 (a) Segmento 90% IA, (b) Segmento 80% EH, (c) Segmento 50% EH inicial.
 Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 01_KERN_SBA132.

Reduciendo el segmento de ajuste mejora considerablemente los resultados de espectros de elongación, sin embargo, el segmento de disipación de energía histerética es a priori desconocido, y, por lo tanto, difícil de replicar el enfoque. Sucede además que el segmento de disipación de energía histerética no necesariamente da cuenta de los instantes en que el sistema desarrolla los mayores niveles de degradación.

En el capítulo anterior fue igualmente notada la dificultad en la identificación para el caso de este tipo de sistemas (bi-lineales sin degradación), y se observó que una forma de cuantificar las máximas incursiones inelásticas desarrolladas es el uso de la identificación por ventanas móviles, rescatando las propiedades efectivas extremas a lo largo de toda la respuesta (con la misma idea de aislar segmentos de respuesta no-lineal de segmentos de respuesta lineal). Este enfoque, que se aproxima a la idea de Katsanos y Sextos (2015), se aleja de la linealización-equivalente por el hecho de no asegurar representatividad de la respuesta completa, sin embargo, otorga una idea más precisa de las máximas incursiones inelásticas alcanzadas.

En **Error! Reference source not found.** se hace una comparación de los espectros de elongación obtenidos para ambos enfoques (ajuste de fase fuerte y ajuste de ventanas móviles), considerando la menor rigidez efectiva identificada de todas las ventanas analizadas (de longitud 4 seg), y se observa que en este último caso la sensibilidad de las curvas de elongación es aún mayor para cada una de las curvas.

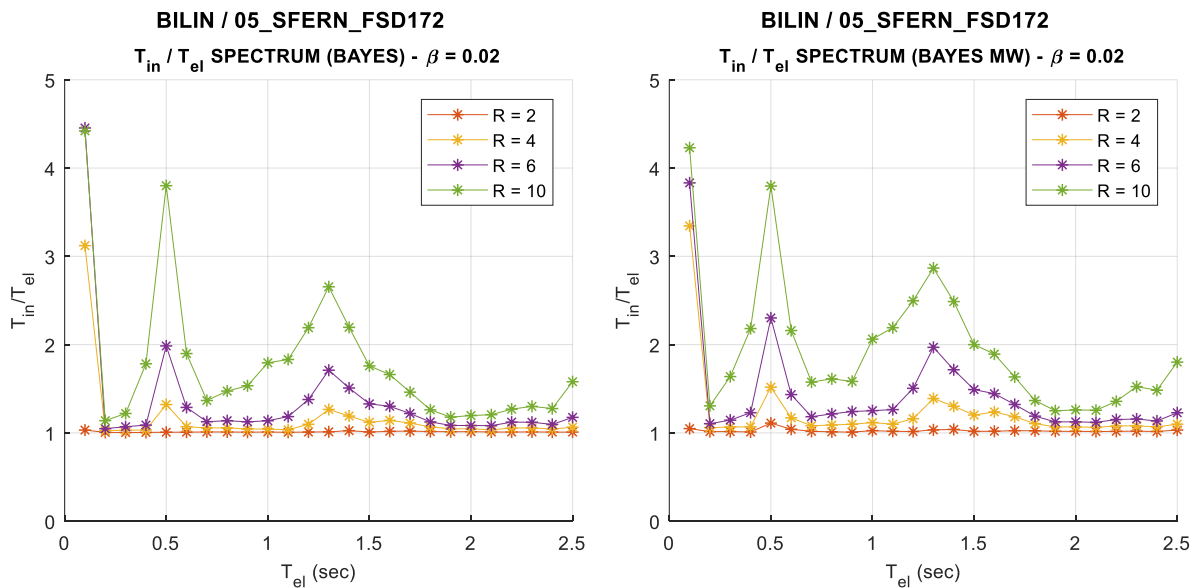


Figura VI.33. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte 90% IA, (b) Ajuste Bayesiano por Ventanas Móviles de 4 seg. Modelo bilineal sin degradación, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

4.2. Sistemas Multi-lineales con Degradación Leve

A continuación, se presentan algunos de los espectros de elongación del periodo obtenidos para sistemas multi-lineales con degradación leve, obtenidos a partir de la implementación detallada en el capítulo V.4.1, y en comparación con espectros basados en propiedades secantes.

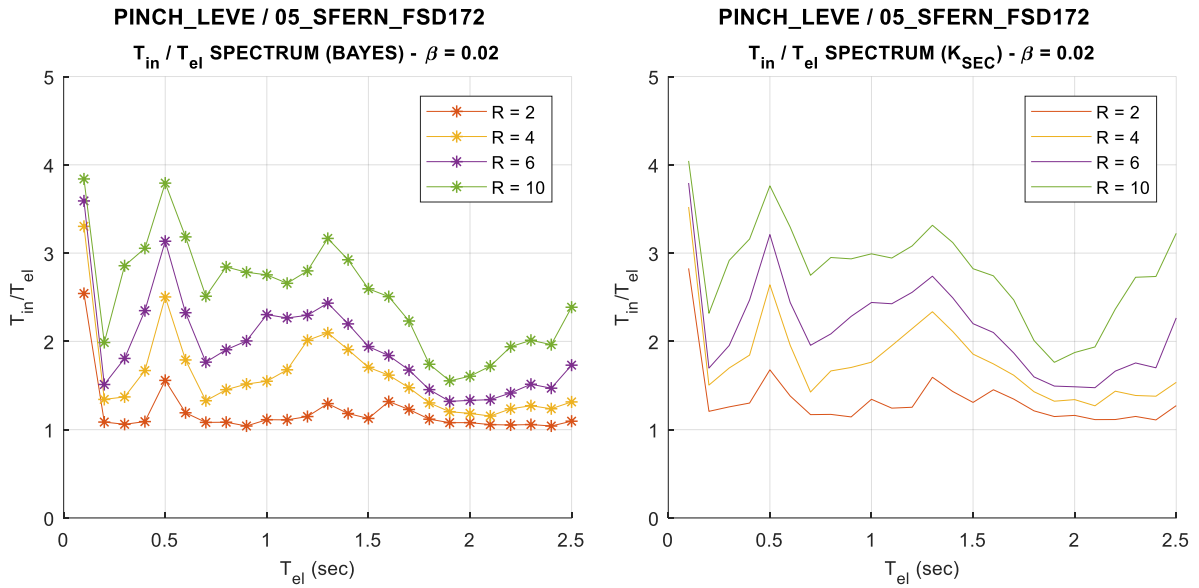


Figura VI.34. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación leve, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

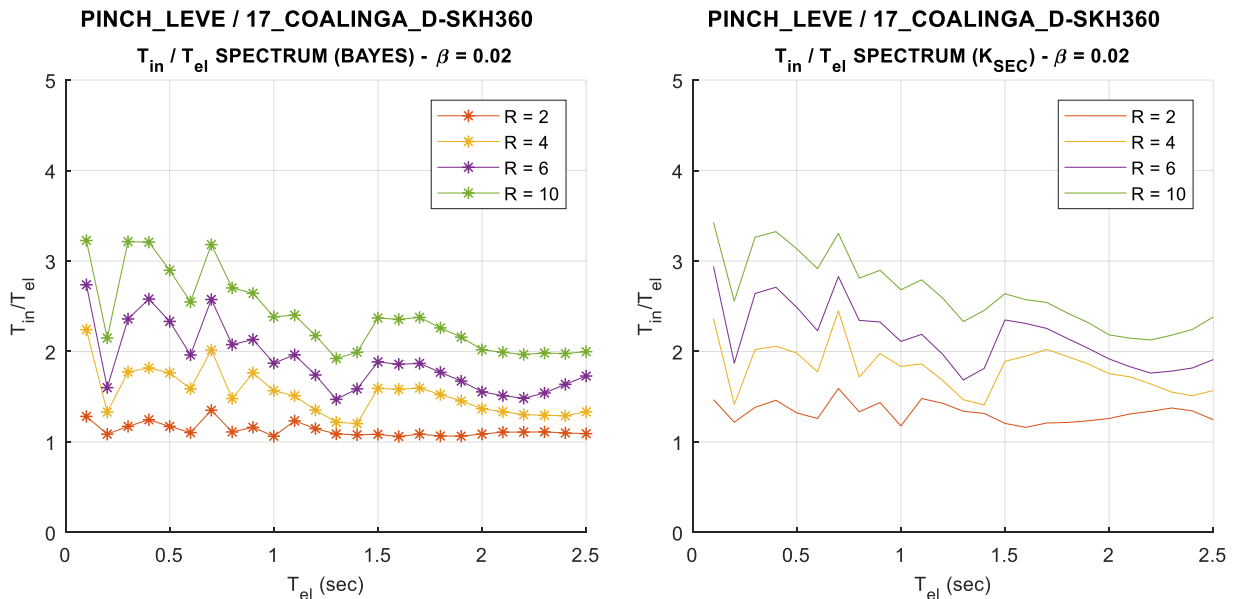


Figura VI.35. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación leve, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 17_COALINGA_D-SKH360.

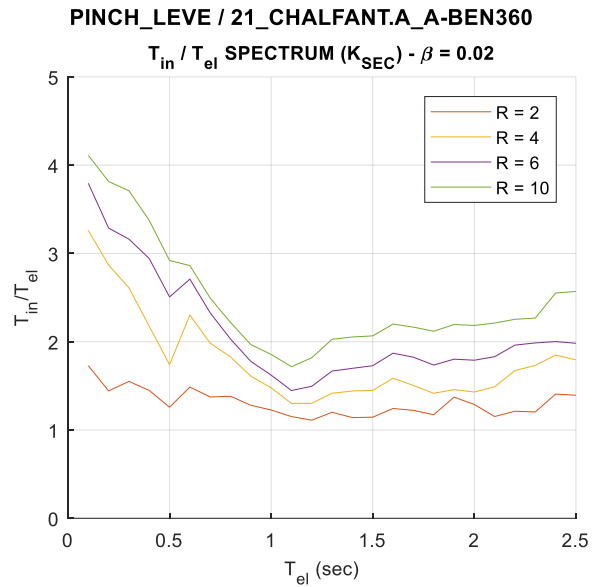
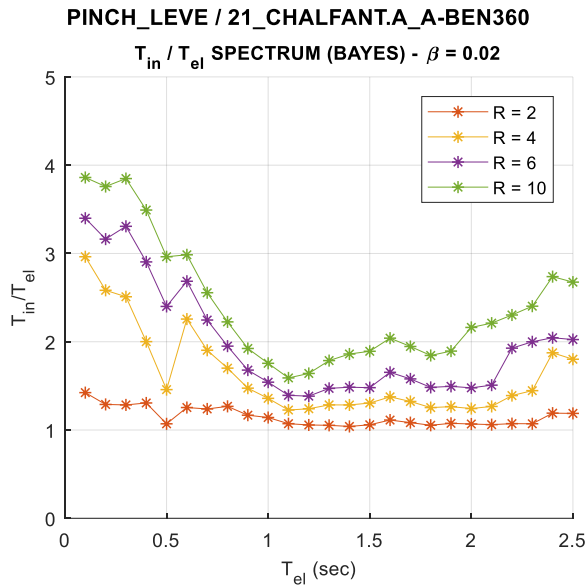


Figura VI.36. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación leve, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 21_CHALFANT.A_A-BEN360.

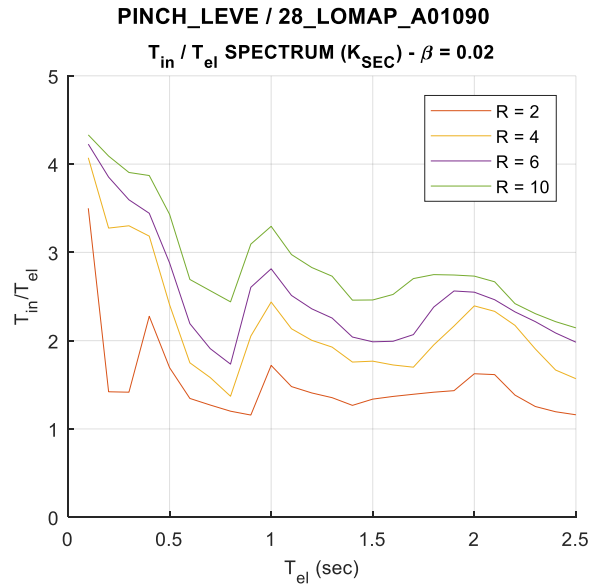
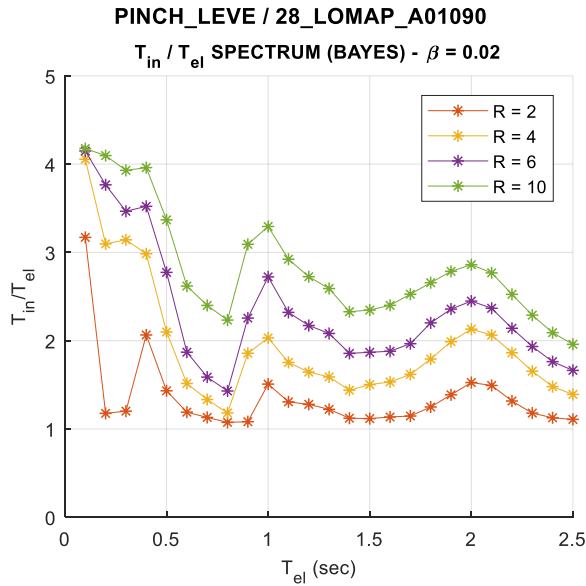


Figura VI.37. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación leve, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

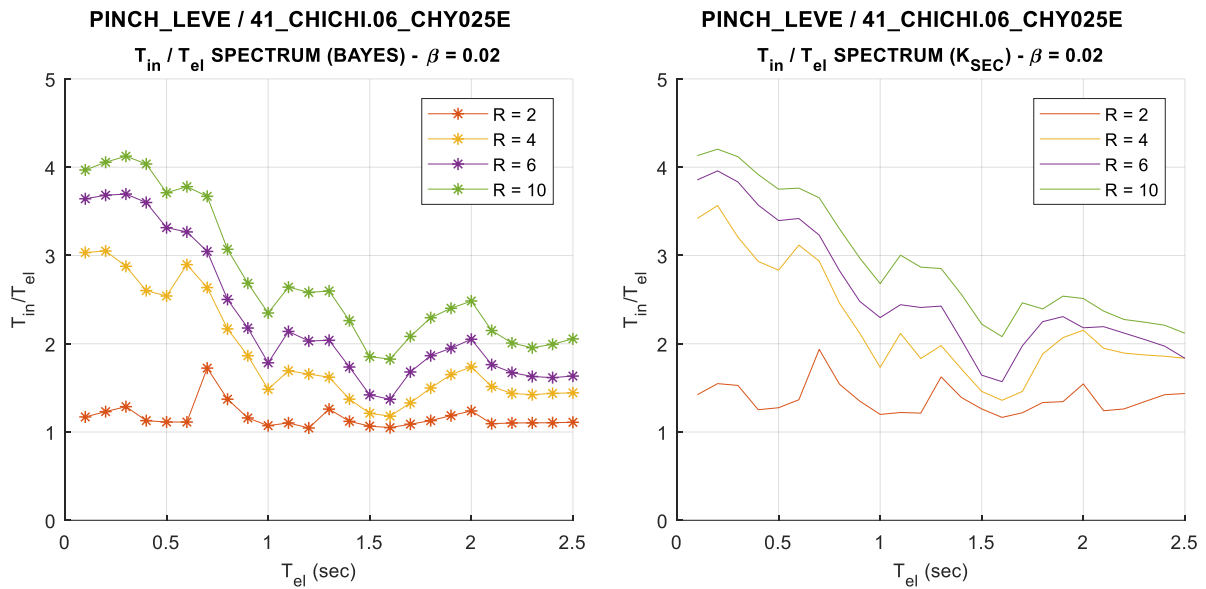


Figura VI.38. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación leve, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 41_CHICHI.06_CHY025E.

