

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“MEDIDAS DE INTENSIDAD SÍSMICA PARA REDUCIR LA VARIABILIDAD DE LA
RESPUESTA ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES USANDO ANÁLISIS DINÁMICO
INCREMENTAL BIDIRECCIONAL”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

Nicole Stefanie Quispe Cosquillo

ID: 0009-0003-6851-2635

ASESOR

PhD. Edison Alberto Moscoso Alcantara

ID: 0000-0002-5885-5066

LIMA - PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

QUISPE COSQUILLO, Nicole Stefanie
nicole.quispe.c@uni.pe
932 406 001

Dedicatoria

A mis padres Carmen y Nino

Por ser mi apoyo incondicional en cada paso de mi formación

A mi familia

Por siempre celebrar mis logros y metas cumplidas

A mi asesor PhD. Edison Moscoso

Por su guía, paciencia y conocimientos compartidos

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por acompañarme y guiarme en cada paso que doy para avanzar en el cumplimiento de mis metas y objetivos.

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería por abrirme las puertas de su casa de estudios y brindarme la formación necesaria para mi crecimiento académico y profesional.

A mi madre, Carmen Cosquillo y a mi padre, Nino Quispe, les agradezco por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Valoro mucho su constante esfuerzo para darme siempre lo mejor. Además, su confianza, cariño y consejos han sido fundamentales para mi formación personal y profesional.

Agradezco también a mi familia por celebrar con entusiasmo cada uno de mis logros y por siempre estar presentes para mí.

A Luis, por ser la mejor compañía durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por siempre escucharme, brindarme tu apoyo y siempre alentarme a ser mejor cada día.

Agradezco a mi asesor, PhD. Edison Alberto Moscoso Alcantara, por todo su apoyo brindado, su disposición de tiempo, la paciencia para absolver mis consultas y especialmente, por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de investigación. Gracias por sus palabras de aliento y consejos, fueron muy importantes para mantenerme motivada y enfocada en cada etapa del proceso.

Finalmente, quisiera agradecer al Instituto de Investigación de la FIC por brindar el financiamiento económico para llevar a cabo este proyecto, así como al CISMID por el soporte técnico proporcionado a través del doctor Moscoso y por facilitar información relevante para el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todas estas personas que, de una forma u otra, contribuyeron a la realización de este proyecto.

Resumen

Los análisis sísmicos mayormente consideran de forma independiente los efectos a lo largo de los ejes ortogonales de las edificaciones, sin tomar en cuenta la orientación real de la demanda sísmica. No obstante, estudios muestran que la simultaneidad y el ángulo de incidencia del sismo afectan significativamente la respuesta estructural. Por otro lado, la vulnerabilidad estructural suele evaluarse mediante funciones de fragilidad obtenidas del análisis dinámico incremental (IDA), en la cual se relaciona una medida de demanda (DM) con una medida de intensidad (IM). Dado ello, la selección de la IM influye en la variabilidad de los resultados.

Esta investigación desarrolla curvas IDA que incorporan en su análisis, el efecto de la simultaneidad y el ángulo de incidencia sísmico. El IDA se aplicó a 15 modelos estructurales híbridos, con diferentes sistemas estructurales en cada dirección, permitiendo captar los efectos de torsión y rigidez. Se seleccionaron 52 registros sísmicos de una base de datos empleando el espectro RotD50, considerando las distintas orientaciones del sismo. Se evaluaron 27 IM con el fin de determinar la que minimice la variabilidad estructural en mayor magnitud.

Se determinó la variabilidad estructural promedio para cada IM considerando los distintos estados de daño: operatividad, ocupación inmediata, seguridad de vida, prevención de colapso y colapso. Los resultados indican que, para los estados de daño dentro del rango elástico, la IM con mejor desempeño es la aceleración espectro ($S_a(T_1, 5\%)$), mientras que, para el comportamiento no lineal, la ley de potencia CR (IM_{CR}) es la más efectiva.

Palabras clave – Bidireccionalidad, ángulo de incidencia, análisis dinámico incremental, variabilidad, medidas de intensidad

Abstract

Seismic analyses usually consider the effects along the orthogonal axes of buildings as independent, without considering the actual orientation of the seismic demand. However, studies show that the simultaneity and the angle of incidence of the earthquake significantly affect the structural response. On the other hand, structural vulnerability is usually evaluated using fragility functions obtained from Incremental Dynamic Analysis (IDA), in which a demand measure (DM) is related to an intensity measure (IM). Therefore, the selection of the IM influences the variability of the results.

This research develops IDA curves that incorporate in their analysis the effect of simultaneity and seismic angle of incidence. The IDA was applied to 15 hybrid structural models, with different structural systems in each direction, allowing to incorporate the effects of torsion and stiffness. Fifty-two seismic records were selected from a database using the RotD50 spectrum, considering the different earthquake orientations. Twenty-seven MI were evaluated to determine the one that minimizes the structural variability in greater magnitude.

The average structural variability was determined for each MI considering the different damage states: operability, immediate occupancy, life safety, collapse prevention and collapse. The results indicate that, for damage states within the elastic range, the IM with the best performance is the acceleration spectrum ($S_a(T_1, 5\%)$), while, for nonlinear behavior, the CR power law (IM_{CR}) is the most effective.

Keywords – Bidirectionality, angle of incidence, Incremental Dynamic Analysis, variability, intensity measures

Tabla de contenido

	Página
Resumen	iv
Abstract.....	v
Prólogo	xvi
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos del estudio	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Antecedentes investigativos.....	3
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	7
2.1 Registro de aceleraciones.....	7
2.2 Espectro de respuesta	8
2.3 Espectro RotD50	9
2.4 Bidireccionalidad	10
2.5 Ángulo de incidencia	11
2.6 Análisis dinámico incremental (IDA).....	12
2.6.1 Definición	12
2.6.2 Factor de escala (FE).....	13
2.6.3 Medidas de intensidad (IM).....	14
2.6.4 Medida de daño (DM)	21
2.7 Edificaciones híbridas	22
2.8 Duración significativa	24
2.9 Medidas de dispersión	24
2.10 Coeficiente de correlación de Pearson (r)	25

2.10	Coeficiente de correlación de Pearson (r)	25
2.11	Coeficiente de determinación (R^2)	25
2.12	Error cuadrático medio (MSE)	26
Capítulo III. Selección de registros sísmicos		27
3.1	Generalidades	27
3.2	Fuentes de información	27
3.2.1	Center for Engineering Strong Motion Data	27
3.2.2	Centro Sismológico de la UCH	28
3.2.3	CEOIS	28
3.2.4	Instituto Geofísico del Perú	29
3.3	Reducción del número de datos del registro	31
3.4	Cálculo del espectro RotD50.....	35
3.5	Metodología para la selección de registros bidireccionales	36
3.6	Selección de los registros sísmicos.....	38
Capítulo IV. Selección de edificios representativos.....		46
4.1	Generalidades	46
4.2	Características de los elementos	46
4.3	Consideraciones para el modelo estructural	47
4.3.1	Vigas	47
4.3.2	Columnas	49
4.3.3	Muros de albañilería.....	51
4.4	Programa computacional empleado.....	52
4.5	Calibración de curva envolvente de histéresis de los muros de albañilería	52
4.5.1	Resistencia al corte por la compresión diagonal del panel de albañilería	53
4.5.2	Resistencia al corte por deslizamiento del panel de albañilería	54
4.5.3	Resistencia al corte del panel de albañilería.....	55
4.5.4	Modelo de histéresis	56
4.5.5	Calibración de la curva envolvente de histéresis	57
4.6	Configuración estructural	64

Capítulo V. Variabilidad de la respuesta estructural	69
5.1 Generalidades	69
5.2 Factores que influyen en la variabilidad de la respuesta estructural sísmica.....	69
5.3 Variabilidad de la respuesta estructural sísmica por el uso de IM	70
5.4 Análisis dinámico incremental bidireccional	71
5.5 Generación de curvas IDA	74
5.6 Variabilidad de la respuesta estructural sísmica	74
5.7 Selección de la IM óptima	77
5.8 Resultados obtenidos	78
5.8.1. Operatividad	78
5.8.2. Ocupación inmediata	79
5.8.3. Seguridad de vida	80
5.8.4. Prevención de colapso.....	81
5.8.5. Colapso	82
5.8.6. Resultado general	83
5.8.7. Comparación entre la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR}	84
5.9 Tiempo computacional	85
Conclusiones	87
Recomendaciones	89
Referencias bibliográficas.....	90
Anexos.....	96

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. Medidas de intensidad.....	15
Tabla 2. Medidas de dispersión conocidas.....	25
Tabla 3. Número de registros sísmicos disponibles según el número de muestras.....	38
Tabla 4. Resumen de las características de los registros sísmicos seleccionados	41
Tabla 5. Características de los elementos de concreto armado.....	46
Tabla 6. Propiedades de los muros de albañilería considerados en los modelos	47
Tabla 7. Diferencias entre los modos de falla de los infill walls y de los muros de albañilería confinada.....	52
Tabla 8. Características de los prismas de albañilería ensayados.....	57
Tabla 9. Promedio y desviación estándar de los prismas de albañilería ensayados	57
Tabla 10. Variables para determinar la función lineal a proponer	59
Tabla 11. $f'm$ obtenidos para cada espécimen.....	60
Tabla 12. Medidas de comparación para las fórmulas del $f'm$	61
Tabla 13. Factores por considerar para la densidad de muros	66
Tabla 14. Análisis de la densidad de muros para la distribución sin excentricidad	66
Tabla 15. Análisis de la densidad de muros para la distribución con excentricidad.....	67
Tabla 16. Características de las edificaciones híbridas propuestas.....	68
Tabla 17. Límites para los estados de daño para un muro de albañilería confinada con ladrillos artesanales	76
Tabla 18. Resultados obtenidos para el modelo MD1_1N ($\times 10^{-4}$).....	77
Tabla 19. Resultados obtenidos para el estado de daño de Operatividad	78
Tabla 20. Resultados obtenidos para el estado de daño de Ocupación inmediata.....	79
Tabla 21. Resultados obtenidos para el estado de daño de Seguridad de vida	80
Tabla 22. Resultados obtenidos para el estado de daño de Prevención de colapso	81
Tabla 23. Resultados obtenidos para el estado de daño de Colapso	82
Tabla 24. Tiempo computacional del IDA bidireccional.....	86
Tabla 25. Tiempo computacional de la obtención del RotD50	86

Lista de figuras

	Página
Figura 1. Registro de aceleraciones del terremoto del 31 de mayo de 1970, estación Parque de la Reserva	7
Figura 2. Espectros de respuesta de aceleración	8
Figura 3. Espectros de respuesta de velocidad.....	8
Figura 4. Espectros de respuesta de desplazamiento.....	9
Figura 5. Espectro de respuesta RotD50 comparado a los espectros de respuesta de las componentes EW y NS	10
Figura 6. Comparación entre Análisis Unidireccional y Análisis Bidireccional	11
Figura 7. (a) Movimientos del terreno registrados en una estación acelerográfica; (b) Eje de referencia típico de una estructura con respecto al movimiento del suelo registrado en la estación.....	12
Figura 8. Curvas IDA	13
Figura 9. Arquetipo de albañilería en Perú	22
Figura 10. Arquitectura típica de viviendas de albañilería en Perú	23
Figura 11. Idealización para análisis sísmico de viviendas de albañilería en Perú	24
Figura 12. Página principal del Strong Motion Center	27
Figura 13. Página principal del Centro Sismológico Nacional de la UCH	28
Figura 14. Página web de CEOIS.....	29
Figura 15. (a) Distribución de acelerómetros del IGP, (b) Distribución de acelerómetros de SENCICO y (c) Distribución de acelerómetros del CN CIP	30
Figura 16. Variación en el tiempo de la intensidad de Arias Normalizada	31
Figura 17. Recorte de datos del registro sísmico	32
Figura 18. Rangos de duración significativa para ambas direcciones del sismo	32
Figura 19. Esquema para el recorte de datos en un análisis bidireccional	33
Figura 20. Variación en el tiempo de la intensidad de Arias Normalizada	34
Figura 21. Modificación del proceso de recorte de para un análisis bidireccional.....	34
Figura 22. Esquema para la obtención del RotD50 para un periodo dado.....	36
Figura 23. Variación del MSE de los registros sísmicos.....	37
Figura 24. Variación del MSE de los registros sísmicos.....	38
Figura 25. Escalamiento de los registros sísmicos seleccionados al espectro de la norma E.030 de Diseño Sismorresistente	39
Figura 26. Metodología propuesta para la selección de registros sísmicos	40
Figura 27. Modelo para las vigas-resortes de flexión y corte no lineales	47
Figura 28. Relación momento-rotación del resorte al doblarse	48

Figura 29. Modelo de histéresis degradante de deslizamiento trilinear.....	48
Figura 30. Modelo de histéresis polilineal orientado al origen.....	49
Figura 31. Relación momento-rotación del resorte al doblarse.....	49
Figura 32. Modelo para las vigas-resortes de flexión y corte no lineales.....	50
Figura 33. Relación momento-rotación del resorte al doblarse.....	50
Figura 34. Modelos de histéresis bilineales para el acero y concreto.....	51
Figura 35. Modelo de histéresis polilineal.....	51
Figura 36. Modelo de histéresis polilineal.....	51
Figura 37. Esquema de un prisma de albañilería para determinar la resistencia a la compresión.....	53
Figura 38. Esquema de un prisma de albañilería para determinar la resistencia al corte deslizante.....	54
Figura 39. Curva de capacidad del muro de albañilería en el Stera 3D.....	56
Figura 40. Correlación entre los $f'm$ calculados con respecto al $f'm$ experimental.....	61
Figura 41. Modificación del factor de rigidez del programa.....	62
Figura 42. Modificación del factor de resistencia del programa.....	62
Figura 43. Modelo de histéresis tetralineal para muros de albañilería confinada.....	63
Figura 44. Calibración de curva de histéresis del programa.....	63
Figura 45. Configuraciones estructurales propuestas.....	65
Figura 46. Notación propuesta para los modelos estructurales propuestos.....	67
Figura 47. Curvas IDA de diferente IMs.....	70
Figura 48. Esquema de la metodología para el análisis estructural bidireccional.....	71
Figura 49. Metodología para el análisis dinámico incremental bidireccional.....	73
Figura 50. Curvas IDA para la edificación MD1_1N.....	74
Figura 51. Determinación de la curva media para las curvas IDA.....	75
Figura 52. Variación del CV a medida que aumenta la distorsión.....	76
Figura 53. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Operatividad.....	79
Figura 54. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Ocupación inmediata.....	80
Figura 55. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Seguridad de vida.....	81
Figura 56. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Prevención de colapso.....	82
Figura 57. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Colapso.....	83

Figura 58. Evaluación de IM señaladas por estado de daño.....	83
Figura 59. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} en la dirección X.....	84
Figura 60. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} en la dirección Y.....	84
Figura 61. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR}	85

Lista de símbolos y siglas

Símbolos

A_{95}	: Sarma y Yang IM
A_p	: Área de planta típica
CV	: Coeficiente de variación
$H(t)$	: Aceleración cuadrática acumulada normalizada
I_a	: Riddell y Garcia Aceleración IM
I_c	: Intensidad característica
I_d	: Riddell y Garcia Desplazamiento IM
I_F	: Fajfar et al. IM
IM_{CR}	: Ley de potencia CR
IM_{SR}	: Ley de potencia SR
$IM S_{a,GM}$	: IM propuesta por Rong et al. (2022)
I_{NP}	: Bojórquez and Iervolino IM
I_v	: Riddell y Garcia Velocidad IM
I_z	: Cosenza y Manfredi IM
f'_c	: Resistencia a la compresión del concreto
f'_{cb}	: Esfuerzo a la compresión axial del ladrillo
f'_{cm}	: Resistencia característica a compresión axial del mortero
f'_j	: Esfuerzo a la compresión del mortero
f'_{tb}	: Esfuerzo a la tracción del ladrillo
f'_m	: Esfuerzo a la compresión del prisma de albañilería
f_y	: Esfuerzo de fluencia del acero
h_b	: Altura de la unidad de albañilería
S	: Factor sísmico del suelo
$S_a(T_1, 5\%)$	: Aceleración espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento
S_{avg}	: Aceleración espectral promedio
$S_d(T_1, 5\%)$	: Desplazamiento espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento
SI_H	: Intensidad del espectro Housner
$S_v(T_1, 5\%)$	: Velocidad espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento
S_x	: Desviación estándar

$t_{ladrillo}$	: Espesor de la unidad de albañilería
$t_{mortero}$	: Espesor de la junta de mortero
τ_f	: Esfuerzo cortante máximo del prisma de albañilería
TPH	: IM de peligro de dos parámetros
μ	: Media estadística
V_{sq}	: Velocidad al cuadrado
V_{rs}	: Raíz cuadrada de la velocidad
r	: Coeficiente de correlación de Pearson
R^2	: Coeficiente de determinación
$t_{5\%}$	: Tiempo en el que se logra el 5% de la aceleración cuadrática normalizada
$t_{95\%}$	: Tiempo en el que se logra el 5% de la aceleración cuadrática normalizada
$t_{5\%-95\%}$	: Rango de tiempo de duración significativa
U	: Factor sísmico de uso
Z	: Factor sísmico de zona

Siglas

AI	: Intensidad de Arias (<i>Arias Intensity</i>)
CAV	: Velocidad absoluta acumulada (<i>Cumulative Absolute Velocity</i>)
CEOIS	: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica
CISMID	: Centro peruano japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
CIP	: Colegio de ingenieros del Perú
DM	: Medida de daño (<i>Damage Measure</i>)
EPA	: Aceleración máxima efectiva (<i>Effective Peak Acceleration</i>)
EPI	: Índice de potencia sísmica (<i>Earthquake Power Index</i>)
FC	: Curvas de fragilidad
FEMA	: Agencia Federal para la Administración de Emergencias (<i>Federal Management Agency</i>)
IDA	: Análisis dinámico incremental (<i>Incremental Dynamic Analysis</i>)
IGP	: Instituto Geofísico del Perú
IM	: Medida de intensidad (<i>Intensity Measure</i>)
MIDA	: Análisis dinámico incremental multicomponente (<i>Multicomponent Incremental Dynamic Analysis</i>)
MSE	: Error cuadrático medio (<i>Mean square error</i>)
PGA	: Pico de aceleración del suelo (<i>Peak Ground Acceleration</i>)

<i>PGD</i>	: Pico de desplazamiento del suelo (<i>Peak Ground Displacement</i>)
<i>PGV</i>	: Pico de velocidad del suelo (<i>Peak Ground Velocity</i>)
REDACIS	: Red Nacional de acelerógrafos del CISMID
REMCOT	: Red GPS para el monitoreo del movimiento de la corteza terrestre
REMOED	: Red de acelerómetros para el monitoreo de la respuesta sísmica de edificaciones y evaluación de su salud estructural
<i>RMS</i>	: Aceleración cuadrática media (<i>Root Mean Square Acceleration</i>)
SENCICO	: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
<i>S – CAV</i>	: Velocidad absoluta acumulativa estandarizada (<i>Standardized Cumulative Absolute Velocity</i>)
UCH	: Universidad de Chile
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
USA	: Estados Unidos (<i>United States of America</i>)

Prólogo

Este trabajo de investigación comenzó hace algún tiempo, cuando aún me encontraba en Japón. Debido a la diferencia horaria, las reuniones con Nicole se realizaban a partir de las 10 o 11 de la noche. Estas reuniones se llevaban a cabo cada dos semanas durante el periodo de estudios, y semanalmente durante sus vacaciones, y han continuado hasta la fecha como parte de un proyecto de investigación. Desde el inicio, Nicole demostró una gran predisposición, paciencia e iniciativa, adaptándose a los cambios y contribuyendo de manera significativa al avance de la investigación.

El tema central de la investigación era la bidireccionalidad y el ángulo de incidencia, pero fue necesario redirigir el enfoque hacia un problema de ingeniería más inmediato y aplicable, centrado en las edificaciones de albañilería confinada, un tipo constructivo característico en Perú. Las investigaciones previas que realicé sobre este tema indicaron la relevancia de abordar los casos en los que existen rigideces diferentes en ambas direcciones, considerando la variación de las densidades de los muros en ambas direcciones.

Además, se incluyó una metodología que permitió considerar el comportamiento de los muros de albañilería confinada a partir de los ensayos realizados en el CISMID. Durante el análisis, también se identificaron las medidas de intensidad más relevantes para reducir la variabilidad en el intervalo de comportamiento inelástico.

Finalmente, esta tesis forma parte del proyecto de investigación del IIFIC 2024, el cual da soporte para la obtención de funciones de fragilidad paramétricas. Además, ha sido aceptada para su publicación en el Journal de TECNIA de la Universidad, en una edición especial coordinada por el CISMID.

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

La evaluación de la respuesta sísmica de las estructuras es importante para establecer metodologías de análisis estructural a fin de reducir su incertidumbre y como consecuencia, garantizar la filosofía y principios del diseño sismorresistente. Es por ello que, en un análisis sísmico, se debe aplicar por lo menos las dos componentes horizontales de un registro sísmico considerando un ángulo crítico con respecto a los ejes principales de la estructura con el fin de obtener respuestas que consideren el efecto de la simultaneidad del sismo; sin embargo, en la actualidad se simplifica el análisis siguiendo las recomendaciones de los códigos de diseño, los cuales permiten aplicar una de las componentes de manera perpendicular a la edificación estudiada.

Por otro lado, es posible realizar un análisis dinámico incremental (IDA) a fin de considerar el comportamiento elástico e inelástico de las estructuras. Este considera una medida de intensidad (IM) que representa la intensidad del sismo y una medida de daño (DM) que representa el desempeño estructural. Esta IM es un indicador que representa la energía y el movimiento del sismo permitiendo estimar el nivel de amenaza sísmica. Para esto, es importante considerar la selección de las IM que caractericen mejor al sismo en función de la estructura y así reducir la incertidumbre del desempeño estructural. Sin embargo, la IM para un IDA que considere la simultaneidad del sismo y su ángulo crítico de respuesta máxima no es llevado a cabo. Es por esa razón que estos factores fueron estudiados en la presente investigación con el fin de proponer la IM que mejor se relaciona con la respuesta estructural de edificaciones híbridas de albañilería confinada y pórticos de concreto armado, sistema estructural usado generalmente en las viviendas en el Perú.

1.2 Descripción del problema de investigación

Las excitaciones dinámicas de los eventos sísmicos pueden ser representadas mediante tres componentes traslacionales y tres rotacionales. Teniendo en cuenta que las componentes rotacionales y la componente vertical tienen un escaso impacto en la respuesta sísmica (Pramanik et al., 2016), se sugiere la necesidad de considerar solo las componentes horizontales simultáneamente. Así mismo, la respuesta sísmica está influenciada por el ángulo de incidencia del movimiento bidireccional del suelo; por lo tanto, la demanda de desplazamiento debe elegirse considerando la orientación del movimiento del suelo con respecto a los ejes principales de la estructura analizada (Hussain et al., 2022). Sin embargo, comúnmente el análisis se lleva a cabo considerando solo una dirección horizontal coincidente con las direcciones principales de la edificación. Además,

los códigos de diseño simplifican los cálculos combinando los efectos en cada dirección de análisis mediante diferentes métodos (Ortiz, 2019), no siempre siendo correcto ya que estudios previos indican que las respuestas obtenidas siguiendo estos códigos de diseño no son necesariamente conservadoras (Mazza et al., 2016).

Por otro lado, la vulnerabilidad sísmica ha sido un tema estudiado por muchos investigadores, entre ellos se encuentran Vamvatsikos y Cornell (2001) quienes propusieron el IDA como un método paramétrico surgido con el fin de estudiar con mayor profundidad el desempeño de las estructuras ante la ocurrencia de un evento sísmico. De esta forma se puede conocer y analizar el rango de respuesta que tendría una estructura ante diferentes niveles de intensidad sísmica (Noriega, 2019). Una IM eficiente u óptima reduce considerablemente la variabilidad de la respuesta estructural. Por tanto, resulta importante seleccionar una IM que pueda relacionarse adecuadamente con las DM. La naturaleza de las estructuras y los sismos (bidireccionalidad y ángulo de incidencia) hace variar los criterios de selección de las IM más representativas. Debido a la complejidad involucrada, no hay un acuerdo de la IM óptima (Rong et al., 2022).

Por tanto, es necesario para el análisis sísmico que se considere la bidireccionalidad, el ángulo de incidencia y la selección de una IM más eficiente. Establecer un criterio de selección permitirá reducir la variabilidad en la predicción de la respuesta estructural sísmica y con ello, incrementar la precisión para diseñar edificaciones más seguras antes sismos significativos. Por ello, la presente investigación planteó buscar la IM que represente mejor la respuesta de una estructura sujeta a movimientos bidireccionales considerando el efecto del ángulo de incidencia.

1.2.1 Problema general

Ante lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué medidas de intensidad sísmica (IM) reducen la variabilidad de la respuesta sísmica estructural en edificaciones usando análisis dinámico incremental (IDA) bidireccional?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo seleccionar registros sísmicos representativos considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones?
- ¿Cómo seleccionar edificaciones representativas considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones?

- ¿Cómo evaluar la variabilidad de la respuesta estructural sísmica al usar IM en un análisis dinámico incremental (IDA) bidireccional en edificaciones?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Proponer medidas de intensidad sísmica (IM) que reducen la variabilidad de la respuesta sísmica estructural de edificaciones usando análisis dinámico incremental (IDA) bidireccional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Proponer una metodología para seleccionar registros sísmicos representativos considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones
- Proponer una metodología para seleccionar edificaciones representativas considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones.
- Proponer una metodología para evaluar la variabilidad de la respuesta estructural sísmica al usar IM en un análisis dinámico incremental (IDA) bidireccional en edificaciones.

1.4 Antecedentes investigativos

El IDA es un método empleado para estudiar la vulnerabilidad sísmica de una estructura que relaciona un parámetro de demanda con una intensidad sísmica. Esto resulta útil para conocer la respuesta estructural para diferentes niveles de intensidad sísmica. Existen una gran cantidad de IM, razón por la cual se tienen investigaciones que buscan la IM que mejor represente la respuesta estructural. Por ejemplo, Nguyen et al. (2023) evaluaron 20 IM aplicadas al análisis de fragilidad sísmica en pórticos de acero resistentes a momentos de 2, 4, 8, 12 y 20 niveles. Los resultados indicaron que los parámetros relacionados con la velocidad, como la Intensidad de Housner (SI_H) y la velocidad máxima del suelo (PGV), junto con la aceleración espectral ($S_a(T_1, 5\%)$), tienden a ser los más adecuados para este tipo de estructuras. Recomendaron el uso de la SI_H como IM cuando las estructuras tuvieran entre 2 y 12 niveles, y la PGV para estructuras de 12 a 20 niveles. Por otro lado, advirtieron que el uso común de la aceleración máxima del suelo (PGA) no es el adecuado para el análisis de este tipo de estructuras.

Por otro lado, no se ha establecido qué IM reduce la variabilidad de la respuesta estructural considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia. Uno de los criterios de selección de la IM se basa en la clasificación de la estructura según el periodo. Este

criterio fue estudiado por Pramanik et al. (2016), quienes analizaron la eficiencia de diferentes IM en la creación de curvas de fragilidad a partir de un IDA considerando las dos componentes horizontales del registro sísmico. Evaluaron sistemas de un grado de libertad con periodos de 0.2, 1 y 3 segundos representando a estructuras de periodos cortos, medianos y largos, respectivamente. Los resultados revelaron que, para periodos cortos, la IM más adecuada fue la *PGA*, mientras que para periodos medianos, la *PGV* y para periodos largos, el desplazamiento máximo del suelo (*PGD*). Otros criterios de selección fueron estudiados por Kostinakis y Athanatopoulou (2016) al evaluar la efectividad de 10 IM para reducir la variabilidad de la deriva máxima de entrepiso en edificios tridimensionales (3D) de concreto armado. Utilizaron cuatro edificios de cinco niveles, de los cuales dos eran simétricos y dos, asimétricos, diseñados según Eurocódigos EC2 y EC8. Estos fueron sometidos a 97 registros sísmicos de fallas lejanas en un IDA bidireccional. La evaluación de las IM se basó en la desviación estándar, en la cual se determinó que la $S_a(T_1, 5\%)$ es efectiva para reducir la variabilidad en registros con baja deriva entrepiso, pero menos eficiente en casos con alta deriva. Además, concluyeron que la eficacia de las IM depende de las características de las estructuras como la excentricidad en planta, el nivel de desempeño y el ángulo de incidencia sísmica. Es por ello que si se tiene en consideración en la elección de la IM el efecto del ángulo con el que se aplica el sismo a la edificación, se reduciría la variabilidad de la respuesta estructural.

Mazza et al. (2016) estudiaron sobre la influencia de la bidireccionalidad y el ángulo de incidencia en la respuesta sísmica de estructuras de concreto armado. Emplearon un análisis dinámico incremental multicomponente (MIDA) en edificios residenciales de 6 y 12 niveles con planta simétrica. En estos, variaron el ángulo de incidencia cada 30° en un rango de 0° a 360° y evaluaron el daño estructural mediante la ductilidad de los elementos estructurales por nivel. Encontraron que la ductilidad máxima se veía afectada por las características del terreno y la intensidad del movimiento sísmico. Además, los valores obtenidos con el ángulo de incidencia que daba las mayores respuestas estructurales en el MIDA fueron ligeramente más conservadores que los del ángulo 0° , sugiriendo una leve influencia del ángulo con el que incide un evento sísmico. Un análisis a una edificación real fue realizado por Gubana y Mazelli (2023) cuyo propósito era evaluar la vulnerabilidad de un hospital ubicado en Friuli Venezia Giulia, Italia, una región propensa a terremotos. Su objetivo era proporcionar curvas de fragilidad (FC) para un hospital de concreto armado diseñado para resistir cargas gravitatorias usando 5 diferentes IM con el fin de evaluar su confiabilidad. Se realizaron IDA unidireccionales y bidireccionales en un modelo tridimensional para evaluar las FC en cuatro niveles de daño. Los resultados indicaron que

cuatro de las cinco IM redujeron la dispersión de la respuesta estructural, siendo la $S_a(T_1, 5\%)$ la excepción, lo que sugiere una evaluación confiable de la fragilidad del edificio al usar las otras IM.

Existen diferentes IM debido a la complejidad que involucra la naturaleza de las estructuras y los sismos por lo que se propusieron nuevas IM que incorporan propiedades dinámicas de las estructuras. Entre las investigaciones que desarrollaron este tema se encuentra el trabajo de Rong et al. (2022), quienes propusieron una nueva IM que considera los efectos de los modos de vibración y el efecto de la inelasticidad de la estructura al que denotaron como $IM S_{a,GM}$. Primero, evaluaron la $S_a(T_1, 5\%)$ como IM en edificios 3D de concreto armado de gran altura (40 m, 63 m, 92 m y 99 m). Investigaron los efectos de los modos de vibración y el comportamiento inelástico de la estructura, encontrando que su eficiencia se ve influenciada por los modos superiores y el comportamiento inelástico de la estructura. Finalmente, la nueva IM propuesta, la $IM S_{a,GM}$, mostró una notable reducción en la dispersión de las respuestas estructurales en comparación con la $S_a(T_1, 5\%)$, así como con otras IM evaluadas.

Como se ha podido apreciar, el sistema estructural de la edificación es un importante factor que considerar al momento de elegir la IM que mejore la variabilidad de la respuesta estructural. En el Perú, es común encontrar viviendas con sistemas estructurales distintos en cada una de sus direcciones. La combinación de estos sistemas forma un nuevo sistema estructural denominado sistema híbrido. Además, el efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia ha sido un tema estudiado en el país, entre los cuales se encuentra la investigación de Moscoso y Quiroz (2019), en donde se evaluaron edificios de concreto armado con sistemas estructurales diferentes en sus direcciones principales. Propusieron factores de amplificación en el análisis modal espectral de la norma peruana que consideren la excentricidad y la diferencia de rigideces en ambas direcciones. Posteriormente, Moscoso (2020) presentó el análisis de un edificio de sistema híbrido de albañilería confinada en una dirección y pórticos de concreto armado en la otra dirección variando el ángulo de incidencia y considerando la bidireccionalidad del sismo. Sus resultados mostraron que el desempeño se veía influenciado por estos factores. Así también, Moscoso et al. (2021) evaluaron bajo tres escenarios el desempeño acoplado de un sistema híbrido de albañilería confinada en una dirección y muros estructurales de concreto armado en la otra dirección a través de análisis no lineales tiempo-historia, unidireccional y bidireccional, de modelos numéricos de 3, 4 y 5 niveles. En el primer escenario se tomó en cuenta los factores de escalamiento de la norma E.030 para los

registros sísmicos, dando como resultado que las estructuras presentaban un adecuado desempeño. En el segundo escenario se consideraron factores de escalamiento tales que los muros de albañilería en el primer nivel alcancen una distorsión de 5/1000 (límite máximo normativo), obteniendo que los muros de concreto armado se mantuvieron en el rango lineal, lo cual indica que el sistema estructural de albañilería confinada limitó a que el sistema estructural de muros de concreto armado logre desarrollar toda su capacidad. El tercer escenario consistía en un análisis unidireccional que considerara las propiedades, modelo estructural y escalamiento según los dos anteriores escenarios para que se encuentren en las mismas condiciones estructurales. Obtuvieron que el procedimiento de la norma E.030 cubre la respuesta estructural considerando un análisis bidireccional o unidireccional.

