



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DEL COSTO EN LA VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE MARCOS DE
ACERO CON SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN VISCOSA UBICADAS EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PABLO ESTEBAN CAÑETE GARAY

PROFESOR GUÍA:
RAFAEL OMAR RUIZ GARCÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN RODOLFO ROJAS BARRALES
EDUARDO NÚÑEZ CASTELLANOS

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: PABLO ESTEBAN CAÑETE GARAY
FECHA: ABRIL 2019
PROF. GUÍA: RAFAEL OMAR RUIZ GARCÍA

ESTUDIO DEL COSTO EN LA VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE MARCOS DE ACERO CON SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN VISCOSA UBICADAS EN CHILE

En esta memoria se estudia el diseño de amortiguadores viscosos para estructuras de marcos de acero mediante criterios de vida útil. Además, se quiere probar la efectividad en la región de Chile de este tipo de amortiguadores dentro de un esquema de decisión multiobjetivo utilizando criterios de rendimiento de la vida útil. Para ello, se elabora un modelo simplificado de un edificio que cumpla con las características de diseño planteadas y se explican los alcances ocupados para el diseño óptimo de los amortiguadores.

Un esquema probabilístico se establece para desarrollar la optimización de diseño considerando criterios de riesgo sísmico específicos a la región de Chile. Se considera que la cuantificación de este riesgo sea mediante un análisis de tiempo historia y la vulnerabilidad sísmica es descrita a través de un modelo estocástico de registro sísmico que es calibrado para ofrecer una compatibilidad de la vulnerabilidad con las ecuaciones de predicción de registro sísmico disponibles para Chile. Se utilizan dos distintos criterios relacionados con el rendimiento de la vida útil de la estructura. El primero, que representa todos los beneficios directos, es el costo de la vida útil del sistema y está compuesto por el costo inicial de los amortiguadores viscosos y las pérdidas a lo largo de la vida útil de la estructura. El segundo criterio, se enfoca en el rendimiento del contenido del edificio, es la aceleración umbral con probabilidad específica de sobrepasarse durante la vida útil de la estructura.

Finalmente, se establece una optimización multiobjetivo y una simulación estocástica se utiliza para estimar todas las métricas de riesgo requeridas, donde se desarrolla un modelo Kriging para apoyar un proceso de optimización eficiente.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación y Generalidades	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos Generales	4
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Estructuración del Trabajo de Título	5
2. Metodología de Evaluación de Desempeño Sísmico	6
3. Estimación de Costos de Reparación de Estructuras con Amortiguadores	10
3.1. Costo de Vida Útil	12
3.2. Rechazo al Riesgo Sísmico	14
4. Optimización de Amortiguadores Viscosos Basado en la Actitud ante el Riesgo	17
4.1. Formulación de Problema	17
4.2. Enfoque Computacional para la Optimización de Diseño	18
4.3. Algoritmo de Implementación	20
5. Casos de Estudio	24
5.1. Estructuras Utilizadas en el Estudio	24
5.2. Amenaza Sísmica y Registros Sintéticos	28
5.3. Curvas de Fragilidad Utilizadas	32
5.4. Lineamientos generales para la selección de amortiguadores	35
5.5. Datos Computacionales	35

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
7. CONCLUSIONES	59
Bibliografía	61

Índice de Tablas

5.1. Cargas tributarias	25
5.2. Secciones de vigas y columnas de edificios de cuatro pisos	26
5.3. Secciones de vigas y columnas de edificios de ocho pisos	27
5.4. Tipos de estructuras	28
5.5. Propiedades modales de estructuras	29
5.6. Parámetros de curvas de fragilidad	33

Índice de Ilustraciones

1.1. Amortiguador viscoso	2
2.1. Esquema de cuantificación de riesgo sísmico	6
3.1. Costo de Reparación y Costo de Vida Útil	11
4.1. Esquema de algoritmo de implementación	23
5.1. Vista en elevación de estructuras de marcos de acero de cuatro y ocho pisos .	25
5.2. Vista en planta de estructuras de marcos de acero de cuatro y ocho pisos . .	26
5.3. Modelo parsimónico (Villanueva 2017)	28
5.4. Histograma de magnitud	30
5.5. Histograma de distancia de ruptura	30
5.6. Histograma de aceleraciones máximas	31
5.7. Ejemplo de espectro de sismo	31
5.8. Estados de daño de componentes estructurales	32
5.9. Estado de daño de contenido	34
5.10. Estados de daño de tabiquería	34
5.11. Estados de daño de cielo falso	35
6.1. Valores óptimos del frente Pareto para el costo de vida útil y umbral de costo de reparación para el modelo para suelo tipo A (roca) de cuatro pisos. Como referencia se tiene que el costo de vida útil para el mismo edificio pero sin amortiguadores viscosos es de \$ 1.400.000	38
6.2. Desglose de frente Pareto de costo de vida útil en costos de reparación y costo de amortiguador para edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca)	39

6.3. Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca)	40
6.4. Valores óptimos de costo de vida útil de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos precios base A_D	41
6.5. Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos factores de escalamiento β_D	42
6.6. Valores óptimos de costo de vida útil de los amortiguadores de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D	43
6.7. Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D	44
6.8. Curvas Pareto de edificios de cuatro pisos	45
6.9. Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo B	46
6.10. Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo C	47
6.11. Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo D	48
6.12. Valores óptimos del frente Pareto para costo de vida útil y umbral de costo de reparación para el modelo para suelo tipo A (roca) de ocho pisos. Como referencia se tiene que el costo de vida útil es \$ 3.060.000	50
6.13. Desglose de frente Pareto de costo de vida útil en costos de reparación y costo de amortiguador para edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca)	51
6.14. Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos precios base A_D	52
6.15. Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos factores de escalamiento β_D	53

6.16. Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D (primeros 4 pisos)	54
6.17. Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D (últimos 4 pisos)	55
6.18. Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D (primeros 4 pisos)	56
6.19. Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D (últimos 4 pisos)	57
6.20. Curvas Pareto de edificios de ocho pisos	58

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Generalidades

Actualmente, tanto en Chile como en el resto del mundo, se está experimentando un cambio de paradigma hacia construcciones más sustentables y con mayor conciencia sobre el impacto negativo de los materiales de construcción sobre el medio ambiente y la sociedad [1]. En la práctica, el desafío es lograr no sólo que un edificio tenga menores costos de construcción sino también, una vez que sean habitados, que el gasto energético y económico de mantenerlos sea el mínimo durante toda su vida útil [2]. Pero mas importante aún, es lograr que, ante sismos de gran magnitud, no se incurra en grandes gastos para reparar los daños ocasionados. Al analizar la experiencia internacional, en la búsqueda de buenas prácticas e innovaciones, se puede observar el protagonismo que tiene el acero en este cambio al paradigma sustentable. El acero es de los pocos materiales, utilizado en las construcciones a nivel mundial, que puede ser reutilizado varias veces sin perder su calidad [3]. Además, al reciclar el acero se disminuyen a más de la mitad los costos energéticos y económicos de producirlos a partir de las materias primas. En los países desarrollados ya se ha tomado conciencia de las características sustentables del acero estructural para utilizarlo en todo tipo de construcciones, como por ejemplo puentes y edificios residenciales [4]. Sin embargo, cuando se observa la realidad chilena se puede apreciar que el acero estructural no es la primera opción en la construcción de edificios residenciales y de oficinas, los cuales se construyen utilizando principalmente el

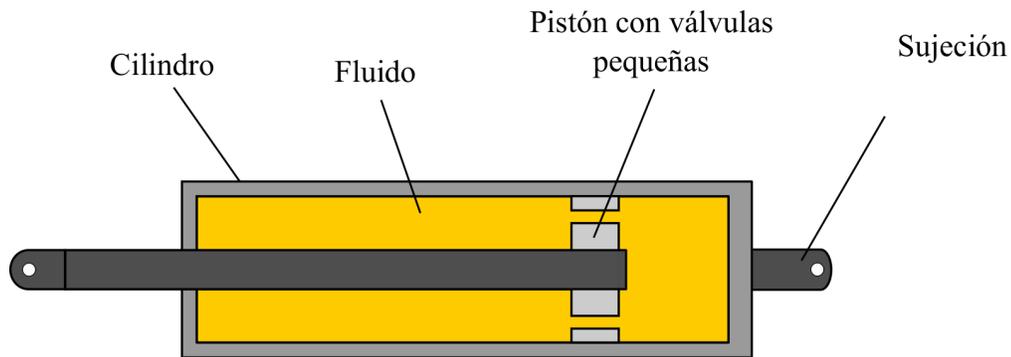


Figura 1.1: Amortiguador viscoso

hormigón armado [5].

Una de las razones por las cuales la construcción de estructuras basadas en marcos de acero no es atractiva, es que ante un terremoto, los desplazamientos laterales entre pisos tienden a sobrepasar los límites fijados por la norma de diseño. Para superar esta deficiencia, está la opción de arriostrarlos, pero esta solución puede implicar un aumento excesivo de los costos haciendo poco atractiva su implementación. Una alternativa, que se analiza en esta memoria, consiste en agregar amortiguadores viscosos a cada uno de los pisos de la estructura para reducir las derivas ante sismos de gran envergadura y así disminuir las pérdidas ocasionadas por daños.

El amortiguador viscoso es un elemento de disipación pasiva de energía ampliamente utilizado en la construcción para disminuir el nivel de vibración y aumentar la protección estructural ante terremotos, especialmente en el contexto de renovación para la protección de estructuras ya existentes [6] [7] [8]. La configuración típica de este elemento mostrada en la figura 1.1 consiste en un cilindro con un pistón en su interior que es relleno con un tipo de aceite. La acción de amortiguamiento es proporcionada por el flujo del fluido que pasa a través de varias válvulas pequeñas de un lado del pistón al otro, lo que genera la disipación de la energía [9]. La disipación de energía otorgada por este tipo de amortiguadores reduce de manera significativa la demanda sísmica, que repercute en menores pérdidas sísmicas y costos de reparación. A pesar que existe una gran variedad de fabricantes, Taylor Devices [10] y Well Link [11] han tenido una gran aceptación e incursión en aplicaciones estructurales, principalmente orientados a edificaciones y puentes.

El costo inicial de instalar este sistema de amortiguamiento aumenta con el tamaño de los equipos y con la cantidad de energía que son capaces de disipar. Por lo tanto, mientras mayor sea la capacidad de disipación de energía, las pérdidas por sismos serán menores, pero al mismo tiempo, el costo inicial de los amortiguadores será mayor [6]. En ese sentido, un adecuado diseño de amortiguadores deberá contemplar estos dos objetivos en competencia: el costo inicial del dispositivo y las pérdidas por sismos.

Existen varios procedimientos para realizar el diseño de amortiguadores viscosos considerando estos criterios [12],[13],[14]. Los cuales adoptan distintos enfoques para modelar la amenaza sísmica, analizar el desempeño estructural y para tomar en cuenta las características no lineales de los amortiguadores y de las estructuras equipadas[6]. Por su parte, las metodologías simplificadas diseñan amortiguadores para lograr una relación de amortiguamiento objetivo específica para la estructura, utilizando una linealización equivalente para abordar las propiedades del amortiguador no lineal [15],[16]. Otros enfoques más integrales toman explícitamente en cuenta la no linealidad de los amortiguadores a través de un análisis dinámico no lineal y formulan el problema de diseño como una optimización de alguna variable de desempeño relacionados con la respuesta de los amortiguadores y de la estructura [7]. Adicionalmente, se ha considerado modelos estacionarios, que utilizan tanto medidas estadísticas de la respuesta estructural como de su confiabilidad para describir el desempeño estructural, incorporando las características no lineales a través de linealizaciones estadísticas [17],[8]. En muchos de estos enfoques el costo inicial de los amortiguadores es incorporado indirectamente en el análisis mediante una restricción de la capacidad total de amortiguamiento. Además, las incertidumbres en el comportamiento de la estructura o en la descripción de la amenaza sísmica suelen ser ignorados o aproximados con una cantidad poco representativa de registros sísmicos y de configuraciones estructurales [6].

En ese sentido un esquema de diseño para los amortiguadores viscosos debería considerar distintos estándares de desempeño y todas la incertidumbres posibles en la vida útil de la estructura para realmente evaluar sus beneficios. Esto se puede lograr al adoptar un análisis de costo de vida útil que de manera explícita considera en la toma de decisiones el costo inicial y las pérdidas esperadas por futuros terremotos [18]. Además, es necesario para este análisis optar por un esquema probabilístico para tomar en cuenta las incertidumbres en la

descripción de la amenaza y en el comportamiento de la estructura elegida [6].

Bajo esa metodología probabilística se pueden utilizar diferentes criterios para el diseño de los amortiguadores en un edificio. El principal corresponde al costo de vida útil (definido acá como el valor esperado del costo de reparación más el costo inicial de los amortiguadores) que incorpora una actitud de riesgo neutral. Adicionalmente, para mejorar la capacidad de decisión se consideran dos criterios que representan características de respuesta con una probabilidad de excedencia específica en la vida útil de la estructura. La primera corresponde al umbral de costo de reparación asociado a una probabilidad de excedencia específica que incorpora una actitud de rechazo al riesgo y que permite considerar el impacto de sismos poco probables pero altamente catastróficos en el proceso de diseño. Mientras que la otra corresponde al umbral de fuerza del amortiguador que es una restricción para el tamaño del amortiguador y para la transferencia de fuerza entre el amortiguador y la estructura [19].

Esto finalmente conlleva a una optimización multiobjetivo con tres objetivos diferentes que permite obtener un rango de soluciones óptimas para que el mandante escoja la configuración de amortiguadores que mejor se ajuste con sus intereses económicos.

El objetivo del siguiente trabajo es utilizar este esquema probabilístico para analizar edificios de marcos de acero diseñados para Chile y su desempeño al introducir amortiguadores viscosos que permita encontrar a futuro soluciones constructivas más eficientes y sustentables que las utilizadas actualmente. Es importante destacar que una de las limitaciones de esta memoria es que los registros sísmicos corresponden a los de suelo tipo roca. Por lo tanto, es necesario que futuros análisis consideren registros sísmicos de otros tipos de suelo presentes en la región de Chile.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Estudiar el diseño de amortiguadores viscosos para estructuras de marcos de acero mediante criterios de vida útil y probar la efectividad en la región de Chile de este tipo de

amortiguadores dentro de un esquema de decisión multiobjetivo utilizando criterios de rendimiento de la vida útil.

1.2.2. Objetivos Específicos

Seleccionar e implementar un marco metodológico que permita estudiar el desempeño sísmico de estructuras de acero en Chile.

Seleccionar estructuras de interés para estudiar el desempeño sísmico y económico ante amenazas sísmicas consistentes con la realidad chilena.

Realizar un estudio de optimización multiobjetivo que considere como criterios los costos de vida útil de la estructura y una actitud de rechazo al riesgo.

1.3. Estructuración del Trabajo de Título

El capítulo 2 se inicia explicando el esquema de evaluación de pérdidas por sismos utilizado en este estudio, los distintos modelos y parámetros que lo componen. En el capítulo 3 se presentan las distintas métricas de costo utilizadas para definir el riesgo sísmico. En el capítulo 4 se explica el problema de optimización para el diseño de amortiguadores viscosos basado en la actitud ante el riesgo. También, se muestra el enfoque computacional para la optimización del diseño, ofreciendo detalles de los métodos computacionales empleados para realizar la optimización multiobjetivo bajo incertidumbres. El capítulo 5 presenta las características principales y propiedades modales de los edificios de marcos de acero seleccionados para el estudio. Además, se dan a conocer los valores de las características sísmicas que se utilizan en el modelo de registros sísmicos. Posteriormente, se muestran los parámetros que definen las curvas de fragilidad que permiten obtener las pérdidas por sismos para cada evento sísmico. El capítulo 6 presenta los resultados obtenidos y se realiza un análisis de los mismos. Finalmente, en el capítulo 7 se plantean las conclusiones del análisis realizado.

Capítulo 2

Metodología de Evaluación de Desempeño Sísmico

En el presente capítulo se presenta la metodología empleada para evaluar el desempeño sísmico de estructuras. La cuantificación de riesgo sísmico sigue el esquema indicado en [19] y se obtiene a través de la implementación concatenada de diferentes modelos asociados a: (1) modelo de registros sísmicos, (2) modelo estructural y (3) modelo de evaluación de pérdidas por sismos. Un esquema general de la metodología es presentado en la figura 2.1. Este esquema parte con un modelo de registros sintéticos los cuales son generados a través de una metodología que realiza un filtrado de secuencias de ruido blanco capaz de obtener

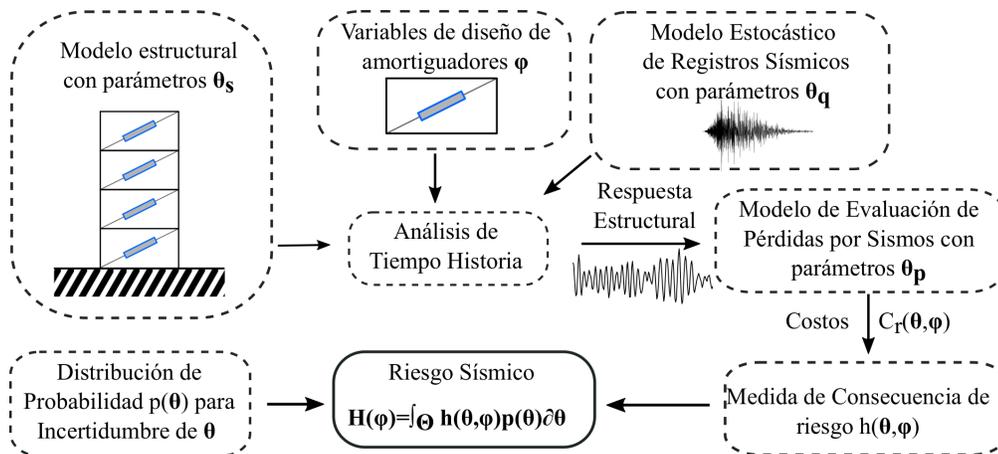


Figura 2.1: Esquema de cuantificación de riesgo sísmico

registros compatibles con la amenaza sísmica de una localidad específica. Luego, los registros sintéticos se introducen a un modelo estructural definido que contempla amortiguadores viscosos con características preestablecidas para hacer un análisis de tiempo historia. La respuesta estructural, obtenida del análisis de tiempo historia de cada registro sintético, se evalúa por medio de un modelo de ensambles de curvas de fragilidad (identificado como modelo de evaluación de pérdidas por sismos en la figura 2.1) que permiten estimar el estado de daño debido a la ocurrencia de ese sismo para cada ensamble y asociar ese estado de daño a un costo específico de reparación. Los ensambles corresponden tanto a elementos estructurales (pilares y vigas) como a elementos no estructurales (tabiquería, cielo falso y contenido). Posteriormente, utilizando los costos de reparación de cada ensamble se puede estimar una medida de consecuencia de riesgo al propagar las incertidumbres de las variables involucradas (por ejemplo, periodo y amortiguamiento de la estructura, variables asociadas a la sismicidad y parámetros asociados curvas de fragilidad) para obtener a partir de la integral probabilística de la ecuación 2.2 el riesgo sísmico asociado. Para facilitar el entendimiento del procedimiento empleado, el resto de este capítulo se centra en la descripción de los modelos involucrados en la figura 2.1.

