

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Cálculo de curvas de fragilidad de múltiples tipologías estructurales  
implementando algoritmos lógicos desarrollados en Python.**

**AUTORES:**

**Robalino González, Richard Sebastián  
Zapata López, Juan Carlos**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, M.Sc.**

**Guayaquil, Ecuador  
24 de febrero del 2025**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

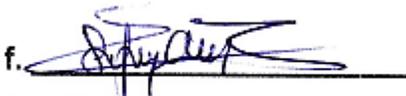
Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Robalino González, Richard Sebastián y Zapata López, Juan Carlos**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

**TUTOR:**

f. 

**Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, M.Sc.**

**DIRECTORA DE LA CARRERA**

f. 

**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther M.Sc.**

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2025**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Robalino González, Richard Sebastián**  
**Zapata López, Juan Carlos**

**DECLARAMOS QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Cálculo de curvas de fragilidad de múltiples tipologías estructurales implementando algoritmos lógicos desarrollados en Python**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2025**

**AUTORES:**

f.  \_\_\_\_\_

**Robalino González, Richard Sebastián**

f.  \_\_\_\_\_

**Zapata López, Juan Carlos**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Robalino González, Richard Sebastián**  
**Zapata López, Juan Carlos**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Cálculo de curvas de fragilidad de múltiples tipologías estructurales implementando algoritmos lógicos desarrollados en Python**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 24 días del mes de febrero del año 2025**

**AUTORES:**

f. \_\_\_\_\_

**Robalino González, Richard Sebastián**

f. \_\_\_\_\_

**Zapata López, Juan Carlos**

# REPORTE COMPILATIO

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**  
magister

sebastian.robalino\_juan.zapata

**3%**  
Textos sospechosos

**2% Similitudes**  
0% similitudes entre conillas  
1% entre las fuentes mencionadas  
**6% Idiomas no reconocidos**  
**1% Textos potencialmente generados por IA**

Nombre del documento: sebastian.robalino\_juan.zapata.pdf  
ID del documento: dfe7eb47be4693c4ceaa7761b3d582ef091a1e0ac  
Tamaño del documento original: 2.03 MB  
Autores: []

Depositante: Clara Catalina Gius Cevallos  
Fecha de depósito: 20/2/2025  
Tipo de carga: Interface  
Fecha de fin de análisis: 20/2/2025

Número de palabras: 14.547  
Número de caracteres: 100.474

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<b>AJILA_MATEO_MOLINA_CARLOS_FINAL_TESIS.docx</b>   <a href="#">AJILA_MATEO_MOLINA_CARLOS_FINAL_TESIS.docx</a>   #560774 El documento proviene de mi biblioteca de referencias 51 fuentes similares	11%		Palabras idénticas: 11% (1673 palabras)
2	<b>repositorio.ucsg.edu.ec</b>   Cálculo de curvas de fragilidad mediante código de Python... <a href="#">http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/23664/1/UCSG-CIBB-23268.pdf</a> 35 fuentes similares	11%		Palabras idénticas: 11% (1608 palabras)
3	<b>www.revistaciencia.amc.edu.mx</b> <a href="#">https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/3_3TDF/Peligrosismo.pdf</a> 3 fuentes similares	6%		Palabras idénticas: 6% (893 palabras)
4	<b>dspace.ups.edu.ec</b> <a href="#">https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2802/1/TT0661.pdf</a> 16 fuentes similares	5%		Palabras idénticas: 5% (730 palabras)
5	<b>hdl.handle.net</b>   Contribuciones a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edifi... <a href="#">http://hdl.handle.net/2117/28315</a> 10 fuentes similares	4%		Palabras idénticas: 4% (583 palabras)

## Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<b>132.248.0.105</b>   Funciones de confiabilidad para diseño sísmico de edificios esbeltos... <a href="#">http://132.248.0.105/prod013/biblioteca/0687705/mateo.html</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
2	<b>localhost</b>   Centro geriátrico en el Cantón Marcelino Maridueña... <a href="#">http://localhost:8080/html/bitstream/3317/4564/1/UCSG-FRE-ARQ-CA-72.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
3	<b>hdl.handle.net</b>   Determinación de la seguridad sísmica en escuelas del distrito de C... <a href="#">http://hdl.handle.net/20506/14074/2508</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
4	<b>Documento de otro usuario</b> #44158 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (33 palabras)
5	<b>biblioteca digital.udea.edu.co</b> <a href="#">https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14900/1/MarinLobian_2010_EvaluacionDes...</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)

**Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)** Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	<a href="https://blogs.upm.es/geolersa/tecuador/riesgo-sismico-en-ecuador/">https://blogs.upm.es/geolersa/tecuador/riesgo-sismico-en-ecuador/</a>
2	<a href="http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8866">http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8866</a>
3	<a href="https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_De">https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_De</a>

TUTOR:

f.   
Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, M.Sc.

## AGRADECIMIENTO

Primero que nada, agradecer a Dios por haberme acompañado en todo este camino, el cual no fue fácil, estuvo lleno de obstáculos, pero Dios me ha dado la fuerza, la voluntad para sobre pasar los diversos obstáculos que hubo en el camino, además que me dio resistencia para salir adelante en momento donde todo parecía ir a mal el me hizo ver el camino hacia la luz y salir adelante. Por protegerme y darme la bendición de estar un día más respirando y viviendo el presente juntos a las personas que más estimo y quiero.

Como no empezar por las personas que me dieron la vida, mi papa Rodrigo Richard Robalino Centeno y mi mama Sussy Jacqueline González Zambrano, la principal causa por la que donde me encuentro ahora, si no fuera por ellos no sé qué sería de mí, es por eso por lo que les agradezco por sus consejos, por su apoyo en toda mi etapa de estudio escuela, colegio y ahora universidad, por su paciencia que han tenido en mí, y por el amor que me han dado y me siguen dando. Por sus experiencias y conocimiento que me forjan como persona de bien. Más bien yo me siento afortunado de tenerlos como papas y son mi ejemplo por seguir. Los adoro.

A mi hermana Kimberly Nicole Robalino González por el simple hecho de que ella es mi otro ejemplo por seguir, con tantos logros que ha obtenido a su temprana edad, agradecerte por apoyarme, por guiarme y siempre darme cariño. Además de motivarme e inspirarme a nunca bajar los brazos y aconsejarme con tu sabiduría. Como no agradecer a mis tíos tanto de parte de mi papa como de mi mama, ya que ellos siempre han estado al pendiente de mí y mi avance en la carrera, con cada llamada con cada visita dándome buenas vibras para seguir adelante. A mis primos de la misma manera, y a mis abuelitos que por más que solo tenga uno en la tierra. Les agradezco por todo el cariño que me han brindado, ya que su nobleza que tenían en el alma me llenaba de calma y asi mismo solo deseaban positivismo en mí. Quiero también agradecer a mis padrinos Juan Robalino y Rocío Sánchez que ellos han estado dispuestos a ayudarme en todo lo posible y por su cariño.

A nuestro tutor el Ing. Jaime Hernández, muchas gracias por confiar en nosotros durante el desarrollo de esta tesis. Gracias por siempre recibirnos en su oficina, discutir acerca del trabajo y ayudarnos con su tiempo en buscar soluciones. Lo admiro bastante y le deseo lo mejor.

Y, por último, pero no menos importante no puedo nombrarlos a todos porque son muchos agradecer a mis amigos del colegio, ya que con sus risas y sus palabras en las reuniones me han motivado a culminar esta hermosa carrera. Y a mis amigos también que logre conectar en la carrera gracias por todo y siempre confiar en mí, gracias por su honestidad y la buena amistad que hay entre nosotros. Gracias “Hostias”. Y claramente nombrar a mi compañero de tesis Juan Carlos Zapata López, gracias por la tan buena comunicación y más que toda la amistad que desarrollamos desde el primer día que entramos en la carrera.

**Richard Sebastián Robalino González**

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico con mucho cariño a mi familia, a mi papa, a mi mama, a mi hermana ya que cada uno de ellos han sido mis tres pilares principales, por lo que me mantuve en esta tan linda carrera, con ellos yo llevo una responsabilidad en mis hombros y una mochila cargada de buenas vibras que me han dado en el transcurso de estos años, además de motivaciones para seguir expandiendo mis estudios. Prometo no defraudarlos y espero seguir celebrando más logros juntos. Ya que su felicidad y sus sonrisas son mis ganas y motivaciones de seguir adelante y no detenerme. Gracias por absolutamente todo. Esto es para ustedes.

**Richard Sebastián Robalino González**

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por todo, gracias por haberme permitido llegar hasta aquí y por siempre bendecirme por un día más de vida. A la madre María y a Jesús, por escuchar mis oraciones y estar siempre protegido bajo su amparo.

Agradezco a mis padres, Juan Carlos y María Pía, por educarme para ser un hombre de bien, por todos los sacrificios que han hecho por mí y por todo su amor incondicional. Gracias por depositar toda su confianza en mí, por siempre estar a mi lado en los días más difíciles que he tenido. Las palabras me quedan cortas para expresarles, pero agradezco cada minuto que han estado ahí conmigo. No saben cuánto han influido en mi ustedes padre y madre.

Agradezco a mi abuelita Piedad, o como a mí me gusta decirle junto con mis hermanos 'Tita', por estar conmigo haciendo el rol de padre y madre cuando mis padres no estaban. Gracias por todo su amor incondicional, como si fuera su segundo hijo. Tita, le agradezco por ser parte del pilar de mi formación.

Agradezco a mis hermanos, Jorge Enrique y Pía Fiorella, por compartir momentos inolvidables, por sus juegos y bromas, y por motivarme por sacar una sonrisa día a día. Gracias por permitirme ser su guía y en alguien que puedan confiar plenamente, estoy agradecido de ser hermano mayor.

Agradezco a mi abuelo, tía y tío, Carlos, Viviana y Carlos Jr. por brindarme toda su apoyo y cariño, por apoyarme en cada decisión que he tomado, por aconsejarme para ser una persona de bien. Quiero agradecerles por dedicar su tiempo en mí.

Agradezco a mi Tutor, Ing. Jaime Hernández, por su confianza y por brindarme enfoques clave en el desarrollo de este trabajo. Ha sido de gran ayuda su guía dentro de este proceso educativo, junto con la del Ing. Carlos Molina y el ing. Adrián Pinos.

Por último, quiero agradecerles a mis amigos, que el tiempo me ha dado a lo largo de este trayecto y los que han estado conmigo desde el primer día en

conocernos, todos han sido importantes para mí, hemos compartidos experiencias, y conocimientos que no cambiaría por nada de este mundo. Y espero seguir contando con ellos en el futuro.

**Juan Carlos Zapata López**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico primero a Dios, por las virtudes, y por los obstáculos superados que han desembocado en el desarrollo de este trabajo.

Este logro también va dirigido a mi familia, por todo lo que me han brindado. Son mi fuente de motivación e inspiración para poder llegar hasta donde estoy hoy. Gracias por ayudarme a crecer como ser humano, enseñarme de todos sus valores y conocimientos. Les prometo no defraudarlos, y es por eso, yo comparto este logro con ustedes.

**Juan Carlos Zapata López**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

f.   
Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, M.Sc.

TUTOR

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.   
Ing. Federico von Buchwald de Janon, Ph.D.

DECANO

DECANO

f.   
Ing. Guillermo Ponce Vasquez, M. Sc

DOCENTE DE LA CARRERA

DOCENTE DE LA CARRERA

f.   
Ing. Barros Cabezas, José Ph.D.

OPONENTE

OPONENTE

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO</b> .....	5
1.1 PELIGRO SÍSMICO ANÁLISIS.....	5
1.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN SISTEMAS ESTRUCTURALES .....	6
1.3 RIESGO SÍSMICO.....	8
1.4 DESEMPEÑO SÍSMICO.....	9
1.4.1 NIVELES DE DESEMPEÑO SÍSMICO.....	10
1.4.2 NIVELES DE DESEMPEÑO SEGÚN EL ATC-40 .....	11
1.5 ESTADOS LIMITES DE DAÑOS .....	13
1.6 MATRIZ DE PROBABILIDAD DAÑO.....	16
1.7 TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES.....	17
1.7.1 DEFINICIÓN DE NOMENCLATURA.....	17
1.7.2 AGRUPACIÓN POR CLASES.....	18
1.8 MÉTODO NEWMARK .....	20
1.9 MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD (CSM) .....	21
1.9.1 CURVAS DE CAPACIDAD O PUSHOVER.....	24
1.9.2 ESPECTRO DE CAPACIDAD .....	25
1.9.3 ESPECTRO DE CAPACIDAD BILINEAL.....	28
1.9.4 PUNTOS DE DESEMPEÑO.....	30
1.10 METODOLOGÍA DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD.....	31

1.10.1	FEMA 440.....	31
1.10.2	MÉTODO “A” .....	32
1.10.3	MÉTODO “B” .....	36
1.10.4	MÉTODO “C” .....	37
1.11	CURVAS DE FRAGILIDAD.....	39
1.11.1	MÉTODO ANALÍTICO .....	41
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....</b>		<b>42</b>
2.1	REGISTROS SÍSMICOS .....	42
2.2	DATOS DE ANÁLISIS BILINEAL.....	44
2.3	FEMA 440 MÉTODO C (GRÁFICO).....	47
2.4	PUNTOS DE DESEMPEÑO FEMA 440 MÉTODO C .....	48
2.5	CURVAS DE FRAGILIDAD FEMA 440 MÉTODO C .....	51
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS .....</b>		<b>52</b>
3.1	RESULTADOS OBTENIDO FEMA 440 MÉTODO C.....	52
3.2	ANÁLISIS PARA OBTENCIÓN DE PUNTOS DE DESEMPEÑO FEMA 440 MÉTODO C .....	52
3.3	ACELERACIÓN ESPECTRAL ( $S_a$ ) vs PUNTOS DE DESEMPEÑO ( $S_d$ ) CURVA BILINEAL FEMA 440 MÉTODO C.....	53
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>60</b>
4.1	CONCLUSIONES .....	60
4.2	RECOMENDACIONES.....	61
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>62</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>66</b>
5.1 CÓDIGO MODIFICADO CON LA METODOLOGÍA FEMA-440, MÉTODO “C” 66	
5.2 Curvas de Fragilidad de Diversas Tipologías Estructurales.....	102

## ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Representación de distintos niveles de intensidad sísmica. (Fuente: Luis Esteva, 2018) .....	6
Imagen 2. Determinación de la deriva global correspondiente a un estado limite i. (Fuente: Vielma J.C, 2014) .....	16
Imagen 3. Proceso de estimación de la matriz de probabilidad de daño. (Fuente: Moreno & Bairán, 2012) .....	17
Imagen 4. Ejemplo de nomenclatura utilizada. (Fuente: Calderón, 2018).....	18
Imagen 5. Ejemplo de nomenclatura utilizada para las categorías. (Fuente: Calderón, 2018).....	19
Imagen 6. Representación gráfica del Método del Espectro de Capacidad. (Fuente: ATC-40 y FEMA 440) .....	22
Imagen 7. Conversión de Curva de Capacidad en Espectro de Capacidad. (Fuente: Hernández, 2022) .....	22
Imagen 8. Conversión del Espectro de Respuesta en Espectro de Demanda. (Fuente: Hernández, 2022) .....	23
Imagen 9. Curvas de capacidad y niveles de desempeño. (Fuente: Francisco Cisneros Sánchez, 2022) .....	23
Imagen 10. Representación de la curva Pushover. (Fuente: Ramos C., Rodríguez S.,2022).....	24
Imagen 11. Características de la curva de capacidad. (Fuente: L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999).....	26

Imagen 12. Representación esquemática de la curva de capacidad para mampostería no reforzada. ((Fuente: L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999).....	26
Imagen 13. Representación Bilineal de la curva de capacidad. (Fuente: Rosangel Moreno González,2007).....	29
Imagen 14. Espectros de capacidad y demanda y punto de desempeño. (Fuente: Rosangel Moreno Gonzalez,2007).....	31
Imagen 15. Periodo inicial, Curva Bilineal, Punto de Interés. (Fuente: FEMA 440, 2005) .....	34
Imagen 16. Desplazamiento máximo que se espera. Usando Método A. (Fuente: FEMA 440, 2005).....	36
Imagen 17. Desplazamiento máximo que se espera. Usando el Método B. (Fuente: FEMA 440, 2005) .....	37
Imagen 18. Desplazamiento máximo que se espera. Usando el Método C. (Fuente: FEMA 440, 2005).....	38
Imagen 19. Representación de las incertidumbres asociadas a la demanda sísmica y capacidad estructural en la determinación del punto de desempeño. (Fuente: Guéguen, 2013).....	40
Imagen 20. Metodologías para calcular las curvas de fragilidad. (Fuente: Pitilakis et al., 2014).....	41
Imagen 21. Ruta de registros sísmicos. (Fuente: Elaboración Propia).....	43
Imagen 22. Formato de cada archivo de texto correspondiente a cada registro sísmico. (Fuente: Elaboración Propia) .....	43
Imagen 23. Primera parte del código modificado. (Fuente: Elaboración Propia) .....	44
Imagen 24. Curva de capacidad. (Fuente: Elaboración Propia).....	45

Imagen 25. Análisis de representación bilineal. (Fuente: Elaboración propia.) .....	46
Imagen 26. Universo de puntos $S_d$ vs $S_a$ . (Elaboración: Fuente Propia).....	47
Imagen 27. Análisis para reducción de registro sísmico. (Fuente: Elaboración Propia) .....	48
Imagen 28. Punto de desempeño, cuando intersecan. Propuesto por el FEMA440 en el Método C. (Fuente: Elaboración propia) .....	49
Imagen 29. Caso en el que toma el último punto de la curva de capacidad ADRS. (Fuente: Elaboración Propia) .....	49
Imagen 30. Aceleración Espectral $S_d$ (cm) vs $S_d$ Performance Point (cm). (Fuente: Elaboración Propia).....	50
Imagen 31. Curva de fragilidad. Cr-D-5. Método C propuesto por el FEMA 440. (Fuente: Elaboración propia) .....	51
Imagen 32. Reducción del espectro de respuesta para determinado caso de ductilidad. (Fuente: Elaboración Propia) .....	52
Imagen 33. Universo de puntos para la obtención de curvas de Fragilidad de la Curva Bilineal. (Fuente: Elaboración Propia) .....	53
Imagen 34. Análisis necesario para determinar los límites para cada estado de daño, curva bilineal. Cr-D-5 (Fuente: Elaboración Propia).....	54
Imagen 35. Puntos en estado de daño extenso en Excel. (Fuente: Elaboración Propia) .....	55
Imagen 36. Coordenadas de puntos. $S_a$ vs $S_d$ (Fuente: Elaboración Propia) .....	56
Imagen 37. Excel de comprobación $S_a$ y excedencia. (Fuente: Elaboración Propia) ..	57
Imagen 38. Excel desarrollado para comprobación con resultados de $S_a$ y Excedencias. (Fuente: Elaboración Propia) .....	57

Imagen 39. Excel arrojado por nuestro código de Python. (Fuente: Elaboración Propia)	58
Imagen 40. Curvas De Fragilidad Cr-D-5. FEMA 440 Método C. (Fuente: Elaboración Propia)	58
Imagen 41. Curvas De Fragilidad Para Sistemas de Concreto Reforzado Dual de Distintos Pisos (Cr-D) FEMA 440 Método C. (Fuente: Elaboración Propia)	59
Imagen 42. Caso Cr-D-10. (Fuente: Elaboración Propia)	102
Imagen 43. Caso Cr-D-15. (Fuente: Elaboración Propia)	103
Imagen 44. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)	103
Imagen 45. Caso Cr-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)	104
Imagen 46. Caso Cr-D-6. (Fuente: Elaboración Propia)	104
Imagen 47. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)	105
Imagen 48. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)	105
Imagen 49. Caso Cr-D-18. (Fuente: Elaboración Propia)	106
Imagen 50. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)	106
Imagen 51. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)	107
Imagen 52. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia)	107
Imagen 53. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)	108
Imagen 54. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)	108
Imagen 55. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)	109
Imagen 56. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia)	109
Imagen 57. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia)	110

Imagen 58. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	110
Imagen 59. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia) .....	111
Imagen 60. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	111
Imagen 61. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	112
Imagen 62. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	112
Imagen 63. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	113
Imagen 64. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	113
Imagen 65. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	114
Imagen 66. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	114
Imagen 67. Caso Cr-D-18. (Fuente: Elaboración Propia).....	115
Imagen 68. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	115
Imagen 69. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	116
Imagen 70. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	116
Imagen 71. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	117
Imagen 72. Caso A-OMF-4. (Fuente: Elaboración Propia).....	117
Imagen 73. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	118
Imagen 74. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	118
Imagen 75. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	119
Imagen 76. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	119
Imagen 77. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	120
Imagen 78. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	120

Imagen 79. Caso A-SMF-4. (Fuente: Elaboración Propia) .....	121
Imagen 80. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	121
Imagen 81. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	122
Imagen 82. Caso A-IMF-4. (Fuente: Elaboración Propia) .....	122
Imagen 83. Caso A-SMF-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	123
Imagen 84. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia).....	123
Imagen 85. Caso A-IMF-10. (Fuente: Elaboración Propia) .....	124
Imagen 86. Caso A-OMF-10. (Fuente: Elaboración Propia).....	124
Imagen 87. Caso Mi-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	125
Imagen 88. Caso Af-M-2. (Fuente: Elaboración Propia).....	125
Imagen 89. Caso Cr-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	126
Imagen 90. Caso Af-M-3. (Fuente: Elaboración Propia).....	126
Imagen 91. Caso Af-M-3. (Fuente: Elaboración Propia).....	127
Imagen 92. Caso Cr-Mu-6. (Fuente: Elaboración Propia) .....	127
Imagen 93. Caso Af-M-2. (Fuente: Elaboración Propia).....	128
Imagen 94. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia) .....	128
Imagen 95. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	129
Imagen 96. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	129
Imagen 97. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	130
Imagen 98. Caso Mi-M-2. (Fuente: Elaboración Propia) .....	130
Imagen 99. Caso Cr-D-4. (Fuente: Elaboración Propia).....	131

Imagen 100. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia).....	131
Imagen 101. Caso Cr-Mu-7. (Fuente: Elaboración Propia) .....	132
Imagen 102. Caso Cr-D-4. (Fuente: Elaboración Propia).....	132
Imagen 103. Caso Cr-Mu-12. (Fuente: Elaboración Propia) .....	133
Imagen 104. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia) .....	133
Imagen 105. Caso Cr-Mu-9. (Fuente: Elaboración Propia) .....	134
Imagen 106. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia) .....	134
Imagen 107. Caso Cr-Mu-8. (Fuente: Elaboración Propia) .....	135
Imagen 108. Caso Cr-D-10. (Fuente: Elaboración Propia).....	135
Imagen 109. Caso Cr-Mu-18. (Fuente: Elaboración Propia) .....	136
Imagen 110. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia) .....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Control de daño y niveles de desempeño para edificios. (Fuente: NEC-2015)	13
Tabla 2. Estados límites y parámetros utilizados para su caracterización. (Fuente: Vielma J.C, 2014).....	15
Tabla 3. Tipos de estructuras y nomenclaturas utilizadas. (Fuente: Calderón, 2018)...	18
Tabla 4. Categorías de las tipologías estructurales. (Fuente: Calderón, 2018).....	20

## RESUMEN

Principalmente en este estudio del trabajo de titulación se modificó el código previo desarrollado en Python del trabajo de titulación de Molina & Ajila (2024). En nuestro caso usamos la metodología propuesta por el FEMA 440, que se basa en el “Método del Espectro de Capacidad”, que nos permite conseguir los puntos de desempeño de dicha estructura o sistema estructural que se quiera analizar y así determinar la curva de fragilidad según su espectro de aceleración.

En la realización de nuestro estudio modificamos ciertos parámetros en el código. Primero partimos desde una curva de aproximación bilineal, por lo que ya no es necesario transformar la curva Pushover. Al escoger curva bilineal este interpola los puntos entre sus coordenadas para su desarrollo en el método del espectro de capacidad. Adicional generamos curvas de fragilidad para sesenta y nueve tipologías estructurales. El método que nos propone el FEMA 440 nos mostró una mayor dispersión de datos, que resulta en una caracterización que se asemeja más a la realidad con una incertidumbre y una representación estadística más ajustada para cada caso de análisis y a la variabilidad de registros sísmicos.

Alinearnos al programa Python para el desarrollo de estas curvas de fragilidad, es fundamental y una herramienta útil para la evaluación sísmica, además de clasificar la demanda sísmica en función de una curva de capacidad específica según la tipología estructural correspondiente, por lo que el código de nuestro estudio puede ser modificados, corregidos incluso mejorado según las necesidades del usuario.

**Palabras claves:** Curvas de fragilidad, curvas bilineales, evaluación sísmica, punto de desempeño, estados de daño, espectro de capacidad, tipologías estructurales, probabilidad.

## ABSTRACT

In this degree work study, we modified the previous code developed in Python from the degree work of Molina & Ajila (2024). In our case we used the methodology proposed by FEMA 440, which is based on the “Capacity Spectrum Method”, which allows us to obtain the performance points of the structure or structural system to be analyzed and thus determine the fragility curve according to its acceleration spectrum.

In conducting our study, we modified certain parameters in the code. First, we start from a bilinear approximation curve, so it is no longer necessary to transform the pushover curve. By choosing a bilinear curve it interpolates the points between its coordinates for its development in the capacity spectrum method. Additionally, we generate fragility curves for sixty-nine structural typologies. And estimate the probable damage for the sixty-nine cases of structures. The method proposed by FEMA 440 showed us a greater dispersion of data, resulting in a characterization that more closely resembles reality with an uncertainty and a statistical representation more adjusted to each case of analysis and to the variability of seismic records.

Aligning ourselves to the Python program for the development of these fragility curves is fundamental and a useful tool for seismic evaluation, in addition to classifying the seismic demand in function of a specific capacity curve according to the corresponding structural typology, so that the code of our study can be modified, corrected or even improved according to the user's needs.

**Keywords:** fragility curves, bilinear representation, seismic evaluation, performance point, damage states, capacity spectrum, structural typologies, probability.

# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

Sabemos que el Ecuador se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico. Por lo que es de suma importancia como ingenieros civiles y para la importancia de vida conocer cómo afecta y cuál es el comportamiento de diversos sistemas estructurales durante un evento sísmico.

El autor Parra (2016) explica que: Ecuador se encuentra localizado en el cinturón de fuego del océano Pacífico, al noroccidente de Sudamérica. siendo uno de los países más densamente poblados de la región que muestra actividad sísmica causada principalmente por la subducción de la placa oceánica de nazca y la presencia de un complejo sistema de fallas activas locales.

Siguiendo que en nuestro país existe la amenaza sísmica más aun, cuando ocurrió el sismo en Pedernales el 16 de abril del 2016, Del Salto Días (2023) nos explica como fue el sismo: “El 16 de abril de 2016, se suscitó un sismo de 7.8 grados en la escala de Richter, el cual provocó estragos en todo el litoral ecuatoriano, dejando un total de 673 muertos. La población más afectada fue la que se encontraba ubicada en la localidad de Pedernales, en donde destruyó el 80% de las edificaciones.”

Por lo que es de importancia proteger la vida durante estos sismos de esta magnitud, y no volver a pasar por la tragedia ya ocurrida en 2016. Entonces dado al avance de los estudio y nuevos análisis no lineales en sistemas estructurales, ahora se ha propuesto los desempeños de dichas estructuras, con lo que se clasificaría en categorías para lograr determinar la vulnerabilidad de estas mismas. A todo esto, existen varios métodos para la evaluación de vulnerabilidad sísmicas. En el presente estudio nos basaremos en las curvas de fragilidad.

El autor Rojas (2010) nos menciona acerca de las curvas de fragilidad que: “Estas curvas permiten representar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y calcular la probabilidad de que la respuesta de una estructura alcance o exceda

determinado límite, asociado al daño, como función de un parámetro indicador de la intensidad sísmica.”

Además, Rojas (2010) expresa sobre la importancia de estas curvas diciendo que, “dentro de la carrera de Ingeniería Civil, en el área de la Ingeniería Estructural y Sismorresistente, un tópico de estudio se centra en la vulnerabilidad sísmica de edificaciones y estimar daños debidos a terremotos utilizando las curvas de fragilidad.”

Conociendo la importancia de esta herramienta, teniendo ya el código para desarrollo de curvas de fragilidad del trabajo previo hecho por el Ing. Molina y el Ing. Ajila nosotros modificaremos y ajustaremos el código para obtener mejores resultados y curvas de fragilidad más precisas. Y así este pueda ser aplicado para regiones aquí en nuestro país, y evitar tragedias como lo ocurrido en el 2016, poniendo siempre adelante la protección de la vida. A continuación, los objetivos y alcance.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Modificación de algoritmo para la creación de curvas de fragilidad para múltiples tipologías estructurales desarrolladas en el programa Python.

## **OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Modificar el algoritmo para determinar las curvas de fragilidad de diferentes tipologías estructurales, utilizando datos de entrada curvas bilineales.
- Obtener curvas de fragilidades más precisas y ajustadas a la variabilidad de registros sísmicos.
- Evaluar la fragilidad estructural de diversas tipologías estructurales mediante umbrales de daño.

## **ALCANCE**

Nuestro estudio realizado se centra en modificar y ajustar el código en el programa Python, obtenido del trabajo de titulación de los Ings. Molina y Ajila, el cual genera las curvas de fragilidad desde el Método del Espectro de Capacidad (CSM) del FEMA-440. Este código nos permitirá conocer los puntos de desempeño de diversas tipologías estructurales a partir de curva de capacidad y la demanda sísmica que corresponde. Adicional a eso, mantenemos las herramientas para calcular las curvas de fragilidad a partir de datos ya conseguidos, así mismo mantenemos las gráficas las curvas de fragilidad para una mejor visualización y comprensión de estas mismas.

Realizaremos una comparación de resultados con estudios previos y analizaremos las mejoras de nuestro código, las limitaciones del Método del Espectro de Capacidad (CSM), la versatilidad de nuestro código modificado para esta realización y la disponibilidad de datos, así llegando a una interpretación más precisa y exacta de los resultados finales y fomentando el uso de este código para futuros proyectos de ingeniería estructural y fundamentalmente para la evaluación de riesgo sísmico.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1 PELIGRO SÍSMICO ANÁLISIS

El autor Esteva, L. (1967) extraído del documento de Esteva Maraboto (2018) define el análisis de peligro sísmico como:

En su forma más simple, el peligro sísmico en un sitio se expresa por medio del valor esperado de la tasa de ocurrencia, por unidad de tiempo (año), de movimientos del terreno con intensidades iguales o mayores de cada valor dado (Esteva, 1967). Esta forma de describir el peligro sísmico lo supone como constante en el tiempo y es, por mucho, la empleada con más frecuencia, a pesar de que ignora las posibles fluctuaciones que el mencionado valor esperado pueda sufrir de acuerdo con la historia sísmica previa, como consecuencia de la evolución de los procesos físicos asociados a la acumulación y liberación de energía de deformación que se manifiestan en la actividad de las fuentes sísmicas cercanas al sitio de interés. Ésta es la forma adoptada en lo que sigue. (Esteva, 1967)

En un sitio o en una región dada, el peligro sísmico puede describirse en términos de las probabilidades de ocurrencia de movimientos del terreno de diversas intensidades durante lapsos determinados. Ello implica describir las posibles historias de ocurrencias de sismos como un proceso de eventos con intensidades aleatorias, que ocurren en instantes aleatorios (Esteva, 1976).

En forma simplificada, también puede describirse el peligro sísmico mediante la tasa de ocurrencia de movimientos sísmicos con intensidades mayores que un valor de interés. La intensidad de un evento está directamente relacionada con la amplitud del movimiento del terreno y puede medirse en términos de diversas variables. En general, conviene seleccionar la que presente una correlación más directa con sus efectos esperados sobre las obras o instalaciones consideradas. (Esteva, 1976)

Si se contara con información estadística suficiente sobre las características de los movimientos del terreno en un sitio dado, la determinación de la función de peligro sísmico en el sitio podría realizarse empleando directamente esa

información. Sin embargo, esto en general no ocurre, por lo que es necesario acudir a estimaciones basadas en modelos probabilísticos que permiten calcular la intensidad de un temblor en un sitio a partir de la magnitud y de la distancia entre dicha fuente y el sitio de interés. (Esteva, 1976)



Imagen 1. Representación de distintos niveles de intensidad sísmica. (Fuente: Luis Esteva, 2018)

El peligro sísmico se suele representar, por ejemplo, en términos de distribuciones de probabilidades de los tiempos de ocurrencia de temblores de distintos niveles de intensidades, del tiempo de espera para la ocurrencia de un temblor con una intensidad mayor o igual que un cierto valor dado, o del valor máximo de la intensidad durante un lapso determinado. (Esteva, 1976)

## 1.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN SISTEMAS ESTRUCTURALES

Luis Esteva Maraboto (2018) nos habla lo siguiente a cerca de la vulnerabilidad sísmica en estructuras:

Las funciones de vulnerabilidad sísmica de una construcción son relaciones cuantitativas entre diversos indicadores de los daños probables que pueda sufrir una construcción ante un evento sísmico y la correspondiente intensidad del movimiento del terreno. El indicador que se emplee para cuantificar los daños probables dependerá de la aplicación que se tenga en mente. Por ejemplo, si el interés se centra exclusivamente en el nivel de seguridad con respecto al posible colapso de la construcción, la función de vulnerabilidad se expresará en términos de la probabilidad de

que el sistema falle si se ve sometido a un movimiento sísmico de una intensidad considerada.

Siguiendo lo anterior Luis Esteva Maraboto (2018) continua que:

Si nos interesa estimar los posibles niveles de daños físicos en la estructura, en los contenidos o en los elementos no estructurales o de relleno, será necesario obtener estimaciones probabilísticas de las respuestas dinámicas del sistema y de sus contenidos para cada intensidad sísmica empleando criterios y herramientas del análisis estructural. En tanto, para estimar las consecuencias económicas esperadas de los temblores de diversas intensidades podrá partirse directamente de la información estadística –en caso de estar disponible– o se podrán emplear criterios que transformen la información sobre los daños físicos para una intensidad dada en valores esperados de los costos directos e indirectos de los daños para dicha intensidad, tomando en cuenta los costos esperados de daño tanto para la condición de colapso como para la de supervivencia.

Luis Esteva Maraboto (2018) adiconas que:

La función de vulnerabilidad depende de la función de densidad de probabilidades del daño físico experimentado por todos los componentes estructurales y no estructurales que integran el sistema, así como de las consecuencias directas e indirectas de dicho daño. Su evaluación también debe tomar en cuenta el daño que puede experimentar el equipo, las instalaciones o los contenidos que puedan fallar, por ejemplo, por volcamiento, por distorsiones excesivas o por fatiga resultante de un número elevado de ciclos de respuesta dinámica.

Reyes (1999) desarrollo una lista: Donde se reportan los resultados de pruebas de laboratorio orientadas a establecer relaciones cuantitativas entre los niveles de daño físico y las máximas amplitudes de la distorsión de diversos tipos de elementos y subconjuntos estructurales y de relleno.

Así mismo, Ismael y cols. (2004) presenta: Modelos simples para estimar la componente del valor del costo de daño correspondiente a la función de vulnerabilidad, e incluyen las contribuciones de costos directos e indirectos.

Vamvatsikos y Cornell (2002) y Esteva e Ismael (2003) muestran: Criterios alternativos, basados en indicadores de daño que miden el deterioro que sufre el sistema estructural en sus propiedades mecánicas globales, como consecuencia de la amplitud y número de los ciclos de deformación que experimentan sus miembros.

### **1.3 RIESGO SÍSMICO**

Teniendo en cuenta ya los conceptos de vulnerabilidad y peligrosidad sísmica Mena Hernández (2002) nos indica sobre el riesgo sísmico:

Apreciamos que hay una relación entre ambos de estas definiciones entonces para que exista definitivamente riesgo sísmico en un lugar, ambos de los dos conceptos deben producirse y existir respectivamente, es decir, el riesgo sísmico evalúa y cuantifica las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto.

Mena Hernández (2002) añade que:

En términos generales el riesgo sísmico son las posibles pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, ocasionadas debido a un evento sísmico de magnitud considerable que logra sobrepasar la capacidad resistente de las estructuras y las lleva al colapso, dejando como consecuencia todo tipo de pérdidas mencionadas anteriormente. Las magnitudes de los daños van directamente relacionadas a la amenaza sísmica existente en la zona y al nivel de vulnerabilidad que presenten las estructuras cercanas.

Por otro lado, Jiménez (2023) menciona que:

El riesgo sísmico es la convolución entre dos variables, por un lado, está la amenaza o el peligro sísmico, y por otro lado está la vulnerabilidad de las edificaciones o infraestructuras realizadas por el hombre.

Según la NEC-2015 en el Capítulo 5: Evaluación del riesgo sísmico en edificios, nos habla lo siguiente:

El objetivo de la evaluación del riesgo sísmico es cuantificar las pérdidas económicas por la ocurrencia de terremotos y otros posibles peligros sísmicos como sea prescrito por el usuario por medio del análisis de ingeniería y evaluación de las características de vulnerabilidad del edificio a determinados niveles de terremotos. El riesgo sísmico podrá ser expresado mediante un escenario de pérdidas (SL) o la pérdida probable (PL). Los resultados podrán ser reportados tanto para la media de valores o para un determinado nivel de confianza. La Pérdida Anualizada Promedio (AAL) también podrá usarse como medida del riesgo sísmico. Funciones de vulnerabilidad para el edificio pueden ser determinada de datos de desempeño pasados, estimaciones de desempeño realizadas por expertos, análisis detallado a niveles específicos de terremoto, o una combinación de éstas.

#### **1.4 DESEMPEÑO SÍSMICO**

Aguiar, (2003) cita lo siguiente: “En un inicio los objetivos del desempeño fueron cualitativos y no estandarizados. Por lo tanto, fue necesario introducir el concepto de límite de capacidad en el diseño sismorresistente de tal manera que sea posible cuantificar el desempeño en términos de cantidad de daños que tiene una estructura debido a un movimiento sísmico y el impacto que tienen estos daños en las actividades posteriores al evento.”

De acuerdo con Choque & Luque (2019) el desempeño sísmico de una estructura se basa en los siguientes tres conceptos:

- Desempeño: es el comportamiento que tiene una estructura en función de su capacidad o demanda específica, para evaluar el desempeño sísmico se debe tener en cuenta el estado límite de daño, la seguridad de vida y la funcionalidad del edificio luego del sismo. (Choque & Luque, 2019)

- Demanda: representa el movimiento del suelo durante el sismo en termino de desplazamiento. Para una estructura y sismo específico, la demanda de desplazamiento es una estimación de la respuesta máxima esperada. (Choque & Luque, 2019)
- Capacidad: es la resistencia final esperada de un elemento estructural. En consecuencia, la capacidad de una estructura depende de la capacidad y deformación de sus componentes. (Choque & Luque, 2019)

### 1.4.1 NIVELES DE DESEMPEÑO SÍSMICO

Estos niveles nos describen un estado límite o grado de daño. Estas representan una condición límite establecida en función de los posibles daños físicos de una estructura pueden ser descritos en términos de la seguridad ofrecida, costo y facilidad de reparación, economía, arquitectura e impacto histórico. (Cárdenas & Talmatch, 2016)

Estos son algunos de los criterios más importantes que se toman en consideración:

- En elementos estructurales y no estructurales sufran daños físicos.
- Después del evento sísmico exista funcionalidad del edificio.
- Peligro o riesgo a la seguridad de vida, dentro de la estructura debido al daño.

Claro es que se derivan distintos niveles de evaluación del desempeño sísmico para estructuras, mampostería, de tal manera toman en referencia y en base los criterios nombrados anteriormente. En este caso lo más importante sería en elementos estructurales.

## 1.4.2 NIVELES DE DESEMPEÑO SEGÚN EL ATC-40

Los niveles de desempeño definidos por el ATC- 40 (1996) corresponden a niveles utilizados para elementos estructurales. Evalúa tres estados de daño (ocupación inmediata, seguridad y estabilidad estructural) que pueden ser utilizados para definir criterios técnicos en los procesos de evaluación y rehabilitación de estructuras. Además, establece dos rangos intermedios (daño controlado y seguridad limitada) que permiten discriminar de manera adecuada y útil el nivel de desempeño de la estructura. Los niveles son identificados por la abreviación SP-n (SP son siglas de “Structural Performance” y n de “numero de desempeño estructural”). (Salazar & Moyón,2022)

Los autores del Carlos Miguel Aranda Salazar, Dayana Lizeth Jacho Moyón (2022) nos demuestran en el siguiente apartado los niveles de desempeño para elementos estructurales:

- **Ocupación Inmediata, SP-1:** es un estado donde se ha producido un daño estructural muy limitado, el riesgo de una lesión que pone en peligro la vida por una falla es insignificante. Los sistemas resistentes de carga vertical y lateral permanecen prácticamente en las mismas características y capacidades antes del sismo. (Moyón & Salazar, 2022)
- **Control de daños, SP-2:** es un rango de daño post-sismo y no es un nivel, varía entre SP-1 y SP-3. Permite llevar el daño estructural más allá del nivel de seguridad de vida, sin que la ocupación presente algún problema. (Moyón & Salazar, 2022)
- **Seguridad de Vida, SP-3:** es un estado de daño significativo, pero mantiene un margen adecuado contra el colapso. Los principales componentes no se han desprendido ni caído, reduciendo las lesiones mortales por daños estructurales. Es posible que sea necesario reparar la estructura antes de ocupar el edificio, sin

embargo, el daño no siempre es económicamente reparable. (Moyón & Salazar, 2022)

- **Seguridad Limitada, SP-4:** es un rango de daño post-sísmico que varía de SP-3 y SP-5. Se presenta en situaciones donde se requiere reforzamiento en algunas partes de la estructura que no cumplen con todos los requisitos de nivel de seguridad de vida, también cuando el nivel de seguridad no es rentable y solo se mitigan las deficiencias estructurales críticas. (Moyón & Salazar, 2022)
- **Estabilidad Estructural, SP-5:** es un estado de daño estructural donde el edificio está a punto de sufrir un colapso parcial o total. Se producen daños sustanciales en la rigidez y resistencia del sistema, es probable que los daños en estructuras más antiguas sean técnica y económicamente irreparables además de tener un alto riesgo de colapso por posibles réplicas. (Moyón & Salazar, 2022)
- **No Considerado, SP-6:** no es un nivel de desempeño, pero es útil en situaciones donde se requiera evaluar los daños sísmicos no estructurales o reforzamientos. (Moyón & Salazar, 2022)

Para una mejor comprensión adjuntamos en la siguiente Tabla 1 proveniente de la NEC 2015 con respecto al tema y como se define en la Normas Ecuatoriana de la Construcción.