En resumen, los estudios revisados ofrecen una perspectiva sobre la selección de IM adecuadas para distintos tipos de estructuras y condiciones de análisis. Los resultados muestran la importancia de considerar tanto la naturaleza de la estructura como las características del terreno y el ángulo de incidencia del sismo al elegir la IM más apropiada. Además, se enfatiza la influencia de la bidireccionalidad en los resultados del análisis sísmico lo que indicaría que se debe dar un enfoque más completo en la evaluación de la vulnerabilidad estructural. Estos hallazgos aportan a la mejora de la precisión y confiabilidad en la evaluación de la fragilidad sísmica de las estructuras. Sin embargo, no se identifican estudios similares en Perú. Por ello, en la presente investigación se propone la adaptación de los métodos a las características de las estructuras existentes en el país.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Registro de aceleraciones

La representación del movimiento del suelo producido por un evento sísmico es algo complejo. Matemáticamente, se puede descomponer el movimiento en tres componentes de traslación y tres componentes de rotación. En ingeniería, las componentes de rotación no son significativas por lo que generalmente se omiten en el análisis sísmico de edificaciones. Así también, los datos de movimiento del suelo más empleados son los registros de aceleración (ver Figura N°1) y los aspectos más usados para describir el movimiento sísmico con fines de ingeniería son la amplitud, la distribución de frecuencias y la duración del movimiento. El impacto de estos registros de movimiento en estructuras con diferentes propiedades se representa mediante los espectros de respuesta (Ortiz, 2019). Sin embargo, estos representan sistemas de un grado de libertad y comportamiento elástico.

Estación: Parque de la Reserva (PRQ)

Latitud: -12.07 Longitud: -77.04 Altitud (m): 130

Frecuencia de muestreo: 50 Hz

Fecha: 31 de mayo, 1970 Hora de origen: 15:23:00 Magnitud: 6.6 Mb

Latitud: -9.36 Longitud: -78.87 Profundidad (km): 64

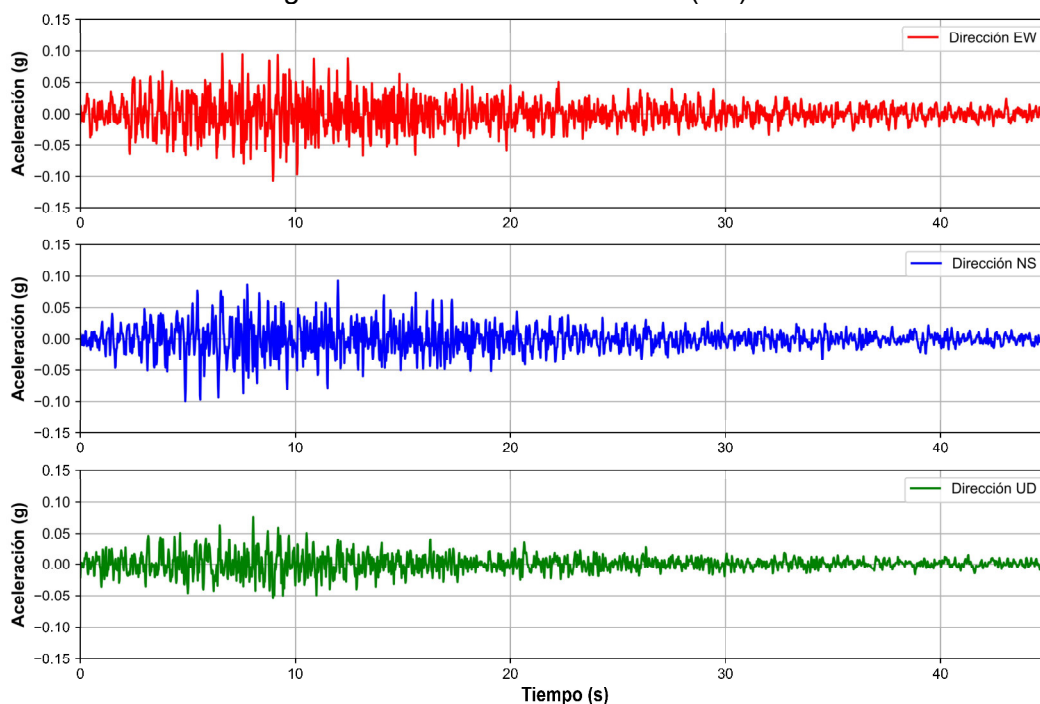


Figura 1. Registro de aceleraciones del terremoto del 31 de mayo de 1970, estación Parque de la Reserva

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de REDACIS

2.2 Espectro de respuesta

Paz (2012) menciona que, en ingeniería sísmica, el espectro de respuesta muestra las respuestas máximas de los sistemas de un grado de libertad variando sus periodos ante una componente particular de movimiento del suelo. El espectro de respuesta puede ser obtenido desde la respuesta de las aceleraciones absolutas (ver Figura N°2), velocidad relativa (ver Figura N°3) o desplazamientos máximos del sistema (ver Figura N°4). El espectro de respuesta relaciona la demanda sísmica y la estructura, por lo que sus máximas amplitudes representan el rango de periodos que coinciden.

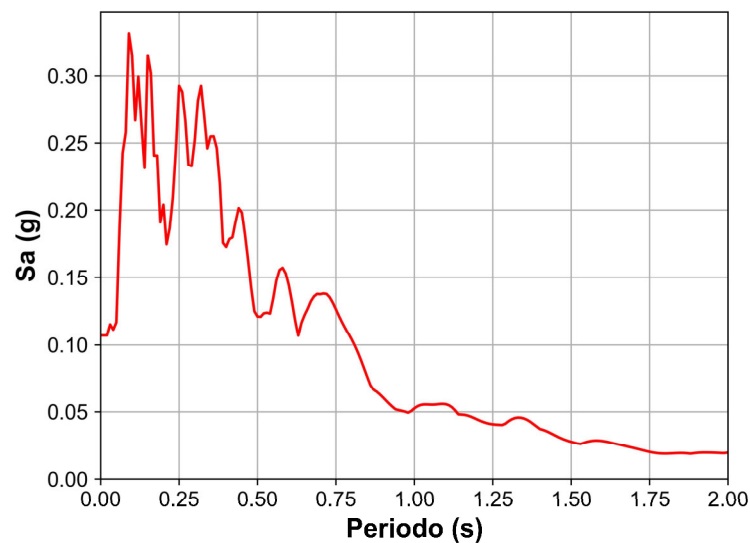


Figura 2. Espectros de respuesta de aceleración

Fuente: Elaboración propia

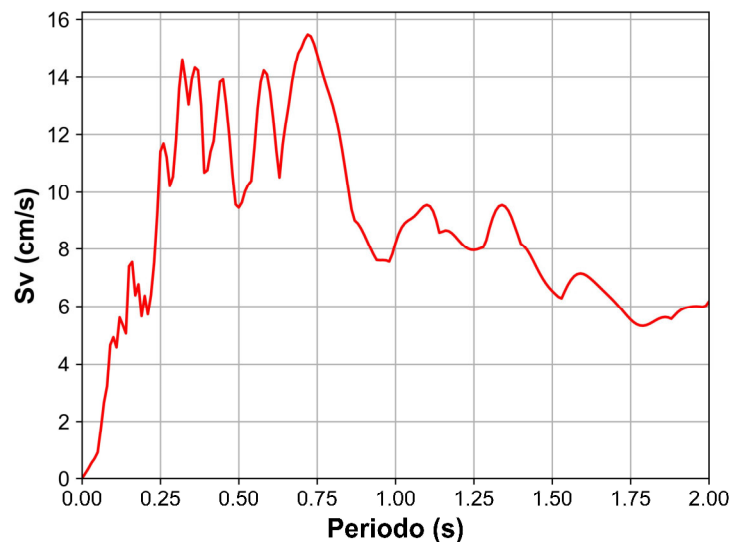


Figura 3. Espectros de respuesta de velocidad

Fuente: Elaboración propia

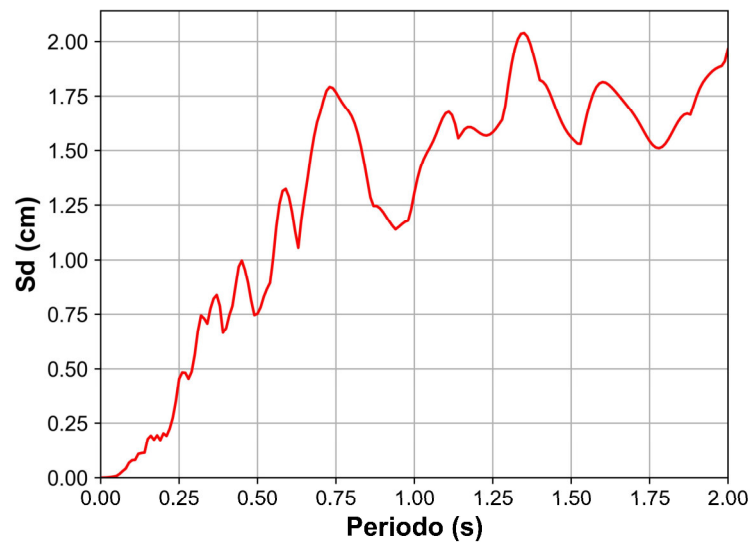


Figura 4. Espectros de respuesta de desplazamiento

Fuente: Elaboración propia

2.3 Espectro RotD50

Boore et al. (2006) desarrollaron un enfoque para calcular la media geométrica de las mediciones de movimiento sísmico que no dependa de la dirección en la que se registra un sismo. Este método se basa en obtener las medias geométricas de las respuestas espectrales de las componentes principales que se obtienen de la rotación de estas respecto a los ejes principales de la estructura. El espectro resultado final, conocido como “RotD50”, se obtiene tomando el promedio de todas las medias geométricas rotadas. RotD50 es una medida que representa a detalle la energía sísmica promedio (ver Figura N°5) de un sismo sin verse afectada por la dirección particular en la que se mida el movimiento sísmico.

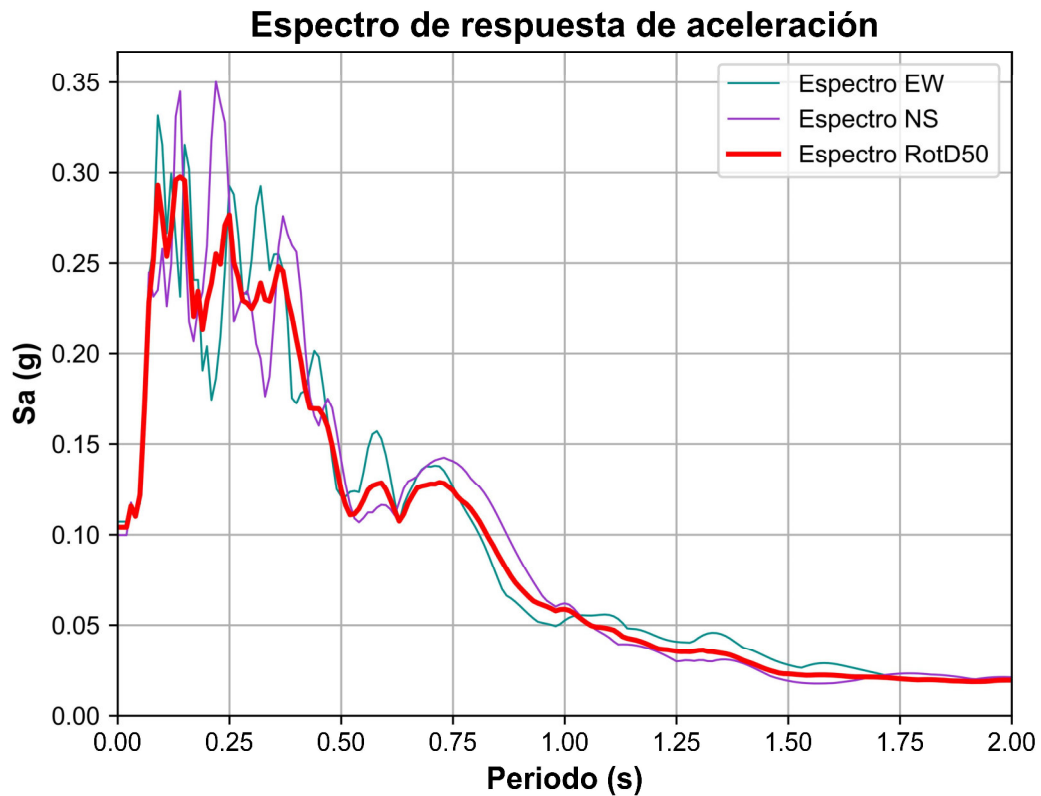


Figura 5. Espectro de respuesta RotD50 comparado a los espectros de respuesta de las componentes EW y NS

Fuente: Elaboración propia

2.4 Bidireccionalidad

Ortega (2023) indica que el diseño sísmico se realiza generalmente mediante análisis unidireccionales para cada uno de los ejes principales de las edificaciones de manera independiente, es decir, se evalúa la estructura ante la acción de una de las componentes del sismo y luego se realiza la misma evaluación, pero con la otra componente. Sin embargo, los eventos sísmicos tienen un comportamiento aleatorio e imponen solicitaciones bidireccionales a las estructuras, es decir, se manifiestan solicitaciones sísmicas en dos direcciones perpendiculares al mismo tiempo (Ver Figura N°6).

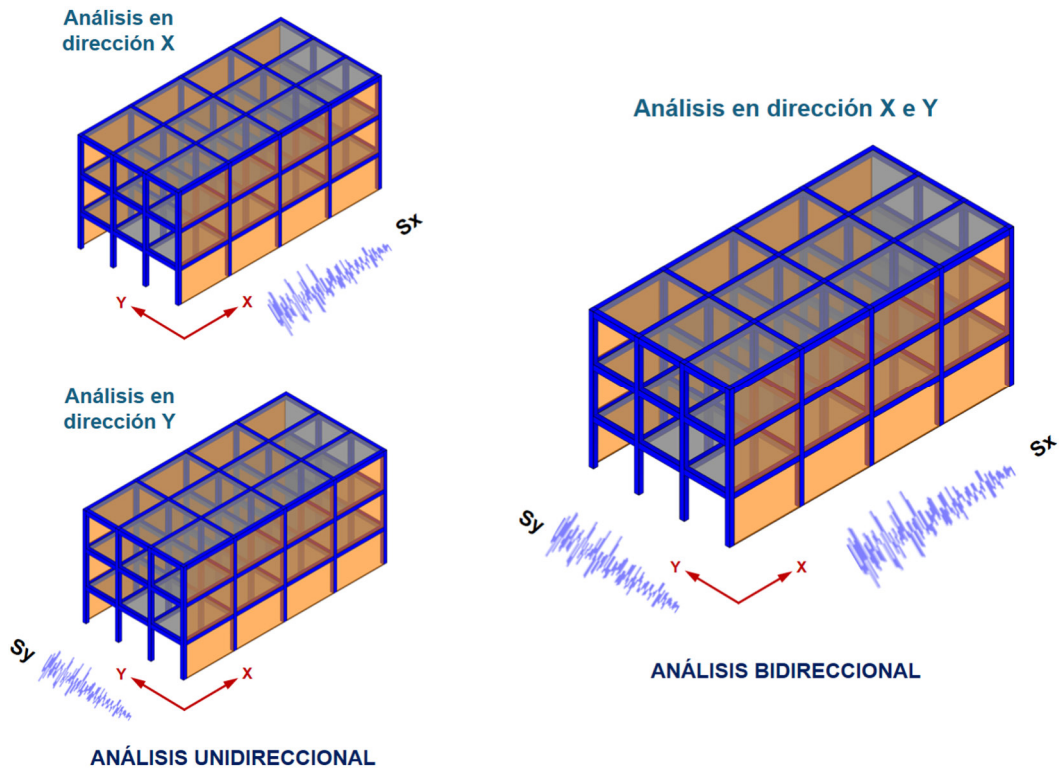


Figura 6. Comparación entre Análisis Unidireccional y Análisis Bidireccional

Fuente: Elaboración propia

2.5 Ángulo de incidencia

El concepto de ángulo de incidencia se muestra en la Figura N°7, donde la Figura N°7 (a) ilustra la estación donde se registró el movimiento del suelo y la Figura N°7 (b) representa cómo dicho movimiento del suelo incide sobre la estructura con un ángulo θ en relación con los ejes principales de la estructura. La consideración de este ángulo de incidencia es importante porque el edificio no siempre está alineado en la misma dirección que la estación sísmica (Hussain et al, 2022).

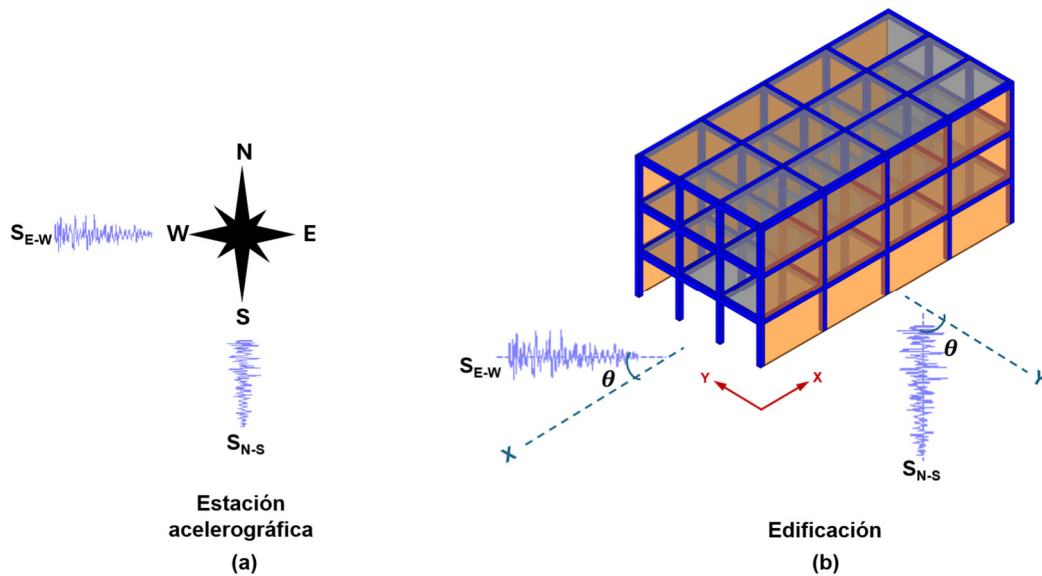


Figura 7. (a) Movimientos del terreno registrados en una estación acelerográfica; (b) Eje de referencia típico de una estructura con respecto al movimiento del suelo registrado en la estación

Fuente: Elaboración propia

2.6 Análisis dinámico incremental (IDA)

Ante las limitantes que presenta el método de análisis estático no lineal o push-over, la cual sobrestima la respuesta estructural y subestima la resistencia o capacidad, se han desarrollado métodos de análisis dinámico para mejorar la estimación de las respuestas. Uno de estos métodos es el Análisis Dinámico Incremental (Chumpitaz, 2021).

En el contexto de la ingeniería sísmica basada en el desempeño, este método ha sido propuesto para estimar la demanda y capacidad de las estructuras. Así mismo, la agencia federal para la administración de emergencias (*Federal Management Agency*, FEMA) de los Estados Unidos ha establecido este método para determinar la capacidad de colapso de una estructura (Carrasco, 2017).

2.6.1 Definición

Vamvatsikos y Cornell (2001) definen al IDA como un método paramétrico surgido con el fin de estudiar con mayor profundidad el desempeño de las estructuras ante la ocurrencia de un evento sísmico. Consiste en someter un modelo estructural a uno o más registros de movimiento del suelo, cada uno escalado a múltiples niveles de intensidad (IM), creando así una o más curvas de respuesta parametrizada a la cual le corresponde cierto nivel de intensidad (ver Figura N°8)

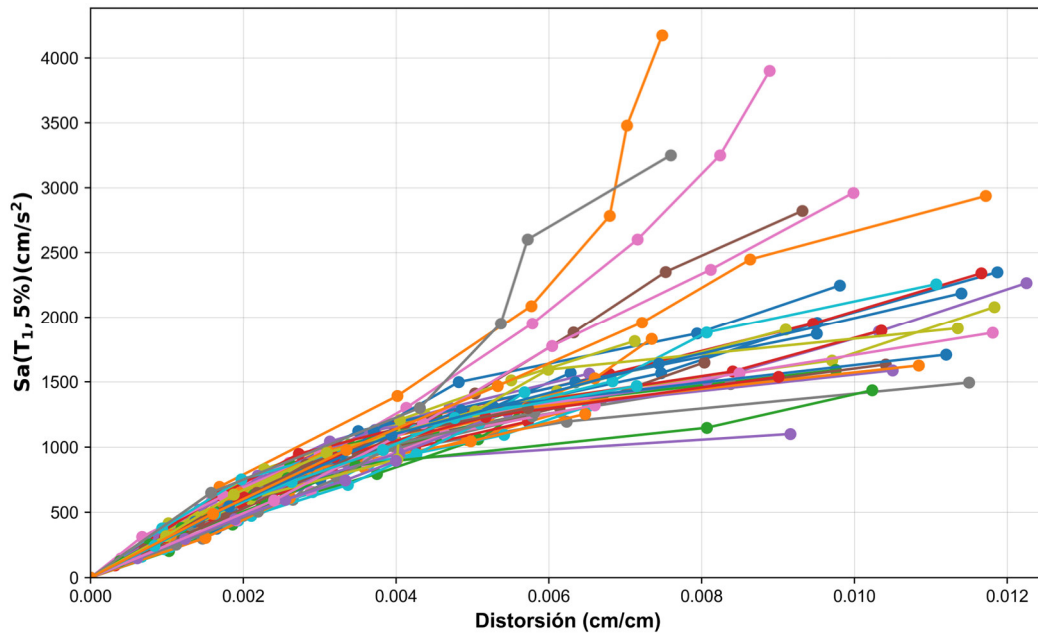


Figura 8. Curvas IDA

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos de aplicar este análisis se puede conocer y analizar el rango de respuesta que tendría una estructura ante diferentes niveles de intensidad sísmica. En otras palabras, mediante este análisis se podrá entender mejor el comportamiento de las estructuras ante sismos de gran magnitud y estimar su capacidad dinámica (Noriega, 2019).

2.6.2 Factor de escala (FE)

Los niveles de intensidad se obtienen mediante factores de escala que se consiguen de disminuir o incrementar cierto valor de referencia del registro sísmico. Con el fin de que la respuesta de la estructura represente el potencial que tiene un sismo escalado, el investigador debe definir el valor de referencia (Chumpitaz, 2021).

Carrasco (2017) lo define como un valor escalar positivo que al multiplicarse con un valor de aceleración de un registro sísmico produce un nuevo valor escalado. Este valor será empleado para escalar todos los valores del registro sísmico produciendo un nuevo conjunto de aceleraciones “escalado”.

2.6.3 Medidas de intensidad (IM)

El valor de referencia del registro sísmico es ampliamente conocido en la literatura como la medida de intensidad y puede encontrarse dentro del propio registro o en los resultados del procesamiento que se le haya realizado a este (Chumpitaz, 2021). Corresponde a una variable escalar que caracteriza la intensidad de un evento sísmico en función de la señal original que va creciendo o disminuyendo, dependiendo del factor de escala (Noriega, 2019).

Muchos autores han propuesto IM para encontrar indicadores sintéticos de la intensidad del sismo. Estas se pueden definir de muchas formas, siendo la más simple definir las en función de parámetros del registro como la aceleración, velocidad desplazamiento, duración, entre otros (Buratti, 2012). Para Moscoso y Saito (2023) las IM pueden obtenerse basados en la aceleración (A), velocidad (V), desplazamiento (D) o por combinación de ellos (H: híbridos) como se muestra en la Tabla N°1.

Tabla 1. Medidas de intensidad

N°	Nombre	Basado en	Notación	Definición	Fuente
1	Aceleración máxima del suelo	A	PGA	$PGA = \max_{0 \leq t \leq t_f} \ddot{u} $	(Douglas, 2003)
2	Aceleración espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento	A	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%) = \max(\ddot{u}_{(T_1, 5\%)} + \ddot{u}_g) $	(Chopra, 2006)
3	Aceleración espectral promedio	A	$S_{a_{avg}}$	$S_{a_{avg}} = \left(\prod_{i=1}^n S_{a(T_i)} \right)^{1/n}$	(Baker y Cornell, 2006)
4	Aceleración máxima efectiva	A	EPA	$EPA = \frac{1}{2.5} * \int_{0.1}^{0.5} S_{a(T, h=5\%)} dT$	(Newmark et al., 1982)
5	Ley de potencia SR	A	IM_{SR}	$IM_{SR} = S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(\sqrt{R}T_1)^\alpha$	(Mehanny, 2009)
6	Ley de potencia CR	A	IM_{CR}	$IM_{CR} = S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(\sqrt[3]{R}T_1)^\alpha$	(Mehanny, 2009)
7	Índice de potencia sísmica	A	EPI	$EPI = \frac{1}{t} * \int_0^t a_{(\tau)}^2 d\tau$	(Housner, 1975)
8	Aceleración cuadrática media	A	RMS	$RMS = \sqrt{EPI}$	(Housner, 1975)
9	Bojórquez e Iervolino IM	A	I_{Np}	$I_{Np} = S_a(T_1, 5\%) \cdot \left(\frac{S_{a_{avg}}}{S_a(T_1, 5\%)} \right)^\alpha$	(Bojórquez e Iervolino, 2011)
10	Intensidad de Arias	A	AI	$AI = \frac{\pi}{2g} * \int_0^t a_{(\tau)}^2 d\tau$	(Arias, 1970)
11	Sarma y Yang IM	A	A_{95}	$A_{95} = 0.05 * \int_0^t a_{(\tau)}^2 d\tau$	(Sarma y Yang, 1987).
12	Intensidad característica	A	I_c	$I_c = RMS^{1.5} \cdot t_{95_t05}^{0.5}$	(Park et al., 1985)
13	Riddell y Garcia Aceleración IM	A	I_a	$I_a = a_{max} \cdot t_{95_t05}^{1/3}$	(Ridell y Garcia, 2001)
14	Velocidad absoluta acumulada	A	CAV	$CAV = \int_0^t a_{(\tau)} d\tau$	(Reed y Kassawara, 1990)
15	Velocidad absoluta acumulativa estandarizada	A	$S - CAV$	$S - CAV = \sum_{i=1}^N \left(H_{(PGA_i - 0.025)} \int_{i-1}^i a_{(t)} dt \right)$	(Campbell y Bozorgnia, 2011)
16	IM de peligro de dos parámetros	A	TPH	$R_{S_a} = \frac{S_a(T_f)}{S_a(T_1)}$ $TPH = S_a(T_1) \cdot R_{S_a}^\alpha$	(Cordova et al., 2000).

N°	Nombre	Basado en	Notación	Definición	Fuente
17	Velocidad máxima del suelo	V	PGV	$PGV = \max_{0 \leq t \leq t_f} v(t) $	(Douglas, 2003)
18	Velocidad al cuadrado	V	V_{sq}	$V_{sq} = \int_0^t v_{(\tau)}^2 d\tau$	(Buratti, 2012)
19	Raíz cuadrada de la velocidad	V	V_{rs}	$V_{rs} = \sqrt{V_{sq}}$	(Buratti, 2012)
20	Fajfar et al. IM	V	I_F	$I_F = PGV \cdot t_{95_t05}^{0.25}$	(Fajfar et al., 1990)
21	Riddell y Garcia Velocidad IM	V	I_v	$I_v = PGV^{2/3} \cdot t_{95_t05}^{1/3}$	(Ridell y Garcia, 2001)
22	Velocidad espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento	V	$S_v(T_1, 5\%)$	$S_v(T_1, 5\%) = S_{v(T_1, h)}$	(Chopra, 2006)
23	Intensidad del espectro Housner	V	SI_H	$SI_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v d\tau$	(Housner, 1952)
24	Desplazamiento máximo del suelo	D	PGD	$PGD = \max_{0 \leq t \leq t_f} u(t) $	(Douglas, 2003)
25	Desplazamiento espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento	D	$S_d(T_1, 5\%)$	$S_d(T_1, 5\%) = S_{d(T_1, h)}$	(Chopra, 2006)
26	Riddell y Garcia Desplazamiento IM	D	I_d	$I_d = PGD \cdot t_{95_t05}^{1/3}$	(Ridell y Garcia, 2001)
27	Cosenza y Manfredi IM	H	I_z	$I_z = \frac{\left(\int_0^t a_{(\tau)}^2 d\tau \right)}{PGA \cdot PGV}$	(Cosenza y Manfredi, 2000).

Fuente: Moscoso y Saito (2023)

La definición de cada una de las IM mencionadas se presenta a continuación:

1. Aceleración máxima del suelo (PGA): amplitud de la máxima aceleración registrada de un acelerograma durante la ocurrencia de un sismo en particular (Douglas, 2003). Medida que es de fácil acceso y comúnmente empleado para caracterizar un sismo.
2. Aceleración espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento ($S_a(T_1, 5\%)$): valor máximo de la aceleración total de un sistema de un grado de libertad sujeto a un movimiento sísmico. Se representa gráficamente como un espectro de aceleración, el cual es un tipo de respuesta estructural que muestra la aceleración máxima alcanzada por un sistema durante un sismo, considerando un periodo de vibración natural y una relación de amortiguamiento dados (Chopra, 2006).
3. Aceleración espectral promedio ($S_{a_{avg}}$): media geométrica de los valores de las aceleraciones espectrales en un rango de periodos (Baker y Cornell, 2006). Medida representativa que se puede generalizar para diferente periodo ya que no depende de un periodo en específico.
4. Aceleración máxima efectiva (EPA): aceleración máxima del suelo asociada al valor medio de la aceleración espectral dentro del rango de alta frecuencia (0.1 - 0.5 s) cuando se considere una amortiguación del 5% (Newmark et al., 1982). Medida que se puede emplear para un tipo de sistema estructural cuyas edificaciones tengan periodos que se encuentren dentro del rango mencionado.
5. Ley de potencia SR (IM_{SR}): propuesta de IM que reduce la dispersión en las estimaciones de la demanda de desplazamiento no lineal para diferentes estructuras asociadas con varios valores de resistencia lateral relativa nominal de un sistema de un grado de libertad, dependiente de la forma del espectro elástico (Mehanny, 2009). Medida de intensidad que ha sido propuesta por generar menor variabilidad en el rango no lineal que es el objeto de estudio de la presente investigación y puede aplicarse a diferentes resistencias laterales que es lo que se plantea al tener dos sistemas estructurales en cada dirección.
6. Ley de potencia CR (IM_{CR}): Modificación de la ley de potencia SR aplicado para estructuras de periodo bastante largo donde es posible reducir el multiplicador

$\sqrt{R}$ a $\sqrt[3]{R}$ (Mehanny, 2009). Esta variación de IM también se puede aplicar para verificar si se mantiene la baja variabilidad.

7. Índice de potencia sísmica (*EPI*): tasa media de energía sísmica total de entrada por unidad de masa durante la ocurrencia de un movimiento sísmico con el fin de estimar la capacidad media del movimiento del suelo para dañar las estructuras (Housner, 1975). Medida que se caracteriza en base a la energía un evento sísmico, lo cual puede relacionarse directamente con la respuesta estructural.
8. Aceleración cuadrática media (*RMS*): forma radical del índice de potencia sísmica (Housner, 1975). Medida que por el radical indicaría una tendencia a disminuir la variabilidad entre las expresiones con respecto a la anterior IM mencionada.
9. Bojórquez e Iervolino IM (I_{Np}): medida escalar de intensidad del movimiento del suelo que depende de la aceleración espectral del primer modo y de la aceleración espectral promedio normalizada con respecto a la aceleración espectral del primer modo (Bojórquez e Iervolino, 2011). IM a considerarse por ser un promedio de todo el rango de periodos sin perder su particularidad al considerar el periodo fundamental.
10. Intensidad de Arias (*AI*): medida de intensidad cuyo propósito es dar una indicación del daño potencial que un sismo puede producir en la localidad en la que se está determinando la intensidad (Arias, 1970). Medida empleada para determinar la energía liberada y conocida por su uso para determinar la duración significativa del evento sísmico.
11. Sarma y Yang IM (A_{95}): nivel de aceleración que contiene hasta el 95% por ciento de la intensidad de Arias (Sarma y Yang, 1987). Variación de la expresión para obtener la intensidad de Arias en la que solo se tiene una parte de la energía total del sismo.
12. Intensidad característica (I_c): índice propuesto dependiente del RMS y la duración significativa que ha demostrado tener una buena correlación con el daño estructural y puede considerarse una medida razonable para la

representación de los movimientos del suelo (Park et al., 1985). De acuerdo con los autores que lo propusieron, esta medida tiene una buena correlación con el daño estructural por lo que empleando esta IM se podría tener una menor variabilidad.