La amenaza sísmica en el esquema mostrado en la figura 2.1 se describe como aceleraciones de tiempo historia mediante un modelo estocástico de registros sísmicos. Este modelo explicado en [20] está definido por los parámetros sismológicos $\theta_q = [M, r]$ donde M es la magnitud de momento y r es la distancia de ruptura. Con estos parámetros y a través de ecuaciones predictivas previamente calibradas se obtienen las características sísmicas (intensidad Arias y duración del registro sintético). Estas ecuaciones predictivas se obtienen de las características de sitio de la amenaza sísmica y registros históricos de la región de Chile. Luego, se modula una secuencia estocástica (ruido blanco) a través de funciones que modifican las características de frecuencia y de dominio de tiempo para obtener un registro sintético acordes con los parámetros sismológicos θ_q antes mencionados. La ocurrencia de eventos sísmicos se asume que tiene una distribución de Poisson y es independiente de eventos sísmicos anteriores. El detalle de la calibración de este modelo de registro sísmicos acorde a la amenaza sísmica chilena escapa de los objetivos de este trabajo sin embargo los detalles de la implementación se pueden encontrar en [21] [19] [20].

Los amortiguadores viscosos presentan relaciones de fuerza velocidad que típicamente son no lineales. Por lo cual, la fuerza de un amortiguador puede ser representada como una función de la velocidad relativa x_D entre los extremos del amortiguador por medio de la ecuación 2.1.

$$F_D = c_D \text{sgn}(\dot{x}_D) |\dot{x}_D|^{\alpha_D} \quad (2.1)$$

donde c_D es el coeficiente de amortiguamiento y α_D es el exponente de velocidad y son parte de las variables de diseño del amortiguador φ . Estas variables de diseño pueden ser definidas por $\varphi \in \Phi \subset \mathfrak{R}^{n_x}$ que es el vector de parámetros controlables de los amortiguadores viscosos, donde Φ es el espacio de diseño aceptado mientras que \mathfrak{R}^{n_x} representa la dimensión de las variables de diseño, en este caso dos variables por amortiguador.

Siguiendo con el esquema de la figura 2.1, el modelo estructural esta definido por los parámetros θ_s que en este caso en particular se refieren a la masa y rigidez de cada piso de la estructura. En este módulo se realiza un análisis de tiempo historia a partir del modelo estructural, los registros sísmicos y los amortiguadores para obtener la respuesta estructural. Acá se identifican los desplazamientos, las velocidades, aceleraciones de cada piso, a la vez de las fuerzas máximas transmitida por los amortiguadores a la estructura.

Posteriormente para obtener los costos asociados a la respuesta estructural se utiliza el modelo de evaluación de pérdidas por sismos donde para estimar los costos de reparación se utiliza un enfoque de curvas de fragilidad basado en ensambles [22]. De acuerdo a este enfoque, los componentes de la estructura se agrupan en ensambles dañables (componentes estructurales, contenido, tabiquería y cielo falso) y distintos estados de daño son designados a cada ensamble. Además, cada estado de daño tiene asociado una curva de fragilidad y un costo de reparación definido por la variable θ_p . Las curvas de fragilidad cuantifican la probabilidad que un componente haya alcanzado o excedido su estado de daño y dependen de los parámetros de demanda de ingeniería (EDP), que están relacionados con la respuesta estructural (deriva entre pisos, velocidad, aceleración y fuerza). Al combinar la información de fragilidad y costo de reparación, se consigue el costo asociado para cada uno de los diferentes ensambles que luego se suman para obtener las pérdidas para cada evento sísmico considerado, identificados en el esquema de la figura 2.1 como C_r .

Finalmente, se define una variable aumentada $\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_s, \boldsymbol{\theta}_q, \boldsymbol{\theta}_p] \in \Theta \subset R^n$ que incluye todos los parámetros de los modelos del esquema, donde Θ representa el espacio posible de valores de los parámetros y está compuesto por los parámetros del sistema estructural $\boldsymbol{\theta}_s$, del registro sintético $\boldsymbol{\theta}_q$ y del modelo de evaluación de desempeño $\boldsymbol{\theta}_p$. Adicionalmente, esta metodología permite incluir las incertidumbres asociadas a los parámetros $\boldsymbol{\theta}$ siempre que sea definida por medio de una función de densidad de probabilidad (PDF), $p(\boldsymbol{\theta})$.

Para una configuración de amortiguadores específica $\boldsymbol{\varphi}$, la medida de consecuencia de riesgo $h_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$, describe que tan favorable es una respuesta, desde un punto de vista del costo de reparación asociado al problema. Esta medida es dependiente de tanto los parámetros de los amortiguadores $\boldsymbol{\varphi}$ como de los parámetros del modelo $\boldsymbol{\theta}$ y se analiza en extensión en el capítulo siguiente. Luego, el riesgo sísmico $H_r(\boldsymbol{\varphi})$ es descrito mediante la integral probabilística multidimensional genérica de la ecuación 2.2.

$$H_r(\boldsymbol{\varphi}) = \int_{\Theta} h_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) p(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta} \quad (2.2)$$

donde, $p(\boldsymbol{\theta})$ es la distribución de probabilidad asociada que facilita la cuantificación del riesgo sísmico al describir las incertidumbres de los distintos modelos (estructural, de registros sísmicos y de evaluación de desempeño), mostrados en la figura 2.1. Hay que notar que la ecuación 2.2 propaga las incertidumbres asociadas a las incertidumbres del modelo estructural, incertidumbres de magnitud de momento y distancia de ruptura y las incertidumbres de los valores $\boldsymbol{\theta}_q$ y $\boldsymbol{\theta}_p$. La solución de esta integral puede llegar a ser no trivial en la mayoría de los casos, requiriendo de la adopción de técnicas de simulación estocástica basadas en el método de Monte Carlo [19]. Estas estrategias numéricas serán abordadas más adelante en el Capítulo 4. Finalmente, el esquema presentado permite introducir diferentes medidas de consecuencia de riesgo basadas en el costo de reparación, permitiendo diferentes cuantificaciones del riesgo sísmico asociados a las métricas de diseño de los amortiguadores viscosos. Las métricas utilizadas en el presente trabajo, específicamente en la 2.2, para calcular el riesgo sísmico serán definidas y discutidas en el capítulo siguiente.

Capítulo 3

Estimación de Costos de Reparación de Estructuras con Amortiguadores

En este capítulo se presentará como se estima cada métrica de riesgo asociada a una medida de consecuencia de riesgo identificada en la ecuación 2.2 como $h_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$. Se van a utilizar dos distintas métricas de riesgo. La primera métrica que se muestra en la ecuación 3.1 corresponde a la de costo de vida útil que considera el costo inicial del amortiguador y el costo esperado asociado a los daños provocados por terremotos. La segunda métrica, asociada a la medida de consecuencia de riesgo de la ecuación 3.10, representa las pérdidas económicas asociadas a una probabilidad de excedencia baja en la vida útil de la estructura. Esta métrica toma en consideración el costo de reparación asociado a la ocurrencia de sismos poco probables. Específicamente, corresponde al umbral de costo de reparación asociado a una probabilidad de excedencia específica que incorpora una actitud de rechazo al riesgo que permite considerar sismos poco probables pero altamente catastróficos en el proceso de diseño. A continuación se ofrece información detallada de estas métricas y su significado en el esquema de optimización adoptado en el presente trabajo.

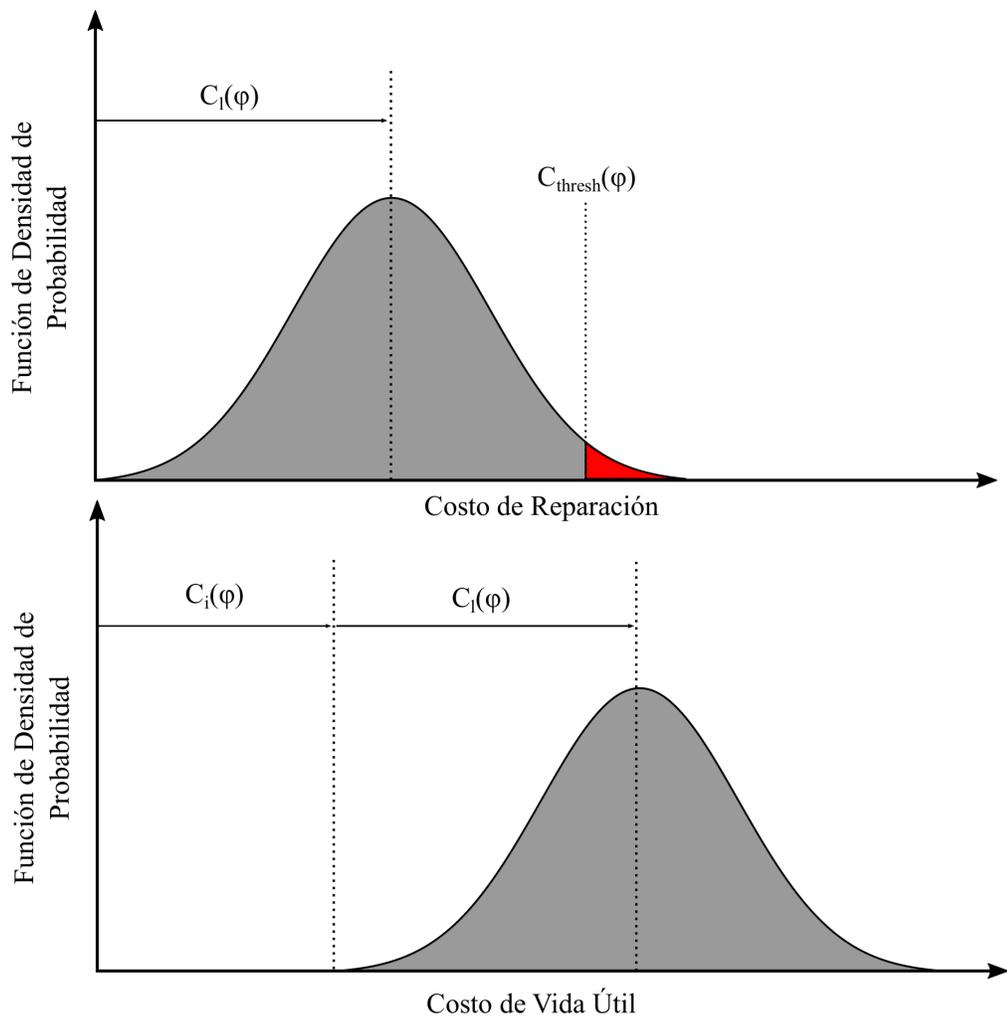


Figura 3.1: Costo de Reparación y Costo de Vida Útil

3.1. Costo de Vida Útil

La primera métrica utilizada en este análisis es el costo total de vida útil de la estructura $C(\boldsymbol{\varphi}) = C_i(\boldsymbol{\varphi}) + C_l(\boldsymbol{\varphi})$ que considera el costo inicial $C_i(\boldsymbol{\varphi})$ del amortiguador, y el costo esperado debido a las pérdidas ocasionadas por sismos en toda la vida útil de la estructura $C_l(\boldsymbol{\varphi})$. Para ilustrar estos conceptos se ha decidido presentar la figura 3.1. Acá es importante resaltar que al definir una configuración específica de amortiguadores $\boldsymbol{\varphi}$, el costo de reparación corresponde a una función de densidad de probabilidad (figura superior). El hecho que el costo de reparación sea una función de densidad de probabilidad tiene que ver con la propagación de las incertidumbres asociadas al problema, en otras palabras, es consecuencia de propagar las incertidumbres en el modelo estructural (masa, rigidez y amortiguamiento), en el modelo de excitación (magnitud de momento y distancia de ruptura), y en el modelo vulnerabilidad adoptado (parámetros de las curvas de fragilidad). A ese costo de reparación (que corresponde a una función de densidad de probabilidad) se le puede sumar el costo del dispositivo, de manera que la función de densidad de probabilidad ahora se corre a la derecha (tal como se presenta en la figura inferior) dando lugar a lo que se define como el costo de vida útil. Siguiendo estas definiciones, la primera métrica de riesgo que se utiliza en el estudio corresponde específicamente al valor esperado del costo de vida útil, o en otras palabras, corresponde al costo inicial $C_i(\boldsymbol{\varphi})$ más el costo esperado de reparación $C_l(\boldsymbol{\varphi})$ (o valor medio de la distribución que describe el costo de reparación). Hay que notar que esta métrica solamente busca determinar el costo medio durante la vida útil de la estructura y de ninguna manera otorga información sobre la dispersión que pueda presentar la función de densidad de probabilidad asociada el costo de reparación.

El costo esperado de reparación $C_l(\boldsymbol{\varphi})$ está asociado a la ocurrencia de eventos sísmicos durante un período de tiempo (vida útil de la estructura). De manera que el costo esperado de reparación $C_l(\boldsymbol{\varphi})$ formalmente representa el valor presente de las futuras pérdidas por sismos y quedando definido por la ecuación 2.2 con una medida de consecuencia de riesgo $h_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ dada por la siguiente ecuación:

$$h_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) = C_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \nu \frac{1 - e^{-r_d t_{life}}}{r_d t_{life}} \quad (3.1)$$

donde, r_d es la tasa de descuento, t_{life} es el tiempo de vida útil considerado, ν es la frecuencia anual de sismos y $C_r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ es el costo por pérdidas debido a la ocurrencia de un sismo, estimado mediante el enfoque de curvas de fragilidad basado en ensambles explicado anteriormente.

Por otra parte, el costo inicial del amortiguador $C_i(\boldsymbol{\varphi})$ se puede estimar a partir de la máxima fuerza creíble F_u alcanzada durante el tiempo de vida de la estructura, por ejemplo, considerando la siguiente relación

$$C_i(\boldsymbol{\varphi}) = A_D F_u^{\beta_D} \quad (3.2)$$

donde A_D es un valor de costo base mientras que β_D indica un factor de escalamiento para el costo. Si $\beta_D = 1$ indica que el costo del amortiguador crece proporcional a la capacidad F_u , mientras que valores de β_D menores que 1 indica que el costo del amortiguador se convierte cada vez más independiente de la capacidad F_u . En particular, la ecuación 3.2 fue tomada de un trabajo previo de Gidaris y Taflanidis [6] donde los valores A_D y β_D fueron ajustados utilizando datos de amortiguadores comerciales provenientes de la empresa Taylor Devices. Los valores referenciales para estas variables son entonces considerados como $A_D = \$96,88$ y $\beta_D = 0,607$, siguiendo la referencia [6].

Para la definición de la fuerza máxima creíble del amortiguador F_u , se ha decidido trabajar con una fuerza límite F_{thresh} asociada a una probabilidad de excedencia baja P_o durante el tiempo de vida de la estructura. Esta fuerza límite puede ser definida en este contexto como:

$$P[F > F_{thresh}(\boldsymbol{\varphi}) \mid \boldsymbol{\varphi}, t_{life}] = P_o \quad (3.3)$$

o como

$$P[F > F_{thresh}(\boldsymbol{\varphi}) \mid \boldsymbol{\varphi}, \text{evento sismico}] = P_e \quad (3.4)$$

dependiendo si la probabilidad de excedencia esta definida en el tiempo de vida o dada

la ocurrencia de un evento sísmico. Asumiendo una distribución de Poisson de ocurrencia de eventos sísmicos, las ecuaciones 3.3 y 3.4 se relacionan de la siguiente manera

$$P_o = 1 - \exp(-t_{life} \nu P_e) \quad (3.5)$$

En ese sentido P_e puede ser estimada por medio de la siguiente integral:

$$P_e = \int_{\Theta} I_c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) p(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta} \quad (3.6)$$

donde $I_c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ representa una función de indicación que toma valores iguales a 1 si $F > F_{thresh}$ y 0 en cualquier otro caso. Al final, el problema se remite en encontrar el F_{thresh} tal que se mantenga el valor P_o impuesto. Al utilizar el valor de F_{thresh} como F_u en la ecuación 3.2, se puede estimar el costo del dispositivo en función de la capacidad requerida durante el tiempo de vida de la estructura.

3.2. Rechazo al Riesgo Sísmico

Cuando el diseño de los amortiguadores se basa en la minimización de la métrica de costo de vida útil, no se impone ningún tipo de restricción sobre la dispersión de los costos de reparación, ya que la métrica sólo se centra en el valor esperado (o valor medio) de los costos de reparación. A este tipo de diseño típicamente se le denomina Diseño Neutral y no incluye información referente a los peores escenarios (relacionados a los extremos de la distribución). Sin embargo, en muchos casos, es fundamental considerar actitudes de riesgo alternativas que conllevan diseños más conservadores, dado que diseños con actitudes de riesgo neutro no enfrentan de manera explícita los poco comunes pero potencialmente devastadores terremotos que se encuentran al final de la curva de distribución de pérdidas por sismos.