Tabla 1. Control de daño y niveles de desempeño para edificios. (Fuente: NEC-2015)

	Nivel de Prevención al Colapso (5-E)	Nivel de Seguridad de Vida (5-E)	Nivel de Ocupación Inmediata (1-B)	Nivel Operacional (1-A)
<b>Daño Global</b>	<b>Severo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Ligero</b>	<b>Muy Ligero</b>
<b>General</b>	Pequeña resistencia y rigidez residual, pero columnas y muros cargadores funcionando. Grandes derivas permanentes. Algunas salidas bloqueadas. Parapetos no asegurados que han fallado o tienen alguna falla incipiente. El edificio está cerca del colapso	Algo de resistencia y rigidez residual ha quedado en todos los pisos. Elementos que soportan cargas gravitacionales aún funcionando. Fallas en muros dentro de su plano o parapetos inclinados. Algo de deriva permanente. Daño en paredes divisorias. El Edificio se mantiene económicamente reparable	No hay deriva permanente. La estructura aún mantiene resistencia y rigidez originales. Fisuras menores en fachadas, paredes divisorias, cielos razos así como en elementos estructurales. Los ascensores aún pueden ser encendidos. Sistema contra incendios aún operable	No hay deriva permanente. La estructura aún mantiene la resistencia y rigidez originales. Fisuras menores en fachadas, paredes divisorias, y cielos razos así como en elementos estructurales. Todos los sistemas importantes para una operación normal están en funcionamiento
<b>Componentes No Estructurales</b>	Daño severo	Peligro de caída de objetos mitigado pero bastante daño en sistemas: arquitectónico, mecánico y eléctrico	Equipos y contenido están seguros de manera general., pero algunos no operan debido a fallas mecánicas o falta de utilidad	Ocurre daño insignificante. La energía eléctrica y otros servicios están disponibles, posiblemente por servicios de reserva

## 1.5 ESTADOS LIMITE DE DAÑOS

El autor Vielma J.C (2014) en el Capítulo 4: Umbrales de estados límite de daño nos indica el procedimiento para determinas estos umbrales de daño:

El primer paso del procedimiento consiste en establecer el desplazamiento lateral del nivel de cubierta del edificio como cantidad a correlacionar con los estados límite. Esta decisión está justificada porque la mayoría de los resultados del análisis no lineal tanto estático como dinámico, así como las pruebas de laboratorio, usan dicho desplazamiento para caracterizar la respuesta de los edificios. El siguiente paso consiste en seleccionar y definir los estados límite que se aplicarán en la evaluación de la respuesta no lineal de los edificios.

En esta investigación se han seleccionado cinco estados límite, que se definen a continuación:

- Estado límite sin daño. - Corresponde a un desplazamiento lateral para el cual no se alcanzan daños en los elementos secundarios o no estructurales. (Vielma J.C, 2014)
- Estado límite de servicio. - Se caracteriza por la aparición de daño en elementos no estructurales, que no requieren reparación inmediata para que el edificio continúe en funcionamiento. (Vielma J.C, 2014)
- Estado límite de daños irreparables. - Es un estado límite para el que se han producido daños concentrados en algunos elementos estructurales y de forma extensiva en elementos no estructurales de algunos niveles; tiene especial importancia para el proyectista, ya que permite establecer un criterio a partir del cual el edificio no es reparable desde el punto de vista económico y/o tecnológico. (Vielma J.C, 2014)
- Estado límite de daños extensos. - Para este estado límite el daño se ha distribuido en diversos elementos estructurales y los elementos no estructurales presentan daños severos, aunque la estructura entera es capaz de seguir soportando su peso propio. (Vielma J.C, 2014)
- Estado límite de prevención de colapso. - Es un estado previo al colapso de la estructura, para el cual el daño de los elementos permite la formación de un mecanismo cinemáticamente inestable y la estructura es incapaz de soportar las cargas de gravedad. (Vielma J.C, 2014)

Vielma J.C (2014) añade que: “Se selecciona el criterio de evaluación que representa el instante para el que se alcanza un estado límite específico. De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, la deriva de entrepiso es un valor adimensional

que permite cuantificar el daño bajo cargas laterales. Entre los valores publicados, algunos de los cuales se han reseñado en el apartado anterior, se han adoptado los valores de las derivas de entrepiso a partir de los cuales se alcanza un daño específico que corresponde al umbral de un Estado límite, estos valores se muestran en la Tabla 2. Entre los valores mostrados cabe señalar que el que permite identificar el estado límite de prevención de colapso queda definido entre una deriva de entrepiso de 3% y la deriva global para la que se alcanza un índice de daño de 95%. Este índice de daño se calcula mediante un análisis no lineal de la estructura utilizando el método de los elementos finitos.”

*Tabla 2. Estados límites y parámetros utilizados para su caracterización. (Fuente: Vielma J.C, 2014)*

<b>Estado límite</b>	<b>Deriva de entrepiso (%)</b>
Sin daño	$0\% \leq \delta < 0,5\%$
De servicio	$0,5\% \leq \delta < 1,5\%$
Daños irreparables	$1,5\% \leq \delta < 2,5,5\%$
Daños extensos	$2,5\% \leq \delta < 3,0\%$
Prevención de colapso	$3,0\% \leq \delta$ ; ID < 95%

Para determinar los umbrales de daño es necesario calcular y graficar la evolución de las derivas de entrepiso respecto al desplazamiento del nivel de cubierta normalizado respecto a la altura total del edificio (SEAOC, 1995) conforme se muestra en la Imagen 2 de a continuación, en la que es posible obtener la deriva global correspondiente a un estado límite  $i$ , caracterizado mediante la deriva de entrepiso. En el caso de un edificio con  $n$  niveles se obtienen  $n$  curvas de evolución, correspondiendo el desplazamiento de un estado límite a la intersección de la primera curva con la deriva de entrepiso que caracteriza a dicho estado límite. (Vielma J.C, 2014)

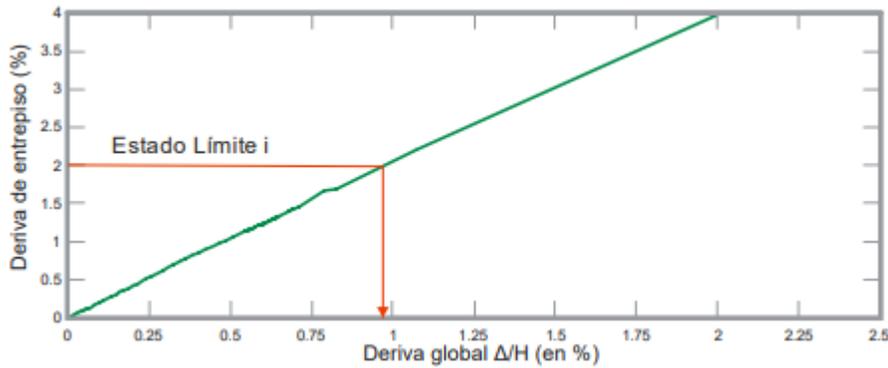


Imagen 2. Determinación de la derivada global correspondiente a un estado límite i. (Fuente: Vielma J.C, 2014)

## 1.6 MATRIZ DE PROBABILIDAD DAÑO

La matriz de probabilidad de daño determina la probabilidad de que un edificio sufra un nivel de daño para una actividad sísmica determinada. Estas representan el daño estructural en función de una intensidad sísmica fijada. (Lantada, 2007).

Las matrices de probabilidad de daño (Imagen 3) se determinan ingresando el desplazamiento espectral para el punto de desempeño ( $SD_{pd}$ ) en las curvas de fragilidad, para obtener las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño (Moreno & Bairán, 2012). Estas se determinan mediante la fórmula:

$$P[ED_i/Sd] = P[ED_i/Sd] - P[ED_{i+1}/Sd]$$

Donde:

$P[ED_i/Sd]$  = Es la probabilidad de que ocurra el estado de daño  $ED_i$  cuando la estructura tiene un desplazamiento espectral  $Sd$ . (Moreno & Bairán, 2012)

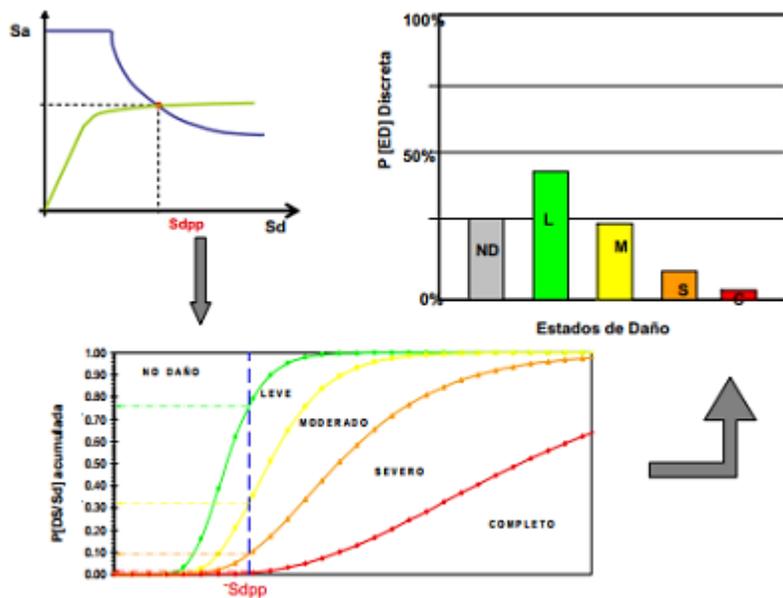


Imagen 3. Proceso de estimación de la matriz de probabilidad de daño. (Fuente: Moreno & Bairán, 2012)

## 1.7 TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

### 1.7.1 DEFINICIÓN DE NOMENCLATURA

Después de indagar en numerosas páginas y artículos sobre posibles nomenclaturas para tipologías estructurales, no se encontraron nomenclaturas para lo que es en el marco ecuatoriano. Es por eso por lo que para fines de una mejor comprensión de las múltiples graficas de curvas de fragilidad que se obtuvieron para distintas tipologías estructurales que se mostraran en el Capítulo 3: Resultados y anexos.

Esteban Calderón (2018) en su trabajo de titulación nos explica que:

Se realizó una recopilación de espectros de capacidad para tipologías estructurales de Costa Rica realizadas según el CSCR en sus versiones 2002 y 2010. Los espectros de capacidad se adquirieron de trabajos finales de graduación de licenciatura y maestría en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Para simplificar la clasificación de las curvas obtenidas, se generó una nomenclatura cuyo ejemplo se muestra en la siguiente Imagen 4. En la Tabla 3 se muestran los tipos de estructuras y su nomenclatura generada.

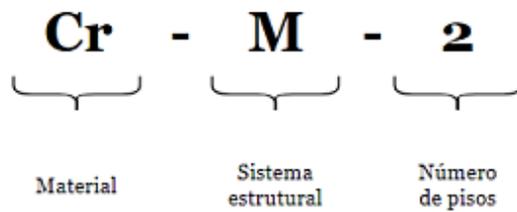


Imagen 4. Ejemplo de nomenclatura utilizada. (Fuente: Calderón, 2018)

Tabla 3. Tipos de estructuras y nomenclaturas utilizadas. (Fuente: Calderón, 2018)

Material	Nomenclatura	Sistema estructural	Nomenclatura
Concreto reforzado	Cr		
		Marco	M
		Dual	D
		Muro	Mu
Mampostería confinada	Mc		
		Muro	M
Mampostería integral	Mi		
		Muro	M
Acero	A		
		Marco especial de momento	SMF
		Marco intermedio de momento	IMF
		Marco ordinario de momento	OMF
		Marco especial arriostrado concéntricamente	SCBF
Acero laminado en frío	Af		
		Marco	M

## 1.7.2 AGRUPACIÓN POR CLASES

A continuación, nos explica a cómo llegaron a esas nomenclaturas para las curvas de fragilidad:

Uno de los principales retos en la generación de estudios de evaluación de riesgo sísmico a escala regional es conocer el inventario de las tipologías de la zona y poder representarlas en clases de tipologías estructurales que sean representativas.

La derivación de curvas de fragilidad apropiadas depende completamente de que la representación de las clases sea razonable (Pitilakis et al., 2014).

Para crear estas clases se supone que las estructuras que tienen características estructurales similares, y que tengan condiciones geotécnicas similares, se van a comportar de manera similar a un mismo nivel de excitación sísmica (Pitilakis et al., 2014).

Por lo que Esteban Calderón (2018) nos indica que: “Estas características permiten analizar un conjunto de estructuras de manera similar agrupando las estructuras según sus semejanzas para poder obtener comportamientos promedio y evaluarlas como un conjunto.”

De acuerdo con Milutinovic & Trendafiloski (2003), “los modelos de capacidad no necesitan ser exactos para ser útiles. Una aproximación del punto de cedencia y el punto último da una idea general de cómo responde la estructura a las demandas sísmicas.”

Entonces siguiendo la metodología y nomenclatura de Esteban Calderón (2018) finaliza que:

Se decidió agrupar las categorías según los datos obtenidos, sin embargo, para generar un estudio a nivel regional se debe conocer las tipologías de la zona y a partir de éstas establecer categorías que permitan la mejor comparación con la realidad. En la Imagen 5 se observa la nomenclatura establecida para las diferentes categorías y en la Tabla 4 se observan las categorías en las que se dividió este estudio.

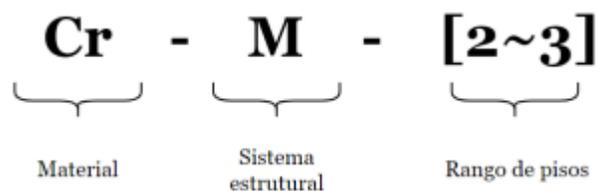


Imagen 5. Ejemplo de nomenclatura utilizada para las categorías. (Fuente: Calderón, 2018)

Tabla 4. Categorías de las tipologías estructurales. (Fuente: Calderón, 2018)

Categoría	Material	Estructura	Pisos
<b>Acero laminado frío-[2~3]</b>	Acero laminado en frío	Marco	2 a 3
<b>Acero-[10]</b>	Acero	IMF, OMF, SMF	10
<b>Acero-[4]</b>	Acero	IMF, OMF, SMF	4
<b>Acero SCBF-[4~10]</b>	Acero	SCBF	4 a 10
<b>Cr-D-[4~7]</b>	Concreto reforzado	Dual	4 a 7
<b>Cr-D-[8~18]</b>	Concreto reforzado	Dual	8 a 18
<b>Cr-M-[10]</b>	Concreto reforzado	Marco	10
<b>Cr-M-[4~7]</b>	Concreto reforzado	Marco	4 a 7
<b>Cr-Mu-[6~8]</b>	Concreto reforzado	Muro	6 a 8
<b>Cr-Mu-[9~18]</b>	Concreto reforzado	Muro	9 a 18
<b>M-M-[2]</b>	Mampostería	Muro	2
<b>Hospitales-[4~10]</b>	Concreto reforzado	Dual	4 a 10
<b>DDBD-[6~10]</b>	Concreto reforzado	Marco	6 a 10

Era necesario argumentar en este capítulo las tipologías, para tener en cuenta, que al momento de tener varias graficas curvas de fragilidad entender a qué caso se refiere cada gráfica y tener una mejor idea y percepción en estas mismas.

## 1.8 MÉTODO NEWMARK

El método de Newmark es un procedimiento para la evaluación numérica de la respuesta dinámica de sistemas que permite calcular las respuestas de desplazamiento y velocidad en el tiempo utilizando fórmulas específicas que consideran la aceleración constante o la aceleración lineal dentro de cada intervalo de tiempo. (Chopra, 2014)

En su libro Chopra (2014) “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering” nos muestra las siguientes ecuaciones de su método:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1}$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)(\Delta t)^2\ddot{u}_i + \beta(\Delta t)^2\ddot{u}_{i+1}\right]$$

A esto el autor Chopra (2014) agrega que: “Los parámetros " $\gamma$ " y " $\beta$ " definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan las características de estabilidad y precisión del método. Una selección típica para " $\gamma$ " es  $\frac{1}{2}$ , y  $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$  es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluida la precisión”.

De igual manera se puede encontrar información más detallada en el libro de Chopra, A. K. (2014) Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, acerca de las ecuaciones de Newmark.

## **1.9 MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD (CSM)**

Aparte que es parte importante para la creación de curvas de fragilidad podemos decir un breve resumen de lo que se basa el método del espectro de capacidad, este método nos permite conocer el comportamiento de la estructura a distintos niveles de intensidad sísmica, graficando el desplazamiento máximo frente a la fuerza cortante en la base.

Según Eliud Hernández (2022) detalla el método con el siguiente criterio:

El Método del Espectro de Capacidad (MEC) fue presentado por el ATC-40 (1996) y mejorado posteriormente en el FEMA 440 (2005). Se fundamenta en una representación aproximada de las características globales no lineales de la estructura, obtenida mediante el reemplazo del sistema no lineal por un sistema lineal equivalente, usando como base los procedimientos del análisis modal. Consiste en comparar el espectro de capacidad de la estructura con el espectro de la demanda sísmica, para identificar el desplazamiento máximo o punto de desempeño, donde la capacidad y la demanda se igualan, permitiendo estimar la respuesta máxima de la edificación, la cual servirá de base para compararla con el nivel de desempeño esperado. (Hernández, 2022)

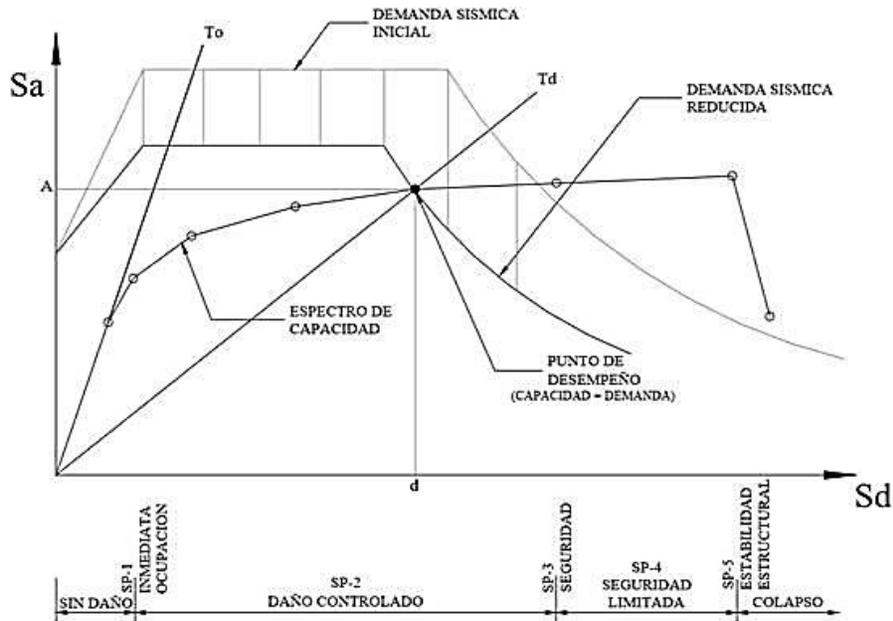


Imagen 6. Representación gráfica del Método del Espectro de Capacidad. (Fuente: ATC-40 y FEMA 440)

Teniendo en cuenta que el espectro de respuesta se establece cómo una gráfica de períodos versus aceleraciones espectrales y que la curva de capacidad de la estructura se define como una gráfica desplazamiento del tope versus el cortante basal, es necesario establecer una gráfica en formato ADRS “Acceleration-Displacement Response Spectrum”, donde se pueda convertir la demanda y la capacidad en términos de aceleraciones y desplazamientos espectrales ( $S_a$  vs  $S_d$ ), y de esa forma trabajar con los mismos parámetros de medición para encontrar el punto de desempeño. (Hernández, 2022).

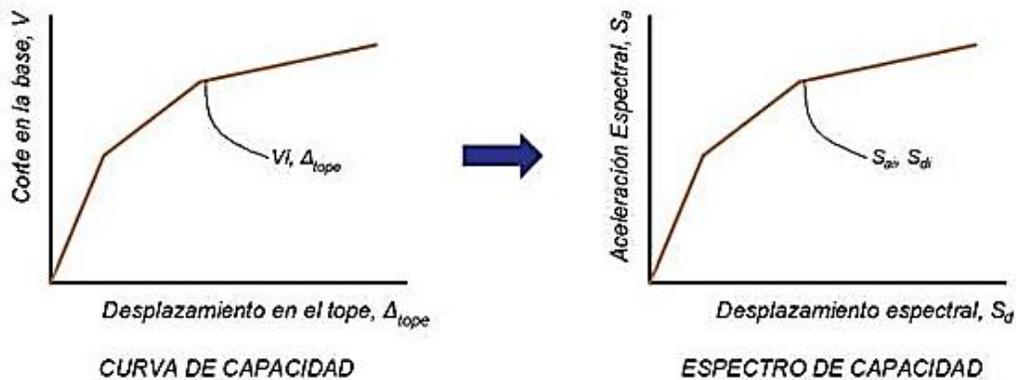


Imagen 7. Conversión de Curva de Capacidad en Espectro de Capacidad. (Fuente: Hernández, 2022)

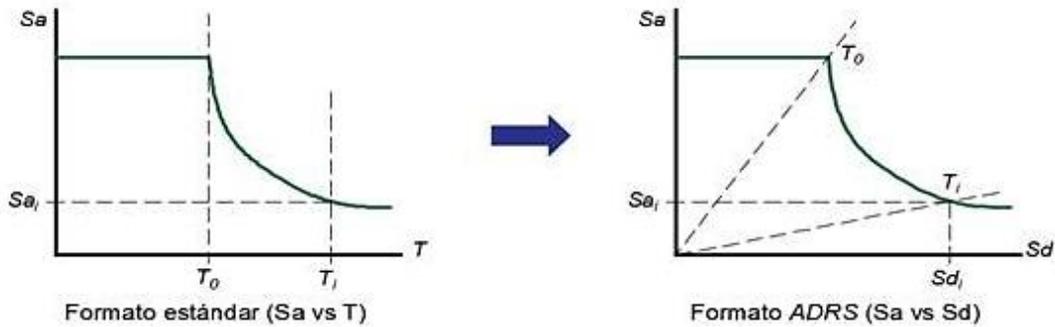


Imagen 8. Conversión del Espectro de Respuesta en Espectro de Demanda. (Fuente: Hernández, 2022)

De acuerdo el Ing. Francisco Cisneros Sánchez (2022) nos dice:

La capacidad estructural depende de la resistencia y la deformación máxima que puede tener los elementos estructurales. Si se desea conocer el comportamiento inelástico del edificio es necesario utilizar el análisis estático no lineal (Análisis Pushover), este procedimiento se conoce como el desempeño que tiene la estructura en deformarse. Para ello se utiliza la curva de capacidad, es la relación entre el cortante basal ( $V$ ) y el desplazamiento ( $D$ ), la curva se construye para representar la respuesta del primer modo de la estructura, basado en el modo fundamental de vibración, esto es válido para estructuras con períodos menores a un segundo.

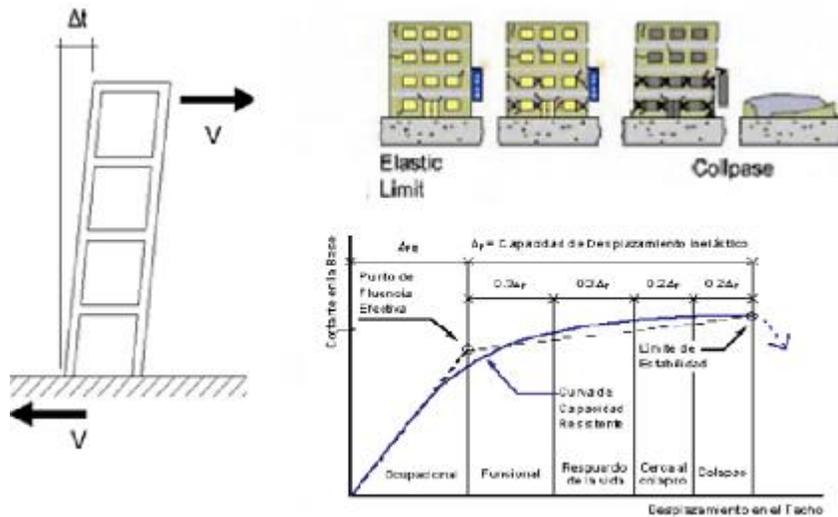


Imagen 9. Curvas de capacidad y niveles de desempeño. (Fuente: Francisco Cisneros Sánchez, 2022)

## 1.9.1 CURVAS DE CAPACIDAD O PUSHOVER

El análisis Pushover o Curva de capacidad nos indica cómo es el comportamiento de una estructura después de que esta excede su límite elástico. Este procedimiento consiste en realizar varios análisis elásticos secuenciales y sobreponerlos, para formar una curva de capacidad representada por el cortante basal vs desplazamiento en el techo. Esta curva de capacidad se obtiene al aplicar una distribución de cargas laterales a la estructura, la cual incrementa hasta llevar a la estructura hasta una deformación objetiva o su colapso (pérdida de capacidad). Mientras la carga aumenta durante el análisis, los elementos de la estructura incursionan secuencialmente en el campo inelástico. Estos cambios se representan a través de la formación de rótulas plásticas en los extremos del elemento. Al momento que un elemento alcanza su límite elástico, se modifica la matriz de rigidez de la estructura para tomar en cuenta la formación de una rótula plástica. Esto también se puede observar gráficamente, mediante la disminución de la pendiente en la curva de capacidad como se observa en la figura próxima (Ramos C., Rodríguez S.,2021).

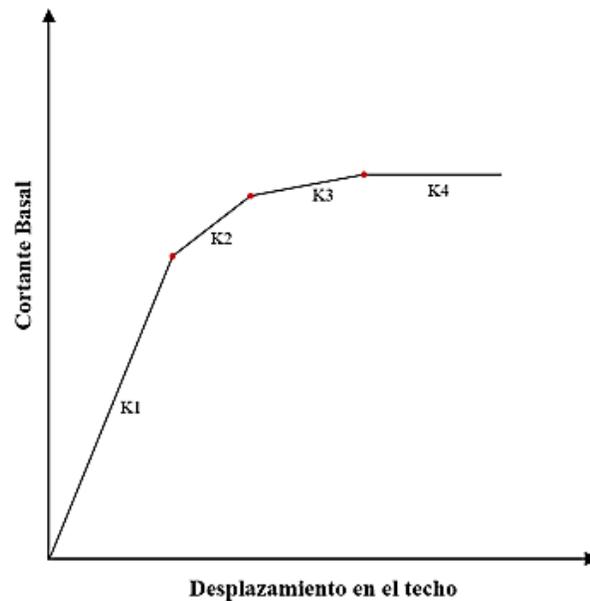


Imagen 10. Representación de la curva Pushover. (Fuente: Ramos C., Rodríguez S.,2022)

A esto los autores añaden:

En términos generales, este proceso consiste en aplicar un patrón de carga lateral a una estructura; el cual incrementa en cada iteración del proceso, produciendo que los elementos de esta fluyan, formando rótulas plásticas. Cada iteración termina cuando se forma una rótula plástica y en ese instante se calculan las deformaciones, fuerzas y momentos de los elementos de la estructura. Después, se cambia la matriz de rigidez de la estructura, se aplica nuevamente el patrón de carga lateral y se repite el proceso hasta que la estructura alcance una deformación deseada o pierda su capacidad (Ramos C., Rodríguez S.,2022).

### **1.9.2 ESPECTRO DE CAPACIDAD**

Segundo los siguientes actores: L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999 define:

Cada tipología tiene sus características, que definen un comportamiento específico. El comportamiento frente a un cortante en la base se puede expresar a través de las curvas de capacidad, curvas que se pueden definir por 3 puntos: i) la capacidad de diseño, ii) la capacidad elástica y iii) la capacidad última (ver imagen 7 y 8). La capacidad de diseño representa la resistencia nominal del edificio definida por las normas de diseño antisísmico. La capacidad elástica representa el valor real de su resistencia frente a cargas horizontales, considerando resistencias reales de los materiales del edificio, no las nominales, y la capacidad última representa la resistencia máxima del edificio, cuando la estructura está totalmente plastificada.

Hasta el punto de plastificación, el espectro de capacidad del edificio es lineal, con una rigidez constante, y está basado en la estimación del período fundamental real del edificio. El período fundamental real es en general más largo que el periodo prescrito por las normas, debido a fisuraciones, a la flexibilidad de las cimentaciones o a otros elementos adicionales. Entre el punto de comienzo de la plasticidad y el de la capacidad última, la pendiente de la curva cambia entre un estado elástico puro y un estado plástico completo. En esta aplicación se van a considerar las curvas de capacidad obtenidas por HAZUS (NIBS, 1997).

Las curvas de capacidad se basan en estimaciones de propiedades que afectan la capacidad de diseño, elástica y última de cada tipología de edificios. Se ha elegido la categoría "low code", dado que para nuestra zona de estudio las normativas de construcción tienen un nivel de exigencia relativamente bajo. Como ejemplo, en la Imagen 12 se presenta la curva de capacidad para edificios en mampostería no reforzada (L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999).

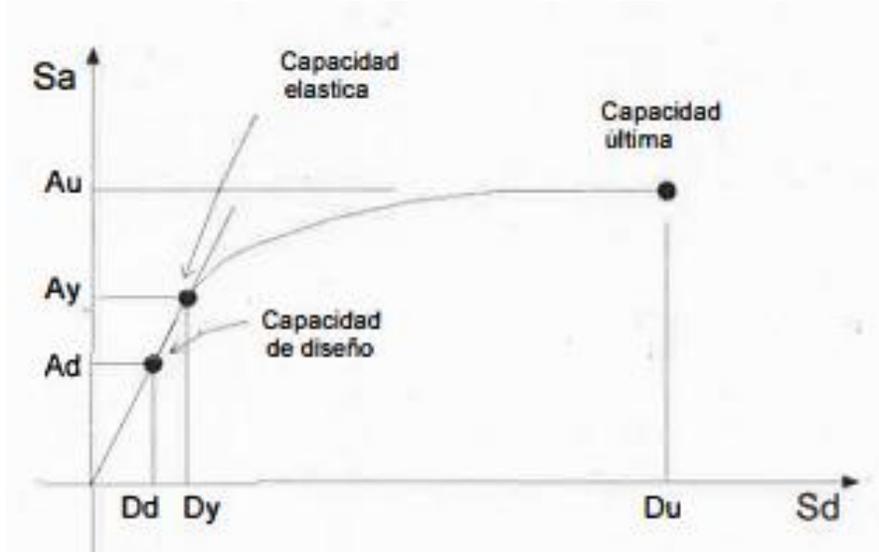


Imagen 11. Características de la curva de capacidad. (Fuente: L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999)

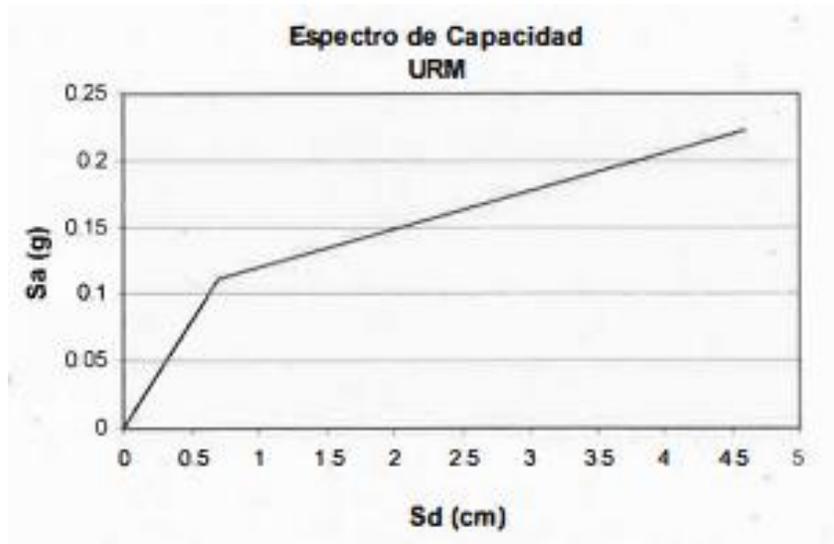


Imagen 12. Representación esquemática de la curva de capacidad para mampostería no reforzada. ((Fuente: L. Chiroiu, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, A. Barbat y L. Pujades, 1999)

Dunn (2016) nos dice detalladamente acerca de las curvas:

Consiste en aplicar fuerzas laterales incrementales a la estructura hasta que este alcance el colapso. En este método, a medida que incrementan las fuerzas laterales, se producen rotulas plásticas en los elementos, cambiando la rigidez de la estructura y permitiendo una redistribución de la carga. Este proceso continúa hasta que la generación de rotulas plásticas produzca una inestabilidad en la estructura, la cual es considerada como colapso.

Dunn (2016) adiciona en referencia al tipo de análisis:

Es una técnica de análisis utilizada en el diseño por desempeño, la cual utilizando un patrón de cargas lateral, que se incrementa en cada iteración, lleva la estructura más allá del rango elástico y, posteriormente, al colapso o hasta una deformación máxima, y así, se obtiene una gráfica de fuerza desplazamiento conocida como curva de capacidad o Pushover.

De igual manera, es importante transformar a coordenadas espectrales, para lograr hacer el espectro de capacidad, en este punto las cargas laterales producidas por el sismo pasan a ser aceleración espectral ( $S_a$ ), en cambio los desplazamientos pasan a ser desplazamientos espectrales ( $S_d$ ), siendo este el formato ADRS.

A continuación, las siguientes ecuaciones para convertir a ADRS el cual fueron obtenidos del ATC 40 (1996) y el FEMA 440 (2005):

$$S_{ai} = \frac{V_i}{\alpha_1}$$

$$S_{di} = \frac{S_i}{PF_1 * \phi_{1,roof}}$$

Donde:

- $\alpha_1$ : *Coefficiente de masa modal*
- $PF_1$ : *Factor de participación para el primer modo de la estructura*

- $\phi_{1,roof}$ : Nivel de amplitud del techo en el primer modo
- $V_i$ : Punto del cortante basal de la curva de capacidad
- $W$  : Peso sísmico
- $S_i$  : Punto del desplazamiento en la curva de capacidad

Nota: En este trabajo no se hará el análisis Pushover, este ya fue calculado por estudios previos y nosotros utilizaremos esos resultados.

### 1.9.3 ESPECTRO DE CAPACIDAD BILINEAL

Las curvas bilineales son fundamentales para la evaluación sísmica, estas curvas simplifican la representación del comportamiento no lineal de un sistema estructural, permitiendo un análisis más accesible. Se caracteriza por su forma que está constituida por dos segmentos lineales, con un punto de cedencia en donde la estructura pasa de comportarse de manera lineal a no lineal.

En el Capítulo 4 de un estudio hecho por Rosangel Moreno González (2007) nos detalla lo siguiente acerca de las curvas bilineales:

Con la finalidad de tener parámetros objetivos y cuantificables respecto al comportamiento de la estructura, el espectro de capacidad se representa por medio de una curva bilineal simplificada definida por dos puntos de control: capacidad de cedencia ( $D_y, A_y$ ) y capacidad última ( $D_u, A_u$ ) (ver Imagen 13).

El punto de cedencia significa el desplazamiento que la respuesta de la estructura empieza a ser fundamentalmente no lineal. Este punto viene definido por ( $D_y, A_y$ ), donde D se refiere al desplazamiento, A la aceleración y el subíndice y se refiere a la cedencia. Este punto es importante ya que nos indica el inicio en el que la estructura comienza a tener daños significativos.

El punto de capacidad ultima es el desplazamiento en el que el sistema estructural ha alcanzado antes de su colapso. Este punto viene definido por ( $D_u, A_u$ ), donde el subíndice u se refiere a la capacidad ultima. Este punto es crucial ya que nos

permite conocer los límites de resistencia y la ductilidad global del sistema estructural. (Moreno González, 2007).

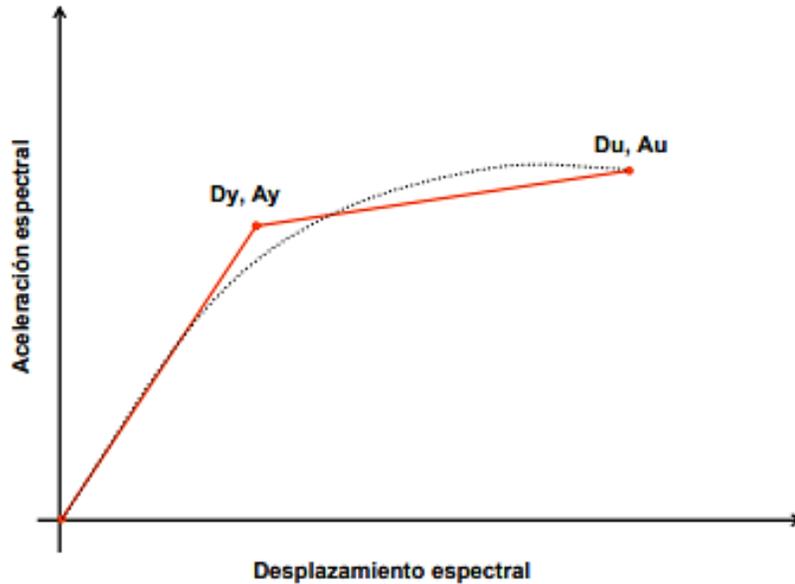


Imagen 13. Representación Bilineal de la curva de capacidad. (Fuente: Rosangel Moreno González, 2007)

Además, Rosangel Moreno González (2007) nos señala que:

La representación bilineal de la curva del espectro de capacidad se determinó con un criterio de balance de energía. Así, se busca una curva bilineal que pueda absorber la misma energía que la curva de capacidad real (área bajo la curva) y que tenga el mismo punto de colapso. Partiendo de la rigidez elástica, el punto de cedencia se define de forma que el área bajo la curva de capacidad y el área bajo su aproximación bilineal coincidan. En otras palabras, se igualan las áreas que, comprendidas entre ambas curvas, quedan por encima y por debajo de la curva de capacidad.

Este punto de desplazamiento último se lo consigue cuando este llega a su máxima ductilidad dicho previamente ( $\mu d$ ), y se la defino como:

$$\mu d = \frac{Du}{Dy}$$

Para completar Rosangel Moreno González (2007) nos cita que “una estructura tiene ductilidad, cuando es capaz de responder inelásticamente a una acción sísmica prevista en su diseño, sin una degradación significativa de la resistencia”.

#### **1.9.4 PUNTOS DE DESEMPEÑO**

Esta definición es útil para el diseño de nuevas estructuras, rehabilitación de estructuras existentes y análisis de vulnerabilidad y daño sísmico. Permite entender de mejor manera el comportamiento de una estructura sometida a movimientos sísmicos de diferente intensidad y es de gran ayuda para incrementar los niveles de seguridad a un bajo costo (Moreno Rosangel, 2006).

Choque y Luque (2019) menciona respecto al tema que:

El punto de desempeño es una estimación del desplazamiento máximo esperado del último nivel de un edificio (techo) calculado para un sismo. En consecuencia, su resultado presenta el estado de daño asociado a la estructura que puede ser comparado con el objetivo de desempeño deseado.

Además, Choque y Luque (2019) agrega lo siguiente:

Los procedimientos de análisis dinámico no lineal NDP (Nonlinear Dynamic Procedure) permiten estimar de manera exacta el comportamiento no lineal de los edificios, sin embargo, no resulta práctico. Por lo tanto, se proponen métodos de análisis no lineal simplificados conocidos como análisis estático no lineal NSP (Nonlinear Static Procedure) como el análisis Pushover.

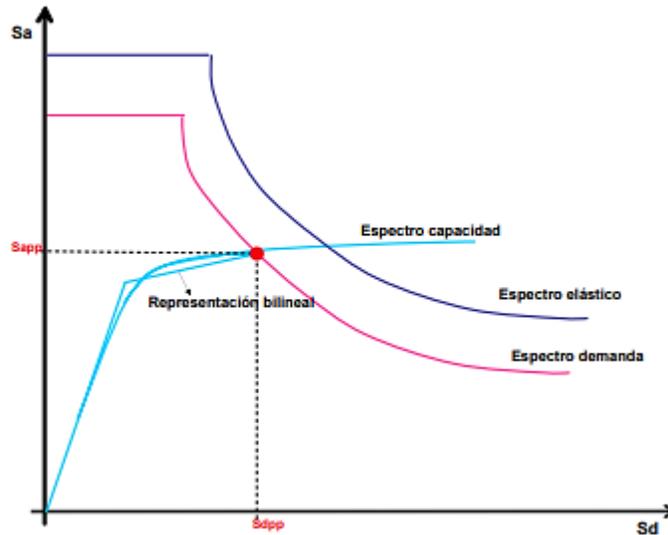


Imagen 14. Espectros de capacidad y demanda y punto de desempeño. (Fuente: Rosangel Moreno Gonzalez, 2007)

## 1.10 METODOLOGÍA DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD

### 1.10.1 FEMA 440

La Agencia Federal de Manejo de Emergencia (FEMA), en su documento publicado que lleva el título de “Procedimientos de Mejora de análisis sísmico estático no lineal” subido en el año 2005, que nos relata el método del espectro de capacidad y en que consiste:

El objetivo del Método del Espectro de Capacidad es desarrollar espectros de demanda y capacidad apropiados para la estructura y determinar su punto de intersección. Durante este proceso, también se evalúa el desempeño de cada componente estructural. La curva de demanda se basa en el espectro de respuesta del terremoto y las curvas de capacidad se basan en el análisis Pushover no lineal estático.

La curva de capacidad se obtiene a partir de un análisis Pushover, donde, la estructura es sometida a niveles crecientes de carga, y se grafica el cortante basal versus el desplazamiento del techo de la estructura a lo largo del proceso. El espectro de capacidad se obtiene transformando el espectro de cortante basal versus

desplazamiento del techo en un espectro de aceleración espectral versus desplazamiento espectral. (FEMA 440, 2005)

El FEMA 440 (2005) adiciona que:

La intersección de una curva de demanda apropiada con la curva de capacidad se llama punto de desempeño. El punto de desempeño define el cortante basal y el desplazamiento estimado de la estructura cuando está sujeta al terremoto representado por la curva de demanda. El comportamiento de la estructura en el punto de desempeño se compara con criterios de aceptación predefinidos para determinar si se cumplen los objetivos de diseño.

El FEMA 440, nos presenta tres métodos, siendo estos el Método “A”, Método “B” y el método “C”, estos tres para lograr desarrollar el método del espectro de capacidad (CSM), el cual lo detallaremos en las secciones de continuación.