13. IM de aceleración de Ridell y Garcia (I_a): índice de intensidad compuesto usado para normalizar los movimientos del suelo y predecir la disipación de energía durante la ocurrencia de un sismo, IM adecuada para modelos estructurales en donde se degrada la rigidez (Ridell y Garcia, 2001). Esta medida proviene de la aceleración máxima, la cual es de fácil acceso y es aplicable para modelos que degradan la rigidez como los sistemas estructurales en estudio.
14. Velocidad absoluta acumulada (CAV): parámetro que define de manera conservadora el umbral de daño para las estructuras y equipos de las centrales nucleares (Reed y Kassawara, 1990). Dado que es una medida conservadora, se tendría menor variabilidad de la respuesta estructural por tener un mayor umbral de daño.
15. Velocidad absoluta acumulativa estandarizada ($S - CAV$): adaptación del CAV por la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos para su uso en la evaluación de si un movimiento sísmico del suelo es un potencial peligro para una central nuclear (Campbell y Bozorgnia, 2011). De igual forma que la anterior IM, se tendría un mayor umbral lo cual se relaciona con la respuesta estructural.
16. IM de peligro de dos parámetros (TPH): medida de intensidad que se propone con el fin de evitar la deficiencia de la aceleración espectral, parámetro que no considera el alargamiento inelástico del periodo a medida que la estructura se ablanda bajo la degradación de la rigidez. Es una combinación de la aceleración espectral del primer modo de vibración con la relación de aceleraciones espectrales en dos periodos (Cordova et al., 2000). Esta medida será empleada por su consideración de la degradación de la rigidez de los elementos.
17. Velocidad máxima del suelo (PGV): amplitud de la velocidad máxima registrada durante la ocurrencia de un sismo en particular (Douglas, 2003). Esta medida es empleada comúnmente para denotar un evento sísmico aplicado a una estructura cuyo movimiento está dominado por la velocidad.

18. Velocidad al cuadrado (V_{sq}): IM propuesta por Buratti (2012) definida por la integral del cuadrado de las velocidades en el rango de duración del sismo. Este parámetro resulta útil ya que depende de la velocidad, parámetro fácil de obtener a partir del registro sísmico.
19. Raíz cuadrada de la velocidad (V_{rs}): raíz cuadrada de la medida de intensidad anterior (Buratti, 2012). Dado que es una raíz cuadrada, se tendría una menor variabilidad con respecto a la anterior IM.
20. Fajfar et al. IM (I_F): expresión propuesta como una medida de la capacidad de movimiento del suelo durante la ocurrencia de un sismo para dañar estructuras con periodos fundamentales cuyo rango se puede clasificar como periodo medio, es decir, donde la velocidad es la que controla el movimiento (Fajfar et al., 1990). Esta IM es útil para ser aplicado en los sistemas a estudiar, además considera el rango de tiempo de duración significativa.
21. Riddell y Garcia Velocidad IM (I_v): índice de intensidad compuesto para normalizar los movimientos del suelo y predecir la disipación de energía durante la ocurrencia de un sismo aplicado en la región donde predomina la influencia de la velocidad del suelo para cualquier modelo (Ridell y Garcia, 2001). Al igual que la anterior IM, es factible emplear esta medida para caracterizar los sistemas a estudiar en la presente investigación.
22. Velocidad espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento ($S_v(T_1, 5\%)$): pseudovelocidad máxima obtenida de un oscilador de un grado de libertad sujeto a un movimiento del suelo por un sismo (Chopra, 2006). Esta IM es de fácil acceso y considera el periodo fundamental de la estructura.
23. Intensidad del espectro Housner (SI_H): medida de intensidad propuesta por Housner (1952) al sugerir que el espectro de pseudovelocidad se puede emplear para medir la gravedad de un sismo durante un análisis sísmico luego de relacionar este con la energía de deformación máxima almacenada en un sistema elástico sísmico. Esta medida considera un promedio de la pseudovelocidad en el rango en el que se encuentran los periodos fundamentales de las estructuras a analizar.

24. Desplazamiento máximo del suelo (PGD): amplitud del desplazamiento máximo registrado durante la ocurrencia de un sismo en particular (Douglas, 2003). Esta medida es empleada comúnmente para denotar un evento sísmico donde las estructuras están dominadas por el desplazamiento.
25. Desplazamiento espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento ($S_d(T_1, 5\%)$): pseudodesplazamiento máximo obtenido de un oscilador de un grado de libertad sujeto a un movimiento del suelo por un sismo (Chopra, 2006). Esta IM es de fácil acceso y considera el periodo fundamental de la estructura.
26. Riddell y Garcia Desplazamiento IM (I_d): índice de intensidad compuesto para normalizar los movimientos del suelo y predecir la disipación de energía durante la ocurrencia de un sismo aplicado en la región donde predomina la influencia del desplazamiento del suelo para cualquier modelo (Ridell y Garcia, 2001). Esta IM es aplicable a los sistemas a estudiar, además considera el rango de tiempo de duración significativa.
27. Cosenza y Manfredi IM (I_z): factor de daño que se encuentra relacionado con el número de ciclos plásticos, lo que indicaría que también está relacionado con el contenido energético del sismo (Cosenza y Manfredi, 1998). Esta medida relaciona el PGA y PGV , los cuales son de fácil acceso, además se estaría relacionando directamente la respuesta estructural con el contenido energético del evento sísmico.

Las IM se emplean para cuantificar la fuerza de los movimientos del suelo y evaluar la respuesta de las estructuras, actúan como un vínculo entre la demanda sísmica y el análisis de peligro sísmico, por tanto, tienen importancia en la ingeniería sísmica basada en el desempeño (Kiani et al., 2019).

2.6.4 Medida de daño (DM)

Este parámetro permite caracterizar el desempeño de una estructura ante las cargas sometidas por el sismo. Esta medida se obtiene de los análisis dinámicos no lineales llevados a cabo para cada registro sísmico escalado. Como medidas de daño se tienen a las derivas máxima en cubierta, la cortante basal, las derivas máximas entrepiso, entre otras (Noriega, 2019).

2.7 Edificaciones híbridas

En el Perú, es común encontrar viviendas como las mostradas en la Figura N°9. Estas cuentan con una arquitectura típica (ver Figura N°10) en la cual se puede apreciar un sistema de albañilería confinada en la dirección colindante con las edificaciones vecinas mientras que, en la dirección perpendicular, estructuras de concreto armado. Al sistema resultante de la combinación de estos sistemas estructurales para cada dirección se le conoce como sistema híbrido (Moscoso et al., 2021).



Figura 9. Arquetipo de albañilería en Perú

Fuente: E. Moscoso, comunicación personal, 22 de junio de 2024

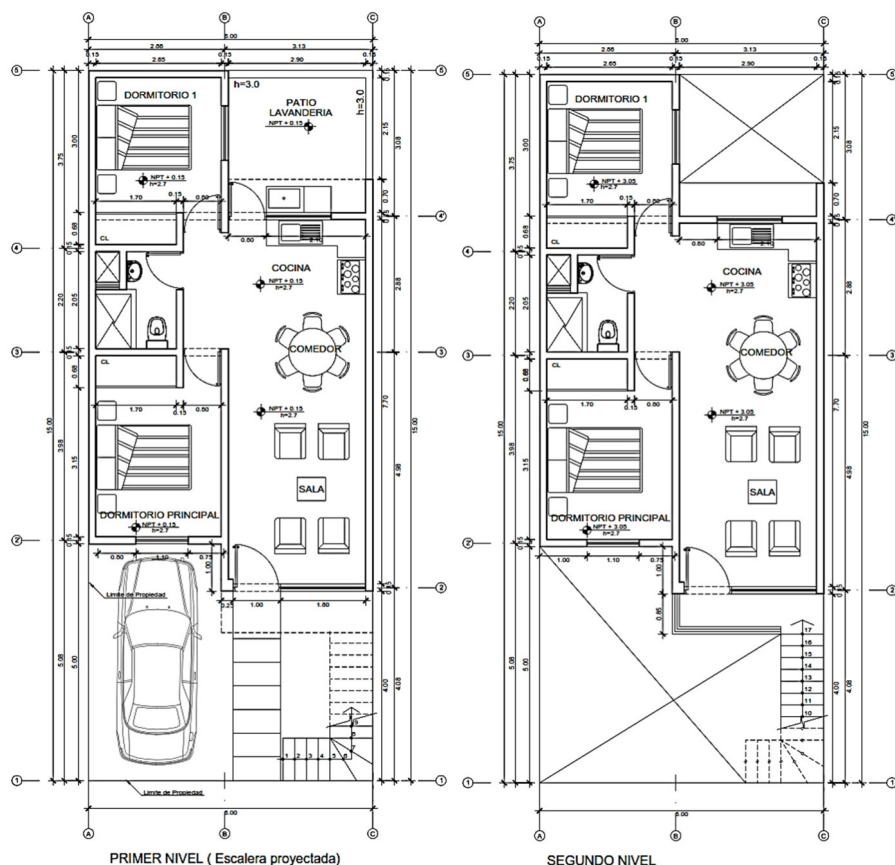


Figura 10. Arquitectura típica de viviendas de albañilería en Perú

Fuente: E. Moscoso, comunicación personal, 22 de junio de 2024

En otras palabras, las edificaciones híbridas se pueden definir como edificaciones cuyas respuestas sísmicas son la combinación de respuestas ante diferentes sistemas estructurales en una misma dirección o direcciones perpendiculares. Con la finalidad de brindar funcionalidad a la edificación (iluminación, ventilación, tránsito, etc.), las edificaciones de albañilería confinada en una dirección y pórticos de concreto armado en la otra son las más usadas en autoconstrucciones. Estas arquitecturas se pueden idealizar para el análisis sísmico como se muestra en la Figura N°11.

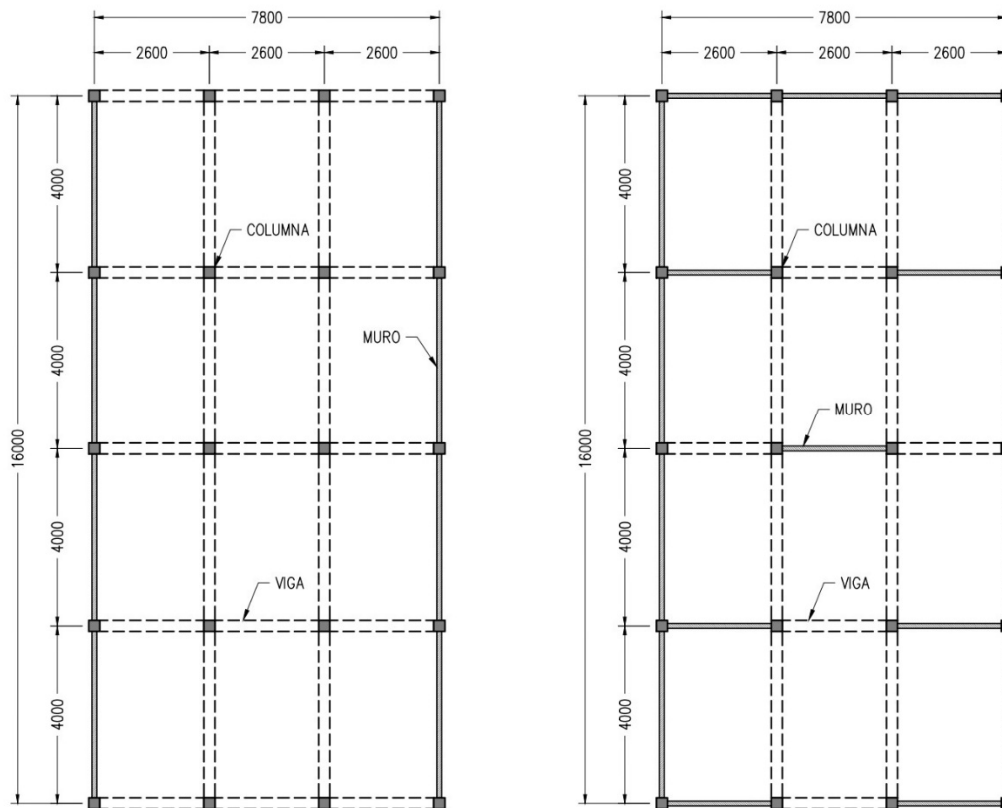


Figura 11. Idealización para análisis sísmico de viviendas de albañilería en Perú

Fuente: Elaboración propia

2.8 Duración significativa

Intervalo de tiempo en el cual se tiene a lugar el 90% central de la contribución a la integral del cuadrado de la aceleración. En otras palabras, es el intervalo en el cual se acumula entre el 5% y el 95% de la intensidad de Arias normalizada, el cual en la mayoría de los casos coincide con la fase fuerte del evento sísmico (Trifunac y Brady, 1975).

2.9 Medidas de dispersión

Obtener una medida estadística como la media o la mediana solo proporciona información parcial sobre un conjunto o distribución de datos. Se pueden tener estas medidas idénticas para diferentes muestras o población, sin embargo, difieren entre sí en otros aspectos como lo es el grado de dispersión. Los valores de una muestra o una población pueden concentrarse alrededor de la media, lo cual indicaría que se tiene poca variabilidad, o pueden estar más dispersos, lo cual indicaría que se tiene un alto grado de variabilidad (Devore, 2012). Las medidas de dispersión que se emplearán en la investigación se muestran en la Tabla N°2.

Tabla 2. Medidas de dispersión conocidas

Medida de dispersión	Notación	Fórmula
Desviación estándar	S_x	$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$
Coefficiente de variación	CV	$CV = \frac{S_x}{\mu}$

Fuente: Elaboración propia

2.10 Coeficiente de correlación de Pearson (r)

Medida estadística independiente de las escalas del gráfico de dispersión que representa el grado de asociación lineal entre el conjunto de pares de valores de dos variables continuas (Kelmansky, 2009). Esta viene expresada de la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ forman un conjunto de pares de datos de tamaño n , los cuales corresponden a observaciones de dos variables continuas X e Y .

2.11 Coeficiente de determinación (R^2)

Medida que mide la relación en la que se reduce la suma de las distancias verticales al cuadrado de los valores observados (x_i, y_i) alrededor de la recta de cuadrados mínimos en comparación con las distancias alrededor de la recta de ecuación $y = \bar{y}$ (Kelmansky, 2009). Se puede determinar usando la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{SCT - SCR}{SCT}$$

Donde

- Suma de cuadrado total (SCT): Mide las distancias verticales obtenidas de los pares observados (x_i, y_i) a la recta $y = \bar{y}$.

$$SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

- Suma de cuadrados de los residuos (SCR): Mide las distancias verticales obtenidas de los pares observados (x_i, y_i) a la recta $y = \hat{y} = a + bx$.

$$SCR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

2.12 Error cuadrático medio (MSE)

El sesgo y la varianza son medidas estadísticas que caracterizan las propiedades de un estimador. Lo que se busca es que estos sean los más pequeños posibles de tal forma que la precisión sea la más alta posible. Sin embargo, no se pueden minimizar ambas medidas ya que siempre hay un equilibrio. Una medida que combina estos dos factores es el error cuadrático medio (MSE), el cual resulta útil al momento de comparar diferentes estimadores que se encuentran sesgados. Esta se define de la siguiente expresión (Heumann y Schomaker, 2016):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Donde y_i y $\hat{y}_i$ son las observaciones de dos grupos y y $\hat{y}$.

Capítulo III. Selección de registros sísmicos

3.1 Generalidades

Como paso previo a todo análisis sísmico, se deben identificar los registros sísmicos que se aplicarán a la estructura en estudio. Existen diversos criterios para el tratamiento y selección de los registros sísmicos con el fin de reducir la variabilidad de la respuesta estructural debido a la selección de los registros sísmicos. Sin embargo, muchos de estos criterios han sido propuestos para análisis unidireccionales, por lo que en análisis bidireccionales presenta sus limitaciones. Es por ello que se ha propuesto una nueva metodología de selección de registros sísmicos que incorpora los efectos de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo. Así mismo, dentro de la metodología se ha incluido un nuevo criterio para el recorte de los datos con el fin de reducir los tiempos de procesamiento computacional debido a los análisis estructurales.

3.2 Fuentes de información

El grupo de registros sísmicos a los cuales se les realizará el tratamiento provienen de distintas fuentes de información, las cuales se pasarán a detallar a continuación.

3.2.1 Center for Engineering Strong Motion Data

Una de las fuentes es la página web del *Strong Motion Center* (ver Figura N°12), mediante la cual se tiene acceso a la información de registros sísmicos en varios países, además de poder ser descargada de manera libre. Se tuvo como filtro para la obtención de los registros sísmicos de esta fuente aquellos que contengan sismos con un *PGA* mayor a 400 gal. Considerando ello, se obtuvieron registros sísmicos cuyas estaciones acelerográficas están ubicadas en Japón, Estados Unidos, Taiwán y México.

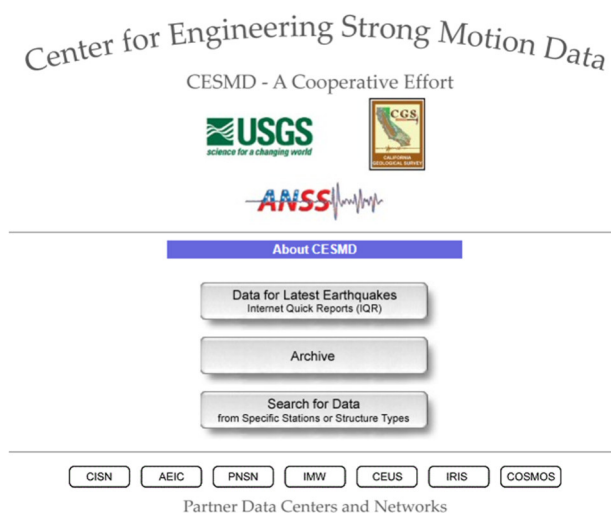


Figura 12. Página principal del *Strong Motion Center*

Fuente: Center for Engineering Strong Motion Data (s.f.)

3.2.2 Centro Sismológico de la UCH

Otra fuente que se empleó fue la página web del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (UCH), en la cual mediante el ingreso de cierta información que se requiere como un rango de fechas, magnitudes, profundidades, etc., se obtienen los registros sísmicos que cumplan con tales condiciones. La información de los registros sísmicos puede ser descargada libremente a través de la página web. En la Figura N°13 se muestra la interfaz de la página web de la UCN de la cual se obtuvieron los registros sísmicos ocurridos en Chile.

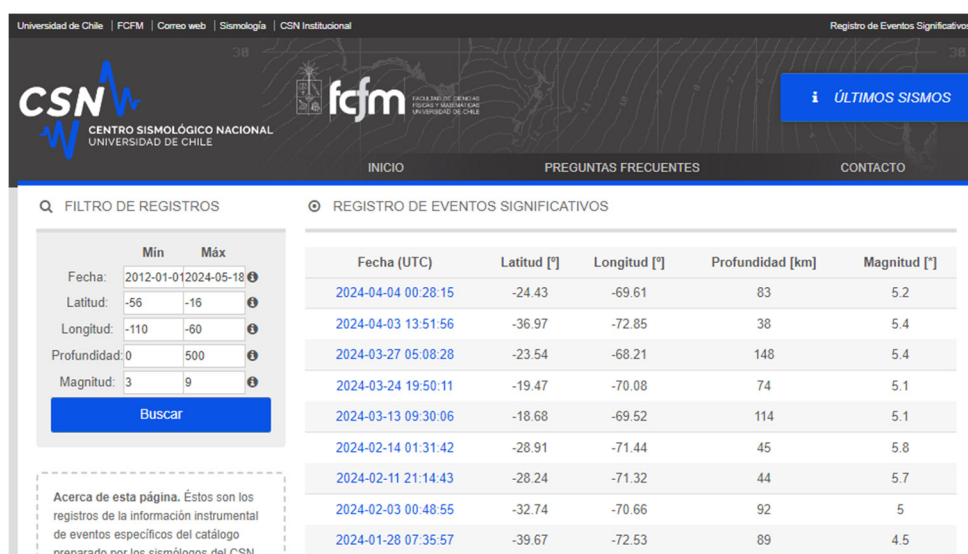


Figura 13. Página principal del Centro Sismológico Nacional de la UCH

Fuente: Centro Sismológico Nacional de la UCH (s.f.)

3.2.3 CEOIS

Otra fuente que se empleará para la obtención de los registros sísmicos es la página web del CEOIS, nombre que recibe el Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica en el territorio peruano perteneciente al Centro peruano japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Esta se encuentra conformada por 3 redes de monitoreo (CEOIS, s.f.):

- Red de acelerómetros para el monitoreo del movimiento fuerte del suelo (REDACIS)
- Red de acelerómetros para el monitoreo de la respuesta sísmica de edificaciones y evaluación de su salud estructural (REMOED)
- Red GPS para el monitoreo del movimiento de la corteza terrestre (REMCOT)

En ella, se encuentran registrados los últimos eventos sísmicos acontecidos en el país y sus datos generados se encuentran disponibles de manera gratuita en la página web. En la Figura N°14 se muestran las diferentes estaciones acelerográficas con las que cuenta el CISMID.

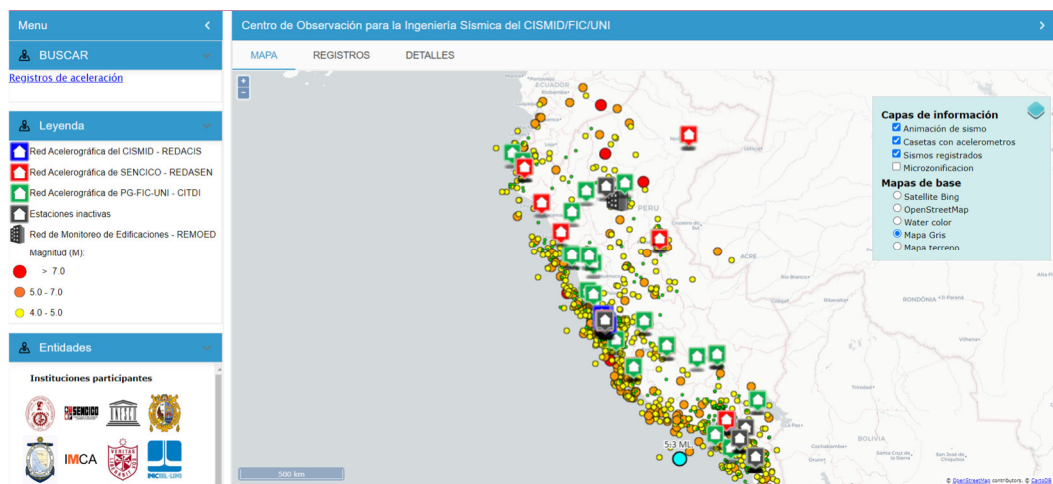


Figura 14. Página web de CEOIS

Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica (s.f.)

3.2.4 Instituto Geofísico del Perú

Como otra fuente de información se tuvo la Red Acelerométrica Nacional, red perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP). Esta se encuentra compuesta de acelerómetros del propio IGP, acelerómetros del Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) y acelerómetros del Consejo Nacional del Colegio de Ingenieros del Perú (CN CIP). Los registros brindados datan del año 2005 y pueden ser descargados de manera libre a través de su página web. En la Figura N°15 se muestran la distribución de los acelerógrafos con los que cuenta la red y diferenciados por el instituto al que pertenece.

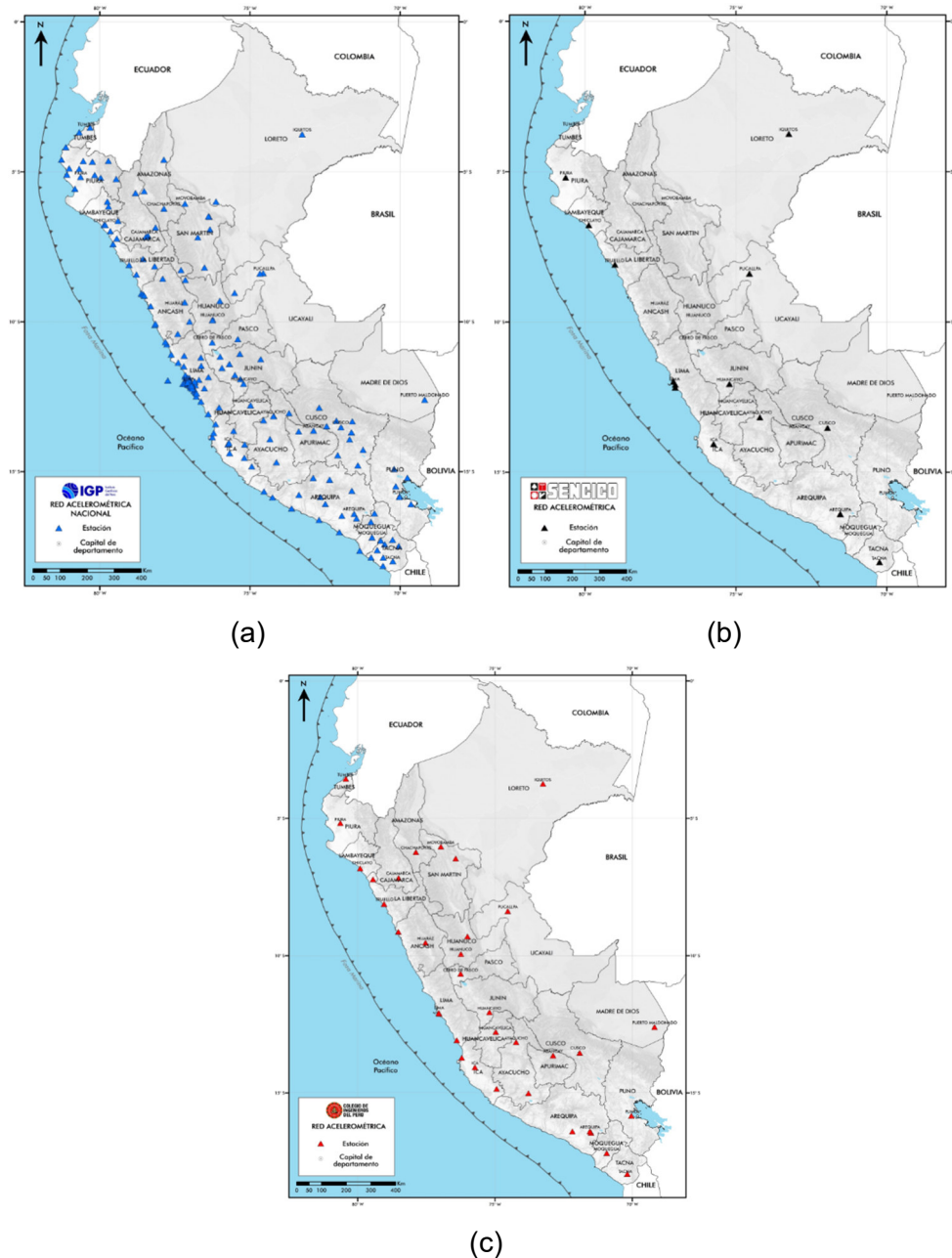


Figura 15. (a) Distribución de acelerómetros del IGP, (b) Distribución de acelerómetros de SENCICO y (c) Distribución de acelerómetros del CNIP

Fuente: Instituto Geofísico del Perú (s.f.)

De las fuentes de información disponibles se obtuvo una base de datos conformada por 286 registros sísmicos bidireccionales, de los cuales se tienen 15 registros sísmicos chilenos, 41 peruanos y 230 de otros países.

3.3 Reducción del número de datos del registro

Con el fin de reducir el tiempo de procesamiento de los datos, se optó por realizar un recorte a la data con la que contaba cada registro. En un análisis unidireccional se puede reducir el número de puntos siguiendo el concepto de duración significativa, el cual se define como rango de tiempo en el que se libera la energía principal del sismo (Husid, 1969). Este criterio se basa en la aceleración cuadrada acumulada normalizada, definida a partir de la siguiente expresión:

$$H(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2}{\int_0^{t_{dur}} [a(t)]^2}$$

En base a ese concepto se sigue el procedimiento de recorte de datos que consiste en tomar solo los datos en los que la intensidad de Arias normalizada se encuentre entre el 5% y el 95%. Para un panorama más claro se muestra la Figura N°16, gráfica donde las abscisas indican el tiempo transcurrido y las ordenadas, la intensidad de Arias normalizada. Entonces, para el recorte de la data, se determinará el rango limitado por el tiempo en el que se logra el 5% ($t_{5\%}$) y el 95% ($t_{95\%}$) de la intensidad de Arias normalizada, este rango estará denotado por $t_{5\%-95\%}$ y viene representado por el rango sombreado en la gráfica.

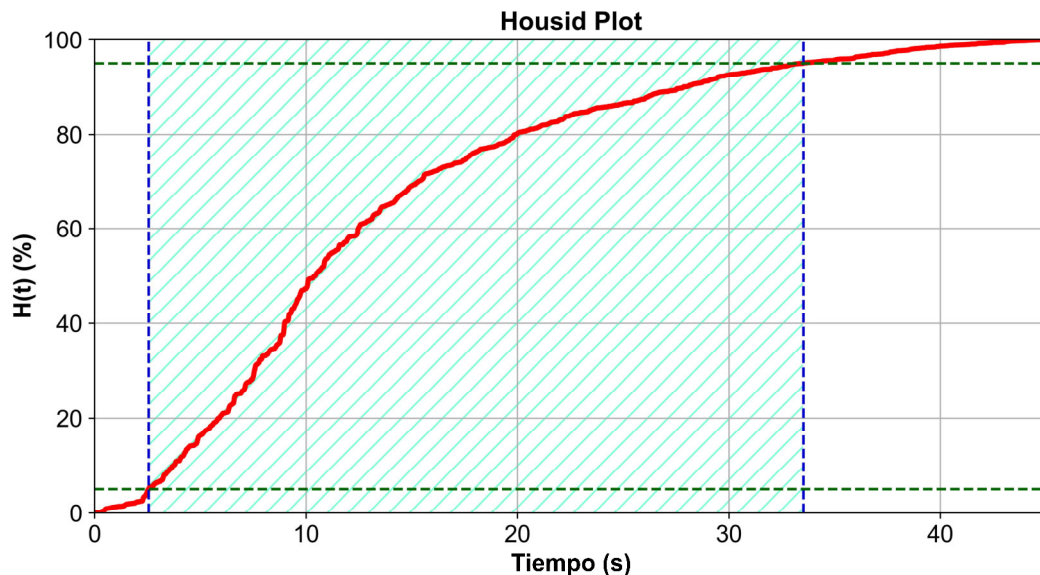


Figura 16. Variación en el tiempo de la intensidad de Arias Normalizada

Fuente: Elaboración propia

La Figura N°17 muestra el registro de aceleración correspondiente a la gráfica anterior. Realizando este procedimiento se ha extraído el rango de duración significativa,

el cual se encuentra resaltado en rojo. Todo lo que esté fuera de este rango que es lo señalado en plomo se eliminará del registro sísmico.

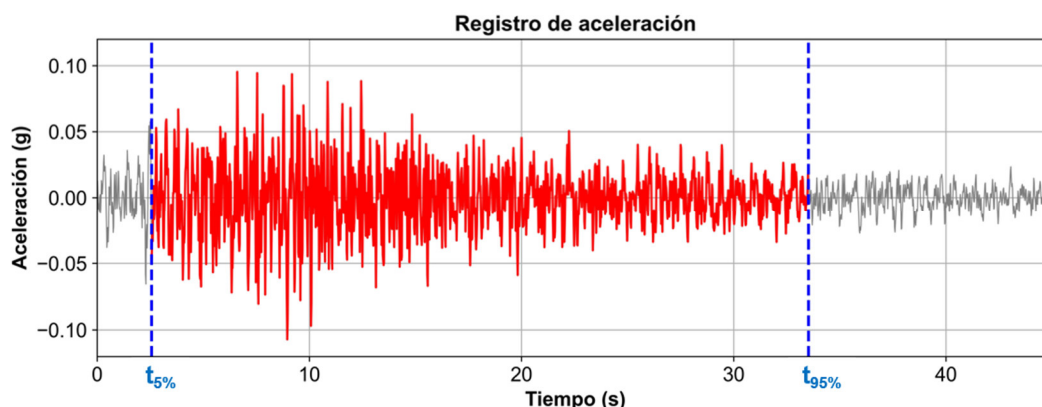


Figura 17. Recorte de datos del registro sísmico

Fuente: Elaboración propia

Si este procedimiento se realiza de manera independiente para cada una de las direcciones (E-W y N-S), se obtienen dos rangos de duración significativa, lo cual se puede apreciar en la Figura N°18. Tomando en cuenta que para realizar un análisis bidireccional el número de datos en una dirección debe ser el mismo que en la otra dirección, se propuso una nueva metodología.