Para introducir un diseño basado en una actitud de rechazo al riesgo, se incorpora una métrica de rechazo al riesgo sísmico correspondiente a un costo de reparación límite C_{thresh} que define una probabilidad de excedencia específica en la vida útil de la estructura. En

otras palabras, y basándose como ejemplo en la figura 3.1, una actitud de rechazo al riesgo busca minimizar el costo de reparación límite (identificado como C_{thresh} en la figura 3.1), de tal manera que el área identificada en rojo siempre sea la misma (eso garantiza que la probabilidad de exceder C_{thresh} se mantenga constante)

Dada la distribución de Poisson de ocurrencia de eventos sísmicos, la probabilidad que el costo de reparación C_r exceda el umbral $C_{thresh}(\varphi)$ en la vida útil de la estructura se denota como

$$P[C_r > C_{thresh}(\varphi) \mid \varphi, t_{life}] = P_o \quad (3.7)$$

mientras que la probabilidad de que C_r exceda el umbral $C_{thresh}(\varphi)$ dado la ocurrencia de un evento sísmico se denota como

$$P[C_r > C_{thresh}(\varphi) \mid \varphi, \text{eventosismico}] = P_e \quad (3.8)$$

y donde la relación entre P_o y P_e viene dada por

$$P_o = 1 - \exp(-t_{life}\nu P_e) \quad (3.9)$$

Finalmente, la probabilidad P_e está dada por la integral de riesgo genérica de la ecuación 2.2 con una medida de consecuencia de riesgo:

$$h_r(\boldsymbol{\theta}, \varphi) = I_C(\boldsymbol{\theta}, \varphi) \quad (3.10)$$

Que corresponde a una función indicación, que toma valor 1 si $C_r(\boldsymbol{\theta}, \varphi) > C_{thresh}(\varphi)$, y cero en cualquier otro caso.

Una vez que se tienen las dos métricas que representan una actitud de riesgo neutral y una de rechazo al riesgo, la pregunta que surge se relaciona a como se puede realizar un proceso de optimización utilizando simultáneamente ambas posturas ante el riesgo. La respuesta a esta

pregunta debe ser encontrada por medio de la proposición de una optimización multiobjetivo la cual será explicada en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Optimización de Amortiguadores

Viscosos Basado en la Actitud ante el Riesgo

4.1. Formulación de Problema

Las dos métricas de riesgo detalladas anteriormente se consideran objetivos al formular el problema de diseño multiobjetivo de amortiguadores viscosos. Esta formulación multiobjetivo, que se muestra en la ecuación 4.1, tiene como resultado un conjunto de puntos (también conocido como diseños dominantes) que se encuentran en el borde del espacio objetivo considerado, denominado frente Pareto. Un punto pertenece al frente Pareto se denomina punto Pareto óptimo si no hay otro punto que mejore uno de los objetivos en detrimento de otro. Finalmente, una vez que se obtiene el frente Pareto el diseñador o mandante puede elegir, dentro de un rango de opciones óptimas, la configuración de amortiguadores que se ajusta mas a sus intereses económicos y su actitud ante el riesgo sísmico.

$$\begin{aligned} \varphi^* = \operatorname{argmin}_{\varphi \in \Phi} \{ & C_i(\varphi) + C_l(\varphi), C_{thresh}(\varphi) \} \\ \text{s. t. } & P(C_r > C_{thresh}(\varphi) \mid \varphi, t_{life}) = P_o \end{aligned} \tag{4.1}$$

Donde el primer objetivo $C(\boldsymbol{\varphi}) = C_i(\boldsymbol{\varphi}) + C_l(\boldsymbol{\varphi})$ es el costo de vida útil mientras que el segundo objetivo $C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi})$ corresponde al umbral de costo de reparación que define una probabilidad de excedencia P_o en la vida útil de la estructura.

La selección de la probabilidad P_o permite al diseñador incorporar diferentes actitudes frente al riesgo dentro de la formulación del problema. Por ejemplo, actitudes de rechazo al riesgo de parte del mandante pueden ser logradas al enfocarse en eventos hacia el final de las respectivas curvas de distribución para C_r (selección de P_o).

4.2. Enfoque Computacional para la Optimización de Diseño

Para obtener los valores de las métricas de riesgo $C(\boldsymbol{\varphi})$ y $C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi})$ de la ecuación 4.1 se requiere resolver integrales probabilísticas de la forma de la ecuación 2.2. La simulación estocástica de la ecuación 4.2 se adopta aquí para estimar de manera eficiente el valor de la integral genérica de riesgo. Específicamente, se adopta un método de simulación estocástica basado en el Método de Monte Carlo y denominado "Importance Sampling"[18]. En ese sentido, la integral probabilística (ecuación 2.2) puede ser estimada de manera aproximada a través de la siguiente expresión

$$\hat{H}_r(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N h_r(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}^j) \frac{p(\boldsymbol{\theta}^j)}{q(\boldsymbol{\theta}^j)} \quad (4.2)$$

Este método se basa en la generación de muestras que siguen una distribución $q(\boldsymbol{\theta})$ que típicamente se selecciona como una función de densidad de probabilidad que es proporcional al integrando de la integral probabilística. De esa manera, se puede reducir significativamente el número de simulaciones envueltas en la aproximación de Monte Carlo. En particular, cada muestra generada será denotada como $\boldsymbol{\theta}^j$, mientras que el set completo de muestras se denominará como $\{\boldsymbol{\theta}^j; j = 1, \dots, N\}$.

Hay que destacar que el proceso de optimización requiere resolver una integral probabilís-

tica para cada objetivo presente en la ecuación 4.1, lo cual implica un costo computacional significativo. Sin embargo, de la ecuación 4.2 se puede observar que el costo computacional más elevado corresponde a la evaluación de la función de riesgo $h_r(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}^j)$ para cada muestra $\boldsymbol{\theta}^j$ ya que esa evaluación involucra un análisis tiempo historia y su posterior paso por las curvas de fragilidad. Acá, hay que destacar una ventaja significativa del método de Importance Sampling, y esta tiene que ver con la versatilidad de evaluar la integral probabilística bajo diferentes escenarios de incertidumbre (definidos por la función de densidad de probabilidad $p(\boldsymbol{\theta})$) sin tener que incurrir en un costo computacional elevado. En otras palabras, se pueden seguir usando las muestras obtenidas a partir de $q(\boldsymbol{\theta})$ (implicando que la parte costosa de la evaluación $h_r(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}^j)$ queda invariante) para solamente tener que recalcular el cociente $p(\boldsymbol{\theta}^j)/q(\boldsymbol{\theta}^j)$.

De los dos objetivos presentados en la función de minimización, el segundo representa tal vez el de mayor complejidad en el cálculo. Hay que notar que la estimación de $C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi})$ usando la ecuación 4.2 requiere la solución de un problema inverso (identificar el umbral del valor asociado a una probabilidad específica). Este problema puede ser resuelto eficientemente de la siguiente manera: Primero el valor requerido para $P[C_r > C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi}) \mid \boldsymbol{\varphi}, \text{evento sismico}]$ o también llamado P_e se calcula en función de la probabilidad $P[C_r > C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi}) \mid \boldsymbol{\varphi}, t_{life}]$ o P_o siguiendo una ley de ocurrencia de Poisson tal que:

$$P_e = -\frac{\ln(1 - P_o)}{\nu t_{life}} \quad (4.3)$$

Después, las muestras disponibles para la medida de consecuencia de riesgo $I_C(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ de la simulación estocástica, son ordenadas de menor a mayor. Finalmente, el valor N_{target} de $C_r(\boldsymbol{\theta}^j, \boldsymbol{\varphi})$ que satisface la ecuación

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_{target}} p(\boldsymbol{\theta}^j)/q(\boldsymbol{\theta}^j) = P_e \quad (4.4)$$

es el umbral de costo de reparación $C_{thresh}(\boldsymbol{\varphi})$.

Los errores asociados a la simulación estocástica se abordan al adoptar un enfoque de muestreo exterior [23] que implica utilizar las mismas muestras en todas las iteraciones del proceso de optimización. De esta manera, se reduce la importancia relativa del error estimado

en la comparación entre diferentes opciones de diseño al crear un error consistente en todos los puntos de diseño.

Finalmente, para poder realizar una optimización eficiente, un modelo sustituto Kriging se utiliza siguiendo las pautas de [6]. Este modelo sustituto tiene el propósito de otorgar una relación aproximada entre el diseño seleccionado φ (datos de entrada del modelo Kriging) y los valores de riesgo del problema de optimización de la ecuación 4.1, $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$ (datos de salida del modelo Kriging). El modelo se utiliza de la siguiente forma: Primero un grupo grande de configuraciones de amortiguadores viscosos se utilizan como puntos de entrenamiento para desarrollar el metamodelo Kriging. Para el muestreo de configuraciones de amortiguadores inicial se utiliza un muestreo de hipercubo latino en el dominio Φ^m (dominio que se utiliza para el desarrollo del metamodelo Kriging) que es igual o más grande que el espacio de diseño aceptado Φ . Después, para cada configuración de amortiguadores de entrenamiento se calcula, mediante la simulación estocástica explicada anteriormente, los valores de riesgo $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$. Más adelante, el modelo Kriging utiliza esta información para otorgar de manera muy eficiente las aproximaciones de los valores de $C(\tilde{\varphi})$ y $C_{thresh}(\tilde{\varphi})$ para una configuración φ en el dominio Φ^m . Posteriormente, estas aproximaciones reemplazan los valores de $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$ de la ecuación de optimización 4.1. Finalmente la optimización multiobjetivo se resuelve mediante un método de búsqueda ciego.

4.3. Algoritmo de Implementación

Con la idea de facilitar el entendimiento de la metodología empleada en la optimización de los amortiguadores se presenta la figura 4.1 que resume los pasos principales utilizados en la implementación de la optimización multiobjetivo.

La primera parte involucra al modelo de registros sísmicos explicado a grandes rasgos en el capítulo 2. Primero se realiza, mediante el código del algoritmo de aceptación y rechazo, un muestreo de los parámetros sismológicos $\theta_q = [M, r]$ (donde M es la magnitud de momento y r es la distancia de ruptura). Para ello se considera que la incertidumbre de la magnitud $p(M)$ se modela según la ley de Gutenberg Richter con factores sísmicos regionales a_M y

b_M truncados para un intervalo $[M_{min}, M_{max}]$. Mientras que la incertidumbre de la distancia de ruptura $p(r)$ se asume que tiene distribución beta definida por el rango de distancia de ruptura considerado $[r_{min}, r_{max}]$, el promedio r_{mean} y el coeficiente de variación r_{cov} . Luego, el código del algoritmo de aceptación y rechazo utiliza las incertidumbres $p(M)$ y $p(r)$ para arrojar como datos de salida muestras de M y r .

La segunda parte involucra al código del modelo de generación de registros que toma los parámetros sismológicos M y r y a través de ecuaciones predictivas previamente calibradas permite obtener las características sísmicas (intensidad de Arias y duración del registro sísmico). Luego, el código en base a estas características sísmicas modula una secuencia estocástica (ruido blanco) a través de funciones que modifican las características de frecuencia y dominio del tiempo. El resultado es un conjunto de vectores de aceleración a_{cel} y tiempo t de los registros sintéticos acordes a los parámetros sismológicos M y r antes mencionados.

Paralelamente y a partir de las variables de diseño φ de los amortiguadores previamente definidas se realiza un muestreo aleatorio de coeficientes de amortiguación para cada los amortiguadores de cada piso de la estructura. Este primer muestreo de n configuraciones distintas se utilizará después como puntos de entrenamiento para el modelo Kriging.

La tercera parte corresponde a realizar un análisis de tiempo historia del modelo estructural en conjunto con las variables de diseño de los amortiguadores y los registros sintéticos mediante el código del análisis de tiempo historia. Este análisis arroja la respuesta de la estructura que consiste en la deriva, velocidad, aceleración y fuerza máxima que experimenta cada piso de la estructura con una configuración de amortiguadores específica ante un registro sísmico.

La cuarta parte involucra realizar un análisis de costos mediante el enfoque de curvas de fragilidad basado en ensambles. En el cual, se utiliza el código de curvas de fragilidad que tiene como datos de entrada la aceleración y deriva máximas de cada piso en conjunto con los parámetros de las curvas de fragilidad. Los datos de salida corresponde a la suma de los costos de reparación de los ensambles para una configuración de amortiguadores y un registro sísmico.

La quinta parte consiste en obtener las métricas de riesgo de $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$ de la

ecuación 4.1 y la fuerza límite $F_{thresh}(\varphi)$ mediante el enfoque computacional explicado en el capítulo 4.2. Para ello se utiliza el código de métricas de riesgo que tiene como datos de entrada la suma de los costos de los ensambles y parámetros sísmicos (número de sismos por año, tiempo de vida útil y tasa de descuento) y tiene como datos de salida los valores de $C(\varphi)$, $C_{thresh}(\varphi)$ y $F_{thresh}(\varphi)$ para cada configuración de amortiguadores.

La sexta parte corresponde a utilizar el código del modelo Kriging para desarrollar un modelo Kriging que realice aproximaciones entre los puntos de entrenamiento de las configuraciones de amortiguadores φ y las métricas de riesgo $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$. Luego, a partir de estas aproximaciones se genera de manera eficiente un muestreo de miles de configuraciones de amortiguadores con sus respectivos valores de $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$.

La séptima parte consiste es reemplazar los valores de $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$ en la ecuación 4.1. Este problema de optimización multiobjetivo se resuelve con un método de búsqueda ciega mediante el código de búsqueda ciega, dando como resultado el frente Pareto con las configuraciones de amortiguadores óptimas de $C(\varphi)$ y $C_{thresh}(\varphi)$.

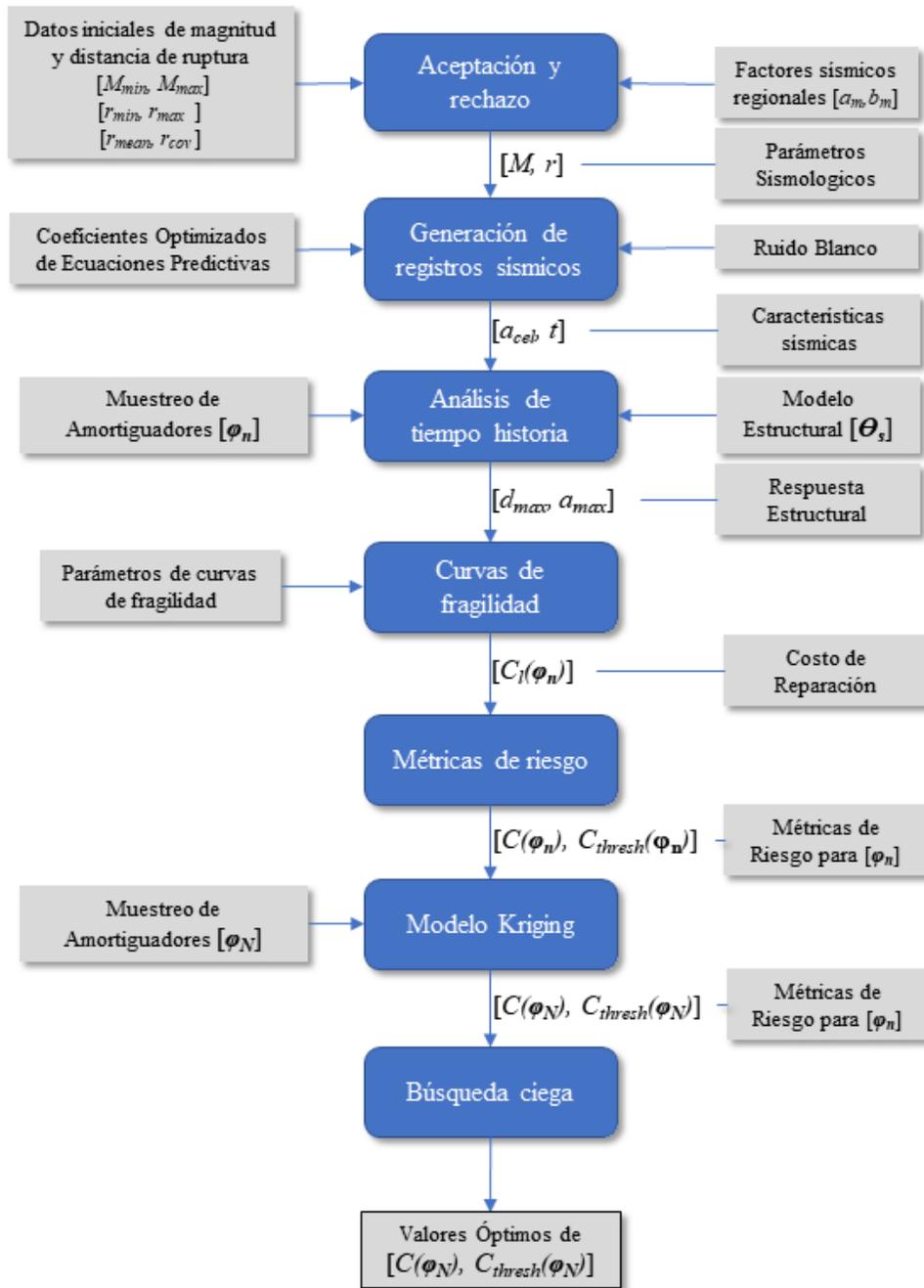


Figura 4.1: Esquema de algoritmo de implementación

Capítulo 5

Casos de Estudio

El esquema de trabajo mostrado en los capítulos anteriores se utiliza para estudiar el impacto del uso de amortiguadores en edificios de marcos de acero diseñados específicamente para la región de Chile. El presente capítulo presenta información detallada de las estructuras utilizadas y de los modelos numéricos utilizados para realizar las simulaciones en tiempo historia. Adicionalmente, se ofrece información sobre la amenaza sísmica utilizada en los análisis, así como un detallamiento de los ensamblajes utilizados en las curvas de fragilidad para estimar los respectivos costos de reparación.