### **1.10.2 MÉTODO “A”**

Alfredo Molina y Mateo Ajila (2024) en su trabajo de titulación que lleva por nombre “Cálculo de curvas de fragilidad mediante código de Python, utilizando el Método de Espectro de Capacidad (CSM)” nos describe de la mejor manera los siguientes métodos y su aplicación:

- a) Se elige un espectro de demanda de referencia con un amortiguamiento del 5%. A continuación, se introduce el efecto de la interacción suelo-estructura, modificando el espectro a través de reducciones en las ordenadas espectrales por interacción cinemática y ajustando el amortiguamiento desde el valor inicial ( $\beta_i$ ) hasta un valor final ( $\beta_0$ ) que considera el amortiguamiento de la cimentación. Si se desprecia el amortiguamiento de la cimentación,  $\beta_0$  será igual a  $\beta_i$ .

- b) El espectro modificado se convierte al formato aceleración desplazamiento (ADRS) según lo indica el ATC-40, lo que da como resultado el espectro de demanda ADRS inicial. Este procedimiento está descrito en la sección 1.8.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a$$

- c) Luego, se genera la curva de capacidad en formato ADRS, de igual manera, se sigue las condiciones del ATC-40. este proceso se menciona en la sección 1.8.1 y 1.8.2.

$$S_{ai} = \frac{V_i}{\alpha_1}$$

$$S_{di} = \frac{S_i}{PF_1 * \phi_{1,roof}}$$

- d) Se debe definir un punto de desempeño inicial en función a la aceleración máxima  $a_{pi}$  y desplazamiento máximo  $d_{pi}$ .
- e) Se procede a crear la curva bilineal explicada en la sección 1.8.3., con los puntos de fluencia  $(d_y, a_y)$ , y se define el periodo inicial  $T_0$ .

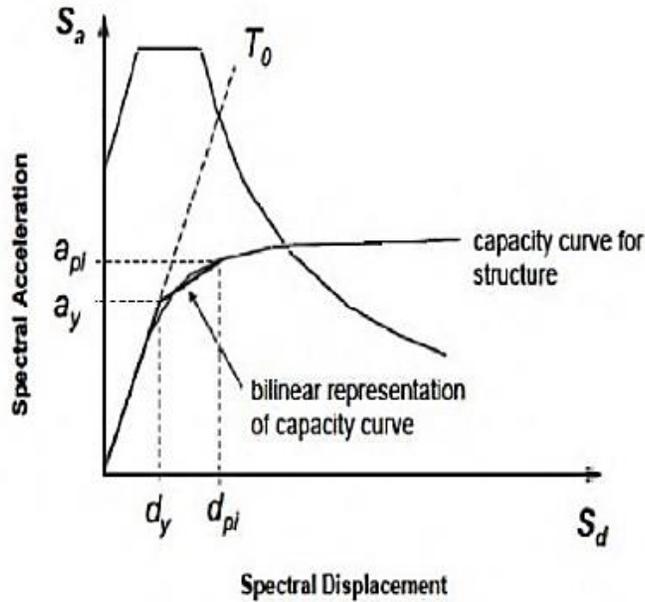


Imagen 15. Período inicial, Curva Bilineal, Punto de Interés. (Fuente: FEMA 440, 2005)

- f) En base al paso 5, se calcula valores de rigidez (post - elástica  $\alpha$ ) y ductilidad ( $\mu$ ), y con estos valores se calcula el amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) y período efectivo ( $T_{eff}$ ). Se utilizan diferentes fórmulas propuestas por el FEMA 440, según la ductilidad obtenida:

$$\alpha = \frac{\left( \frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y} \right)}{\frac{a_y}{d_y}}$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

Para ductilidad  $1.0 < \mu \leq 4.0$ :

$$\beta_{eff} = 4.9(\mu - 1)^2 - 1.1(\mu - 1)^3 + \beta_0$$

$$T_{eff} = T_0 [0.2(\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1]$$

Para ductilidad  $4.0 < \mu \leq 6.5$ :

$$\beta_{eff} = 14.0 + 0.32(\mu - 1) + \beta_0$$

$$T_{eff} = T_o[0.28 + 0.13 (\mu - 1)]$$

Para ductilidad  $\mu > 6.5$ :

$$\beta_{eff} = 19 \left\{ \frac{0.64(\mu - 1) - 1}{[0.64(\mu - 1)]^2} \right\} \left( \frac{T_{eff}}{T_o} \right)^2 + \beta_0$$

$$T_{eff} = T_o \left\{ \left[ \sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\}$$

g) Se ajusta los espectros en formato ADRS iniciales utilizando el  $\beta_{eff}$ .

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{eff})} \rightarrow \beta_{eff}(\%)$$

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} (S_a)_\beta$$

h) Con el periodo efectivo y el espectro en formato ADRS calculado con el amortiguamiento efectivo, se determina el desplazamiento máximo esperado.

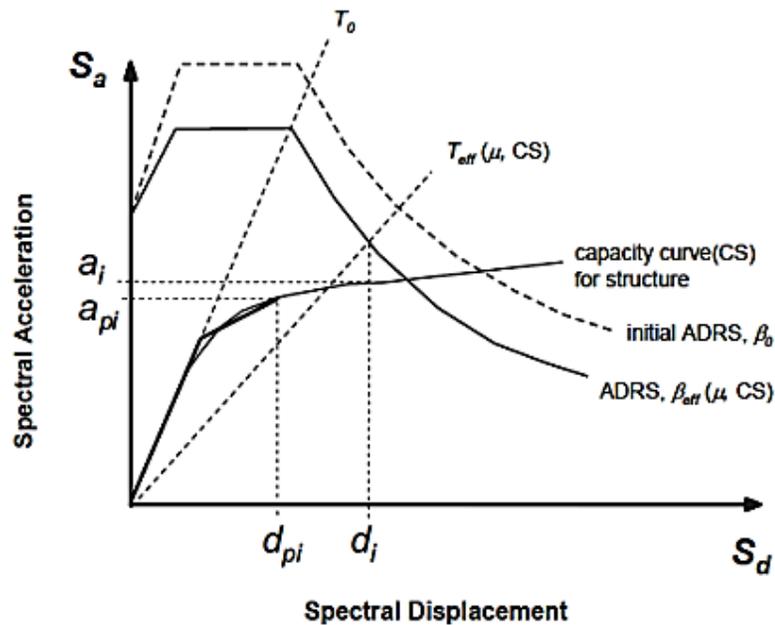


Imagen 16. Desplazamiento máximo que se espera. Usando Método A. (Fuente: FEMA 440, 2005)

Este método “A” fue obtenido y detallado por los autores Molina y Ajila (2024).

### 1.10.3 MÉTODO “B”

Molina y Ajila (2024) nos indican que:

A diferencia del método “A”, este método, define el punto de desempeño o desplazamiento objetivo con un espectro de demanda en formato MADRS, donde la letra “M”, hacer referencia a “modificado”

Por lo que Dunn Arias (2016), nos explica el Método B que será colocado por puntos a continuación:

- a) Haciendo uso del  $\beta_{eff}$ , se debe calcular el factor de modificación “M”, este se debe multiplicar por los valores de aceleración, y así generar el espectro de respuesta modificado “aceleración vs desplazamiento” (MADRS).

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2$$

$$\left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \frac{1 + \alpha (\mu - 1)}{\mu}$$

- b) Finalmente, se determina el desplazamiento objetivo con la intersección de la curva de capacidad y el espectro de respuesta modificado.

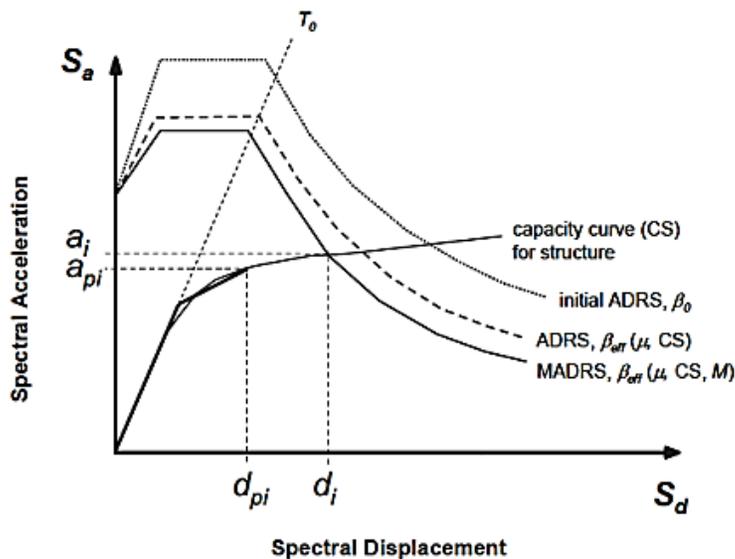


Imagen 17. Desplazamiento máximo que se espera. Usando el Método B. (Fuente: FEMA 440, 2005)

### 1.10.4 MÉTODO “C”

Dunn Arias (2016), comenta acerca de este método que:

“Se usa el espectro de respuesta modificado para múltiples soluciones asumidas ( $a_{pi}$  y  $d_{pi}$ ), y las correspondientes ductilidades para generar una línea, uniendo los múltiples puntos de desempeño.”

Este mismo autor usa el mismo mecanismo que se usó para el método “A” y “B”, entonces seguiremos los mismos pasos del 1 al 7 de los métodos previos, aumentando el punto 1

del método “B”, siguiendo con lo relacionado Dunn Arias (2016), nos explica lo siguiente acerca de este método:

- a) Se encuentra un posible punto de desempeño que es generado por la intersección del periodo secante radial  $T_{sec}$ , con el espectro de respuesta modificado (MADRS). Ver Imagen 18.
- b) Aumentar o disminuir el punto de desempeño asumido y repetir el proceso para generar una serie de posibles puntos de desempeños.
- c) El punto de desempeño actual es definido por la intersección de la unión de puntos del paso con la curva de espectro de capacidad.

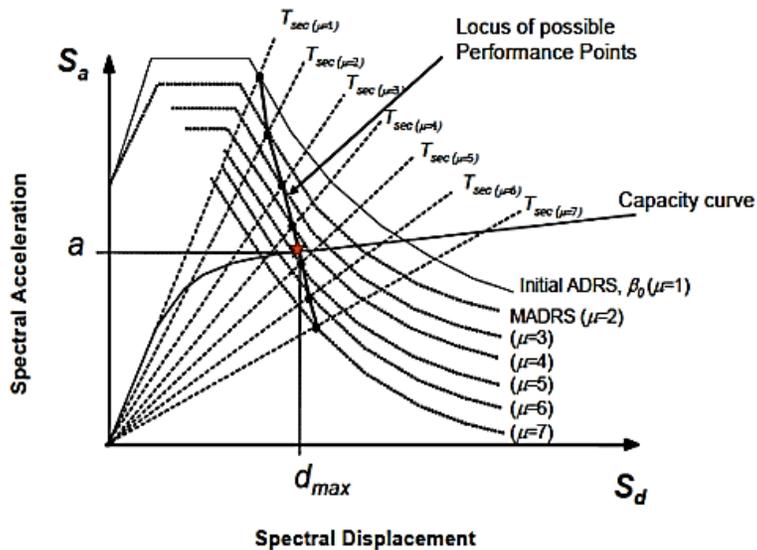


Imagen 18. Desplazamiento máximo que se espera. Usando el Método C. (Fuente: FEMA 440, 2005)

## 1.11 CURVAS DE FRAGILIDAD

Esta herramienta de curvas de fragilidad en resumen se basa en la probabilidad estadística que nos permite conocer cuál será el daño probable que tendrá dicha estructura, esto en función de la intensidad en el que suelo se movió durante el evento sísmico. Cada curva de fragilidad tiene dos parámetros principales: primero vendría el valor medio que significa el nivel esperado de daño para un estado limite en específico. El segundo es la desviación estándar que representa la variabilidad en la que la estructura responde bajo una demanda sísmica. Esta herramienta tiene como función para evaluar el riesgo sísmico, la vulnerabilidad, además de tomar medidas de prevención y mitigar daños futuros.

Las curvas de fragilidad son una herramienta clave en la determinación del riesgo sísmico. Estas permiten obtener probabilidades de exceder un estado de daño específico de acuerdo con un parámetro de demanda sísmica ingenieril ( $IM$ ). Este parámetro de demanda puede ser: el valor de aceleración máxima del terreno ( $PGA$ ), el desplazamiento espectral ( $S_d$ ) o la aceleración espectral ( $S_a$ ). (Pitilakis, Crowley, & Kaynia, 2014).

Tal como mencionamos en el primer párrafo estas curvas suelen describir mediante una distribución probabilística tipo Log-Normal mediante la siguiente ecuación dada por Guéguen (2013):

$$P[d_s / IM] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{IM}{IM_{ds}} \right) \right]$$

- $IM_{ds}$  = El valor medio de la medida de intensidad sísmica ( $IM$ ) en el que la estructura alcanza el umbral del estado de daño  $D_s$ .
- $\beta_{ds}$  = Desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral.
- $IM$  = Medida de intensidad sísmica.
- $\Phi$  = Función de distribución normal estándar acumulada.

El desarrollo de la curva de capacidad y la estimación del punto de desempeño (Pd) es una manera eficiente y simplificada de evaluar el nivel de daño de una estructura debido a un nivel de demanda sísmica, sin embargo, esta evaluación determinística es insuficiente cuando se requiere hacer un análisis para estimar la vulnerabilidad de muchos edificios de un diseño similar, de una ciudad o zona geográfica determinada (Guéguen, 2013).

Guéguen (2013) adiciona respecto a las curvas que: “Las curvas de fragilidad son una manera probabilística de tratar los análisis determinísticos realizados para las estructuras, las incertidumbres son determinadas a partir de la variable de la desviación estándar.”

Esteban Calderón S. (2018): “en la siguiente Imagen 19 se observa la incertidumbre en la distribución de la demanda sísmica y la capacidad estructural, variando la probabilidad de cada curva se puede dar un amplio rango de salidas de respuesta, lo cual significa que no existe un solo punto de desempeño sino una probabilidad asociada a un punto de desempeño. Es debido a esta variabilidad que métodos probabilistas, como las curvas de fragilidad, comprenden un mejor acercamiento para determinar la vulnerabilidad.”

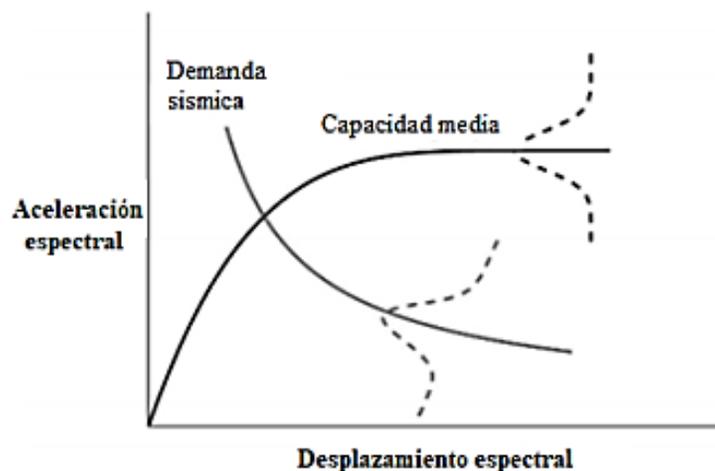


Imagen 19. Representación de las incertidumbres asociadas a la demanda sísmica y capacidad estructural en la determinación del punto de desempeño. (Fuente: Guéguen, 2013)

### 1.11.1 MÉTODO ANALÍTICO

En la siguiente Imagen 20 adjuntaremos los diversos métodos que existen en la actualidad para calcular las curvas de fragilidad que comúnmente se clasifican en 4 categorías.

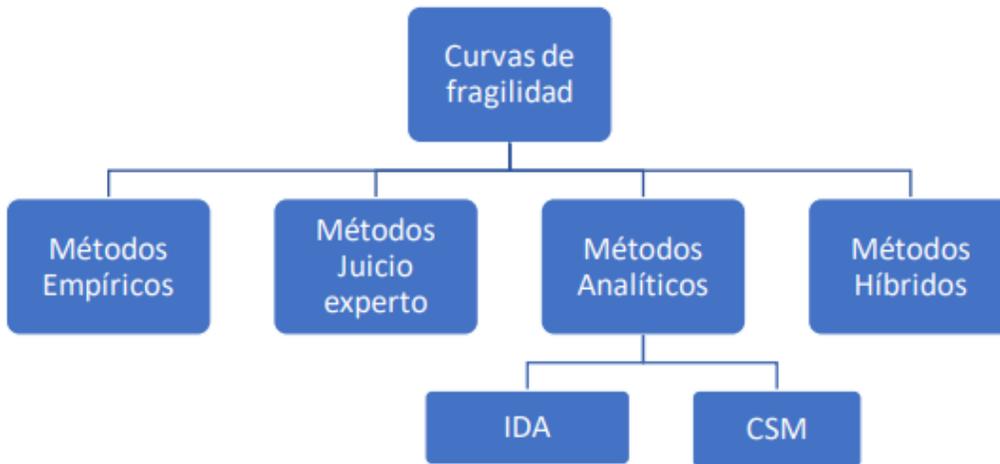


Imagen 20. Metodologías para calcular las curvas de fragilidad. (Fuente: Pitilakis et al., 2014)

Esteban Calderón S. (2018) aclara sobre los métodos analíticos que: “Estos métodos adoptan distribuciones de daño realizadas mediante análisis de modelos estructurales tanto dinámicas, con modelos de aceleración en el tiempo; como con modelos estáticos como espectros de respuesta. En general resulta en una amplia credibilidad de la estimación de la vulnerabilidad.”

Dentro de estos métodos se encuentran los más populares y en el cual nosotros estamos basando y tomando de origen nuestro trabajo de titulación que es Método del Espectro de Capacidad (CSM) que según lo descrito por Calderón S. (2018): “Es la utilizada por la metodología HAZUS y la LM2 del Risk-UE, está basado en el uso de curva de capacidad realizada de un análisis tipo Pushover”.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Ahora en esta sección presentaremos como se modificó el código empezando con datos de entrada 3 carpetas, en el cual la primera carpeta contiene los registros sísmicos, el cual nos ayuda a encontrar las demandas sísmicas. Luego en la segunda carpeta tenemos las curvas bilineales, estas dependen de la tercera carpeta el cual contiene coordenadas. Las coordenadas son las que van a representar la curva bilineal o la curva de capacidad. Por lo cual nosotros mantenemos un orden.

- Registros Sísmicos
- Curvas Bilineales
- Coordenadas

### 2.1 REGISTROS SÍSMICOS

Para empezar, debemos tener una gran cantidad de registros sísmicos, nosotros tenemos un total de 121 registros sísmicos, estos se los puede conseguir de distintas paginas oficiales, tomando como ejemplos: PEER, RENAC. Para poder avanzar necesitamos que los registros obtenidos estén en unidades de GALS  $\left(\frac{cm}{seg^2}\right)$ . Esas unidades son fundamentales, al momento de usar en nuestro código el Método de Newmark que se encuentra en el marco teórico del capítulo anterior en la sección 1.7, para lograr sacar los espectros de respuesta de aceleración como de desplazamiento.

Por consecuente necesitamos tener un formato para que el código pueda leer estos archivos. Por lo que estos registros sísmicos, se encuentra en datos archivo de texto (.txt) comenzando desde la primera fila y en una sola columna. En la siguiente Imagen 21, mostramos los varios registros con su formato establecido y la ruta donde se encuentran. Para mayor facilidad estos archivos de textos deben estar en una carpeta llamada “Registros Sísmicos”.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
184057.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	42 KB
184327.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	42 KB
ABBAR--L.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	38 KB
ABBAR--T.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	33 KB
ABBAR--V.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	38 KB
ACHNE.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	155 KB
ACHNN.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	156 KB
AES2E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	296 KB
AES2N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	296 KB
AGY1E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	351 KB
AGY1N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	351 KB
AGY2E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	325 KB
AGY2N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	324 KB
ALB1E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	189 KB
ALB1N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	189 KB
ALB2E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	231 KB
ALB2N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	231 KB
AMA1E.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	150 KB
AMA1N.txt	7/8/2024 9:41	Documento de te...	150 KB

Imagen 21. Ruta de registros sísmicos. (Fuente: Elaboración Propia)

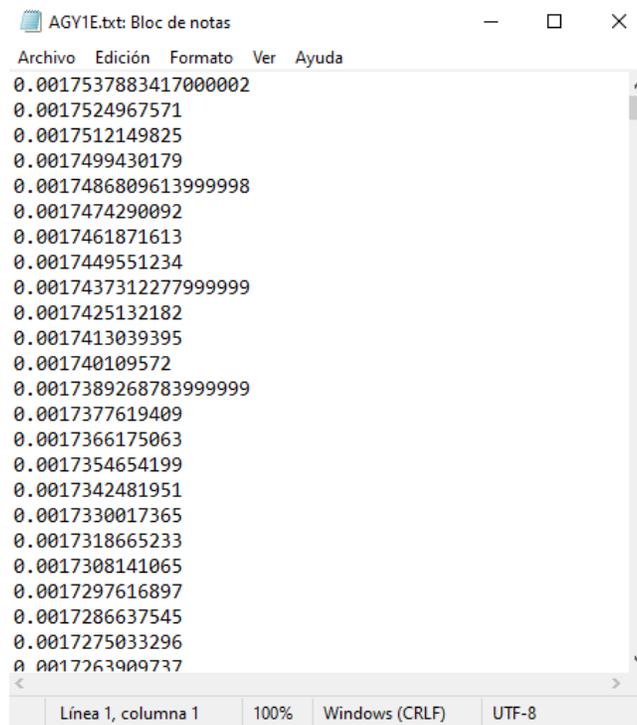


Imagen 22. Formato de cada archivo de texto correspondiente a cada registro sísmico. (Fuente: Elaboración Propia)

## 2.2 DATOS DE ANÁLISIS BILINEAL

En nuestro caso nos basamos completamente en trabajos de titulación pasadas, el cual iremos mencionando en el transcurso de este y los siguientes capítulos, llegamos a que se necesitan otros valores de inputs y así el código pueda desarrollar las curvas de fragilidad a partir de curvas bilineales.

Cuando el código modificado empieza a correr lo que primero solicita al usuario que elija entre: Curva de capacidad el cual representa la respuesta no lineal de la estructura bajo carga. Y aproximación bilineal el cual genera una curva idealizada con dos tramos lineales esto para facilitar el análisis.

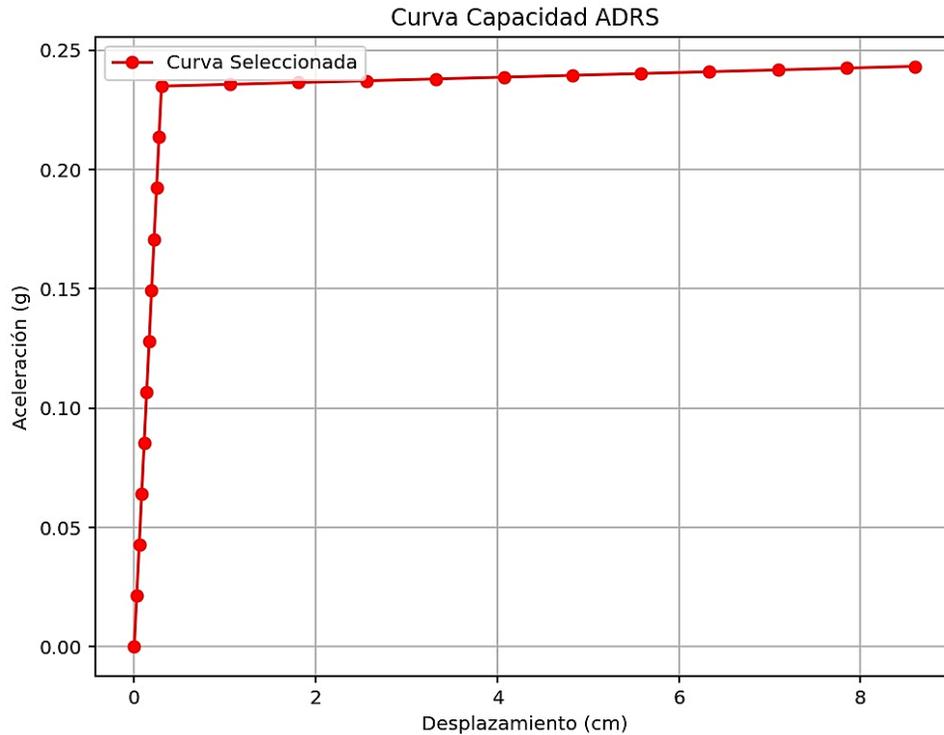
```
Seleccione el tipo de curva a procesar:  
1. Curva de Capacidad  
2. Aproximación Bilineal  
Ingrese el número de su elección: 2|
```

*Imagen 23. Primera parte del código modificado. (Fuente: Elaboración Propia)*

En el menú nos muestra dos opciones y espera la entrada del usuario. Si nosotros ingresamos “1”, la función retorna a “Capacidad”; en cambio si se ingresa “2”; esta retoma a “bilineal”. En el momento de escoger la curva bilineal este interpola los puntos entre sus coordenadas para su desarrollo en el método de espectro de capacidad. Siempre y cuando se haya insertado de manera correcta los archivos de texto de los registros. Con esto el código una vez leído los registros sísmicos nos arrojará la curva de capacidad y este pedirá a usuario las siguientes coordenadas:

$(D_{ui}; A_{ui})$ : Siendo  $D_{ui}$  el desplazamiento ultimo y  $A_{ui}$  el cortante último. Este nos muestra el último punto de la curva de capacidad ya graficada.

Haciendo acuerdo que no se debe colocar el valor de las coordenadas de  $x$  y  $y$ , una vez que nos haya grafica la representación capacidad sobre bilineal nos pide digitar el último punto a calcular. En la mayoría de nuestros casos que sería bilineal es 23. En el caso que sea de capacidad se toma el último punto de cedencia, el cual esta puesta en coordenadas según el usuario.



```

Ingrese la posición del punto DU-AU: 23
Ingrese las coordenadas iniciales del punto A para la curva pushover (Dy, Ay): 0.3,0.2349
  
```

Imagen 24. Curva de capacidad. (Fuente: Elaboración Propia)

Siguiendo con el proceso del código modificado, este leerá un archivo de datos sísmicos y este procesa la aceleración de cada registro y calcula los espectros de desplazamiento, al igual que el espectro de aceleración para una serie de periodos naturales ( $T_n$ ). Este hará una probabilidad con respecto a la aceleración espectral de la estructura, lo cual esto nos da un nuevo enfoque para la creación de curvas de fragilidad. En otras palabras, para cada archivo de aceleración sísmica, el código hace los siguientes pasos:

- Convierte la aceleración de  $\frac{cm}{s^2}$  a unidades de g.
- Calcula el espectro de desplazamiento (ESPECTD) y espectro de aceleración (ESPECTA) para un conjunto de periodos  $T_n$ .

- Utiliza un modelo de oscilador simple amortiguado para obtener respuestas de desplazamiento máximo.

Una vez hecho lo primero el código pedirá las coordenadas ( $D_{yi}$ ;  $A_{yi}$ ). Estas coordenadas son propuestas por el usuario que usa el código, siendo  $D_{yi}$  el desplazamiento y  $A_{yi}$  el cortante esperado de la estructura, cuando comienza a ser no lineal. Este punto para así tener la representación bilineal de la curva de capacidad. Para el caso de capacidad bien el usuario puede estimar un punto de cedencia y lo que hace el código verifica cuanto será el error de representación bilineal tiene la nueva grafica.

Prosiguiendo con el código en la parte de consola este va a ajustar la curva bilineal a la curva de capacidad. Este va a calcular el área bajo la curva real mediante integración numérica. Ahora este calcula el área bajo la curva bilineal, minimizando el error de ajuste ajustando valga la redundancia el punto de fluencia  $D_y$ ,  $A_y$ . Nos aseguramos siempre de que el error sea menor al 1%. Dado a que en nuestro trabajo de titulación trata de curvas bilineales, este porcentaje siempre será 0, pero al momento en el que el usuario quiera ingresar curvas de capacidad, continua este proceso para que el porcentaje sea menor al 1%. El código da la opción, si el área bilineal es mayor al área de capacidad minimice ese error y tengas un error por debajo del 2.5%.

```

Área bajo la curva Pushover: 2.02
Área bajo la curva de la Representación bilineal inicial: 2.02
Error de la representación bilineal inicial: 0.00%
¿Calcular nuevas coordenadas para el punto A? (si/no): no
Rigidez post-elástica: 0.00
Ductilidad última esperada ( $\mu$ ): 28.67
To  $\leq$  1.2. Rango de Tn mantenido en 3.0
Periodo Inicial ( $T_0$ ): 0.23

```

*Imagen 25. Análisis de representación bilineal. (Fuente: Elaboración propia.)*

Ahora realizara un ajuste en la rigidez post-elástica y ductilidad. Se determina el periodo inicial  $T_0$  y se establece un rango de periodos  $T_n$  definiendo un conjunto de valores de periodo para los cuales se calculará la respuesta espectral de la estructura. En nuestro código modificado, usamos un rango mayor ya que estructuras con periodos largos suelen ser más flexibles y necesitan un análisis más detallado y un rango más corto porque las estructuras más rígidas o con bajos periodos tienden a tener su respuesta concentrada en este rango.

Para cada registro sísmico, se obtiene la intersección entre el espectro de demanda MADRS y la curva bilineal. Se determina el Sd y Sa del punto de desempeño. Y este procede almacenar estos valores para generar las curvas de fragilidad.

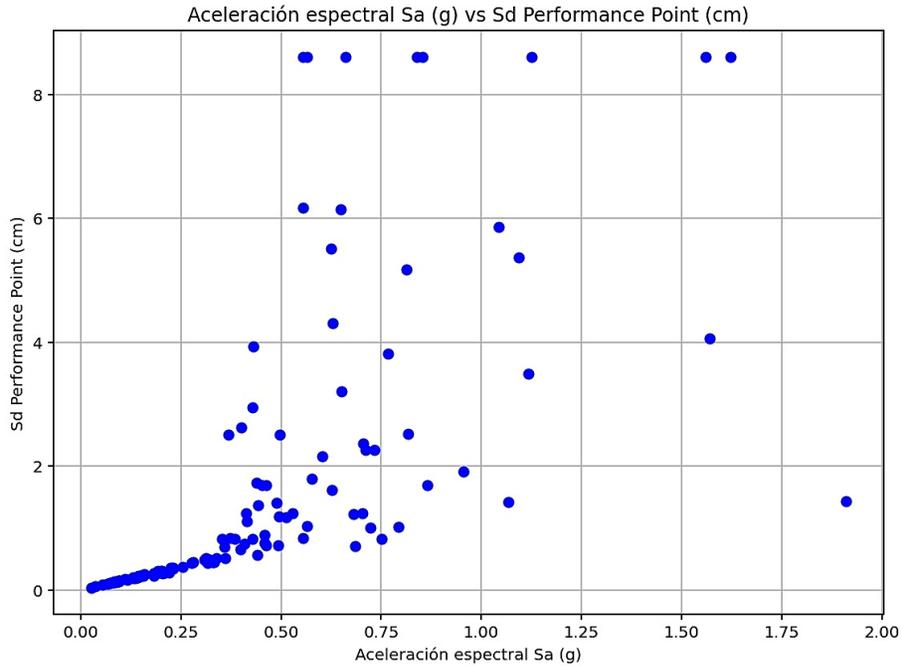


Imagen 26. Universo de puntos Sd vs Sa. (Elaboración: Fuente Propia)

### 2.3 FEMA 440 MÉTODO C (GRÁFICO)

Siguiendo los primero cuatro pasos ya vistos en la sección anterior, este empieza en los puntos de desempeño. Estos resultados serán presentados en el siguiente capítulo, con resultados de otros análisis para otra curva de capacidad. Ahora presentamos lo que muestra el terminal de Python una vez ingresado los valores input, no se presentan dentro de la tabla del terminal, todos los factores que se usaron y propuestos por el método B para la reducción del registro sísmico analizado. El factor Reduction (M/B) es un reductor sísmico del 5%, lo que hace es que este valor va disminuyendo mientras se vaya obteniendo una ductilidad mayor hasta llegar a una ductilidad máxima calculada.

Usando un rango de Tn desde 0 hasta 2.96 con incrementos de 0.04

	Ductilidad $\mu$	Periodo Efectivo T <sub>eff</sub>	...	Au	Reduction(M/B)
0	1.000000	0.226707	...	0.23490	0.997641
1	1.500000	0.236965	...	0.23505	0.691252
2	2.000000	0.263433	...	0.23520	0.578853
3	2.500000	0.299650	...	0.23535	0.540757
4	3.000000	0.339153	...	0.23550	0.531015
5	3.500000	0.375483	...	0.23565	0.527900
6	4.000000	0.378600	...	0.23580	0.456030
7	4.500000	0.393336	...	0.23595	0.436466
8	5.000000	0.408072	...	0.23610	0.421783
9	5.500000	0.422808	...	0.23625	0.410644
10	6.000000	0.437544	...	0.23640	0.402157
11	6.500000	0.452280	...	0.23655	0.395707
12	7.000000	0.466992	...	0.23670	0.393704
13	7.500000	0.480509	...	0.23685	0.388855
14	8.000000	0.493138	...	0.23700	0.384195
15	8.500000	0.504977	...	0.23715	0.379692
16	9.000000	0.516109	...	0.23730	0.375327
17	9.500000	0.526601	...	0.23745	0.371083

Imagen 27. Análisis para reducción de registro sísmico. (Fuente: Elaboración Propia)

El código nos da la opción de poder visualizar los puntos de intersección que tiene la demanda sísmica con la curva de capacidad.

## 2.4 PUNTOS DE DESEMPEÑO FEMA 440 MÉTODO C

Dado que la finalidad de nuestro estudio es graficar curvas de fragilidad para cualquier tipología estructural, cabe aclarar que se lo puede hacer siempre y cuando se realice su respectivo análisis no lineal. En esta parte del método, seguimos el espectro de desplazamientos espectrales (S<sub>d</sub>) frente a las aceleraciones espectrales (S<sub>a</sub>) con un amortiguamiento de 5%, lo que indica una ductilidad igual a 1. Adicional, se muestran los periodos secantes correspondientes a cada curva S<sub>d</sub> vs S<sub>a</sub> reducidas según el código. El objetivo es encontrar un punto de desempeño dentro de la curva de capacidad en formato ADRS.

En este punto podemos ver que el código se encuentra con dos casos para el punto de desempeño. En el primer caso cuando las curvas intersecan entre sí, y ahí encuentra el punto de desempeño; el otro caso es que ya con la máxima ductilidad calculada, así mismo con la curva S<sub>d</sub> vs S<sub>a</sub>, no encuentra una intersección, el código

establece como punto de desempeño el último punto de la curva de capacidad ADRS, y así determinamos todos los puntos de desempeño según el método C.

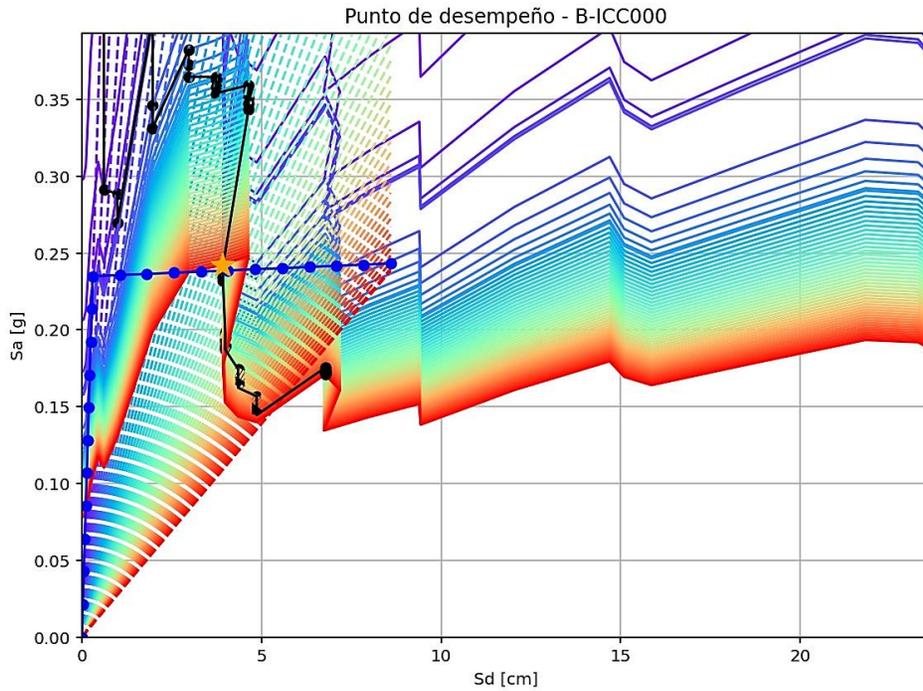


Imagen 28. Punto de desempeño, cuando intersecan. Propuesto por el FEMA440 en el Método C. (Fuente: Elaboración propia)

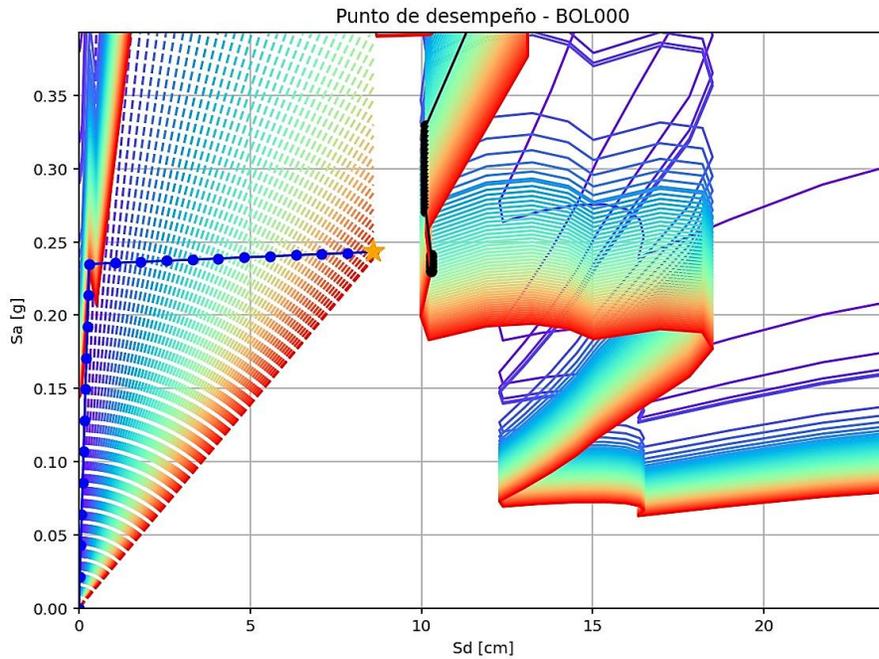


Imagen 29. Caso en el que toma el último punto de la curva de capacidad ADRS. (Fuente: Elaboración Propia)

Para este caso no utilizamos el periodo  $T_e$  tanto para la interpolación, ni para obtener el desplazamiento espectral  $S_d$ , y se usó el periodo inicial ( $T_o$ ) ya calculado para la estructura.

Ahora se establecen umbrales de daño: leve, moderado, extenso y colapso. Se cuenta el número de análisis y cuantos exceden cada umbral. Se calcula la probabilidad de excedencia en función de  $IM(S_a)$ . El código ajusta los parámetros theta y beta de una función de fragilidad teórica y la real, utilizando el método MSA (Multiple Stripes Analysis). Y posterior a este paso se grafican las curvas de fragilidad para cada nivel de daño. En la siguiente Imagen 30 podemos ver cómo se comportan el universo de puntos y estas presentan una variación, y es que dejo de ser lineal, lo cual nos conviene ya que la estadística y la probabilidad se asemeja más a la realidad.

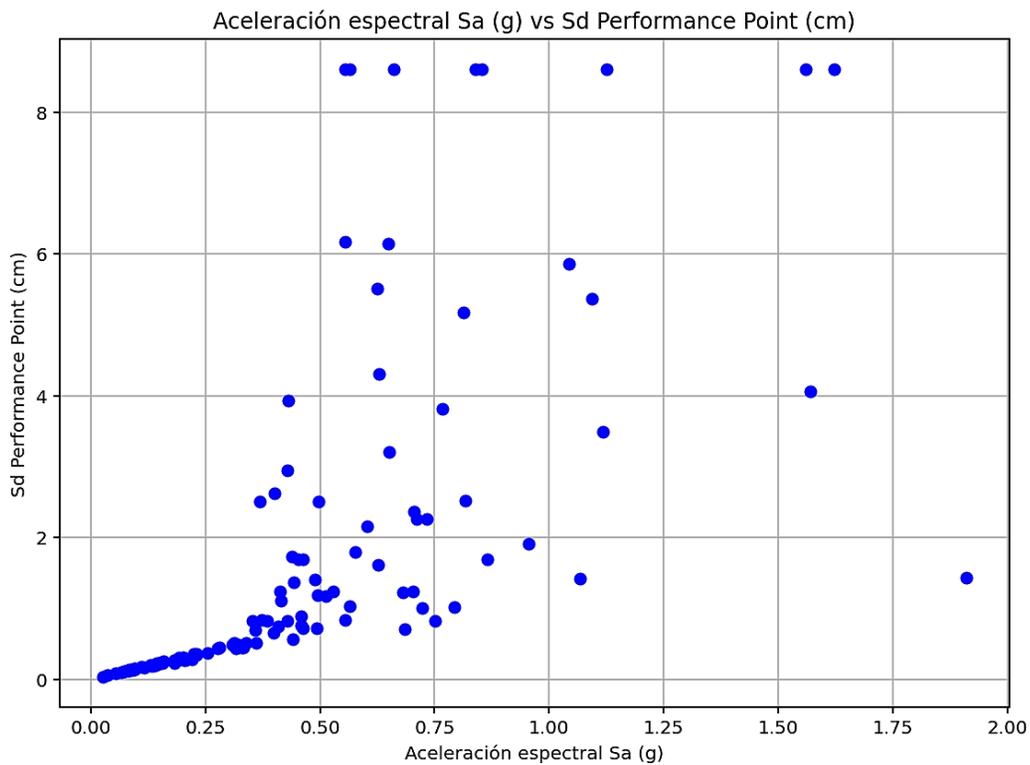


Imagen 30. Aceleración Espectral  $S_d$  (cm) vs  $S_d$  Performance Point (cm). (Fuente: Elaboración Propia)

## 2.5 CURVAS DE FRAGILIDAD FEMA 440 MÉTODO C

Para las curvas de fragilidad y fueran lo más precisas posibles hicimos lo siguiente. Ampliamos el tamaño de aceleraciones y desplazamientos, que en el trabajo de titulación pasado había un tope de 1G y un desplazamiento máximo de 50cm, ampliamos eso para tener un mayor rango de análisis porque al limitarlo así mismo limitamos los análisis para diferentes estructuras las cuales pueden llegar a tener desplazamientos hasta de 1 metro o incluso más.