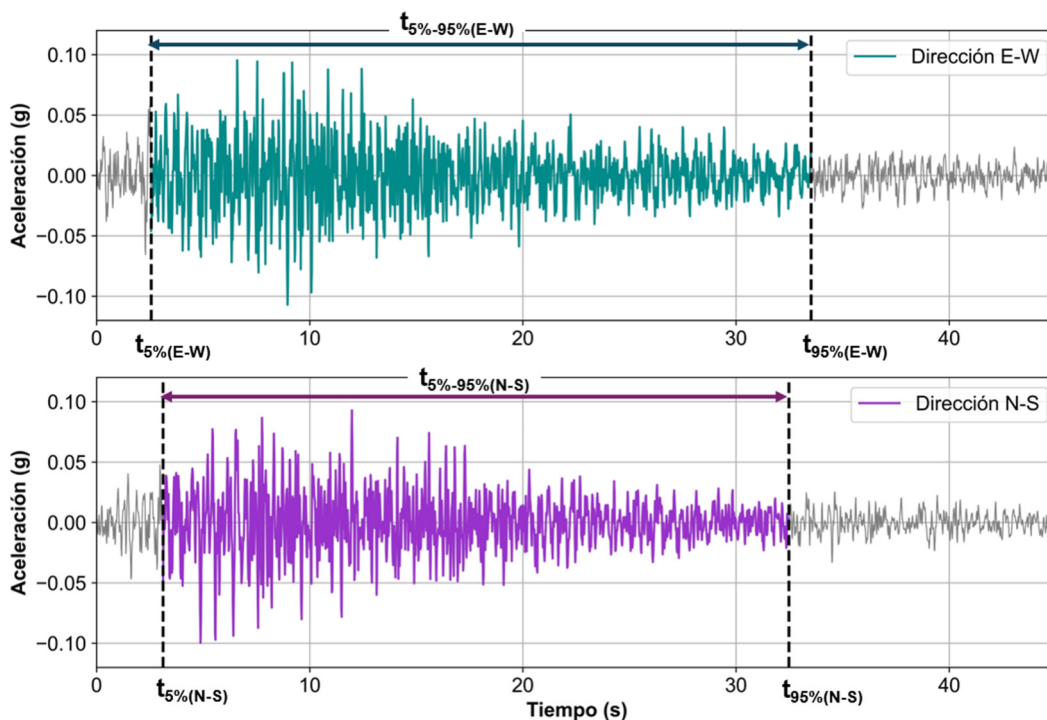


Figura 18. Rangos de duración significativa para ambas direcciones del sismo

Fuente: Elaboración propia

Esta metodología consistió en recortar los datos considerando un rango de tiempo que englobe ambos rangos de duración significativa, de esta forma se cumple con este concepto en ambas direcciones. La Figura N°19 muestra un ejemplo esquemático del procedimiento, en este esquema se tienen dos rangos de tiempo, uno obtenido para la componente E-W ($t_{5\%-95\%(E-W)} = [t_{5\%(E-W)}; t_{95\%(E-W)}]$) y otro para la componente N-S ($t_{5\%-95\%(N-S)} = [t_{5\%(N-S)}; t_{95\%(N-S)}]$). Entonces el rango de tiempo seleccionado para el recorte de la data siguiendo el criterio antes mencionado sería la unión de ambos intervalos que sería $t = [t_{5\%(E-W)}; t_{95\%(N-S)}]$.

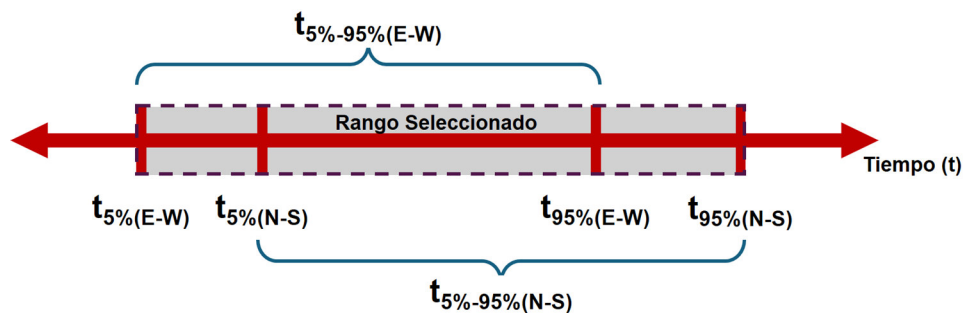


Figura 19. Esquema para el recorte de datos en un análisis bidireccional

Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo aplicativo se puede apreciar en la Figura N°20, donde se están traslapando las gráficas de la variación de la intensidad de Arias acumulada a lo largo del tiempo con respecto a la intensidad de Arias total de las dos componentes del registro sísmico (E-W y N-S). En ella se pueden distinguir los dos rangos de tiempo obtenidos para cada componente para luego elegir el intervalo de tiempo que abarque ambos rangos, el cual se encuentra sombreado en la gráfica.

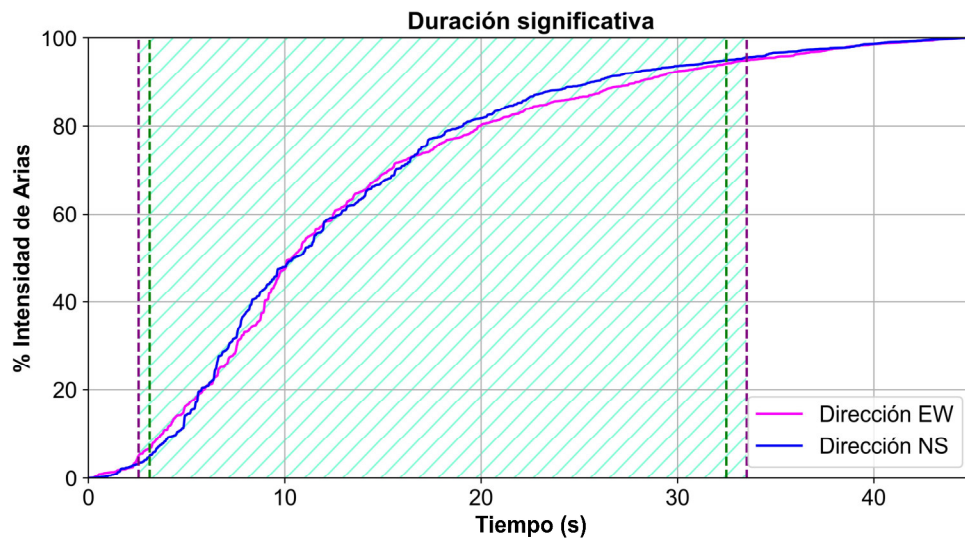


Figura 20. Variación en el tiempo de la intensidad de Arias Normalizada

Fuente: Elaboración propia

Si esta aplicación se muestra a través de una gráfica de aceleraciones de ambas componentes del sismo (ver Figura N°21), se puede apreciar el recorte de la data de color plomo. De esta manera se obtuvieron dos registros de aceleraciones del mismo sismo, en el mismo intervalo de tiempo y con la misma cantidad de puntos de aceleración. Con ello, se asegura que en ambas direcciones se cumpla con el rango de duración significativa que le corresponde. Este procedimiento se realizó a toda la base de datos de registros sísmicos con los que se contaba.

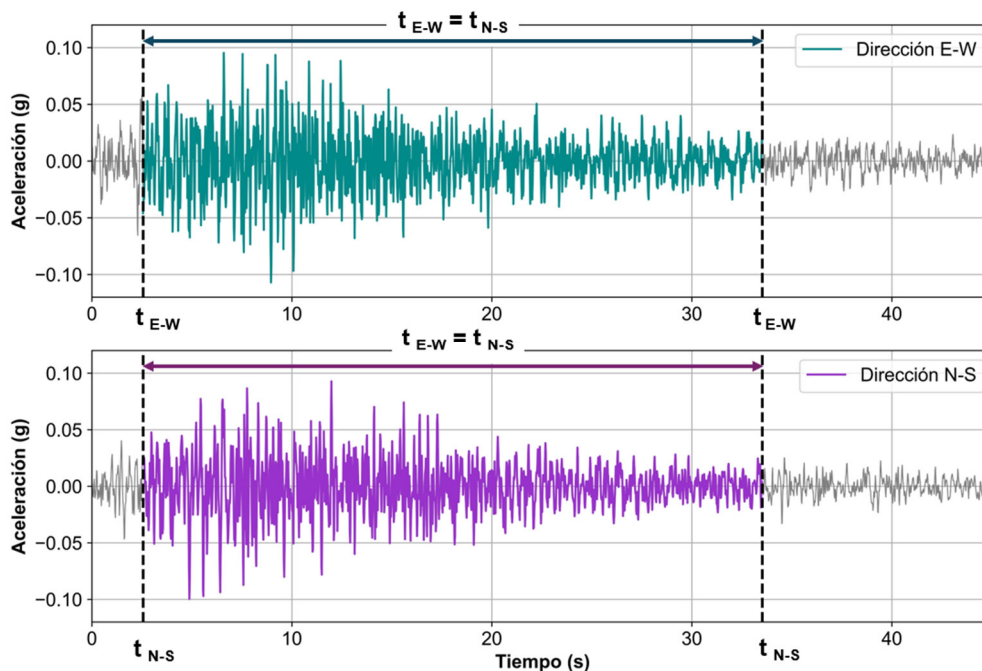


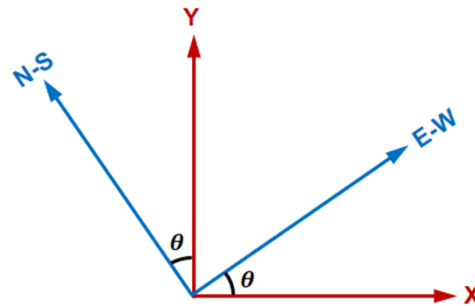
Figura 21. Modificación del proceso de recorte de para un análisis bidireccional

Fuente: Elaboración propia

3.4 Cálculo del espectro RotD50

Al realizar un análisis bidireccional se tienen dos espectros de respuesta debido a las dos componentes del sismo. Es por esta razón que se propone el uso de un nuevo espectro de respuesta, el RotD50, espectro resultante de un análisis de medias de las medias geométricas obtenidas de girar las componentes sísmicas en un rango de 0° a 90° . De esta forma se emplearía un solo espectro que represente a ambas componentes del sismo.

La Figura N°22 muestra esquemáticamente el procedimiento para obtener el valor del espectro RotD50 para un periodo T_i . Este consiste en descomponer las aceleraciones espectrales de cada componente del sismo en función al ángulo que forman estos con las direcciones principales X e Y de la estructura. Este ángulo se hace variar cada grado en un intervalo que va desde 0° a 90° , en donde se considera que en el ángulo 0, el $S_{ax-0^\circ} = S_{E-W}$ y $S_{ay-0^\circ} = S_{N-S}$. Entonces, para la descomposición de las aceleraciones espectrales se emplean las siguientes expresiones.



$$S_{ax-\theta} = S_{ax-0^\circ}(\cos\theta) - S_{ay-0^\circ}(\sin\theta)$$

$$S_{ay-\theta} = S_{ax-0^\circ}(\sin\theta) + S_{ay-0^\circ}(\cos\theta)$$

Para cada ángulo se obtienen las componentes espectrales S_{ax} y S_{ay} . Con estas dos aceleraciones se determina un promedio geométrico que represente la aceleración espectral para cada ángulo. Finalmente, el RotD50 para el periodo T_i sería la mediana de las 91 medias geométricas obtenidas. La construcción del espectro RotD50 consistiría en realizar el procedimiento mencionado de manera continua para el rango de periodos elegidos.

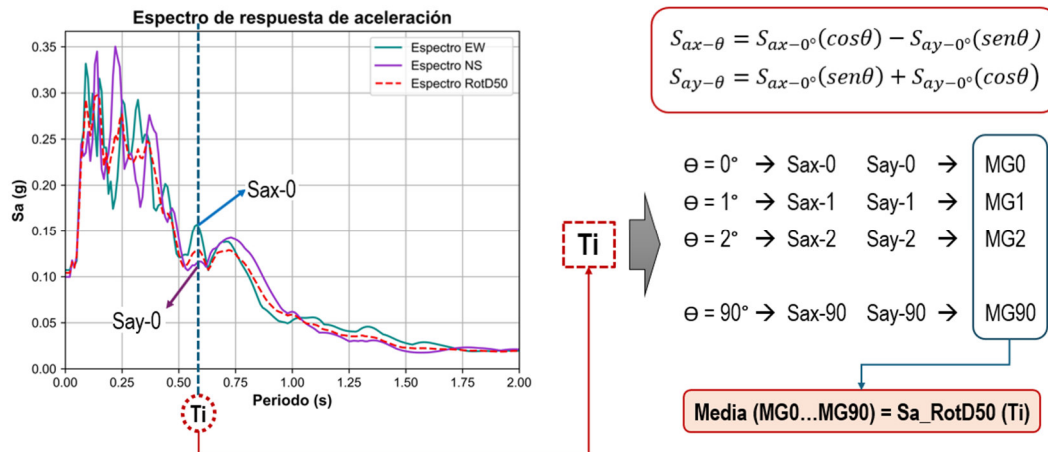


Figura 22. Esquema para la obtención del RotD50 para un periodo dado

Fuente: Elaboración propia

Entonces, para la presente investigación se obtuvieron los espectros RotD50 para cada registro sísmico con el fin de aplicarlo luego en la selección de los registros sísmicos. Para reducir el tiempo de cálculo, se automatizó este procedimiento mediante una codificación en Python. El tiempo de corrida del programa será mostrado en el Capítulo V.

3.5 Metodología para la selección de registros bidireccionales

La selección de los registros sísmicos en un análisis unidireccional consiste en escalar los espectros de respuesta a un espectro objetivo, el cual muchas veces ha sido representado por el espectro de la norma E.030 Ingeniería Sismorresistente (versión 2018, de acá en adelante). Los registros sísmicos que menor error (MSE) tengan del *Spectral Matching* serán los elegidos (Moscoso y Saito, 2023).

Dado que la presente investigación buscaba realizar análisis bidireccionales, se planteó una modificación a la metodología de selección descrita líneas arriba. Para ello, se tomó como referencia a Beyer y Bommer (2007), quienes propusieron una metodología que considera el efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia a través del espectro de respuesta denominado RotD50. Esta consiste en realizar el *Spectral Matching* empleando como espectro el espectro RotD50.

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, se propuso como espectro objetivo al espectro de la norma E.030 y como espectro a escalar, los espectros RotD50 calculados. De esta forma, se considera el efecto de las dos componentes del registro sísmico y del ángulo de incidencia al calcular un promedio de los espectros al ser giradas

las componentes sísmicas. Así mismo, se calculó el *Minimun Square Error* (MSE) de todos los espectros.

A fin de considerar registros sísmicos que tengan un menor MSE y la menor cantidad de puntos de muestras para reducir el tiempo computacional, se procedió a evaluar los MSE obtenidos para cada registro.

La Figura N°23 muestra una comparación tomando como referencia el máximo MSE obtenido. En la figura, el valor de las abscisas representa el porcentaje del total del número de registros sísmicos, mientras que el valor de las ordenadas representa el porcentaje del máximo MSE obtenido. Se observa que más del 90% del total del número de registros sísmicos no supera el 50% del máximo MSE. Esto indica que la selección de registros sísmicos no influye significativamente en el MSE.

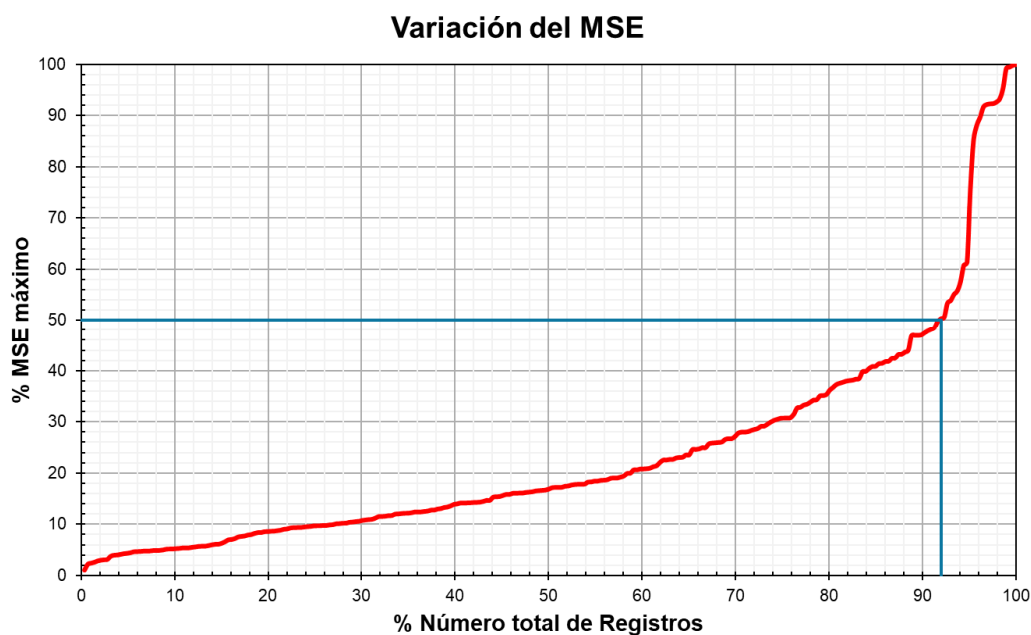


Figura 23. Variación del MSE de los registros sísmicos

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se realizó una comparación entre la cantidad de registros sísmicos en función del máximo número de muestras como se aprecia en la Tabla N°3. Finalmente, se consideraron los 52 registros sísmicos que tienen menos de 2000 muestras a fin de reducir el tiempo computacional de los análisis estructurales.

Tabla 3. Número de registros sísmicos disponibles según el número de muestras

Número de muestras	Número de registros sísmicos
Sin condición	286
< 10 000	189
< 8 000	155
< 6 000	127
< 5 000	110
< 4 000	96
< 3 000	71
< 2 000	52
< 1 000	34

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N°24 se muestran los porcentajes del máximo MSE con respecto al número de registros sísmicos seleccionados, los cuales se encuentran por debajo del 50%.

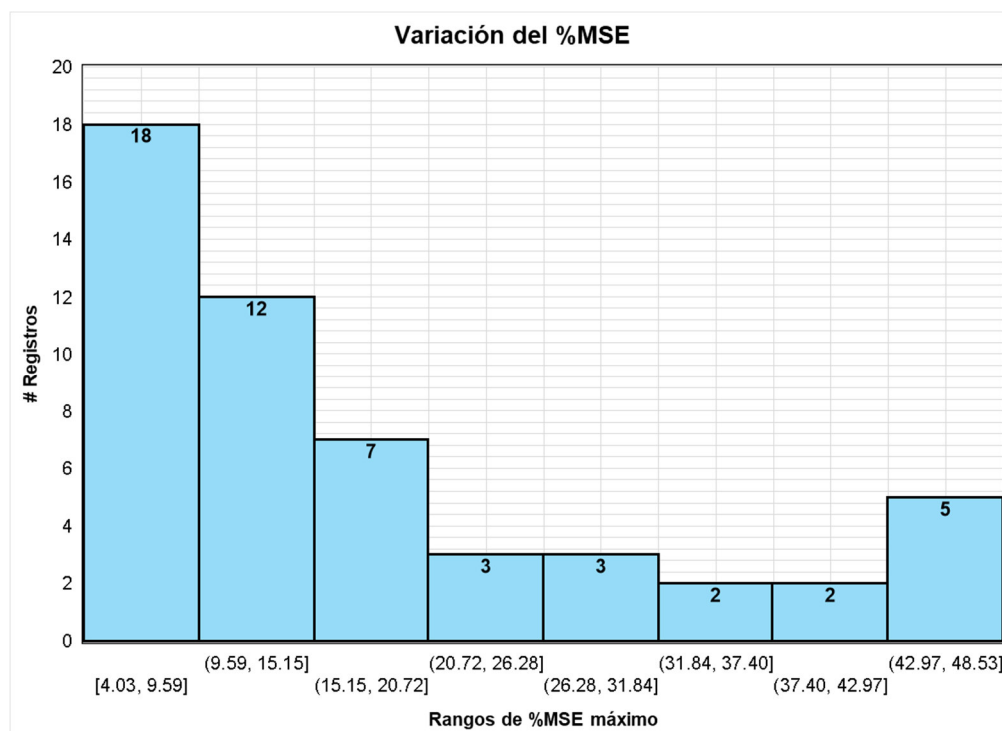


Figura 24. Variación del MSE de los registros sísmicos

Fuente: Elaboración propia

3.6 Selección de los registros sísmicos

Siguiendo los pasos mencionados en este capítulo se seleccionaron 52 registros sísmicos, cuyas características de la estación y el evento sísmico registrado se muestran en la Tabla N°4. Así mismo, estos registros sísmicos fueron normalizados según el factor de escala obtenido del *Spectral Matching* de la selección de registros sísmicos como se

muestra en la Figura N°25. El procedimiento descrito en este capítulo se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Figura N°26.

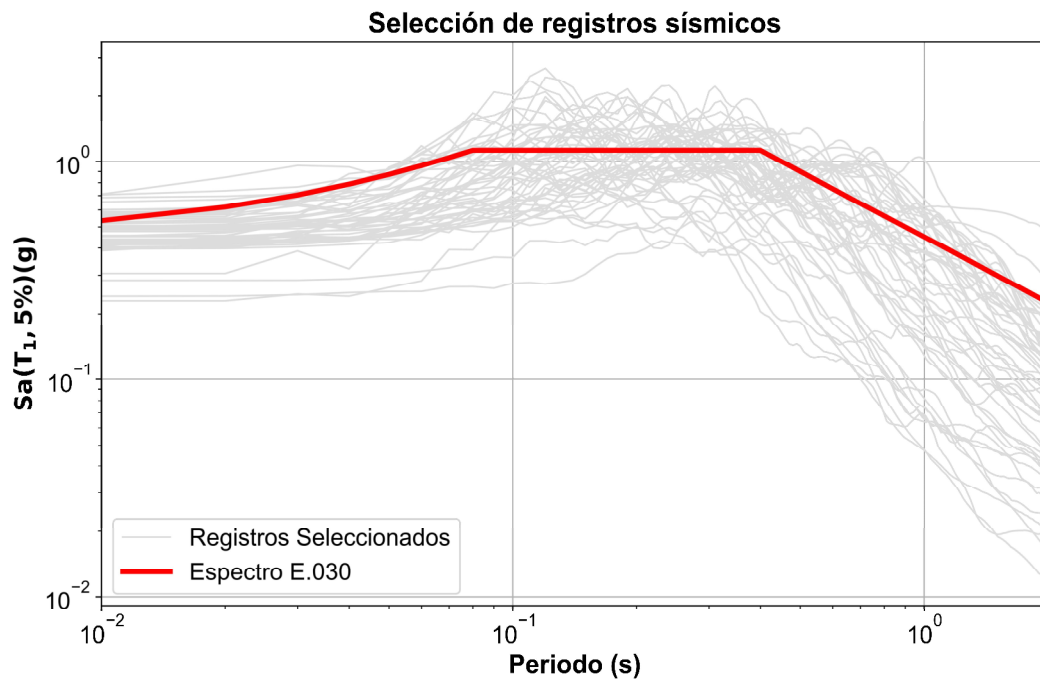


Figura 25. Escalamiento de los registros sísmicos seleccionados al espectro de la norma E.030 de Diseño Sismorresistente

Fuente: Elaboración propia

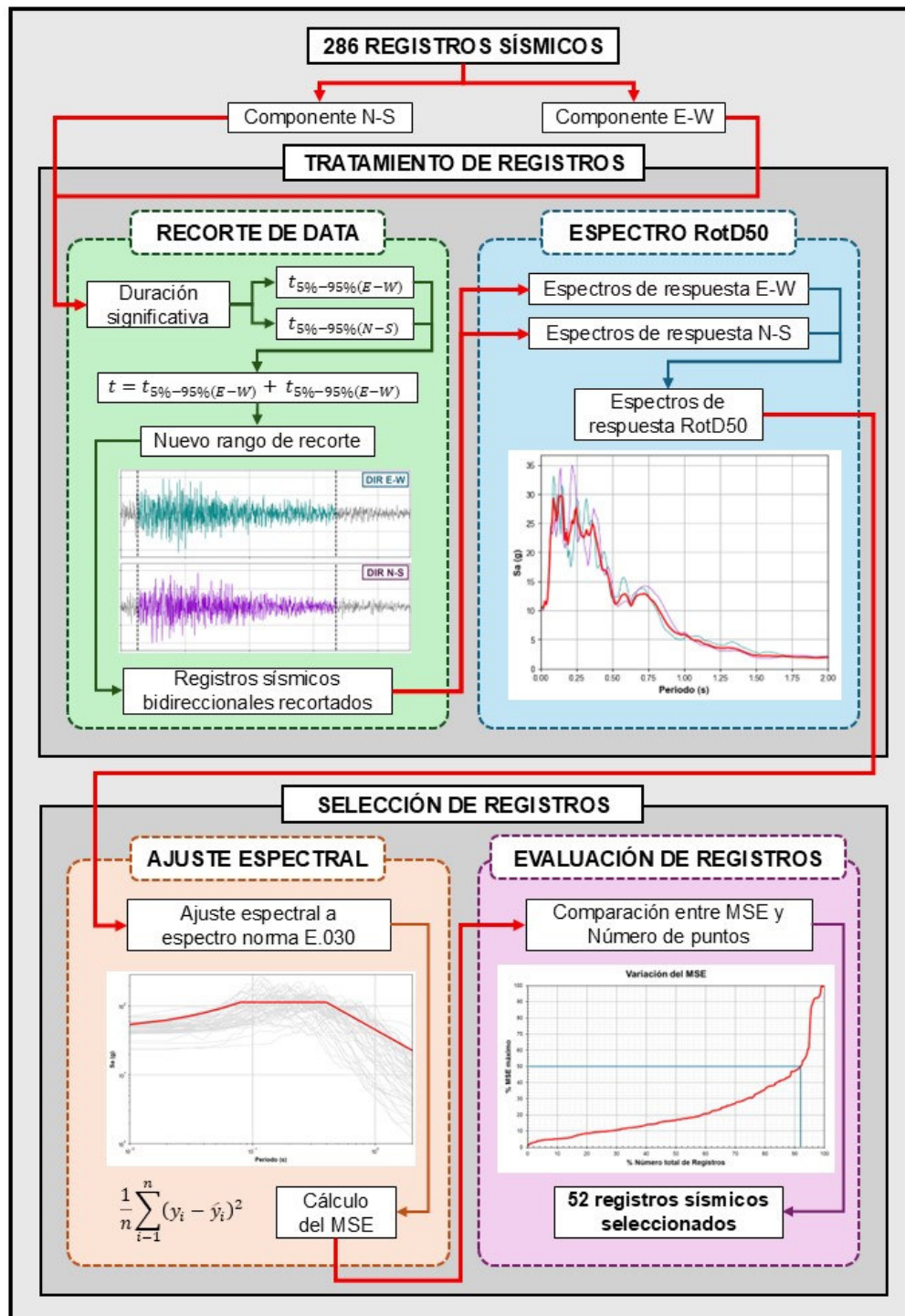


Figura 26. Metodología propuesta para la selección de registros sísmicos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Resumen de las características de los registros sísmicos seleccionados

Nº	Nombre asignado al registro sísmico	Ubicación	Estación de Referencia	Magnitud	Fecha	Distancia Epicentral (km)	H (km)	PGA (E-W) (cm/s ²)	PGA (N-S) (cm/s ²)
1	US_1986_North Palm Springs	USA	33.962N, 116.509W / Desert Hot Springs	MI = 5.9	8/07/1986	9.90	12.00	445.30	399.60
2	US_1994_Northridge_02	USA	34.236N, 118.439W / Arleta-Nordhoff Ave Fire Station	Mw = 6.7	17/01/1994	9.41	18.00	448.50	500.90
3	JP_1997_Kagoshima	Japón	31.9006N, 130.4513E / KGS005	Mw = 6.3	26/03/1997	12.50	8.00	627.10	550.50
4	JP_2016_Kumamoto_01	Japón	32.753N, 130.762E / KMM006	Mw = 7.3	16/04/2016	4.70	12.00	376.40	506.50
5	US_1989_Loma Prieta_03	USA	36.987N, 121.536W / Gilroy #3-Gilroy Sewage Plant	Ms = 7.1	18/10/1989	31.38	18.00	564.10	384.10
6	US_1989_Loma Prieta_06	USA	37.255N, 122.031W / Saratoga-Aloha Ave.	Ms = 7.1	18/10/1989	27.54	18.00	659.10	421.50
7	CH_2016_25DIC	Chile	43.10S, 73.70W / GO07	Ms = 7.6	25/12/2016	74.18	30.00	411.70	569.50
8	US_1991_Petrolia	USA	40.325N, 124.287W / Petrolia	MI = 6.0	17/08/1991	6.01	10.00	666.60	504.30
9	US_1994_Northridge_01	USA	34.068N, 118.439W / Los Angeles-UCLA Grounds	Mw = 6.7	17/01/1994	18.69	18.00	774.40	454.10
10	US_1989_Loma Prieta_01	USA	36.974N, 121.952W / Capitola-Fire Station	Ms = 7.1	4/12/1989	9.31	18.00	414.30	349.80
11	US_1992_Petrolia_02	USA	40.503N, 124.100W / Rio Dell-101 / Painter St. Overpass	Mw = 7.1	25/04/1992	23.68	15.00	510.50	358.60
12	US_1989_Loma Prieta_04	USA	37.046N, 121.803W / Corralitos-Eureka Canyon Rd.	Ms = 7.1	18/10/1989	7.19	18.00	525.00	399.00

N°	Nombre asignado al registro sísmico	Ubicación	Estación de Referencia	Magnitud	Fecha	Distancia Epicentral (km)	H (km)	PGA (E-W) (cm/s ²)	PGA (N-S) (cm/s ²)
13	TW_1999_ChiChi_09	Taiwán	24.692N, 121.013E / Hsinchu-Emei School	Mw = 7.7	21/09/1999	32.59	8.00	628.90	338.90
14	US_1994_Northridge_03	USA	34.387N, 118.530W / Newhall-La County Fire Station	Mw = 6.7	17/01/1994	19.09	18.00	344.00	340.10
15	PE_1974_09NOV_01	Perú	12.13S, 76.98W / The National Agrarian University, La Molina	Mb = 6	9/11/1974	79.14	12.80	468.30	374.30
16	TW_1999_ChiChi_01	Taiwán	23.632N, 120.605E / Yunlin-Shanfeng School	Mw = 7.7	21/09/1999	32.59	8.00	391.60	329.20
17	US_1989_Loma Prieta_05	USA	37.118N, 121.550W / Coyote Lake Dam-Southwest Abutment	Ms = 7.1	18/10/1989	30.95	18.00	238.80	756.40
18	JP_2003_Hokkaido_06	Japón	41.781N, 144.074E / HKD075	Mw = 8	26/09/2003	168.11	42.00	614.50	458.50
19	US_1989_Loma Prieta_02	USA	36.973N, 121.572W / Gilroy #1-Gavilan College, Water Tank	Ms = 7.1	18/10/1989	28.58	18.00	465.40	473.10
20	JP_2011_Miyagi_17	Japón	38.203N, 141.920E / MYG013	Mw = 7.1	7/04/2011	87.02	66.00	559.20	329.40
21	PE_1966_17OCT	Perú	12.07S, 77.04W / Parque de la Reserva, Cercado de Lima	Mw = 8.1	17/10/1966	236.20	24.00	426.80	634.10
22	JP_1997_13MAY	Japón	31.9006N, 130.4513E / KGS005	Mw = 6.2	13/05/1997	15.62	8.00	637.00	639.40
23	US_1981_Westmorland	USA	33.037N, 115.623W / Westmorland	Ms = 6.0	26/04/1981	6.93	4.00	465.60	376.70
24	JP_2016_Kumamoto_07	Japón	33.2569N, 131.3439E / OIT009	Mw = 7.3	16/04/2016	77.97	12.00	497.90	366.00

N°	Nombre asignado al registro sísmico	Ubicación	Estación de Referencia	Magnitud	Fecha	Distancia Epicentral (km)	H (km)	PGA (E-W) (cm/s ²)	PGA (N-S) (cm/s ²)
25	PE_1970_31MAY	Perú	12.07S, 77.04W / Parque de la Reserva, Cercado de Lima	Mb = 6.6	31/05/1970	360.45	64.00	420.20	391.20
26	US_1992_Petrolia_Aftershock_02	USA	40.325N, 124.287W / Petrolia	Ms = 6.6	26/04/1992	46.80	15.00	374.50	571.50
27	US_1987_WhittierNarrows_01	USA	34.037N, 118.178W / Los Angeles-Obregon Park	MI = 6.1	1/10/1987	9.64	9.00	611.30	580.70
28	US_1991_SierraMadre	USA	34.177N, 118.096W / Altadena-Eaton Canyon Park	Mw = 5.8	28/06/1991	12.80	12.00	678.10	271.30
29	US_2005_Anza_01	USA	33.706N, 116.235W / Indio-1-story Hospital	Mw = 5.2	12/06/2005	36.29	13.10	481.90	991.00
30	JP_2018_Hokkaido_03	Japón	42.690N, 142.007E / HKD103	Mw = 6.7	6/09/2018	24.14	37.00	470.70	398.20
31	JP_2007_Noto_01	Japón	37.220N, 136.685E / ISK006	Mw = 6.9	25/03/2007	6.65	11.00	541.90	458.70
32	US_1992_Petrolia_01	USA	40.325N, 124.287W / Petrolia	Mw = 7.1	25/04/1992	5.37	15.00	409.30	459.80
33	JP_2018_Hokkaido_07	Japón	42.8739N, 141.81917E / IBUH01	Mw = 6.7	6/09/2019	25.57	37.00	321.10	462.00
34	JP_1997_Shizuoka	Japón	34.9652N, 139.1031E / SZO002	Mw = 5	3/03/1997	5.59	3.00	677.90	350.80
35	US_1992_Big Bear	USA	34.238N, 116.935W / Big Bear Lake - Civic Center Grounds	MI = 6.5	28/06/1992	10.85	7.00	534.20	472.20
36	US_1992_Petrolia_Aftershock_01	USA	40.325N, 124.287W / Petrolia	Ms = 6.6	26/04/1992	28.89	20.00	468.60	344.00
37	JP_2008_Iwate_02	Japón	39.1740N, 140.7129E / AKTH04	Mw = 7.2	14/06/2008	21.72	8.00	905.00	489.20

N°	Nombre asignado al registro sísmico	Ubicación	Estación de Referencia	Magnitud	Fecha	Distancia Epicentral (km)	H (km)	PGA (E-W) (cm/s ²)	PGA (N-S) (cm/s ²)
38	US_1987_WhittierNarrows_02	USA	34.160N, 118.534W / Tarzana-Cedar Hill Nursery	MI = 6.1	1/10/1987	43.45	9.00	433.60	574.90
39	JP_2016_Kumamoto_05	Japón	32.9984N, 130.8301E / KMMH03	Mw = 7.3	16/04/2016	27.95	12.00	178.80	616.30
40	JP_2018_Hokkaido_05	Japón	42.7655N, 141.8221E / HKD128	Mw = 6.7	6/09/2018	17.31	37.00	286.50	237.30
41	US_2005_Anza_02	USA	33.706N, 116.235W / Indio-1-story Hospital	Mw = 5.2	12/06/2005	36.29	13.10	616.80	726.20
42	JP_2004_Chuetsu_04	Japón	37.1281N, 138.7468E / NIG021	Mw = 6.8	23/10/2004	20.99	13.00	366.90	736.50
43	US_1992_Petrolia_Aftershock_03	USA	40.026N, 124.069W / Shelter Cove-Airport	Ms = 6.6	26/04/1992	77.56	15.00	325.50	552.60
44	JP_2011_19MAR_01	Japón	36.5915N, 140.6453E / IBR003	Mw = 6.1	19/03/2011	22.29	5.00	579.10	558.40
45	PE_1974_05ENE_01	Perú	120.020S, 77.010W / Estación Zarate	Mb = 6.1	5/01/1974	88.40	91.70	522.10	587.40
46	PE_1974_09NOV_02	Perú	12.07S, 77.04W / Parque de la Reserva, Cercado de Lima	Mb = 6	9/11/1974	77.83	12.80	185.10	279.80
47	TW_1999_ChiChi_05	Taiwán	24.198N, 120.739E / Taichung-Guangcheng School	Mw = 7.7	21/09/1999	39.01	8.00	292.90	236.00
48	JP_1996_DEC21	Japón	36.7258N, 139.7155E / TCG009	Mw = 5.8	21/12/1996	67.54	53.00	348.50	450.60
49	MX_1985_Guerrero	México	17.3444N, 100.2145W / Parasio	Mw = 8.1	19/09/1985	197.15	15.00	631.50	834.30

N°	Nombre asignado al registro sísmico	Ubicación	Estación de Referencia	Magnitud	Fecha	Distancia Epicentral (km)	H (km)	PGA (E-W) (cm/s ²)	PGA (N-S) (cm/s ²)
50	JP_2011_19MAR_02	Japón	36.5516N, 140.4102E / IBR004	Mw = 6.1	19/03/2011	29.39	5.00	664.50	420.10
51	JP_2021_Miyagi_01	Japón	38.1802N, 140.6405E / MYGH07	Mw = 6.9	20/03/2021	91.95	59.00	532.10	549.00
52	PE_1974_05ENE_02	Perú	12.07S, 77.04W / Parque de la Reserva, Cercado de Lima	Mb = 6.1	5/01/1974	88.95	91.70	266.90	286.50

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Selección de edificios representativos

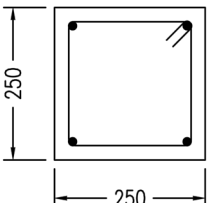
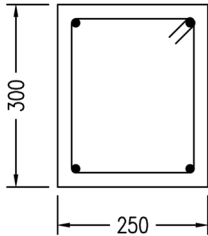
4.1 Generalidades

El presente capítulo desarrolla la metodología que se empleó para proponer los modelos estructurales a los cuales se les aplicaron los registros sísmicos seleccionados en el capítulo anterior. El Perú alberga una gran cantidad de viviendas con sistema híbridos, es por ello que se tomó como modelo de análisis este tipo de sistema. Este apartado explicará las consideraciones que se tomaron para determinar la distribución estructural, así como se mostrarán las características de los elementos. Así mismo, se explicarán de qué manera estas consideraciones fueron asignadas en el programa a emplear para el análisis.