5.1. Estructuras Utilizadas en el Estudio

Para el caso de estudio, se decidió utilizar 8 estructuras diferentes de marcos de acero que fueron diseñadas de acuerdo a los requerimientos de la norma chilena de la construcción NCh433.Of1996 y la norma estadounidense de construcción AISC. Las estructuras corresponden a 4 estructuras de 4 pisos y a 4 estructuras de 8 pisos, todas con una altura entre pisos de 3.5m y luces de 7m [24]. La motivación en la selección de estas estructuras se basa en que son estructuras previamente estudiadas y cuidadosamente diseñadas para cumplir con el marco regulatorio Chileno. Adicionalmente, cada estructura surge como resultado de un proceso de diseño ante diferentes amenazas sísmicas y diferentes tipologías de suelo. Las estructuras de 4 y 8 pisos empleadas poseen dimensiones específicas que son presentadas en

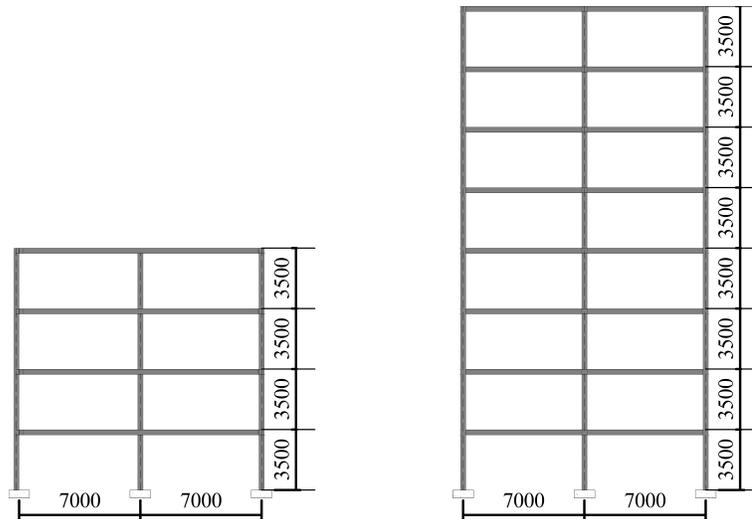


Figura 5.1: Vista en elevación de estructuras de marcos de acero de cuatro y ocho pisos

el plano de elevación de la figura 5.1, 5.2. Adicionalmente, se presenta una vista en planta (figura 5.2) donde se puede observar que las 8 estructuras presentan una geometría regular con pórticos de 7m de base.

Los detalles de las estructuras utilizadas pueden encontrarse en el trabajo de Baez 2018 [24]. Sin embargo, se presentan algunos detalles de diseño generales. En particular, las cargas vivas y muertas consideradas en los modelos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Cargas tributarias

Nombre	Abreviación	Carga [kgf/m ²]	Carga Tributaria [kgf/m]
Carga Muerta	D	500	3500
Carga Viva de Losa	L	250	1750
Carga Viva de Techo	Lr	100	700

Los pilares y vigas de acero utilizados en los modelos de edificios toman en consideración tanto el tipo de suelo como la zona sísmica y se muestran en la tabla 5.2.

Para tener un uso más eficiente de acero en los edificios de ocho pisos, las secciones de las vigas y columnas de los cuatro pisos superiores son menores que las de los cuatro pisos inferiores, tal como se muestra en la tabla 5.3. Claramente, hay solo cuatro tipos de tipos de

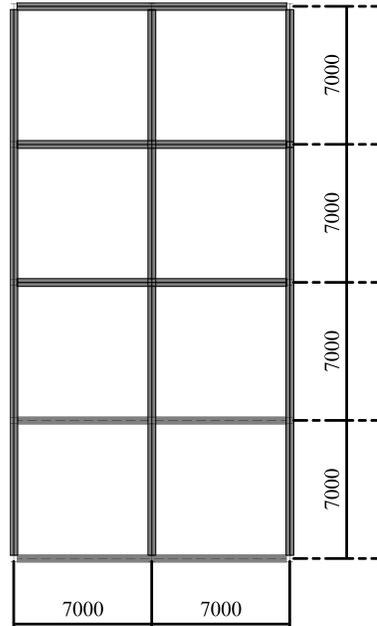


Figura 5.2: Vista en planta de estructuras de marcos de acero de cuatro y ocho pisos

Tabla 5.2: Secciones de vigas y columnas de edificios de cuatro pisos

Zona/Suelo	A	B	C	D	Tipo
1	W12x50	W12x50	W12x50	W12x50	Viga
	W18x106	W18x106	W18x106	W21x132	Columna
2	W12x50	W12x50	W12x50	W16x45	Viga
	W18x106	W18x106	W21x132	W36x210	Columna
3	W12x50	W12x50	W16x45	W16x67	Viga
	W21x132	W21x132	W36x210	W36x280	Columna

Tabla 5.3: Secciones de vigas y columnas de edificios de ocho pisos

Zona/Suelo	A	B	C	D	Elemento (Pisos)
1	W12x58	W12x58	W12x58	W14x61	Viga (1-4)
	W12x58	W12x58	W12x58	W12x58	Viga (5-8)
	W30x132	W30x132	W30x132	W36x245	Columna (1-4)
	W21x111	W21x111	W21x111	W24x229	Columna (5-8)
2	W14x61	W14x61	W16x67	W16x67	Viga (1-4)
	W12x58	W12x58	W14x68	W14x68	Viga (5-8)
	W36x245	W36x245	W36x280	W36x280	Columna (1-4)
	W24x229	W24x229	W27x281	W27x281	Columna (5-8)
3	W14x61	W14x61	W16x67	W18x143	Viga (1-4)
	W12x58	W12x58	W14x68	W18x86	Viga (5-8)
	W36x245	W36x245	W36x280	W36x328	Columna (1-4)
	W24x229	W24x229	W27x281	W36x280	Columna (5-8)

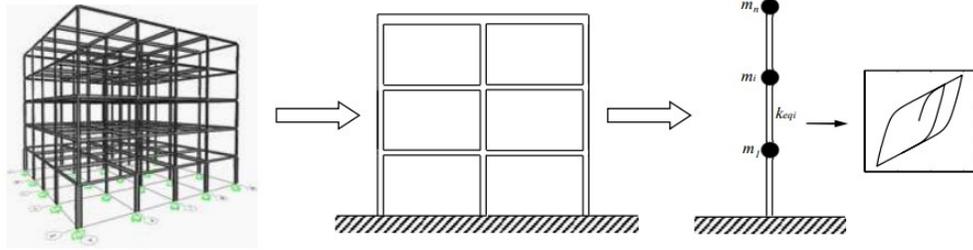


Figura 5.3: Modelo parsimónico (Villanueva 2017)

estructuras para los edificios de ocho pisos, los cuales han sido clasificados de acuerdo con la rigidez y se presentan junto con las de cuatro pisos en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Tipos de estructuras

N de Pisos	Sección	1	2	3	4
4	Viga	W12x50	W12x50	W16x45	W16x67
	Columna	W18x106	W21x132	W36x210	W36x280
8	Viga (1-4)	W12x58	W14x61	W16x67	W18x143
	Viga (5-8)	W12x58	W12x58	W14x68	W18x86
	Columna (1-4)	W30x132	W36x245	W36x280	W36x328
	Columna (5-8)	W21x111	W24x229	W27x281	W36x280

Para disminuir la alta complejidad computacional de la estructura, se implementa un modelo parsimónico[25]. Para ello, la rigidez lateral de cada piso del edificio está modelada por un grupo de resortes no lineares paralelos como se muestra en la figura 5.3. Las propiedades modales como el período y fuerza de las distintas estructuras se muestran en la tabla 5.5.

5.2. Amenaza Sísmica y Registros Sintéticos

Las incertidumbres en la magnitud de momento M se modelan con la ley de Gutenberg Richter truncada en el intervalo $[M_{min}, M_{max}] = [6,0, 9,0]$, (eventos menores a M_{min} no contribuyen al riesgo sísmico) que conlleva a tener una probabilidad de ocurrencia $p(M) = b_M e^{-b_M M} / (e^{-b_M M_{min}} - e^{-b_M M_{max}})$ y número esperado de eventos por año $\nu = e^{a_M - b_M M_{min}} -$

Tabla 5.5: Propiedades modales de estructuras

N de Pisos	Tipo de Estructura	Período (T1) [s]	Fuerza [tonf]
4	1	1.08	224.3
	2	0.99	225.7
	3	0.65	229.6
	4	0.53	235.4
8	1	2.04	458.7
	2	1.64	472.5
	3	1.4	479.2
	4	0.98	489.4

$e^{a_M - b_M M_{max}}$. Los factores sísmicos b_M y a_M se obtienen al promediar los valores de zonas sísmicas cercanas a Santiago y corresponden a $b_M = 0,8 \log_e(10)$ y $a_M = 5,65 \log_e(10)$. Un histograma de la magnitud de los sismos utilizados en esta memoria se muestra en la figura 5.4.

Con respecto a las incertidumbres de la ubicación del sismo considerada en este informe, la distancia más cercana a la ruptura de falla, r_{rup} , para los eventos sísmicos se asume que sigue una distribución beta en [30 250] km con valor medio en $r_{med} = 100[km]$ y coeficiente de variación de 35%. En la figura 5.5 se muestra un histograma de las distancias de ruptura de los sismos considerados en este informe. Finalmente, para este estudio se considera un número finito $N = 500$ de muestras de θ , una cantidad de 8000 registros sísmicos, una tasa de descuento $r_D = 1,5\%$ y una vida útil de 50 años. Además $p_{or} = p_{oi} = 10\%$ y el cociente de $p(\theta)$ y $q(\theta)$ de la ecuación 4.2 es igual a 1. Un histograma de las aceleraciones máximas de estos registros sísmicos se muestran en la figura 5.6. 11 Además, en la figura 5.7 se muestra como ejemplo el espectro de uno de los sismos considerados en este informe.

Sin embargo, es importante señalar que los registros sísmicos se calibraron para corresponder a suelos tipo roca, por lo que un análisis que considere registros sísmicos calibrados para otros tipos de suelo está fuera del alcance de este estudio.

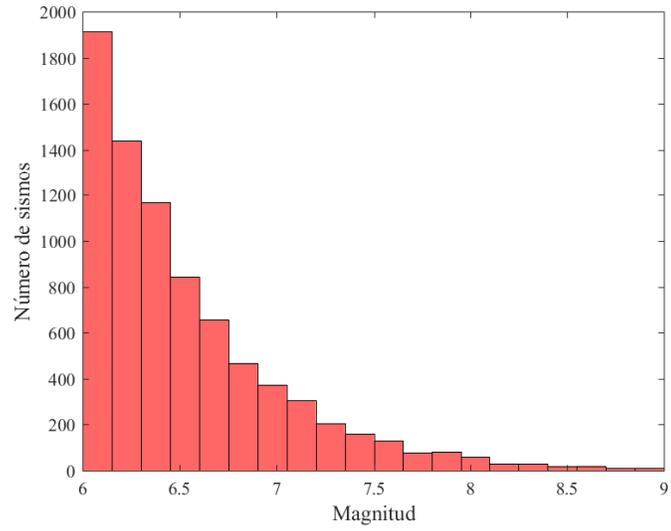


Figura 5.4: Histograma de magnitud

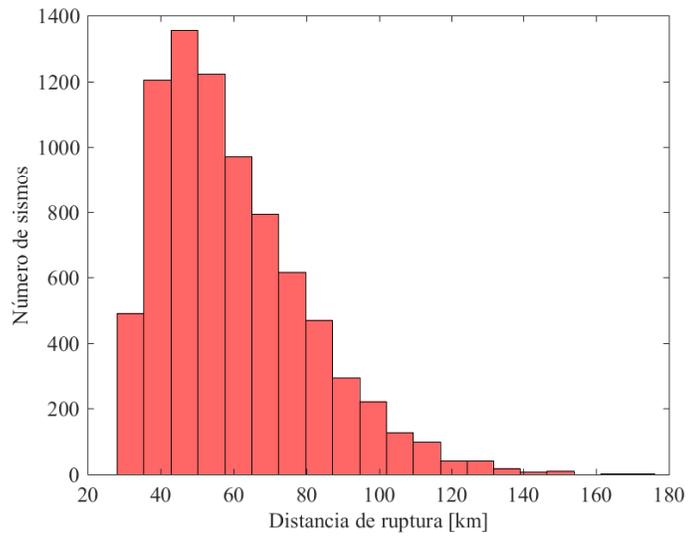


Figura 5.5: Histograma de distancia de ruptura

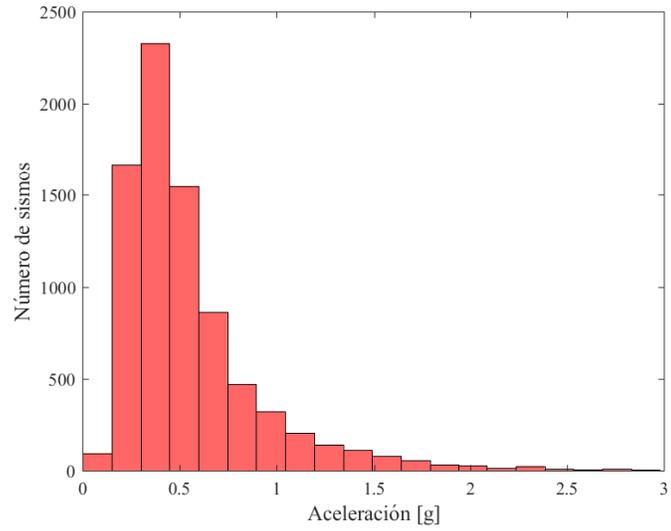


Figura 5.6: Histograma de aceleraciones máximas

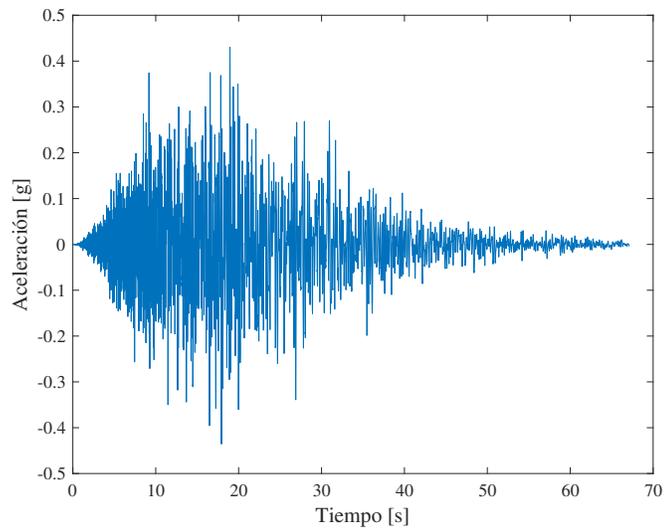


Figura 5.7: Ejemplo de espectro de sismo

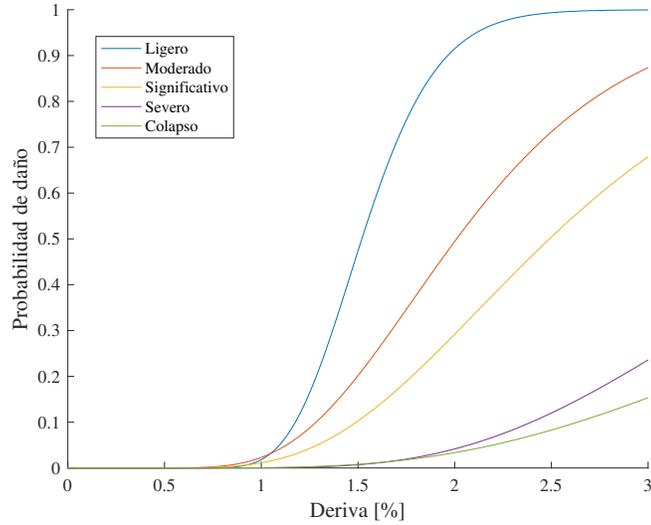


Figura 5.8: Estados de daño de componentes estructurales

5.3. Curvas de Fragilidad Utilizadas

Cada curva de fragilidad considerada en este informe consiste en una función log normal con mediana x_m y desviación estándar b_m que tiene asociada una EDP y un costo estimado por elemento $\$/n_{el}$ tal como se muestra en la tabla 5.6, donde n_{el} corresponde al número de elementos que se asume que hay en cada piso. Para las componentes estructurales las curvas de fragilidad son elegidas de acuerdo a las características de la curva de la fuerza restaurativa de cada piso, estableciendo una relación directa entre las curvas de fragilidad y la rigidez y resistencia del modelo estructural. Los parámetros de las curvas de fragilidad de los elementos estructurales se obtienen de [25], las particiones y el cielo falso se basan en las recomendaciones en FEMA-P-58 [26], mientras que para el contenido dañable la curva de fragilidad es similar a la elegida en [?]. Para las componentes estructurales y tabiquería, el EDP relacionado es la deriva entre pisos (IDR). Por otro lado, para el contenido y el cielo falso, el EDP que permite calcular el nivel de daño es la aceleración máxima del piso (PFA).

En las figuras 5.8,5.9,5.10, 5.11, se muestran las curvas de fragilidad de los estados de daño de los distintos ensambles.