Al igual que en el caso anterior, las magnitudes de elongación del periodo siguen una tendencia lógica con respecto al nivel de incursiones inelásticas definido por el factor de reducción de la respuesta elástica “R”.

En el capítulo anterior se observó para casos particulares ($T_{el} = 0.1, 1.0$ y 2.5 seg) que los resultados de la identificación de rigideces efectivas presentaban una buena aproximación a las propiedades secantes del sistema. En vista de los espectros de elongación presentados en esta sección es posible validar este fenómeno de manera global, observando la similitud entre los espectros de elongación determinados a partir de los dos enfoques. Este aspecto se mantiene constante para todos los registros sísmicos analizados.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, el sistema multi-lineal de “degradación leve” incorpora en su ley constitutiva componentes de degradación de rigideces, degradación de fuerza restitutiva en un menor grado, y un bajo nivel de efecto “pinching”. Finalmente, los efectos de degradación se ven controlados principalmente por la variación de la rigidez en el tiempo. En base a los resultados, se estima que el buen nivel de identificación alcanzado para estos sistemas se debe a la especial sensibilidad de la respuesta en aceleraciones frente a los cambios degradantes de rigidez.

4.3. Sistemas Multi-lineales con Degradación Severa

A continuación, se presentan algunos de los espectros de elongación del periodo obtenidos para sistemas multi-lineales con degradación severa, obtenidos a partir de la implementación detallada en el capítulo V.4.1, y en comparación con espectros basados en propiedades secantes.

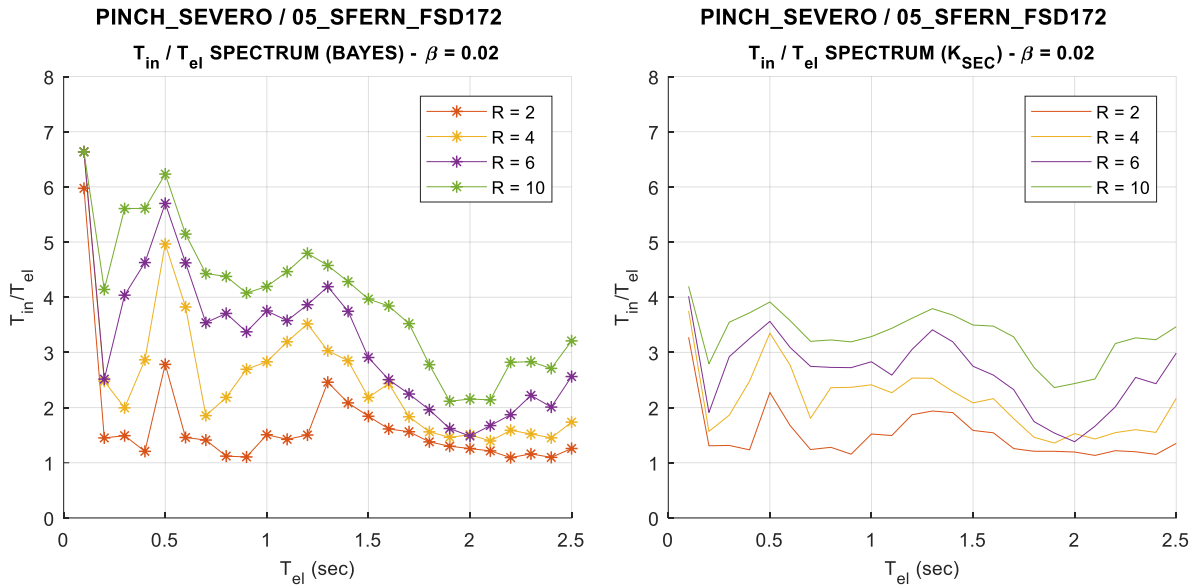


Figura VI.39. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 05_SFERN_FSD172.

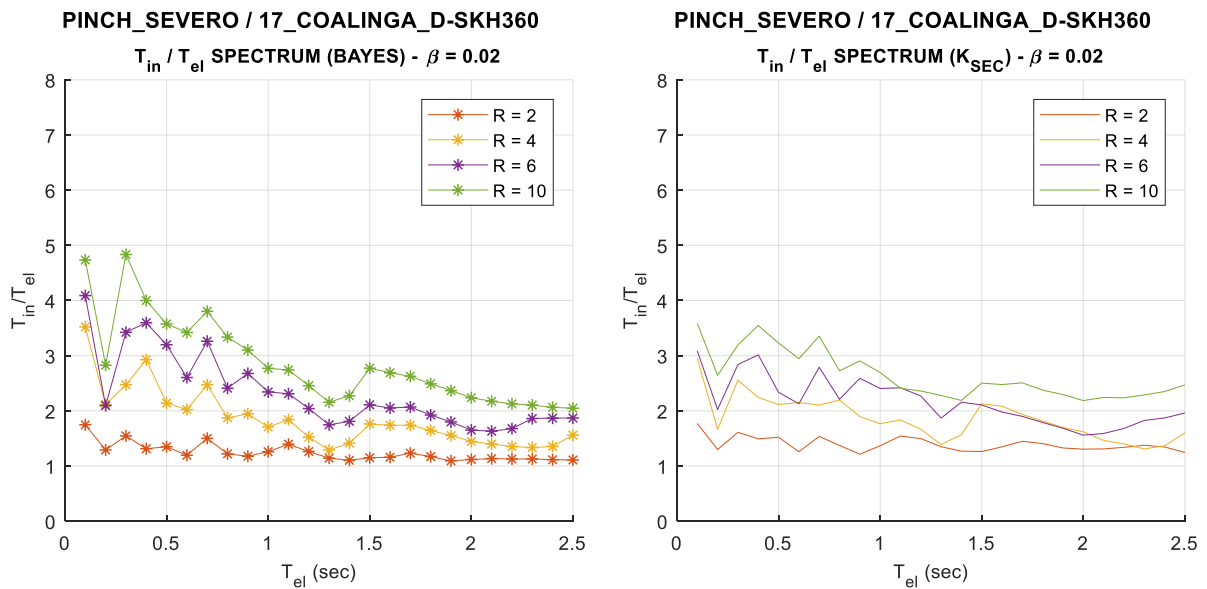


Figura VI.40. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 17_COALINGA_D-SKH360.

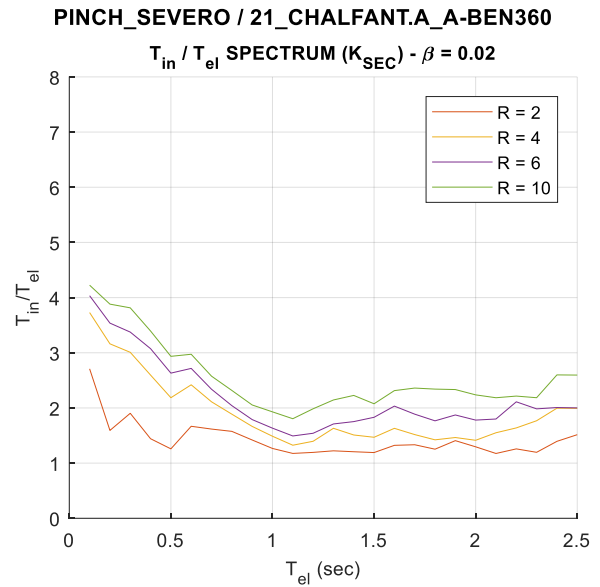
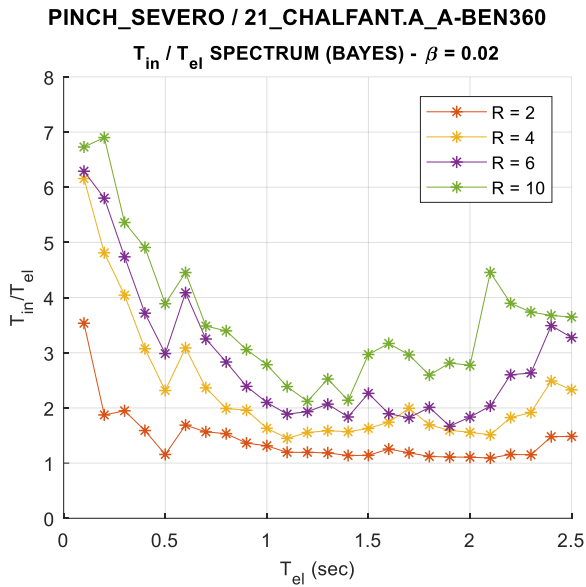


Figura VI.41. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
 (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 21_CHALFANT.A_A-BEN360.

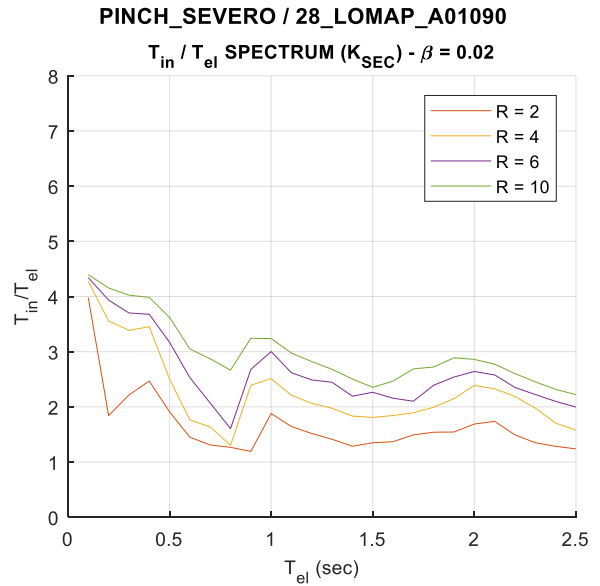
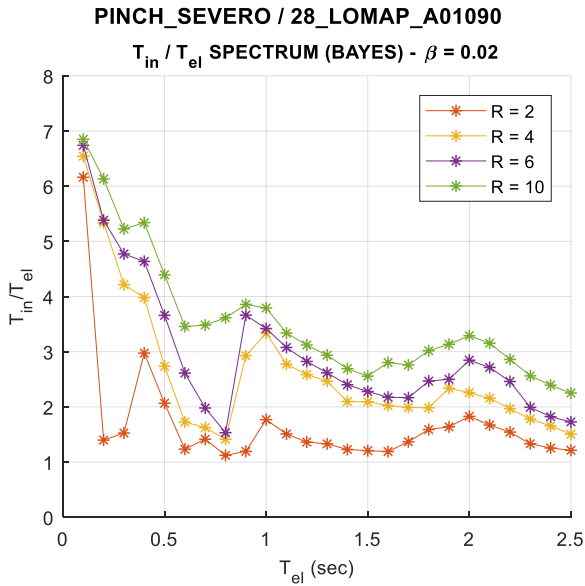


Figura VI.42. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
 (a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 28_LOMAP_A01090.

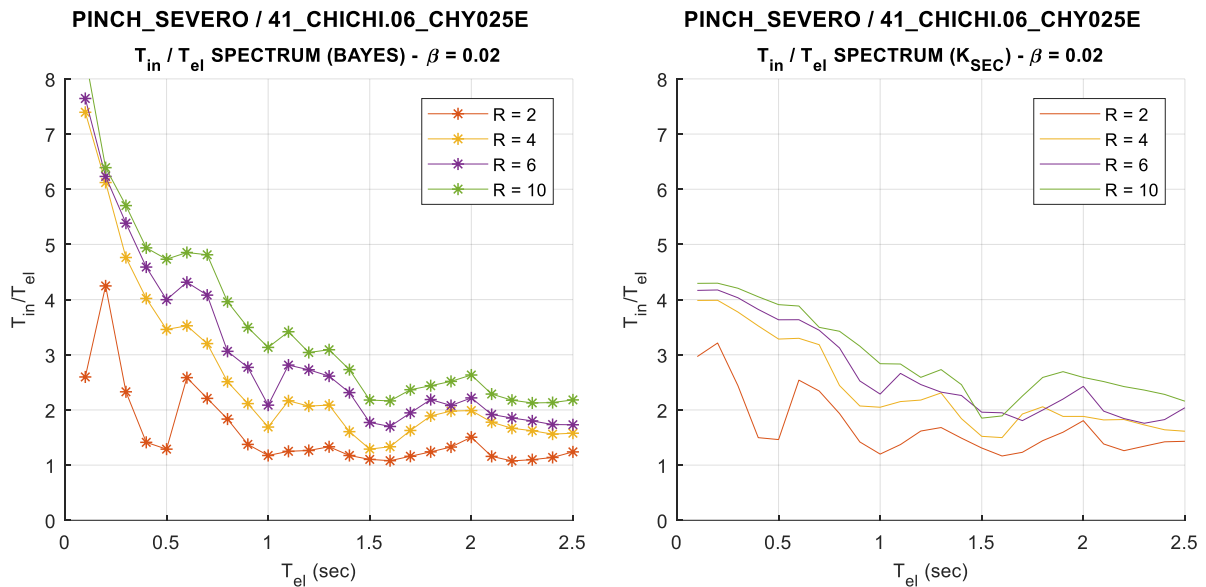


Figura VI.43. Comparación de espectros de elongación del periodo aparente obtenido en base a
(a) Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte, (b) Propiedades Secantes.

Modelo multi-lineal de degradación severa, $\beta = 2.0\%$. Registro sísmico 41_CHICHL06_CHY025E.

Al igual que en el caso anterior, las magnitudes de elongación del periodo siguen una tendencia lógica con respecto al nivel de incursiones inelásticas definido por el factor de reducción de la respuesta elástica “R”.

En el capítulo anterior se observó en casos particulares ($T_{el} = 0.1$ seg) que los resultados de la identificación presentaban una directa influencia a los ciclos de “sliding” que presentaba la respuesta histerética, haciendo tender los resultados a rigideces menores a las secantes. Por otro lado, para el caso de sistemas de mayor flexibilidad ($T_{el} = 1.0$ y 2.5 seg), con una reducida presencia de ciclos de “sliding”, la rigidez efectiva identificada desarrolla una ligera tendencia hacia las propiedades secantes.

Estas observaciones pueden confirmarse a partir de los espectros de elongación obtenidos, en que de manera global se observa el mismo fenómeno para el grupo de sistemas de mayor rigidez, y el grupo de sistemas de mayor flexibilidad. Para sistemas rígidos (T_{el} entre 0.1 y 1.0 seg) los niveles de elongación del periodo aparente son ampliamente mayores a los previstos en base a propiedades secantes. Por otro lado, para los sistemas más flexibles, los resultados del ajuste llevan a magnitudes de elongación similares a los obtenidos con propiedades secantes.

4.4. Espectros de Elongación del Periodo Aparente Finales

Se presentan a continuación los espectros de elongación finales para cada sistema histerético analizado, y para el set completo de 290 registros sísmicos analizados.