4.2 Características de los elementos

Las estructuras que se propusieron cuentan con 4 elementos: vigas, columnas y losa de concreto armado y muros de albañilería. Cada uno de estos elementos consideran características y consideraciones típicas para el modelamiento estructural. Las características de las vigas y columnas de concreto armado están resumidas en la Tabla N°5. En el caso de la losa, se está considerando un modelo equivalente de una losa aligerada de 20 cm y que cumple la función de diafragma rígido.

Tabla 5. Características de los elementos de concreto armado

Elemento	Sección (mm)	Acero transversal	Acero Longitudinal	f_y (MPa)	f'_c (MPa)
Columna C2		4 Φ #4	1 est. #4 1@50 rto. @150	42	17.5
Viga B1		4 Φ #4	1 est. #4 1@50 rto. @150	42	21

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los muros de albañilería (M1), se consideraron muros de saga de unidades artesanales con las características representativas mostradas en la Tabla N°6.

Tabla 6. Propiedades de los muros de albañilería considerados en los modelos

Propiedad	Valor numérico
Resistencia característica a compresión axial de las unidades de albañilería	$f'_{cb} = 8.2 \text{ MPa}$
Espesor de ladrillo	$t_{ladrillo} = 110 \text{ mm}$
Resistencia característica a compresión axial del mortero	$f'_{cm} = 9.3 \text{ MPa}$
Espesor del mortero	$t_{mortero} = 10 \text{ mm}$

Fuente: Elaboración propia

4.3 Consideraciones para el modelo estructural

Los edificios fueron modelados como estructuras de resortes tridimensionales donde cada resorte representa un elemento estructural, los cuales se explicarán líneas abajo.

4.3.1 Vigas

Para las vigas se emplean resortes de flexión no lineales en ambos extremos del elemento (ver Figura N°27), este modelo se define como la relación momento-rotación bajo una carga asimétrica (ver Figura N°28) en donde la relación se supone que es infinita.

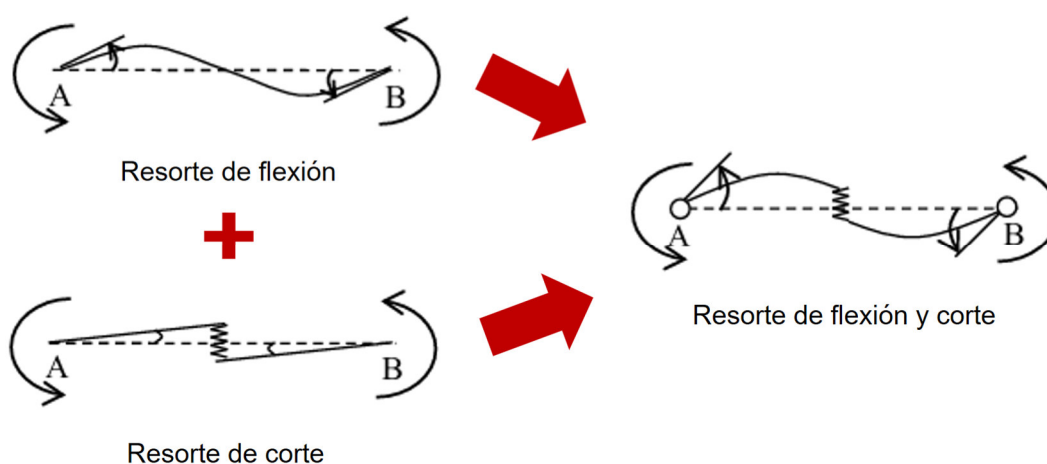


Figura 27. Modelo para las vigas-resortes de flexión y corte no lineales

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

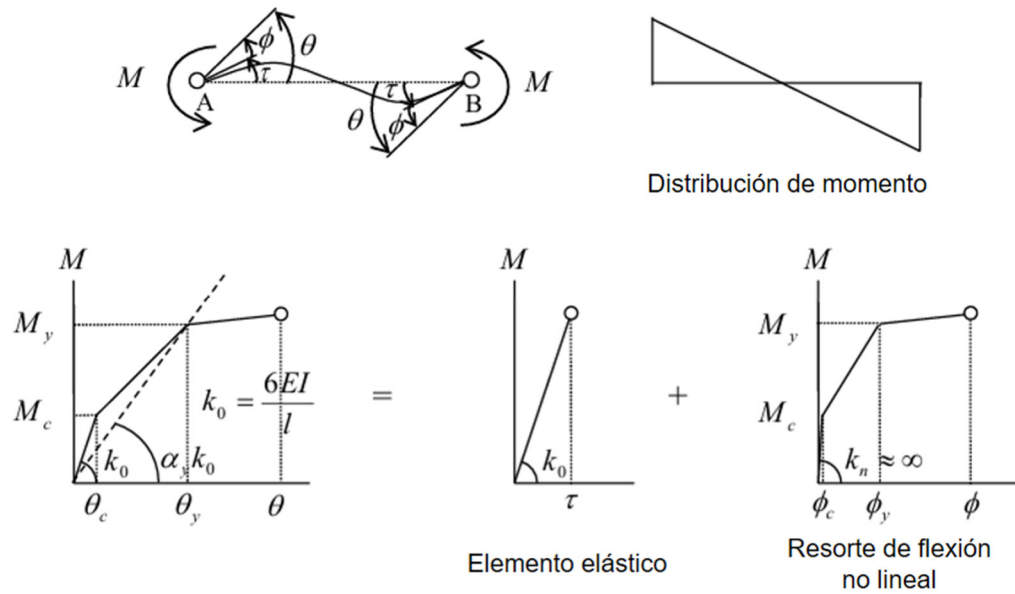


Figura 28. Relación momento-rotación del resorte al doblarse

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

Con el fin de considerar la diferencia de la capacidad de la flexión entre el lado positivo y negativo de la viga, se desarrolló un modelo de histéresis de los resortes de flexión de la viga de deslizamiento trilineal degradante (ver Figura N°29), el cual se encuentra basado en el modelo Takeda (Saito, s.f.).

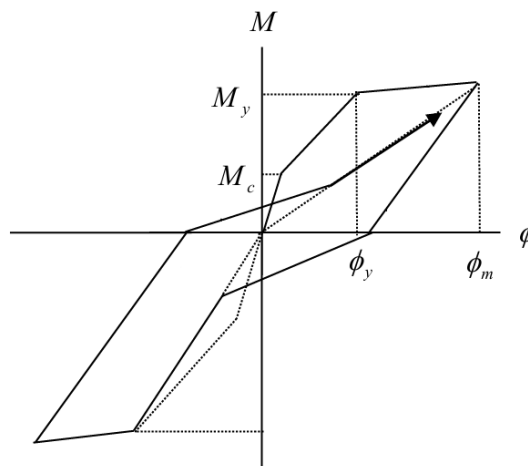


Figura 29. Modelo de histéresis degradante de deslizamiento trilineal

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

En el centro se consideran resortes de corte no lineal donde el modelo de histéresis está definido como la relación de rotación-fuerza que sigue un modelo polilineal orientado al origen (ver Figura N°30).

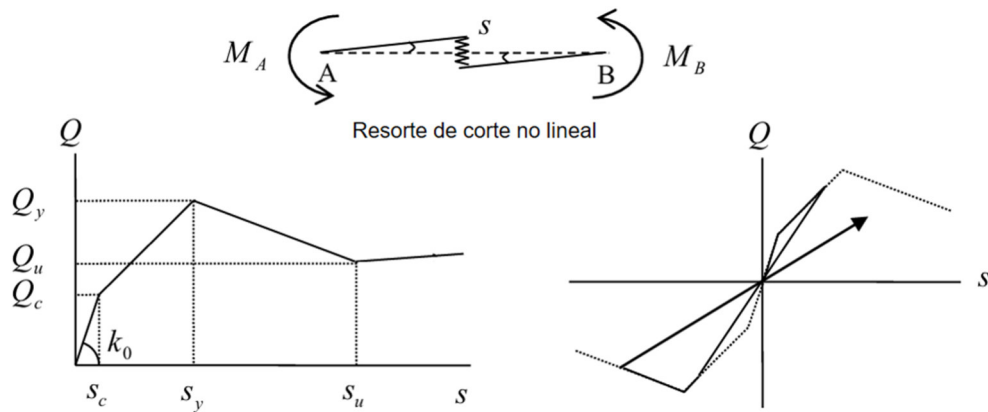


Figura 30. Modelo de histéresis polilineal orientado al origen

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

4.3.2 Columnas

En este caso, se empleó un modelo de un resorte de flexión no lineal donde la relación momento-rotación está bajo una carga antisimétrica y la rigidez inicial del resorte se supone infinita (ver Figura N°31).

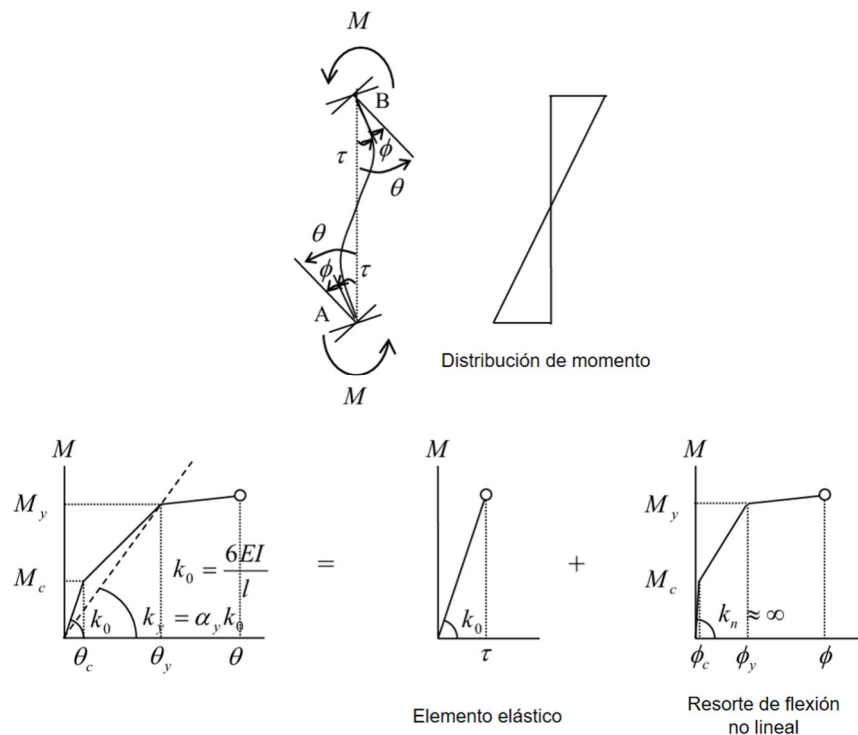


Figura 31. Relación momento-rotación del resorte al doblarse

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

Se emplearon modelos no lineales de sección de múltiples resortes en ambos extremos del elemento con el fin de considerar los efectos bidireccionales flexionales y axiales (ver Figura N°32).

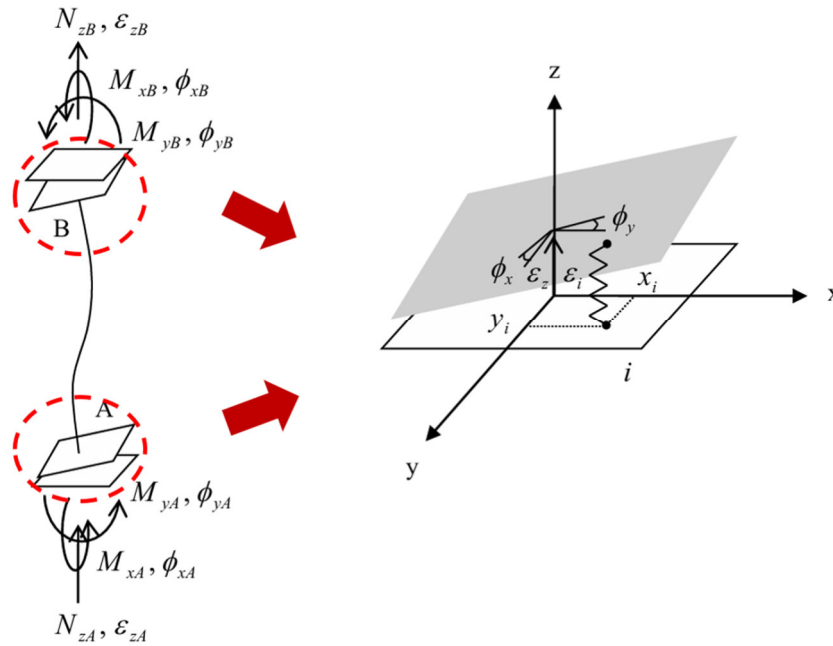


Figura 32. Modelo para las vigas-resortes de flexión y corte no lineales
Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

El modelo de resortes múltiples consiste en que el resorte de flexión no lineal es construido a través de resortes verticales no lineales los cuales se encuentran distribuidos en la sección del elemento. El tramo se divide en 5 zonas, de las cuales las 4 esquinas tienen resortes de acero y concreto y el área central tiene un resorte de concreto (ver Figura N°33). Además, se consideran modelos de histéresis bilineales para el acero (tracción y compresión) y el concreto (solo compresión) como se puede apreciar en la Figura N°34.

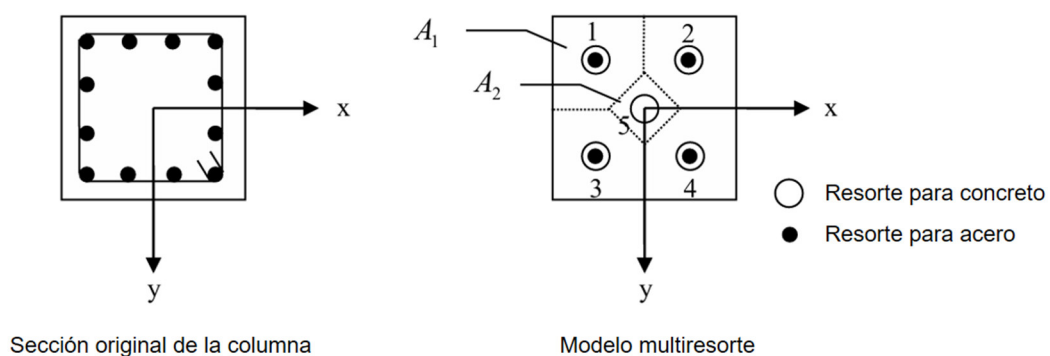


Figura 33. Relación momento-rotación del resorte al doblarse
Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

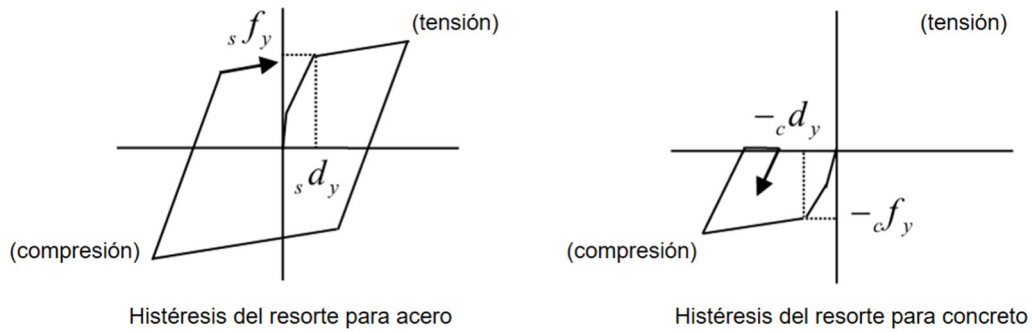


Figura 34. Modelos de histéresis bilineales para el acero y concreto

Fuente: Adaptado de Saito (s.f.)

Al igual que en las vigas, se consideraron en el centro de la columna resortes de corte no lineal donde el modelo de histéresis está definido como la relación de rotación-fuerza que sigue un modelo polilineal orientado al origen (ver Figura N°35).

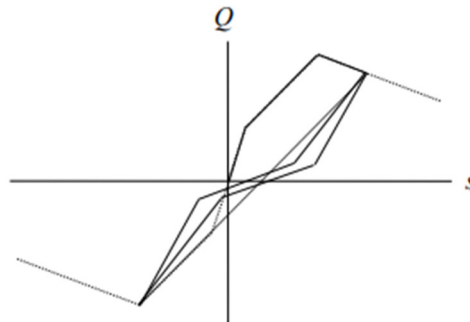


Figura 35. Modelo de histéresis polilineal

Fuente: Saito (s.f.)

4.3.3 Muros de albañilería

Para el caso de los muros de albañilería, el resorte de corte fue definido por un modelo de histéresis de deslizamiento polilineal (ver Figura N°36).

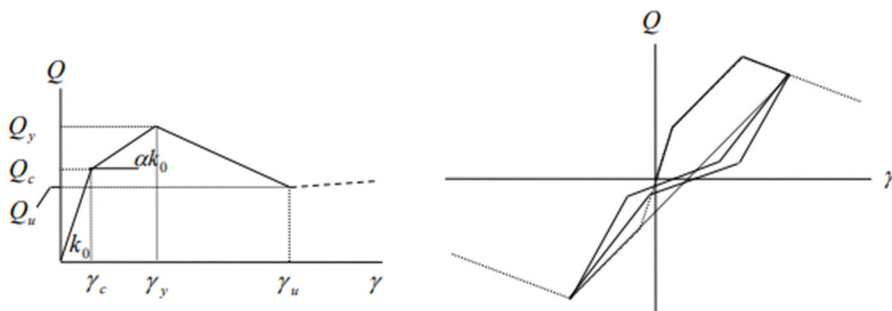


Figura 36. Modelo de histéresis polilineal

Fuente: Saito (s.f.)

4.4 Programa computacional empleado

El programa Stera 3D, programa desarrollado por el profesor Dr. Taiki Saito para fines educativos y de investigación, es una herramienta para el análisis sísmico de edificios en un espacio tridimensional con una interfaz visual. Este programa considera los puntos mencionados líneas arriba y permite modificar las propiedades de los elementos según el usuario. Además, debido a su programación, es ideal para la automatización de los análisis y de esta manera, abarcar una mayor cantidad de estos, brindando una mayor muestra para el análisis.

Por otro lado, es importante mencionar que el programa considera muros de albañilería del tipo de relleno (*infill walls*), mas no de albañilería confinada, los cuales tienen un diferente comportamiento estructural debido al proceso constructivo de cada uno. Por lo tanto, se tuvo que calibrar el comportamiento estructural a través de la curva de capacidad que seguirá el modelo de histéresis de los muros de albañilería, esto se explicará a mayor detalle a continuación.

4.5 Calibración de curva envolvente de histéresis de los muros de albañilería

Como se ha mencionado, el programa considera a los muros de albañilería del tipo relleno (*infill walls*), cuyo proceso constructivo consiste en rellenar con muros de albañilería los pórticos de concreto armado posterior a la construcción de los estos. Lo opuesto sucede con los muros de albañilería confinada, en donde primero se construyen los muros de albañilería y posteriormente se vacían los pórticos de concreto armado. Esta diferencia determina el comportamiento y modos de falla de cada uno de estos (ver Tabla N°7).

Tabla 7. Diferencias entre los modos de falla de los *infill walls* y de los muros de albañilería confinada

<i>Infill walls</i>	Albañilería confinada
- Falla por compresión diagonal del panel de albañilería	- Falla por fisuración diagonal por tracción del panel de albañilería
- Falla por deslizamiento del panel de albañilería	- Falla por compresión diagonal del panel de mampostería
	- Falla por deslizamiento de la mampostería
	- Falla por compresión de las columnas
	- Falla por tracción de la columna de tensión
	- Falla por cortante de las columnas

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta los comportamientos distintos que presentan estos sistemas, se procedió con la calibración del modelo de la curva envolvente de histéresis del muro de albañilería. Para ello, se explicará cómo el STERA 3D obtiene la resistencia al corte.

4.5.1 Resistencia al corte por la compresión diagonal del panel de albañilería

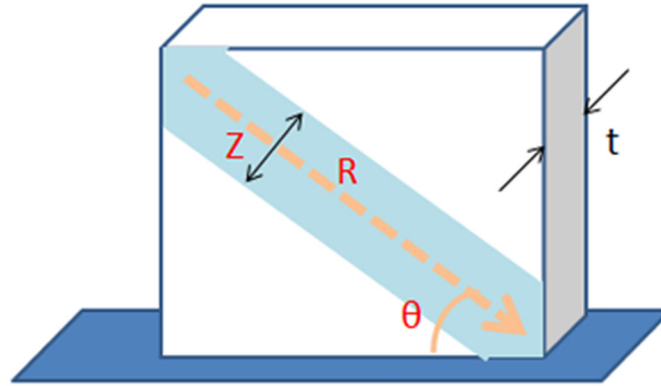


Figura 37. Esquema de un prisma de albañilería para determinar la resistencia a la compresión

Fuente: Saito (s.f.)

La Figura N°37 muestra un esquema de un prisma de albañilería en la que se muestran las variables que se emplearán para la determinación de la resistencia a la compresión del puntal diagonal, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$R = Z \cdot t \cdot f'_m$$

Donde:

f'_m : esfuerzo a la compresión del prisma de albañilería

Z : ancho del puntal diagonal ($Z = 0.25d$, d es la longitud diagonal)

t : espesor del muro

El f'_m puede obtenerse de dos maneras. Una de ellas es aplicando la fórmula de Paulay y Priestley (1992), la cual se define de la siguiente manera:

$$f'_m = \frac{f'_{cb}(f'_{tb} + \alpha f'_j)}{U_u(f'_{tb} + \alpha f'_{cb})}$$

$$\alpha = \frac{j}{4.1h_b}$$

Donde:

f'_{cb} : esfuerzo a la compresión del ladrillo

f'_{tb} : esfuerzo a la tracción del ladrillo ($f'_{tb} = 0.1f'_{cb}$)

f'_j : esfuerzo a la compresión del mortero

j : espesor de la junta de mortero

h_b : altura de la unidad de albañilería

U_u : coeficiente de no uniformidad de tensión ($U_u = 1.5$)

Así también, puede obtenerse el f'_m aplicando la fórmula propuesta por el Eurocódigo 6, en donde indican que el f'_m se halla a partir de la siguiente expresión:

$$f'_m = k \cdot (f'_{cb})^\alpha \cdot (f'_j)^\beta$$

Entonces el esfuerzo de corte se obtiene de la siguiente fórmula:

$$V_c = R \cos \theta = Z \cdot t \cdot f'_m \cdot \cos \theta$$

4.5.2 Resistencia al corte por deslizamiento del panel de albañilería

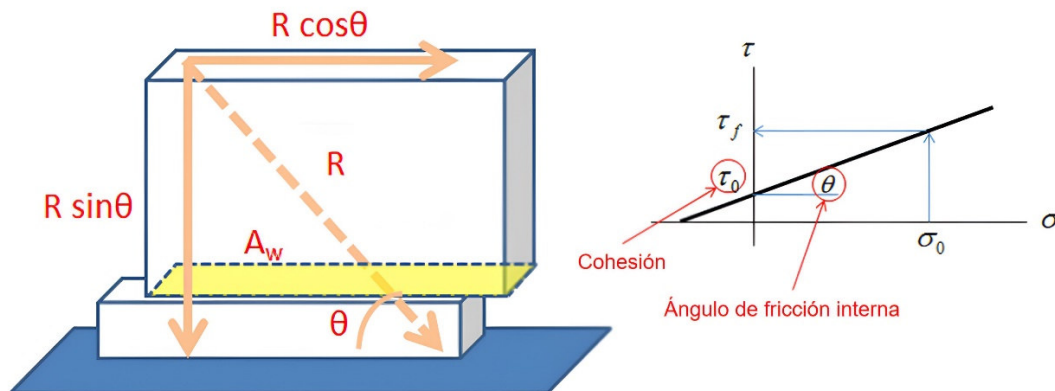


Figura 38. Esquema de un prisma de albañilería para determinar la resistencia al corte deslizante

Fuente: Saito (s.f.)

El esfuerzo cortante máximo se determina aplicando el criterio de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = \tau_0 + \mu \sigma_0 = \tau_0 + \tan \phi \cdot \sigma_0$$

Donde:

τ_0 : Capacidad cohesiva de las capas de mortero ($\tau_0 = 0.04f'_m$) (Paulay y Priestley, 1992)

μ : coeficiente de fricción por deslizamiento a lo largo de la junta del panel

$$\mu = 0.654 + 0.000515f'_j(f'_j \text{ en } kg/cm^2) \text{ (Cheng et al., 2003)}$$

σ_0 : esfuerzo a compresión ($\sigma_0 = W/A_w = Rsen\theta/A_w$)

Entonces, la resistencia al corte se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_f = \tau_f A_w = \left(\tau_0 + \mu \frac{W}{A_w} \right) A_w = \tau_0 A_w + \mu W$$

Sustituyendo $V_f = Rcos\theta$ y $W = Rsen\theta$. Estas expresiones provienen de la descomposición de la fuerza R en función del ángulo θ , ángulo que forma un puntal diagonal con el plano horizontal, como se puede apreciar en el esquema mostrado en la Figura N°38).

$$Rcos\theta = \tau_0 A_w + \mu Rsen\theta$$

$$Rcos\theta(1 - \mu tan\theta) = \tau_0 A_w$$

$$Rcos\theta = \frac{\tau_0 A_w}{1 - \mu tan\theta}$$

$$V_f = \frac{\tau_0 A_w}{1 - \mu tan\theta}$$

4.5.3 Resistencia al corte del panel de albañilería

La resistencia de corte Q_y es calculada como el valor mínimo entre la resistencia por deslizamiento V_f y la resistencia por compresión diagonal V_c :

$$Q_y = \min(V_f, V_c)$$

El desplazamiento de corte a la resistencia máxima γ_y se obtiene según la expresión propuesta por Madan et al. (1997):

$$\gamma_y = \frac{\varepsilon'_m \cdot d_m}{cos\theta}$$

Donde ε'_m es la deformación por compresión en el esfuerzo de compresión máximo. Según Hossein y Kabeyasawa (2004) $\varepsilon'_m = 0.0018$.

Por otro lado, Madan et al. (1997) proponen que la rigidez elástica inicial se suponga como la siguiente fórmula:

$$k_0 = \frac{2Q_y}{\gamma_y}$$

De la Figura N°39 se puede deducir que la resistencia al corte en el agrietamiento Q_c se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_c = \frac{Q_y - \alpha k_0 \gamma_y}{1 - \alpha}$$

Donde α es la relación de rigidez de la segunda rigidez, la cual se asume tiene un valor de 0.2. Entonces, el desplazamiento por corte en la fisura se obtiene como

$$\gamma_c = \frac{Q_c}{k_0}$$

Hossein y Kabeyasawa (1994) indican que la resistencia al corte y el desplazamiento en la etapa final se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_u = 0.3Q_y$$

$$\gamma_u = 3.5(0.01h_m - \gamma_y)$$

Donde h_m es la altura del muro de albañilería.

4.5.4 Modelo de histéresis

Como se ha mencionado, los muros de albañilería tendrán resortes de corte que siguen un deslizamiento polilineal. Los valores característicos Q_c , Q_y y Q_u se obtienen siguiendo el procedimiento explicado líneas arriba. Con esos valores es que se podrá construir la curva envolvente de histéresis del muro como se muestra en la Figura N°39.

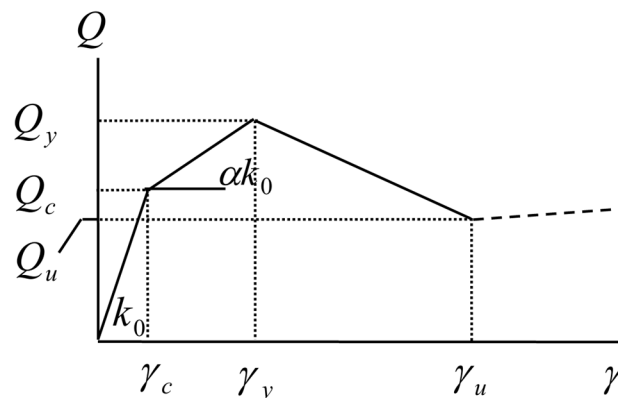


Figura 39. Curva de capacidad del muro de albañilería en el Stera 3D

Fuente: Saito (s.f.)

4.5.5 Calibración de la curva envolvente de histéresis

El valor del f'_m se puede obtener de la fórmula de Paulay y Priestley (1992) o calibrando los parámetros de la fórmula del Eurocódigo 6. Para determinar cuál de las dos formas usar, se tomaron los resultados de ensayos realizados a prismas de albañilería en el CISMID, provenientes de los trabajos de Lavado et al. (2014) y Lavado et al. (2020). En total se contaba con los f'_m de 20 especímenes, cuyas características se muestran en la Tabla N°8 y N°9.