Tabla 5.6: Parámetros de curvas de fragilidad

Estado de Daño	EDP	xm [%]	bm [%]	nel	\$/nel
<i>Componentes estructurales</i>					
1(ligero)	IDR	1.52	0.2	24	2700
2(moderado)	IDR	2.01	0.35	24	12995
3(significativo)	IDR	2.49	0.4	24	24570
4(severo)	IDR	4	0.4	24	29160
5(colapso)	IDR	5	0.5	24	46305
<i>Contenido</i>					
1(daño)	PFA	0,70g	0.3	10	1500
<i>Tabiquería</i>					
1(fisuras pequeñas)	IDR	0.21	0.6	490	22.3
2(grietas moderadas)	IDR	0.71	0.45	490	60.3
3(daño severo)	IDR	1.2	0.45	490	92.7
<i>Cielo Falso</i>					
1(caída de algunas placas)	PFA	0,55g	0.4	392	15.2
2(caída extensiva de placas)	PFA	1,00g	0.4	392	120.1
3(colapso total de cielo falso)	PFA	1,50g	0.4	392	237.7

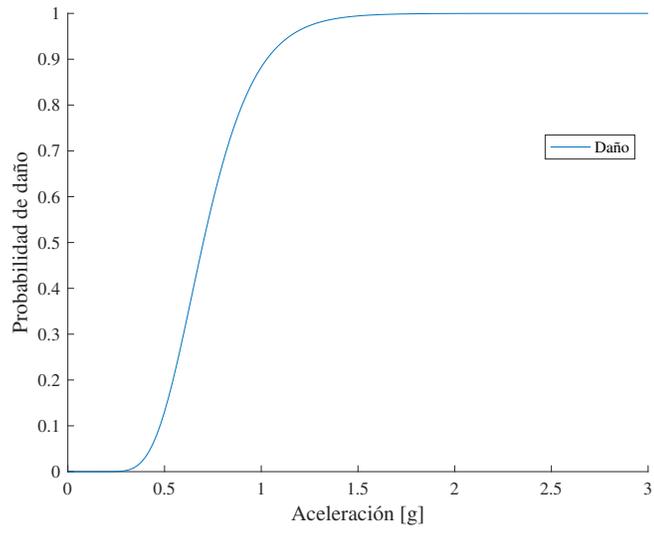


Figura 5.9: Estado de daño de contenido

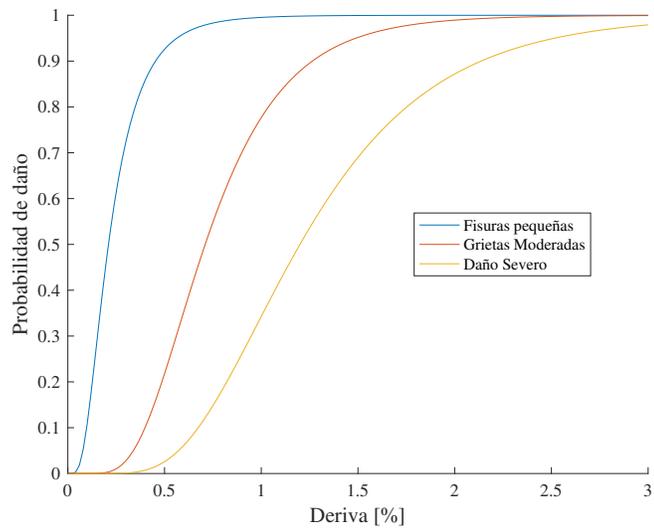


Figura 5.10: Estados de daño de tabiquería

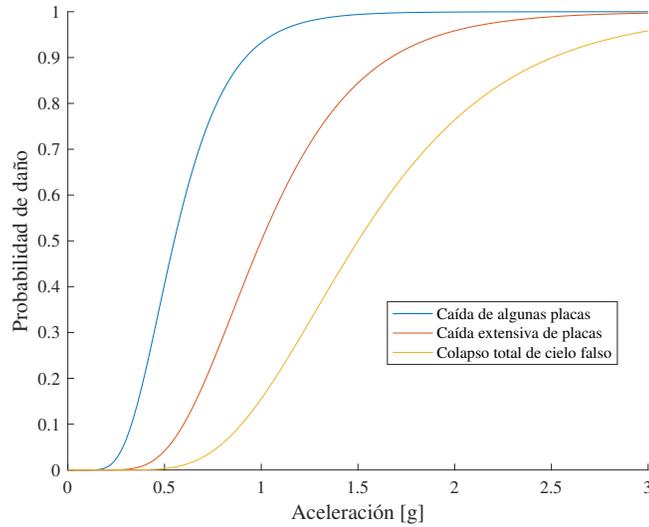


Figura 5.11: Estados de daño de cielo falso

5.4. Lineamientos generales para la selección de amortiguadores

Los edificios cuentan con un amortiguador por piso y el espacio de diseño inicial para los amortiguadores de los edificios de cuatro pisos es de $[0,5 \ 1]MN/(m/sec)^{0,5}$ para los dos pisos superiores y $[0 \ 0,5]MN/(m/sec)^{0,5}$ para los dos inferiores. Mientras que para los edificios de ocho pisos, el espacio de diseño inicial para los amortiguadores es de $[0 \ 1]MN/(m/sec)^{0,5}$ para los ocho pisos superiores. Finalmente, el exponente de velocidad α para cada amortiguador tiene un valor de 0,5 que corresponde a un valor común para aplicaciones sísmicas.

5.5. Datos Computacionales

En este caso estudio, para el análisis de tiempo historia del modelo estructural se utiliza un número de 8000 registros sintéticos y 500 muestras de amortiguadores viscosos las cuales se utilizarán después como puntos de entrenamiento del modelo Kriging. El modelo Kriging genera con un error menor a 5%, 400000 nuevas muestras de amortiguadores con sus respectivas métricas de riesgo. Mientras que la obtención de las métricas de riesgo en

la simulación estocástica mediante el método de Monte Carlo tiene una precisión mayor a 95 %. Con respecto a la demora de los procesos computacionales, el que toma mas tiempo corresponde al generar los puntos de entrenamiento para el modelo Kriging. En particular el tiempo para realizar el análisis de tiempo historia del modelo estructural es de 79 horas para los 500 puntos de entrenamiento. Luego, el análisis de costos de reparación y la obtención de las métricas de los puntos de entrenamiento toma 1 hora aproximadamente. Posteriormente, el tiempo que se utiliza para entrenar el modelo Kriging y obtener las 400000 nuevas muestras de amortiguadores y sus métricas de riesgo es de 10 minutos aproximadamente. Finalmente, los valores óptimos de los amortiguadores junto con sus métricas de riesgo es de 20 segundos.

El servidor utilizado tiene un procesador de 40 núcleos Intel Xeon E5-2630v4 de 2.20 [GHz] y una memoria instalada (RAM) de 128 GB. Este computador permite reducir el tiempo en realizar el análisis de tiempo historia al utilizar todos sus núcleos en procesos simultáneos.

Capítulo 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados analizados se muestran a continuación y se dividen en dos partes, siendo la primera la correspondiente a los resultados de los edificios de cuatro pisos mientras que la segunda parte corresponden a los de los edificios de ocho pisos.

Para el edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) se obtiene la proyección de la curva Pareto del modelo en los planos de $C_{thresh}-C_l(\varphi)$ y $F_{thresh}-C_l(\varphi)$ que se muestran en la figura 6.1, donde cada punto del frente Pareto corresponde a una configuración óptima de amortiguadores viscosos. En este gráfico se pueden observar los dos extremos de cada frente Pareto, siendo de mayor costo de vida útil $C_l(\varphi)$ y menor costo de reparación C_{thresh} la configuración de rechazo al riesgo. Mientras que el otro caso corresponde a riesgo neutral donde C_{thresh} es el máximo y $C_l(\varphi)$ el mínimo. Además, es importante destacar que la sola incorporación de amortiguadores viscosos a la estructura permite una reducción de mas de 75 % en el costo de vida útil. Si este costo se desglosa (figura 6.2) se observa una reducción de casi el 100 % de los costos de reparación, siendo el costo del amortiguador el único valor relevante en el costo total de vida útil. Por lo tanto, la figura 6.1 muestra que el punto con el costo de vida útil máximo es también el del máximo valor de coeficiente de amortiguamiento que está ligado directamente con el tamaño y el precio del amortiguador. Además, a medida que el costo de vida útil disminuye lo hace también el costo de los amortiguadores y su capacidad de amortiguamiento lo que hace aumentar los daños para sismos de gran magnitud que está asociado a un aumento del umbral de costo de reparación como muestra la figura

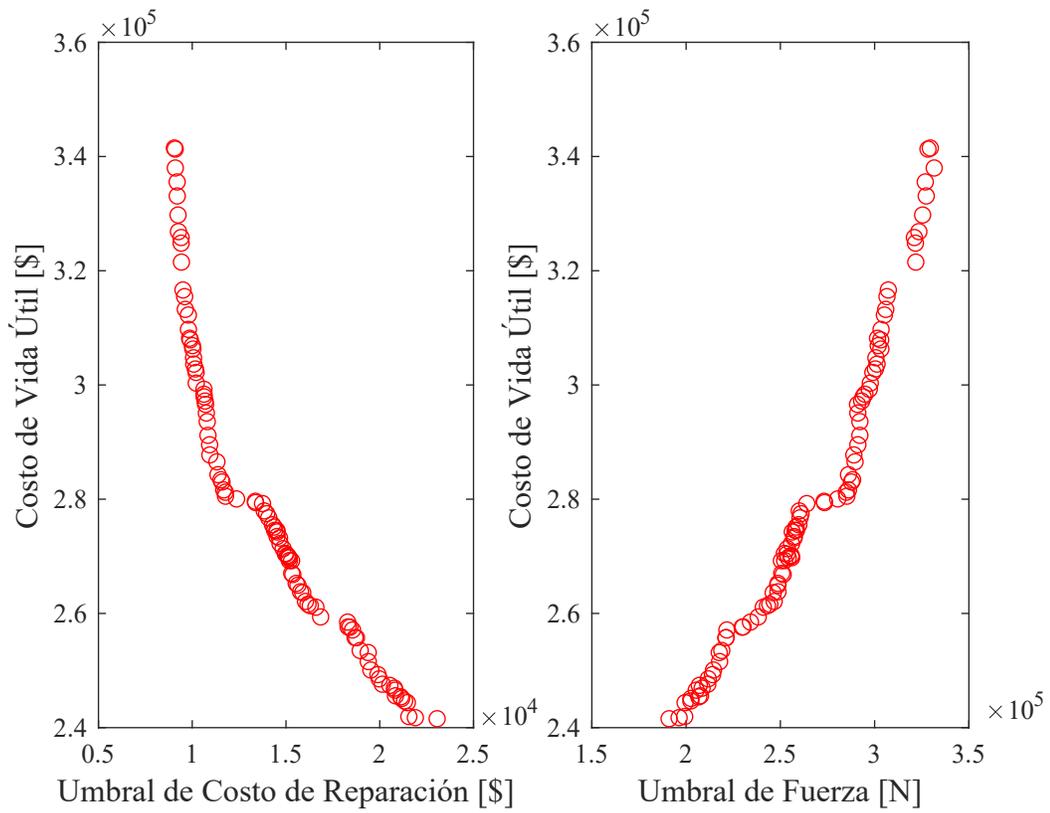


Figura 6.1: Valores óptimos del frente Pareto para el costo de vida útil y umbral de costo de reparación para el modelo para suelo tipo A (roca) de cuatro pisos. Como referencia se tiene que el costo de vida útil para el mismo edificio pero sin amortiguadores viscosos es de \$ 1.400.000

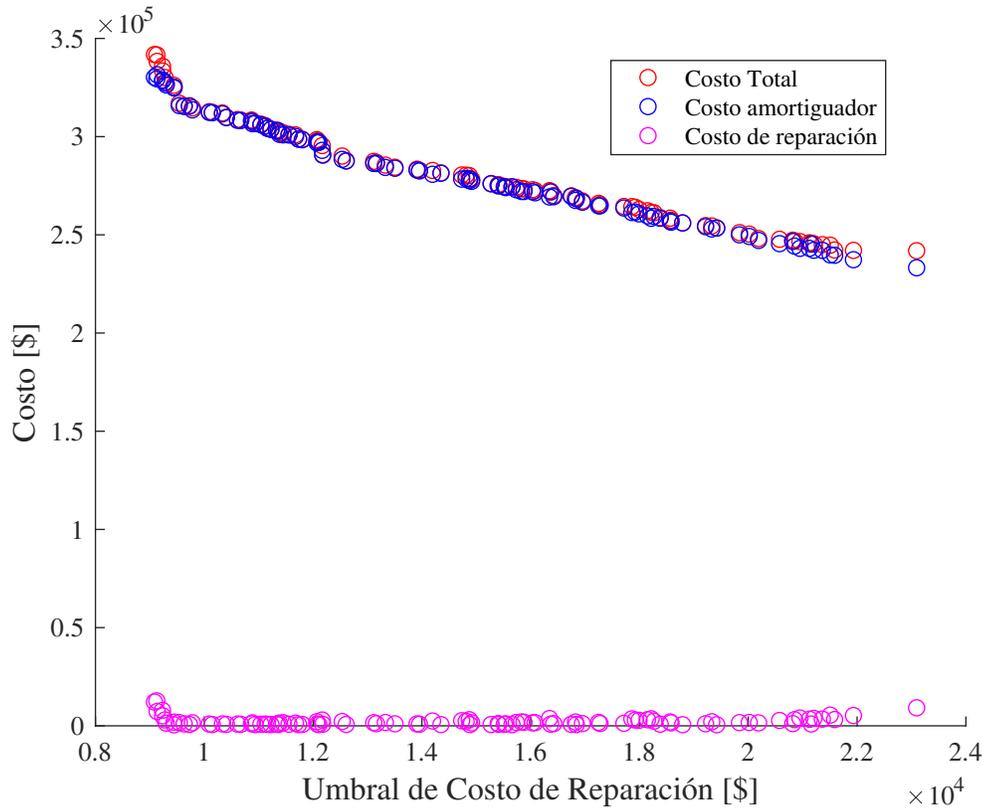


Figura 6.2: Desglose de frente Pareto de costo de vida útil en costos de reparación y costo de amortiguador para edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca)

6.1.

Al realizar el análisis del costo de vida útil para cada uno de los amortiguadores de los pisos del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) (figura 6.3), es posible apreciar que a medida que aumenta el costo de vida útil el coeficiente de amortiguamiento para todos los pisos aumenta también, tendencia que coincide con lo mostrado en las figuras 6.1 y 6.2. Adicionalmente, se observa que los pisos inferiores presentan mayores coeficientes de amortiguamiento que se explica por estar en contacto directo con los movimientos sísmicos del suelo cuya energía es disipada a medida que sube a los pisos superiores del edificio.

Es importante destacar que el valor base A_D y el factor de escalamiento del amortiguador, β_D mostrados en la ecuación 3.2, corresponden a una marca específica de amortiguadores (Taylor Devices) y que en el mercado existen otras compañías que los producen con curvas de precios distintos, por lo que se hace necesario considerar variaciones a la curva de costos

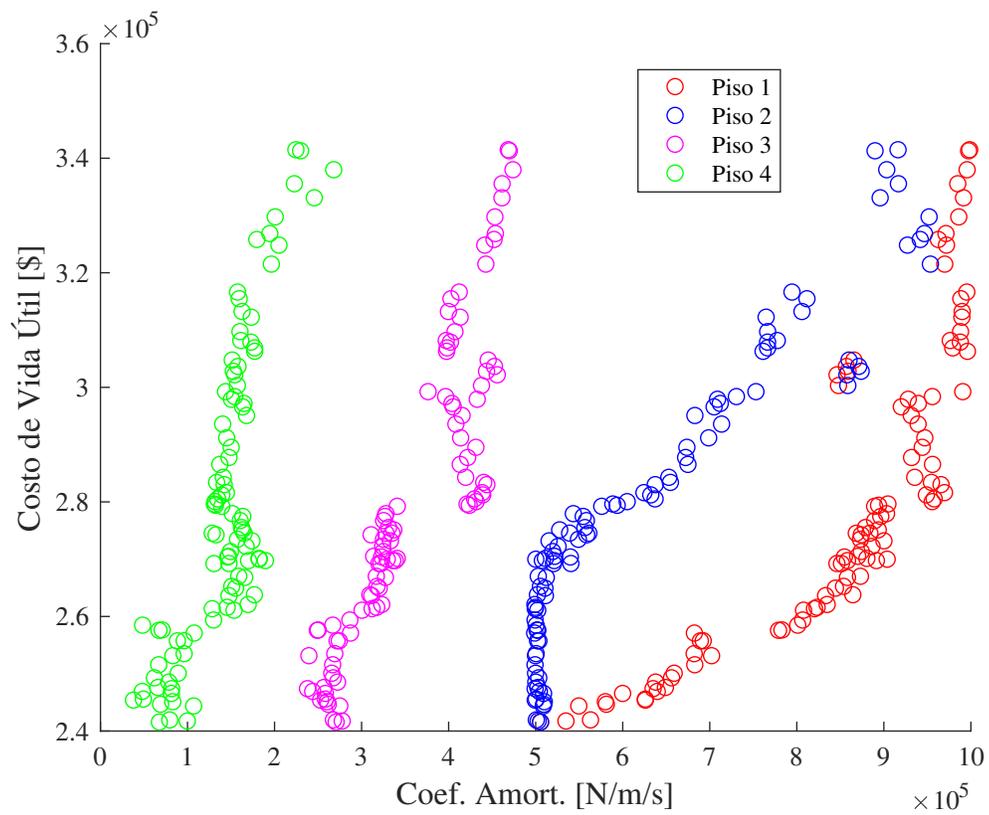


Figura 6.3: Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca)

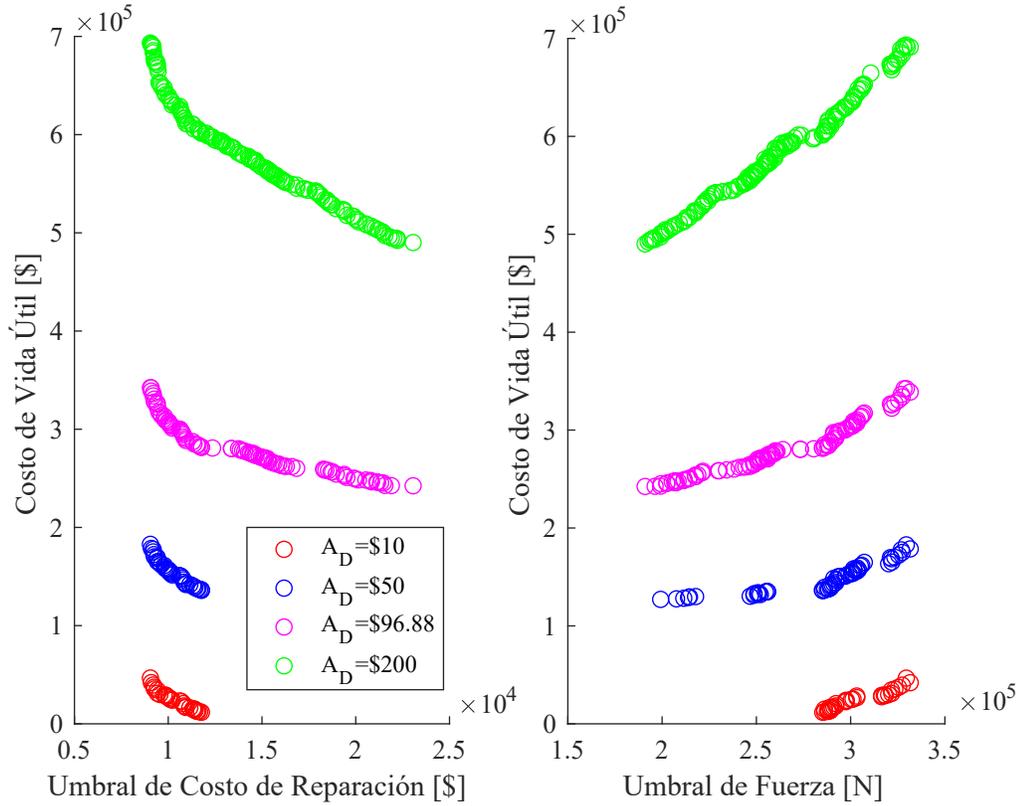


Figura 6.4: Valores óptimos de costo de vida útil de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos precios base A_D

de los amortiguadores.