Para diferentes estructuras se determinó para periodos iniciales de 1.2 el programa no puede tener un recorrido de 3s de periodo, por eso en nuestro caso ajustamos el código para que el programa automáticamente cambie el periodo de análisis de 3 a 20 segundos. Por lo que, con estas modificaciones, ya no hay limitaciones para generar intersecciones entre la curva bilineal y el espectro de demanda, ya que ahora puede adaptarse a cualquier estructura. Adicional este lleva un registro de tiempo para determinar si en el proceso de intercepción llega a haber un fallo en el proceso. Entonces una vez estimado los rangos de colapso, nos calcula la curva de fragilidad.

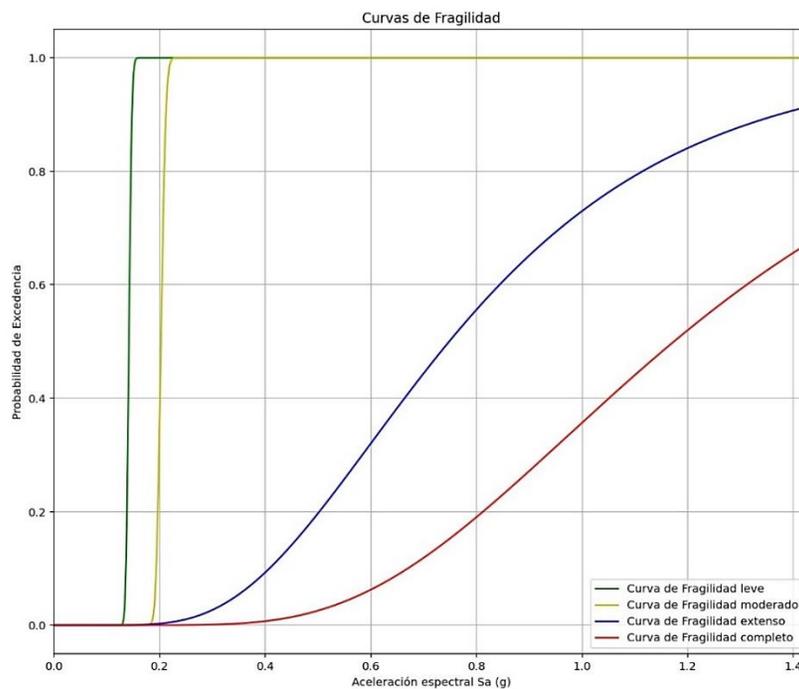


Imagen 31. Curva de fragilidad. Cr-D-5. Método C propuesto por el FEMA 440. (Fuente: Elaboración propia)

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1 RESULTADOS OBTENIDO FEMA 440 MÉTODO C

Usaremos los registros sísmicos que son un total de 121 para las siguientes 68 estructuras que estarán ancladas en los anexos. En este caso a analizar nos basamos en el caso Cr-D-5, lo cual basándonos en la sección 1.7 definimos que es un concreto reforzado dual de 5 pisos. Destacando que nosotros optamos para las categorías de estructuras mediante pórticos representativos, tanto como en dirección X, como en dirección Y. Por lo que las imágenes y graficas adjuntadas en este capítulo serán específicamente de este caso.

### 3.2 ANÁLISIS PARA OBTENCIÓN DE PUNTOS DE DESEMPEÑO FEMA 440 MÉTODO C

```
Rigidez post-elástica: 0.00
Ductilidad última esperada ( $\mu$ ): 28.67
Periodo Inicial ( $T_0$ ): 0.23
```

	Ductilidad $\mu$	Periodo Efectivo $T_{eff}$	...	Au	Reduction(M/B)
0	1.000000	0.226707	...	0.23490	0.997641
1	1.500000	0.236965	...	0.23505	0.691252
2	2.000000	0.263433	...	0.23520	0.578853
3	2.500000	0.299650	...	0.23535	0.540757
4	3.000000	0.339153	...	0.23550	0.531015
5	3.500000	0.375483	...	0.23565	0.527900
50	26.000000	0.705101	...	0.24240	0.272776
51	26.500000	0.707999	...	0.24255	0.270667
52	27.000000	0.710821	...	0.24270	0.268595
53	27.500000	0.713569	...	0.24285	0.266557
54	28.000000	0.716247	...	0.24300	0.264554
55	28.500000	0.718858	...	0.24315	0.262584
56	28.666667	0.719713	...	0.24320	0.261935

Imagen 32. Reducción del espectro de respuesta para determinado caso de ductilidad. (Fuente: Elaboración Propia)

En el final de esta imagen podemos encontrar nuestra ductilidad esperada de 28.67, mediante esta ductilidad se espera tener una reducción del espectro de demanda.

### 3.3 ACELERACIÓN ESPECTRAL ( $S_a$ ) vs PUNTOS DE DESEMPEÑO ( $S_d$ ) CURVA BILINEAL FEMA 440 MÉTODO C

Podemos encontrar que en los niveles más bajos tienen una tendencia lineal, esto a medida que va creciendo los puntos de desempeño se va dispersando las aceleraciones.

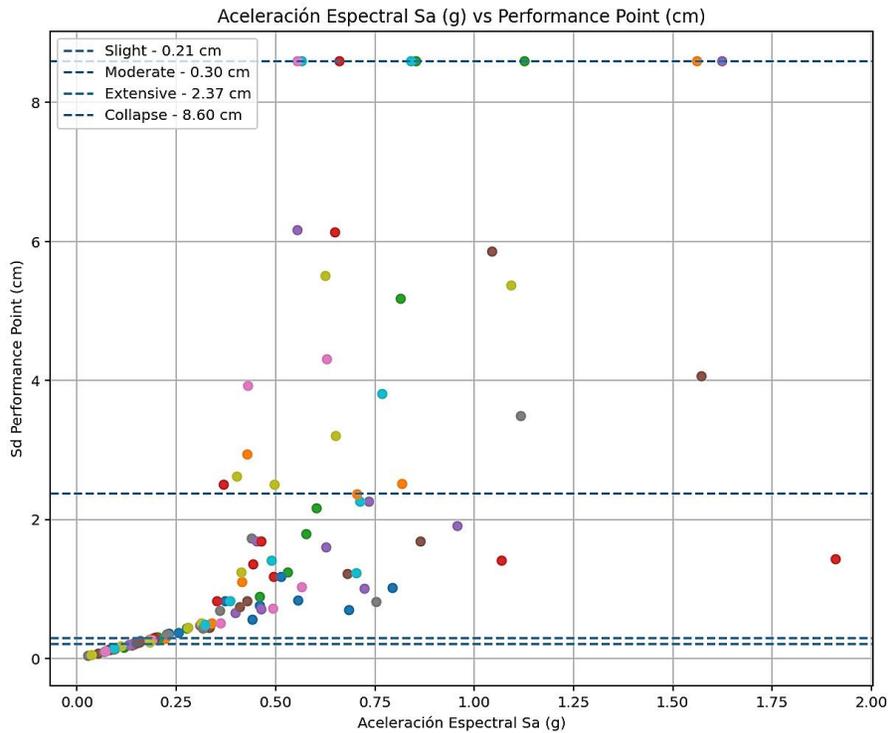


Imagen 33. Universo de puntos para la obtención de curvas de Fragilidad de la Curva Bilineal. (Fuente: Elaboración Propia)

```
Para el estado de daño 'leve':  
- Sa_min = 0.1418, Sa_max = 0.1423  
- Total de puntos en este rango: 2  
  
Para el estado de daño 'moderado':  
- Sa_min = 0.1996, Sa_max = 0.2213  
- Total de puntos en este rango: 7  
  
Para el estado de daño 'extenso':  
- Sa_min = 0.3680, Sa_max = 1.9100  
- Total de puntos en este rango: 63  
  
Para el estado de daño 'completo':  
- Sa_min = 0.5548, Sa_max = 1.9100  
- Total de puntos en este rango: 38
```

*Imagen 34. Análisis necesario para determinar los límites para cada estado de daño, curva bilineal. Cr-D-5 (Fuente: Elaboración Propia)*

Entonces en el último apartado de la modificación, demostramos como actúa el código, se divide en un conjunto de valores Sa en intervalos equitativos en términos de percentiles. De ahí este convierte la lista de puntos dentro de los límites en orden ascendente. Ahora genera una lista de números espaciados uniformemente entre 0% y 100% para proceder a calcular los valores de Sa que corresponde a los percentiles, en este caso para esta estructura Cr-D-5 hay 63 puntos para el estado de daño extenso. El 0% indica el mínimo de valores en Sa, los puntos intermedios dividen los datos de forma equitativa, y el 100% indica el máximo de valores en Sa. Y así obtenemos los bordes de los intervalos para clasificar los valores de Sa.

Prosiguiendo ahora el código divide los valores de Sa en grupos de igual cantidad de datos y determina los bordes de cada intervalo basados en percentiles, no en una distancia uniforme. Permittiéndonos categorizar los valores de Sa en intervalos balanceados, evitando distorsiones por datos muy concentrados en una misma región. Y así repitiendo el mismo mecanismo para los otros estados límite de daño leve, moderado y completo.

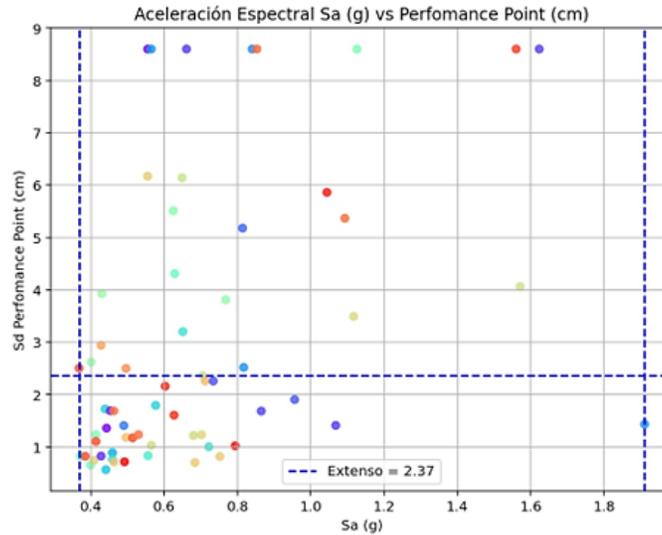


Imagen 35. Puntos en estado de daño extenso en Excel. (Fuente: Elaboración Propia)

Concluyendo con lo anterior es que en si adapta cada intervalo que contenga aproximadamente la misma cantidad de datos, estos son muy útiles cuando la distribución de Sa no es uniforme.

Por lo que para corroborar los resultados obtenidos de la función en Python para este caso procedimos a realizar en metodología analítica hecha en Excel. Por lo que queremos encontrar las aceleraciones espectrales y la fracción de Excedencia. Concentrándonos en el umbral de daño de extenso, tal cual, explicado anteriormente ahora de manera más didáctica, colocamos en el código una función para obtener las coordenadas de los puntos para los 121 registros sísmicos. Coordenadas que estan basadas en Sa la aceleración espectral y Sd que es el punto de desempeño. Como podemos ver en la siguiente Imagen 36.

1	Sa	Sd	2.37			
2	0.37212	0.83098	0	0	1	1
3	0.42829	2.94234	1	1	0	1
4	0.57693	1.79507	0	1	1	2
5	0.36795	2.50665	1	2	0	2
6	0.734	2.25966	0	2	1	3
7	0.86506	1.68555	0	2	1	4
8	0.56484	1.03249	0	2	1	5
9	0.43882	1.72683	0	2	1	6
10	0.49601	2.50122	1	3	0	6
11	0.19234	0.29992	0	3	1	7
12	0.15797	0.25141	0	3	1	8
13	0.08607	0.12878	0	3	1	9
14	0.09634	0.14501	0	3	1	10
15	0.14228	0.19688	0	3	1	11
16	0.14489	0.22766	0	3	1	12
17	0.05358	0.0783	0	3	1	13
18	0.07411	0.11256	0	3	1	14
19	0.02673	0.03836	0	3	1	15
20	0.03615	0.05197	0	3	1	16
21	0.56545	8.6	1	4	0	16
22	0.55562	0.83398	0	4	1	17
23	0.8171	2.52036	1	5	0	17
24	1.12638	8.6	1	6	0	17
25	0.6492	6.14073	1	7	0	17
26	0.55503	6.17161	1	8	0	17

Imagen 36. Coordenadas de puntos. Sa vs Sd (Fuente: Elaboración Propia)

El código de Python nos arroja que un total de 63 puntos se encuentran en este umbral de daño extenso. Con una aceleración espectral mínima de 0.368g y un Sa máximo de 1.91g. Teniendo en cuenta que el desplazamiento en extenso va a ser 2.37cm. Ahora en el Excel de los 63 puntos se los agrupa en grupos de 9 en relación de Sa y Sd este promedia los 9 valores de Sa y nos arroja un resultado. De tal manera para la fracción en excedencia se lo obtiene sumando los Sd que pasan los 2.37 cm en el grupo de 9, esos que pasan ya sean 1 o 2 se los divide para 9 así obteniendo nuestra fracción de excedencia.

Sa	Sd				Sa	Sd			
0.368	2.507	=PROMEDIO(P2:P10)			0.368	2.507	0.399	1	=SUMA(S2:S10)/9
0.372	0.831	PROMEDIO(número1; [número2]; ...)			0.372	0.831		0	SUMA(número1;
0.385	0.822		0		0.385	0.822		0	
0.399	0.654		0		0.399	0.654		0	
0.401	2.621		1		0.401	2.621		1	
0.409	0.746		0		0.409	0.746		0	
0.414	1.238		0		0.414	1.238		0	
0.414	1.106		0		0.414	1.106		0	
0.428	2.942		1		0.428	2.942		1	
0.428	0.827	0.446	0	0.11111	0.428	0.827	0.446	0	0.11111
0.430	3.930		1		0.430	3.930		1	
0.439	1.727		0		0.439	1.727		0	
0.441	0.567		0		0.441	0.567		0	
0.443	1.360		0		0.443	1.360		0	
0.453	1.692		0		0.453	1.692		0	
0.459	0.890		0		0.459	0.890		0	
0.459	0.764		0		0.459	0.764		0	
0.463	0.714		0		0.463	0.714		0	

Imagen 37. Excel de comprobación Sa y excedencia. (Fuente: Elaboración Propia)

Por último, se prosigue el mismo proceso para los otros grupos. Teniendo ya nuestros Sa promedios y nuestra fracción de excedencia comparándolas con los resultados que nos arroja el código de Python podemos ver y confirmar que de hecho nuestra función esta correcta.

V	W
Sa promedio	Excedencia
0.399	0.333
0.446	0.111
0.510	0.333
0.600	0.444
0.695	0.222
0.829	0.556
1.346	0.778

Imagen 38. Excel desarrollado para comprobación con resultados de Sa y Excedencias. (Fuente: Elaboración Propia)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Sa (g)	Número de Análisis	Casos de Excedencia	Fracción de Excedencia	Función de fragilidad teórica	robabilidad	Probabiliq	$\theta$	$\beta$
1									
2	0.183976235	31	0	0	0.00151041	0.954223	-0.04686	0.748426	0.473145
3	0.257566729	46	0	0	0.012083243	0.571658	-0.55921	0.748426	0.473145
4	0.331157223	53	0	0	0.042415773	0.10055	-2.2971	0.748426	0.473145
5	0.398927585	9	3	0.333333333	0.091790963	0.036458	-3.31159	0.748426	0.473145
6	0.44596421	9	1	0.111111111	0.136925534	0.379414	-0.96913	0.748426	0.473145
7	0.509945242	9	3	0.333333333	0.208714634	0.187472	-1.67412	0.748426	0.473145
8	0.599544712	9	4	0.444444444	0.319613291	0.191712	-1.65176	0.748426	0.473145
9	0.694710212	9	2	0.222222222	0.437461502	0.122814	-2.09708	0.748426	0.473145
10	0.828740669	9	5	0.555555556	0.585288679	0.255979	-1.36266	0.748426	0.473145
11	1.345823066	9	7	0.777777778	0.892547066	0.187567	-1.67362	0.748426	0.473145
12	$\Sigma=$						-15.6431		

Imagen 39. Excel arrojado por nuestro código de Python. (Fuente: Elaboración Propia)

Una vez explicado y comprobado que el código modificado cumple con su función adjunto la curva de fragilidad final para la estructura Cr-D-5 concreto reforzado dual de 5 pisos.

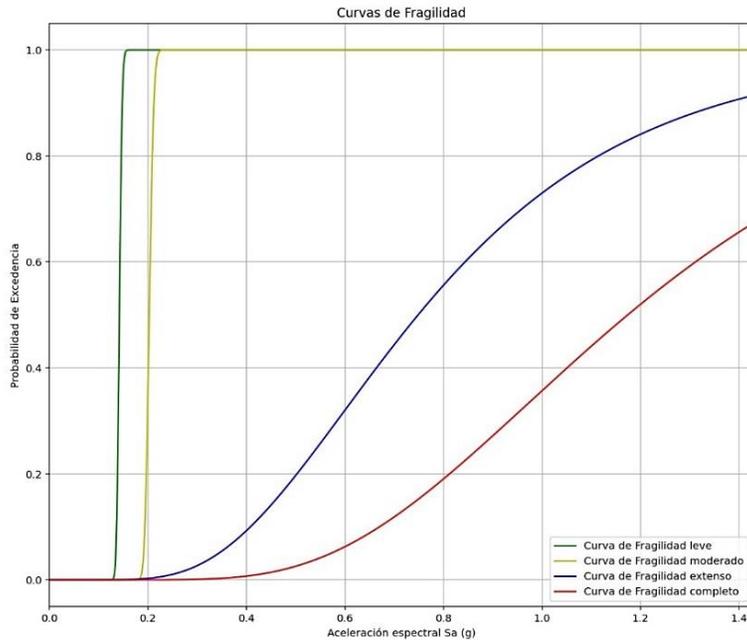


Imagen 40. Curvas De Fragilidad Cr-D-5. FEMA 440 Método C. (Fuente: Elaboración Propia)

Ahora en la Imagen 41 que se presenta a continuación, basados en una categoría de tipología estructural, específicamente en sistemas de concretos reforzados duales de distintos pisos. Estos tienen entre 2,3,5,8,15 y hasta de 18 pisos. Haciendo énfasis en nuestro estudio, graficamos las curvas de fragilidad para cada límite de daño de cada uno de estos sistemas de concreto reforzado duales, que están representados en las curvas de color gris. Y las curvas que vemos de colores en la gráfica, estas representan el promedio de todas las curvas que arroja cada sistema de diferentes pisos, promediando los valores Theta y Beta tanto en leve, moderado, extenso y completo de todas las curvas, convergiendo en una sola curva de fragilidad promediada para cada estado límite de daño de todas las estructuras de esta categoría Cr-D.

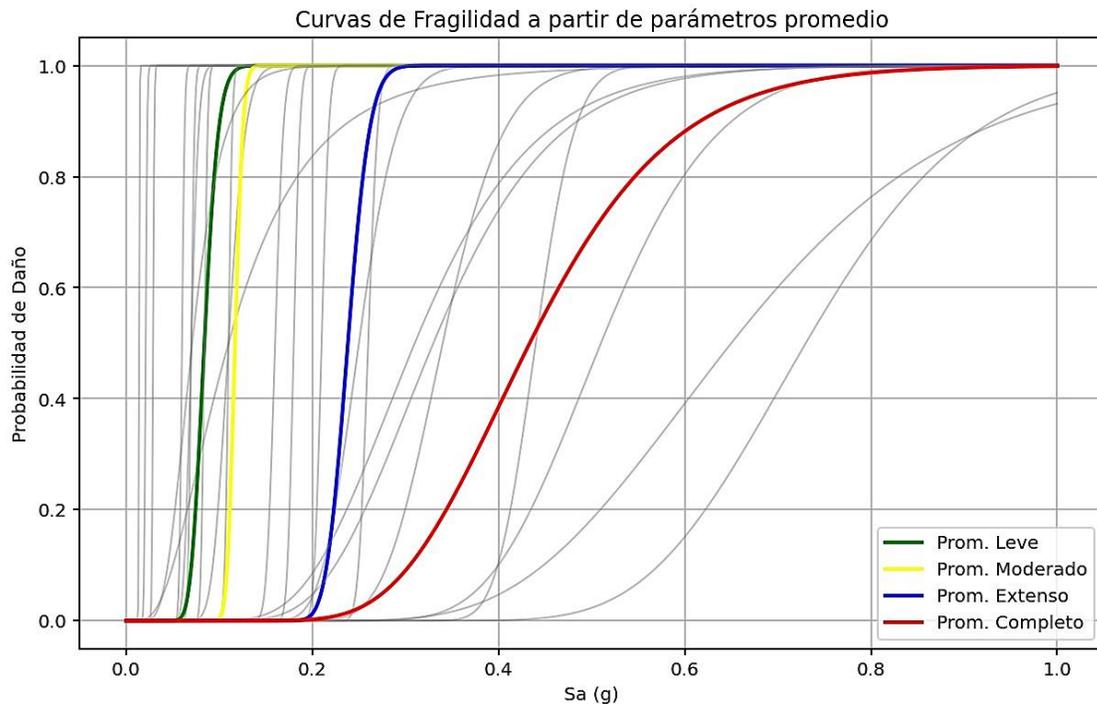


Imagen 41. Curvas De Fragilidad Para Sistemas de Concreto Reforzado Dual de Distintos Pisos (Cr-D) FEMA 440 Método C. (Fuente: Elaboración Propia)

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 4.1 CONCLUSIONES

Ya analizado los resultados del capítulo previo y con el código modificado ya usado, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Concluimos que el Multiple Stripe Analysis (MSA) para nuestra consideración es el método más eficaz para la estimación de funciones de fragilidad. Ya que con el uso de máxima verosimilitud para poder ajustar las curvas de fragilidad nos ayuda a conseguir estimaciones más exactas. Tal como se ha venido diciendo, esta herramienta puede mejorar la evaluación de riesgo sísmico de diversas tipologías estructurales, reduciendo la incertidumbre en las predicciones de colapso de un sistema estructural.
- Esta metodología es aplicable y replicable para otros proyectos de ingeniería, lo cual fomenta la innovación y el uso del lenguaje de programación como lo es Python. Así logramos optimizar recursos y tiempo, incluso tomar medidas preventivas y mitigar daños durante un sismo.
- Con las modificaciones realizadas que están detalladas en el capítulo 2 y 3 de nuestro estudio logramos obtener curvas de fragilidad con una mayor dispersión de datos, lo que resulta en una caracterización que se asemeja más a la realidad de la incertidumbre y la probabilidad estadística lo cual se basa las curvas de fragilidad. Por lo que con lleva a una evaluación de vulnerabilidad y fragilidad en estructuras más precisa.

Para finalizar vemos que este algoritmo modificado para este estudio es eficaz para los cálculos de las curvas de fragilidad, haciendo énfasis en el que el código está abierto a la modificación y corrección para futuros estudios y así lograr un mejoramiento de este mismo.

## 4.2 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones que podemos dar es que para futuros estudios exista una ampliación en la base de datos para los registros sísmicos, ya que la cantidad de registros sísmicos afecta de manera directa la precisión del análisis, por lo que expandiendo esa base de datos podremos obtener curvas de fragilidad más representativas.

También algo por recomendar es que se pueda investigar más sistemas estructurales ya que en nuestro estudio usamos y nos basamos en 69 tipologías estructurales, lo cual es un valor significativo, pero creemos que existen incluso más, ampliando eso nos permitiría conocer la susceptibilidad de más tipologías estructurales en la región durante un sismo. Así mismo, en base a nuestro estudio hacer un análisis o un estudio sobre las diversas tipologías estructurales en nuestro país, y nos referimos exactamente a la nomenclatura ya que como podemos ver en el capítulo 1 en la sección 1.7 en nuestro estudio por fines de comprensión usamos la nomenclatura de tipologías estructurales en Costa Rica, por lo que una nomenclatura en Ecuador sería más eficaz y de mejor comprensión para nuestro territorio.

Adicional es que se sigan estudios con la información que hemos desarrollado para aplicarlo en nuevas cosas, por ejemplo, esta herramienta de curvas de fragilidad sirve para calcular el riesgo sísmico en un barrio o alguna ciudad que contiene estructuras que pueden ser representadas por las curvas de fragilidad, por lo que en otro estudio para otros tipos de proyectos hagan estos proyectos usando esta herramienta, ya que es aplicable y modificable.

## BIBLIOGRAFÍA

Parra, H. A. (2016). Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Chopra, A. K. (2014). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (4th ed.). Pearson.

Guéguen, P. (Ed.) (2013). Seismic vulnerability of structures. London: ISTE Ltd.

Esteva, L. Esteva, L. (1967), "*Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico*", *Tercer Simposio Panamericano de Estructuras*, Caracas, Universidad Central de Venezuela

Esteva, L. (1976), "*Seismicity*", C. Lomnitz y E. Rosenblueth (eds.), *Seismic Risk and Engineering Decisions*, Ámsterdam, Elsevier

Reyes, C. (1999), *El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios* (tesis doctoral), México, Facultad de Ingeniería-UNAM.

Ismael, E., O. Díaz López y L. Esteva (2004), "*Seismic vulnerability analysis for optimum design of multistory reinforced concrete buildings*", presentada en *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá.

Vamvatsikos, D. y C. A. Cornell (2002), "*Incremental dynamic analysis*", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3):491-514.

Esteva, L. y E. Ismael (2003), "A maximum likelihood approach to system reliability with respect to seismic collapse", presentada en *11th IFIP WG7.5 Working Conference*, Banff, Canadá.

Jiménez, M. (2023). *GEOALERTA*. Obtenido de <https://blogs.upm.es/geoalerta/ecuador/riesgo-sismico-en-ecuador/>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*. Quito, Ecuador: Ministerio de Desarrolla Urbano y Vivienda.

Ing. Francisco Vinicio Cisneros Sánchez. (2022). “*CAPACIDAD SÍSMICA RESIDUAL DE UN EDIFICIO REFORZADO CON PERFILERÍA METÁLICA USANDO ANÁLISIS NO LINEAL EN LA CIUDAD DE AMBATO*”. Obtenido de Trabajo de titulación Previo a la obtención del grado académico de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas.

Ramos C., Rodríguez S. (2022). *Estudio y aplicación de la metodología de linealización equivalente, propuesta por FEMA 440*. Obtenido de Trabajo de Titulación- Universidad del Azuay.

Chávez, J., Goula, X., Roca, A., Mañá, F., Presmanes, J.A. & López-Arroyo, A., (1999). *Escenarios de daños sísmicos en Cataluña. 1er. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica* (Murcia, 12-16 de abril de 1999(, Memorias, T. la, 299-307.

Dunn, K. B. (2016). *Rehabilitación estructural de la Facultad de Ingeniería mediante aisladores sísmicos* (Trabajo de titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Civil). Guayaquil, Ecuador.

Rosangel Moreno González. (2007). Capítulo 4: Metodología para la evaluación del riesgo sísmico. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93559/05RMG05de12.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Choque J. Luque E. (2019). *Análisis estático no lineal y evaluación del desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles, diseñado con la norma E.030*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8866>

Luis Esteva Maraboto, (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Vol 69, Numero 3. Obtenido de [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69\\_3/PDF/PeligroSismos.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69_3/PDF/PeligroSismos.pdf)

Carlos Miguel Aranda Salazar, Dayana Lizeth Jacho Moyón. (2022). *ANÁLISIS Y DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICIOS DE ACERO CON MARCOS A MOMENTO, CONSIDERANDO COLUMNAS CRUCIFORMES Y TUBULARES HUECAS*. Obtenido de Trabajo de Titulación de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28042/1/TTS661.pdf>

Aguiar Roberto, (2003), *Análisis sísmico por desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 342 p., Quito. <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/ANALISISSISMICOPORDESEMPEO.pdf>

Flores, R. D., & Toro, C. M. (2024). Cálculo de curvas de fragilidad de estructuras de hormigón armado de un piso alto con vigas banda y cubierta liviana en residencias ubicadas en vía a la Costa, Guayaquil – Ecuador. Trabajo de titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil.

Ajila, M. S., & Molina, C. A. (2024). Cálculo de curvas de fragilidad mediante código de Python, utilizando el Método de Espectro de Capacidad (CSM). Trabajo de titulación, Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil.

Juan Carlos Vielma. (2014). Capítulo 4: Umbrales de Estados Limite de Daño Sísmico. Obtenido de Monografía CIMNE IS-68. “*Contribuciones a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios*”. [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Captulo4568%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Captulo4568%20(1).pdf)

ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: SEISMIC SAFETY COMMISSION.

Calderón, E. (2018). *Curvas de fragilidad según el método del espectro de capacidad para tipologías estructurales definidas en el Código Sísmico de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

Moreno, R., & Bairán, J. M. (2012). Evaluación sísmica de los edificios de mampostería típicos de Barcelona aplicando la metodología Risk-UE. *Revista*

Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 28(3), 161-169.

Pitilakis, K., Crowley, H., & Kaynia, A. M. (Eds.). (2014). SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk (Vol. 27). Dordrecht: Springer Netherlands.

Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings.

Del Salto, M. B. (2023). Vulnerabilidad sociodemográfica ante amenazas naturales en el perfil costero norte del Ecuador.

Rojas, R. J. (2010). Curvas de fragilidad sísmica para edificios a porticados de concreto reforzado de poca altura. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

## ANEXOS

### 5.1 CÓDIGO MODIFICADO CON LA METODOLOGÍA FEVA-440, MÉTODO

“C”

```
import os

import numpy as np

import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

from numpy import trapz

from scipy.stats import norm, binom

from lmfit import minimize, Parameters

import matplotlib.cm as cm

import time

def seleccionar_tipo_curva():

    while True:

        print("Seleccione el tipo de curva a procesar:")

        print("1. Curva de Capacidad")

        print("2. Aproximación Bilineal")

        eleccion = input("Ingrese el número de su elección: ").strip()

        if eleccion == "1":

            return "capacidad"

        elif eleccion == "2":

            return "bilineal"

        else:

            print("Entrada erronea. Por favor, ingrese 1 o 2.")
```

```

def procesar_archivo(nombre_archivo,Tn):
    try:
        tiempo_inicio = time.time() # Inicio del cronómetro para este archivo
        datosacel = np.loadtxt(nombre_archivo)
        ug = datosacel / 981 # Convertir de cm/s^2 a g
        ts = 0.01 # Pasos del registro
        tg = np.arange(0, len(ug) * ts, ts) # Vector Tiempo
        m = 1 # masa
        zita = 0.05 # Amortiguamiento

        ESPECTD = []
        ESPECTA = []

        for T in Tn:
            wn = 2 * np.pi / T # frecuencia del sistema
            k = wn**2 * m # Rigidez
            c = 2 * zita * wn * m # amortiguamiento [N s/m]

            uo = 0 # [m]
            vo = 0 # [m/s]
            ao1 = 0 # [m/s^2]
            dt = ts
            po = -m * ug

            y = 1 / 2

```

be = 1 / 6 # Aceleración lineal

ao = (po[0] - c \* vo - k \* uo) / m

a1 = (m / (be \* dt\*\*2)) + (y / (be \* dt)) \* c

a2 = (m / (be \* dt)) + ((y / be) - 1) \* c

a3 = (1 / (2 \* be) - 1) \* m + dt \* ((y / (2 \* be)) - 1) \* c

kk = k + a1

u = [uo]

u1 = [vo]

u2 = [ao1]

for i in range(len(tg) - 2):

    if i + 1 >= len(po):

        break

    p1 = po[i + 1] + a1 \* u[i] + a2 \* u1[i] + a3 \* u2[i]

    u\_new = p1 / kk

    u1\_new = (3 \* (u\_new - u[i]) / dt) - 2 \* u1[i] - (dt \* u2[i] / 2)

    u2\_new = (6 \* (u\_new - u[i]) / (dt\*\*2)) - 2 \* u2[i] - (6 \* u1[i] / dt)

    u.append(u\_new)

    u1.append(u1\_new)

    u2.append(u2\_new)

ESPECTD.append(max(u))

```

    ESPECTA.append(max(u) * wn**2)

ESPECTD = np.array(ESPECTD)
ESPECTA = np.array(ESPECTA)

tiempo_fin = time.time() # Fin del cronómetro
tiempo_total = tiempo_fin - tiempo_inicio

print(f'Tiempo para procesar {nombre_archivo}: {tiempo_total:.2f}
segundos")

return tg, ug, Tn, ESPECTD, ESPECTA

except Exception as e:

    print(f"Error procesando archivo {nombre_archivo}: {e}")

    return None, None, None, None, None

def read_bilinear_curve_data(file_path):

    if not os.path.exists(file_path):

        print(f"Error: El archivo {file_path} no existe.")

        return None, None

    data = pd.read_csv(file_path, delim_whitespace=True, header=None,
names=['Displacement', 'Acceleration'])

    return data['Displacement'].values, data['Acceleration'].values

def generar_coordenadas_intermedias(puntos, num_intermedios=10):

    coordenadas = []

    for i in range(len(puntos) - 1):

```

```

x_inicial, y_inicial = puntos[i]
x_final, y_final = puntos[i + 1]

# Mantener precisión de numpy
x_interpolados = np.linspace(x_inicial, x_final, num_intermedios + 2)
y_interpolados = np.linspace(y_inicial, y_final, num_intermedios + 2)

# Aplicar redondeo al final
coordenadas.extend(zip(x_interpolados[:-1], y_interpolados[:-1]))

coordenadas.append((round(puntos[-1][0], 5), round(puntos[-1][1], 5)))

return [(round(x, 5), round(y, 5)) for x, y in coordenadas]

# Leer los puntos principales desde el archivo de entrada
def leer_puntos_desde_archivo(nombre_archivo):
    puntos = []
    with open(nombre_archivo, "r") as archivo:
        for linea in archivo:
            valores = linea.strip().split()
            if len(valores) < 2:
                print(f"Línea ignorada (no tiene suficientes valores): '{linea.strip()}'")
                continue
            try:
                x, y = map(float, valores[:2])
                puntos.append((x, y))

```

```

except ValueError:
    print(f"Línea ignorada (valores no numéricos): '{linea.strip()}'")
return puntos

# Guardar las coordenadas en un nuevo archivo en una ruta específica
def guardar_coordenadas_en_nuevo_archivo(ruta_salida, coordenadas):
    with open(ruta_salida, "w") as archivo:
        for x, y in coordenadas:
            archivo.write(f"{x:.5f} {y:.5f}\n")

# Definir el archivo de entrada y la ruta de salida
nombre_archivo = r"C:\ poner ruta donde está la carpeta
coordenadas\coordenadas.txt"

ruta_salida = r"C:\ poner ruta donde está la carpeta
coordenadas\DatosPushOver\PushOver.txt"

# Leer puntos principales desde el archivo
puntos_principales = leer_puntos_desde_archivo(nombre_archivo)

# Generar las coordenadas con puntos intermedios
coordenadas_resultantes =
generar_coordenadas_intermedias(puntos_principales, num_intermedios=10)

# Guardar las nuevas coordenadas en un archivo en la ruta especificada
guardar_coordenadas_en_nuevo_archivo(ruta_salida, coordenadas_resultantes)

print(f"Las nuevas coordenadas se han guardado en '{ruta_salida}'")

```

```

def calculate_area_under_curve(x, y, end_index):
    x = np.array(x)
    y = np.array(y)
    x_segment = np.concatenate(([0], x[:end_index + 1]))
    y_segment = np.concatenate(([0], y[:end_index + 1]))
    area = trapz(y_segment, x_segment)
    return area

```

```

def bilinear_area_complete(Dyi, Ayi, Du, Au):
    m1 = Ayi / Dyi
    area1 = (m1 / 2) * Dyi**2
    m2 = (Au - Ayi) / (Du - Dyi)
    b2 = Ayi - m2 * Dyi
    area2 = (m2 / 2) * (Du**2 - Dyi**2) + b2 * (Du - Dyi)
    total_area_under_curve = area1 + area2
    return total_area_under_curve

```

```

def calculate_error(displacements, accelerations, Dyi, Ayi, Du, Au):
    area_under_curve = calculate_area_under_curve(displacements, accelerations,
np.argmax(displacements == Du))

    area_bilineal = bilinear_area_complete(Dyi, Ayi, Du, Au)

    # Verificar que el área bajo la curva no sea cero

    if area_under_curve == 0 or abs(area_under_curve) < 1e-10: # Umbral para
valores muy pequeños

        print("Advertencia: El área bajo la curva es cero o muy pequeña.")

    return float('inf') # Retornar error infinito

```

```
error = abs(area_under_curve - area_bilinear) / area_under_curve * 100
return error
```

```
def convert_to_adrs(displacements, accelerations):
```

```
    Sa = accelerations
    Sd = displacements
    return Sd, Sa
```

```
def calculate_post_elastic_rigidity_adrs(Dy, Ay, Du, Au):
```

```
    alpha_post_elastic = ((Au - Ay) / (Du - Dy)) / (Ay / Dy)
    return alpha_post_elastic
```

```
def calculate_ductility(Sd):
```

```
    Dy = Sd[1]
    Du = Sd[-1]
    return Du / Dy
```

```
def calculate_initial_period(Sd, Sa):
```

```
    Sd_2 = Sd[1]
    Sa_2 = Sa[1]
    To = 2 * np.pi * np.sqrt(Sd_2 / (Sa_2 * 981))
    return To
```

```
def calculate_teff(mu, To):
```

```
    if 1.0 < mu < 4.0:
        Teff = (0.20 * (mu - 1)**2 - 0.038 * (mu - 1)**3 + 1) * To
```

```

elif 4.0 <= mu <= 6.5:
    Teff = (0.28 + 0.13 * (mu - 1) + 1) * To
elif mu > 6.5:
    Teff = (0.89 * (np.sqrt((mu - 1) / (1 + 0.05 * (mu - 2))) - 1) + 1) * To
else:
    Teff = To
return Teff

```

```

def calculate_beff(mu, zita, Teff, To):
    if 1.0 <= mu < 4.0:
        Beff = 4.9 * (mu - 1)**2 - 1.1 * (mu - 1)**3 + 5
    elif 4.0 <= mu <= 6.5:
        Beff = 14 + 0.32 * (mu - 1) + 5
    elif mu > 6.5:
        factor = 0.64 * (mu - 1)
        Beff = 19 * ((factor - 1) / (factor**2)) * (Teff / To)**2 + 5
    else:
        Beff = zita
    return Beff

```

```

def calculate_tsec(To, mu, alpha_post_elastic):
    Tsec = np.sqrt(((To**2) * mu) / (1 + alpha_post_elastic * (mu - 1)))
    return Tsec

```

```

def calculate_B_Beff(Beff):
    return 4 / (5.6 - np.log(Beff))

```

```

def calculate_M(Teff, Tsec):
    return (Teff / Tsec) ** 2

def calculate_Beff_curve(Sd, Sa, Beff):
    B_Beff = calculate_B_Beff(Beff)
    Sa_Beff = Sa / B_Beff
    return Sa_Beff

def calculate_MADRS_curve(Sa_Beff, M):
    Sa_MADRS = Sa_Beff * M
    return Sa_MADRS

def find_intersection(Sd, Sa_MADRS, Sd_Tsec, Sa_Tsec):
    def interpolate(x, xp, fp):
        return np.interp(x, xp, fp)

    def binary_search(Sd, Sa_MADRS, Sd_Tsec, Sa_Tsec):
        left, right = 0, len(Sd) - 1
        while left <= right:
            mid = (left + right) // 2
            if interpolate(Sd[mid], Sd_Tsec, Sa_Tsec) < Sa_MADRS[mid]:
                left = mid + 1
            else:
                right = mid - 1
        return Sd[left], Sa_MADRS[left]

```

```

Sd_int, Sa_int = binary_search(Sd, Sa_MADRS, Sd_Tsec, Sa_Tsec)
return Sd_int, Sa_int

# Función de fragilidad teórica
def fragilidad_teorica(Sa, theta, beta):
    fragilidad = norm.cdf((np.log(Sa) - np.log(theta)) / beta)
    return np.clip(fragilidad, 0, 1)

def calcular_probabilidad(casos_excedencia, num_analisis, fragilidad_teorica):
    return binom.pmf(casos_excedencia, num_analisis, fragilidad_teorica)

def funcion_objetivo(params, Sa, casos_excedencia, num_analisis):
    theta = params['theta'].value
    beta = params['beta'].value
    if theta < 0.01 or beta < 0.01:
        return np.full_like(Sa, np.inf) # Penalización por valores fuera de los límites

    fragilidades_teoricas = norm.cdf((np.log(Sa) - np.log(theta)) / beta)
    ln_probabilidades = np.array([
        np.log(binom.pmf(e, n, f) + 1e-10) for e, n, f in zip(casos_excedencia,
num_analisis, fragilidades_teoricas)
    ])

    penalizacion = np.abs(fragilidades_teoricas[-1] - 1) # Penalización por no
alcanzar colapso

    return -ln_probabilidades + penalizacion # Negativo para maximizar, sumando
la penalización

```

```

def optimizar_theta_beta(Sa, casos_excedencia, num_analisis):
    params = Parameters()
    params.add('theta', value=np.median(Sa), min=0.01)
    params.add('beta', value=0.4, min=0.01)

    result = minimize(funcion_objetivo, params, args=(Sa, casos_excedencia,
num_analisis), method='leastsq')

    return result.params['theta'].value, result.params['beta'].value

def determinar_intervalos(valores_sa, num_intervalos):
    valores_sa = np.array(sorted(valores_sa)) # Ordenamos los valores
    percentiles = np.linspace(0, 100, num_intervalos + 1) # Calculamos los percentiles
    bins = np.percentile(valores_sa, percentiles) # Determinamos los cortes de los
intervalos

    return bins

def Acceleration_Spectral_vs_Performance_Point(puntos_desempeño, Slight,
Moderate, Extensive, Collapse):
    plt.figure(figsize=(10, 8))
    plt.title('Aceleración Espectral Sa (g) vs Performance Point (cm)')

    for Sa, delta_t, archivo in puntos_desempeño:
        plt.plot(Sa, delta_t, 'o')

    # Definir los límites de daño
    limites = [Slight, Moderate, Extensive, Collapse]