Tabla 8. Características de los prismas de albañilería ensayados

N°	Especimen	f'b (Mpa)	f'j (Mpa)	f'm (Mpa)	f'tb (Mpa)	j (mm)	hb (mm)
01	IND-01	12.6	22.8	9.56	1.26	10	91.3
02	IND-02	10.4	22.8	8.08	1.04	10	91.3
03	IND-03	12.3	22.8	8.31	1.23	10	91.3
04	ART-01	5.9	22.8	6.15	0.59	10	90
05	ART-02	8.7	22.8	6.57	0.87	10	90
06	ART-03	11	22.8	9.98	1.1	10	90
07	PND-1	2.5	22.8	2.58	0.25	10	91.8
08	PND-2	1.9	22.8	2.8	0.19	10	91.8
09	IND-01	12.6	9.3	8.42	1.26	10	91.3
10	IND-02	10.4	9.3	6.83	1.04	10	91.3
11	IND-03	12.3	9.3	8.28	1.23	10	91.3
12	ART-01	5.9	9.3	5.77	0.59	10	90
13	ART-02	8.7	9.3	6.02	0.87	10	90
14	ART-03	11	9.3	9.57	1.1	10	90
15	PND-1	2.5	9.3	1.89	0.25	10	91.8
16	PND-2	1.9	9.3	1.22	0.19	10	91.8
17	ART-02	11.58	22.8	9.74	1.158	10	90
18	ART-01	6.4	14.5	6.89	0.64	10	90
19	ART-01	6.4	9.3	5.3	0.64	10	90
20	ART-02	11.58	9.3	7.1	1.158	10	90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Promedio y desviación estándar de los prismas de albañilería ensayados

Medida estadística	f'b (Mpa)	f'j (Mpa)	f'm (Mpa)	f'tb (Mpa)
Media	8.33	15.64	6.55	0.83
Desviación estándar	3.85	6.75	2.67	0.39

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó la expresión del Eurocódigo 6 tiene la siguiente forma:

$$f'_m = k \cdot (f'_{cb})^\alpha \cdot (f'_j)^\beta$$

Donde k, α, β son constantes que deben ser calibradas con los muros de albañilería a analizar, para lo cual se transformó dicha expresión en lo siguiente:

$$\begin{aligned} f'_m &= k \cdot (f'_{cb})^\alpha \cdot (f'_j)^\beta \\ \log(f'_m) &= \log(k \cdot (f'_{cb})^\alpha \cdot (f'_j)^\beta) \\ y &= \log(k) + \alpha \log(f'_{cb}) + \beta \log(f'_j) \\ y &= w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 \end{aligned}$$

Empleando los datos obtenidos de ensayos realizados a prismas de albañilería en el CISMID (ver Tabla N°8), se realizó una regresión lineal múltiple. Se obtuvieron los siguientes valores:

$$w_0 = -0.217 \rightarrow k = 0.606$$

$$w_1 = 0.840 \rightarrow \alpha = 0.840$$

$$w_2 = 0.229 \rightarrow \beta = 0.229$$

Además de estas dos fórmulas, se propone una nueva expresión en la que el f'_m depende linealmente del f'_b , es decir que sigue la forma $X = bY$. Esta expresión se obtendrá al realizar una regresión lineal sin intercepto a los resultados obtenidos de los ensayos antes mencionados. La fórmula para obtener el coeficiente b de la expresión se muestra a continuación:

$$b = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum (Y_i)^2}$$

Tabla 10. Variables para determinar la función lineal a proponer

N°	Espécimen	f'b (Mpa) Xi	f'm (Mpa) Yi	XiYi	Yi²
01	IND-01	9.56	12.60	120.46	158.76
02	IND-02	8.08	10.40	84.03	108.16
03	IND-03	8.31	12.30	102.21	151.29
04	ART-01	6.15	5.90	36.29	34.81
05	ART-02	6.57	8.70	57.16	75.69
06	ART-03	9.98	11.00	109.78	121.00
07	PND-1	2.58	2.50	6.45	6.25
08	PND-2	2.80	1.90	5.32	3.61
09	IND-01	8.42	12.60	106.09	158.76
10	IND-02	6.83	10.40	71.03	108.16
11	IND-03	8.28	12.30	101.84	151.29
12	ART-01	5.77	5.90	34.04	34.81
13	ART-02	6.02	8.70	52.37	75.69
14	ART-03	9.57	11.00	105.27	121.00
15	PND-1	1.89	2.50	4.73	6.25
16	PND-2	1.22	1.90	2.32	3.61
17	ART-02	9.74	11.58	112.79	134.10
18	ART-01	6.89	6.40	44.10	40.96
19	ART-01	5.30	6.40	33.92	40.96
20	ART-02	7.10	11.58	82.22	134.10

Fuente: Elaboración propia

Parte de los cálculos realizados se muestra en la Tabla N°10. De ella se puede obtener lo siguiente:

$$b = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum (Y_i)^2} = 0.762$$

Entonces la expresión propuesta viene dada por:

$$f'_m = 0.762 f'_b$$

Para determinar cuál de las fórmulas se iba a emplear para obtener el f'_m se planteó determinar este según las tres fórmulas mencionadas para cada uno de los especímenes (ver Tabla N°11) para luego realizar una comparación de los métodos con respecto al f'_m obtenido de manera experimental, de tal forma que la que presente un menor error será la ecuación elegida.

Tabla 11. f'_m obtenidos para cada espécimen

N°	Especimen	f'_m Ensayos (Mpa)	f'_m Pauly y Prestley (Mpa)	f'_m Eurocódigo 6 (Mpa)	f'_m Fórmula lineal (Mpa)
01	IND-01	9.56	9.83	10.44	9.60
02	IND-02	8.08	8.68	8.88	7.93
03	IND-03	8.31	9.68	10.23	9.38
04	ART-01	6.15	6.34	5.52	4.50
05	ART-02	6.57	7.80	7.65	6.63
06	ART-03	9.98	9.01	9.31	8.38
07	PND-1	2.58	4.51	2.68	1.91
08	PND-2	2.80	4.19	2.13	1.45
09	IND-01	8.42	7.94	8.50	9.60
10	IND-02	6.83	6.78	7.23	7.93
11	IND-03	8.28	7.78	8.33	9.38
12	ART-01	5.77	4.42	4.49	4.50
13	ART-02	6.02	5.89	6.23	6.63
14	ART-03	9.57	7.09	7.58	8.38
15	PND-1	1.89	2.62	2.18	1.91
16	PND-2	1.22	2.30	1.73	1.45
17	ART-02	9.74	9.31	9.72	8.83
18	ART-01	6.89	5.42	5.33	4.88
19	ART-01	5.30	4.68	4.81	4.88
20	ART-02	7.10	7.40	7.92	8.83

Fuente: Elaboración propia

Con la información presentada se construyeron gráficas que relacionan los f'_m calculados con el f'_m obtenido de manera experimental, estas con mostradas en la Figura N°40.

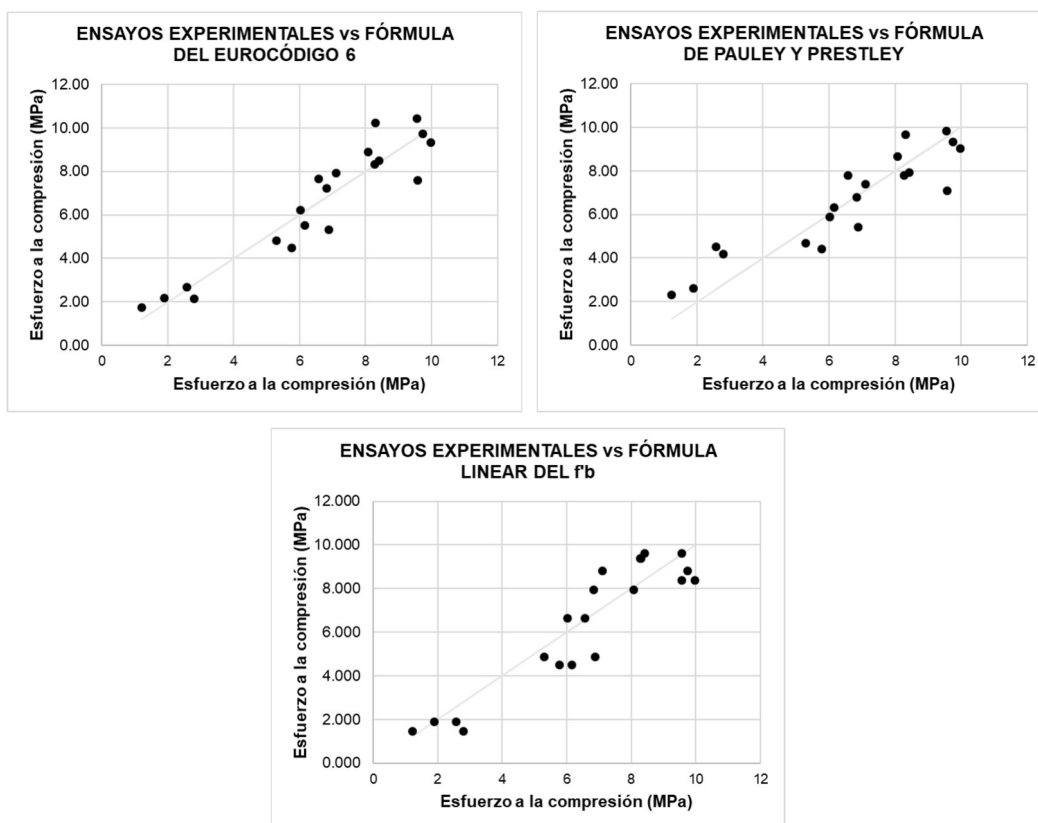


Figura 40. Correlación entre los f'_m calculados con respecto al f'_m experimental

Fuente: E. Moscoso, comunicación personal, 22 de junio de 2024

La Tabla N°12 muestra valores de 3 medidas de comparación: el MSE, el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2). Como se mencionó, la ecuación que menor error presente sería la elegida. Siguiendo este criterio, se notó que la fórmula propuesta por el Eurocódigo es la que se empleará para la obtención del f'_m . Si tomamos en cuenta otros tipos de comparación como qué tan bien una fórmula predice el f'_m o la correlación que existe con respecto al f'_m experimental, se reafirma que la fórmula del Eurocódigo es la que mejor resultados arroja de estas medidas de comparación con respecto a las otras fórmulas.

Tabla 12. Medidas de comparación para las fórmulas del f'_m

Fórmula	R^2	r	MSE
Pauly y Prestley	0.830	0.911	1.172
Eurocódigo 6	0.886	0.941	0.854
Fórmula lineal	0.859	0.927	1.201

Fuente: Elaboración propia

Ya conociendo la fórmula para determinar el f'_m , se procedió con la construcción de la curva envolvente de histéresis, la cual será calibrada. El proceso de calibración consiste en ajustar esta curva a una curva de histéresis de un muro de albañilería confinada. Para ello, se ha tomado los resultados de ensayos realizados a muros de albañilería confinada en el CISMID por parte de Zavala et al. (2014), de los cuales se tomará como referencia el resultado del muro con ladrillos artesanales.

El STERA 3D proporciona factores de modificación de rigidez y resistencia al corte, los cuales permiten ajustar la curva tanto en las abscisas (ver Figura N°41) como las ordenadas (ver Figura N°42), respectivamente. Estos factores permitirán modificar la curva envolvente de histéresis proporcionada por el programa hasta que se ajuste a la curva de histéresis obtenida del ensayo para el muro seleccionado.

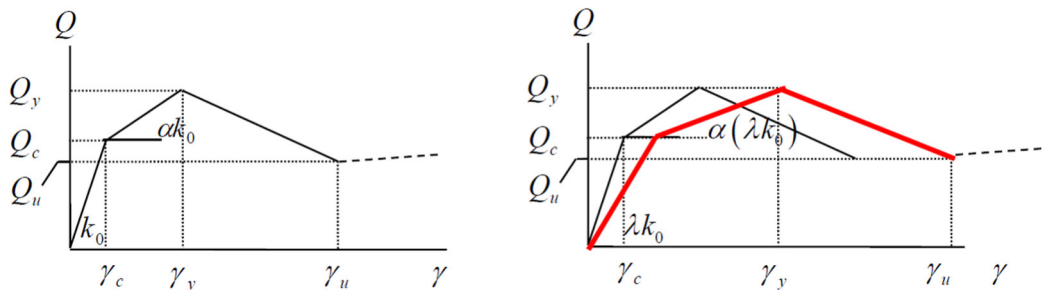


Figura 41. Modificación del factor de rigidez del programa

Fuente: Saito (s.f.)

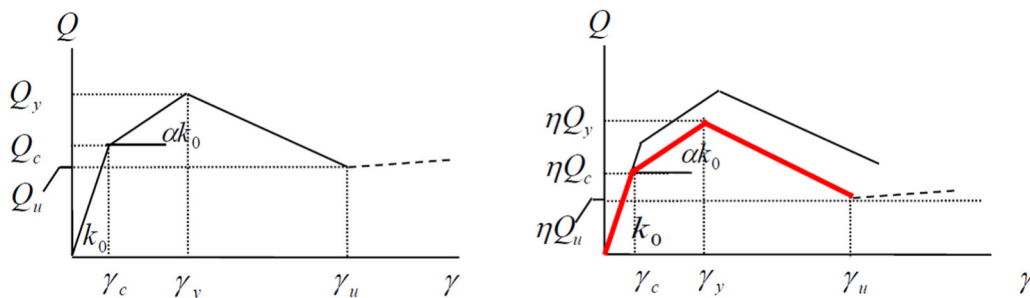


Figura 42. Modificación del factor de resistencia del programa

Fuente: Saito (s.f.)

Así mismo, se compara con la curva de capacidad propuesta por Díaz et al. (2019), la cual sigue una curva de histéresis tetralineal (Ver Figura N°43).

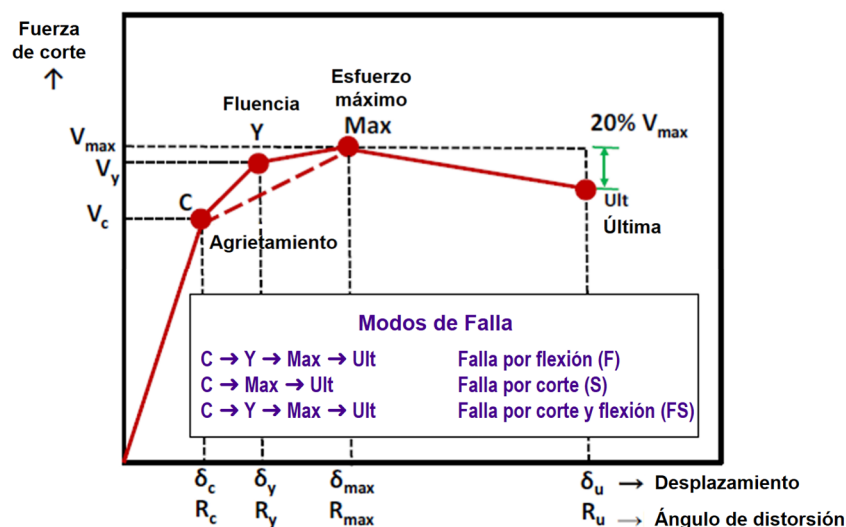


Figura 43. Modelo de histéresis tetralineal para muros de albañilería confinada

Fuente: Adaptado de Sugano et al. (2014)

La Figura N°44 muestra la curva de histéresis ajustada del Stera 3D junto a la curva de histéresis obtenida del ensayo. Las envolventes de estas curvas construyen la curva de capacidad. Así mismo, se puede apreciar que la curva envolvente de histéresis obtenida con el Stera 3D tiene una curva muy similar a la curva Tetralineal. De esta forma se comprueba que la calibración realizada es la adecuada.

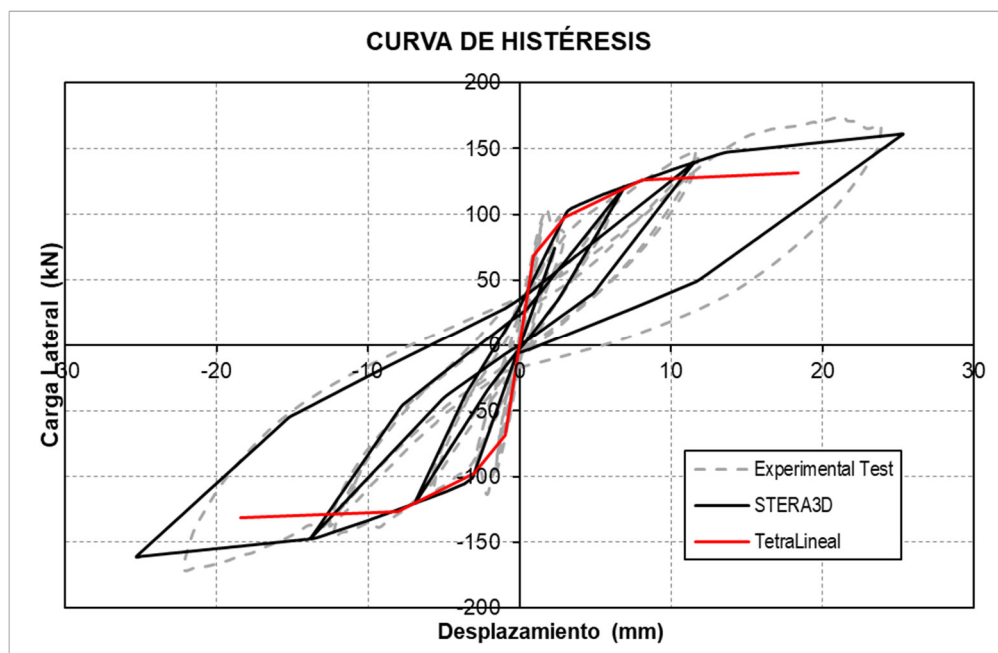


Figura 44. Calibración de curva de histéresis del programa

Fuente: E. Moscoso, comunicación personal, 22 de junio de 2024

4.6 Configuración estructural

La longitud típica aproximada de los muros ensayados es de 2.6 m, es por ello que para la estructuración se plantearon en la dirección transversal tres paños dando un frontis con longitud de 7.8 m (dirección X). Así también, se propusieron cuatro paños de 4 m de longitud en la dirección longitudinal (dirección Y). Esto equivale a un lote de 7.8 m x 16 m (124.8 m²), medidas típicas de edificaciones híbridas peruanas. Se propusieron columnas C2, vigas B1 y muros M1. Se formaron cinco distribuciones típicas de los muros de albañilería en la dirección transversal, de las cuales, una era sin excentricidad, mientras que las demás contaban con excentricidad en la dirección Y. Se construyeron modelos estructurales de 1 a 3 niveles con las distribuciones mencionadas considerando una altura de entrepiso de 2.6m.

El modelo estructural 1 corresponde a la distribución sin excentricidad, en la cual se planteó que la dirección Y sea un sistema estructural de albañilería confinada mientras que la dirección X sea un sistema estructural de pórticos de concreto armado. Por otro lado, para los modelos del 2 al 5 se añadieron muros de albañilería confinada en la dirección X variando su ubicación generando diferentes excentricidades en la dirección Y como se muestra en la Figura N°45.

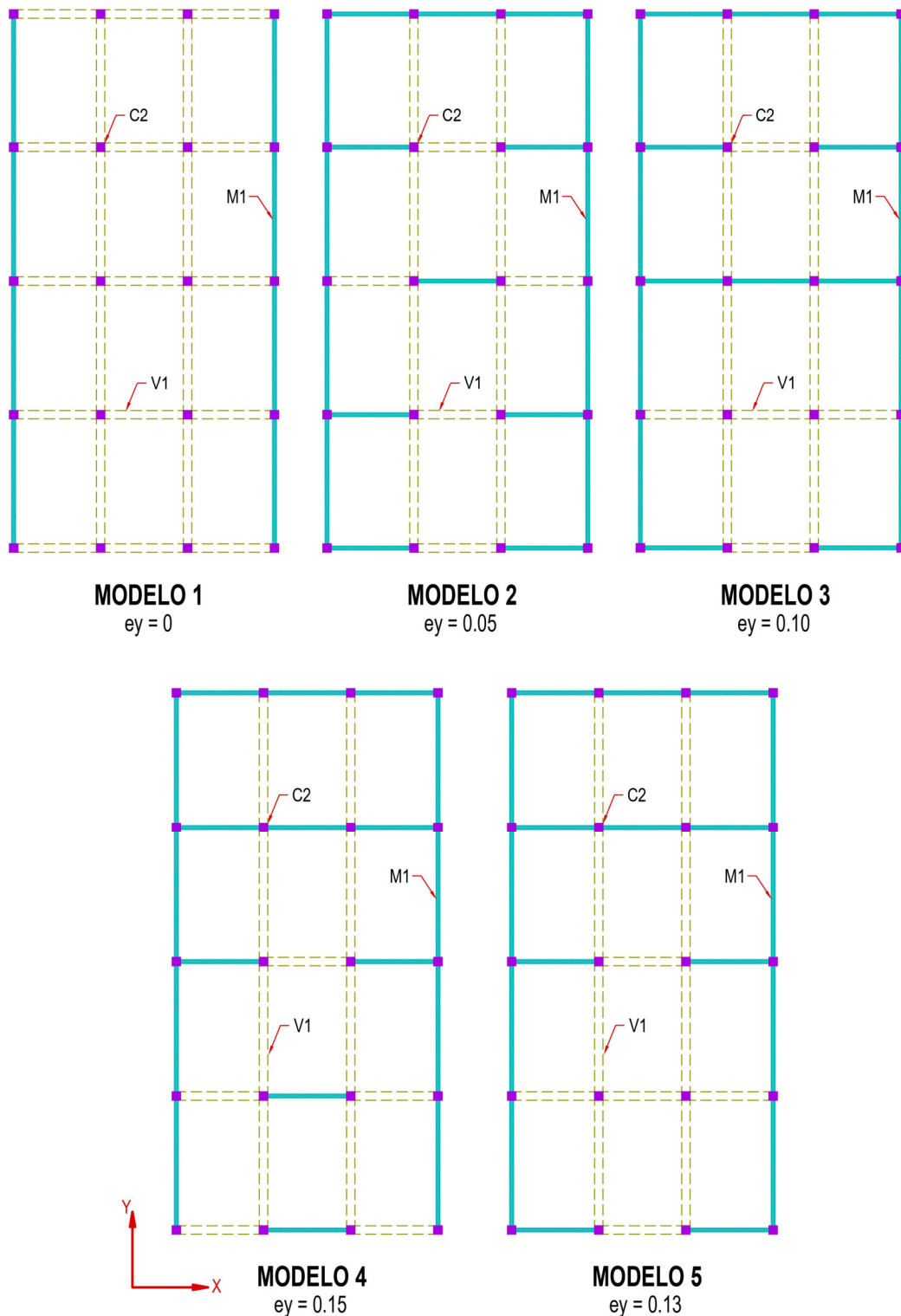


Figura 45. Configuraciones estructurales propuestas

Fuente: Elaboración propia

Consecuentemente, se procedió con la evaluación de la densidad de muros, la cual se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Área de corte de los muros reforzados}}{\text{Área de la planta típica}} = \frac{\sum L \cdot t}{A_p}$$

La estructuración consideró que la densidad de muros se encuentre dentro del rango del $\pm 15\%$ del valor límite establecido en la norma E.070 Albañilería (2006), la cual viene dada por $\frac{Z \cdot U \cdot S \cdot N}{56}$. Donde “Z”, “U” y “S” corresponden a los factores de zona sísmica, importancia y de suelo, respectivamente, obtenidos en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018). Así mismo, “N” denota al número de pisos del edificio; “L”, a la longitud total del muro y “t”, al espesor efectivo del muro. Los valores considerados para estas variables están resumidos en la Tabla N°13.

Tabla 13. Factores por considerar para la densidad de muros

Z	U	S	t (mm)
0.45	1	1	110

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los valores de la tabla anterior, se realizó la verificación de la densidad de muros para las distribuciones en planta. Las plantas con excentricidad tuvieron la misma cantidad de muros para la distribución, solo se varió la ubicación de estos con el fin de generar diferentes excentricidades en la dirección Y, por tanto, se tuvo la misma densidad de muros, lo que permitió simplificar el análisis. El análisis para la distribución sin excentricidad se muestra en la Tabla N°14 mientras que el de las distribuciones con excentricidad se presenta en la Tabla N°15.

Tabla 14. Análisis de la densidad de muros para la distribución sin excentricidad

N° Pisos	$\sum \frac{L \cdot t}{A_p}$		Límite de norma E.070 (2006)	Verificación de la densidad de muros	
	DIR-X	DIR-Y	$\frac{Z \cdot U \cdot S \cdot N}{56}$	DIR-X	DIR-Y
1	-	0.0282	0.0080	-	Cumple
2	-	0.0282	0.0161	-	Cumple
3	-	0.0282	0.0241	-	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Análisis de la densidad de muros para la distribución con excentricidad

N° Pisos	$\sum \frac{L \cdot t}{A_p}$		Límite de norma E.070 (2006)	Verificación de la densidad de muros	
	DIR-X	DIR-Y	$\frac{Z \cdot U \cdot S \cdot N}{56}$	DIR-X	DIR-Y
1	0.0229	0.0282	0.0080	Cumple	Cumple
2	0.0229	0.0282	0.0161	Cumple	Cumple
3	0.0229	0.0282	0.0241	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

4.7 Modelos estructurales propuestos

Por un tema de presentación, se propone una notación que permitirá identificar de forma rápida y sencilla cada uno de los modelos estructurales propuestos, esto se puede apreciar en la Figura N°46. Esta notación será empleada para lo que resta del presente escrito.

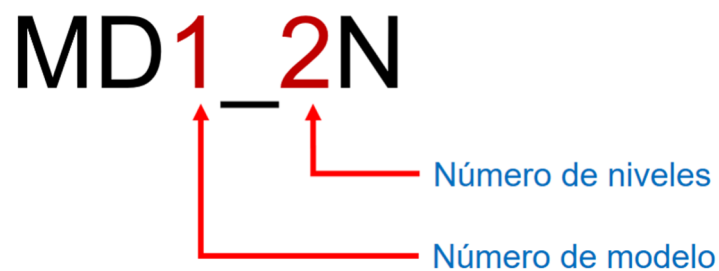


Figura 46. Notación propuesta para los modelos estructurales propuestos

Fuente: Elaboración propia

Como se ha explicado, se tuvieron 5 distribuciones en planta, a las cuales se les fue variando el número de niveles (1-3). Entonces, se tendría un total de 15 edificaciones híbridas propuestas, cuyas características se encuentran resumidas en la Tabla N°16.

Tabla 16. Características de las edificaciones híbridas propuestas

Modelo	Altura	Periodo Fundamental		Ratio de Excentricidad	
	H (m)	Tx (s)	Ty (s)	ex	ey
MD1_1N	2.60	0.218	0.142		
MD1_2N	5.20	0.370	0.234	0.00	0.00
MD1_3N	7.80	0.526	0.327		
MD2_1N	2.60	0.116	0.139		
MD2_2N	5.20	0.191	0.232	0.00	0.05
MD2_3N	7.80	0.268	0.327		
MD3_1N	2.60	0.125	0.144		
MD3_2N	5.20	0.203	0.238	0.00	0.10
MD3_3N	7.80	0.285	0.334		
MD4_1N	2.60	0.127	0.138		
MD4_2N	5.20	0.210	0.229	0.00	0.15
MD4_3N	7.80	0.295	0.323		
MD5_1N	2.60	0.127	0.144		
MD5_2N	5.20	0.206	0.238	0.00	0.13
MD5_3N	7.80	0.289	0.333		

Fuente: Elaboración propia

Capítulo V. Variabilidad de la respuesta estructural

5.1 Generalidades

En el siguiente capítulo se justificará el uso de medidas de intensidad como factor que influye en la variabilidad de la respuesta estructural. Así mismo, se mostrará la obtención de las respuestas estructurales de las dos direcciones principales de las edificaciones propuestas en el capítulo anterior al aplicarles los registros sísmicos seleccionados, para lo cual se planteó realizar análisis dinámicos incrementales bidireccionales. Por otro lado, se presentará la variabilidad de la respuesta al ser relacionada con una medida de intensidad con el fin de obtener la que menos variabilidad generaba por cada estado de daño.

5.2 Factores que influyen en la variabilidad de la respuesta estructural sísmica

La variabilidad de la respuesta estructural ante la ocurrencia de eventos sísmicos está influenciada por diversos factores. La comprensión de estos factores es importante para obtener respuestas mucho más precisas y con ello, conocer a mayor detalle el comportamiento de las estructuras y mejorar el diseño. Entre estos factores se encuentra la aceleración del suelo, indicador de la fuerza ejercida sobre las estructuras. Esta medida puede variar según la proximidad al epicentro y a la magnitud del sismo afectando directamente a la respuesta de las edificaciones. La frecuencia del movimiento es otro factor que considerar, las características de frecuencia del movimiento representadas por espectros de aceleración, velocidad o desplazamiento afectan en cómo diferentes tipos de edificaciones responden al sismo. Estructuras con diferentes periodos naturales reaccionan de manera distinta a estas frecuencias. La cantidad total de energía liberada durante un sismo y cómo esta energía ha ido acumulándose a lo largo del tiempo influyen en la capacidad de una estructura para absorber y disipar energía. La duración del sismo también influye en la respuesta estructural dado que, a una mayor duración, se causan mayores daños acumulados debido a que se tendría esfuerzos sobre la estructura por más tiempo.

Estos factores son diversos y como se ha podido ver, contribuyen de manera distinta a la respuesta estructural, lo cual resulta importante estudiar. Estas medidas son conocidas como medidas de intensidad sísmica (IM), las cuales proporcionan una manera de evaluar cómo las estructuras responderán a diferentes características de un sismo. Dado que estas características son complejas y variables es que la respuesta estructural también se vuelve variable. Por tanto, resulta importante conocer un poco más sobre estas IM y evaluar cuál es la que mejor se relaciona con la respuesta estructural.

5.3 Variabilidad de la respuesta estructural sísmica por el uso de IM

Como se ha podido explicar en el anterior ítem, las medidas de intensidad juegan un papel importante en la respuesta estructural sísmica. Tal y como se mencionó en el Capítulo II, en un análisis dinámico incremental, se busca relacionar la respuesta estructural con una IM, parámetro empleado para caracterizar a un evento sísmico. Elegir correctamente la IM reduciría la dispersión de los resultados y mejorará la representatividad de los resultados obtenidos, y con ello, ofrecerá una mayor confiabilidad estructural.

Para una mayor explicación de lo mencionado líneas arriba, se muestra la Figura N°47, la cual muestra curvas IDA, curvas obtenidas de un mismo análisis dinámico incremental diferenciándose una de otra por la IM usada para representar la respuesta estructural. En la parte izquierda, las curvas IDA se construyeron empleando a la $S_a(T_1, 5\%)$ como IM mientras que en la parte derecha se muestran las curvas IDA construidas empleando la PGA como IM. Al realizar un análisis visual de ambas gráficas, se puede observar una diferencia clara: las curvas asociadas a la $S_a(T_1, 5\%)$ están mucho más concentradas en comparación con las curvas construidas a partir de la PGA .

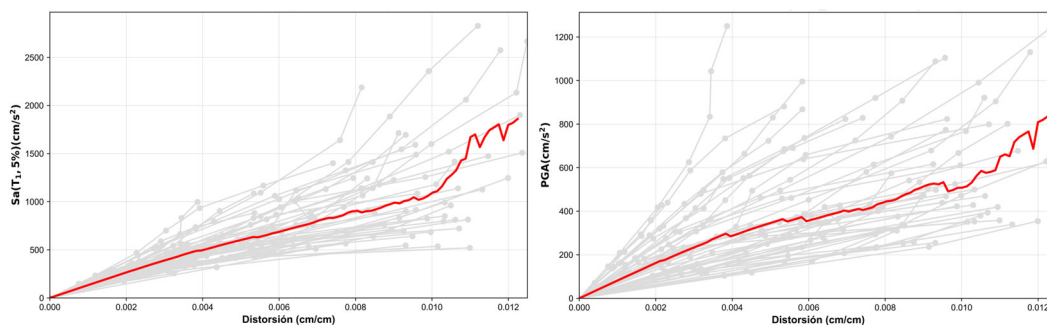


Figura 47. Curvas IDA de diferente IM

Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia en la concentración de las curvas muestra que el uso de la $S_a(T_1, 5\%)$ como IM proporciona una curva media más representativa de la respuesta estructural sísmica. Esto, a su vez, resulta en una menor dispersión en los resultados obtenidos. En otras palabras, la utilización de la $S_a(T_1, 5\%)$ como IM puede ofrecer una estimación más precisa de la respuesta sísmica en comparación con el uso de la PGA como IM. Cabe resaltar que este es un caso en particular, es decir, no siempre se va a cumplir con lo mencionado, esto dependerá de las características de la estructura a analizar, las cuales esta investigación busca relacionar con las IM.

5.4 Análisis dinámico incremental bidireccional

Como en la presente investigación se plantea un análisis bidireccional, se ha propuesto una nueva metodología para el IDA. Esta metodología consiste en evaluar las dos direcciones principales de la edificación en dos IDA diferentes, los cuales se diferencian en las componentes del sismo que se aplicarán en cada una de las direcciones de la estructura.

La Figura N°48 muestra una edificación a la cual se le quiere evaluar su respuesta estructural ante la ocurrencia de un sismo, del cual se tienen ambas componentes horizontales (S_{E-W} y S_{N-S}). Para la evaluación estructural, lo que se plantea es aplicar la componente de mayor intensidad, medida a través de la PGA , en la dirección que se desea evaluar. En este caso, la componente de mayor intensidad es el S_{E-W} . Por tanto, si se desea evaluar la dirección X, se aplicaría esta componente en esa dirección y la componente S_{N-S} en la otra dirección. De igual forma sucedería con la dirección Y. De esta manera, se obtendría la respuesta estructural máxima en una dirección con la influencia del sismo en la otra dirección.