En la figura 6.4 se presentan los valores óptimos para distintos precios base A_D de los amortiguadores viscosos según la ecuación 3.2. Donde se muestran que para precios base altos, los frentes Pareto son más extensos y por lo tanto con mayor rango de valores óptimos. Al comparar estos resultados con los de la figura 6.6 se observa que a medida que el precio del amortiguador es mas barato, se tiende a seleccionar el amortiguador de mayor capacidad.

En la figura 6.5 se analizan los frentes Pareto de las configuraciones óptimas de amortiguadores viscosos para distintos factores de escalamiento, donde se observa que para valores altos de β_D el coeficiente de amortiguamiento ligado al tamaño de los amortiguadores es muy relevante para el costo de vida útil. Es decir que existe una gran variación del costo de vida útil al cambiar el coeficiente de amortiguamiento, mientras que para β_D pequeños las variaciones de costos son pequeñas.

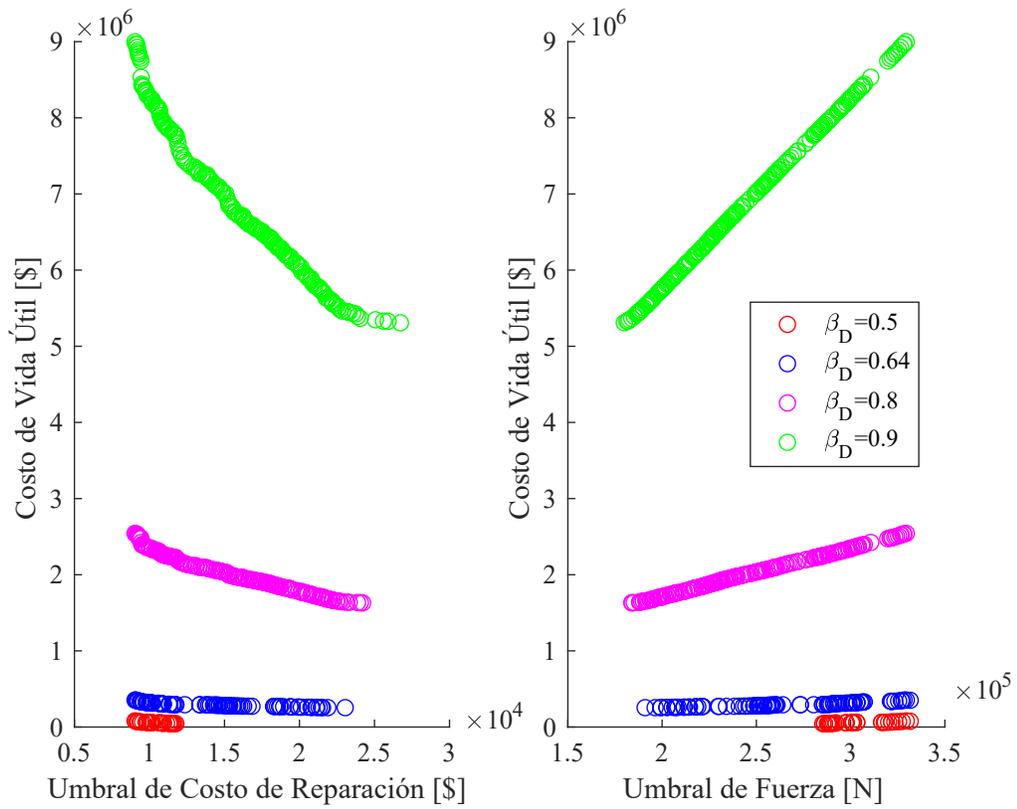


Figura 6.5: Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos factores de escalamiento β_D

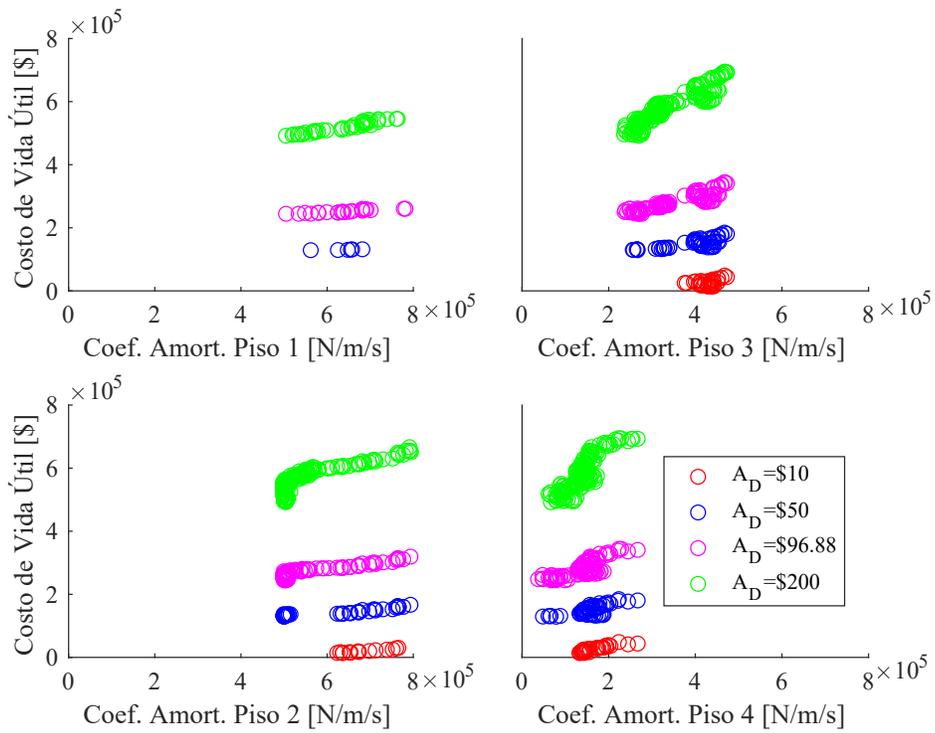


Figura 6.6: Valores óptimos de costo de vida útil de los amortiguadores de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D

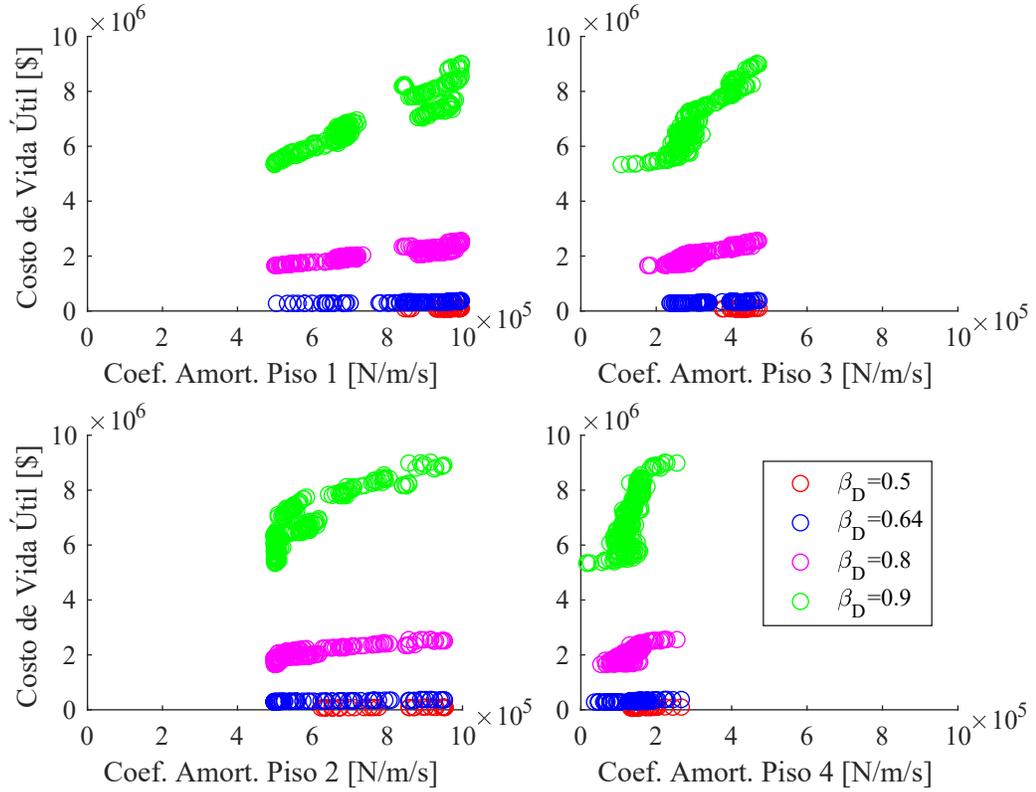


Figura 6.7: Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de un edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D

En la figura 6.6 se muestran los valores óptimos de costo de vida útil y coeficiente de amortiguamiento de los amortiguadores de cada piso del edificio para distintos valores base. Aquí se observa que para precios base bajos se tiende a escoger los amortiguadores con mayor capacidad de amortiguamiento.

En la figura 6.7, se muestran los valores óptimos de los amortiguadores viscosos de cada piso para distintos precios base donde se observa que para factores de escalamiento β_D mas altos el coeficiente de amortiguamiento afecta mas el costo de vida útil. Es decir que la diferencia de costo de vida útil es mayor para distintos coeficientes de amortiguamiento en amortiguadores con factor de escalamiento mayor. Además, se observa que en los pisos inferiores los valores de c_D son menores debido a que están en contacto directo a las cargas dinámicas del suelo ante sismos, mientras que en los pisos superiores estos efectos disminuyen.

Después, en la figura 6.8 se presentan los frentes Pareto de todos los modelos de cuatro

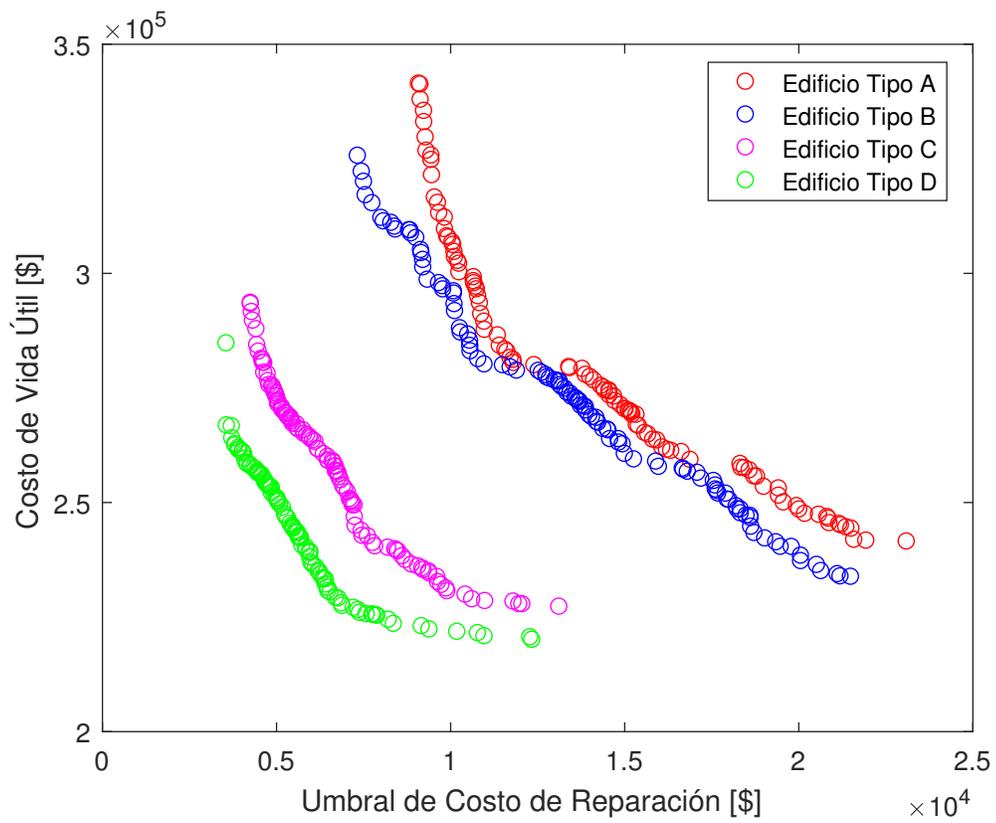


Figura 6.8: Curvas Pareto de edificios de cuatro pisos

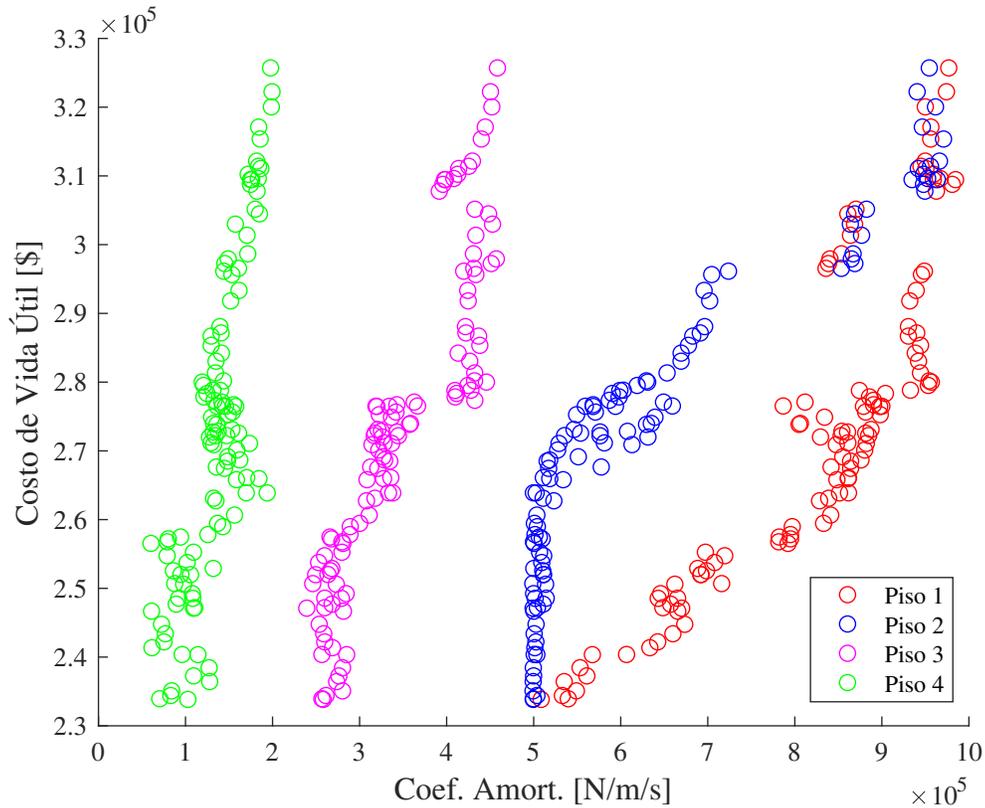


Figura 6.9: Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo B

pisos, donde se muestra que el edificio diseñado para suelo tipo roca presenta configuraciones óptimas de amortiguadores viscosos con valores de umbral de costos de reparación y de vida útil más altos que el resto de las estructuras. Esto se debe a que posee un diseño más flexible que permite mayores deformaciones y por lo tanto es más susceptible a sufrir daños ocasionados por sismos de gran envergadura en comparación con el resto de las estructuras que son mas rígidas.

Las figuras 6.9 , 6.10 y 6.11 muestran los valores óptimos para los amortiguadores de cada piso del resto de los edificios de cuatro pisos. Se puede observar que a medida que el suelo en que el edificio diseñado es de peor calidad los costos de vida disminuyen al tener un diseño mas rígido que el resto.

La siguiente parte de los resultados analizados corresponden al modelo del edificio de ocho pisos en suelo tipo A (roca). La figura 6.12 muestra los valores óptimos en la proyección de la

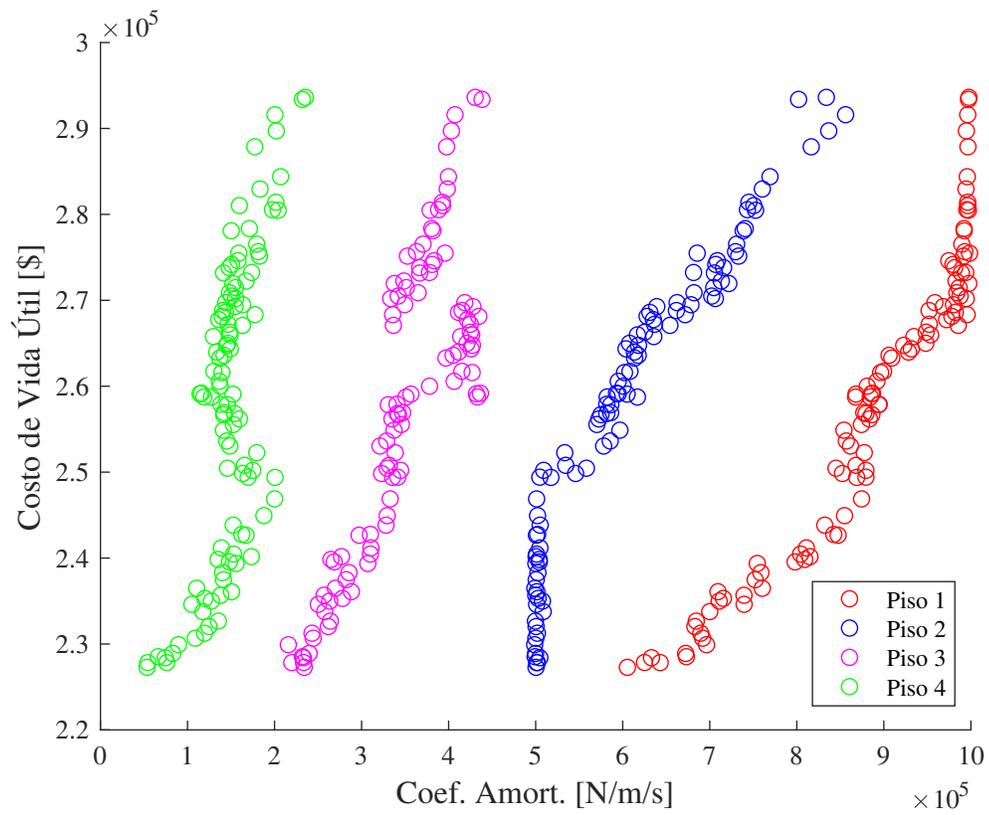


Figura 6.10: Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo C

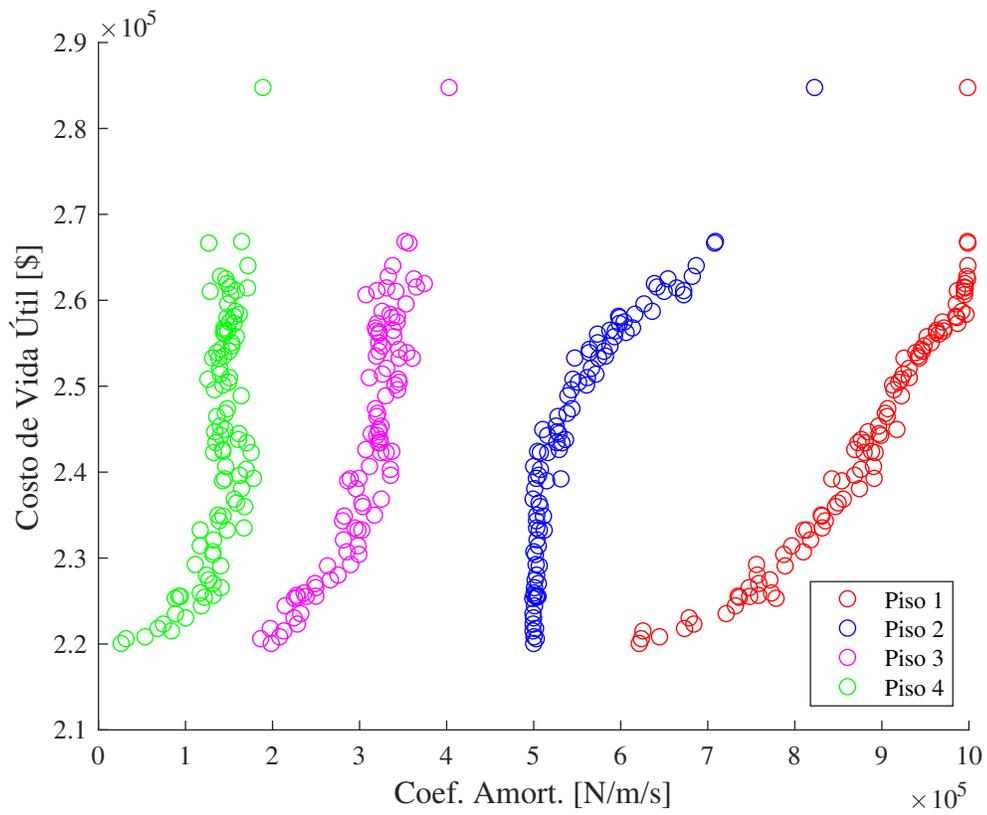


Figura 6.11: Valores óptimos para amortiguadores de cada piso del edificio de cuatro pisos diseñado para suelo tipo D