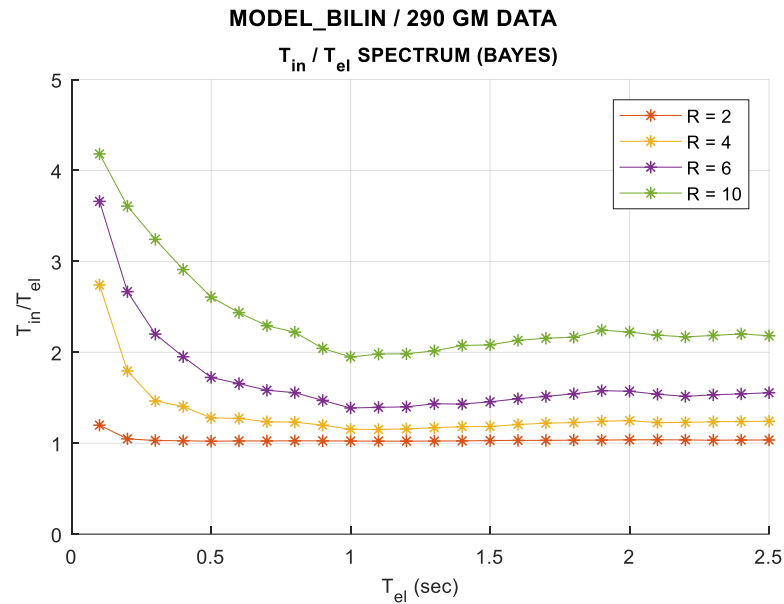


Figura VI.44. Espectro de elongación del periodo aparente para un sistema bilineal sin degradación.

Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

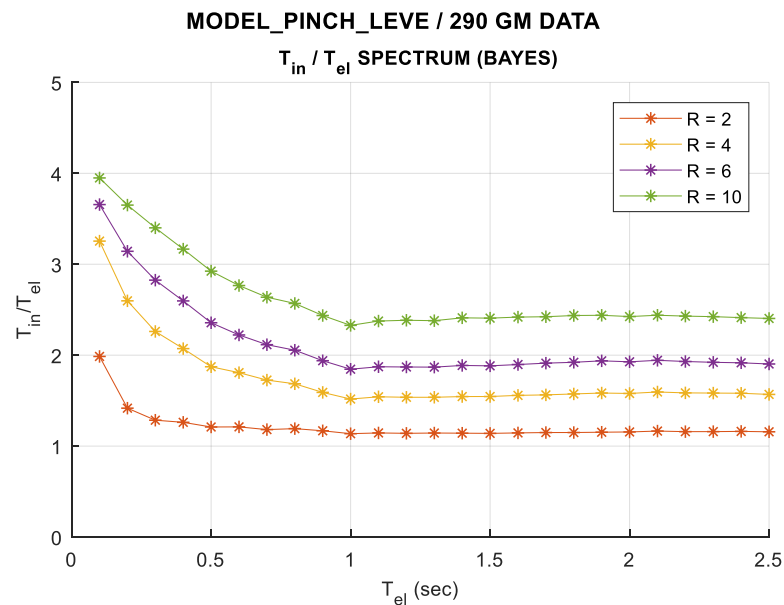


Figura VI.45. Espectro de elongación del periodo aparente para un sistema multi-lineal con degradación leve.

Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

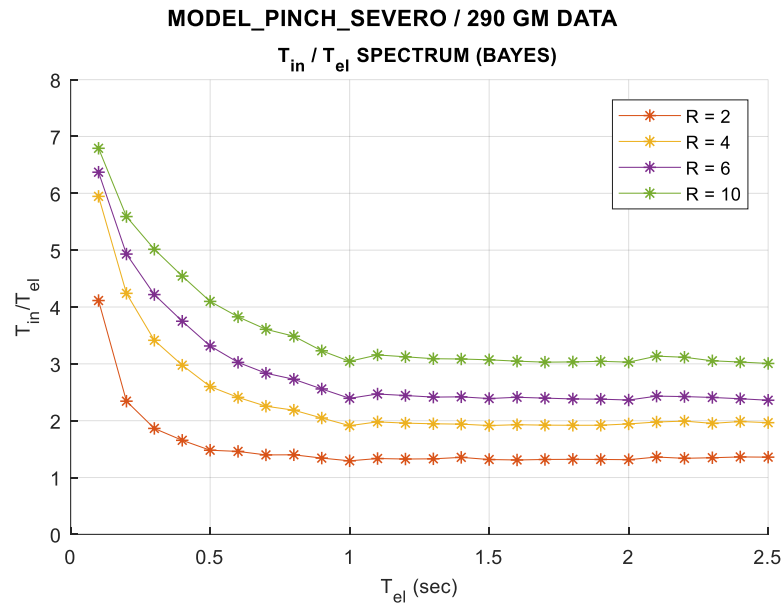


Figura VI.46. Espectro de elongación del periodo aparente para un sistema multi-lineal con degradación severa. Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

Finalmente se obtienen curvas de elongación del periodo aparente promedio, representativas de los sistemas histeréticos en términos de respuesta en aceleraciones relativas, y que desarrollan una forma similar a las descritas por las propiedades secantes (Figura VI.6, Figura VI.7 y Figura VI.8), con magnitudes máximas para sistemas de alta rigidez, un decaimiento hacia estructuras de rigidez moderada, y una leve tendencia asintótica hacia sistemas flexibles ($T_{el} > 1.0$ seg). Este límite resultante para un periodo de 1.0 seg, que separa las tendencias en las curvas de elongación del periodo aparente, fue igualmente observado por Katsanos y Sextos (2015), con tendencias similares en su proyección asintótica.

A diferencia de los espectros basados en propiedades secantes, existe una clara diferenciación en las amplitudes de elongación obtenidas para cada régimen de degradación evaluado. Sin embargo, según lo discutido en la sección anterior (VI.4.1) para el caso del sistema sin degradación se estima que los niveles de elongación son levemente subestimados, sobre todo para las curvas asociadas a magnitudes bajas de “R”.

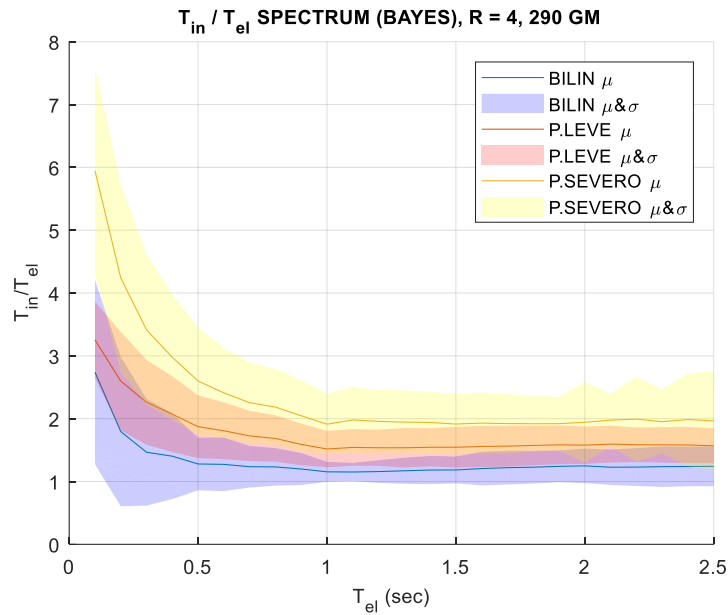


Figura VI.47. Comparación de elongación del periodo para sistemas bi-lineal sin degradación, degradación leve y severa. Con un factor de reducción de respuesta elástica, R, igual a 4. Resultado de 290 registros sísmicos. Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte.

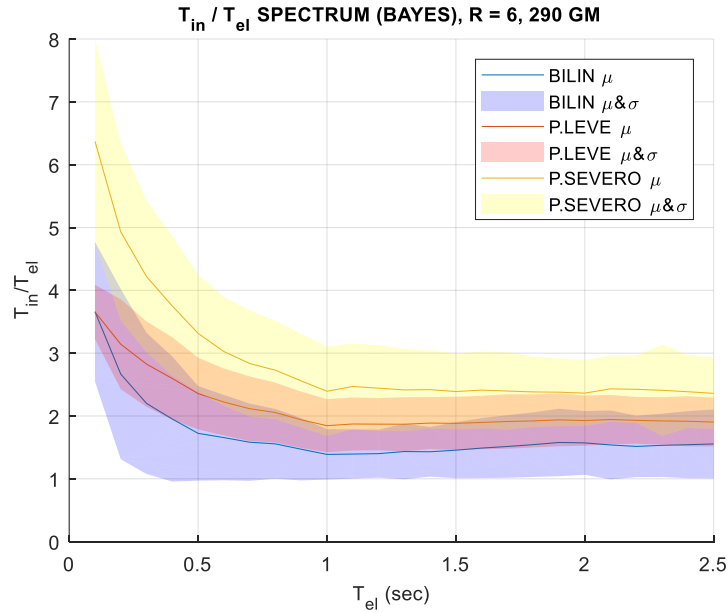


Figura VI.48. Comparación de elongación del periodo aparente para sistemas bi-lineal sin degradación, degradación leve y severa. Con un factor de reducción de respuesta elástica, R, igual a 6. Resultado de 290 registros sísmicos. Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte.

Comparando los espectros de elongación finales obtenidos para cada modelo constitutivo analizado, se observa que los niveles de dispersión son relativamente constantes a lo largo de todo el espectro, y de gran amplitud a pesar del gran número de eventos sísmicos considerados. Los niveles de elongación media obtenidos para sistemas de degradación severa (“PINCH_SEVERO”) permanecen del orden de un 25-35 % mayor a los obtenidos para los sistemas de degradación leve (“PINCH_LEVE”). Así mismo, estos últimos permanecen en torno a unos 15-25 % mayores a los obtenidos para los sistemas sin degradación (“BILIN”).

Las ecuaciones exponenciales que describen las curvas de elongación del periodo obtenidas son las siguientes.

- Sistema bi-lineal sin degradación.

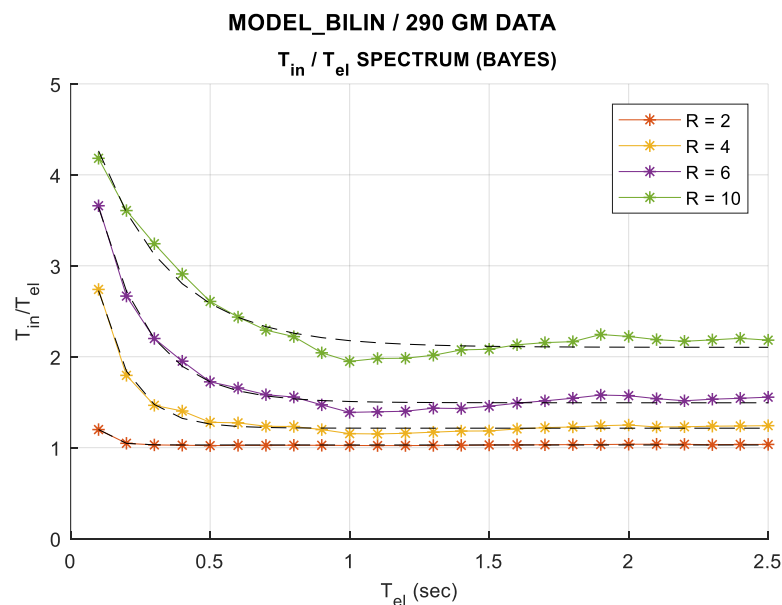


Figura VI.49. Ajuste exponencial a espectro de elongación (sistema bilineal sin degradación).

Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

Líneas segmentadas: Ajuste Exponencial $A \cdot \exp(B \cdot T_{el}) + C$.

$$T_{in}/T_{el} (R = 2) = 1.5904 \cdot e^{-22.3915 \cdot T_{el}} + 1.0295$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 4) = 3.6441 \cdot e^{-8.7986 \cdot T_{el}} + 1.2142$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 6) = 3.7583 \cdot e^{-5.5937 \cdot T_{el}} + 1.4936$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 10) = 3.1453 \cdot e^{-3.7585 \cdot T_{el}} + 2.1032$$

Extrapolando las constantes A, B y C en función de la variable R se obtiene la siguiente expresión general aproximada para la estimación de la elongación del periodo:

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el}) = (-0.101 \cdot R^2 + 1.384 \cdot R - 0.638) \cdot e^{-45.22 \cdot T_{el} \cdot R^{-1.12}} + (0.0052 \cdot R^2 + 0.073 \cdot R + 0.857)$$

- Sistema multi-lineal de degradación leve.

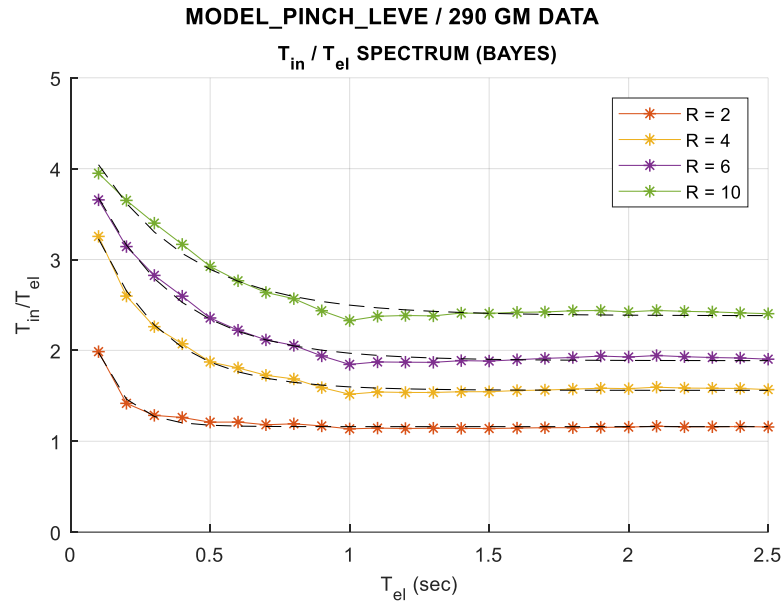


Figura VI.50. Ajuste exponencial a espectro de elongación (sistema multi-lineal con degradación leve).

Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

Líneas segmentadas: Ajuste Exponencial $A \cdot \exp(B \cdot T_{el}) + C$.

$$T_{in}/T_{el}(R = 2) = 2.1929 \cdot e^{-9.9122 \cdot T_{el}} + 1.1609$$

$$T_{in}/T_{el}(R = 4) = 2.5380 \cdot e^{-4.2062 \cdot T_{el}} + 1.5603$$

$$T_{in}/T_{el}(R = 6) = 2.5261 \cdot e^{-3.4297 \cdot T_{el}} + 1.8869$$

$$T_{in}/T_{el}(R = 10) = 2.2322 \cdot e^{-2.9513 \cdot T_{el}} + 2.3814$$

Extrapolando las constantes A, B y C en función de la variable R se obtiene la siguiente expresión general aproximada para la estimación de la elongación del periodo:

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el}) = (-0.022 \cdot R^2 + 0.264 \cdot R + 1.775) \cdot e^{-7.03 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.38}} + (-0.0074 \cdot R^2 + 0.241 \cdot R + 0.710)$$

- Sistema multi-lineal de degradación severa.

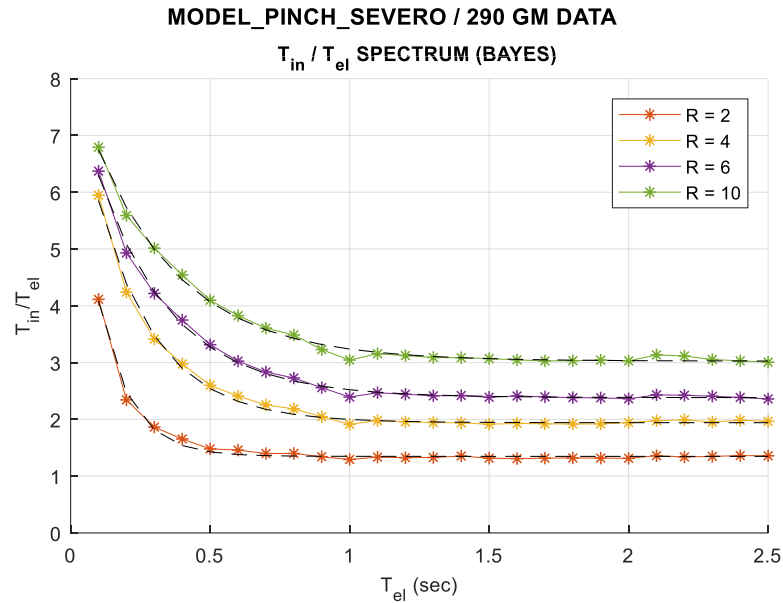


Figura VI.51. Ajuste exponencial a espectro de elongación (sistema multi-lineal con degradación severa).