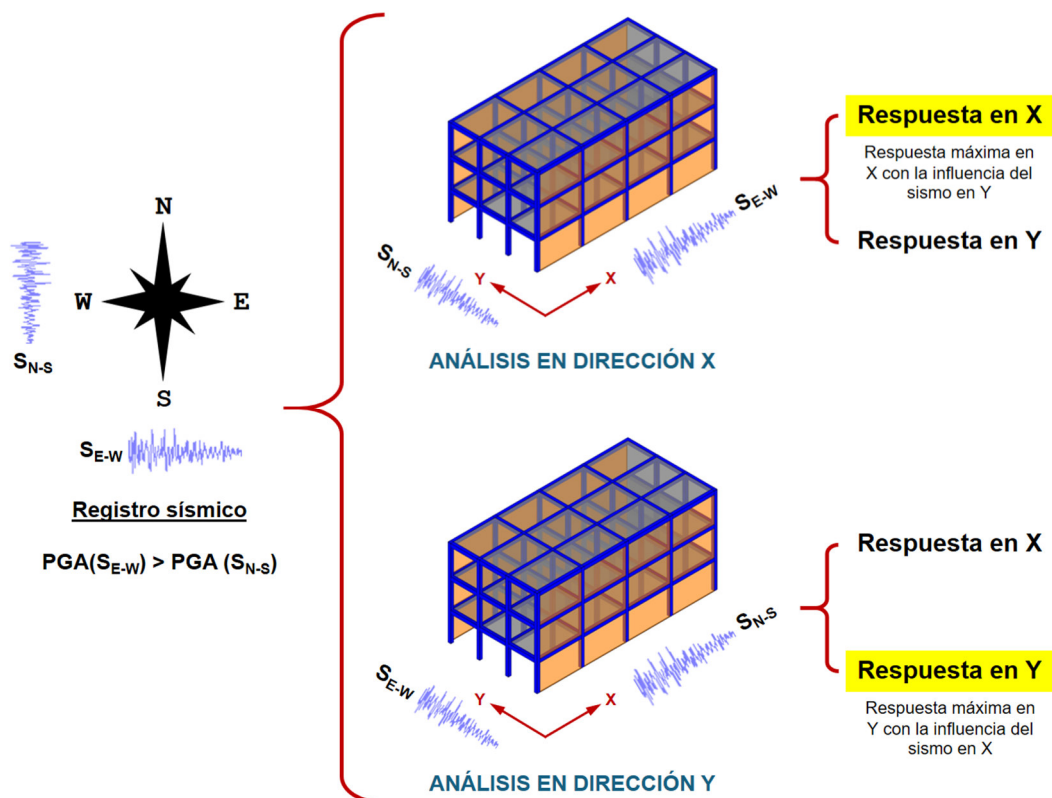


Figura 48. Esquema de la metodología para el análisis estructural bidireccional

Fuente: Elaboración propia

Explicada la forma de obtener las respuestas estructurales en cada dirección, se puede apreciar que se realizaron dos IDA bidireccionales, de los cuales se están considerando como factores de escala los valores de 0.25, 0.50, 0.75, 1, 1.25 y 1.50. Como IM se están considerando las 27 IM detalladas en el Capítulo II.

Tomando en cuenta que se tienen 52 registros sísmicos, 15 modelos estructurales, 6 factores de escala y que por cada modelo y registro se tuvieron que realizar 2 análisis no lineales, se tuvo que llevar a cabo un total de 9360 análisis estructurales tiempo – historia bidireccionales inelásticos en 3D. Dado que se tenía una cantidad considerable de análisis por realizar, lo que conllevaría a invertir un gran tiempo en el análisis, se optó por desarrollar un algoritmo en lenguaje de programación Python con el fin de optimizar los tiempos de ejecución del programa. Este algoritmo realiza el IDA bidireccional obteniendo las IM para cada análisis. Un diagrama más explicativo del flujo de trabajo de la codificación se muestra en la Figura N°49.

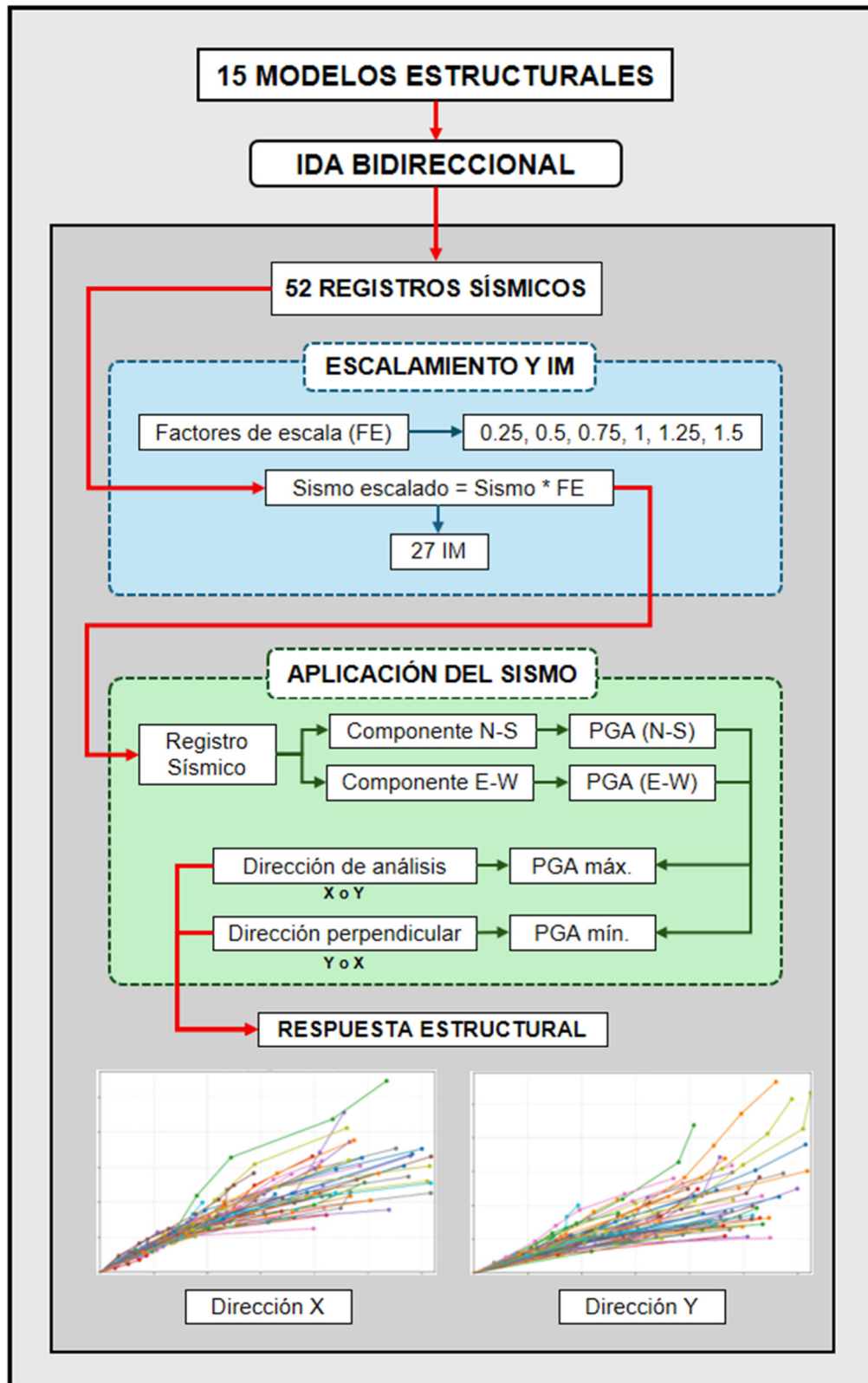


Figura 49. Metodología para el análisis dinámico incremental bidireccional

Fuente: Elaboración propia

5.5 Generación de curvas IDA

Obtenidas las respuestas de los análisis dinámicos incrementales en ambas direcciones se procedió a construir las curvas IDA para cada IM y cada dirección de análisis. Para ello, se tomaron las respuestas estructurales que sean menores a 0.0125 para que sean compatibles con resultados de ensayos de laboratorio.

La Figura N°50 muestra las curvas IDA para la edificación MD1_1N construidas usando como IM la PGA y la $S_a(T_1, 5\%)$ para cada una de las direcciones de análisis. Si se realiza una comparación visual entre las curvas, se puede apreciar que la $S_a(T_1, 5\%)$ genera curvas que están mucho más concentradas a diferencia del PGA , lo cual nos da un indicio que la $S_a(T_1, 5\%)$ es una medida de intensidad mucho más adecuada para el caso de edificaciones híbridas, en comparación con el PGA .

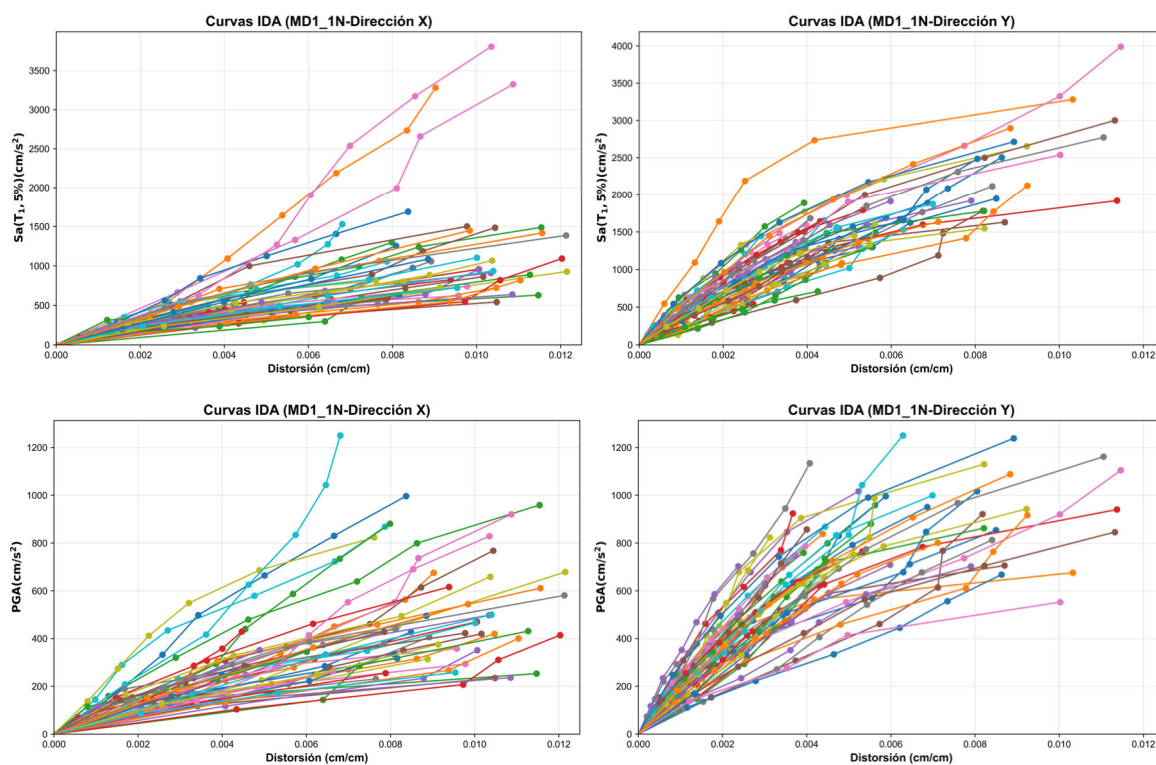


Figura 50. Curvas IDA para la edificación MD1_1N

Fuente: Elaboración propia

5.6 Variabilidad de la respuesta estructural sísmica

Se propuso como medida de comparación al coeficiente de variación (CV), medida estadística adecuada considerando que son diferentes grupos muestrales de análisis.

Se dividió el rango de distorsiones de 0 a 0.0125 de tal forma que se tuvieron un conjunto de puntos, los cuales se evaluaron por cada dirección de análisis. Finalmente, se hallaron los puntos de intersección con las curvas IDA por cada registro sísmico y se obtuvieron un conjunto de valores por cada punto de distorsión. A estos valores se les calculó su media y su desviación estándar, con los cuales se pudo determinar el CV. En la Figura N°51 se muestra el procedimiento para un punto de distorsión, proceso que se repite para cada uno de los puntos de distorsión que se tuviera.

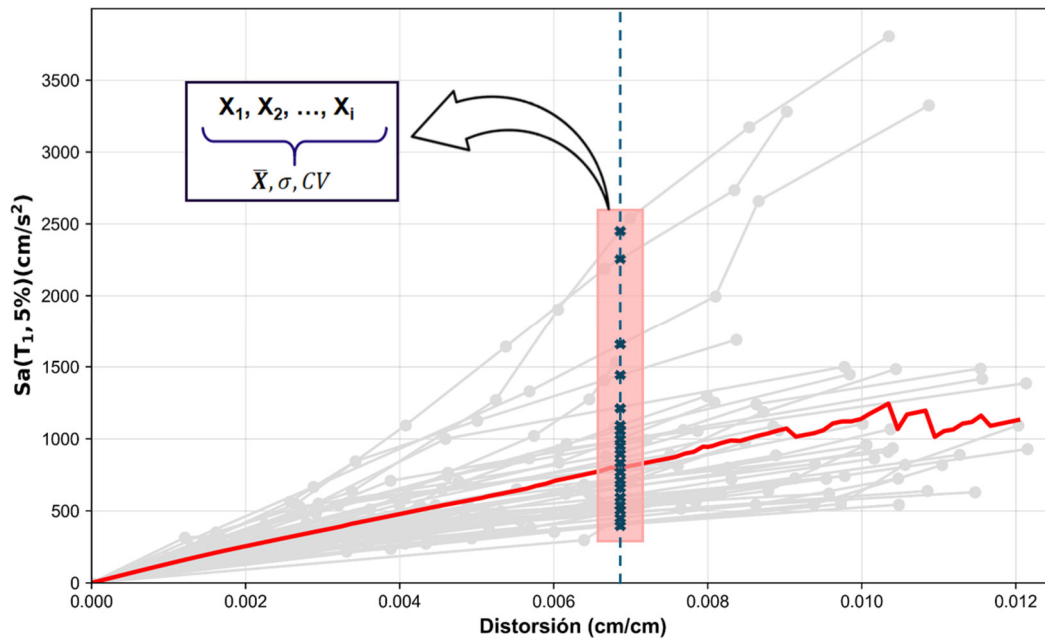


Figura 51. Determinación de la curva media para las curvas IDA

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento descrito líneas arriba se realizó para cada uno de los 15 modelos estructurales y sus direcciones de análisis. De esta manera se construyeron las curvas medias y se obtuvieron los CV por cada IM de los modelos para cada dirección.

Por otro lado, se consideró agrupar las respuestas estructurales por estados de daños, cuyos límites (ver Tabla N°17) se han obtenido del trabajo de Zavala et. al (2019). Estos han sido tomados del caso del muro de albañilería confinada construido con ladrillos artesanales.

Tabla 17. Límites para los estados de daño para un muro de albañilería confinada con ladrillos artesanales

Estado de daño	Límites	
	Inferior	Superior
Operatividad	0.0000	0.0013
Ocupación inmediata	0.0013	0.0029
Seguridad de vida	0.0029	0.0035
Prevención de colapso	0.0035	0.0040
Colapso	0.0040	0.0080

Fuente: Zavala et. al (2019)

La variación del CV a través de la distorsión por cada IM se muestra en la Figura N°52. En la figura se puede apreciar que el CV es variable y no se tiene una IM que esté siempre por debajo del resto de las otras. Por tanto, se propone una metodología para la determinación de la IM óptima.

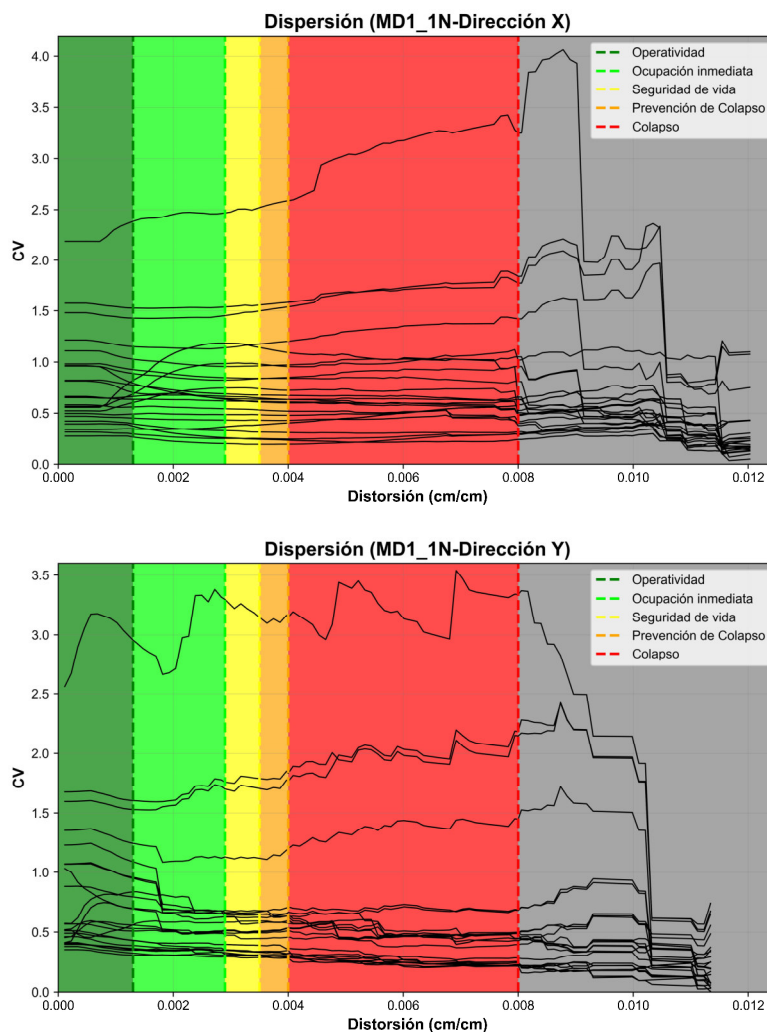


Figura 52. Variación del CV a medida que aumenta la distorsión

Fuente: Elaboración propia

5.7 Selección de la IM óptima

Como se mencionó, no había una IM que siempre genere una menor dispersión en todos los puntos obtenidos del rango. Es por ello que, por cada estado de daño, se determinó el área bajo la curva de dispersión para cada IM. Así mismo, se ordenó de menor a mayor área. La que tuviera menor área sería la que menor dispersión genera en la respuesta estructural, las cuales están marcadas de azul en la Tabla N°18, cuadro en el que se muestran los resultados ordenados obtenidos para la edificación MD1_1N en la dirección X.

Tabla 18. Resultados obtenidos para el modelo MD1_1N ($\times 10^{-4}$)

Operatividad		Ocupación inmediata		Seguridad de vida		Prevención de colapso		Colapso	
Área	IM	Área	IM	Área	IM	Área	IM	Área	IM
3.24	<i>IM_{CR}</i>	3.54	<i>IM_{CR}</i>	0.97	<i>IM_{CR}</i>	0.76	<i>IM_{CR}</i>	8.62	<i>IM_{SR}</i>
3.67	<i>EPA</i>	4.20	<i>EPA</i>	1.23	<i>IM_{SR}</i>	0.93	<i>IM_{SR}</i>	8.65	<i>TPH</i>
4.04	<i>S_a(T₁, 5%)</i>	4.77	<i>IM_{SR}</i>	1.23	<i>TPH</i>	0.93	<i>TPH</i>	9.58	<i>IM_{CR}</i>
4.04	<i>S_v(T₁, 5%)</i>	4.78	<i>TPH</i>	1.24	<i>EPA</i>	0.97	<i>EPA</i>	10.58	<i>EPA</i>
4.04	<i>S_d(T₁, 5%)</i>	5.49	<i>S_a(T₁, 5%)</i>	1.58	<i>I_{Np}</i>	1.22	<i>I_{Np}</i>	12.06	<i>I_{Np}</i>
4.65	<i>IM_{SR}</i>	5.49	<i>S_v(T₁, 5%)</i>	1.87	<i>S_v(T₁, 5%)</i>	1.56	<i>S_d(T₁, 5%)</i>	17.73	<i>RMS</i>
4.65	<i>TPH</i>	5.49	<i>S_d(T₁, 5%)</i>	1.87	<i>S_a(T₁, 5%)</i>	1.56	<i>S_v(T₁, 5%)</i>	18.88	<i>PGA</i>
4.94	<i>I_{Np}</i>	5.57	<i>I_{Np}</i>	1.87	<i>S_d(T₁, 5%)</i>	1.56	<i>S_a(T₁, 5%)</i>	19.49	<i>S_v(T₁, 5%)</i>
5.47	<i>RMS</i>	6.92	<i>RMS</i>	2.13	<i>RMS</i>	1.68	<i>RMS</i>	19.49	<i>S_d(T₁, 5%)</i>
5.80	<i>PGA</i>	7.74	<i>PGA</i>	2.39	<i>PGA</i>	1.88	<i>PGA</i>	19.49	<i>S_a(T₁, 5%)</i>
6.37	<i>I_c</i>	8.75	<i>I_a</i>	2.64	<i>I_a</i>	2.04	<i>I_a</i>	19.57	<i>I_a</i>
6.73	<i>I_a</i>	9.90	<i>CAV</i>	3.02	<i>CAV</i>	2.35	<i>CAV</i>	22.47	<i>CAV</i>
6.98	<i>EPI</i>	10.57	<i>S – CAV</i>	3.05	<i>I_z</i>	2.39	<i>I_z</i>	23.21	<i>S – CAV</i>
7.32	<i>AI</i>	10.64	<i>I_z</i>	3.13	<i>I_v</i>	2.47	<i>I_v</i>	23.42	<i>I_z</i>
7.32	<i>A₉₅</i>	10.97	<i>I_c</i>	3.22	<i>S – CAV</i>	2.49	<i>S – CAV</i>	24.81	<i>I_v</i>
7.66	<i>S – CAV</i>	10.99	<i>I_v</i>	3.34	<i>Sa_{avg}</i>	2.63	<i>Sa_{avg}</i>	25.55	<i>Sa_{avg}</i>
7.66	<i>CAV</i>	11.36	<i>Sa_{avg}</i>	3.65	<i>I_c</i>	2.83	<i>I_c</i>	28.25	<i>I_c</i>
9.23	<i>I_z</i>	13.33	<i>PGV</i>	4.08	<i>PGV</i>	3.28	<i>SI_H</i>	32.46	<i>SI_H</i>
9.54	<i>Sa_{avg}</i>	13.85	<i>SI_H</i>	4.14	<i>SI_H</i>	3.30	<i>PGV</i>	35.60	<i>PGV</i>
10.81	<i>I_v</i>	14.08	<i>EPI</i>	4.72	<i>I_F</i>	3.77	<i>EPI</i>	39.82	<i>EPI</i>
11.08	<i>PGV</i>	15.53	<i>I_F</i>	4.86	<i>EPI</i>	3.79	<i>I_F</i>	39.88	<i>I_F</i>
11.41	<i>SI_H</i>	16.86	<i>A₉₅</i>	5.73	<i>V_{rs}</i>	4.35	<i>A₉₅</i>	40.23	<i>A₉₅</i>
12.83	<i>I_F</i>	16.86	<i>AI</i>	5.76	<i>A₉₅</i>	4.35	<i>AI</i>	40.23	<i>AI</i>
14.10	<i>V_{rs}</i>	17.96	<i>V_{rs}</i>	5.76	<i>AI</i>	4.68	<i>V_{rs}</i>	52.24	<i>V_{rs}</i>
17.22	<i>PGD</i>	22.59	<i>PGD</i>	7.30	<i>PGD</i>	5.96	<i>PGD</i>	66.68	<i>I_d</i>
18.35	<i>I_d</i>	24.10	<i>I_d</i>	7.63	<i>I_d</i>	6.15	<i>I_d</i>	67.35	<i>PGD</i>
26.45	<i>V_{sq}</i>	38.56	<i>V_{sq}</i>	12.32	<i>V_{sq}</i>	10.03	<i>V_{sq}</i>	122.46	<i>V_{sq}</i>

Fuente: Elaboración propia

Dado que había valores de área muy cercanos al que representa el de menor área, se consideró también a los siguientes mejores de la lista que se diferencien en un 5% con respecto al primer valor. Así mismo, se notó que la aceleración espectral $S_a(T_1, 5\%)$, la velocidad espectral $S_v(T_1, 5\%)$ y el desplazamiento espectral $S_d(T_1, 5\%)$ tienen la misma dispersión, esto debido a que los valores de la $S_v(T_1, 5\%)$ y el $S_d(T_1, 5\%)$ son proporcionales al valor de la $S_a(T_1, 5\%)$. Es por ello que se decidió eliminar a la $S_v(T_1, 5\%)$ y $S_d(T_1, 5\%)$ de la lista de IM evaluadas.

5.8 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de la(s) IM que generan una menor dispersión de la respuesta estructural se agruparon por estados de daño. Así mismo, se muestran los porcentajes en los que una IM ha sido escogida en función del total de casos. Dado que se tienen 2 direcciones de análisis y 15 modelos estructurales, se tendría un total de 30 casos por cada estado de daño.

5.8.1. Operatividad

La Tabla N°19 muestra las mejores IM obtenidas para cada modelo estructural y dirección de análisis. A partir de ello, se puede decir que la aceleración espectral $S_a(T_1, 5\%)$ es la mejor IM en el 67% de los casos totales, seguido por la IM_{CR} que está representado por un 20%. La *EPA* y la *PGA* tienen una participación menor de 7% y 3%, respectivamente. La Figura N°53 muestra el porcentaje de las IM que superan el 2%. Entonces, se puede indicar que la $S_a(T_1, 5\%)$, IM mayormente empleada en un IDA, es una medida adecuada para su aplicación en la representación de la respuesta estructural para este estado de daño.

Tabla 19. Resultados obtenidos para el estado de daño de Operatividad

Excentricidad en Y	1 nivel		2 niveles		3 niveles	
	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y
0.00	IM_{CR}	<i>PGA</i>	IM_{CR}	<i>EPA</i>	IM_{CR}	<i>EPA</i>
0.05	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$
0.10	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$
0.13	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$
0.15	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$

Fuente: Elaboración propia

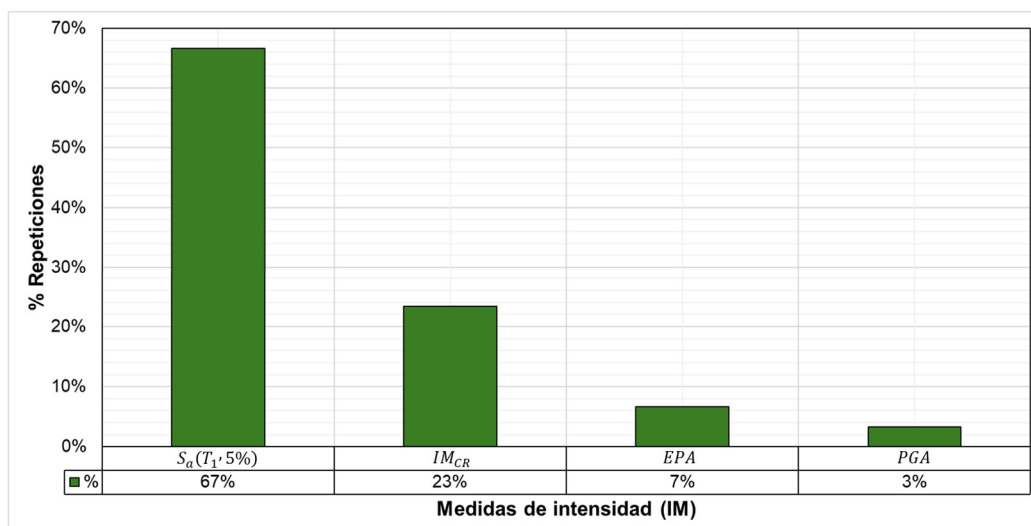


Figura 53. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Operatividad

Fuente: Elaboración propia

5.8.2. Ocupación inmediata

La Tabla N°20 muestra las mejores IM obtenidas para cada modelo estructural y dirección de análisis de este estado de daño. A partir de estos datos, se puede decir que la $S_a(T_1, 5\%)$ es en el 63% de los casos totales, la mejor IM, seguido por la IM_{CR} que está representada por un 33%. La EPA aumentó en 3% con respecto al estado de daño anterior mientras que la PGA mantuvo su porcentaje, además la I_{Np} tiene una participación del 7%. La Figura N°54 muestra el porcentaje de las IM que superan el 2%.

Tabla 20. Resultados obtenidos para el estado de daño de Ocupación inmediata

Excentricidad en Y	1 nivel		2 niveles		3 niveles	
	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y
0.00	IM_{CR}	PGA EPA	IM_{CR}	EPA	IM_{CR}	EPA
0.05	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$ I_{Np}
0.10	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$
0.13	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$
0.15	IM_{CR}	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	$S_a(T_1, 5\%)$	I_{Np} IM_{CR} $S_a(T_1, 5\%)$

Fuente: Elaboración propia

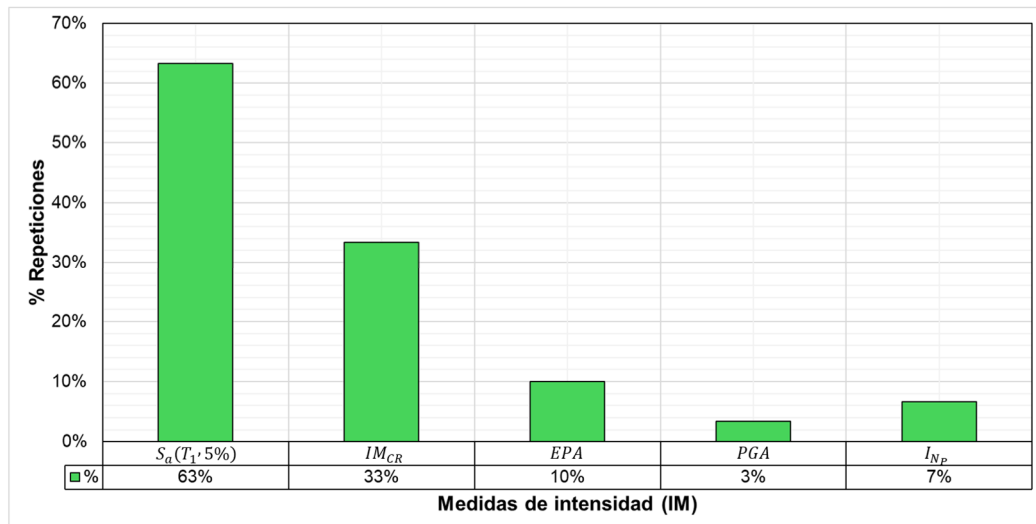


Figura 54. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Ocupación inmediata

Fuente: Elaboración propia

5.8.3. Seguridad de vida

La Tabla N°21 muestra las mejores IM obtenidas para cada modelo estructural y dirección de análisis de este estado de daño. De esto se puede decir que la IM_{CR} es la mejor IM en el 57% de los casos totales, seguido por la $S_a(T_1, 5\%)$ que está representado por un 27%. Así mismo, la EPA y la I_{Np} han aumentado su participación a 23% y 10% respectivamente. Por otro lado, la PGA mantuvo su porcentaje. La Figura N°55 muestra el porcentaje de las IM que superan el 2%. En este caso, se aprecia que la IM_{CR} está superando a la $S_a(T_1, 5\%)$.

Tabla 21. Resultados obtenidos para el estado de daño de Seguridad de vida

Excentricidad en Y	1 nivel		2 niveles		3 niveles	
	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y
0.00	IM_{CR}	PGA	IM_{CR}	EPA	IM_{CR}	EPA
0.05	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	EPA	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}
0.10	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	EPA	$S_a(T_1, 5\%)$	I_{Np}
0.13	IM_{CR}	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	EPA	$S_a(T_1, 5\%)$	I_{Np}
0.15	IM_{CR}	IM_{CR}	EPA	EPA	IM_{CR}	IM_{CR}

Fuente: Elaboración propia

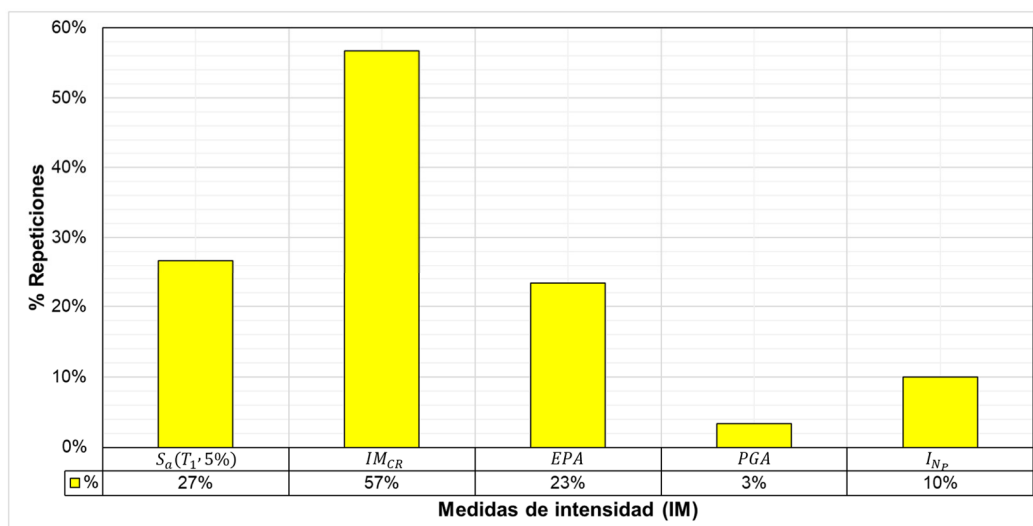


Figura 55. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Seguridad de vida

Fuente: Elaboración propia

5.8.4. Prevención de colapso

La Tabla N°22 muestra las mejores IM obtenidas para cada modelo estructural y dirección de análisis. De esto se puede decir que la IM_{CR} es la mejor IM en el 63% de los casos totales, seguido por la $S_a(T_1, 5\%)$ que está representada por un 23%. Así mismo, la EPA disminuyó su participación a 20% mientras que la I_{NP} y la PGA mantuvieron su 10% y 3% de participación respectivamente. Así mismo, se tiene la presencia de la TPH , la RMS y la IM_{SR} con un 3% cada una. La Figura N°56 muestra el porcentaje de las IM que superan el 2%.