curva de Pareto del modelo en los planos de $C_{thresh}-C_l(\varphi)$ y $F_{thresh}-C_l(\varphi)$. Además, se agrega el caso de amortiguadores con coeficiente de amortiguamiento $c_D = 0$. Se pueden observar los dos extremos de cada frente Pareto, siendo de mayor costo de vida útil $C_l(\varphi)$ y menor costo de reparación C_{thresh} la configuración de rechazo al riesgo. Mientras que el otro caso corresponde a riesgo neutral donde C_{thresh} es mayor y $C_l(\varphi)$ menor. Los resultados muestran que, tal como en el edificio de cuatro pisos, el solo hecho de agregar un amortiguador reduce de manera significativa las pérdidas por daños originadas por sismos. La reducción corresponde a un 90% del costo de vida útil $C_l(\varphi)$. Si este costo se desglosa (figura 6.13) se observa una reducción de casi el 100% de los costos de reparación, siendo el costo del amortiguador el único valor relevante en el costo total de vida útil. Por lo tanto en la figura 6.12 el punto con el costo de vida útil máximo es también el del máximo valor de coeficiente de amortiguamiento, mientras que el punto mínimo del costo de vida útil es coincidente también con el mínimo coeficiente de amortiguamiento.

En la figura 6.14 se presentan los valores óptimos para distintos precios base A_D de los amortiguadores viscosos según la ecuación 3.2. Donde se muestra tal como para el edificio de cuatro pisos que para precios base altos, los frentes Pareto son más extensos y por lo tanto con mayor rango de valores óptimos. Al comparar estos resultados con los de la figura 6.6 se observa que a medida que el precio del amortiguador es mas barato, se tiende a seleccionar el amortiguador de mayor capacidad.

En la figura 6.15 se analizan los frentes Pareto de las configuraciones óptimas de amortiguadores viscosos para distintos factores de escalamiento, donde se observa que para valores altos de β_D el coeficiente de amortiguamiento ligado al tamaño de los amortiguadores es muy relevante para el costo de vida útil. Es decir que existe una gran variación del costo de vida útil al cambiar el coeficiente de amortiguamiento, mientras que para β_D pequeños las variaciones de costos son pequeñas. En las figuras 6.16, 6.17 se muestran los valores óptimos de costo de vida útil y coeficiente de amortiguamiento de los amortiguadores de cada piso del edificio para distintos valores base. Aquí se puede apreciar la presencia de ruido en los resultado de los cuatro pisos superiores. Mientras que para los pisos inferiores se observa que, a diferencia del edificio de cuatro pisos, no hay una clara tendencia que para precios base menores se tienda a escoger los amortiguadores con mayor capacidad de amortiguamiento.

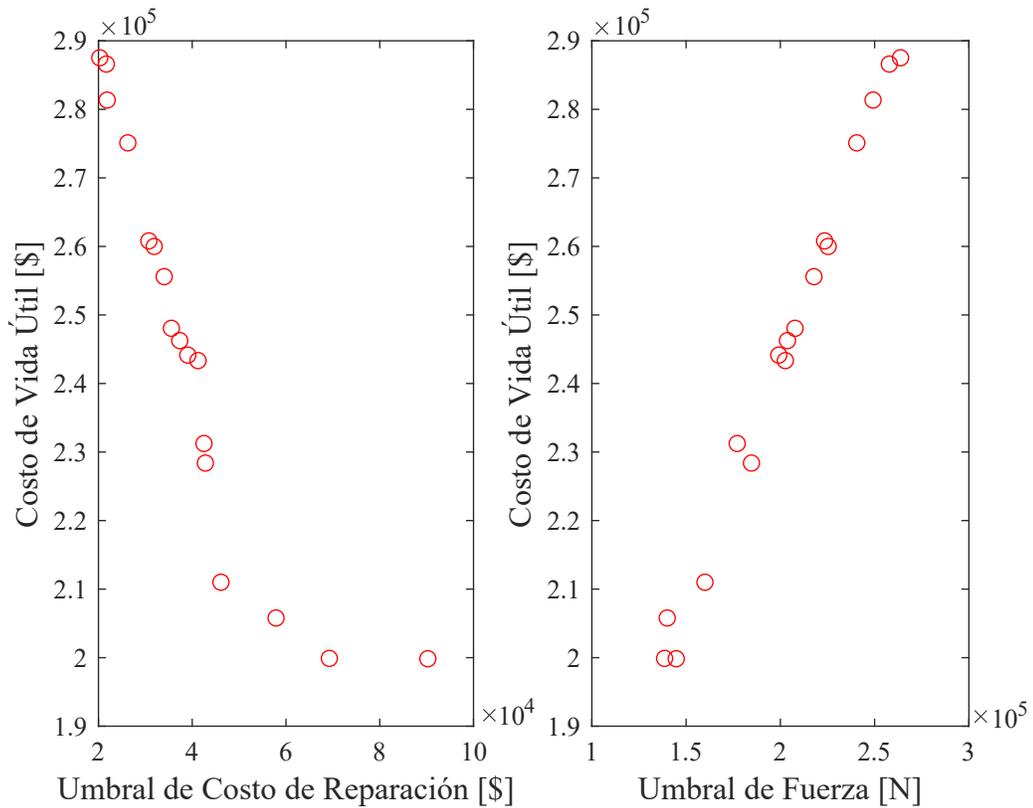


Figura 6.12: Valores óptimos del frente Pareto para costo de vida útil y umbral de costo de reparación para el modelo para suelo tipo A (roca) de ocho pisos. Como referencia se tiene que el costo de vida útil es \$ 3.060.000

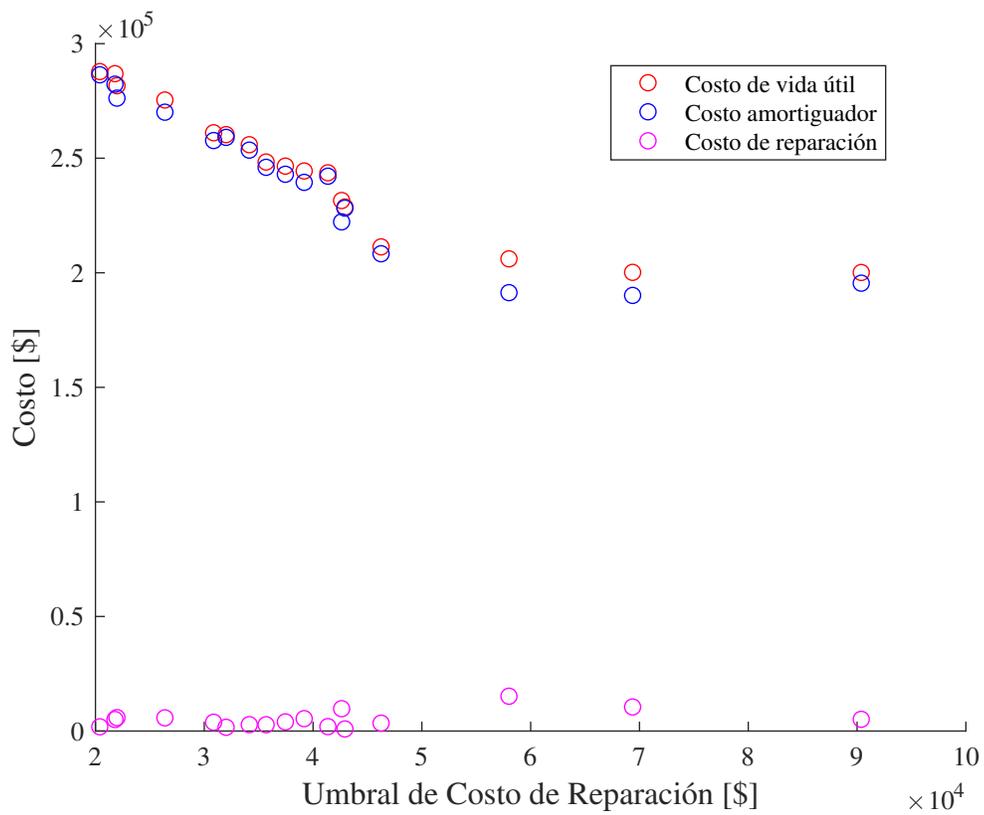


Figura 6.13: Desglose de frente Pareto de costo de vida útil en costos de reparación y costo de amortiguador para edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca)

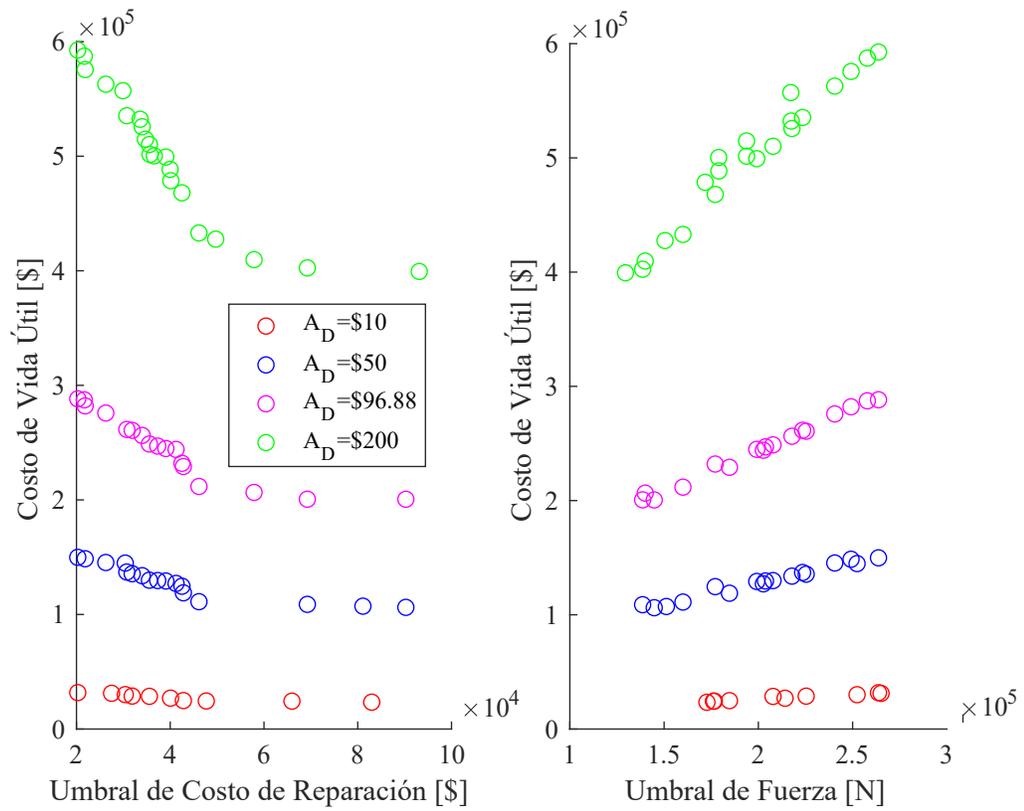


Figura 6.14: Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos precios base A_D

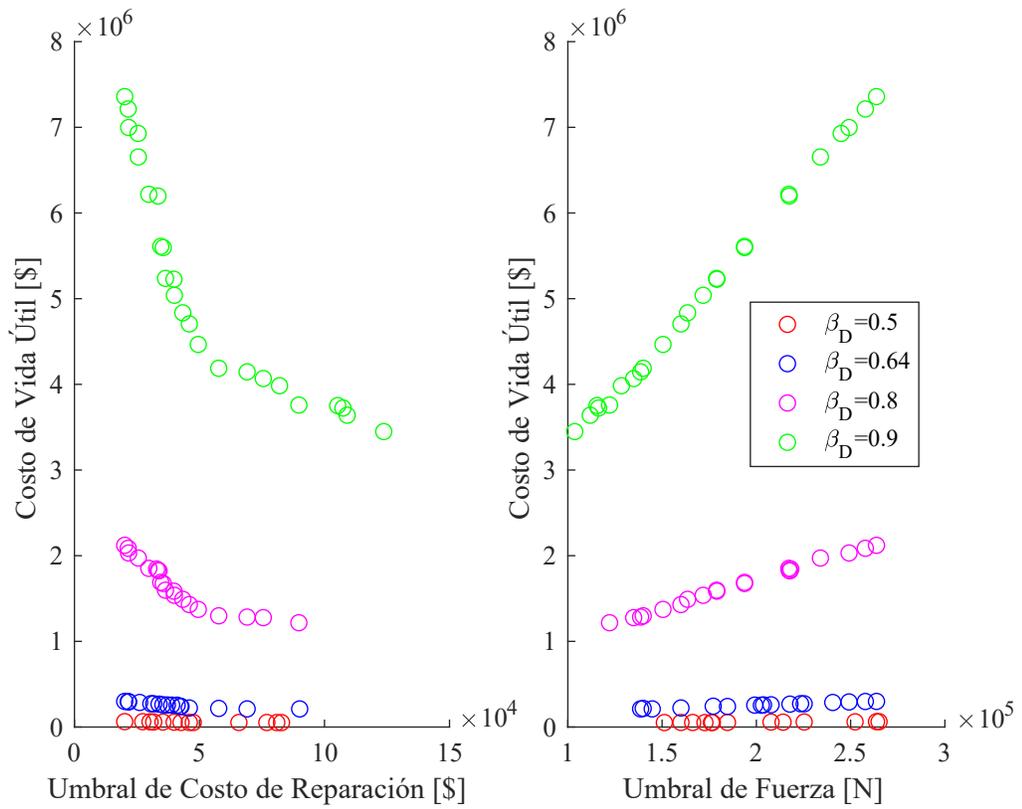


Figura 6.15: Valores óptimos de costo de vida útil de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) con amortiguadores con distintos factores de escalamiento β_D

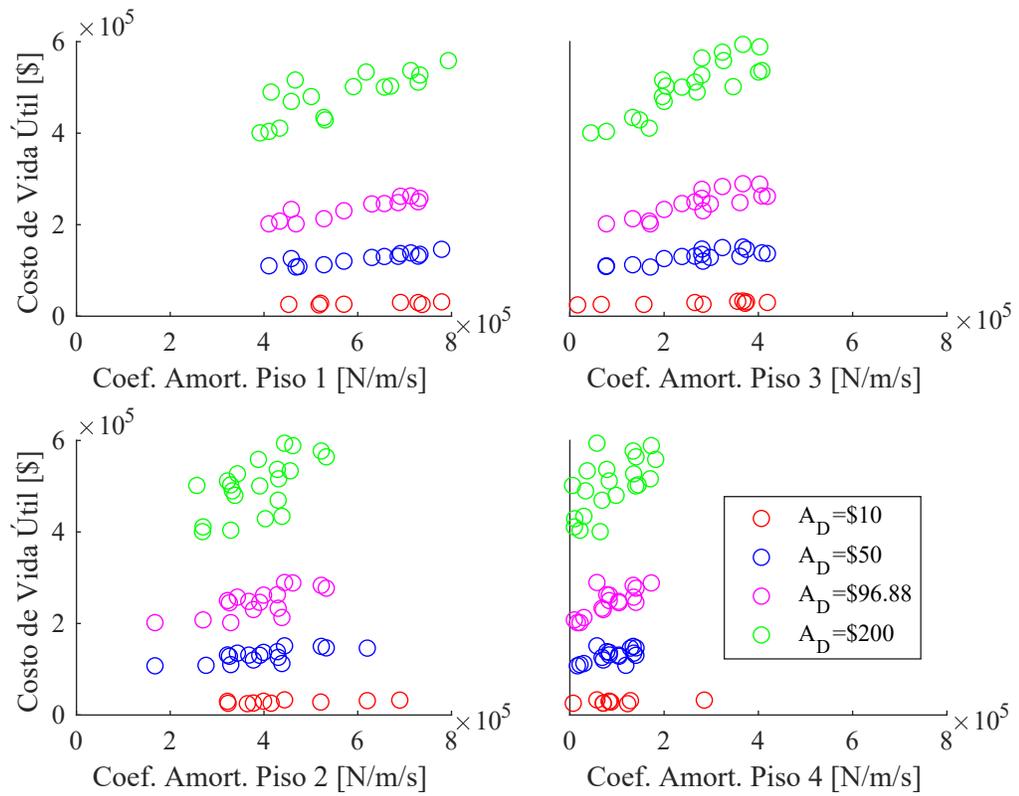


Figura 6.16: Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D (primeros 4 pisos)