Método: Ajuste Bayesiano de Fase Fuerte. Resultado de 290 registros sísmicos.

Líneas segmentadas: Ajuste Exponencial $A \cdot \exp(B \cdot T_{el}) + C$.

$$T_{in}/T_{el} (R = 2) = 6.6262 \cdot e^{-8.8638 \cdot T_{el}} + 1.3484$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 4) = 6.2471 \cdot e^{-4.6894 \cdot T_{el}} + 1.9415$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 6) = 5.6680 \cdot e^{-3.7080 \cdot T_{el}} + 2.3834$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 10) = 5.1104 \cdot e^{-3.1817 \cdot T_{el}} + 3.0263$$

Extrapolando las constantes A, B y C en función de la variable R se obtiene la siguiente expresión general aproximada para la estimación de la elongación del periodo:

$$T_{in}/T_{el} (R, T_{el}) = (-0.162 \cdot R + 6.971) \cdot e^{-12.74 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.65}} + (-0.0129 \cdot R^2 + 0.363 \cdot R + 0.680)$$

4.5. Influencia del Tipo de Suelo

Katsanos y Sextos (2015) en su investigación evalúan la influencia en los resultados de elongación las variables que definen la demanda sísmica. Particularmente se analiza el contenido de frecuencia del registro sísmico de aceleraciones, PGA, duración del evento sísmico, la distancia al foco desde la estación de registro y el tipo de suelo sobre el cual fue registrado (según una clasificación basada en el parámetro de ondas de corte superficiales V_{s30}). En general, los autores observaron una débil dependencia a estas variables (salvo casos particulares), obteniendo tendencias y magnitudes de elongación similares.

Para el caso de esta investigación este aspecto se repite, y se puede observar por ejemplo comparando las curvas de elongación del periodo obtenidas para los grupos de eventos sísmicos registrados en suelos tipo C (172 registros) y tipo D (106 registros) (Figura VI.52 y Figura VI.53).

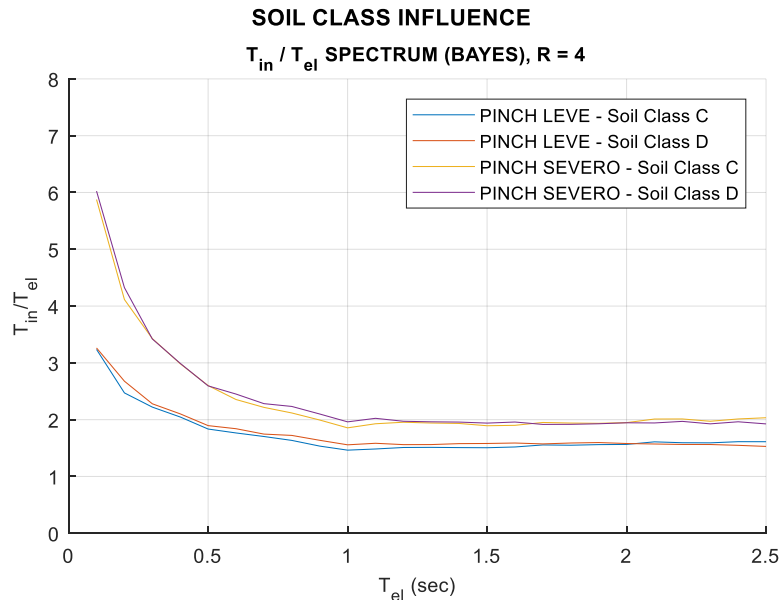


Figura VI.52. Influencia del tipo de suelo en la elongación del periodo aparente para sistemas de degradación leve y severa. Factor de reducción de respuesta elástica, R, igual a 4.

Se estima que la independencia generalizada de los resultados frente las características de los eventos sísmicos (tipo de suelo, distancia al foco, etc.) radica en el hecho de que los niveles de incursión inelástica de los sistemas histeréticos evaluados se encuentran justamente normalizados con respecto a la respuesta elástica máxima de los mismos eventos sísmicos (factores “R”).

Tal como se plantea originalmente la metodología, la respuesta inelástica de un sistema a una excitación sísmica se encuentra calibrada (o escalada) en función de la demanda que impone al respectivo sistema en condiciones lineales-elásticas. Esto invisibiliza las características propias del evento sismo frente a otro evento y se pierde la definición del sistema histerético para cada excitación analizada.

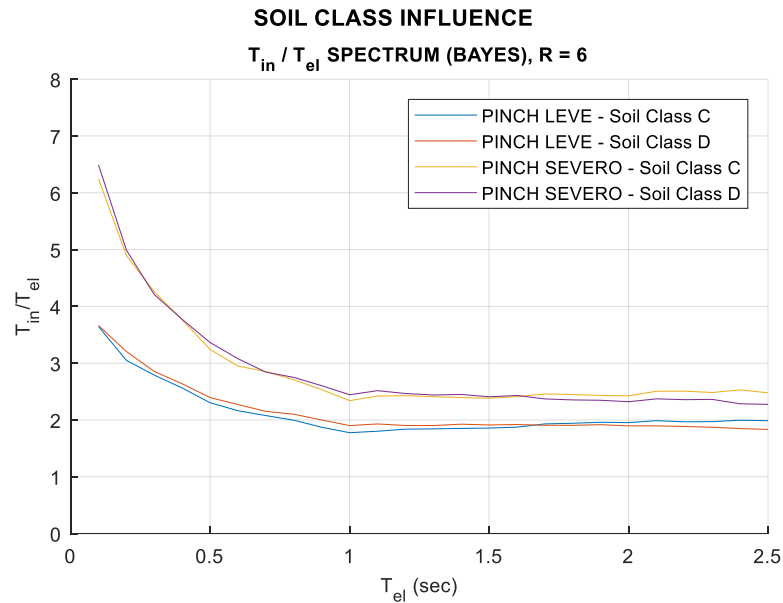


Figura VI.53. Influencia del tipo de suelo en la elongación del periodo aparente para sistemas de degradación leve y severa. Factor de reducción de respuesta elástica, R, igual a 6.

Se considera interesante replantear esta metodología para la obtención de espectros de elongación del periodo aparente, considerando una normalización de los sistemas histeréticos (independiente del registro sísmico y respuesta del sistema), definiendo niveles de resistencia de fluencia en proporciones de masa (F_y/M). Se prevé que de esta forma se apreciarán claramente la influencia de las variables que definen la demanda sísmica.

Por otro lado, el uso de factores de reducción de la respuesta elástica “R” sigue siendo un parámetro de normalización orientado al campo del diseño sísmico, y en la práctica, los resultados finales serán tan validos cuanto más se ajuste el conjunto de eventos sísmicos a un espectro de diseño sísmico particular. Este aspecto se revisa en la sección siguiente.

4.6. Comparación de Resultados: Linealización Equivalente vs Propiedades Secantes

En esta sección se comparan los resultados obtenidos de la elongación del periodo aparente, a partir de la linealización equivalente de la fase fuerte de respuesta (Análisis Bayesiano), versus la elongación estimada a partir del enfoque de propiedades secantes. Esta comparación se realiza en términos de una razón entre ambas elongaciones respectivamente, e intenta acercar cualitativamente el enfoque del análisis de respuesta en el tiempo y el enfoque de diseño comúnmente basado en las propiedades secantes del sistema.

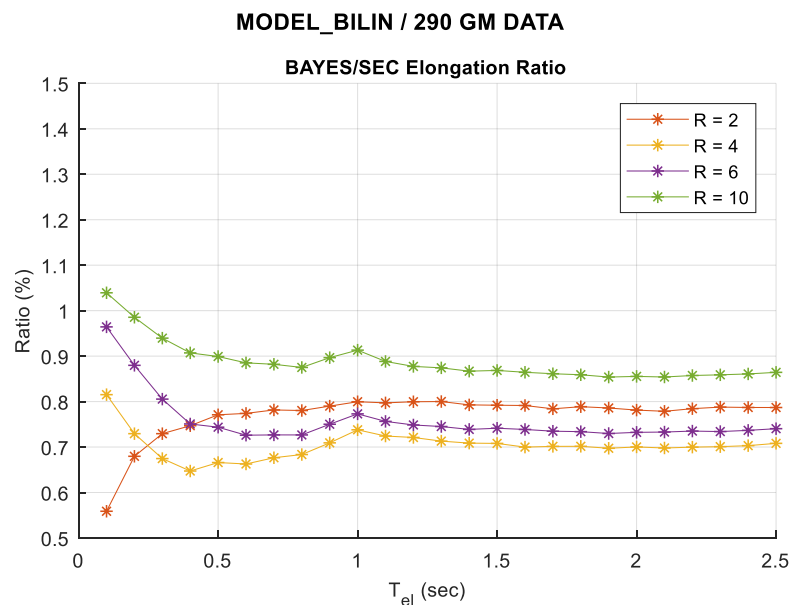


Figura VI.54. Razón de elongaciones del periodo aparente.
Ratio: Linealización Equivalente sobre Propiedades Secantes.
Modelo: Bilineal sin degradación.

Para el caso del modelo bi-lineal sin degradación se observa que la elongación determinada mediante la linealización equivalente ronda entre un 60-90% de la elongación asociada a las propiedades secantes para el caso de sistemas de período elástico mayor a 0.5 seg y en función del factor R del sistema histerético. Este rango expande sus límites en un 10% para sistemas de mayor rigidez. La tendencia de estas razones de elongación se observa estable, salvo por el modelo de R = 2, en cuyos resultados ya se había previsto problemas de confiabilidad y subestimación (VI.4.1). Se estima probable que esto último influya en los resultados dispares de la curva asociada al modelo de R = 2.

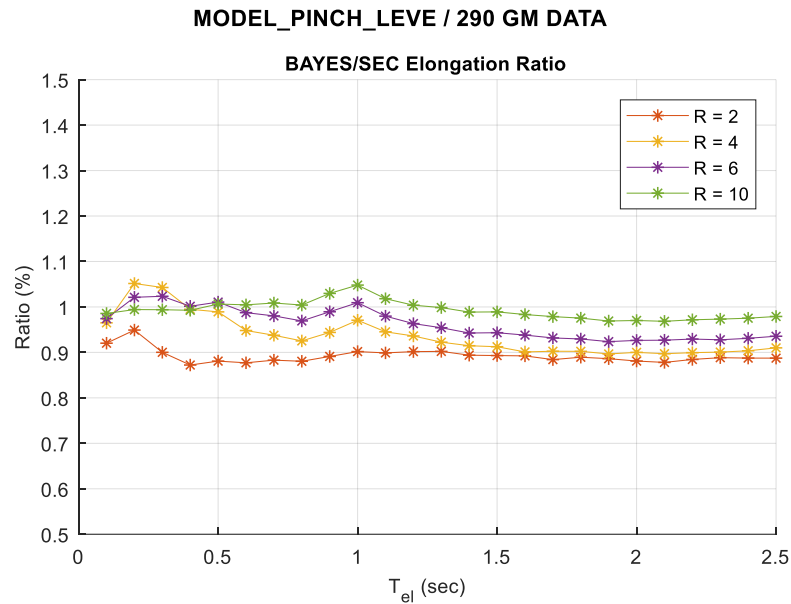


Figura VI.55. Razón de elongaciones del periodo aparente.
Ratio: Linealización Equivalente sobre Propiedades Secantes.
Modelo: Multi-lineal con degradación leve.

Para el caso del modelo multi-lineal con degradación leve se observa que la elongación determinada mediante la linealización equivalente ronda entre un 90-105% de la elongación asociada a las propiedades secantes, casi para todo el espectro de periodos elásticos, y con leves diferencias en función del factor R del sistema.

Esta cercanía entre los resultados del ajuste lineal y propiedades secantes se observó anteriormente, y se asocia a la naturaleza del modelo degradante, que incorpora en su ley constitutiva principalmente componentes de degradación de rigideces, aspecto especialmente sensible en la respuesta en aceleraciones relativas del sistema sobre las cuales se está desarrollando la linealización equivalente.

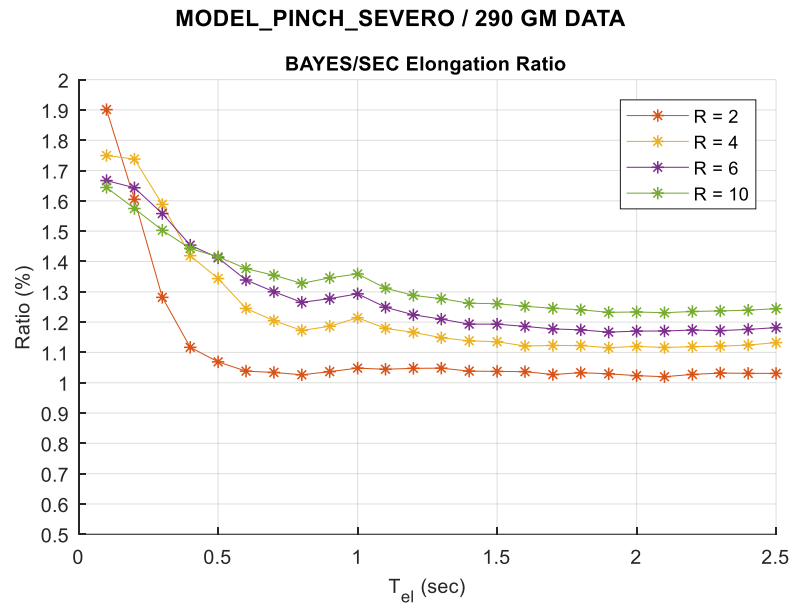


Figura VI.56. Razón de elongaciones del periodo aparente.
Ratio: Linealización Equivalente sobre Propiedades Secantes.
Modelo: Multi-lineal con degradación severa.

Para el caso del modelo multi-lineal con degradación severa se aprecia un fenómeno contrario al visto para los modelos anteriores. En este caso la elongación determinada mediante la linealización equivalente resulta hasta un 40% mayor a la obtenida en base a las propiedades secantes, para sistemas de periodo elástico mayor a 0.5 seg, y hasta un 90% mayor para sistemas de mayor rigidez. Igualmente se observa una fuerte dependencia del factor R considerado en el sistema.

Nuevamente, las tendencias de estos resultados se asocian a las características del modelo sobre el cual se realiza en el análisis. Como se ha descrito anteriormente, este sistema de degradación severa ha sido definido incorporando una fuerte componente de “pinching”, que lleva al sistema a responder reiterativamente por ramas histeréticas de rigidez muy cercana a cero (“sliding”). Estos ciclos de respuesta que reducen al mínimo la energía histerética del sistema influyen en los resultados de linealización equivalente, favoreciendo el mejor ajuste hacia rigideces efectivas de menor magnitud, incluso menores a las rigideces secantes asociadas al desplazamiento máximo del sistema.

4.7. Comparación de Resultados: Katsanos-Sextos 2015 y Linealización Equivalente

En esta sección se comparan los espectros ajustados calculados por Katsanos y Sextos (2015) a partir de una regresión polinómica de orden 6, versus la regresión calculada en esta investigación a partir de métodos de linealización equivalente y presentadas en la sección 4.4, Figura VI.50. Katsanos y Sextos en su artículo exponen las ecuaciones de regresión polinómica únicamente para el ajuste de los espectros de elongación asociados a la respuesta del modelo de degradación leve. Estas son comparadas con las obtenidas en el presente estudio para una comparación directa de las amplitudes de elongación obtenidas (Ver Figura VI.57).