```

```

nombres_limite = ['Slight', 'Moderate', 'Extensive', 'Collapse']

for limite, nombre in zip(limite, nombres_limite):
    plt.axhline(y=limite, linestyle='--', label=f'{nombre} - {limite:.2f} cm')

plt.xlabel('Aceleración Espectral Sa (g)')
plt.ylabel('Sd Performance Point (cm)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# Clasificar y contar los casos de daño
categorias = {
    'leve': Slight,
    'moderado': Moderate,
    'extenso': Extensive,
    'completo': Collapse
}

puntos_totales_por_estado = {}
puntos_excedencias_por_estado = {}
promedios_por_estado = {}

for categoria, umbral in categorias.items():
    registros_superan = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t, _ in puntos_desempeño if
delta_t >= umbral]

```

```
registros_por_debajo = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t, _ in puntos_desempeño
if delta_t < umbral]
```

```
if registros_superan:
```

```
sa_min = min(Sa for Sa, _ in registros_superan)
```

```
sa_max_original = max((Sa for Sa, _ in registros_por_debajo),
default=None)
```

```
if sa_max_original is not None and sa_min > sa_max_original:
```

```
sa_min, sa_max_original = sa_max_original, sa_min
```

```
registros_totales = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t, _ in puntos_desempeño if
sa_min <= Sa <= sa_max_original]
```

```
valores_sa = [Sa for Sa, _ in registros_totales]
```

```
num_intervals = int(np.sqrt(len(valores_sa)))
```

```
bins = determinar_intervalos(valores_sa, num_intervals)
```

```
promedios_intervalo = []
```

```
puntos_excedencias = []
```

```
puntos_totales_intervalo = []
```

```
for i in range(len(bins)- 1):
```

```
lower_bound = bins[i]
```

```
upper_bound = bins[i+1]
```

```
interval_points = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t in registros_totales if
lower_bound <= Sa <= upper_bound]
```

```

if interval_points:
    avg_Sa = np.mean([Sa for Sa, _ in interval_points])
    promedios_intervalo.append(avg_Sa)

    excedencia_points = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t in registros_superan
if lower_bound <= Sa <= upper_bound]
    puntos_excedencias.append(excedencia_points)
    puntos_totales_intervalo.append(interval_points)

sa_left_values = np.linspace(0.5 * sa_min, 0.9 * sa_min, 3)

sa_left_validos = []
puntos_totales_left = []

for sa_left in sa_left_values:
    puntos_bajo_umbral = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t, _ in
puntos_desempeño if Sa <= sa_left and delta_t < umbral]
    if puntos_bajo_umbral:
        sa_left_validos.append(sa_left)
        puntos_totales_left.append(puntos_bajo_umbral)

sa_right_values = np.linspace(1.2 * sa_max_original, 1.5 * sa_max_original,
3)

sa_right_validos = []
puntos_totales_right = []

```

```

for sa_right in sa_right_values:
    puntos_arriba_umbral = [(Sa, delta_t) for Sa, delta_t, _ in
puntos_desempeño if Sa > sa_right and delta_t > umbral]

    if puntos_arriba_umbral:
        sa_right_validos.append(sa_right)
        puntos_totales_right.append(puntos_arriba_umbral)

    promedios_intervalo = list(sa_left_validos) + promedios_intervalo +
list(sa_right_validos)

    puntos_excedencias = [[]] * len(sa_left_validos) + puntos_excedencias +
puntos_totales_right

    puntos_totales_intervalo = puntos_totales_left + puntos_totales_intervalo
+ puntos_totales_right

    puntos_totales_por_estado[categoria] = puntos_totales_intervalo
    puntos_excedencias_por_estado[categoria] = puntos_excedencias
    promedios_por_estado[categoria] = promedios_intervalo
    num_puntos_rango = len(registros_totales)

    print(f"Para el estado de daño '{categoria}':")
    print(f" - Sa_min = {sa_min:.4f}, Sa_max = {sa_max_original:.4f}")
    print(f" - Total de puntos en este rango: {num_puntos_rango}\n")

    return puntos_totales_por_estado, puntos_excedencias_por_estado,
promedios_por_estado

def crear_tablas(puntos_totales_por_estado, puntos_excedencias_por_estado,
promedios_por_estado):
    tablas = {}

```

```

for nivel in puntos_totales_por_estado.keys():
    if nivel not in promedios_por_estado or nivel not in
puntos_excedencias_por_estado or nivel not in puntos_totales_por_estado:
        continue

    promedios_nivel = np.array(promedios_por_estado[nivel])

    puntos_excedencias_nivel = np.array([len(p) for p in
puntos_excedencias_por_estado[nivel]])

    puntos_totales_nivel = np.array([len(p) for p in
puntos_totales_por_estado[nivel]])

    indices_no_cero = np.where(puntos_excedencias_nivel > 0)[0]
    if len(indices_no_cero) == 0:
        continue

    primer_excedencia = indices_no_cero[0]

    filtro = (puntos_excedencias_nivel == 0) &
(np.arange(len(puntos_excedencias_nivel)) < primer_excedencia)

    filtro |= (puntos_excedencias_nivel > 0)

    if not np.any(filtro):
        continue

    promedios_nivel = promedios_nivel[filtro]
    puntos_excedencias_nivel = puntos_excedencias_nivel[filtro]
    puntos_totales_nivel = puntos_totales_nivel[filtro]

```

```

try:
    theta_beta_opt = optimizar_theta_beta(promedios_nivel,
puntos_excedencias_nivel, puntos_totales_nivel)

    theta, beta = theta_beta_opt

    print(f"Estado de daño: {nivel}")

    print(f"θ (theta):{theta:.4f}, β (beta): {beta:.4f}\n")

except Exception as e:

    print(f"Error optimizando θ y β para el nivel de daño '{nivel}': {e}")

    continue

# Calcular fragilidades teóricas (una por cada valor de Sa)

fragilidades_teoricas = np.array([fragilidad_teorica(Sa, theta, beta) for Sa in
promedios_nivel])

# Verificar si las longitudes son iguales antes de calcular probabilidad

if len(puntos_excedencias_nivel) != len(fragilidades_teoricas):

    continue

# Calcular probabilidades asegurando fila a fila

probabilidades = np.array([calcular_probabilidad(excedencia, total,
fragilidad) for excedencia, total, fragilidad in zip(puntos_excedencias_nivel,
puntos_totales_nivel, fragilidades_teoricas)])

# Asegurar que todas las probabilidades están dentro del rango válido

probabilidades = np.clip(probabilidades, 1E-10, 1)

```

```
ln_probabilidades = np.log(probabilidades)
```

```
data = {  
    'Sa (g)': promedios_nivel,  
    'Número de Análisis': puntos_totales_nivel,  
    'Casos de Excedencia': puntos_excedencias_nivel,  
    'Fracción de Excedencia': puntos_excedencias_nivel / puntos_totales_nivel,  
    'Función de fragilidad teórica': fragilidades_teoricas,  
    'Probabilidad': probabilidades,  
    'LN Probabilidad': ln_probabilidades,  
    'θ': theta,  
    'β': beta  
}
```

```
df = pd.DataFrame(data)
```

```
# Sumar LN Probabilidad correctamente
```

```
suma_ln_probabilidad = np.sum(ln_probabilidades)
```

```
suma_fila = {  
    'Sa (g)': 'Σ=', 'Número de Análisis': '',  
    'Casos de Excedencia': '',  
    'Fracción de Excedencia': '',  
    'Función de fragilidad teórica': '',  
    'Probabilidad': '',  
    'LN Probabilidad': suma_ln_probabilidad,  
    'θ': '',
```

```

        'β': "
    }

    # Añadir la fila de sumatoria
    df = pd.concat([df, pd.DataFrame([suma_fila]), ignore_index=True)

    tablas[nivel] = df

return tablas

def exportar_a_excel(tablas, nombre_archivo):
    with pd.ExcelWriter(nombre_archivo) as writer:
        for nivel, tabla in tablas.items():
            tabla.to_excel(writer, sheet_name=nivel, index=False)

def graficar_curvas_fragilidad(tablas, niveles_dano, max_Sa):
    max_x = (max_Sa)
    x = np.arange(0.001, max_x, 0.001)

    plt.figure(figsize=(12, 10))
    plt.title('Curvas de Fragilidad')
    plt.xlabel('Aceleración espectral Sa (g)')
    plt.ylabel('Probabilidad de Excedencia')
    colores = ['g', 'y', 'b', 'r']

    for nivel, tabla in tablas.items():

```

```

if nivel not in niveles_dano:
    continue

theta = tabla['θ'][0]
beta = tabla['β'][0]

# Graficar curva de fragilidad
fragilidad = fragilidad_teorica(x, theta, beta)
plt.plot(x, fragilidad, '-', label=f'Curva de Fragilidad {nivel}',
color=colores.pop(0))

plt.legend()
plt.grid(True)
plt.xlim(0, max_x)
plt.show()

def main():
    tipo_curva = seleccionar_tipo_curva()
    tiempo_inicio_programa = time.time()
    file_path = 'DatosPushOver/PushOver.txt'
    displacements, accelerations = read_bilinear_curve_data(file_path)
    if displacements is None or accelerations is None:
        return

    # Rutas de archivos
    archivo_coordenadas = r"C:\poner ruta donde está la carpeta
coordenadas\coordenadas.txt"

```

```
archivo_salida = r"C:\ poner ruta donde está la carpeta
coordenadas\DatosPushOver\PushOver.txt"
```

```
if tipo_curva == "capacidad":
    # Leer las coordenadas originales
    print("Procesando Curva de Capacidad...")
    puntos = leer_puntos_desde_archivo(archivo_coordenadas)
elif tipo_curva == "bilineal":
    # Generar coordenadas intermedias
    print("Procesando Aproximación Bilineal...")
    puntos_principales = leer_puntos_desde_archivo(archivo_coordenadas)
    puntos = generar_coordenadas_intermedias(puntos_principales,
num_intermedios=10)
    guardar_coordenadas_en_nuevo_archivo(archivo_salida, puntos)
    print(f"Coordenadas intermedias generadas y guardadas en
'{archivo_salida}'")
```

```
displacements, accelerations = zip(*puntos)
displacements = np.array(displacements)
accelerations = np.array(accelerations)
```

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(displacements, accelerations, marker='o', linestyle='-', color='r',
label='Curva Seleccionada')
plt.xlabel('Desplazamiento (cm)')
plt.ylabel('Aceleración (g)')
plt.title('Curva Capacidad ADRS')
plt.legend()
```

```

plt.grid(True)

plt.show()

pos = int(input("Ingrese la posición del punto DU-AU: ")) - 1

dy_ay = input("Ingrese las coordenadas iniciales del punto A para la curva
pushover (Dy, Ay): ")

Dy, Ay = map(float, dy_ay.split(','))

if 0 <= pos < len(displacements):

    area_OBD = calculate_area_under_curve(displacements, accelerations, pos)

    print(f"Área bajo la curva Pushover: {area_OBD:.2f}")

Du = displacements[pos]

Au = accelerations[pos]

initial_bilinear_area = bilinear_area_complete(Dy, Ay, Du, Au)

print(f"Área bajo la curva de la Representación bilineal inicial:
{initial_bilinear_area:.2f}")

error = calculate_error(displacements, accelerations, Dy, Ay, Du, Au)

print(f"Error de la representación bilineal inicial: {error:.2f}%")

calcular_nuevas_coordenadas = input("¿Calcular nuevas coordenadas para el
punto A? (si/no): ").strip().lower()

if calcular_nuevas_coordenadas == "si":

    max_iteraciones = 100 # Máximo número de iteraciones

    iteracion = 0

```

```

while error > 1:
    Dy *= 0.99
    Ay *= 0.99
    error = calculate_error(displacements, accelerations, Dy, Ay, Du, Au)
    iteracion += 1

if iteracion == max_iteraciones:
    print("Advertencia: Límite de iteraciones alcanzado. No se pudo reducir el
error por debajo del 1%.")
else:
    print(f"Nuevas coordenadas del punto A: Dyi = {Dy:.2f}, Ayi = {Ay:.2f}")
    print(f"Área bajo la curva de la Representación bilineal con el punto A
encontrado: {bilinear_area_complete(Dy, Ay, Du, Au):.2f}")
    print(f"Error de la representación bilineal: {error:.2f}%")

plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(displacements, accelerations, marker='o', linestyle='-', color='r',
label='Curva Capacidad')
plt.plot(0, 0, marker='o', color='black')
plt.text(0, 0, 'O', ha='right', color='black')

if 0 <= pos < len(displacements):
    plt.plot(displacements[pos], accelerations[pos], marker='x', markersize=8,
color='blue')
    plt.plot([displacements[pos], displacements[pos]], [0, accelerations[pos]], 'b-
-')
    plt.plot([0, displacements[pos]], [accelerations[pos], accelerations[pos]], 'b-
-')
    plt.text(displacements[pos], 0, 'Du', ha='center', color='blue', va='bottom')
    plt.text(0, accelerations[pos], 'Au', ha='right', color='blue', va='center')

```

```
plt.plot(displacements[pos], accelerations[pos], marker='o', markersize=8,
color='red')
```

```
plt.text(displacements[pos], accelerations[pos], 'B', ha='left', color='red',
va='bottom')
```

```
plt.plot(Dy, Ay, marker='o', markersize=8, color='green')
```

```
plt.text(Dy, Ay, 'A', ha='left', color='green', va='bottom')
```

```
plt.plot([0, Dy], [0, Ay], 'g--')
```

```
if 0 <= pos < len(displacements):
```

```
plt.plot([Dy, displacements[pos]], [Ay, accelerations[pos]], 'g--')
```

```
plt.plot([0, Dy, displacements[pos]], [0, Ay, accelerations[pos]], 'g--',
label='Representación Bilineal')
```

```
plt.xlabel('Desplazamiento (cm)')
```

```
plt.ylabel('Aceleración(g)')
```

```
plt.title('Curva Capacidad ADRS')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

```
zita = 0.05 # Amortiguamiento
```

```
Sd, Sa = convert_to_adrs(displacements, accelerations)
```

```
Sd_bilineal, Sa_bilineal = convert_to_adrs(np.array([0, Dy, Du]), np.array([0, Ay,
Au]))
```

```

plt.figure(figsize=(8, 6))

plt.plot(Sd, Sa, marker='o', linestyle='-', color='b', label='Curva Capacidad ADRS')

plt.plot(Sd_bilineal, Sa_bilineal, marker='x', linestyle='--', color='r',
label='Representación Bilineal ADRS')

plt.xlabel('Desplazamiento Espectral Sd (cm)')

plt.ylabel('Aceleración Espectral Sa (g)')

plt.title('Representación Bilineal ADRS')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.show()

alpha_post_elastic = calculate_post_elastic_rigidity_adrs(Sd_bilineal[1],
Sa_bilineal[1], Sd_bilineal[-1], Sa_bilineal[-1])

print(f"Rigidez post-elástica: {alpha_post_elastic:.4f}")

ductility = calculate_ductility(Sd_bilineal)

print(f"Ductilidad última esperada ( $\mu$ ): {ductility:.2f}")

To = calculate_initial_period(Sd_bilineal, Sa_bilineal)

if To > 1.2:

    Tn = np.arange(0, 19.0, 0.1)

else:

    Tn = np.arange(0, 3.0, 0.04)

print(f"Periodo Inicial ( $T_0$ ): {To:.2f}")

resultados = {

    'Ductilidad  $\mu$ ': [],

```

```

'Periodo Efectivo Teff': [],
'Amortiguamiento Efectivo  $\beta_{eff}$ ': [],
'Coeficiente M': [],
'Periodo Secante Tsec': [],
'B': [],
'Rigidez Post-Elástica': [],
'Du': [],
'Au': [],
'Reduction(M/B)': []
}

```

```

ductilidades = np.arange(1, ductility + 0.5, 0.5)

```

```

if ductilidades[-1] > ductility:

```

```

    ductilidades[-1] = ductility

```

```

for mu in ductilidades:

```

```

    Teff = calculate_teff(mu, To)

```

```

    Beff = calculate_beff(mu, zita, Teff, To)

```

```

    Tsec = calculate_tsec(To, mu, alpha_post_elastic)

```

```

    M = calculate_M(Teff, Tsec)

```

```

    B = calculate_B_Beff(Beff)

```

```

    resultados['Ductilidad  $\mu$ '].append(mu)

```

```

    resultados['Periodo Efectivo Teff'].append(Teff)

```

```

    resultados['Amortiguamiento Efectivo  $\beta_{eff}$ '].append(Beff)

```

```

    resultados['Coeficiente M'].append(M)

```

```

resultados['Periodo Secante Tsec'].append(Tsec)
resultados['B'].append(B)

Du_temp = mu * Sd_bilineal[1]
Au_temp = np.interp(Du_temp, Sd_bilineal, Sa_bilineal)

if mu == 1:
    rigidez_post_elastica = alpha_post_elastic
else:
    rigidez_post_elastica = calculate_post_elastic_rigidity_adrs(Sd_bilineal[1],
Sa_bilineal[1], Du_temp, Au_temp)
    if rigidez_post_elastica < 0:
        rigidez_post_elastica = 0

resultados['Rigidez Post-Elástica'].append(rigidez_post_elastica)
resultados['Du'].append(Du_temp)
resultados['Au'].append(Au_temp)
resultados['Reduction(M/B)'].append(M / B)

df_resultados = pd.DataFrame(resultados)
print(df_resultados)

df_resultados.to_excel('Resultados_Ductilidad.xlsx', index=False)

ver_graficas = input("¿Desea ver las gráficas de puntos de desempeño para cada
registro sísmico? (si/no): ").strip().lower()

```

```

Sa_values = []
Sd_performance_points = []
puntos_desempeño = []

if ver_graficas == "si":
    carpeta = "Registros Sismicos"
    archivos = [f for f in os.listdir(carpeta) if f.endswith('.txt')]

    colors = cm.rainbow(np.linspace(0, 1, len(ductilidades))) # Asignar colores
    únicos

for archivo in archivos:
    try:
        plt.figure(figsize=(8, 6))
        ruta_archivo = os.path.join(carpeta, archivo)
        tg, ug, Tn, ESPECTD, ESPECTA = procesar_archivo(ruta_archivo,Tn)

        if tg is None:
            continue

        Sd_intersections = []
        Sa_intersections = []
        intersection_found = False
        Sd_star, Sa_star = None, None

```

```

for color, mu, M, Tsec, reduction in zip(colors, ductilidades,
df_resultados['Coeficiente M'], df_resultados['Periodo Secante Tsec'],
df_resultados['Reduction(M/B)']):

```

```

    Teff = calculate_teff(mu, To)

```

```

    Beff = calculate_beff(mu, zita, Teff, To)

```

```

    Sa_MADRS = ESPECTA * reduction

```

```

    Sd_MADRS_limited = np.clip(ESPECTD * 1000, 0, Du+50)

```

```

    Sa_MADRS_limited = np.clip(Sa_MADRS, 0, Au+0.5)

```

```

    plt.plot(Sd_MADRS_limited, Sa_MADRS_limited, label=f'Espectro
MADRS Reducido ( $\mu$ ={mu}, M={M:.2f})', color=color)

```

```

    Sd_Tsec = np.linspace(0, Du, 100)

```

```

    Sa_Tsec = ((4 * np.pi**2 / Tsec**2) * Sd_Tsec) / 1000

```

```

    Sa_Tsec_limited = np.clip(Sa_Tsec, 0, Au+0.5)

```

```

    plt.plot(Sd_Tsec, Sa_Tsec_limited, linestyle='--', color=color,
label=f'Línea Tsec ( $\mu$ ={mu}, Tsec={Tsec:.2f})')

```

```

# Encontrar la intersección

```

```

    Sd_int, Sa_int = find_intersection(Sd_MADRS_limited,
Sa_MADRS_limited, Sd_Tsec, Sa_Tsec)

```

```

    if Sd_int is not None and Sa_int is not None:

```

```

        Sd_intersections.append(Sd_int)

```

```

        Sa_intersections.append(Sa_int)

```

```

        plt.plot(Sd_int, Sa_int, 'ko') # Punto de intersección

```

```

    if not intersection_found and Sd_int <= Sd.max() and Sa_int <=
Sa.max():

```

```

        Sd_star, Sa_star = Sd_int, Sa_int

```

```

        intersection_found = True

    # Dibujar la línea que une los puntos de intersección
    if Sd_intersections and Sa_intersections:
        plt.plot(Sd_intersections, Sa_intersections, 'k-', label='Function for
Performance')

    Sd_limited = np.clip(Sd, 0, Du+50)
    Sa_limited = np.clip(Sa, 0, Au+0.5)

    plt.plot(Sd_limited, Sa_limited, marker='o', linestyle='-', color='b',
label='Curva Capacidad ADRS')

    if Sd_star is not None and Sa_star is not None:
        plt.plot(Sd_star, Sa_star, marker='*', markersize=15, color='orange',
label='Intersección Principal')
    else:
        Sd_star = Sd[-1]
        Sa_star = Sa[-1]

        plt.plot(Sd_star, Sa_star, marker='*', markersize=15, color='orange',
label='Asumido en el último punto')

    plt.xlim(0, 10)
    plt.ylim(0, 0.5)

    plt.xlabel('Sd [cm]')
    plt.ylabel('Sa [g]')
    plt.title(f'Punto de desempeño - {archivo[:-4]}')

```

```
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
Sa_T0 = np.interp(To, Tn, ESPECTA)
Sa_values.append(Sa_T0)
Sd_performance_points.append(Sd_star)
puntos_desempeño.append((Sa_T0, Sd_star, archivo))
```

```
except Exception as e:
```

```
    print(f"Error procesando archivo {archivo}: {e}")
```

```
else:
```

```
    carpeta = "Registros Sismicos"
```

```
    archivos = [f for f in os.listdir(carpeta) if f.endswith('.txt')]
```

```
    for archivo in archivos:
```

```
        try:
```

```
            tiempo_inicio_archivo = time.time()
```

```
            ruta_archivo = os.path.join(carpeta, archivo)
```

```
            tg, ug, Tn, ESPECTD, ESPECTA = procesar_archivo(ruta_archivo, Tn)
```

```
        if tg is None:
```

```
            continue
```

```
        Sd_intersections = []
```

```

Sa_intersections = []
intersection_found = False
Sd_star, Sa_star = None, None

for mu, M, Tsec, reduction in zip(ductilidades, df_resultados['Coeficiente
M'], df_resultados['Periodo Secante Tsec'], df_resultados['Reduction(M/B)']):
    Teff = calculate_teff(mu, To)
    Beff = calculate_beff(mu, zita, Teff, To)
    Sa_MADRS = ESPECTA * reduction

    Sd_MADRS_limited = np.clip(ESPECTD * 1000, 0, Du+50)
    Sa_MADRS_limited = np.clip(Sa_MADRS, 0, Au+0.5)

    Sd_Tsec = np.linspace(0, Du, 100)
    Sa_Tsec = ((4 * np.pi**2 / Tsec**2) * Sd_Tsec) / 1000
    Sa_Tsec_limited = np.clip(Sa_Tsec, 0, Au+0.5)

    # Encontrar la intersección
    Sd_int, Sa_int = find_intersection(Sd_MADRS_limited,
Sa_MADRS_limited, Sd_Tsec, Sa_Tsec)

    if Sd_int is not None and Sa_int is not None:
        Sd_intersections.append(Sd_int)
        Sa_intersections.append(Sa_int)

    if not intersection_found and Sd_int <= Sd.max() and Sa_int <=
Sa.max():
        Sd_star, Sa_star = Sd_int, Sa_int
        intersection_found = True

```

```

if not intersection_found:
    Sd_star = Sd[-1]
    Sa_star = Sa[-1]

Sa_T0 = np.interp(T0, Tn, ESPECTA)
Sa_values.append(Sa_T0)
Sd_performance_points.append(Sd_star)
puntos_desempeño.append((Sa_T0, Sd_star, archivo))

tiempo_final_archivo = time.time() # Tiempo final del archivo
tiempo_archivo = tiempo_final_archivo - tiempo_inicio_archivo
print(f"Tiempo para procesar {archivo}: {tiempo_archivo:.2f} segundos")

except Exception as e:
    tiempo_final_archivo = time.time()
    tiempo_archivo = tiempo_final_archivo - tiempo_inicio_archivo
    print(f"Error procesando archivo {archivo}: {e}")
    print(f"Tiempo hasta el error en {archivo}: {tiempo_archivo:.2f}
segundos")

if Sa_values and Sd_performance_points:
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.plot(Sa_values, Sd_performance_points, 'bo', linestyle='None')
    plt.xlabel('Aceleración espectral Sa (g)')
    plt.ylabel('Sd Performance Point (cm)')
    plt.title('Aceleración espectral Sa (g) vs Sd Performance Point (cm)')

```

```

plt.grid(True)

plt.tight_layout()

plt.show()

# Calcular umbrales de daño usando Dy y Au

Slight = 0.7 * Dy

Moderate = Dy

Extensive = Dy + 0.25 * (Du - Dy)

Collapse = Du

# Obtener los resultados de los puntos de desempeño

puntos_totales_por_estado,          puntos_excedencias_por_estado,
promedios_por_estado                =
Acceleration_Spectral_vs_Performance_Point(puntos_desempeño,      Slight,
Moderate, Extensive, Collapse)

# Definir los casos totales por nivel de daño basado en la cantidad de intervalos
en cada nivel

niveles_dano = {nivel: len(puntos) for nivel, puntos in
puntos_totales_por_estado.items()}

# Crear las tablas usando los nuevos diccionarios

tablas = crear_tablas(puntos_totales_por_estado,
puntos_excedencias_por_estado, promedios_por_estado)

# Exportar los resultados a Excel

exportar_a_excel(tablas, 'Curvas de Fragilidad.xlsx')

print("Las tablas se han exportado a 'Curvas de Fragilidad.xlsx'.")