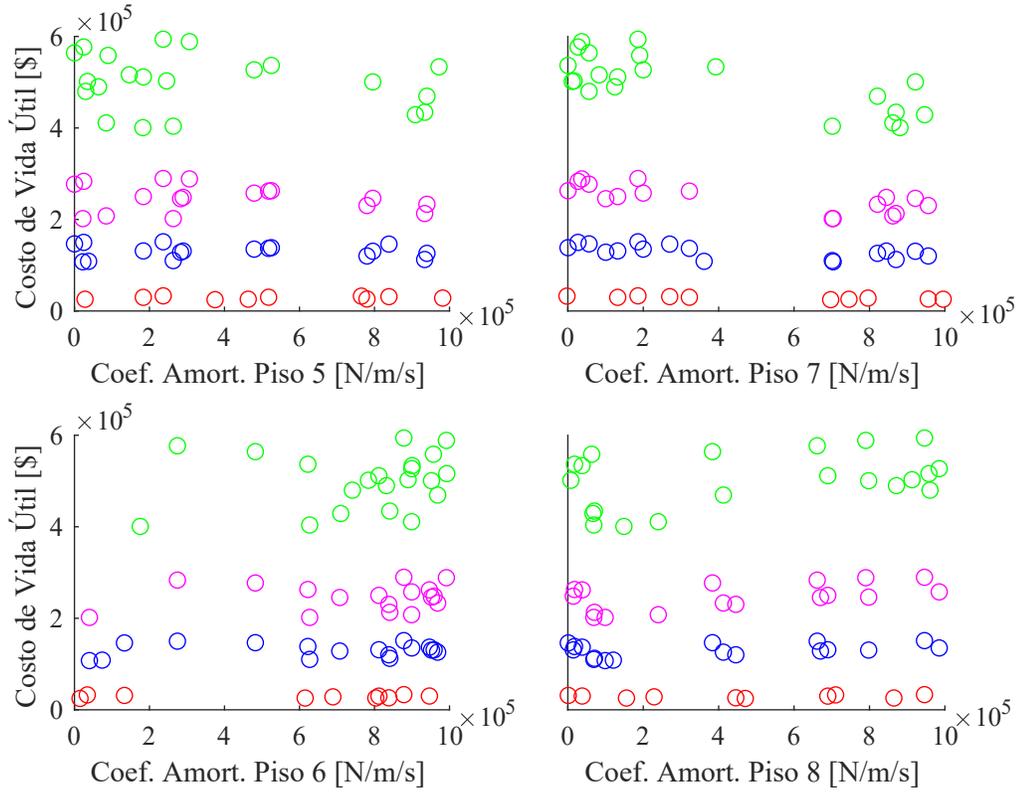


Figura 6.17: Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos precios base A_D (últimos 4 pisos)

Esto se debe al nivel de ruido que también presentan los resultados de los pisos inferiores.

Las figuras 6.18 y 6.19 muestran los valores óptimos de las configuraciones de amortiguadores para distintos factores de escalamiento. Se observa aquí que para los pisos superiores los frentes son más angostos y con valores de c_D menores. Esto se debe a que son los pisos inferiores los que están en contacto directo a las cargas dinámicas del suelo ante sismos, mientras que en los pisos superiores estos efectos disminuyen. También hay una tendencia de mayor variación de costo de vida útil con respecto al coeficiente de amortiguamiento para factores de escalamientos mayores.

Después, en la figura 6.20 se muestran los frentes Pareto de todos los modelos de ocho pisos, donde se muestra que los frentes Pareto se cruzan entre sí. Por ejemplo, el edificio diseñado para roca presenta un costo de vida útil mas alto que el resto de las estructuras para un costo de reparación de 10 % mayor a \$ 50000.

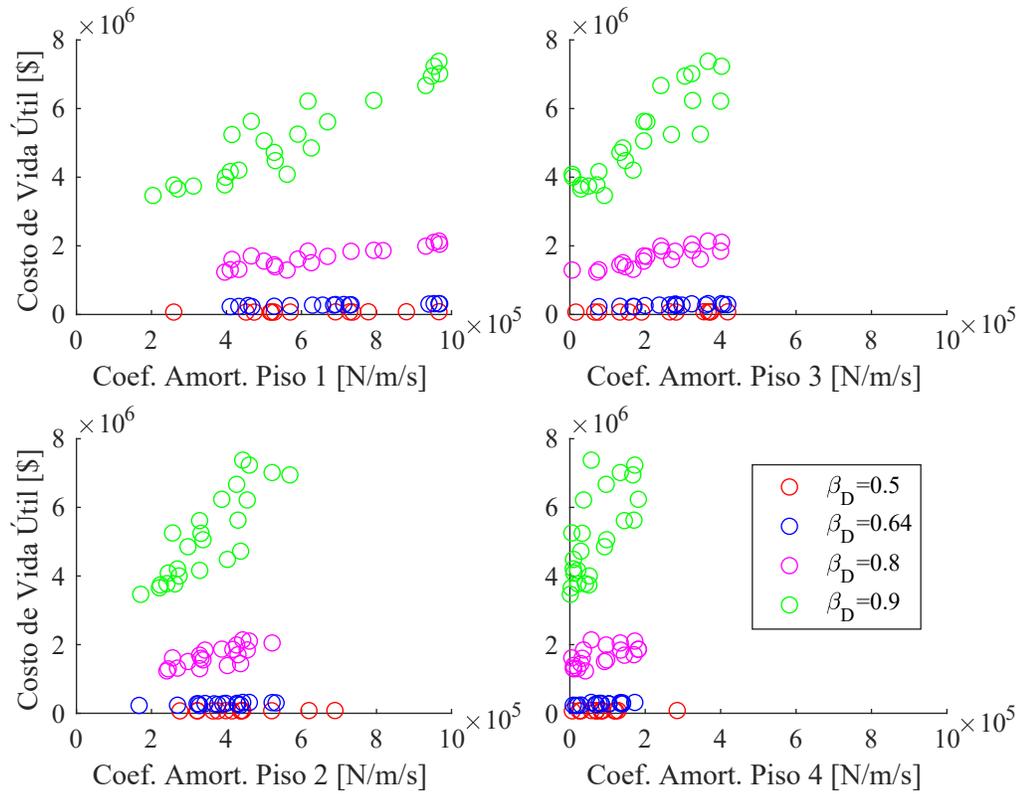


Figura 6.18: Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D (primeros 4 pisos)

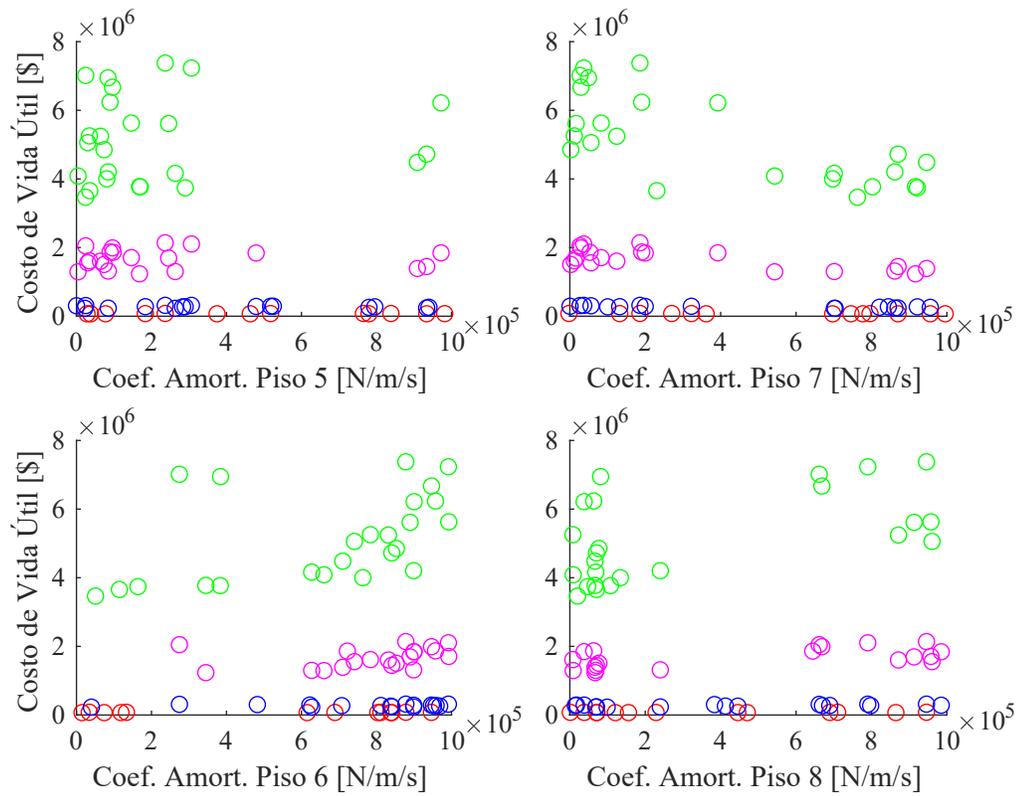


Figura 6.19: Valores óptimos de costo de vida útil de amortiguadores de edificio de ocho pisos diseñado para suelo tipo A (roca) para distintos factores de escalamiento β_D (últimos 4 pisos)

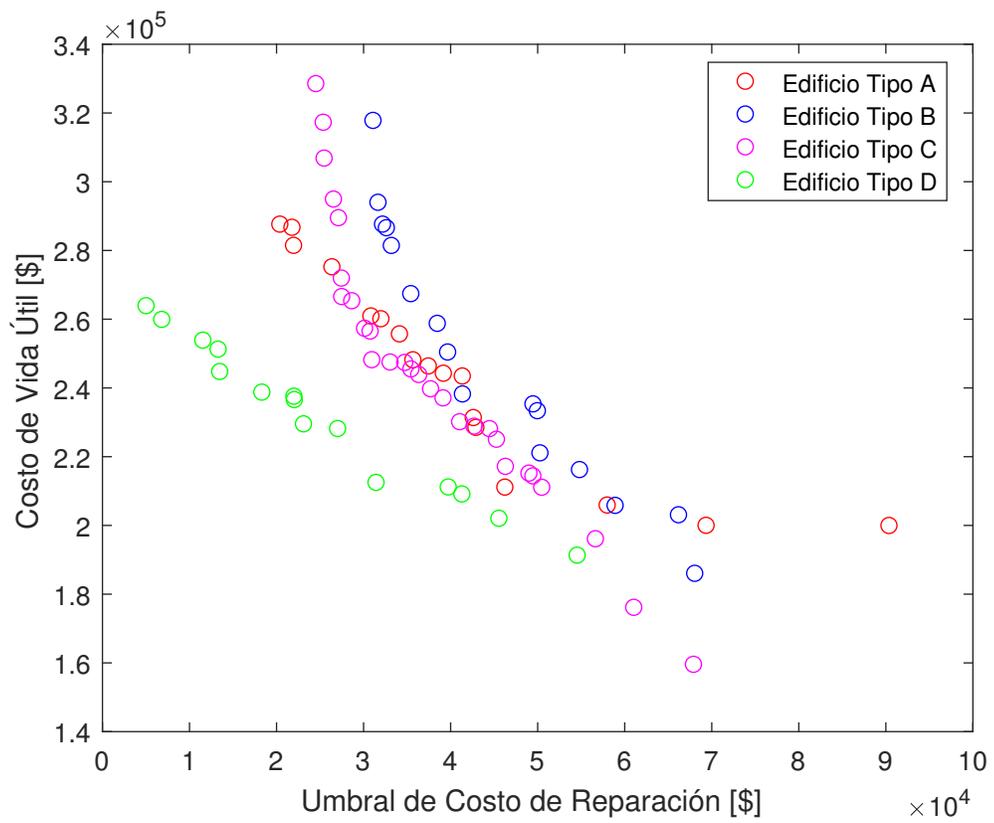


Figura 6.20: Curvas Pareto de edificios de ocho pisos

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Para realizar un diseño de amortiguadores viscosos se implementó un marco metodológico que considera un análisis de costo de vida útil que incluye el costo inicial del dispositivo y las futuras pérdidas por sismos. También, este esquema permitió considerar diferentes curvas de precios de los amortiguadores viscosos en base a la capacidad de amortiguamiento. Adicionalmente, para incorporar en el esquema de diseño las incertidumbres presentes en la descripción de la amenaza sísmica y en el comportamiento de la estructura elegida se optó por un esquema probabilístico. El que además permitió de manera efectiva seleccionar amortiguadores viscosos basado en criterios de riesgo que mejoran la capacidad de decisión ante el impacto de sismos poco probables pero altamente catastróficos. Posteriormente, Se realizó una optimización multiobjetivo que dio como resultado un rango de valores óptimos que considera los distintos criterios de costos y riesgos mencionados anteriormente con el fin de que el mandante del edificio escoja el diseño que mas le acomode en base a sus intereses económicos. Para poner a prueba el marco metodológico se implementaron 4 modelos representativos de edificios de marcos de acero de cuatro pisos y 4 de ocho pisos. Estos edificios fueron seleccionados por ser diseñados en base a los distintos tipos de suelo y zonas sísmicas de la amenaza sísmica chilena.

Finalmente, el esquema de trabajo permite que se puedan realizar a futuro nuevos análisis con registros sísmicos de otros tipos de suelo, además de poder comparar los resultados con edificios de distinta estructuración y con otros sistemas de amortiguación para así encontrar

soluciones constructivas que sean más eficientes y sustentables que las actuales.

A futuro se espera que las limitaciones actuales de recursos computacionales presentes en este esquema de trabajo puedan solucionarse para así considerar un análisis de estructuras más complejas y consistentes con la realidad.

Bibliografía

- [1] Katherine Adams, Mohamed Osmani, Tony Thorpe, and Jane Thornback. Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers. 2017.
- [2] Dan M Frangopol, Maarten-Jan Kallen, and Jan M van Noortwijk. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions. *Progress in structural engineering and Materials*, 6(4):197–212, 2004.
- [3] World Steel Association et al. Steel in the circular economy: a life cycle perspective. *Rue Colonel Bourg*, 120, 2015.
- [4] Muiris C Moynihan and Julian M Allwood. The flow of steel into the construction sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 68:88–95, 2012.
- [5] Jean Pierre Andrés Espinoza Segura. *Comparación técnico-económica entre edificios de acero y hormigón armado, considerando diferentes alturas y plantas iguales, con diseños basados en la NCH433 OF. 96*. PhD thesis, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2016.
- [6] Ioannis Gidaris and Alexandros A Taflanidis. Performance assessment and optimization of fluid viscous dampers through life-cycle cost criteria and comparison to alternative design approaches. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(4):1003–1028, 2015.
- [7] M Martinez-Rodrigo and ML Romero. An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. *Engineering Structures*, 25(7):913–925, 2003.

- [8] Mahendra P Singh and Luis M Moreschi. Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(4):955–976, 2002.
- [9] Rita Greco, Jennifer Avakian, and Giuseppe Carlo Marano. A comparative study on parameter identification of fluid viscous dampers with different models. *Archive of Applied Mechanics*, 84(8):1117–1134, 2014.
- [10] Taylor Devices Inc. Taylor devices, 2019.
- [11] Ltd Well-Link Industry Co. Well link, 2019.
- [12] Izuru Takewaki. *Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes*. John Wiley & Sons, 2011.
- [13] JK Whittle, MS Williams, TL Karavasilis, and A Blakeborough. A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4):540–560, 2012.
- [14] Oren Lavan and Oded Amir. Simultaneous topology and sizing optimization of viscous dampers in seismic retrofitting of 3d irregular frame structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(9):1325–1342, 2014.
- [15] Andrew S Whittaker, Michael C Constantinou, Oscar M Ramirez, Martin W Johnson, and Christis Z Chrysostomou. Equivalent lateral force and modal analysis procedures of the 2000 nehrp provisions for buildings with damping systems. *Earthquake Spectra*, 19(4):959–980, 2003.
- [16] Oscar M Ramirez, Michael C Constantinou, Juan D Gomez, Andrew S Whittaker, and Christis Z Chrysostomou. Evaluation of simplified methods of analysis of yielding structures with damping systems. *Earthquake Spectra*, 18(3):501–530, 2002.
- [17] Alexandros A Taflanidis and Jeffrey T Scruggs. Performance measures and optimal design of linear structural systems under stochastic stationary excitation. *Structural Safety*, 32(5):305–315, 2010.
- [18] Alexandros A Taflanidis and James L Beck. Life-cycle cost optimal design of passive

- dissipative devices. *Structural Safety*, 31(6):508–522, 2009.
- [19] R Ruiz, AA Taflanidis, A Giaralis, and D Lopez-Garcia. Risk-informed optimization of the tuned mass-damper-inerter (tmdi) for the seismic protection of multi-storey building structures. *Engineering Structures*, 177:836–850, 2018.
- [20] Rafael Ruiz, Alexandros A Taflanidis, Diego Lopez-Garcia, and Christopher R Vetter. Life-cycle based design of mass dampers for the chilean region and its application for the evaluation of the effectiveness of tuned liquid dampers with floating roof. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(3):943–970, 2016.
- [21] Christopher R Vetter, Alexandros A Taflanidis, and George P Mavroeidis. Tuning of stochastic ground motion models for compatibility with ground motion prediction equations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(6):893–912, 2016.
- [22] Christine A Goulet, Curt B Haselton, Judith Mitrani-Reiser, James L Beck, Gregory G Deierlein, Keith A Porter, and Jonathan P Stewart. Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building—from seismic hazard to collapse safety and economic losses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13):1973–1997, 2007.
- [23] James C Spall. *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*, volume 65. John Wiley & Sons, 2005.
- [24] Pablo Alberto Báez Romero. Evaluación del desempeño sísmico de marcos a momento en edificios de baja y mediana altura. 2018.
- [25] José Antoine Villanueva Riffo. Modelo computacionalmente eficiente de marcos de acero incluyendo efectos no-lineales. 2017.
- [26] Ronald Hamburger. Fema p58 seismic performance assessment of buildings. *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering*, 01 2014.