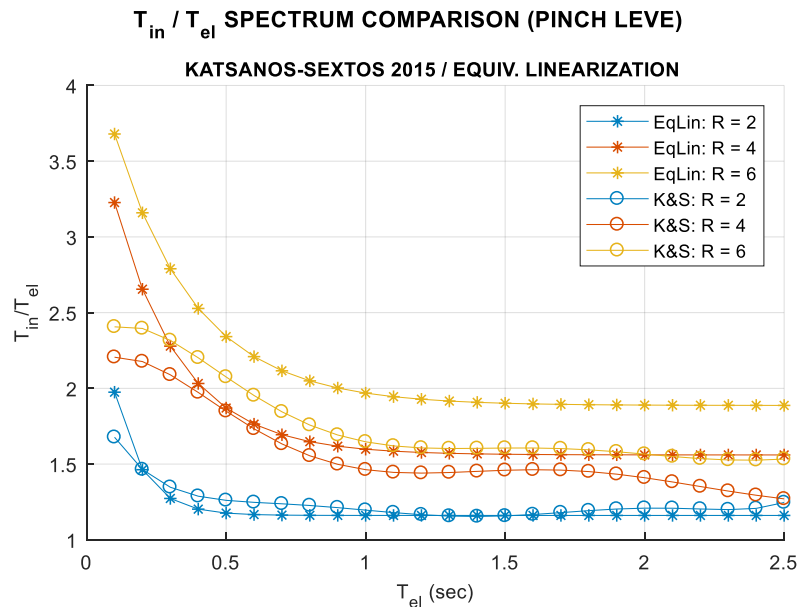


Figura VI.57. Comparación de Ajustes de Espectros de Elongación del Periodo Aparente. Katsanos y Sextos 2015 vs Linealización Equivalente (Bayes) Modelo: Multi-lineal con degradación leve.

La metodología de Katsanos y Sextos, que implementa una identificación en espacio de la frecuencia (equivalente a STFT), dependiendo del factor R considerado, presenta grandes diferencias de amplitudes de elongación frente a las obtenidas en este estudio a partir de linealizaciones equivalente. Respaldado por las observaciones descritas en los capítulos anteriores, estas diferencias pueden estar directamente asociadas a la imprecisión de las metodologías de espacio-frecuencia para sistemas no-lineales.

4.8. Espectros de Elongación en Contexto Nacional

A continuación, en base a los mismos sistemas degradantes estudiados, se obtienen espectros de elongación del periodo aparente para un grupo de eventos sísmicos, enmarcados dentro de un nivel de demanda sísmica específico y definido por la normativa de diseño sísmico nacional “NCh433of.1996mod.2009”, con la aplicación de las últimas actualizaciones por medio del Decreto Supremo n°60 del MINVU del año 2011.

Se selecciona un resumido grupo de 12 eventos sísmicos registrados en zona de sismicidad 3 y un suelo tipo B, según las clasificaciones normativas (Figura VI.58).

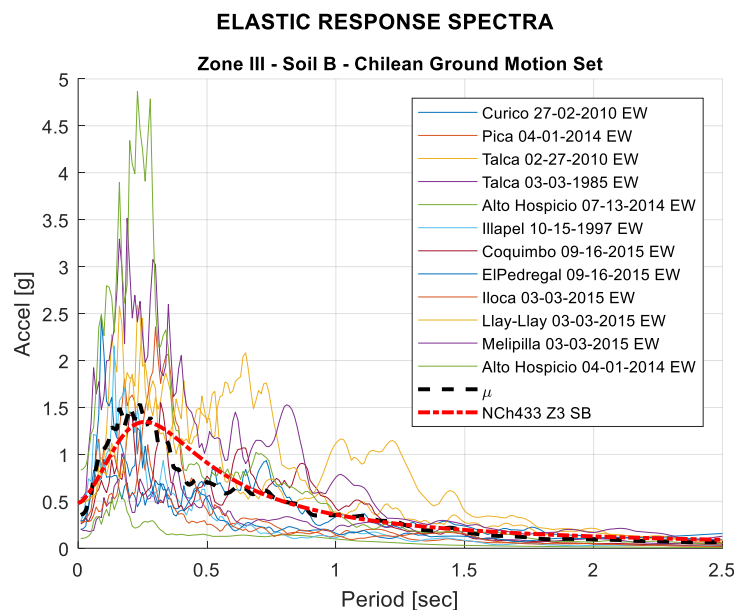


Figura VI.58. Espectros de respuesta elástica de registros chilenos y espectro elástico de diseño (NCh433) para zona de sismicidad 3 y suelo B.

Los espectros de elongación del periodo obtenidos para este conjunto de eventos sísmicos se presentan en las figuras Figura VI.59 y Figura VI.60.

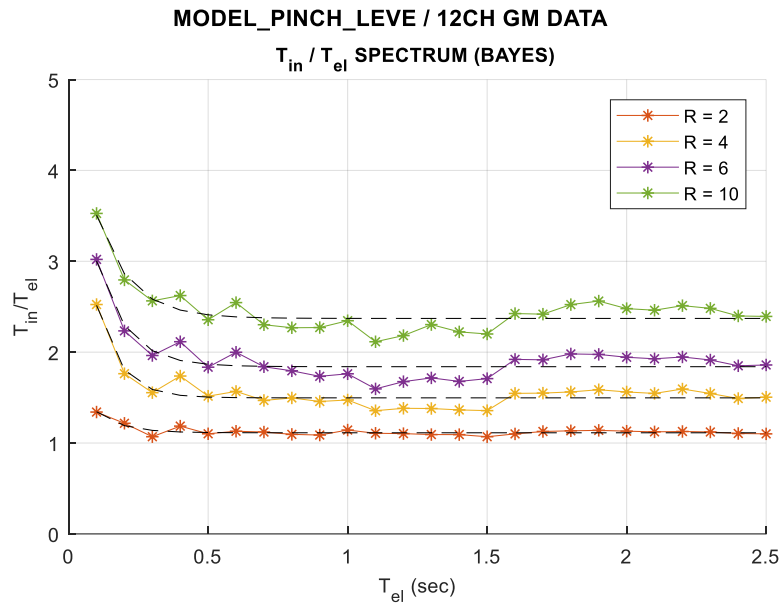


Figura VI.59. Espectro de elongación del periodo aparente para un sistema multi-lineal con degradación leve.

Zona de sismicidad 3 y Suelo tipo B.

Líneas segmentadas: Ajuste Exponencial $A \cdot \exp(B \cdot T_{el}) + C$.

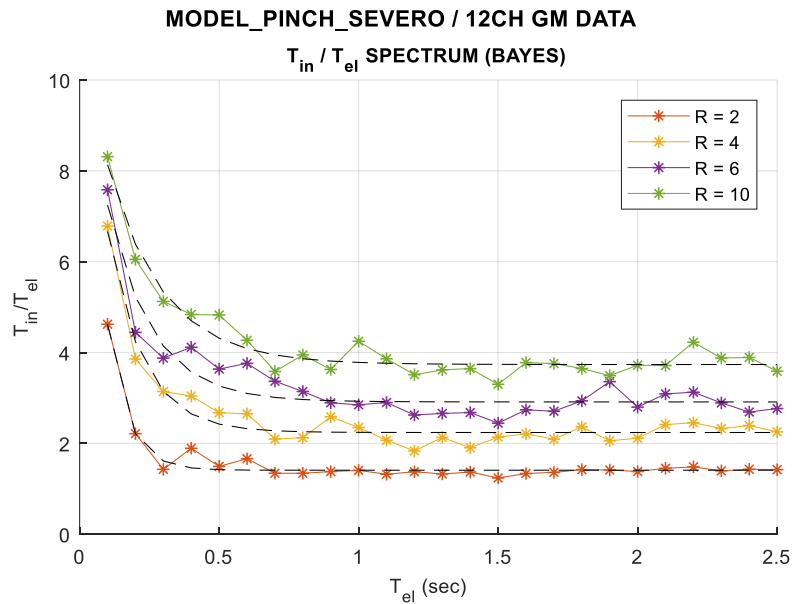


Figura VI.60. Espectro de elongación del periodo aparente para un sistema multi-lineal con degradación severa.

Zona de sismicidad 3 y Suelo tipo B.

Líneas segmentadas: Ajuste Exponencial $A \cdot \exp(B \cdot T_{el}) + C$.

Las ecuaciones exponenciales que describen las curvas de elongación del periodo obtenidas son las siguientes.

- Sistema multi-lineal de degradación leve.

$$T_{in}/T_{el} (R = 2) = 0.6845 \cdot e^{-10.8458 \cdot T_{el}} + 1.1128$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 4) = 3.3857 \cdot e^{-12.0164 \cdot T_{el}} + 1.4971$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 6) = 2.9883 \cdot e^{-9.4412 \cdot T_{el}} + 1.8400$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 10) = 2.6257 \cdot e^{-8.3838 \cdot T_{el}} + 2.3711$$

Extrapolando las constantes A, B y C en función de la variable R se obtiene la siguiente expresión general aproximada para la estimación de la elongación del periodo:

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el}) = (-0.11 \cdot R^2 + 1.53 \cdot R - 1.67) \cdot e^{-13.26 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.18}} + (-0.006 \cdot R^2 + 0.230 \cdot R + 0.676)$$

- Sistema multi-lineal de degradación severa.

$$T_{in}/T_{el} (R = 2) = 12.8023 \cdot e^{-13.8356 \cdot T_{el}} + 1.4099$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 4) = 9.7846 \cdot e^{-7.9406 \cdot T_{el}} + 2.2404$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 6) = 8.1323 \cdot e^{-6.2965 \cdot T_{el}} + 2.9132$$

$$T_{in}/T_{el} (R = 10) = 7.2974 \cdot e^{-5.0656 \cdot T_{el}} + 3.7367$$

Extrapolando las constantes A, B y C en función de la variable R se obtiene la siguiente expresión general aproximada para la estimación de la elongación del periodo:

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el}) = (-0.65 \cdot R + 13.1) \cdot e^{-20.3 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.63}} + (-0.021 \cdot R^2 + 0.544 \cdot R + 0.404)$$

4.9. Correlación de Elongación del Periodo

Como ha sido descrito en capítulos anteriores, el enfoque utilizado para la linealización equivalente tiene por objetivo ajustar la respuesta en aceleraciones relativas de un sistema lineal a la respuesta del sistema hysterético de interés. Este enfoque dista en cierto grado del enfoque del diseño, contexto en el cual se tiene especial interés en las demandas máximas del sistema en deformaciones.

Sin embargo, el parámetro de elongación del periodo como indicador de degradación en el sistema, presenta una interesante correlación con los niveles de demanda de ductilidad alcanzada por los sistemas hysteréticos, presentando tendencias consistentes incluso para distintos eventos sísmicos (Figura VI.61).

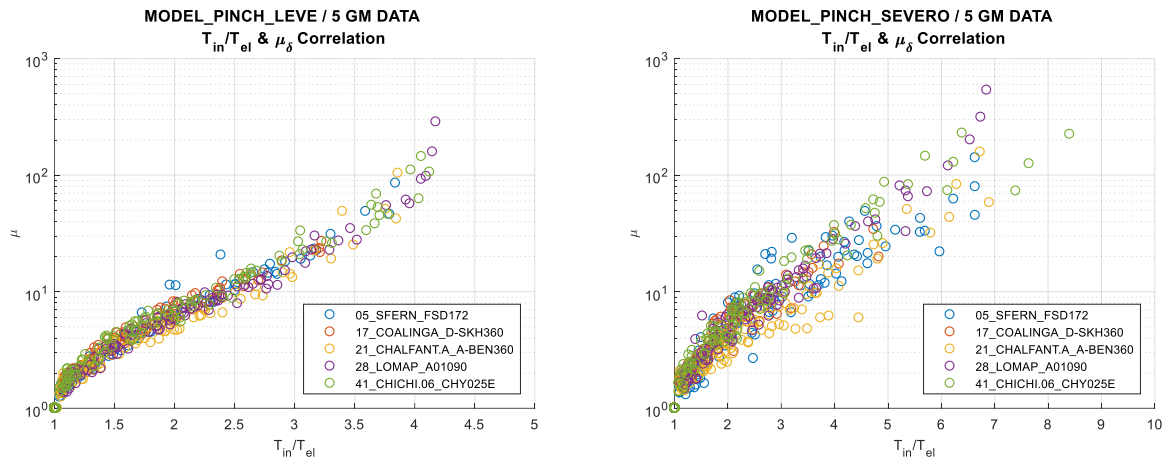


Figura VI.61. Correlación de elongación y demanda de ductilidad. Sistema multi-lineal con (a) degradación leve y (b) degradación severa. Cinco casos de eventos sísmicos.

De estos resultados se obtiene una estable relación numérica entre el nivel de elongación del periodo aparente en un sistema, un parámetro medible, y niveles de máxima demanda de ductilidad, un parámetro a priori desconocido, y de directa utilidad en etapas de diseño y control de desempeño. Esta correlación aritmética se expresa a continuación en base al conjunto completo de eventos sísmicos.

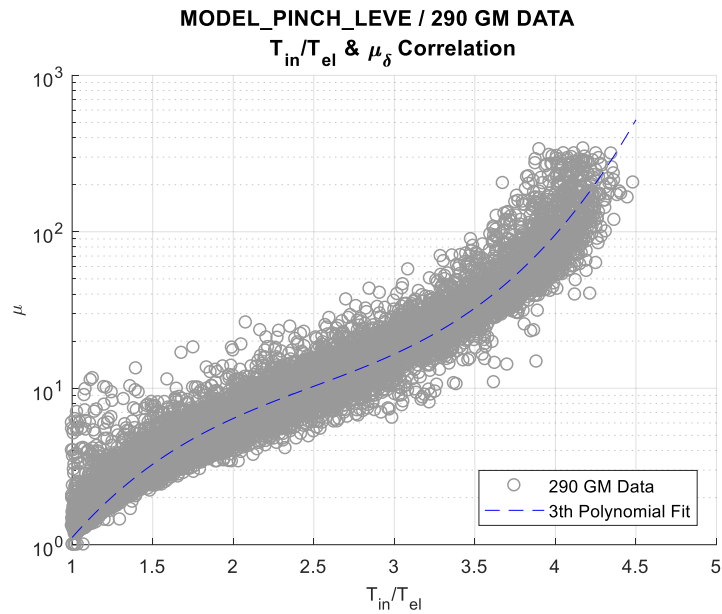


Figura VI.62. Correlación de elongación y demanda de ductilidad. Sistema multi-lineal con degradación leve. Conjunto de 290 eventos sísmicos. Ajuste exponencial-polinomial de orden 4.

Las ecuaciones de correlación entre la elongación del periodo y la demanda de ductilidad, para el caso del sistema histerético de degradación leve, son las siguientes.

- Ajuste exponencial-polinomial de orden 3.

$$\mu_{PL} \approx e^{0.2692\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 2.0171\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 5.9178\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 4.0632}$$

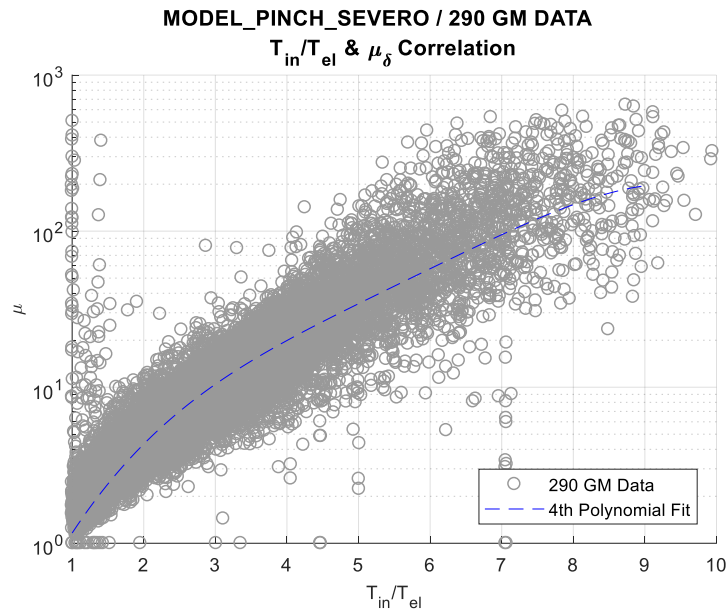


Figura VI.63. Correlación de elongación y demanda de ductilidad. Sistema multi-lineal con degradación severa. Conjunto de 290 eventos sísmicos. Ajuste exponencial-polinomial de orden 4.