```

```
# Determinar el máximo Sa para graficar correctamente las curvas de fragilidad
max_Sa = max((max(promedios, default=0) for promedios in
promedios_por_estado.values()), default=0)

# Graficar curvas de fragilidad
graficar_curvas_fragilidad(tablas, niveles_dano, max_Sa)

# Mostrar tiempo total de ejecución
tiempo_final_programa = time.time()
tiempo_total = tiempo_final_programa - tiempo_inicio_programa
print(f"Tiempo total de ejecución del programa: {tiempo_total:.2f} segundos")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

## 5.2 Curvas de Fragilidad de Diversas Tipologías Estructurales

Aquí adjuntamos las curvas de fragilidad de más de 50 tipologías estructurales diferentes, haciendo énfasis en revisar en el Capítulo 1 de nuestro estudio, en la sección 1.7 donde hablamos y explicamos la nomenclatura en la que nos basamos para mayor entendimiento.

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-10	3.9	0.1160041	19.3	0.1310907	0.0736	0.0407	0.1098	0.1322	0.2087	0.0346	0.3364	0.3024

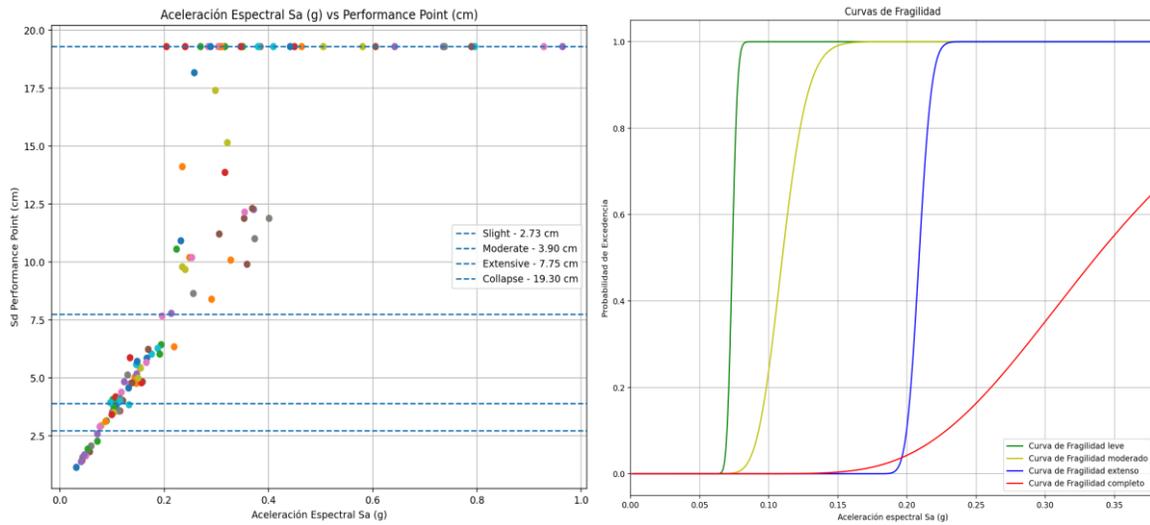


Imagen 42. Caso Cr-D-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-15	5.9	0.0196738	19.7	0.02263	0.0135	0.0373	0.0212	0.0647	0.0295	0.0388	0.0712	0.3553

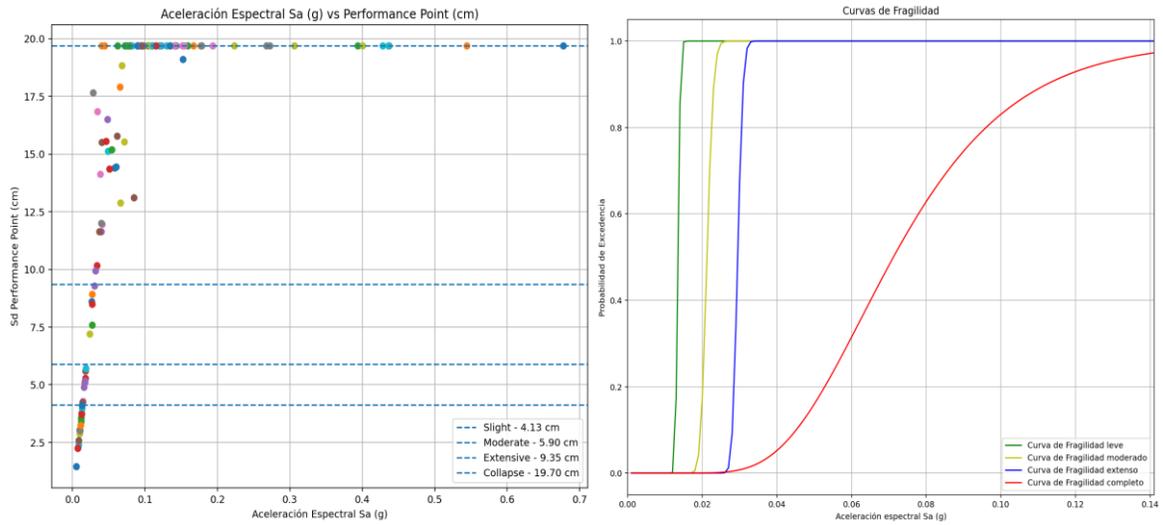


Imagen 43. Caso Cr-D-15. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	1.9	0.3043833	20.6	0.3010194	0.1927	0.0366	0.2790	0.1192	1.0008	0.4410	1.5145	0.2329

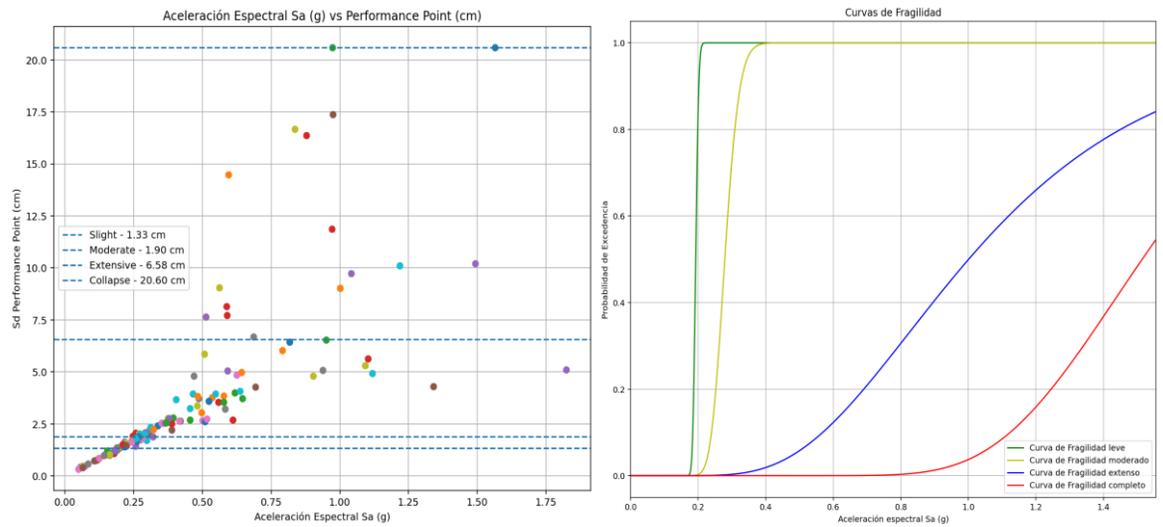


Imagen 44. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-2	2.8	0.391947	20.6	0.3961264	0.2543	0.0785	0.3872	0.1285	0.9133	0.2589	1.3396	0.1439

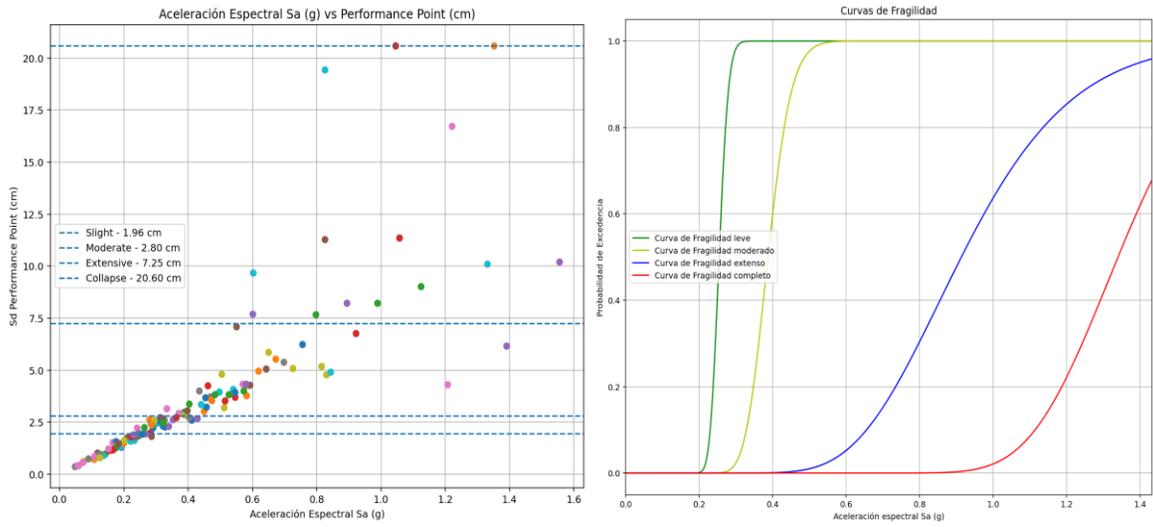


Imagen 45. Caso Cr-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-6	4.7	0.2678899	21.3	0.2706422	0.1849	0.0330	0.2654	0.0322	0.4444	0.0764	0.7253	0.1919

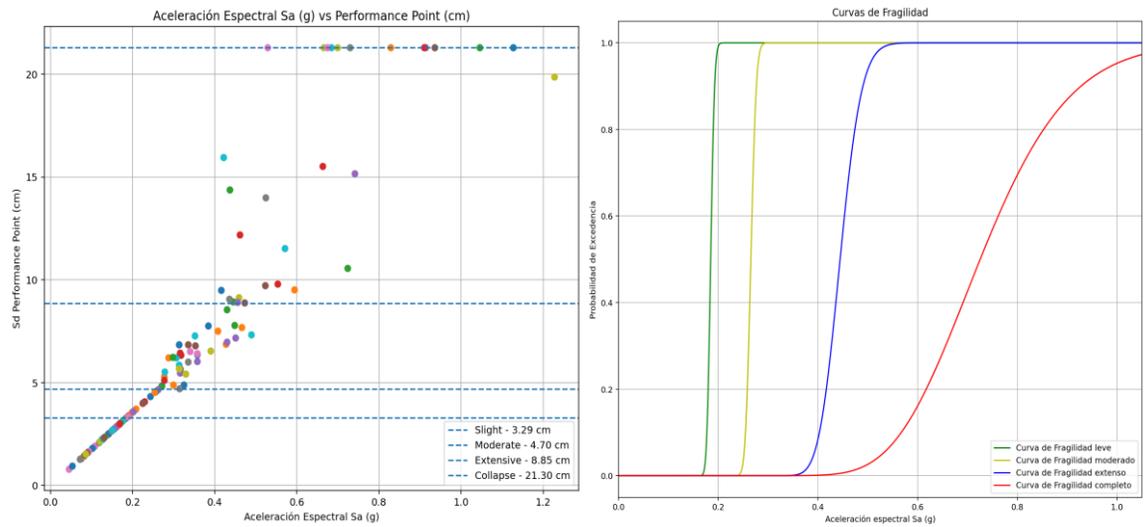


Imagen 46. Caso Cr-D-6. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-5	1.4	0.258104	24.8	0.2621814	0.1580	0.0503	0.2399	0.0759	1.0114	0.5521	0.9829	0.3731

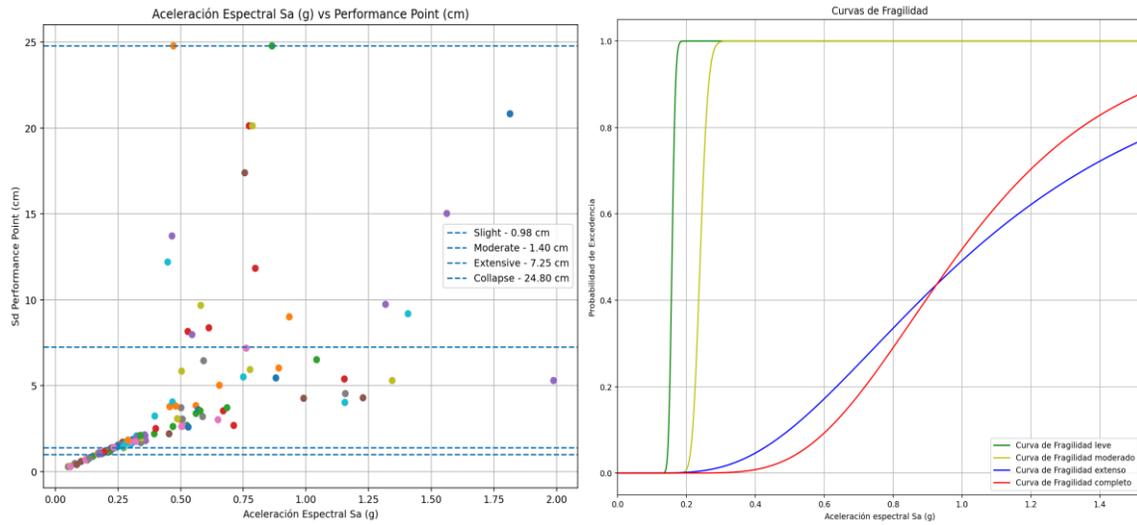


Imagen 47. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-5	2.8	0.180632	32.7	0.2117227	0.1210	0.0340	0.1791	0.0309	0.4974	0.2328	0.8850	0.3432

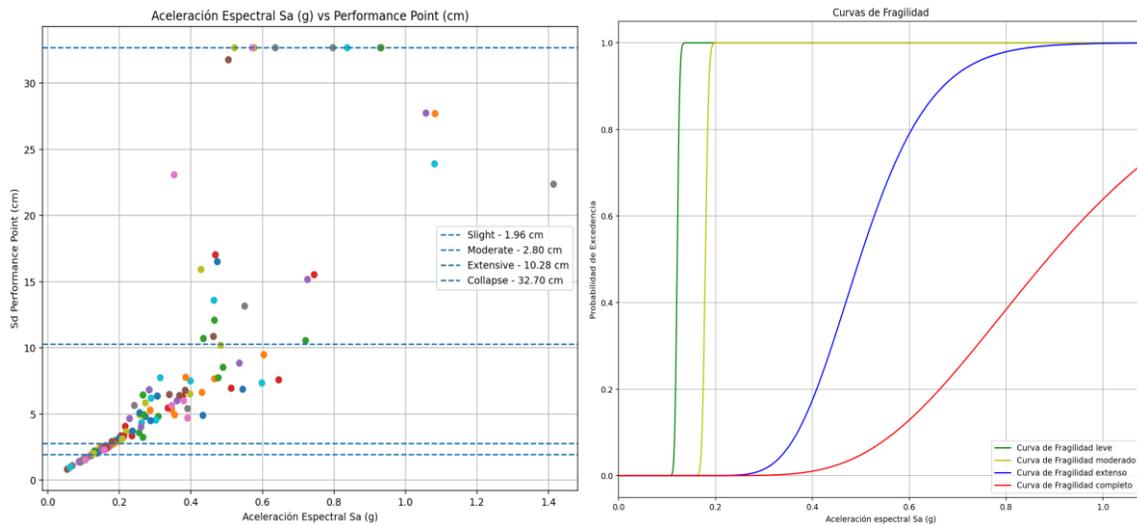


Imagen 48. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-18	7.7	0.0865443	37.1	0.1248726	0.0599	0.0389	0.0842	0.0348	0.1564	0.0452	0.3076	0.3207

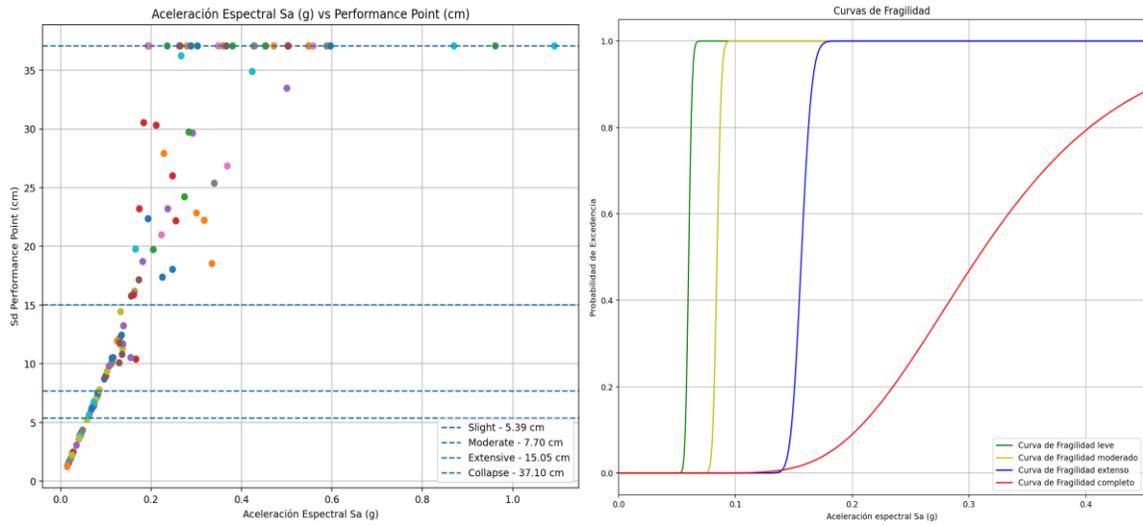


Imagen 49. Caso Cr-D-18. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	6.4	0.1653415	37.1	0.2143731	0.1077	0.0609	0.1401	0.0303	0.3368	0.1515	0.6454	0.2937

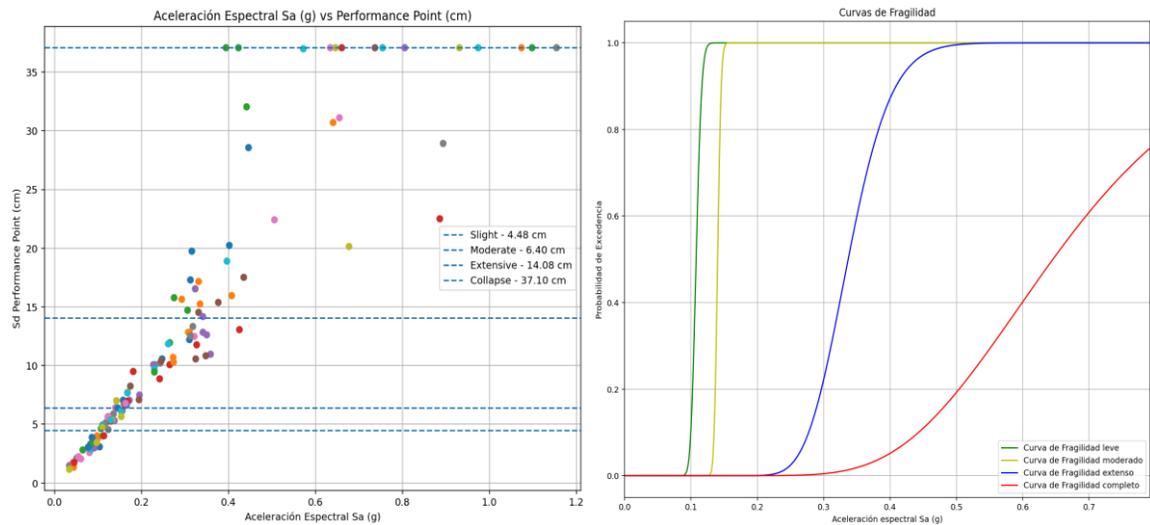


Imagen 50. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	2.3	0.1978593	40	0.2251784	0.1319	0.1110	0.1835	0.1016	0.7318	0.4380	0.6418	0.1472

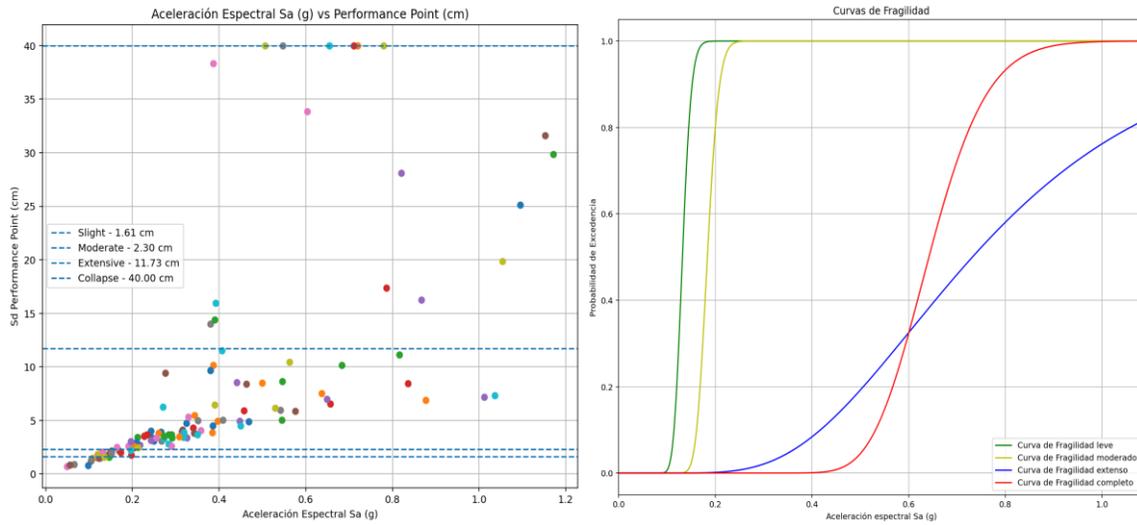


Imagen 51. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-4	2.6	0.1074414	40.1	0.1070336	0.0746	0.0569	0.1030	0.0716	0.3141	0.2469	0.8181	0.6130

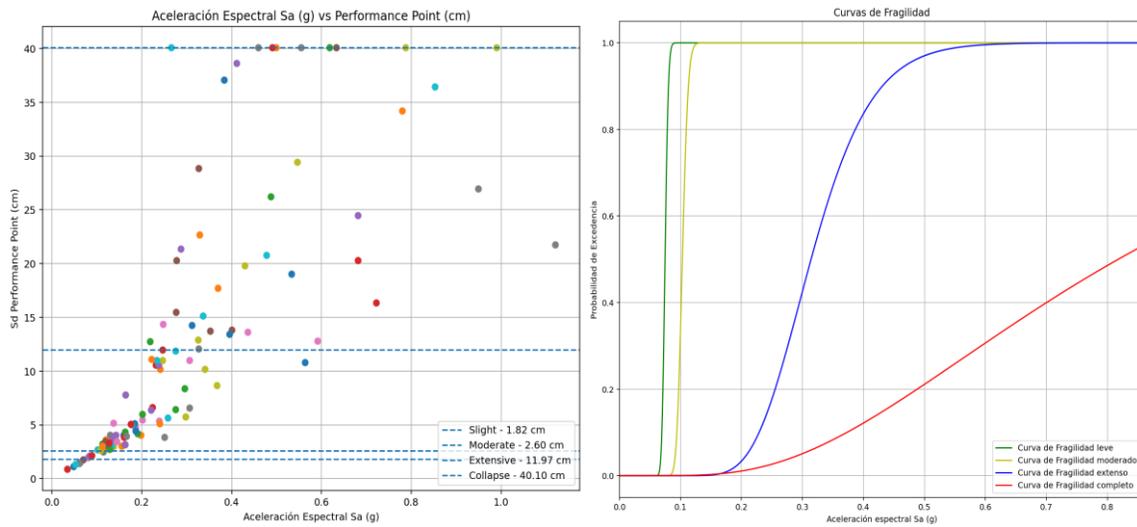


Imagen 52. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	2.8	0.2449541	44.3	0.2748216	0.1649	0.0395	0.2503	0.0838	0.8457	0.4507	0.7734	0.1789

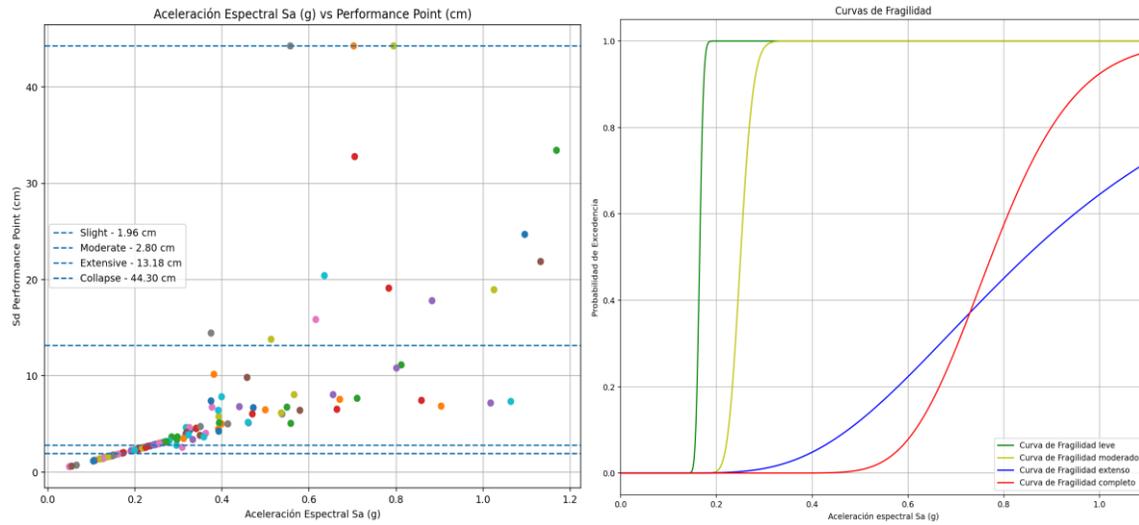


Imagen 53. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	2	0.1803262	44.4	0.2035678	0.1221	0.0446	0.1608	0.0390	0.7165	0.4459	0.8286	0.2468

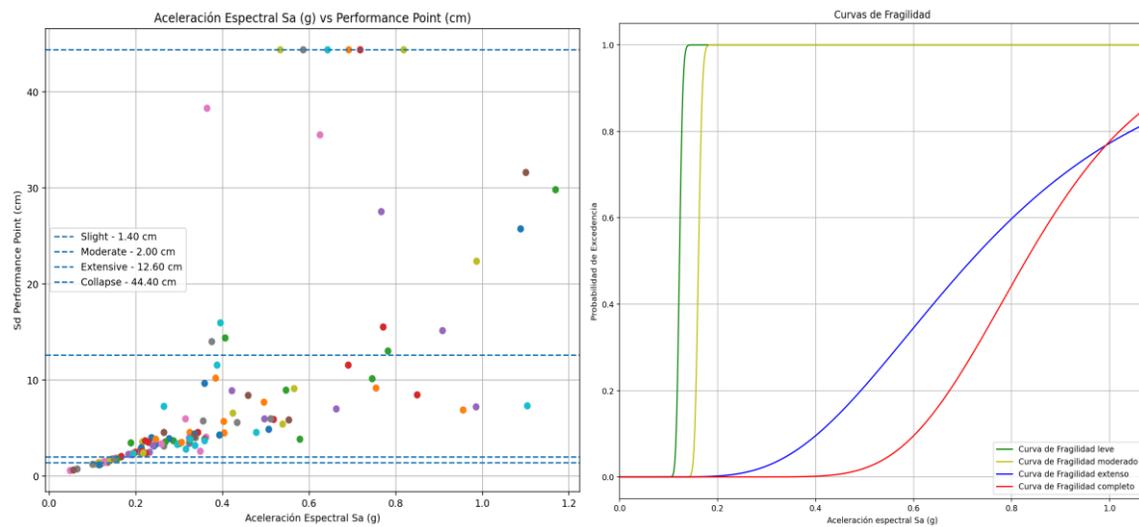


Imagen 54. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	3.2	0.2821611	52.1	0.3194699	0.1895	0.0305	0.2770	0.0340	0.8649	0.1925	0.8457	0.0326

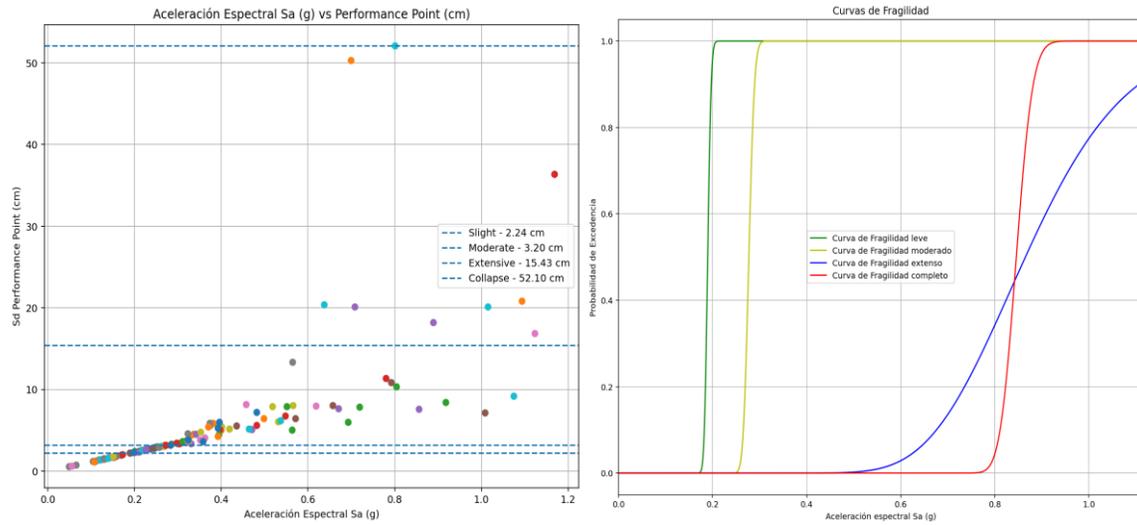


Imagen 55. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-6	6.2	0.3021407	52.7	0.3708461	0.1977	0.0350	0.2936	0.0349	0.6061	0.0823	0.7720	0.1197

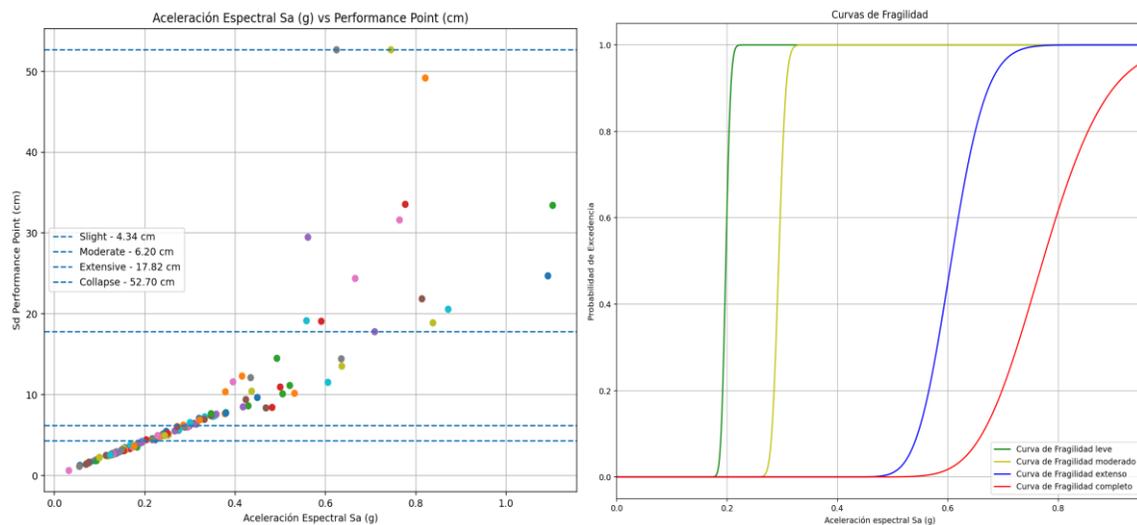


Imagen 56. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-6	7.7	0.3988787	53.8	0.5349643	0.2692	0.1184	0.3753	0.1092	0.8251	0.1371	-	-

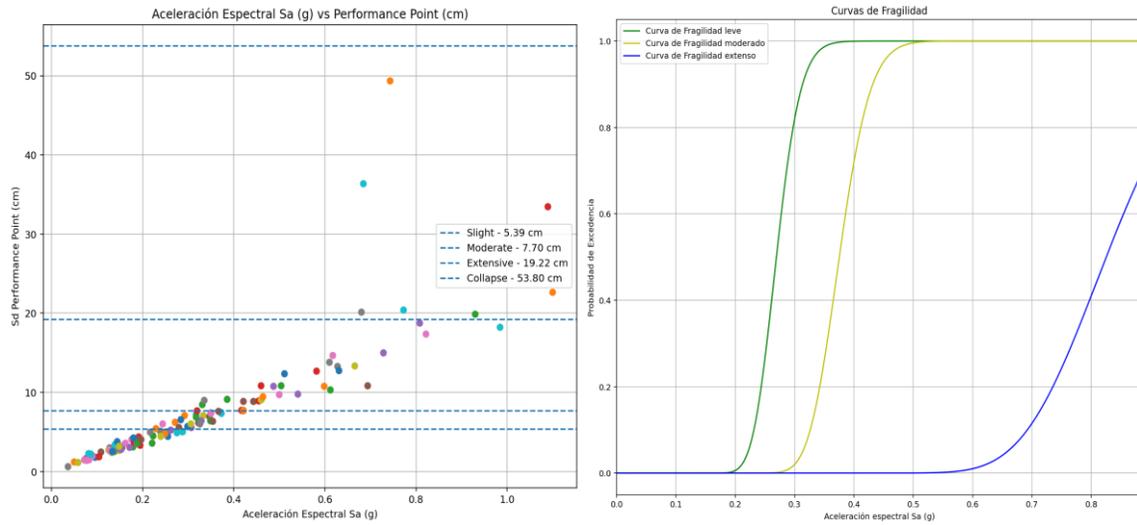


Imagen 57. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	3.3	0.2211009	55	0.2570846	0.179773	0.1635269	0.3525929	0.3399974	0.8933396	0.1	-	-

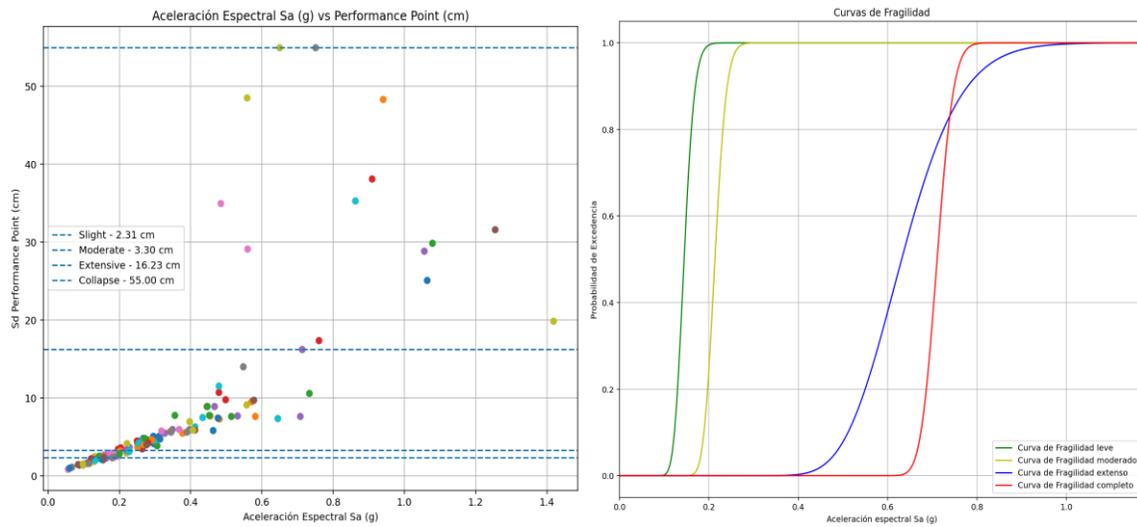


Imagen 58. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-6</b>	6.1	0.3265036	55.7	0.4376147	0.2132	0.0319	0.3047	0.0481	0.6970	0.0566	0.7402	0.0365

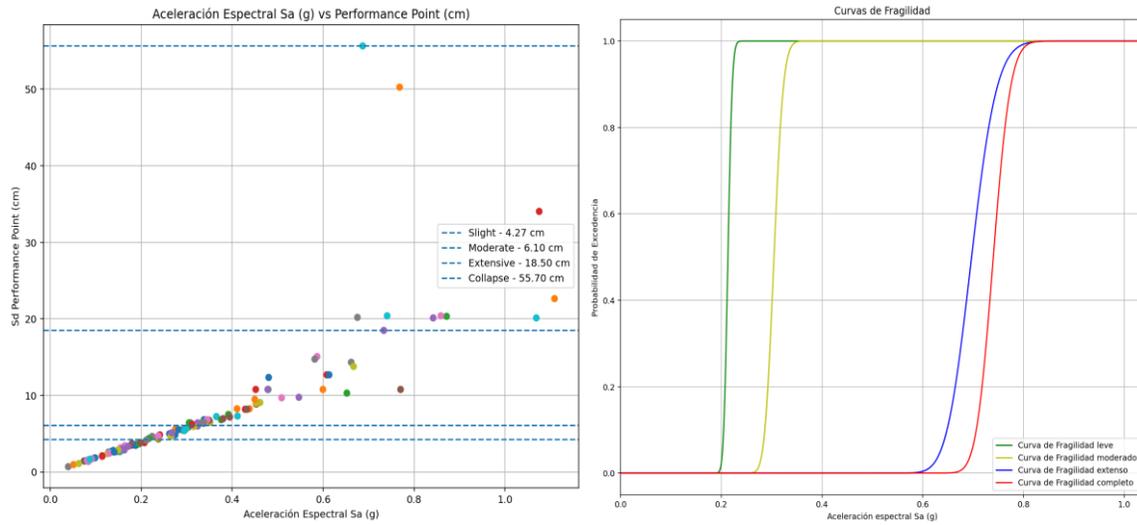


Imagen 59. Caso Cr-M-6. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-D-8</b>	3.3	0.2299694	56.5	0.264526	0.1577	0.0353	0.2229	0.0348	0.7074	0.2218	0.7146	0.0380

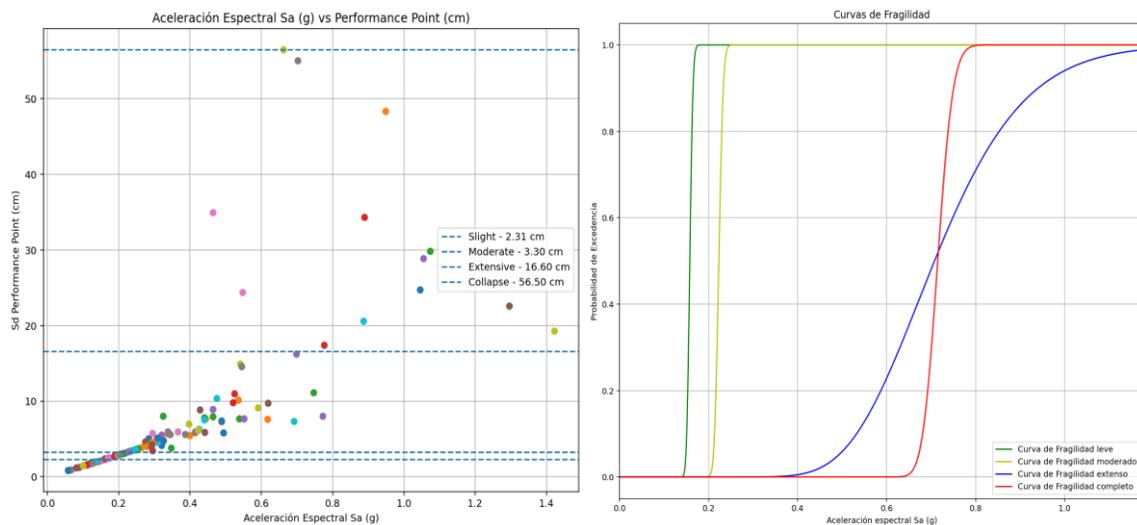


Imagen 60. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	13.4	0.2269113	59.9	0.2735984	0.1456	0.0574	0.2149	0.0501	0.4185	0.0271	0.7079	0.3072

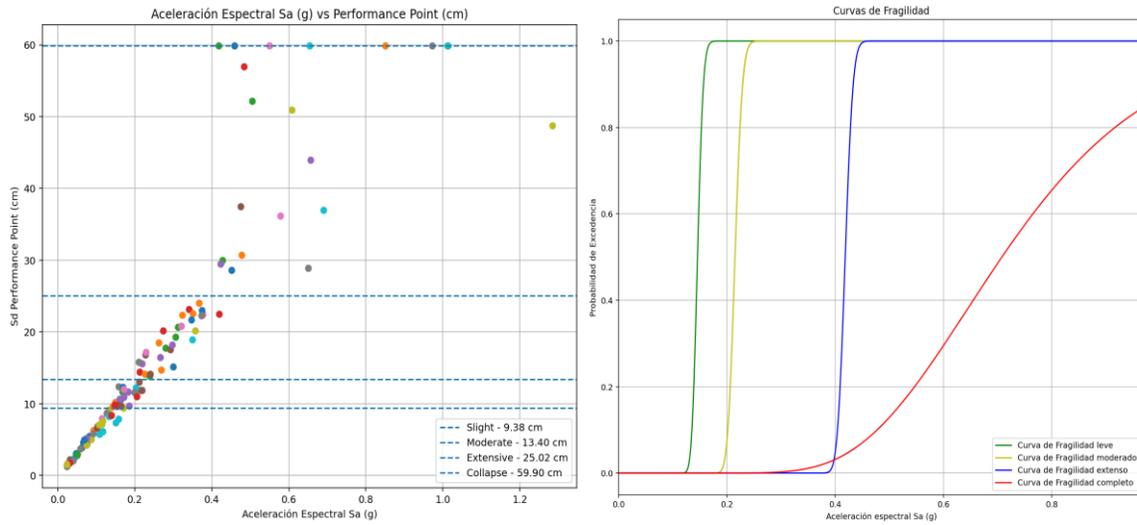


Imagen 61. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	15	0.2601427	59.9	0.3228338	0.1692	0.1264	0.2355	0.1314	0.4131	0.0955	0.7392	0.2648

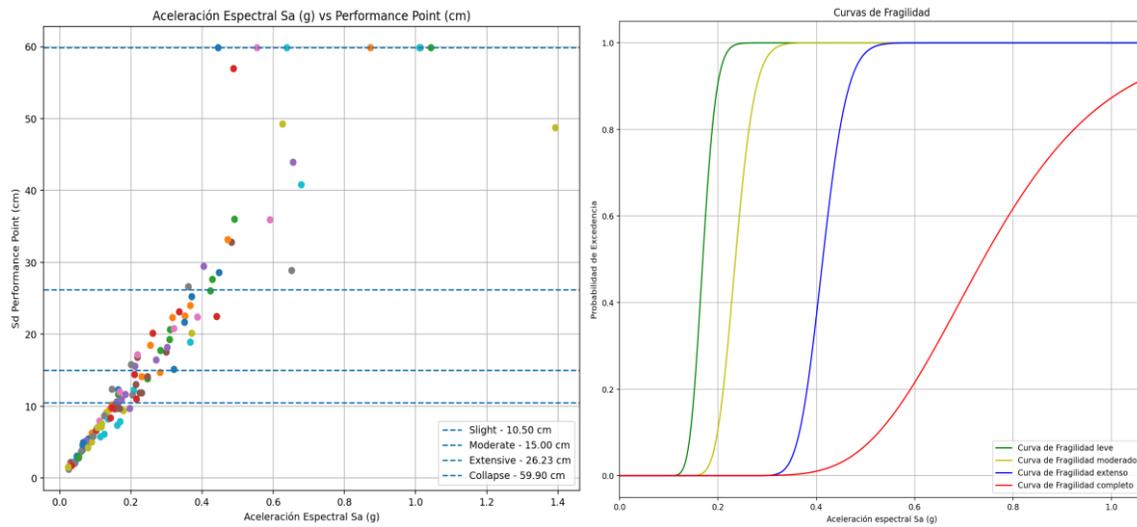


Imagen 62. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	8.6	0.2027523	61.1	0.2330275	0.1283	0.1386	0.1835	0.0813	0.4031	0.1826	0.7599	0.4349

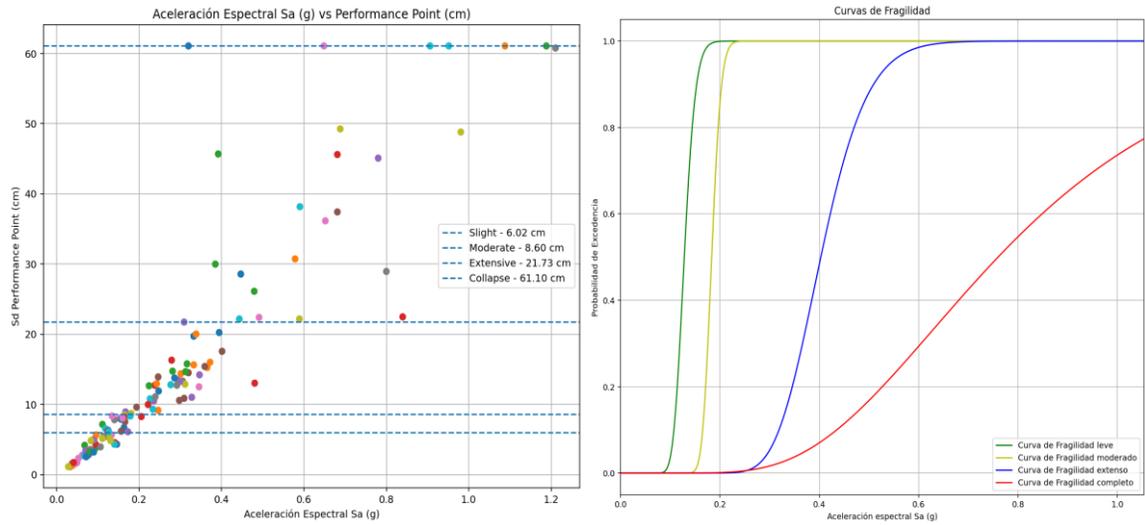


Imagen 63. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	8	0.1735984	64.8	0.206524	0.1094	0.0378	0.157	0.0415	0.4200	0.1673	1.0323	0.4536

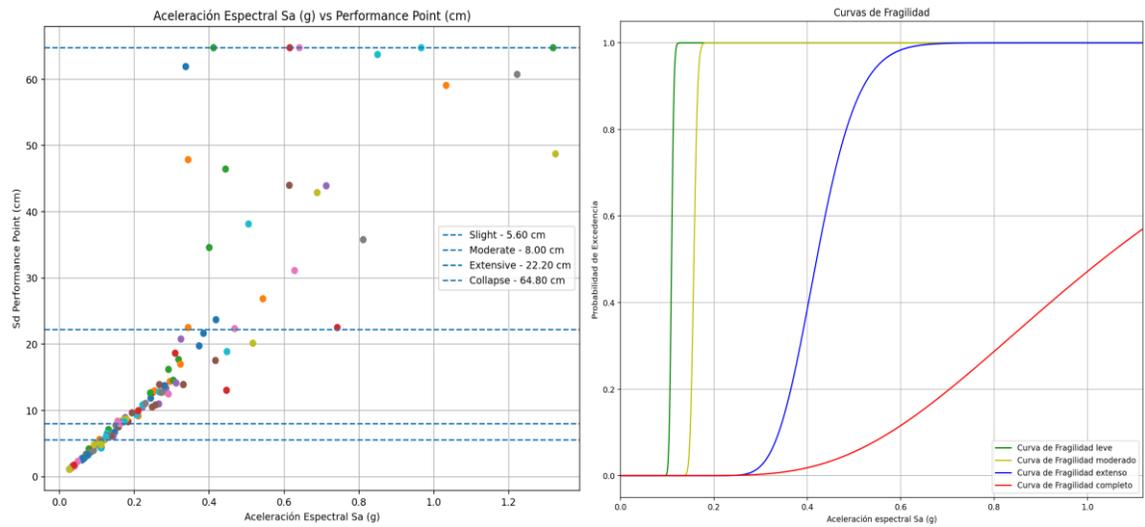


Imagen 64. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	3	0.2189602	64.8	0.2573904	0.1474	0.0365	0.2167	0.0293	0.7749	0.2766	0.7611	0.0449

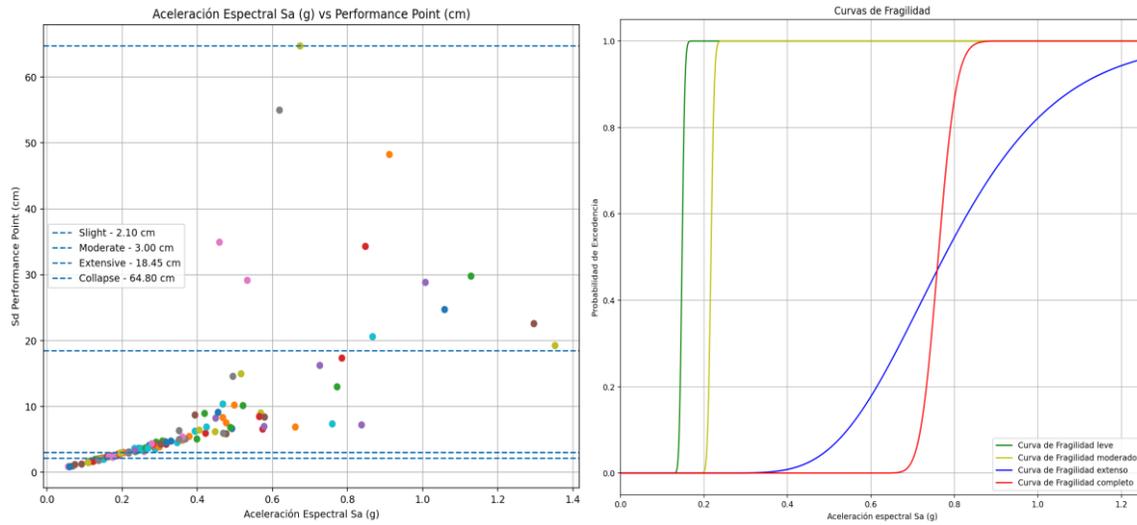


Imagen 65. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	6.9	0.1682977	65.3	0.2009174	0.1121	0.0299	0.1577	0.0297	0.4523	0.2118	0.9643	0.4447

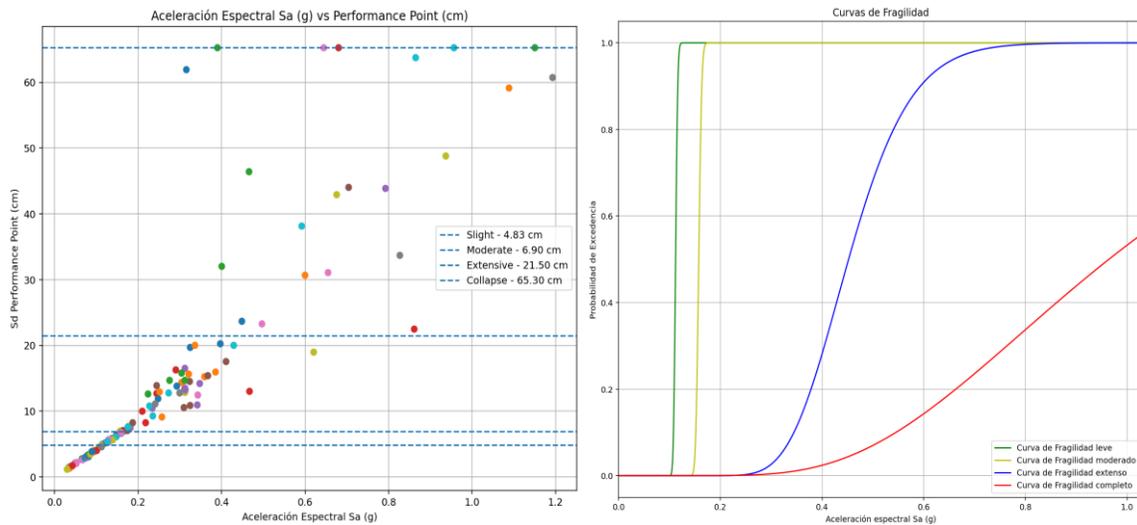


Imagen 66. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-D-18</b>	9.9	0.1081549	65.7	0.1857288	0.0731	0.0871	0.1105	0.0298	0.2481	0.1285	0.5121	0.1871

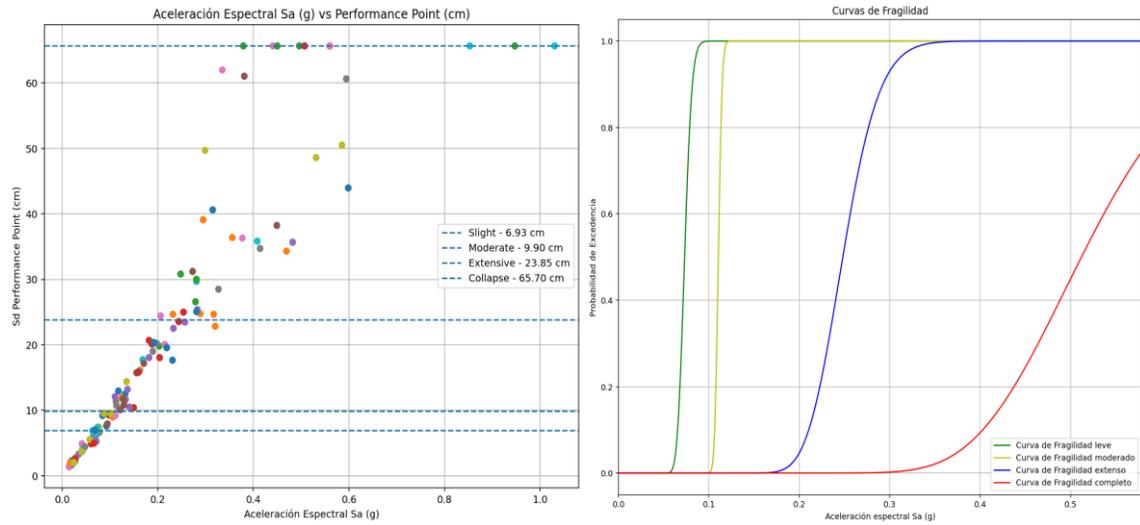


Imagen 67. Caso Cr-D-18. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	12.3	0.2119266	70	0.2504587	0.1399	0.1083	0.1976	0.1582	0.3992	0.0712	0.9355	0.2630