Las ecuaciones de correlación entre la elongación del periodo y la demanda de ductilidad, para el caso del sistema histerético de degradación leve, son las siguientes.

- Ajuste exponencial-polinomial de orden 4.

$$\mu_{PS} \approx e^{-0.0025\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^4 + 0.0574\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 0.4975\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 2.4411\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 1.8475}$$

Capítulo VII. Comentarios y Conclusiones

A través de los años, se ha demostrado en el campo experimental y analítico que métodos de identificación basados en el espacio de la frecuencia permiten estimar componentes de la respuesta no-lineal de sistemas dinámicos (estructuras, suelos y otros), y visualizar las variaciones de estas componentes en el tiempo. Estas técnicas se han evaluado con distintas fuentes de excitación, y de variada amplitud, tales como vibraciones ambientales, fuerzas de impacto, excitaciones sinusoidales forzadas, e incluso movimientos sísmicos. Para todos estos casos, las metodologías de espacio-frecuencia han ofrecido similares conclusiones, asociando las variaciones de las propiedades dinámicas a efectos de degradación e incursiones inelásticas presentes en la respuesta de los sistemas dinámicos. Se ha demostrado una correlación entre el nivel de degradación y/o incursión inelástica con una reducción en magnitud de las frecuencias fundamentales de vibración (aumento del periodo) y un respectivo aumento del amortiguamiento modal.

Especial interés se ha centrado en la identificación de los periodos fundamentales de vibración, cuyas magnitudes inciden directamente en la respuesta dinámica del sistema, guardan relación con aspectos del diseño sísmico de tipo espectral, y la magnitud de variación (aumento o elongación del periodo) se correlaciona estrechamente con niveles de degradación o daño alcanzado durante la excitación dinámica. En la explotación de la elongación del periodo como parámetro de análisis, diseño y control, destaca la investigación de Katsanos y Sextos (2015) que con un enfoque estadístico proponen espectros para la predicción de la elongación del periodo, en función de variables base que definen el problema general (propiedades iniciales del sistema, régimen histerético y demanda sísmica).

Teniendo como referencia el estudio y metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015), en este trabajo se ha replicado detalladamente el procedimiento para la obtención de espectros de elongación del periodo, ampliando los tipos de sistemas histeréticos evaluados y la metodología de identificación aplicada.

Los comentarios y conclusiones finales de este trabajo han sido descritos en el cuerpo del informe, y se detallan a continuación.

- **Desarrollo y Obtención de Resultados**

Se reúne y analiza casi la totalidad de los registros sísmicos considerados en el estudio de Katsanos y Sextos (97%, 290 registros), cubriendo sismos de distinta naturaleza, duración, tipos de suelo, contenidos de frecuencia y distancia al foco desde el punto de registro. Se considera que el conjunto de eventos sísmicos recopilado es suficiente como para validar el enfoque estadístico de los resultados finales. Los datos de estos eventos sísmicos son extraídos de la plataforma del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center).

Fueron modelados y analizados sistemas histeréticos multi-lineales degradantes que asimilan el comportamiento dinámico global de sistemas estructurales de varios grados de libertad. Los parámetros que describen estos modelos constitutivos fueron ajustados a equivalencia de lo establecido por los autores, que a su vez responden al comportamiento esperado de edificios de hormigón armado estructurados en marcos especiales de momento, provistos de un detallamiento acorde a actuales códigos de diseño sísmico, y afectos a dos niveles de degradación histerética. Un primer modelo es definido con un régimen de “degradación leve”, que principalmente desarrolla una degradación en la rigidez del sistema tras cada ciclo de recarga histerética y una leve componente de efecto “pinching”. Un segundo modelo se define con un régimen de “degradación severa”, que agrega una fuerte componente de “pinching”. Igualmente fue considerado y analizado en detalle un modelo histerético bi-lineal sin degradación (bi-lineal) y modelos suavizados (Bouc-Wen) con y sin componentes de degradación y pinching, para comparaciones puntuales.

Fue analizada la respuesta dinámica de estos sistemas y para el conjunto de registros sísmicos descrito, considerando cuatro niveles de reducción de la respuesta elástica máxima (factor “R” = 2, 4, 6 y 10) para asegurar varios niveles de incursión inelástica, y un rango de 25 rigideces iniciales asociados a periodos elásticos desde 0.1 a 2.5 seg.

La definición de los modelos constitutivos y el desarrollo de los análisis dinámicos fueron procesados en OpenSEES por su rapidez y amplio contenido de librerías de sistemas histeréticos. Para la aceptabilidad de los resultados de análisis dinámicos se adoptó el criterio de convergencia basado en el control del error balance de energía (EBE) de entrada-salida. El cual se mantuvo para todos los casos inferior a un 0.1 % con respecto a la energía de entrada al sistema.

Para el análisis sistemático fue necesario el desarrollo de variadas rutinas en lenguaje de programación “TCL” (lenguaje para OpenSEES) y MATLAB para la generación espectros de respuesta, organización de la información y post-procesamiento. Obtenida la respuesta dinámica de cerca de 110000 sistemas distintos (sin contar modelos con suavización), esta fue organizada para su respectivo análisis y control de error de balance de energía, cálculo de propiedades secantes, identificación de propiedades dinámicas aparentes y linealización equivalente. La automatización de estos procesos dio forma a una herramienta de trabajo para la generación de espectros de respuesta, curvas evolutivas de energía en el sistema, cálculo de intensidad de Arias, espectros de ductilidad constante, entre otros; al igual que la aplicación simultánea de metodologías para la identificación de cada sistema en base a su propia respuesta.

Sobre la respuesta de estos sistemas se han implementado dos metodologías de identificación de sistemas para la estimación de las propiedades dinámicas lineales-equivalentes.

Siguiendo el enfoque propuesto por Katsanos y Sextos (2015), se ha implementado en primer lugar una técnica de identificación de espacio-frecuencia (Short Time Fourier Transform, STFT) sobre la respuesta de aceleraciones relativas de los sistemas evaluados. Se establece el periodo aparente del sistema como el máximo identificado a lo largo de la curva de espectrograma.

En una segunda parte, se ha implementado un método de identificación basado en un análisis bayesiano para el ajuste de la respuesta en el tiempo de aceleraciones relativas de los sistemas no-lineales dentro de un único y amplio segmento de respuesta (fase fuerte de respuesta). Con este enfoque se ha logrado obtener para cada sistema las propiedades efectivas de rigidez y amortiguamiento que definen el respectivo sistema lineal-equivalente.

La elongación del periodo aparente de un sistema histerético se define como la razón entre la magnitud del periodo identificado a partir de la respuesta no-lineal, sobre la magnitud del periodo fundamental del sistema asociado a las propiedades iniciales-elásticas del sistema. Espectros de elongación del periodo son obtenidos a partir de ambas técnicas de identificación aplicadas, los resultados son comparados entre sí, y respecto a las propiedades secantes obtenidas analíticamente.

- **Identificación de Sistemas en Espacio-Frecuencia**

En base a los resultados obtenidos y discutidos en el cuerpo del informe, se estima que el presente estudio es otra prueba de las limitaciones de la aplicación de metodologías de este tipo para la identificación de propiedades lineales-equivalentes representativas o cualquier definición de aspectos cuantitativos.

En numerosos casos se observa una fuerte influencia de la respuesta forzada en los resultados de la identificación mediante STFT. A pesar de utilizar la respuesta de aceleraciones relativas del sistema para la identificación, durante la fase fuerte de respuesta el contenido de frecuencias de la excitación sísmica prima sobre el espectro de frecuencias propio del sistema. Esto pone un problema a la estimación de la frecuencia aparente (menor magnitud identificada en el espectrograma), y a su vez en el cálculo de la elongación del periodo, obteniendo resultados no representativos. Este problema ha sido observado anteriormente por otros autores, optando por utilizar las propiedades identificadas al final de la respuesta dinámica.

Varios autores han documentado el uso de funciones de transferencia empírica (razón espectral respuesta/excitación) para la identificación de frecuencias dominantes del sistema [3, 4, 6-16], proporcionando una suerte de filtro del contenido de frecuencia presente en la excitación sísmica. Se observó en este estudio que a partir de esta metodología se elimina la sensibilidad del espectrograma a la respuesta forzada, capturando de mejor manera el contenido de frecuencia de la respuesta del sistema. Sin embargo, en los casos analizados aumenta levemente la inestabilidad en la curva de seguimiento de frecuencia aparente a lo largo de la respuesta. Esta metodología no fue mayormente profundizada.

Se ha observado que para modelos histeréticos que desarrollan amplias incursiones inelásticas y/o abruptas no-linealidades (modelo bi-lineal puro, modelo con fuerte componente de pinching), el método de identificación de espacio-frecuencia STFT no presenta resultados claros ni representativos. En particular, para el modelo bi-lineal se obtienen los resultados más erráticos y menos representativos, en donde las respectivas incursiones inelásticas del sistema se han visto reflejadas en una distorsión en la curva del espectrograma en lugar de una perceptible disminución de la frecuencia fundamental del sistema.

Para el caso de los sistemas histeréticos degradantes, en general sí se ha observado una regular tendencia a la reducción de magnitud de las frecuencias aparentes del sistema, y en

proporción a nivel incursión inelástica (“R”) y grado de degradación del sistema. La metodología de identificación en cuestión ha presentado una especial sensibilidad y estabilidad en sus resultados frente a las componentes de degradación de rigidez en el sistema (modelo de degradación leve).

Para sistemas bi-lineales (sin degradación) se evaluó la influencia del grado de suavización entre las ramas de respuesta de rigidez inicial y rigidez de post-fluencia utilizando un modelo Bouc-Wen, reduciendo el cambio abrupto de rigidez. Consecuentemente con investigaciones anteriores [5], se observó que la presencia de este efecto de suavización, aspecto siempre presente en la respuesta de sistemas reales, alteran favorablemente las técnicas de identificación en el espacio de la frecuencia. Si bien persiste el problema de la respuesta forzada presente en la identificación, con el aumento del grado de suavización en el modelo histerético, los resultados del espectrograma presentan una mayor sensibilidad al nivel de incursión inelástica en términos del periodo aparente resultante.

Se concluye que, para modelos degradantes, la frecuencia aparente identificada a partir de la metodología de espacio-frecuencia STFT efectivamente puede dar indicios del nivel de degradación alcanzado por el sistema, sin embargo, sus resultados no necesariamente mantienen una relación con aspectos cuantitativos comparables o de equivalencia lineal.

- **Análisis Bayesiano para la Identificación de Sistemas**

Cumpliendo con uno de los objetivos principales del estudio, se propone una mejora a la metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015) para la estimación del periodo aparente de un sistema dinámico, con la aplicación de una metodología de identificación orientada a asegurar una representatividad cuantitativa del sistema lineal-equivalente identificado.

Esto se logra con la implementación de un Análisis Bayesiano para el ajuste (minimización del error) entre la respuesta en el tiempo de aceleraciones relativas de los sistemas no-lineales y la respuesta modelada de un sistema lineal dado, dentro de un único y característico segmento de respuesta (fase fuerte). Con este enfoque se ha obtenido para cada sistema no-lineal analizado las propiedades de rigidez y amortiguamiento que definen el respectivo sistema lineal-equivalente. Para estimar el periodo aparente (o periodo inelástico) se realiza una transformación directa a partir de rigidez identificada, considerando la masa del sistema conocida (ecuación de oscilador armónico simple).

El método de identificación aplicado demuestra ser efectivo y robusto, mostrándose estable para todos los modelos constitutivos tratados. Este presenta igualmente flexibilidad en su aplicación, posibilitando una identificación secuencial por ventanas móviles de tiempo, permitiendo visualizar las variaciones en las propiedades lineales-equivalentes a lo largo de la respuesta completa. Este último enfoque otorga una representación únicamente cualitativa de los niveles de degradación y/o incursión inelástica alcanzada durante la excitación sísmica, pero alcanzando una sensibilidad mayor a la percibida aplicando un ajuste acotado a la fase fuerte de respuesta.

No fue un aspecto completamente logrado en este estudio la implementación de un análisis de sensibilidad detallado en los resultados de la identificación en función de las variables de entrada del método de identificación (definición inicial del sistema lineal-equivalente, dispersión inicial de las variables del problema, valores límite de variables para la optimización, definición de la fase fuerte, entre otros). Esto se debe a la gran variedad de sistemas dinámicos analizados, con un amplio rango de magnitudes de sus propiedades constitutivas y variada naturaleza de eventos sísmicos analizados. En ciertos casos fue necesario analizar particularmente la correcta convergencia en el ajuste para evadir óptimos locales. Sin embargo, sería factible, conveniente y relativamente simple acompañar esta metodología con técnicas de estabilidad que permitan asegurar la optimización global al problema y con una mayor eficiencia.

La identificación basada en la respuesta en aceleraciones relativas resultó ser un buen parámetro de entrada para capturar los niveles de incursión inelástica para todos los sistemas histeréticos tratados, con una especial sensibilidad a los efectos de degradación de la rigidez (similar a lo observado de la identificación en espacio-frecuencia). Para sistemas histeréticos con cambios abruptos en sus ramas de rigidez, tales como el modelo bi-lineal o el modelo de degradación severa con fuerte componente de “pinching”, se obtienen buenos niveles de ajuste, pero con una mayor presencia de óptimos locales.

- Ajuste de Respuesta en Fase Fuerte (Sistema Lineal-Equivalente)

Se define este enfoque de ajuste como la identificación de un sistema lineal-equivalente representativo de la respuesta en aceleraciones relativas del sistema no-lineal, y sus resultados son utilizados para la posterior construcción de espectros de elongación del periodo.

En general, para todos los modelos histeréticos analizados, de la identificación se obtiene una regular tendencia al aumento del periodo aparente (reducción de la rigidez lineal-equivalente) en proporción a nivel incursión inelástica (“R”) y grado de degradación del sistema.

En particular para el sistema bi-lineal, cuando las incursiones inelásticas son concentradas o acotadas respecto al segmento de respuesta analizada ($R = 2$), estas son poco influyentes en la respuesta en aceleraciones relativas, lo cual deriva en pobres resultados de la linealización-equivalente. Esto induce una común convergencia hacia las propiedades iniciales-elásticas del sistema, desarrollando ajustes de baja calidad en términos del error cuadrático medio. (RMS). Aspectos como la identificación por ventanas móviles, reducción de la longitud de fase fuerte de respuesta, o identificación en zonas de primeras incursiones inelásticas demostraron ser alternativas de aplicación para mitigar este problema.

Los resultados de la identificación de los sistemas de degradación leve y severa se ven naturalmente influenciados por las características de degradación de cada modelo constitutivo.

Para los sistemas con degradación leve (degradación de rigidez y mínimo efecto pinching) se obtienen los mejores niveles de ajuste de respuesta y con resultados de rigidez efectiva que tienden hacia las propiedades secantes del sistema. Se confirma que la respuesta en aceleraciones relativas es especialmente sensible a la tasa de cambio fuerza-desplazamiento, y que, para este tipo de sistemas degradantes, la identificación de un sistema lineal-equivalente en base a esta respuesta permitirá obtener propiedades mayormente representativas.