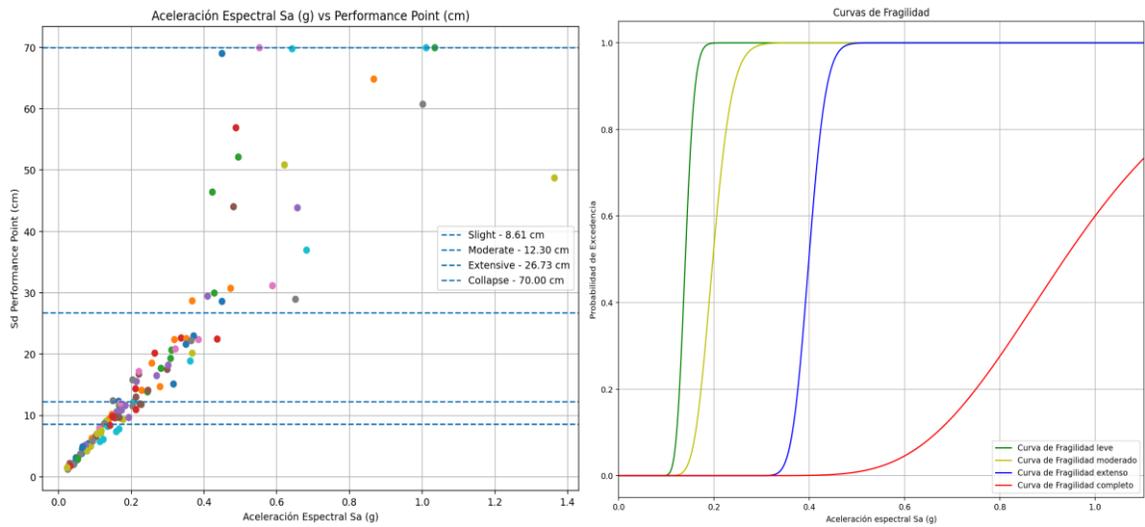


Imagen 68. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	5.2	0.103262	70.5	0.1148828	0.0762	0.0900	0.1037	0.1301	0.2821	0.2938	0.7017	0.5551

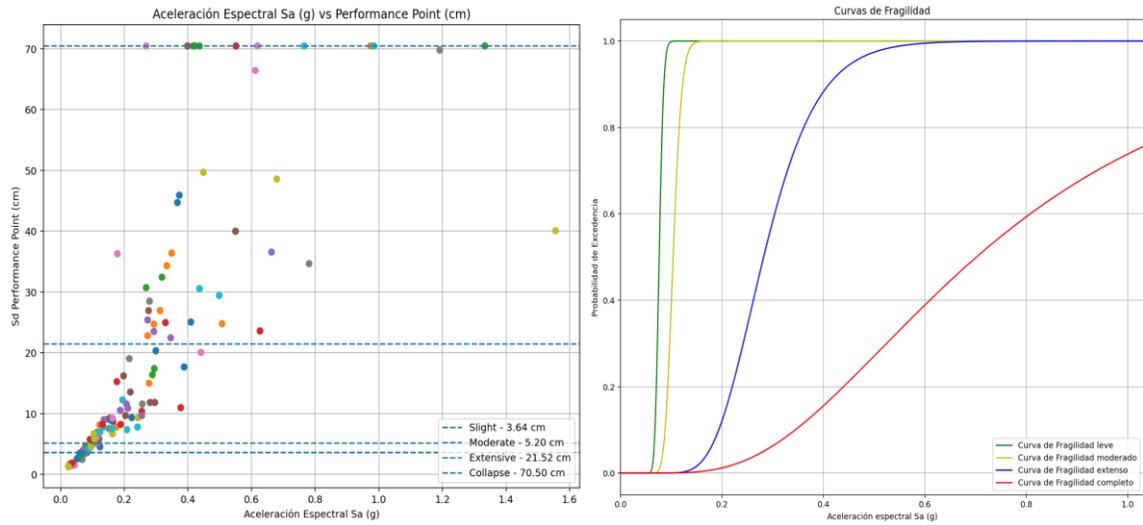


Imagen 69. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	6.7	0.1719674	70.5	0.2147808	0.1115	0.0710	0.1563	0.0780	0.5535	0.2237	0.9418	0.2140

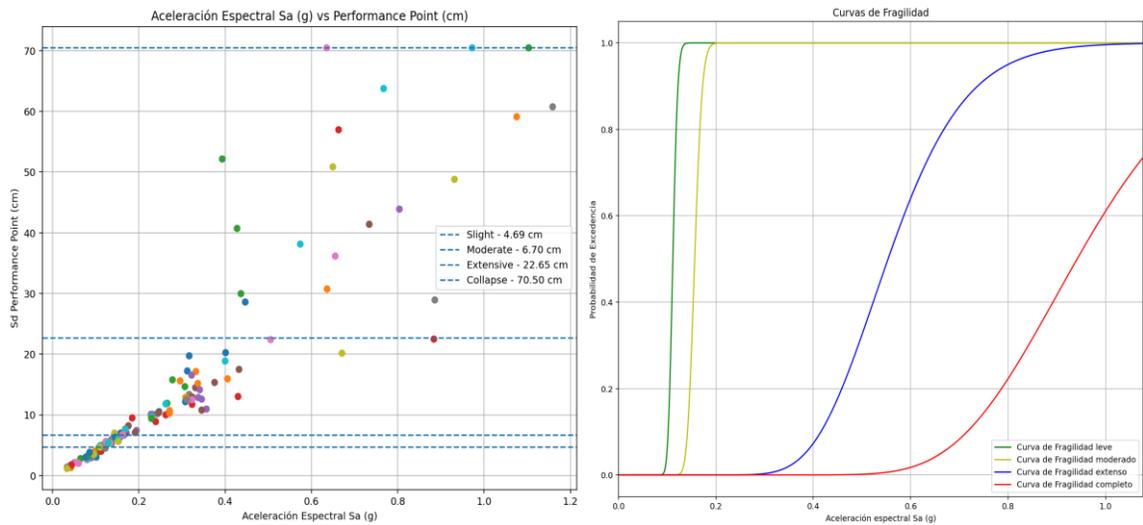


Imagen 70. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	6.9	0.1266055	71.9	0.1450561	0.0905	0.0301	0.1219	0.0344	0.3506	0.3187	0.7841	0.4922

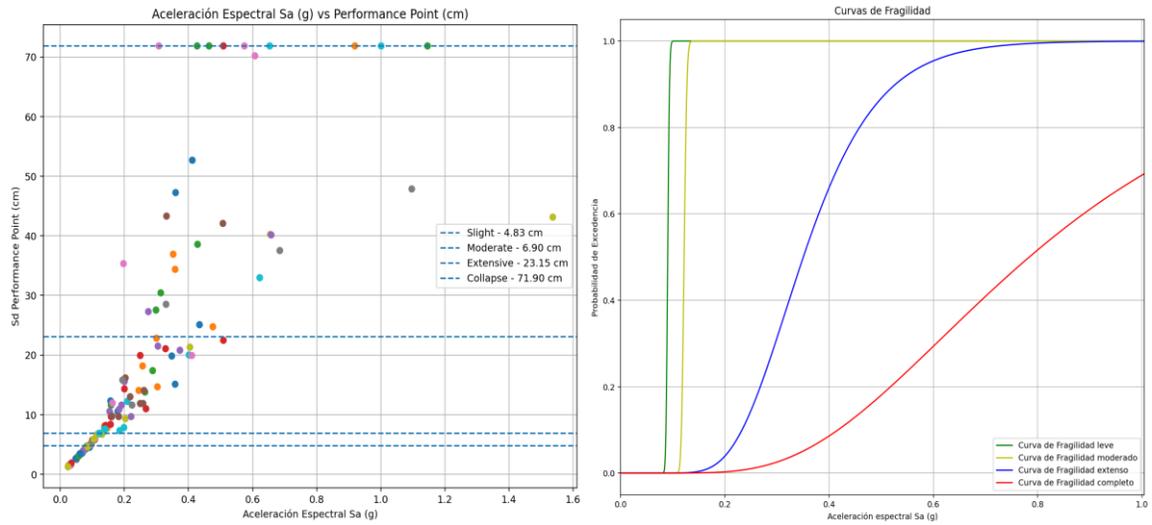


Imagen 71. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
A-OMF-4	20.1	1.2970438	72.9	1.6141692	0.8829	0.0402	1.2906	0.0339	-	-	-	-

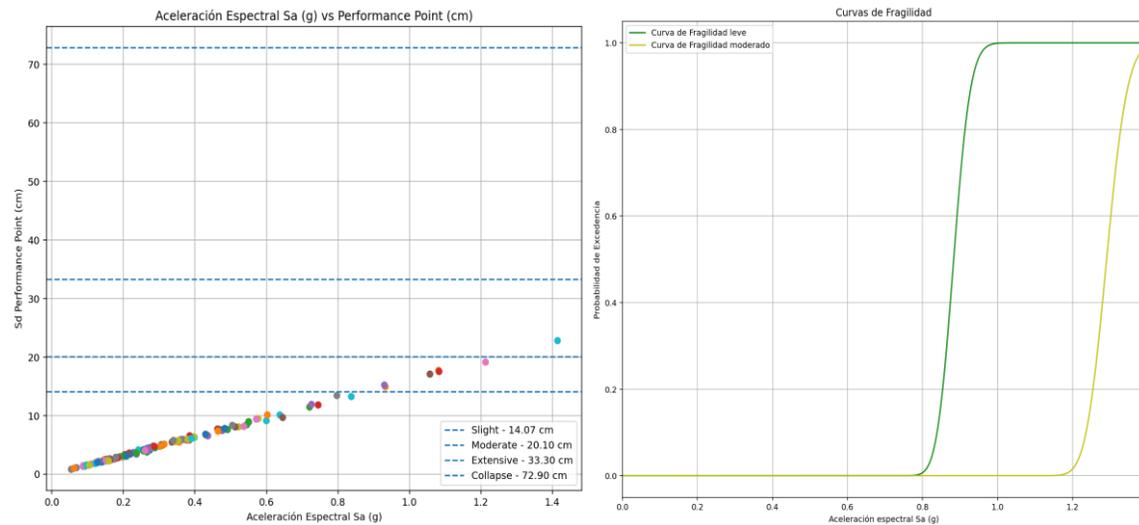


Imagen 72. Caso A-OMF-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	5.3	0.1076453	74.7	0.1267074	0.0773	0.1174	0.1057	0.1477	0.3113	0.3968	0.8410	0.5868

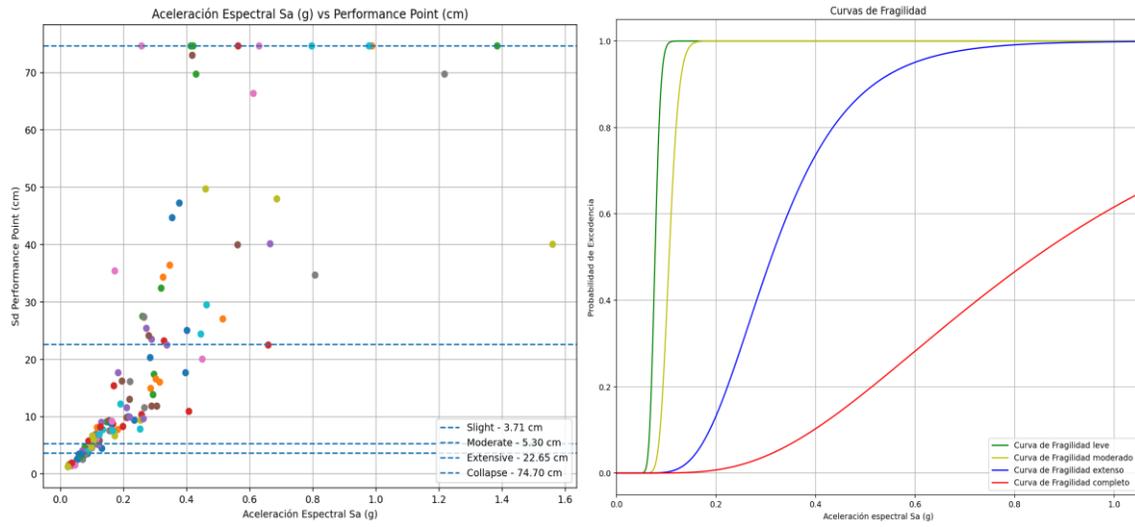


Imagen 73. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	5.3	0.1030581	76.1	0.1146789	0.0753	0.0519	0.1044	0.1115	0.2956	0.2812	0.7916	0.4111

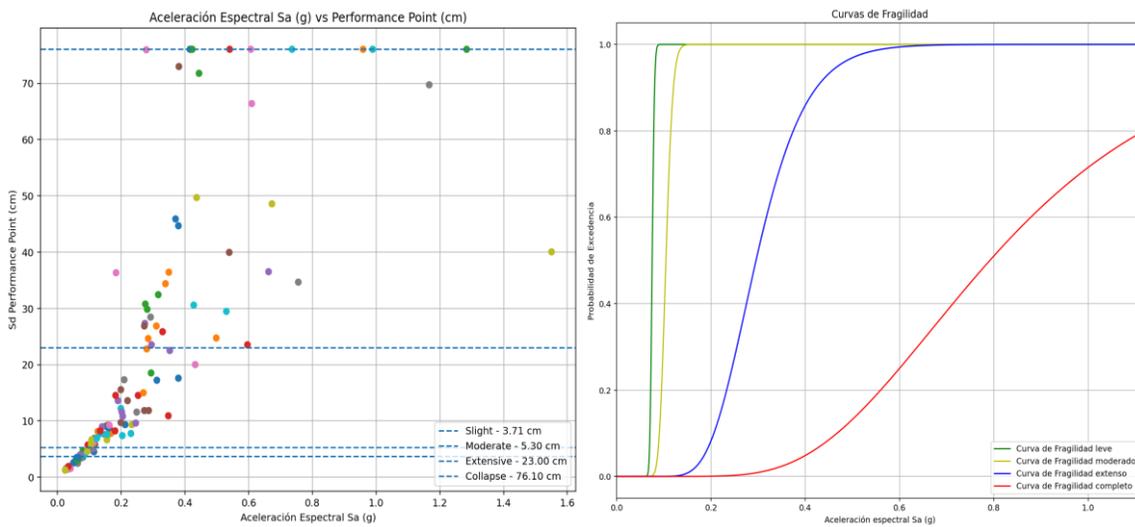


Imagen 74. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	6.7	0.0845056	77	0.0899083	0.0585	0.0320	0.0890	0.0816	0.2366	0.3302	0.6337	0.7003

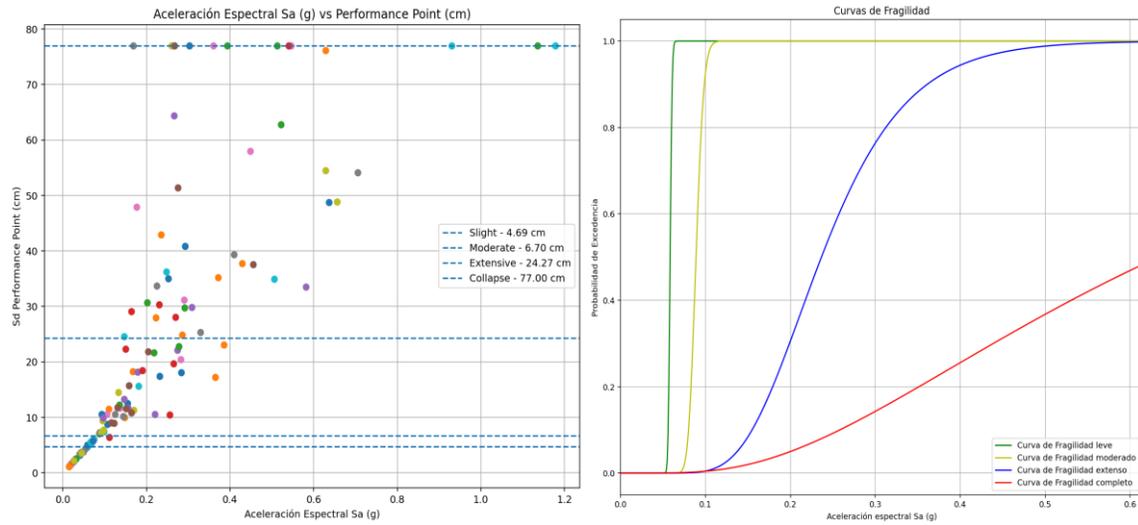


Imagen 75. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-8	5.7	0.1199796	79.1	0.1352701	0.0830	0.0359	0.1243	0.0544	0.3571	0.2774	0.9550	0.6357

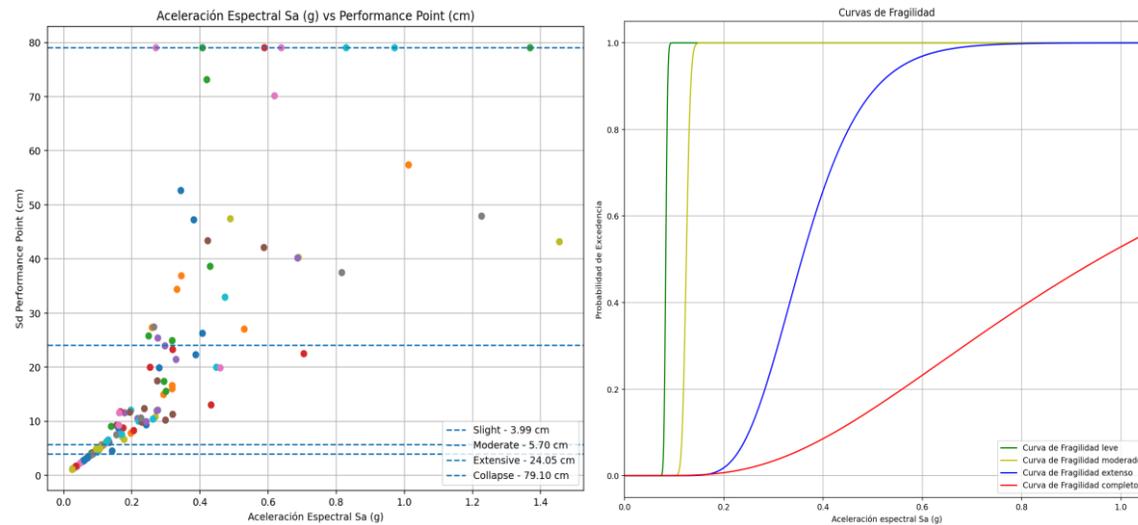


Imagen 76. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	6.9	0.1019368	85.5	0.1125382	0.0694	0.0381	0.1033	0.0394	0.3011	0.2785	0.6397	0.2803

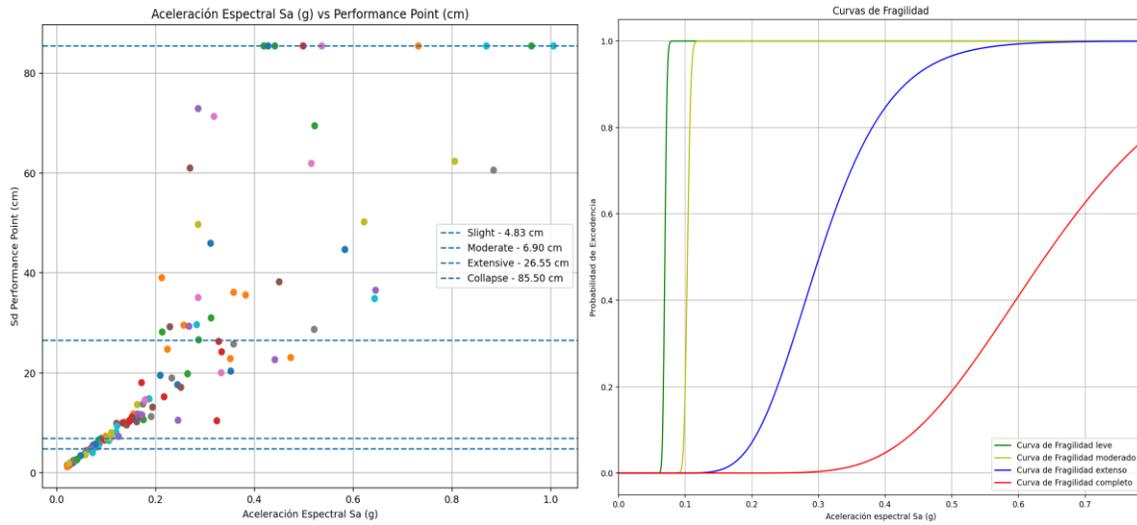


Imagen 77. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	6.6	0.1010194	87.3	0.1103976	0.0695	0.0791	0.0928	0.1428	0.3121	0.3895	0.6341	0.2753

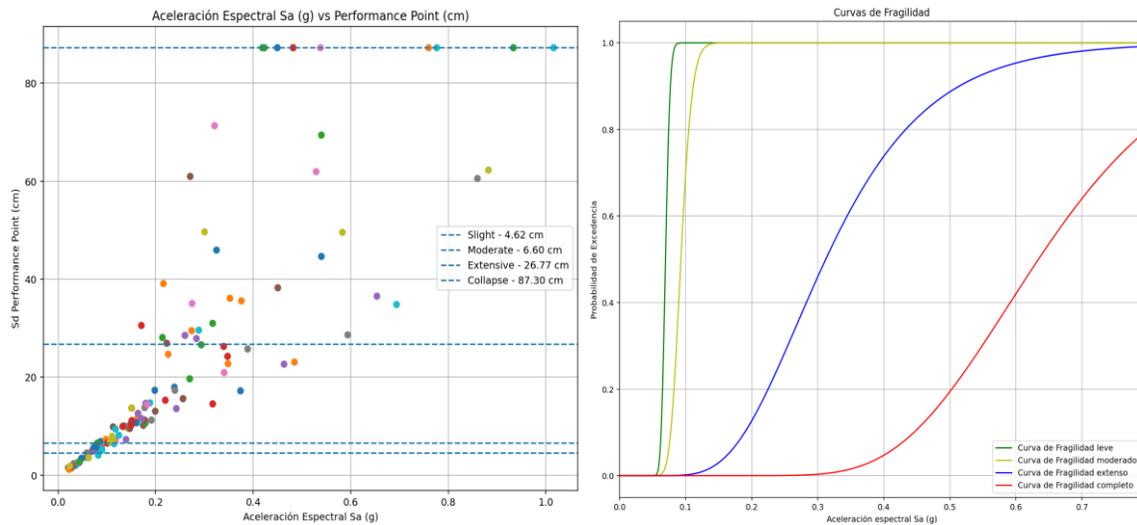


Imagen 78. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>A-SMF-4</b>	16.5	0.3740061	88.6	0.3701325	0.2502	0.0947	0.3473	0.0889	0.7074	0.0774	11,152	0.0691

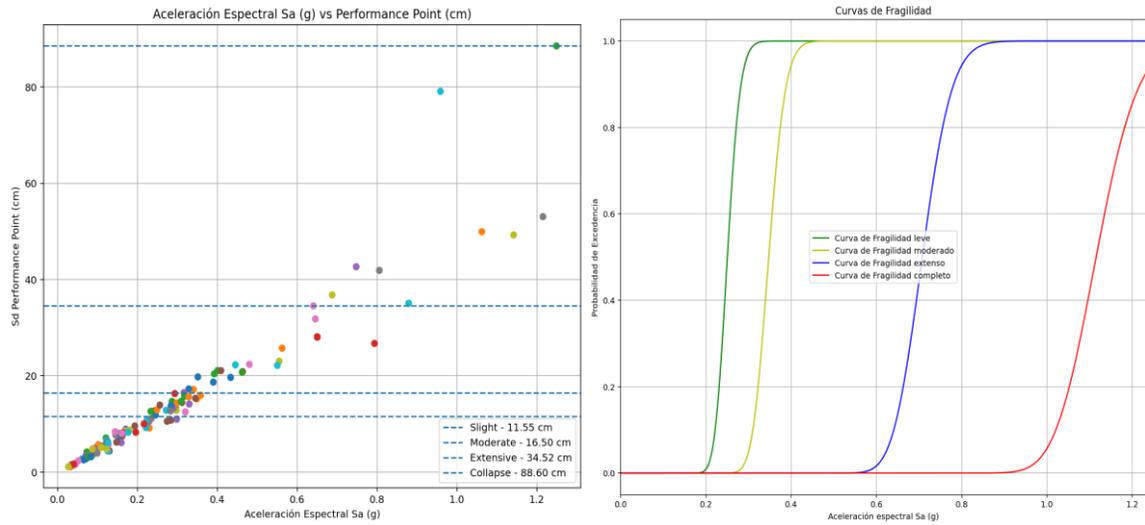


Imagen 79. Caso A-SMF-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	6.9	0.104893	88.8	0.1132518	0.0693	0.0722	0.1062	0.0767	0.3121	0.3703	0.6892	0.3203

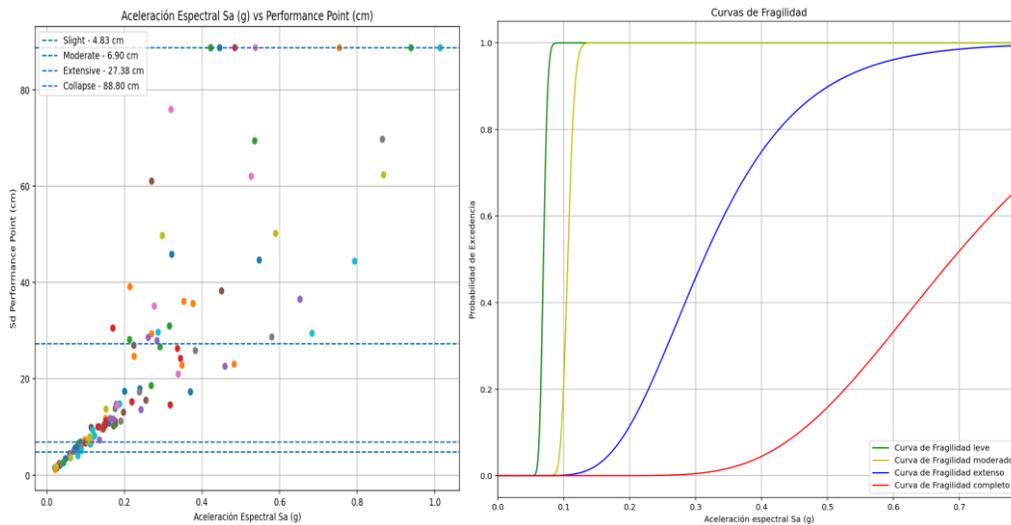


Imagen 80. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-10</b>	7	0.1020387	92.4	0.1116208	0.0682	0.0328	0.1014	0.0338	0.3101	0.2847	0.5448	0.1876

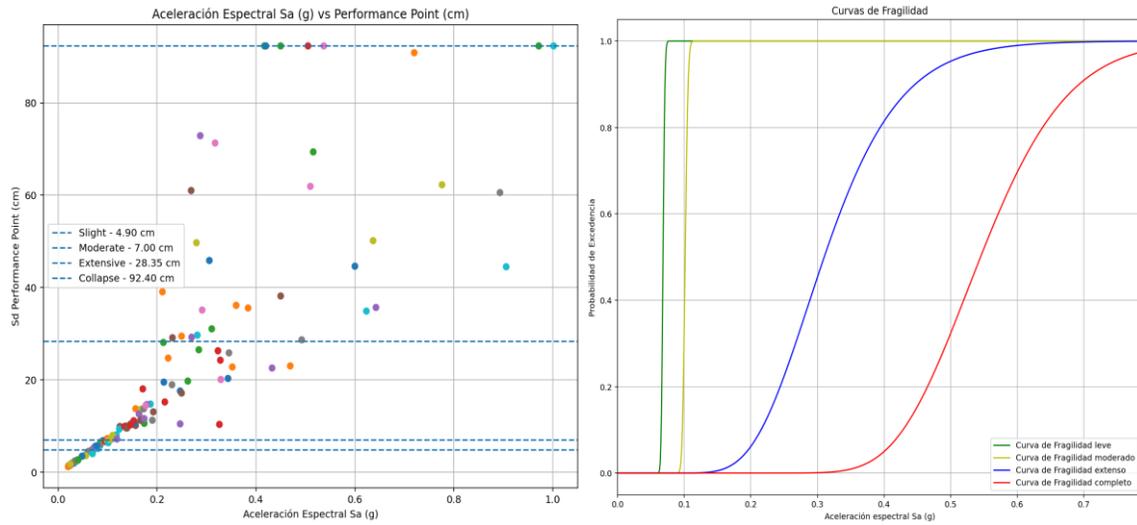


Imagen 81. Caso Cr-M-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>A-IMF-4</b>	16.8	0.4915392	96.1	0.5213048	0.3238	0.0843	0.4753	0.0410	0.5555	0.0591	-	-

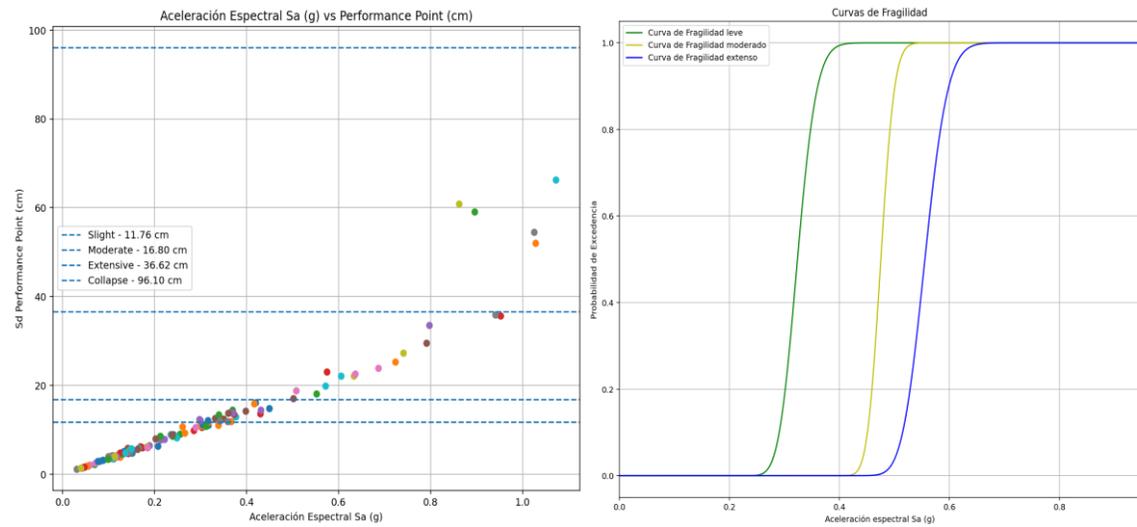


Imagen 82. Caso A-IMF-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>A-SMF-10</b>	32	0.2545362	105.3	0.3365953	0.1730	0.0623	0.2454	0.0668	0.3787	0.0297	0.5921	0.0304

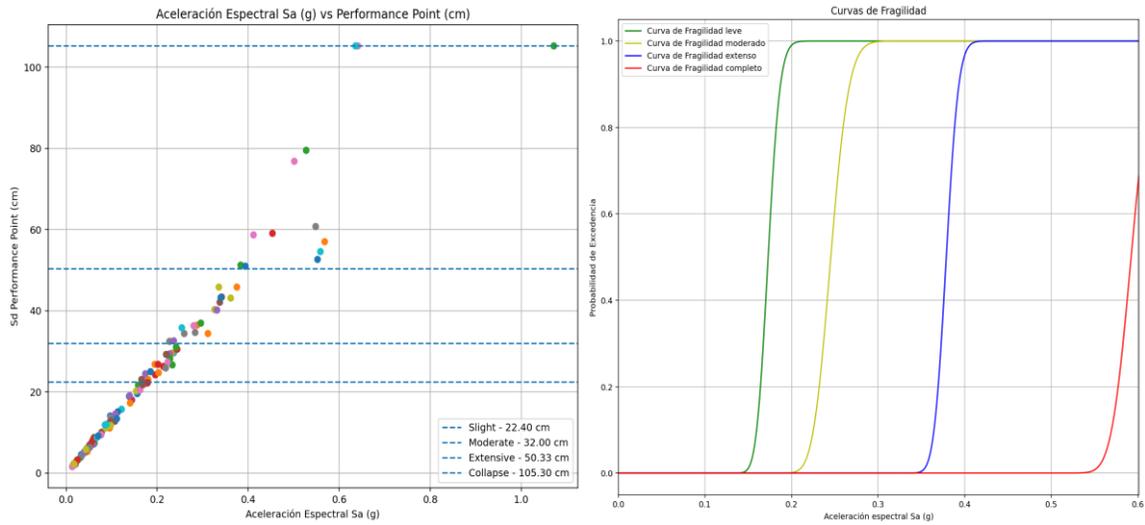


Imagen 83. Caso A-SMF-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-D-8</b>	4.4	0.0845056	109.4	0.0900102	0.0586	0.0373	0.0796	0.0310	0.3764	0.3989	0.9456	0.4583

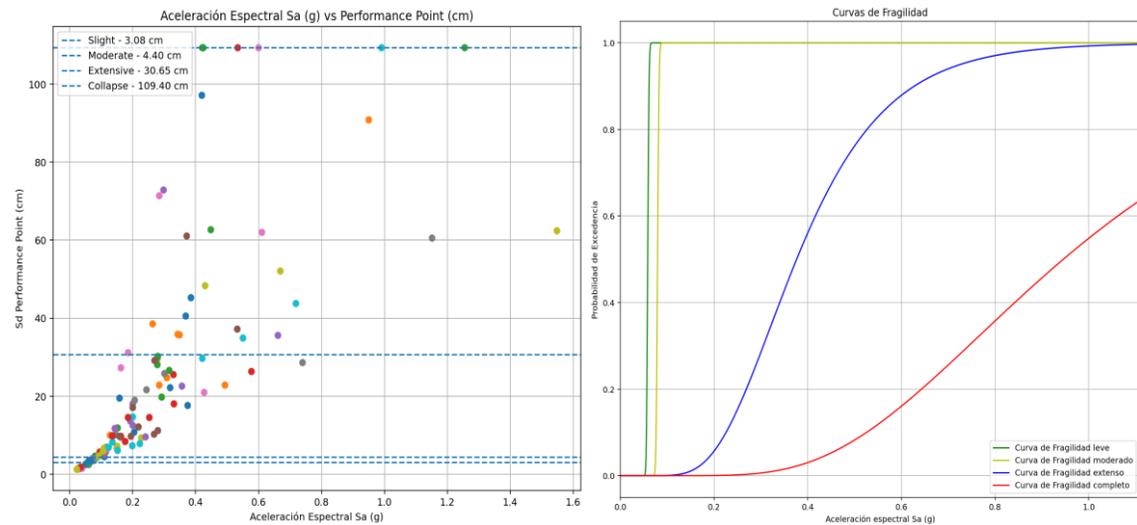


Imagen 84. Caso Cr-D-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
A-IMF-10	32	0.2609582	114.6	0.3489297	0.1757518	0.0868207	0.2483622	0.0993533	0.3980269	0.0281893	0.5803935	0.0671612

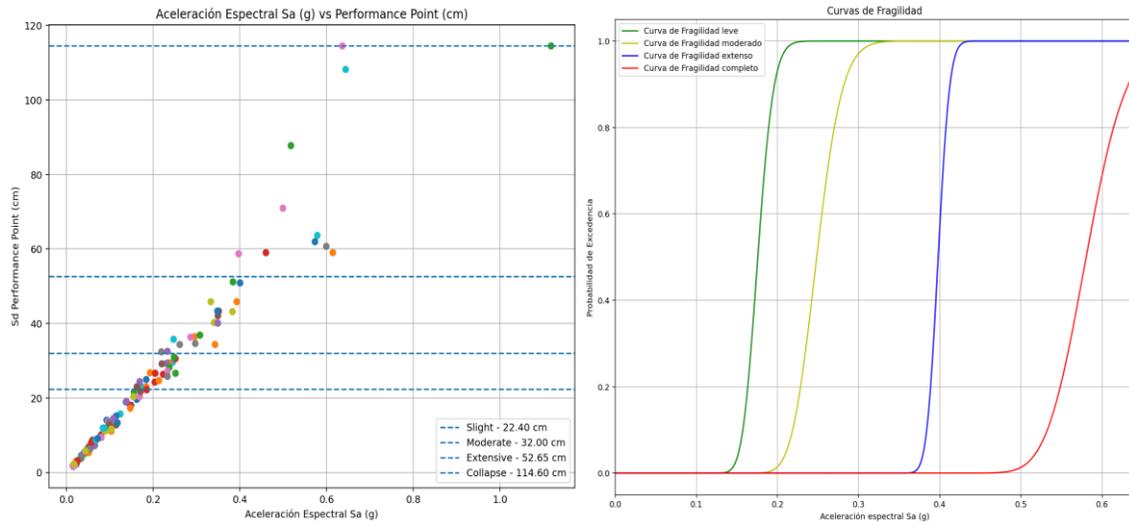


Imagen 85. Caso A-IMF-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
A-OMF-10	35.9	0.3278287	148.2	0.4325178	0.2262	0.0308	0.3115	0.0359	0.6085	0.0497	0.8625	0.0585

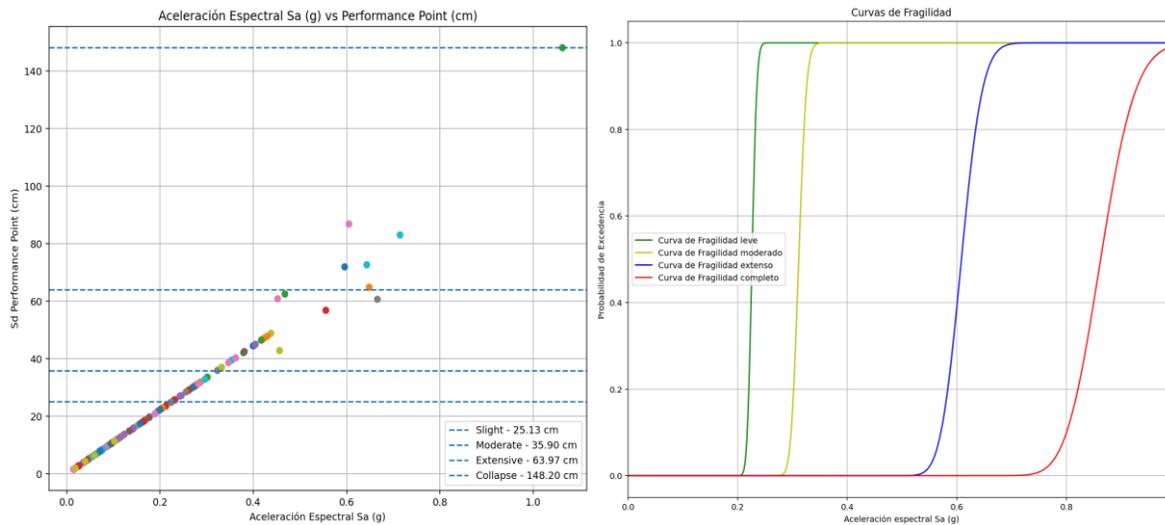


Imagen 86. Caso A-OMF-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Mi-M-2	0.7	1.914475	2.7	1.5925586	0.7459	0.2112	1.0367	0.2790	-	-	-	-

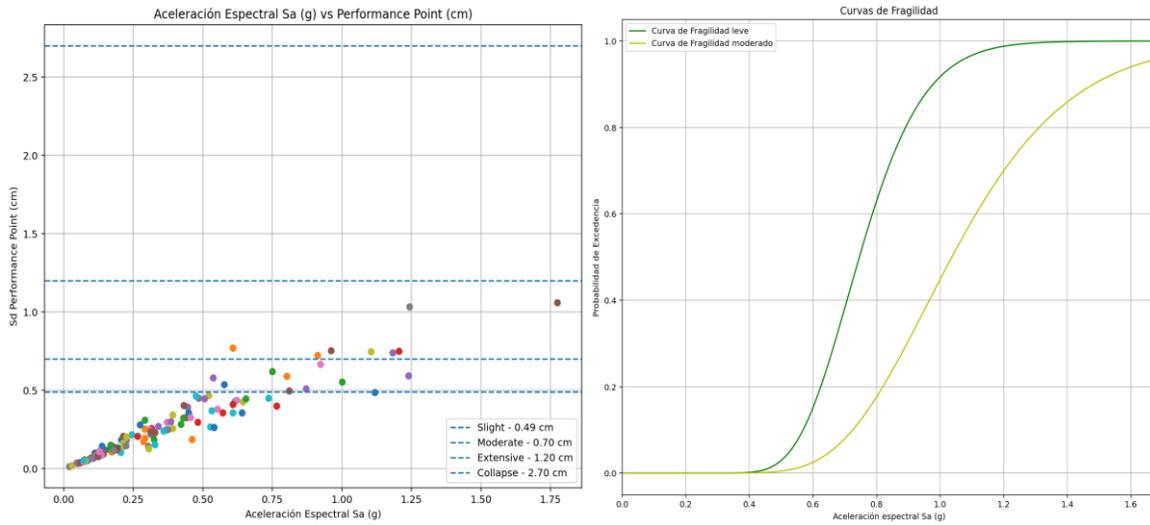


Imagen 87. Caso Mi-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Af-M-2	1.8	0.9232416	3.2	1.1705403	0.7218369	0.1103585	0.9550321	0.1	1.1917049	0.1263304	1.445211	0.1751798

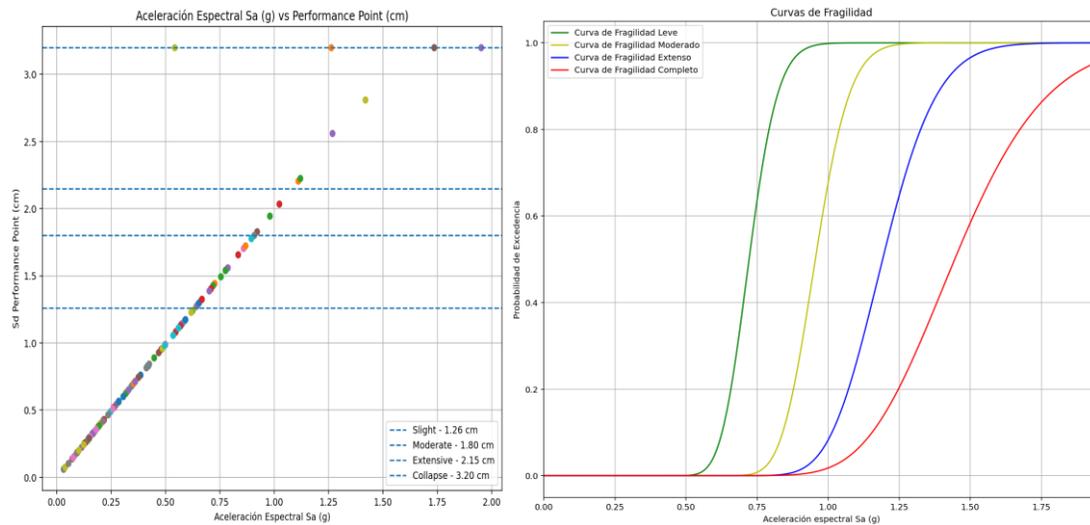


Imagen 88. Caso Af-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-2</b>	0.2	0.390316	4.2	0.3885831	0.2033	0.0962	0.2996	0.1001	1.0025	0.1791	0.8777	0.0343

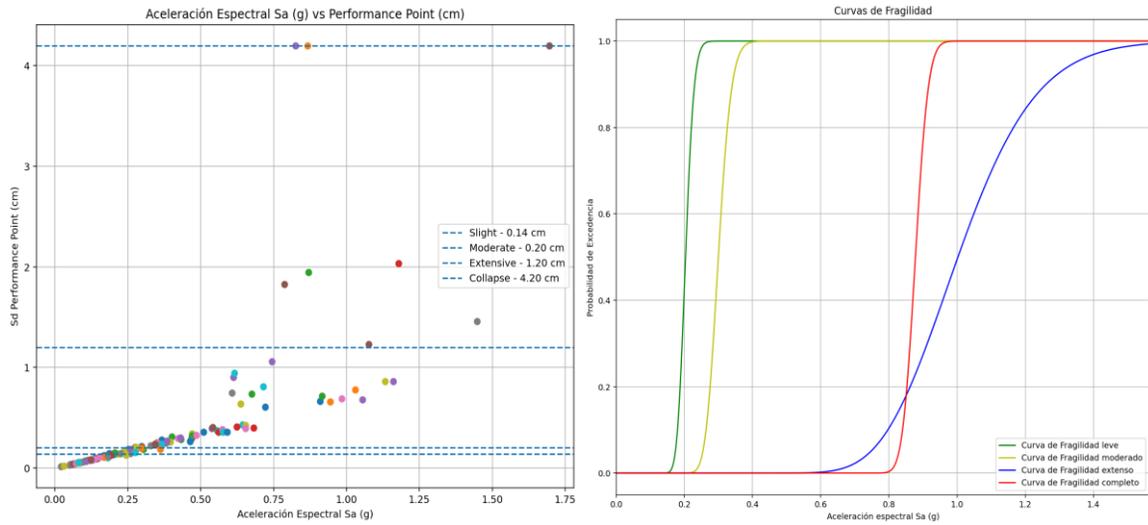


Imagen 89. Caso Cr-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Af-M-3</b>	2.2	0.3668705	4.9	0.4206932	0.2276	0.1164	0.3150	0.0843	0.4306	0.0941	0.6936	0.2767

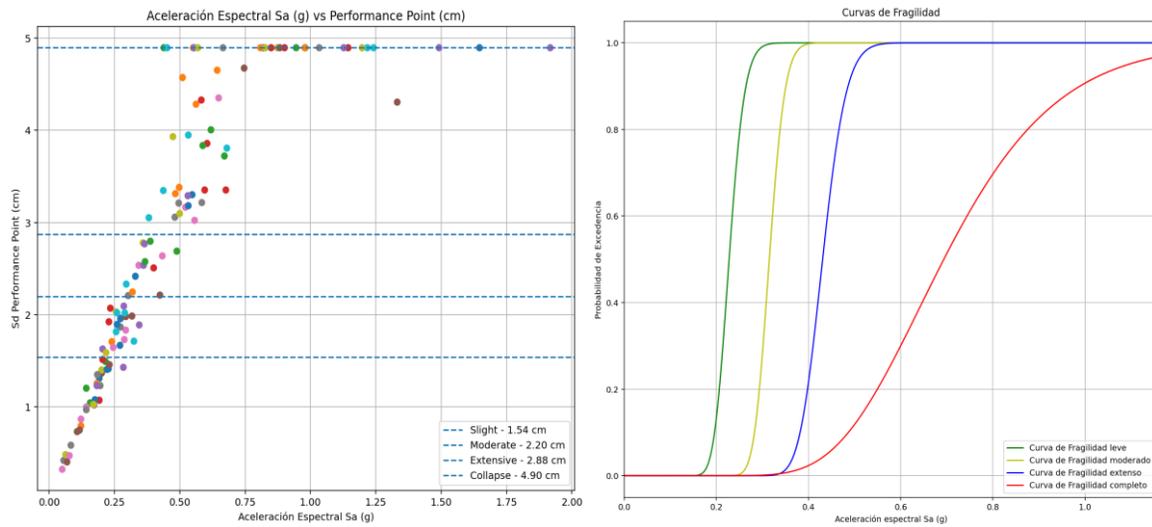


Imagen 90. Caso Af-M-3. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Af-M-3</b>	2.5	0.7509684	5	0.9811417	0.4724	0.1395	0.6675	0.1432	0.8251	0.1380	1.1	0.2674

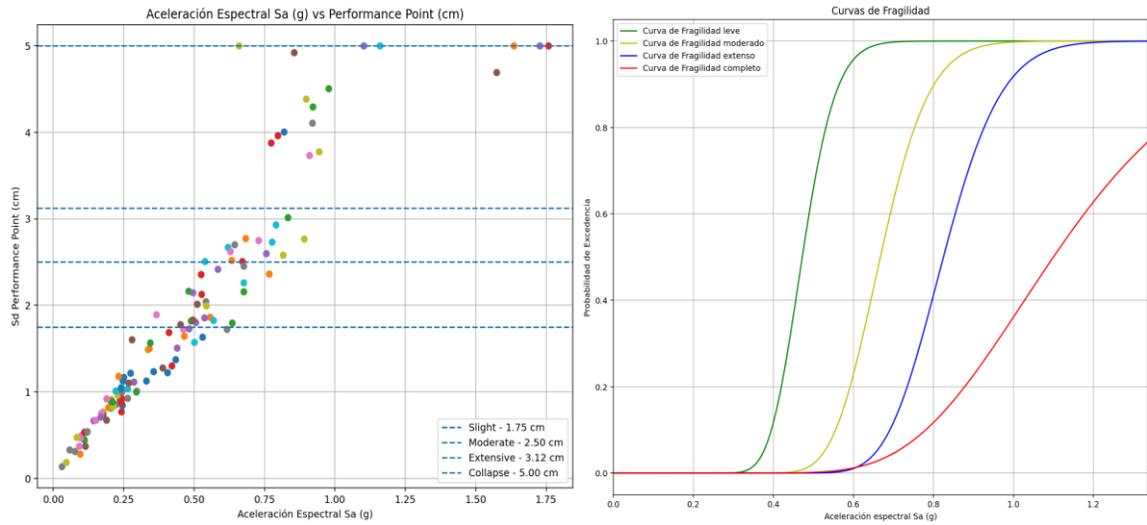


Imagen 91. Caso Af-M-3. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-Mu-6</b>	0.7	2.5093782	5.1	4.6167176	1.3534	0.0717	-	-	-	-	-	-

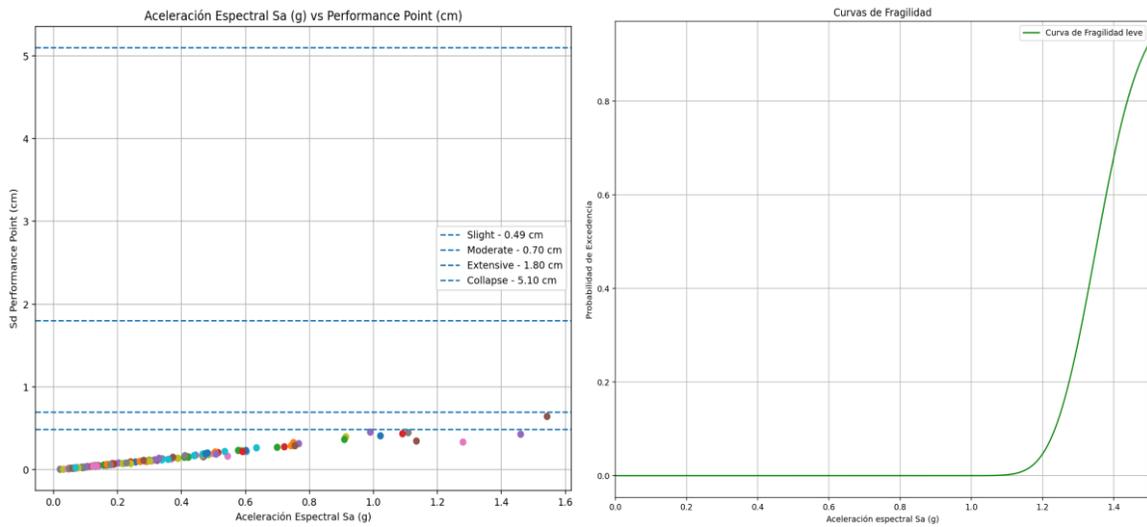


Imagen 92. Caso Cr-Mu-6. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Af-M-2</b>	2.2	0.6103976	5.3	0.6544343	0.3876	0.1016	0.5636	0.0511	0.7968	0.0278	1.31450	0.2200

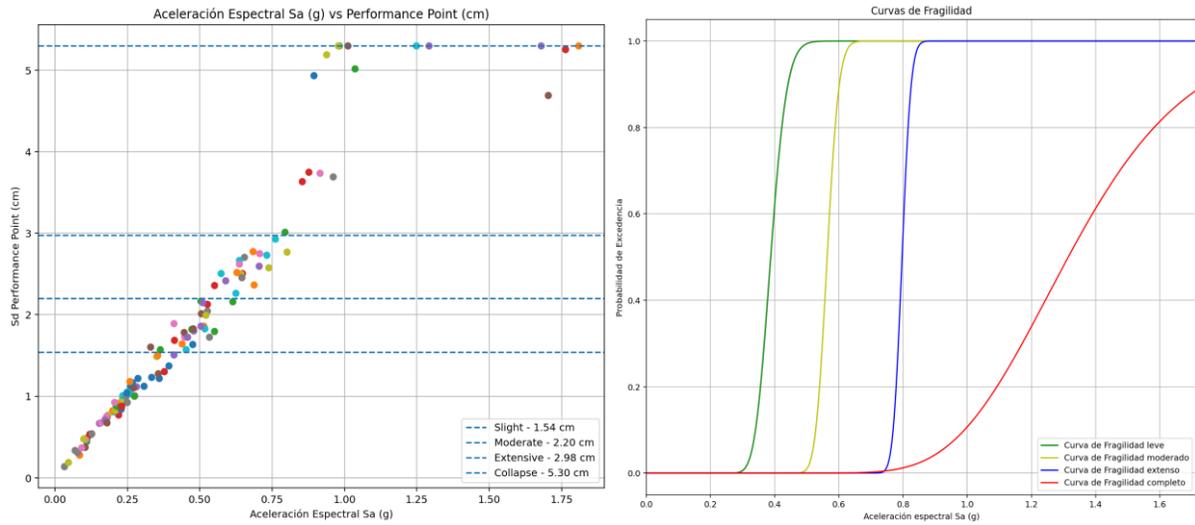


Imagen 93. Caso Af-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-5</b>	0.7	0.1374108	5.4	0.2705403	0.0990	0.0421	0.1245	0.0861	0.3346	0.1473	0.7479	0.4477

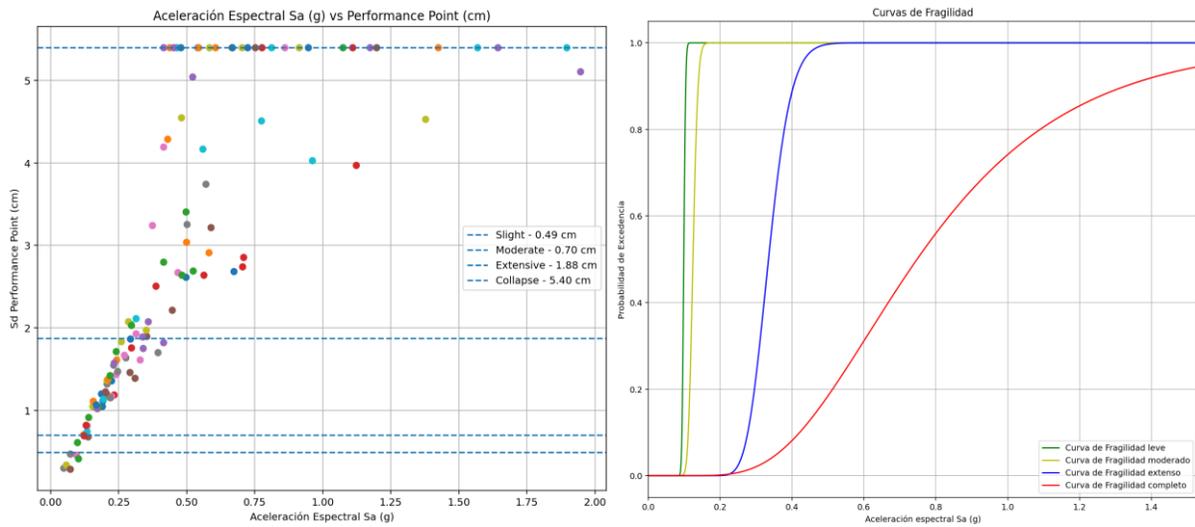


Imagen 94. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Mc-M-2</b>	0.4	0.5918451	5.5	0.5897044	0.2444	0.0849	0.4190	0.2409	1.2081	0.1903	0.9480	0.0370

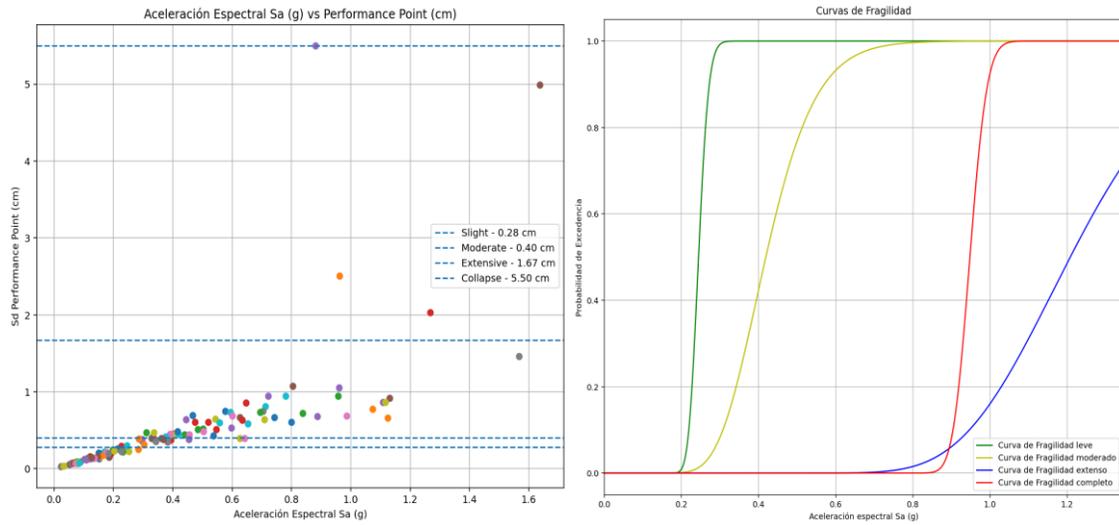


Imagen 95. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Mc-M-2</b>	0.7	0.8211009	5.6	0.8382263	0.4971	0.0276	0.7308	0.0892	1.3271	0.0326	-	-

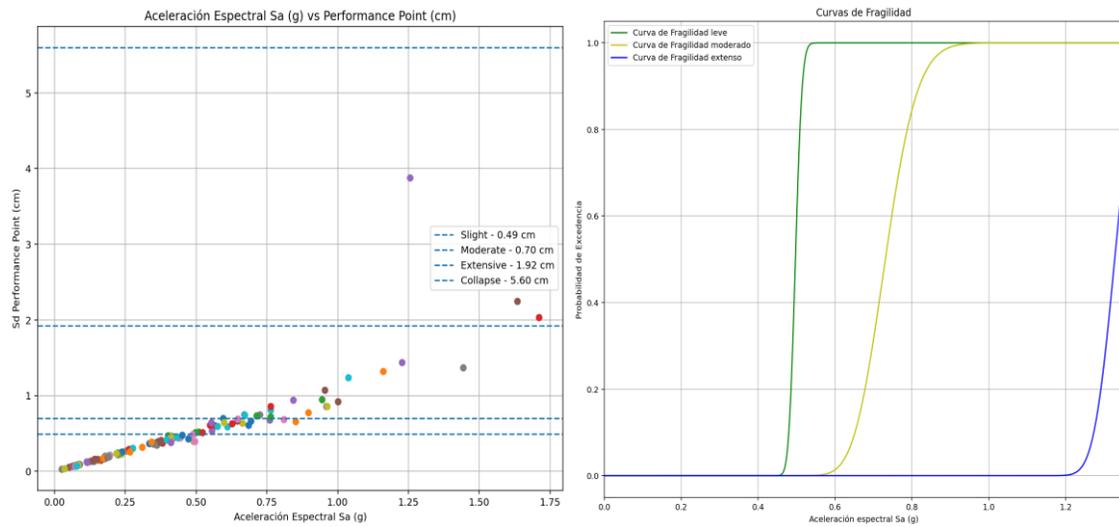


Imagen 96. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Mc-M-2</b>	0.6	0.683792	5.8	0.6781855	0.4262	0.0708	0.5662	0.0496	1.3059	0.0751	-	-

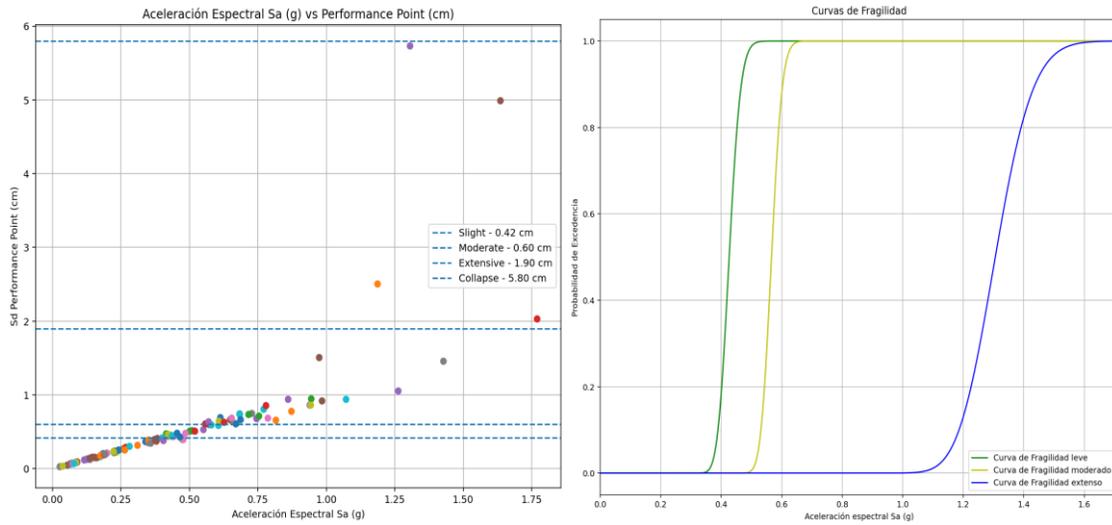


Imagen 97. Caso Mc-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Mi-M-2</b>	1.8	0.9674822	6.7	0.780632	0.6297	0.0295	0.9057	0.0318	1.5156	0.0390	-	-

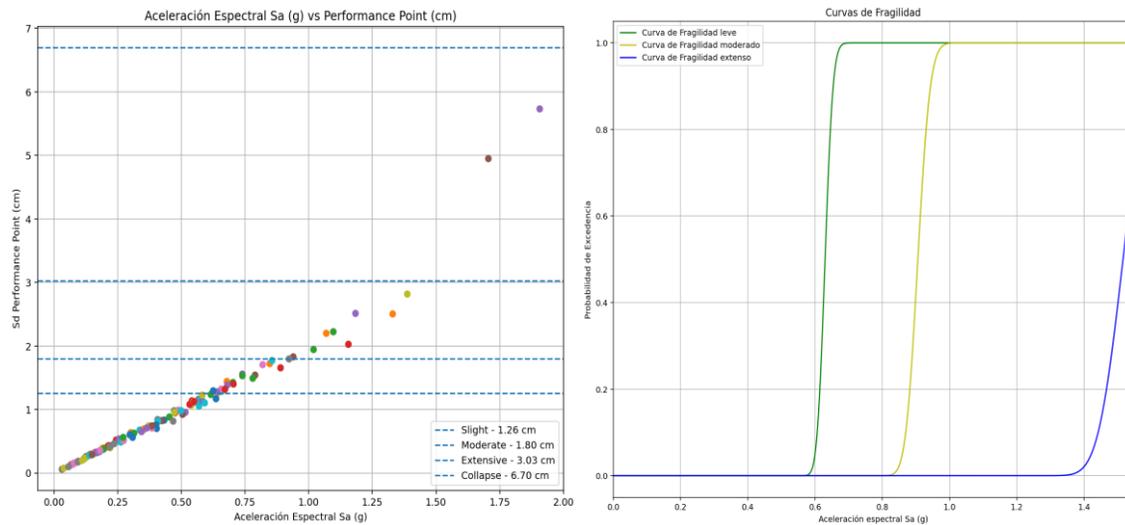


Imagen 98. Caso Mi-M-2. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-4	2.6	0.3716616	8	0.3754332	0.2275	0.0496	0.3243	0.1222	0.5171	0.1512	0.9494	0.2752

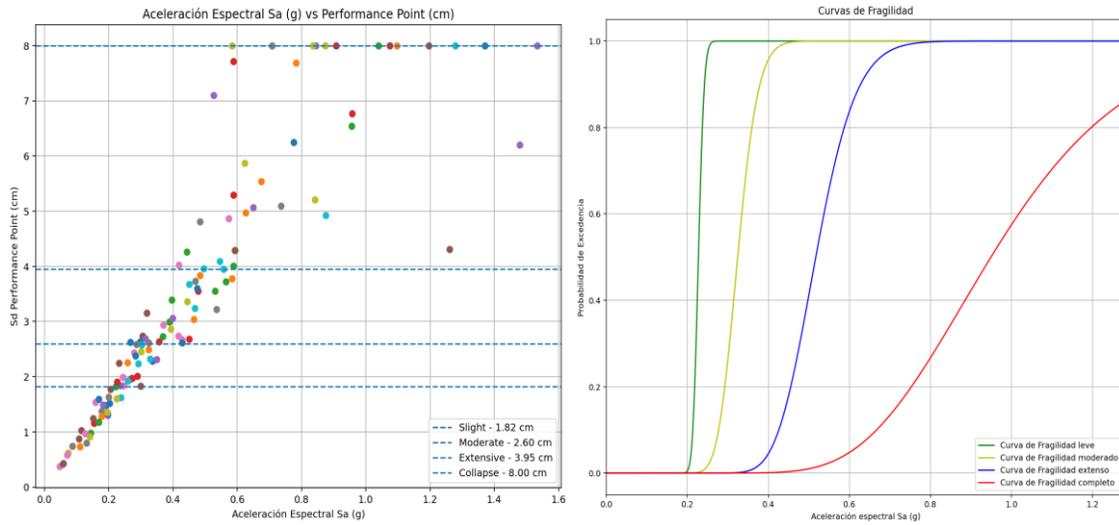


Imagen 99. Caso Cr-D-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-D-5	0.3	0.23496432	8.6	0.2432212	0.14205784	0.03174692	0.20276324	0.0353341	0.74842563	0.47314537	1.17395657	0.43743791

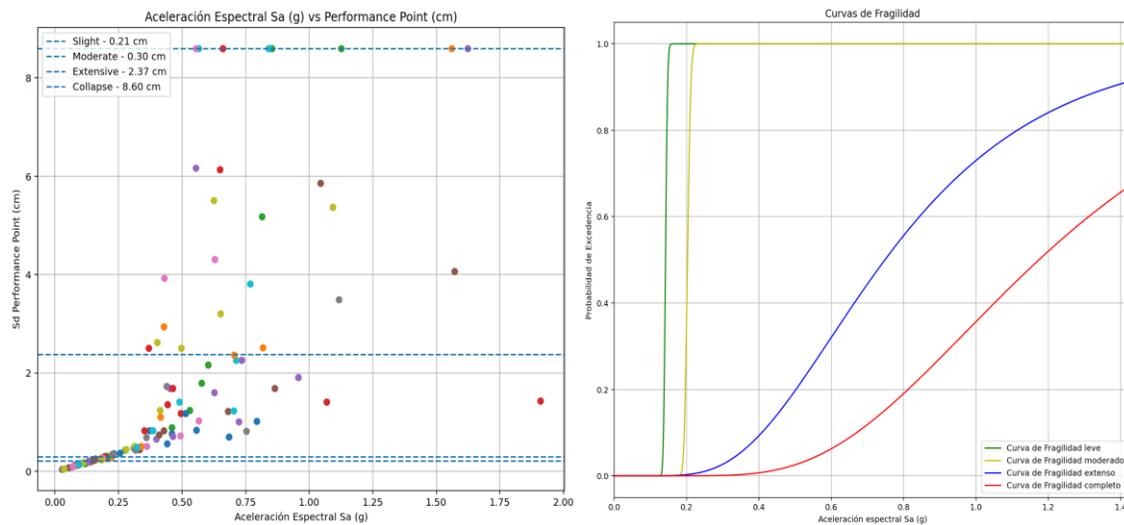


Imagen 100. Caso Cr-D-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-Mu-7</b>	1.1	2.0520897	8.6	2.4783894	1.073	0.0468	-	-	-	-	-	-

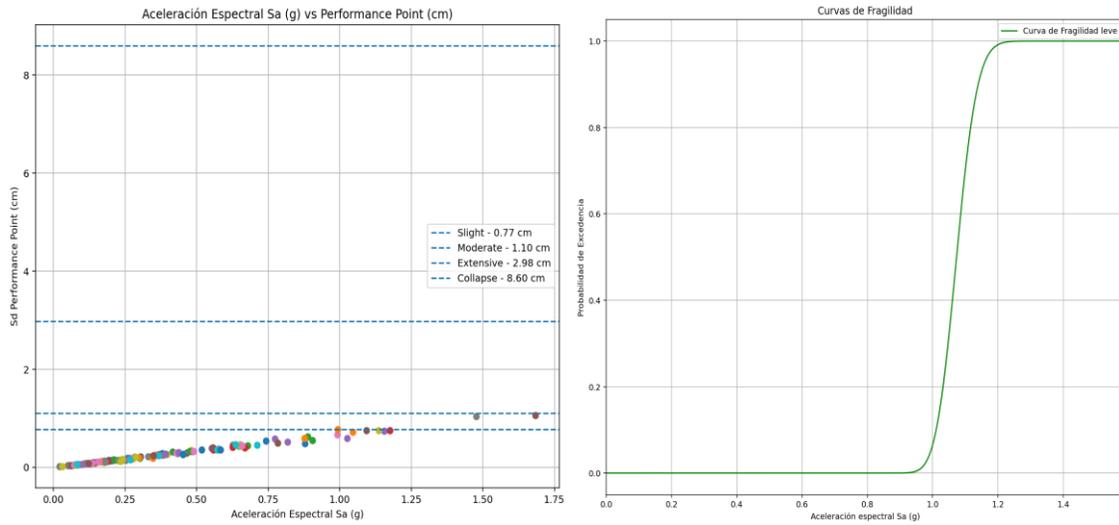


Imagen 101. Caso Cr-Mu-7. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-D-4</b>	3.5	0.2812436	9.7	0.2848114	0.1858	0.0590	0.2816	0.1245	0.3682	0.1519	0.6201	0.2866

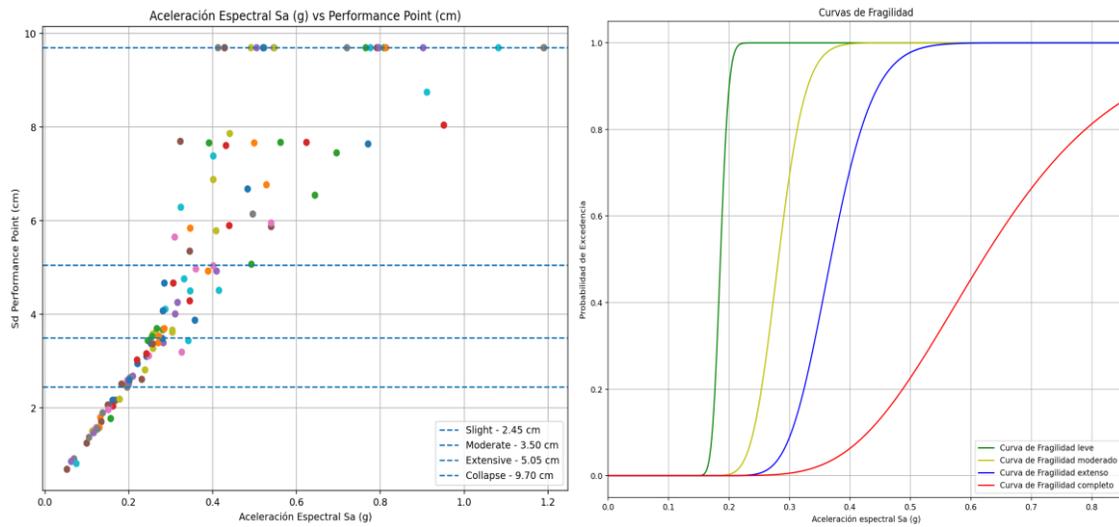


Imagen 102. Caso Cr-D-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-Mu-12</b>	2.7	1.3971458	11.4	2.596738	0.9553	0.0353	1.3433	0.0410	-	-	-	-

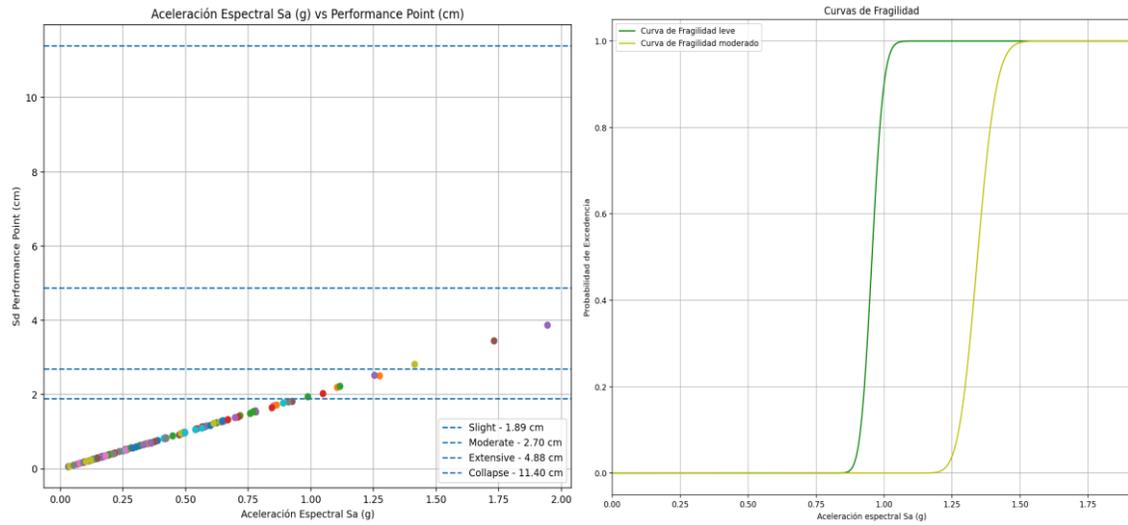


Imagen 103. Caso Cr-Mu-12. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-4</b>	2.6	0.1869521	13.3	0.1895005	0.1215	0.0423	0.1963	0.1011	0.3014	0.2090	0.5887	0.3377

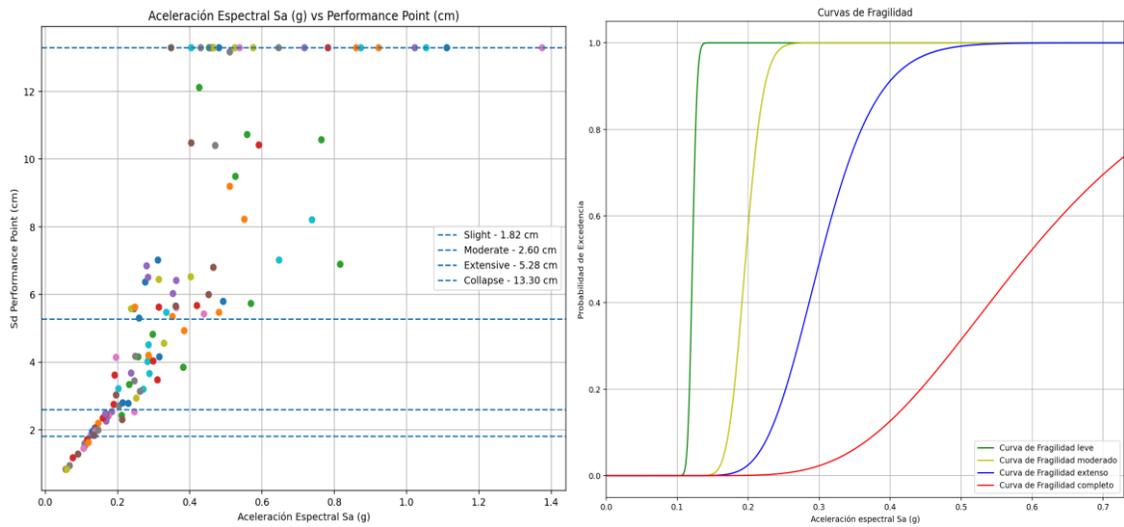


Imagen 104. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-Mu-9</b>	2.6	1.9475025	13.5	2.5056065	1.3609	0.0646	1.7351	0.0326	-	-	-	-

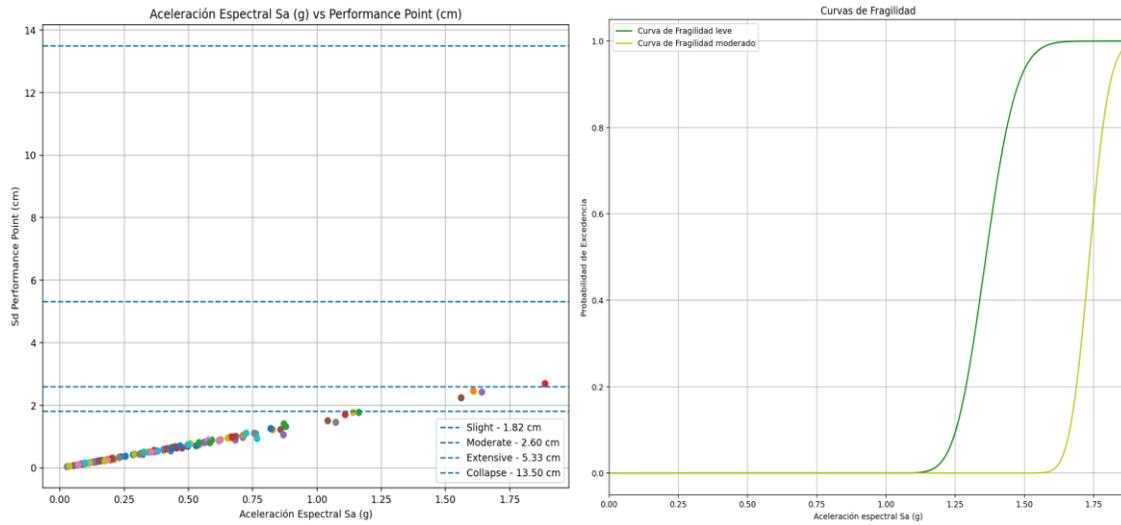


Imagen 105. Caso Cr-Mu-9. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-M-5</b>	2	0.1361876	13.8	0.1937819	0.0845	0.1333	0.1176	0.0714	0.3031	0.1924	0.6404	0.4876

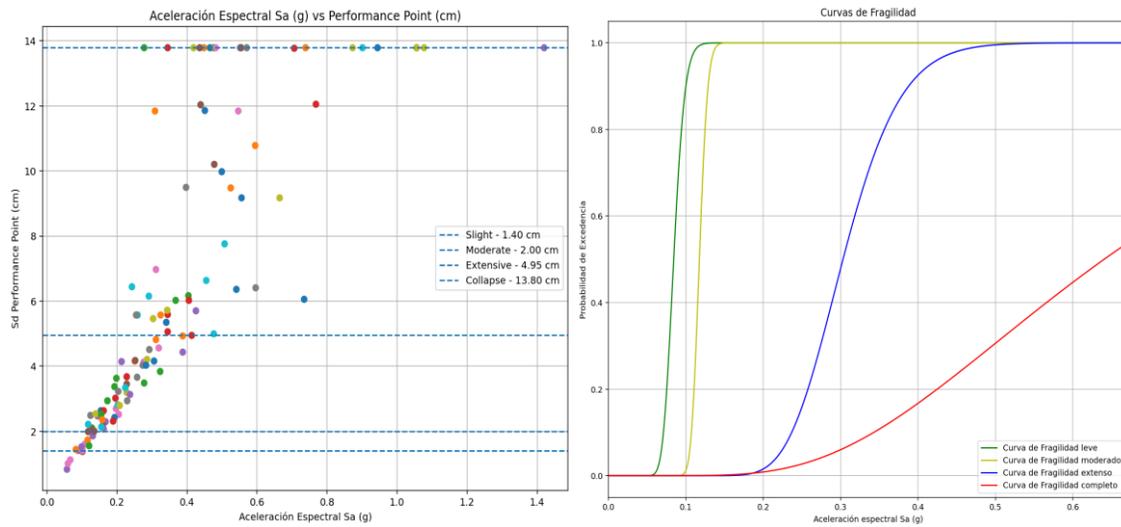


Imagen 106. Caso Cr-M-5. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-Mu-8</b>	2.6	2.0929664	14.2	3.6727829	1.3374	0.0643	1.7364	0.0360	-	-	-	-

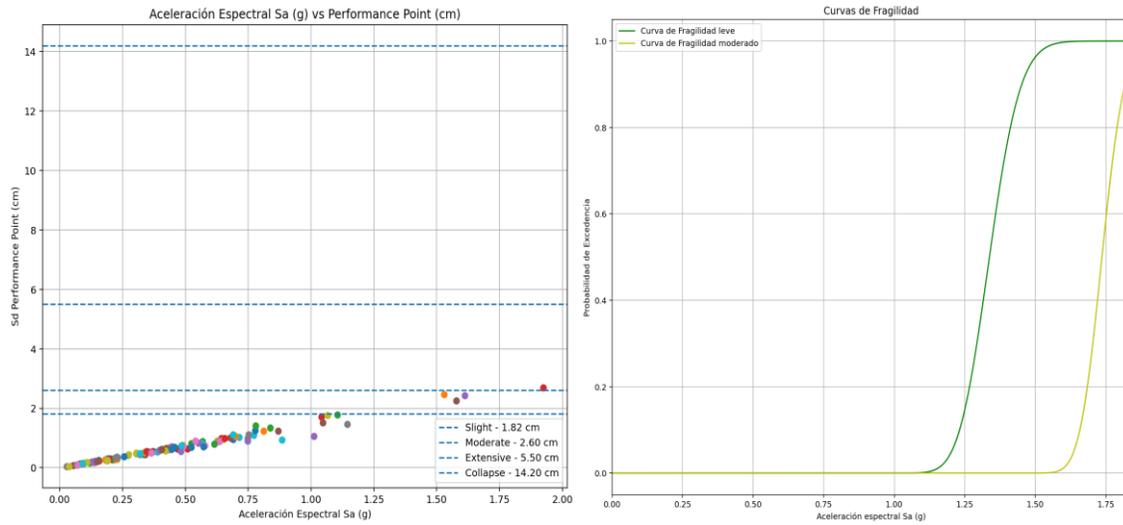


Imagen 107. Caso Cr-Mu-8. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
<b>Cr-D-10</b>	3.9	0.2104995	16.7	0.2703364	0.1427	0.0854	0.2093	0.0287	0.4003	0.0825	0.5975	0.1856

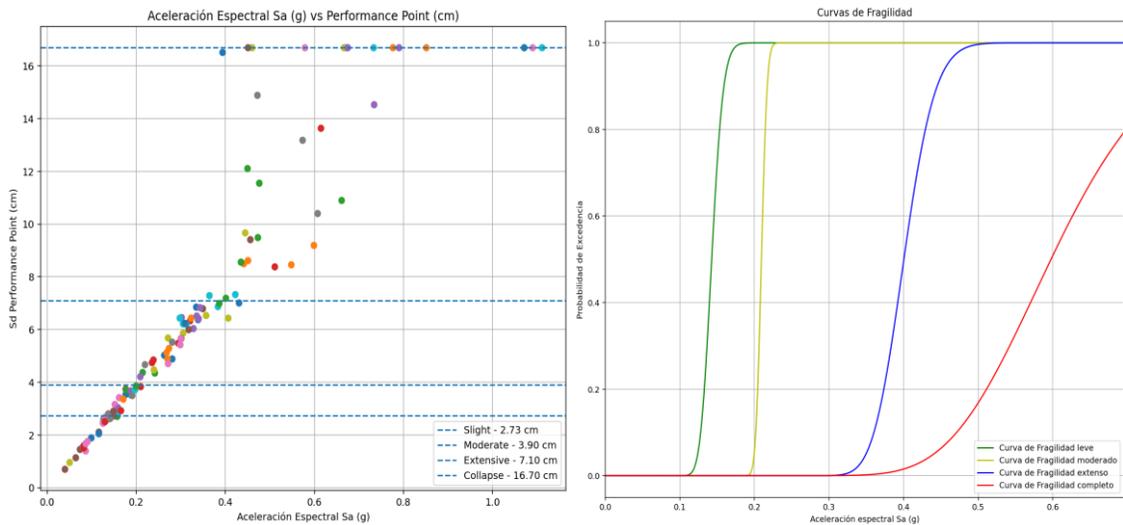


Imagen 108. Caso Cr-D-10. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-Mu-18	5.3	0.6555556	16.8	0.8857288	0.4194	0.0648	0.6462	0.1660	0.9374	0.0348	-	-

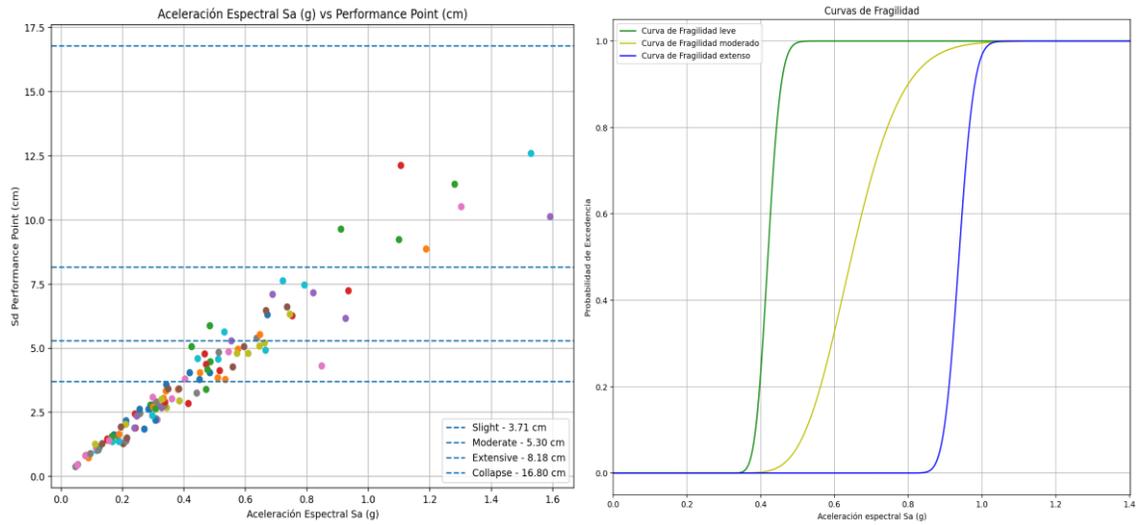


Imagen 109. Caso Cr-Mu-18. (Fuente: Elaboración Propia)

NOMENCLATURA	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	$\theta$ leve	$\beta$ leve	$\theta$ mod	$\beta$ mod	$\theta$ extens	$\beta$ extens	$\theta$ comp	$\beta$ comp
Cr-M-4	5	0.1015291	18.5	0.1082569	0.0674	0.1333	0.1008	0.1330	0.1703	0.2303	0.2679	0.2474




Imagen 110. Caso Cr-M-4. (Fuente: Elaboración Propia)

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Robalino González, Richard Sebastián** C.C: # **0950192088**, **Zapata López, Juan Carlos**, con C.C: # **0950471938**, **0950192088** autores del trabajo de titulación: **Cálculo de curvas de fragilidad de múltiples tipologías estructurales implementando algoritmos lógicos desarrollados en Python**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

**Guayaquil, 24 de febrero de 2025**

f.   
\_\_\_\_\_

**Robalino González, Richard Sebastián**

**C.C: 0950192088**

f.   
\_\_\_\_\_

**Zapata López, Juan Carlos**

**C.C: 0950471938**

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA:</b>	Cálculo de curvas de fragilidad de múltiples tipologías estructurales implementando algoritmos lógicos desarrollados en Python.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Robalino González, Richard Sebastián Zapata López, Juan Carlos		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, M.Sc.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	24 de febrero de 2025	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	135
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Análisis sismorresistente, Análisis estructural, Ingeniería Forense		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Curvas de fragilidad, curvas bilineales, evaluación sísmica, punto de desempeño, estados de daño, espectro de capacidad, tipologías estructurales, probabilidad.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>Principalmente en este estudio del trabajo de titulación se modificó el código previo desarrollado en Python del trabajo de titulación de Molina &amp; Ajila (2024). En nuestro caso usamos la metodología propuesta por el FEMA 440, que se basa en el “Método del Espectro de Capacidad”, que nos permite conseguir los puntos de desempeño de dicha estructura o sistema estructural que se quiera analizar y así determinar la curva de fragilidad según su espectro de aceleración. En la realización de nuestro estudio modificamos ciertos parámetros en el código. Primero partimos desde una curva de aproximación bilineal, por lo que ya no es necesario transformar la curva Pushover. Al escoger curva bilineal este interpola los puntos entre sus coordenadas para su desarrollo en el método del espectro de capacidad. Adicional generamos curvas de fragilidad para sesenta y nueve tipologías estructurales. El método que nos propone el FEMA 440 nos mostró una mayor dispersión de datos, que resulta en una caracterización que se asemeja más a la realidad con una incertidumbre y una representación estadística más ajustada para cada caso de análisis y a la variabilidad de registros sísmicos. Alinearnos al programa Python para el desarrollo de estas curvas de fragilidad, es fundamental y una herramienta útil para la evaluación sísmica, además de clasificar la demanda sísmica en función de una curva de capacidad específica según la tipología estructural correspondiente, por lo que el código de nuestro estudio puede ser modificados, corregidos incluso mejorado según las necesidades del usuario.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-984250960 +593-995747843	E-mail: <a href="mailto:juan.zapata@cu.ucsg.edu.ec">juan.zapata@cu.ucsg.edu.ec</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO DE TITULACIÓN):</b>	<b>Nombre:</b> Glas Cevallos, Clara Catalina <b>Teléfono:</b> +593-4-984616792 E-mail: <a href="mailto:clara.glas@cu.ucsg.edu.ec">clara.glas@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			