En cuanto a los sistemas con degradación severa (fuerte componente de pinching), los resultados de la identificación se encuentran ligados al grado de pinching presente en la respuesta histerética. Con menos ciclos histeréticos desarrollados por el sistema se obtienen resultados de rigidez lineal-equivalente con una ligera tendencia hacia las propiedades secantes, mientras que con una mayor presencia del efecto pinching en la respuesta, se obtiene una rigidez lineal-equivalente cada vez menor.

- Ajuste de Respuesta por Ventanas Móviles

Los resultados de este enfoque de ajuste representan la respuesta del sistema no-lineal dentro de un acotado segmento de tiempo y no son representativos de la respuesta global del sistema frente a la excitación sísmica. Es por esto que este enfoque se propone de manera complementaria para una representación cualitativa de incursiones inelásticas y/o degradación

histerética desarrollada por el sistema, presentando un seguimiento de propiedades lineales-equivalentes (o efectivas) de rigidez y amortiguamiento en el tiempo.

En general, los niveles de ajuste alcanzados en términos de error cuadrático medio (RMS) son de mejor calidad en comparación con los obtenidos ajustando la fase fuerte de la respuesta producto de la propia segmentación del problema de minimización del error.

Como aspecto complementario, con las curvas de seguimiento de propiedades efectivas es posible observar cómo el nivel de incursión inelástica del sistema impacta simultáneamente en las propiedades de rigidez y amortiguamiento identificados, únicamente a partir de las señales de entrada y salida del sistema dinámico.

Para el caso del sistema bi-lineal sin degradación se presenta una sincronía entre la reducción de rigidez efectiva y aumento del amortiguamiento efectivo, correlacionados en favor del ajuste de la respuesta en aceleración relativa del sistema. Este fenómeno es equivalente a la formulación clásica las propiedades secantes de un sistema histerético bi-lineal.

Sin degradación en el sistema, el seguimiento de propiedades efectivas finaliza con una total recuperación de las propiedades iniciales del sistema. Por otro lado, para sistemas con degradación, cada incursión plástica incurre en las propiedades lineales-equivalentes sin verse restituidas.

- Influencia de la Suavización de la Respuesta Histerética

Analizando los modelos histeréticos bi-lineales con suavización entre ramas de respuesta (Bouc-Wen) se observó que los resultados del Análisis Bayesiano (linealización-equivalente) mejoran considerablemente en calidad de ajuste de respuesta (menor RMS) para mayores niveles de suavización en la respuesta histerética. Por lo observado en este estudio, las no-linealidades abruptas de la respuesta histerética presentan una limitación y fuente de error para las metodologías de identificación en general, mientras que la presencia de suavización tal como se observa normalmente en sistemas dinámicos reales, beneficia la calidad de los resultados. Este aspecto asociado a la identificación de sistemas con suavización fue igualmente observado por Martínez, Boroschek y Bilbao (2015).

- **Espectros de Elongación del Periodo Aparente**

Se ha presentado en el cuerpo de este informe, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos de espectros de elongación del periodo para un total de 375 sistemas histeréticos, y para un conjunto de 290 registros sísmicos (108,750 casos en total). Estos casos presentados son a su vez característicos del total de casos, por lo tanto, las observaciones y conclusiones expresadas se extienden de igual manera.

Para ambas metodologías de identificación descritas (Short Time Fourier Transform y Análisis Bayesiano para la Linealización Equivalente) se han obtenido los espectros de elongación del periodo aparente para todos los eventos sísmicos considerados en el estudio. Estos resultados son analizados, comparados entre sí, y con respecto a las magnitudes de elongación asociadas a las propiedades secantes desarrollados por cada sistema no-lineal.

La tendencia general de los espectros de elongación presenta mayores amplitudes en periodos elásticos bajos (0.1 a 0.5 seg.), y un decaimiento en magnitud hacia sistemas más flexibles. Sin embargo, es común observar espectros que presentan elongaciones mayores en torno a periodos elásticos particulares. Este fenómeno se atribuye a la particularidad y naturaleza de cada registro sísmico en términos de contenido de frecuencia, amplificaciones dinámicas presentes en cada evento sísmico, características del suelo, entre otros aspectos.

- **Espectros de Elongación a partir de Propiedades Secantes**

Los espectros de elongación del periodo aparente asociados a las propiedades secantes son obtenidos de manera analítica, y considerados como un primer elemento de referencia y comparación de resultados debido a su amplio uso en materias del diseño y análisis estructural. Sin embargo, se reconoce que estas propiedades no necesariamente describen un sistema lineal-equivalente en términos de ajuste de la respuesta. Las propiedades secantes se encuentran específicamente definidas a partir de la demanda máxima de desplazamiento del sistema, y no dan cuenta del régimen histerético o modelo constitutivo del sistema no-lineal.

De estos espectros se observan que, para un mismo registro sísmico, se obtienen magnitudes de elongación similares para los tres sistemas histeréticos analizados, y levemente mayores para los sistemas de degradación severa. La similitud entre los espectros da cuenta de la ligera equivalencia en términos de demanda de deformaciones entre sistemas sin degradación y

amplios rangos de amortiguamiento histerético, versus sistemas con alta degradación de rigidez y bajo amortiguamiento histerético. Finalmente, en los resultados se invisibilizan las características propias de degradación de cada sistema analizado.

Los resultados globales de espectros a partir de propiedades secantes indican que, respecto a un modelo sin degradación (bi-lineal) las componentes de degradación histerética amplifican la elongación del periodo aparente principalmente en rangos de periodos elásticos bajos, de 0.1 a 0.7 segundos, con un máximo de un 14% (degradación leve, $R = 4$) y un 40% (degradación severa, $R = 2$). Mientras que, para periodos elásticos mayores, reflejan un aumento máximo del orden de un 5% (degradación leve) y 15% (degradación severa), e independientes del factor de reducción de respuesta elástica.

- Espectros de Elongación del Periodo a partir de Identificación STFT

En el caso del modelo bi-lineal sin degradación se obtienen erráticos y poco representativos resultados de la identificación en espacio-frecuencia, lo cual repercute de igual manera en los espectros de elongación obtenidos. Las magnitudes de elongación resultantes permanecen concentradas en torno a la unidad, y en comparación con los espectros de elongación obtenidos con propiedades secantes, se concluye que los resultados de la identificación utilizando el espectrograma no logran representar la respuesta del sistema histerético o máximas demandas de desplazamiento.

Tomando como referencia los espectros de elongación calculados a partir de las propiedades secantes, el modelo histerético de degradación leve presenta los resultados mayormente representativos en términos de forma de curvas espectrales y orden de magnitudes de la elongación obtenida. Esta ventaja en los resultados se atribuye a las características propias del modelo histerético que concentra su componente de degradación en la magnitud de rigidez tangente, aspecto que logra ser capturado con mayor facilidad por el método de identificación. Por otro lado, el modelo de degradación severa incorpora un importante efecto “pinching” en la respuesta histerética, lo cual genera una fuerte distorsión de los resultados de la identificación producto de los abruptos cambios de rigidez en los ciclos de carga y recarga (de manera similar a lo observado en los resultados de sistemas bi-lineales sin degradación).

Finalmente se puede concluir que, a pesar de las fuertes amplitudes de la demanda y amplias incursiones inelásticas, la identificación en espacio-frecuencia es especialmente sensible

y asertiva en casos de no-linealidades controladas por la degradación de la rigidez tangente del sistema. No así en el caso de sistemas que incorporan en su respuesta cambios abruptos, cuyos resultados de identificación no aportan representación de la respuesta histerética.

En cualquier caso, persiste el problema de que los resultados de la identificación no garantizan representatividad efectiva, o cuantitativa, de los sistemas no-lineales en términos de equivalencia de respuestas en desplazamientos o aceleraciones. Cabe señalar que los espectros de elongación resultantes para estos casos, en particular las amplitudes de elongación, mantienen una dependencia al nivel de suavización aplicado a las curvas de identificación en el tiempo de respuesta (espectrogramas). Esto incide principalmente para el modelo histerético que incorpora un fuerte efecto “pinching” (degradación severa), mientras que para el caso de degradación leve se obtienen curvas espectrales más regulares y estables respecto al nivel de suavización aplicado.

- Espectros de Elongación del Periodo a partir de Linealización Equivalente

A partir de la metodología propuesta de linealización equivalente se construyen espectros de elongación del periodo, cuyas magnitudes son representativas del nivel de incursión inelástica de cada sistema histerético. Para todos los registros y modelos histeréticos analizados se obtienen espectros de elongación cuyas amplitudes siguen una tendencia lógica respecto al nivel de incursiones inelásticas definido por el factor de reducción de la respuesta elástica “R”.

Para el modelo bi-lineal sin degradación se presenta una común inclinación a alcanzar menores magnitudes de elongación para las curvas asociadas a factores “R” bajos. Esto es particularmente imponente para el caso de R igual a 2.0 en que las magnitudes de elongación permanecen muy cercanas a la unidad. Estos resultados se atribuyen esencialmente al predominio de la respuesta elástica durante el segmento definido como fase fuerte. Se observó que, si a lo largo del segmento de identificación la incursión inelástica es puntual, el método de ajuste no lo considera influyente frente a una respuesta lineal predominante en el resto del segmento, y por lo tanto se genera una convergencia o tendencia hacia las propiedades lineales-elásticas. Este aspecto podría mitigarse definiendo segmentos de fase fuerte de menor duración con la idea de concentrar aún más la respuesta no-lineal.

Para el modelo de degradación leve, los espectros de elongación resultantes mantienen una buena aproximación en forma y amplitudes, a los espectros obtenidos con propiedades secantes del sistema. Este aspecto se mantiene constante para todos los registros sísmicos

analizados. Se confirma desde la globalidad de casos la especial sensibilidad que presenta el método de identificación a la degradación de la rigidez tangente presente en el modelo histerético.

Para el modelo de degradación severa, las amplitudes de elongación resultantes son regularmente mayores a las obtenidas con propiedades secantes, y en función del periodo lineal-elástico inicial del sistema. Para sistemas rígidos ($T_{el} \leq 1.0$ seg) los niveles de elongación del periodo aparente son ampliamente mayores a los previstos en base a propiedades secantes. Por otro lado, para los sistemas más flexibles, los resultados del ajuste llevan a magnitudes de elongación de similar magnitud. Se confirma desde la globalidad de casos la influencia de los ciclos de “sliding” (mayormente presentes en sistemas rígidos) en los resultados rigidez lineal-equivalente, y por lo tanto, en la amplitud de la elongación del periodo.

- **Espectros de Elongación Esperada del Periodo Aparente**

Considerando la técnica de linealización-equivalente propuesta como la metodología que alcanza una mejor representación de las respuestas histeréticas analizadas, con los datos procesados se elaboran espectros de elongación esperada del periodo para cada modelo histerético, cuyas amplitudes de elongación resultantes se ajustan a las siguientes expresiones matemáticas en función del periodo inicial-elástico, “ T_{el} ”, y el factor de reducción de la respuesta elástica, “ R ”.

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el})_{BILIN} = (-0.101 \cdot R^2 + 1.384 \cdot R - 0.638) \cdot e^{-45.22 \cdot T_{el} R^{-1.12}} + (0.0052 \cdot R^2 + 0.073 \cdot R + 0.857)$$

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el})_{DEG.LEVE} = (-0.022 \cdot R^2 + 0.264 \cdot R + 1.775) \cdot e^{-7.03 \cdot T_{el} R^{-0.38}} + (-0.0074 \cdot R^2 + 0.241 \cdot R + 0.710)$$

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el})_{DEG.SEVERA} = (-0.162 \cdot R + 6.971) \cdot e^{-12.74 \cdot T_{el} R^{-0.65}} + (-0.0129 \cdot R^2 + 0.363 \cdot R + 0.680)$$

Las curvas de elongación esperada del periodo presentan su magnitud máxima para los sistemas de mayor rigidez ($T_{el} = 0.1$ seg), un decaimiento exponencial hacia estructuras de rigidez media ($T_{el} = 1.0$ seg), y con una tendencia asintótica hacia sistemas flexibles ($T_{el} \geq 1.0$ seg). Este límite resultante para un periodo de 1.0 seg, que separa las tendencias en las curvas de elongación del periodo aparente, fue igualmente observado por Katsanos y Sextos (2015), con tendencias similares en su proyección asintótica. La tendencia constante que presenta la amplitud de elongación para el rango de periodos de 1.0 a 2.5 seg puede ser modelada por las siguientes expresiones matemáticas.

$$T_{in}/T_{el}(R)_{BILIN} \approx 0.77 \cdot R^{0.42} \quad \forall T_{el} \in [1.0, 2.5] \text{ seg}$$

$$T_{in}/T_{el}(R)_{DEG.LEVE} \approx 0.85 \cdot R^{0.45} \quad \forall T_{el} \in [1.0, 2.5] \text{ seg}$$

$$T_{in}/T_{el}(R)_{DEG.SEVERA} \approx 0.95 \cdot R^{0.51} \quad \forall T_{el} \in [1.0, 2.5] \text{ seg}$$

○ Correlación con Propiedades Secantes

Para los modelos histeréticos bi-lineal sin degradación y multi-lineal de degradación leve se obtienen amplitudes de elongación del periodo menores que las obtenidas a partir de las máximas demandas de deformaciones (propiedades secantes). Caso contrario se presenta para el modelo multi-lineal de degradación severa, en que la elongación del periodo resulta en todos los casos mayor a la obtenida a partir de propiedades secantes.

Para el modelo bi-lineal sin degradación se obtiene que una elongación del periodo “representativa” puede oscilar entre un **60-100%** de la elongación asociada a las propiedades secantes, en función del factor “R” considerado en el sistema. Estas diferencias se encuentran asociadas en la misma proporción (e inversamente) a las magnitudes de rigidez lineal-equivalente y la rigidez secante obtenida de la respuesta histerética. Así, la rigidez efectiva de la respuesta histerética tiende a ser mayor a la rigidez secante asociada a las máximas deformaciones. Para un análisis pseudo-estático, el uso de propiedades secantes podría eventualmente subestimar el nivel de esfuerzos alcanzados por el sistema, y sobrestimar la demanda de desplazamientos del mismo.

De manera similar al caso anterior, para el caso del modelo de degradación leve se observa que las diferencias en las magnitudes de elongación oscilan entre un **90-105%**, para casi todo el espectro de periodos elásticos, y con leves diferencias en función del factor R del sistema. Esta cercanía entre los resultados del ajuste lineal y propiedades secantes se observó anteriormente, y se asocia a la naturaleza del modelo degradante, que incorpora en su ley constitutiva principalmente componentes de degradación de rigideces, aspecto especialmente sensible en la respuesta en aceleraciones relativas del sistema sobre las cuales se está desarrollando la linealización equivalente.

Para el caso del modelo de degradación severa se aprecia el fenómeno contrario. La elongación determinada mediante la linealización equivalente resulta ser hasta un **140%** respecto a la obtenida en base a las propiedades secantes para sistemas de periodo elástico mayor a 0.5 seg, y hasta un **190%** mayor para sistemas de mayor rigidez. Se observa igualmente una fuerte dependencia del factor R considerado en el sistema. Las tendencias de estos resultados se asocian

a las características del modelo sobre el cual se realiza en el análisis. Como se ha descrito anteriormente, este sistema de degradación severa ha sido definido incorporando una fuerte componente de “pinching”, que lleva al sistema a responder reiterativamente por ramas histeréticas de rigidez muy cercana a cero (“sliding”). Estos ciclos de respuesta que reducen al mínimo la energía histerética del sistema influyen en los resultados de linealización equivalente, favoreciendo el mejor ajuste hacia rigideces efectivas de menor magnitud, incluso menores a las rigideces secantes asociadas al desplazamiento máximo del sistema.

- Influencia del Tipo de Suelo

Dada la diversidad de la base de datos de eventos sísmicos, se analiza la influencia del tipo de suelo en los resultados de elongación del periodo para los modelos histeréticos estudiados. De este análisis se observa que, efectivamente, se mantienen diferencias de magnitud de elongación entre casos de degradación leve/severa, sin embargo, no se observan diferencias considerables en los resultados influenciadas por la clasificación del suelo. Este aspecto fue igualmente observado por los autores Katsanos y Sextos (2015).

Se estima que la independencia generalizada de los resultados frente las características de los eventos sísmicos (tipo de suelo, distancia al foco, etc.) radica en el hecho de que los niveles de incursión inelástica de los sistemas histeréticos analizados, tal como se plantea originalmente la metodología, se encuentran normalizados respecto a la respuesta elástica máxima producto de los mismos eventos sísmicos (uso de factores “R”). Esto invisibiliza las características propias del evento sísmico frente a otro evento y se pierde la definición del sistema histerético para cada excitación analizada.

Se presume que para evaluar la influencia de las características de cada evento sísmico sería necesario normalizar la definición de los sistemas histeréticos de manera independiente a la excitación sísmica. Una forma de abordar este problema podría ser estableciendo niveles de fuerza de fluencia como una escala de razones de masa (F_y/M), de tal manera que estos esfuerzos límites sean constantes para el set de eventos sísmicos.

- Correlación con Demanda Máxima de Ductilidad

El enfoque utilizado para la linealización equivalente tiene por objetivo ajustar un segmento de la respuesta en aceleraciones relativas de un sistema lineal a la respuesta del sistema histerético de interés. Este enfoque dista en cierto grado del enfoque del diseño, contexto en el

cual se tiene especial interés en las demandas máximas del sistema en deformaciones o aceleraciones. Sin embargo, el parámetro de elongación del periodo como indicador de degradación en el sistema, presenta igualmente una correlación con los niveles de demanda de ductilidad alcanzada por los sistemas histeréticos, presentando tendencias consistentes incluso para distintos eventos sísmicos.

A partir de los datos procesados para todos los sistemas histeréticos analizados (T_{el} , R) y todos los eventos sísmicos de la base de datos, se estima que los máximos niveles de ductilidad presentes en los sistemas de degradación se ajustan a las siguientes expresiones matemáticas en función de la elongación del periodo.

$$\mu_{DEG.LEVE} \approx e^{0.2692\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 2.0171\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 5.9178\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 4.0632}$$

$$\mu_{DEG.SEVERA} \approx e^{-0.0025\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^4 + 0.0574\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 0.4975\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 2.4411\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 1.8475}$$

La correlación de datos obtenida para el modelo de degradación leve presenta una mayor estabilidad en comparación con los resultados del modelo de degradación severa. Esta estabilidad en los resultados del modelo de degradación leve ha sido permanente desde los resultados de identificación y espectros de elongación obtenidos. Por otro lado, para el modelo de degradación severa se percibe una mayor dispersión de los resultados, con una gran cantidad de casos fuera de la tendencia general de correlación. En general se ha observado que las abruptas no-linealidades en la respuesta histerética generadas por el efecto pinching, así como la falta de una suavización entre las ramas de respuesta, son aspectos que perjudican la calidad de los resultados de los métodos de identificación orientados a la linealización del sistema.

- Espectros de Elongación en Contexto Nacional

Se ha replicado la metodología para la construcción de un espectro de elongación esperada del periodo, en base a los mismos sistemas degradantes estudiados, para un grupo reducido de eventos sísmicos enmarcados dentro de un nivel de demanda sísmica específico y definido por la normativa de diseño sísmico nacional (NCh433). Se selecciona un grupo de 12 eventos sísmicos registrados en zona de sismicidad 3 y un suelo tipo B, según las clasificaciones normativas. Para este caso, las amplitudes de elongación resultantes se ajustan a las siguientes expresiones matemáticas en función del periodo inicial-elástico, " T_{el} ", y el factor de reducción de la respuesta elástica, " R ".

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el})_{DEG.LEVE} = (-0.11 \cdot R^2 + 1.53 \cdot R - 1.67) \cdot e^{-13.26 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.18}} + (-0.006 \cdot R^2 + 0.230 \cdot R + 0.676)$$

$$T_{in}/T_{el}(R, T_{el})_{DEG.SEVERA} = (-0.65 \cdot R + 13.1) \cdot e^{-20.3 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.63}} + (-0.021 \cdot R^2 + 0.544 \cdot R + 0.404)$$

Respecto al set original de 290 eventos sísmicos, se observó que la forma y tendencia general de estas curvas espectrales se mantiene similar, con una característica diferencia de amplitudes de elongación del periodo, las cuales se mantuvieron inferiores en magnitud. Esta diferencia en amplitudes estaría asociada a las características particulares de la demanda sísmica, y se estima que principalmente sería respecto a la duración que alcanzan los registros sísmicos.

Dada la extensa duración de los eventos sísmicos nacionales, se define para cada evento sísmico una “fase fuerte” de mayor duración a los analizados anteriormente. Es probable que, con un segmento de respuesta de mayor duración, la fase lineal-elástica de respuesta tenga una presencia dominante frente a los segmentos de incursión histerética. Este aspecto influiría directamente en la identificación orientada a la linealización-equivalente, considerando las propiedades de la fase lineal-elástica de gran influencia para la identificación de propiedades óptimas para el ajuste de respuestas medida-modelada; y finalmente subestimando las demandas de desplazamiento máximo y la elongación del periodo. Este fenómeno se observó igualmente en este estudio, para el caso de sistemas cuyas incursiones inelásticas se desarrollaban de manera muy focalizadas respecto a la totalidad del segmento de fase fuerte (sobre todo en sistemas definidos con $R = 2$).

- **Recomendaciones y Futura Investigación**

Se estima que el desarrollo y uso de espectros de elongación del periodo propuestos por Katsanos y Sextos cuentan con un gran potencial en el campo del diseño, análisis y control de sistemas dinámicos. En esta línea de estudio, y para extender su aplicación general y en el contexto nacional, se proponen las siguientes mejoras según lo observado en la presente investigación.

- ✓ Es necesario definir modelos histeréticos degradantes que representen el comportamiento global de sistemas estructurales convencionales, utilizados en el contexto nacional, y en función del detallamiento y capacidades de ductilidad asignadas a los componentes estructurales. Se destaca la estructuración en base a muros ordinarios y muros especiales. Magnitudes de elongación del periodo en estos casos pueden aportar para el diseño de

tipo espectral (aceleración y/o desplazamiento), así como para un análisis simplificado de respuesta en el tiempo.

- ✓ Se recomienda considerar componentes de suavización en la respuesta de modelos histeréticos. Este aspecto, que se encuentra presente en la respuesta de sistemas dinámicos reales, favorece la calidad y estabilidad de la identificación, y en la estimación de la elongación del periodo aparente.
- ✓ Es necesaria la implementación de un método de identificación cuyos resultados sean cuantitativamente representativos de la respuesta del sistema no-lineal. Se propone el uso de la metodología utilizada en este estudio, basada en el Análisis Bayesiano para el ajuste de modelos lineales a la respuesta en aceleraciones relativas.
- ✓ Se estima que la forma de normalización de los sistemas histeréticos propuesta por Katsanos y Sextos, en base a factores de reducción de la respuesta elástica (“R” = 2, 3, 4...) invisibiliza las componentes y características propias que impone una excitación sísmica frente a otra. Para comparar niveles de elongación del periodo aparente entre eventos sísmicos de distintas características, se propone construir curvas de elongación del periodo, calibrando los sistemas no-lineales a partir de distintos niveles de esfuerzo de fluencia en razón de la masa del sistema (“Fy/M” = 0.1, 0.2, 0.5...). Se estima que de esta forma se apreciarán efectivamente la influencia de las variables que definen la demanda sísmica.
- ✓ Sin perjuicio de la recomendación anterior, se estima que la normalización de los sistemas histeréticos en base a factores de reducción de la respuesta elástica (“R”), sí mantiene un enfoque de diseño sísmico, y las magnitudes de elongación obtenidas con este enfoque serán tan válidos cuanto más se ajuste el conjunto de eventos sísmicos a ciertas características particulares de la demanda. Se recomienda, bajo este enfoque, analizar la construcción de espectros de elongación del periodo a partir de un conjunto de eventos sísmicos que engloben un único nivel de peligro sísmico y mecanismo de falla sísmica, tal como establecería una normativa de diseño sísmico. De esta manera se diferencian curvas de elongación por cada zona de sismicidad.
- ✓ La metodología de identificación utilizada, orientada a la linealización equivalente, demostró un gran potencial gracias a su efectividad y flexibilidad en la implementación. Se considera interesante explorar su aplicación y análisis de resultados, a partir del ajuste de respuestas en velocidades o deformaciones relativas y explorar la correlación de demandas de ductilidad frente a los resultados de identificación por ventanas móviles.

Bibliografía

- [1] F. E. Udwadia and M. D. Trifunac, “Time and Amplitude Dependent Response of Structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 2, 359-378 (1974).
- [2] E. I. Katsanos and A. G. Sextos, “Inelastic Spectra to Predict Period Elongation of Structures Under Earthquake Loading”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015; 44:1765–1782.
- [3] L. Lin, N. Naumoski, S. Foo and M. Saatcioglu, “Elongation of The Fundamental Periods of Reinforced Concrete Frame Buildings During Nonlinear Seismic Response”, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China
- [4] Z. Zembaty, M. Kowalski, S. Pospisil, “Dynamic identification of a reinforced concrete frame in progressive states of damage”, *Engineering Structures* 28 (2006) 668–681.
- [5] J. Martínez, R. Boroschek, J. Bilbao, “System Identification procedures for nonlinear response of Buckling Restraint Braces”, *SHMII Torino 2015*.
- [6] R. Crawford and H. S. Ward, “Determination of The Natural Periods of Buildings”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 54, No 6, pp. 1743-1756 (1964).
- [7] M. D. Trifunac, “Comparison between ambient and forced vibration experiments”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 1, 133-150 (1972).
- [8] P. C. Jennings, R. B. Matthiesen, J. B. Hoernes, “Forced Vibration of a 22 - Story Steel Frame Building”, *California Institute Of Technology Earthquake Engineering Research Laboratory And University Of California At Los Angeles Earthquake Engineering And Structures Laboratory*, EERL 71-01 (1971).
- [9] J. H. Wood, “Analysis of the Earthquake Response of a Nine - Story Steel Frame Building during the San Fernando Earthquake”, *California Institute of Technology*, EERL 72-04 (1972).
- [10] A. S. Elnashai and L. Di Sarno, “Fundamentals of Earthquake Engineering”, Wiley (2008).
- [11] M. Aghagholizadeh, and A. Massumi, “Relation between Dynamic Characteristics and Damage Index of RC-MRFs Using Non-Linear Incremental Dynamic Analyses”, 15 WCEE (2012).
- [12] X. Y. Ou, Z. He and J. P. Ou, “Seismic Collapse Margin of Structures Using Modified Mode-based Global Damage Model”, 15 WCEE (2012).
- [13] K. Kadas, A. Yakut and I. Kazaz, “Spectral Ground Motion Intensity Based on Capacity and Period Elongation”, *Journal of Structural Engineering*, DOI: 10.1061 (ASCE)ST.1943-541X.0000084 (2011).

- [14] M. D. Trifunac, S. S. Ivanovic and M. I. Todorovska, “Apparent Periods of A Building. II: Time-Frequency Analysis”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 5, (2001).
- [15] M. D. Trifunac, S. S. Ivanovic and M. I. Todorovska, “Apparent Periods of A Building. II: Fourier Analysis”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 5, (2001).
- [16] R. Bouc, “The Power Spectral Density of Response for a Strongly Non-Linear Random Oscillator”, *Journal of Sound and Vibration* (1994) 175(3), 317-331.
- [17] M. Mucciarelli, A. Masi, M. R. Gallipoli, P. Harabaglia, M. Vona, F. Ponzio, and M. Dolce, “Analysis of RC Building Dynamic Response and Soil-Building Resonance Based on Data Recorded during a Damaging Earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, pp. 1943–1953, (2004).
- [18] A. G. Sextos and A. S. Elnashai, “Prediction of Inelastic Response Periods of Buildings Based on Intensity Measures and Analytical Model Parameters”, *Engineering Structures*, DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.04.007, (2014).
- [19] A. Massumi and E. Moshtagh, “A new damage index for RC buildings based on variations of nonlinear fundamental period”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 22, 50-61 (2013).
- [20] E. Moshtagh and A. Massumi, “Seismic assessment of RC buildings by estimation of effective parameters on seismic behaviour using non-destructive tests”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 20, 816-831 (2011).
- [21] G. M. Calvi, R. Pinho and H. Crowley, “State-Of-The-Knowledge on The Period Elongation of RC Buildings During Strong Ground Shaking”, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, Paper Number: 1535 (2006).
- [22] H. Crowley and R. Pinho, “Period-Height Relationship for Existing European Reinforced Concrete Buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, Special Issue 1 (2004) 93–119.
- [23] J.-M. Ndambi, J. Vantomme, K. Harri, “Damage Assessment in Reinforced Concrete Beams Using Eigenfrequencies and Mode Shape Derivatives”, *Engineering Structures* 24 (2002) 501–515.
- [24] K. Trevelopoulos and P. Guéguen, “Period Elongation-Based Framework For Operative Assessment Of The Variation Of Seismic Vulnerability Of Reinforced Concrete Buildings During Aftershock Sequences”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 84 (2016) 224–237.
- [25] R. P. Carreño and R. L. Boroschek, “Modal Parameter Variations Due to Earthquakes of Different Intensities”, *Civil Engineering Topics*, Volume 4, 321-333 (2011).
- [26] C. Michel and P. Guéguen, “Time-Frequency Analysis of Small Frequency Variations in Civil Engineering Structures Under Weak and Strong Motions Using a Reassignment Method” (2010).
- [27] W. D. Iwan and A. O. Cifuentes, “A Model for System Identification of Degrading Structures”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 14, 877-890 (1986).
- [28] F. Dunand, P. Guéguen, P. Bard, Rodgers and M. Celebi, “Comparison of the Dynamic Parameters Extracted from Weak, Moderate and Strong Motion Recorded in Buildings”, *First*

European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Paper Number: 1021 (2006).

[29] T. K. Caughey, "Equivalent Linearization Techniques", The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 35, N°11 (1963).

[30] W. D. Iwan and I. Yang, "Application of Statistical Linearization Techniques to Nonlinear Multidegree-of-Freedom Systems", Journal of Applied Mechanics (1972).

[31] J. L. Beck, "Determining Models of Structures from Earthquake Records", California Institute of Technology, EERL 78-01 (1978).

[32] W. D. Iwan and N. C. Gates, "The Effective Period and Damping of a Class of Hysteretic Structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 7, 199-211 (1979).

[33] G. H. McVerry, "Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 8, 161-180 (1980).

[34] T. Liu, "Equivalent Linearization Analysis Method for Base-Isolated Buildings", University of Trento, Department of Civil (2014).

[35] A. Hashemi and K. M. Mosalam, "Shake-Table Experiment on One-Story RC Structure With and Without Masonry Infill", Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences book Series, Vol. 66, pp 411-426 (2006).

[36] A. M. Mwafy and A. S. Elnashai, "Static Pushover versus Dynamic Collapse Analysis of RC Buildings", Engineering Structures 23 (2001) 407-424.

[37] Beck, James L., and Alexandros Taflanidis. "Prior and posterior robust stochastic predictions for dynamical systems using probability logic." International Journal for Uncertainty Quantification 3.4 (2013)