Tabla 22. Resultados obtenidos para el estado de daño de Prevención de colapso

Excentricidad en Y	1 nivel		2 niveles		3 niveles	
	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y
0.00	IM_{CR}	PGA $S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	EPA	IM_{CR}	EPA
0.05	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR} EPA	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR} I_{NP}
0.10	IM_{CR} IM_{SR} TPH	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	I_{NP} IM_{CR}
0.13	IM_{CR} RMS	IM_{CR}	EPA	IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$	I_{NP} IM_{CR}
0.15	IM_{CR}	IM_{CR}	EPA	IM_{CR} EPA	IM_{CR}	IM_{CR}

Fuente: Elaboración propia

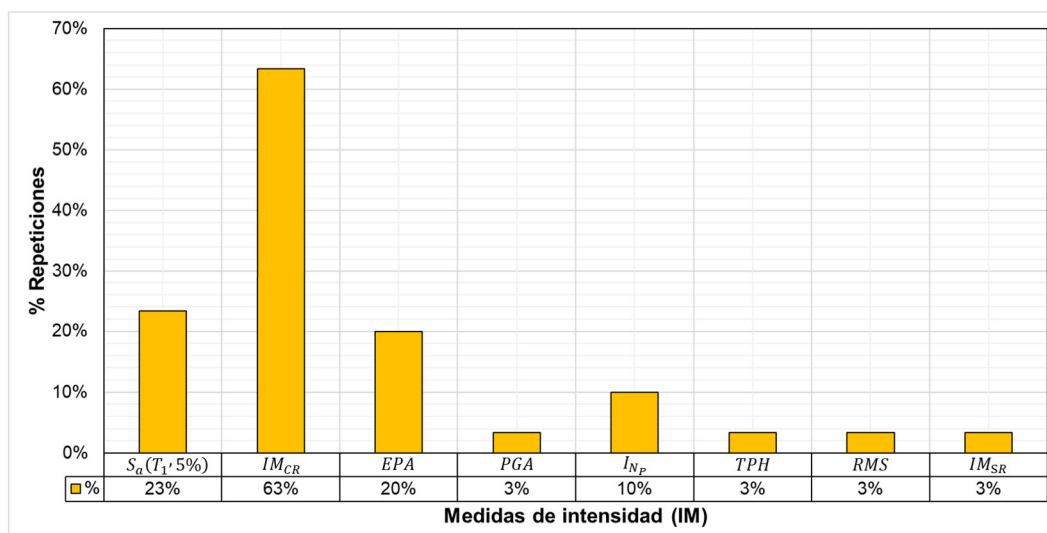


Figura 56. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Prevención de colapso

Fuente: Elaboración propia

5.8.5. Colapso

La Tabla N°23 muestra las mejores IM obtenidas para cada modelo estructural y dirección de análisis del estado de daño de Colapso. De esto se puede decir que la IM_{CR} es la mejor IM en el 73% de los casos totales, seguido por la EPA que está representada por un 37%. Así mismo, se ve una disminución considerable de la participación de la $S_a(T_1, 5\%)$ a un 3%. Por otro lado, la PGA , la TPH , la I_{Np} y la IM_{SR} tienen un 7% de participación. La Figura N°57 muestra el porcentaje de las IM que superan el 2%.

Tabla 23. Resultados obtenidos para el estado de daño de Colapso

Excentricidad en Y	1 nivel		2 niveles		3 niveles	
	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y	Dir-X	Dir-Y
0.00	IM_{SR} TPH	EPA I_{Np}	TPH IM_{SR} IM_{CR}	EPA	IM_{CR}	EPA
0.05	IM_{CR} PGA	IM_{CR}	EPA	EPA IM_{CR}	$S_a(T_1, 5\%)$ IM_{CR} I_{Np}	IM_{CR}
0.10	PGA IM_{CR}	IM_{CR}	EPA	EPA IM_{CR}	IM_{CR}	IM_{CR}
0.13	IM_{CR}	IM_{CR}	EPA	EPA IM_{CR}	IM_{CR}	IM_{CR}
0.15	IM_{CR}	IM_{CR}	EPA	EPA IM_{CR}	IM_{CR}	IM_{CR}

Fuente: Elaboración propia

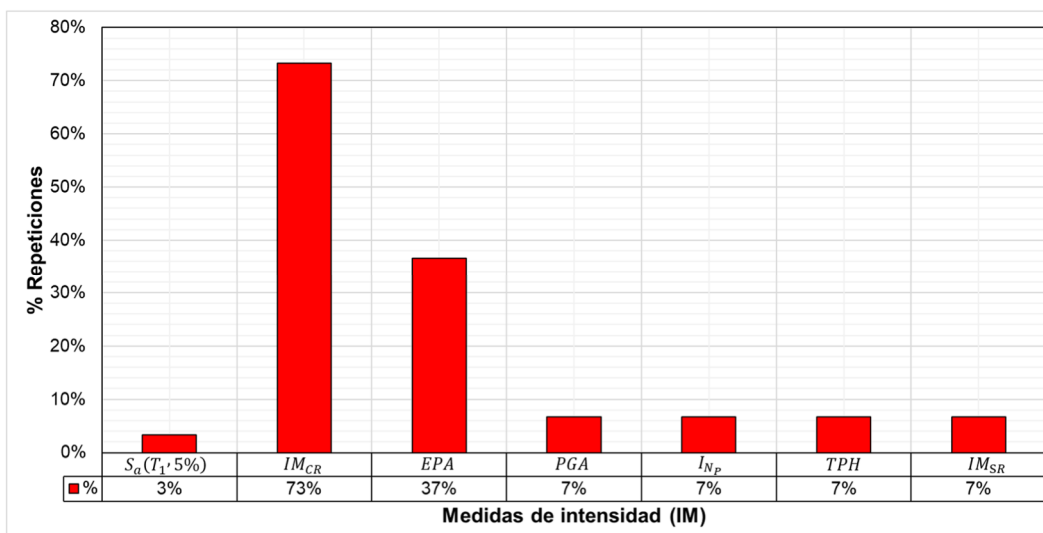


Figura 57. Evaluación de IM que han sido seleccionadas en el estado límite de Colapso

Fuente: Elaboración propia

5.8.6. Resultado general

La Figura N°58 muestra los aportes de las IM cuya participación es mayor al 0% de manera acumulada con respecto al total de casos, los cuales son 150 considerando que se tienen 5 estados de daños y 30 casos por cada estado de daño. Estos aportes se han diferenciado por una escala de colores en función a los estados de daño. En la figura se puede apreciar que a nivel general la IM_{CR} es la IM que genera menos dispersión en la representación de la respuesta estructural en un 52% seguido de la $S_a(T_1, 5\%)$ con un 37%. Así mismo, se puede reconocer la presencia de la EPA en un 19%.

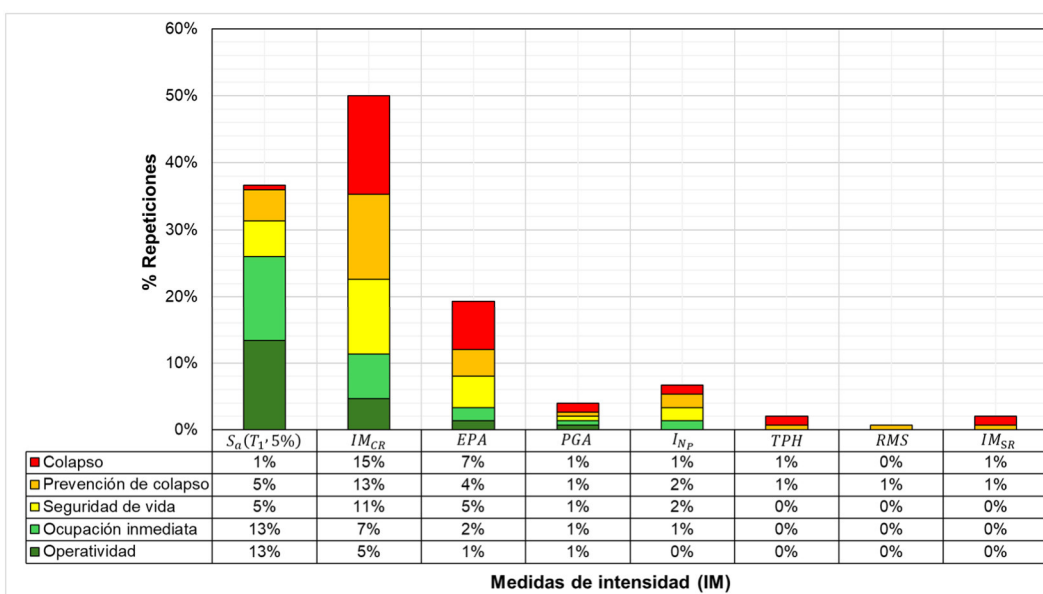


Figura 58. Evaluación de IM señaladas por estado de daño

Fuente: Elaboración propia

5.8.7. Comparación entre la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR}

Se ha realizado una comparación de los porcentajes obtenidos por cada estado de daño y dirección de análisis de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} , IM que obtuvieron una mayor participación. La Figura N°59 muestra los resultados obtenidos en la dirección X y la Figura N°60 en la dirección Y. En ambas gráficas se puede apreciar la relación inversa entre la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} , diferenciándose en el estado de daño de seguridad de vida. Dado que la tendencia se mantiene, se decidió no tomar en cuenta la dirección de análisis. Solo se tomaría en cuenta la cantidad de veces que se obtiene una IM como la que menor variabilidad genera.

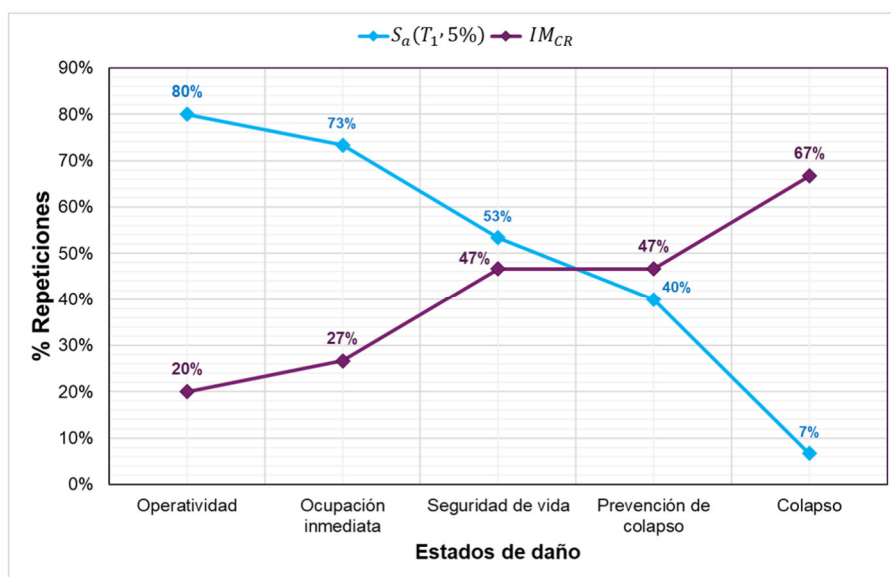


Figura 59. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} en la dirección X

Fuente: Elaboración propia

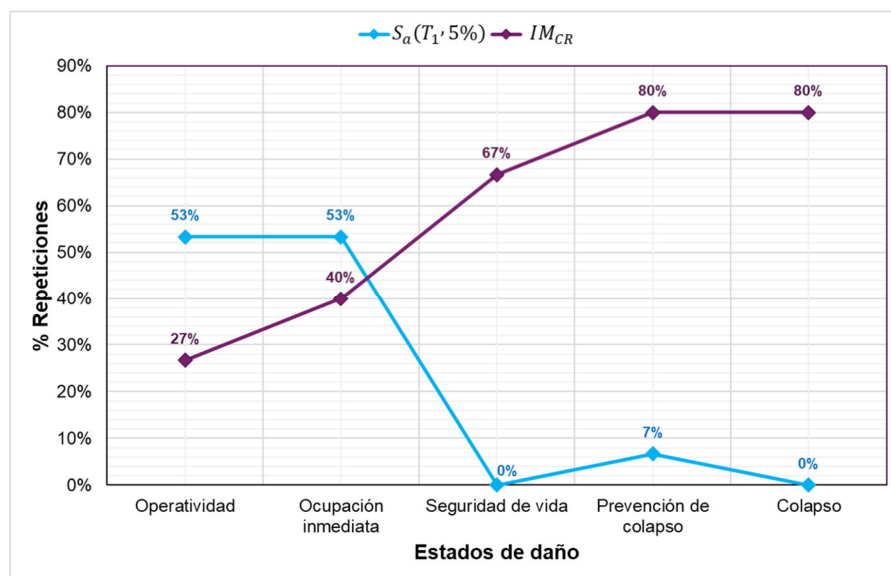


Figura 60. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} en la dirección Y

Fuente: Elaboración propia

La Figura N°61 muestra una comparación general de estas dos IM. En ella, se puede apreciar que a medida que la respuesta estructural va aumentando, se tiene una disminución en la participación de la $S_a(T_1, 5\%)$ mientras que la IM_{CR} va aumentando en participación. Entonces, se puede concluir que, cuando se tiene un comportamiento elástico, el uso de la $S_a(T_1, 5\%)$ permite la disminución de la respuesta estructural en comparación con otras IM. Así mismo, a medida que se tiene un comportamiento inelástico, esta condición ya no se cumple y sería la IM_{CR} la que disminuiría la respuesta estructural.

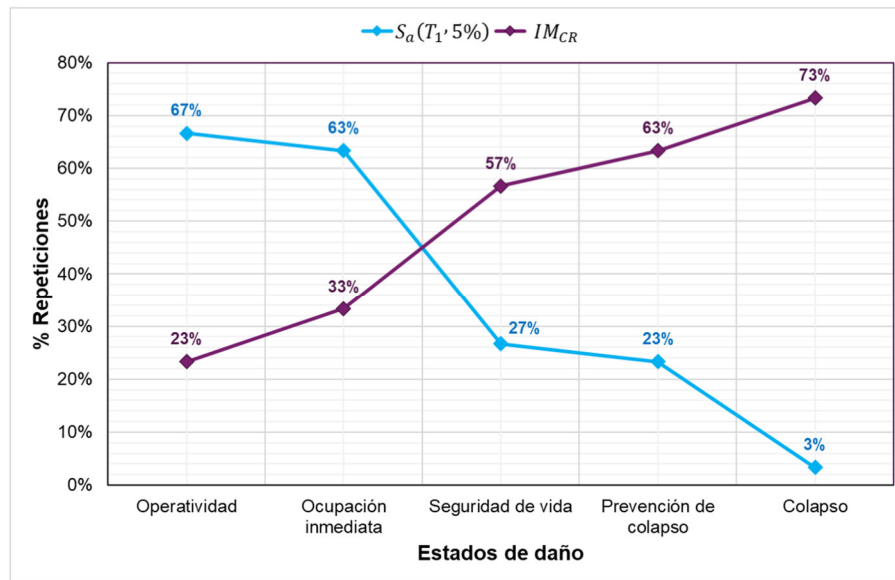


Figura 61. Comparación por estados de daño de la $S_a(T_1, 5\%)$ e IM_{CR}

Fuente: Elaboración propia

5.9 Tiempo computacional

En este apartado se muestran los tiempos empleados para cada uno de los procesos que conllevaron a emplear una codificación en Python (Ver Tabla N°24 y N°25). El dispositivo empleado presenta las siguientes características técnicas:

- Sistema operativo: Windows 10 Pro
- Procesador: Intel(R) Core (TM) i5
- Memoria: 8 Gb de RAM
- Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits

Tabla 24. Tiempo computacional del IDA bidireccional

MODELO	DIR-X	DIR-Y	SUBTOTAL	TOTAL
MD1_1N	82m 49.4s	75m 52.1s	158m 41.5s	
MD1_2N	210m 56.9s	224m 57.7s	435m 54.6s	23h 41m 18.9s
MD1_3N	359m 26.0s	467m 16.8s	826m 42.8s	
MD2_1N	68m 11.2s	78m 4.8s	146m 16.0s	
MD2_2N	173m 43.2s	181m 3.8s	354m 47.0s	19h 40m 15.1s
MD2_3N	327m 27.8s	351m 44.3s	679m 12.1s	
MD3_1N	68m 38.5s	74m 13.3s	142m 51.8s	
MD3_2N	187m 16.0s	195m 37.5s	382m 53.5s	20h 2 m 47.1s
MD3_3N	334m 39.9s	342m 21.9s	677m 1.8s	
MD4_1N	69m 49.2s	74m 55.7s	144m 44.9s	
MD4_2N	192m 10.0s	189m 9.0s	381m 19.0s	20h 35m 41.5s
MD4_3N	362m 59.7s	346m 37.9s	709m 37.6s	
MD5_1N	77m 24.3s	60m 6.5s	137m 30.8s	
MD5_2N	186m 38.2s	189m 26.8s	376m 5.0s	19h 50m 24.3s
MD5_3N	335m 31.4s	341m 17.1s	676m 48.5s	
			TOTAL	103h 50m 26.9s

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Tiempo computacional de la obtención del RotD50

REGISTROS	CANTIDAD	DURACIÓN
Peruanos	41	3h 27m 10.0s
Chilenos	15	1h 28m 28.2s
Otros países	230	26h 59m 11.3s
TOTAL		31h 54m 49.5s

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

- Las IM son parámetros que representan la demanda sísmica. Sin embargo, no hay un criterio de selección en función al tipo de estructura para identificar la IM que reduzca la variabilidad estructural.
- Las edificaciones híbridas de albañilería confinada y pórticos de concreto armado presentan respuestas estructurales resultado de la combinación de ambos sistemas.
- La metodología propuesta permite seleccionar registros sísmicos representativos considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones. Esto fue posible al emplear el espectro RotD50 para realizar el ajuste espectral de los registros, previamente recortados según el rango de duración significativa, al espectro de la norma E.030.
 - Es posible reducir el tiempo de procesamiento de datos al reducir el número de datos de cada registro sísmico tomando en cuenta la duración significativa del sismo. En un análisis bidireccional se tomaría un rango de duración significativa que englobe los rangos obtenidos en cada dirección.
 - El espectro RotD50 representa la energía sísmica promedio de un sismo considerando un promedio geométrico de las dos componentes horizontales del sismo (bidireccionalidad) y el ángulo de incidencia del sismo.
 - La selección de registros sísmicos bidireccionales puede realizarse mediante el ajuste espectral del RotD50 al espectro de la norma E.030.
 - Más del 90% del total del número de registros sísmicos no superaba el 50% del máximo MSE obtenido, lo cual indicó que la selección de los registros sísmicos no está influenciada significativamente por el MSE y se podía seleccionar comparando la cantidad de datos del registro sísmico.
- La metodología propuesta permite seleccionar edificaciones representativas considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones. Los modelos propuestos consideraron sistemas de albañilería confinada en una dirección y pórticos de concreto armado en la dirección perpendicular.
 - Los muros de albañilería según sea su proceso constructivo tienen comportamientos y modos de falla distintos. Estos pueden ser muros del tipo relleno o muros de albañilería confinada.
 - El comportamiento de los muros de albañilería del tipo relleno se puede adaptar al comportamiento de los muros de albañilería confinada por medio de una calibración de la curva envolvente de histéresis empleando como referencia los resultados de ensayos realizados a los muros de albañilería confinada.

- El f'_m obtenido mediante la fórmula del Eurocódigo 6 es la que mejor se ajusta a los parámetros de los muros de albañilería ensayados empleados para la presente investigación.
- La metodología propuesta permitió evaluar la variabilidad de la respuesta estructural debido al uso de la IM considerando el efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo. La variabilidad fue evaluada a partir de un análisis bidireccional para cada tipo de edificación propuesta a través del CV y luego se determinó la IM adecuada por cada estado de daño.
 - Las IM presentan características complejas y variables, esto sumado a la gran cantidad de IM que existen es que existe variabilidad de la respuesta estructural debido al uso de estas.
 - Los resultados mostraron que durante un comportamiento elástico el uso de la $S_a(T_1, 5\%)$ como IM permite la disminución de la dispersión de la respuesta estructural en comparación con las otras IM estudiadas. Por otro lado, en un comportamiento inelástico, la IM_{CR} es la IM más adecuada para disminuir la variabilidad estructural.
 - La IM_{CR} se obtiene de una fórmula en la que se incluye el uso de la $S_a(T_1, 5\%)$ y otros factores que se han calibrado para las estructuras estudiadas por el autor que la propuso. Esto indica una tendencia a emplear variaciones de la $S_a(T_1, 5\%)$ para obtener una IM que genere una menor variabilidad de la respuesta estructural.

Recomendaciones

- La metodología propuesta permitió seleccionar registros sísmicos representativos considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones. Esto a través del ajuste espectral de los espectros RotD50 de los registros, previamente recortados según el rango de duración significativa, al espectro de la norma E.030. Además, se consideró los que tengan menos de 2000 puntos ya que se encontraban por debajo del 50% del MSE máximo obtenido, con el fin de reducir el tiempo computacional. Por tanto, se recomienda que se seleccionen registros sísmicos que se ajusten mejor al espectro objetivo sin considerar el número de datos que contiene el registro con el fin de usar registros con menor MSE.
- Se propusieron edificaciones representativas considerando la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en edificaciones. Se propusieron 15 modelos de 5 arquitecturas típicas y variando los niveles (1-3) considerando sistemas de albañilería confinada en una dirección y pórticos de concreto armado en la dirección perpendicular. Además, se tomó en cuenta que se tenga la misma densidad de muros en los modelos. Por tanto, se recomienda el uso de una mayor cantidad de modelos estructurales variando la densidad de muros con el fin de obtener más parámetros de la estructura.
- La metodología propuesta permitió evaluar la variabilidad de la respuesta estructural debido al uso de la IM para cada tipo de edificación propuesta a través del CV y luego se determinó la IM adecuada por cada estado de daño.
 - Del análisis se obtuvo que la $S_a(T_1, 5\%)$ y la IM_{CR} son las IM adecuadas para un comportamiento elástico e inelástico respectivamente. La IM_{CR} contiene dentro su formulación a la $S_a(T_1, 5\%)$. Por tanto, se recomienda estudiar nuevas IM que consideren el uso de la $S_a(T_1, 5\%)$ y proponer nuevas IM que se adapten al tipo de edificación que se requiera analizar.

Referencias bibliográficas

- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, 438-83.
- Baker, J., & Cornell, A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 35, 1077-1095.
<https://doi.org/10.1002/eqe.571>
- Beyer, K., & Bommer, J. (2007). Selection and Scaling of Real Accelerograms for Bi-Directional Loading: A Review of Current Practice and Code Provisions. *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 13-45.
<http://dx.doi.org/10.1080/13632460701280013>
- Bojórquez, E., & Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 996-1008.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.03.006>
- Boore, D., Watson-Lamprey, J., & Abrahamson, N. (2006). Orientation-Independent Measures of Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1502-1511. <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Buratti, N. (24-28 de setiembre de 2012). *A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures* [Presentación de paper]. Simposio Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2011). Prediction equations for the standardized version of cumulative absolute velocity as adapted for use in the shutdown of U.S. nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 241 (7), 2558-2569.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.020>
- Carrasco, M. (2017). Evaluación del Análisis Dinámico Incremental mediante modelos de atenuación [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco]. <https://hdl.handle.net/11191/6239>
- Centro de Observación de Ingeniería Sísmica CEOIS (s.f.). *Base de datos de registros de aceleración*. Recuperado el 23 de febrero de 2024 de <https://www.cismid.uni.edu.pe/ceojs/red/#>
- Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (s.f.). *Registro de eventos significativos*. Recuperado el 23 de febrero de 2024 de <https://evtdb.csn.uchile.cl/>
- Center for Engineering Strong Motion Data (s.f.). *Strong Motion Data*. Recuperado el 16 de noviembre de 2023 de <https://www.strongmotioncenter.org/index.html>
- Chopra, A. (2006). Elastic response spectrum: A historical note. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(1), 3-12. <https://doi.org/10.1002/eqe.609>

- Chumpitaz, J. (2021). *Evaluación de métodos de estimación de análisis dinámico incremental a partir de análisis estático no-lineal* [Tesis de maestría, Escuela Técnica de Camins]. Repositorio Institucional – Escuela Técnica de Camins.
- Cordova, P., Deierlein, G.G., Mehanny, S.S., & Cornell, C.A. (2001). Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 51.
- Cosenza, E., & Manfredi, G. (2000). Damage indices and damage measures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2 (1), 50-59.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1528-2716\(200001/03\)2:1<50::AID-PSE7>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1528-2716(200001/03)2:1<50::AID-PSE7>3.0.CO;2-S)
- Devore, J. (2012). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. (8° ed.). Cengage Learning.
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00112-5)
- Díaz, M., Zavala, C., Flores, E., & Cardenas, L. (2019). Development of analytical models for confined masonry walls based on experimental results in Lima city. *Journal TECNIA*, 29(2), 23-29. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.711>
- Fajfar, P., Vidic, T., & Fischinger, M. (1990). A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9 (5), 236-242. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(05\)80002-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(05)80002-8)
- Gubana, A., & Mazelli, A. (2023). Fragility curves for different intensity measures for a gravity load-design RC hospital building: A case study. *Structures*, 56.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104925>
- Heumann, C., & Schomaker, S. (2016). *Introduction to Statistics and Data Analysis*. Springer Nature.
- Hossein, M., & Kabeyasawa, T. (2004). Effect of Infill Masonry Walls on the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings Subjected to the 2003 Bam Earthquake Strong Motion: A Case Study of Bam Telephone Center. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 79(3/4), 133-156.
- Housner, G. (1952). *Intensity of ground motion during strong earthquakes*. California Institute of Technology.
- Housner, G. (18-20 de junio de 1975). *Measures of severity of earthquake ground shaking* [Presentación de paper]. US National Conference on Earthquake Engineering. Michigan, USA.

- Husid, L. (1969). Características de terremotos. Análisis general. *Revista IDIEM*, 8(1), 21-42. <https://revfono.uchile.cl/index.php/RIDIEM/article/view/38536>
- Hussain, A., Chandra, S., & Das, S. (2022). Seismic behaviour of structures under bidirectional ground motion: Does the angle of incidence have any influence? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107328>
- Instituto Geofísico del Perú (s.f.). *Centro Sismológico Nacional*. Recuperado el 23 de febrero de 2024 de <https://ultimosismo.igp.gob.pe/descargar-datos-sismicos>
- Kelmansky, D. (2009). *Estadística para todos: Estrategias de pensamiento y herramientas para la solución de problemas*. Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica
- Kiani, A., Torabi, M., & Mirhosseini, S. (2019). Intensity measures for the seismic response evaluation of buried steel pipelines under near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18, 917-931. <https://doi.org/10.1007/s11803-019-0543-4>
- Kostinakis, K., & Athanatopoulou, A. (2016). Incremental dynamic analysis applied to assessment of structure-specific earthquake IMs in 3D R/C buildings. *Engineering Structures*, 125, 300-312. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.007>
- Lavado, L., Taira, J., & Gallardo, J. (2014). Current State of Masonry Properties Material on Emerging Zones in Lima City. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 1015-1020. <https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p1015>
- Lavado L., Gallardo, J., & Honma, C. (13-18 de setiembre de 2020). *Experimental and numerical analysis of behaviour in compression and shear of handmade clay brick masonry* [Presentación de paper]. 17th World Conference on Earthquake Engineering. Sendai, Japón.
- Madan, A., Reinhorn, A., Mander, J., & Valles, R. (1997). Modeling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 123(10), 1295 – 1302. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:10\(1295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:10(1295))
- Mazza, F., Mazza, M., & Liguori, C. (2016). Multicomponent nonlinear incremental dynamic analysis of R.C. spatial framed structures subjected to near-fault earthquakes. *Contemporary Engineering Sciences*, 9(26), 1255-1272. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2016.67127>
- Mehanny, S. (2009). A broad-range power-law form scalar-based seismic intensity measure. *Engineering Structures*, 31(7), 1354-1368. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.003>

- Moscoso, E. (20-21 de agosto de 2020). *Desempeño de edificaciones de albañilería peruana considerando el efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo* [Sesión de simposio]. XXXIII Simposio Nacional de Prevención de Desastres-Simposio Internacional de Ingeniería Sismorresistente, Lima, Perú.
- Moscoso, E., Baldeon, L., & Chicoma, J. (28 de junio-2 de julio de 2021). *Evaluación el desempeño estructural bidireccional de edificaciones de albañilería con sistemas híbridos ortogonales considerando la actual propuesto de Norma E.070 "Albañilería"* [Presentación de paper]. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Ica, Perú.
- Moscoso, E., & Quiroz, L. (2019). Proposal for Peruvian standard considering the effect of bidirectionality and the angle of incidence of an earthquake. *Journal TECNIA*, 29(2), 99-108. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.703>
- Moscoso, E., & Saito, T. (2023). Machine Learning-Based Rapid Post-Earthquake Damage Detection of RC Resisting-Moment Frame Buildings. *Sensors*, 23. <https://doi.org/10.3390/s23104694>
- Newmark, N., & Hall, W. (1982). *Earthquake Spectra and Design*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Noriega, A. (2019). *Reducción de tiempo de procesamiento en el análisis dinámico incremental* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional – Universidad de los Andes.
- Nguyen, H., Shin, M., & LaFave, J. (2023). Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand models of steel moment frames. *Journal of Building Engineering*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105629>
- Ortega, V., & Yaranga, R. (2023). *Análisis de la bidireccionalidad sísmica en la respuesta de estructuras de concreto armado con irregularidades de esquina entrante y de piso blando* [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias]. Repositorio Institucional – Universidad Peruana de Ciencias.
- Ortiz, K. (2019). *Evaluación del efecto de la simultaneidad de las componentes de sismo en estructuras con irregularidad torsional* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Ingeniería.
- Park, Y.-J., Ang, A.H.-S., & Wen, Y.K. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 740-757.
- Pauley, T., & Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- Paz, E. (2012). *Procedimiento de Cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el Diseño Sismorresistente de Estructuras* [Tesis de grado, Universidad de San

- Carlos de Guatemala]. Repositorio Institucional – Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pramanik, D., Banerjee, A., & Roy, R. (2016). Implications of bi-directional interaction on seismic fragilities of structures. *Couple Systems Mechanics*, 5(2), 101-126.
<http://dx.doi.org/10.12989/csm.2016.5.2.101>
- Reed, J., & Kassawara, R. (1990). A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake. *Nuclear Engineering and Design*, 123 (2-3), 387-396.
[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(90\)90259-Z](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90259-Z)
- Riddell, R., & Garcia, J. (2001). Hysteretic energy spectrum and damage control. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(12), 1791-1816.
<https://doi.org/10.1002/eqe.93>
- Rong, X., Yang, J., Jun, L., Zhang, Y., Zheng, S., & Dong, L. (2022). Optimal ground motion intensity measure for seismic assessment of high-rise reinforced concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, 18.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01678>
- Saito, T. (s.f.). *STERA 3D: Technical Manual Version 7.4*. Toyohoshi University of Technology.
- Sarma, S.K., & Yang, K.S. (1987). An evaluation of strong motion records and a new parameter A95. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 15(1), 119-132.
<https://doi.org/10.1002/eqe.4290150109>
- Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la construcción-SENCICO (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Reglamento Nacional de edificaciones.
- Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la construcción-SENCICO (2006). *Norma Técnica E.070 Albañilería*. Reglamento Nacional de edificaciones.
- Sugano, S., Saito, T., Zavala, C., & Cardenas, L. (2014). Strength and Deformation of Confined Brick Masonry Walls Subjected to Lateral Forces – Review of Existing Test Data in Japan and Peru –. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 984-992.
<https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p0984>
- Trifunac, M., & Brady, A. (1975). A study of the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0650030581>
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. (2001). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491-514.
<https://doi.org/10.1002/eqe.141>

- Zavala, C., Lavado, L., Taira, J., Cardenas, L., & Diaz, M. (2014). Comparison of Behaviors of Non-Engineered Masonry Tubular Block Walls and Solid Engineered Walls. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 1021-1025.
<https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p1021>
- Zavala, C., Diaz, M., Flores, E., & Cardenas, L. (2019). Damage limits states for confined masonry walls based on experimental test. *Journal TECNIA*, 29(2), 135-141.
<https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.715>

Anexos

	Página
Anexo 1: Curvas IDA	1
Anexo 2: Análisis de la variabilidad estructural por estado de daño	42
Anexo 3: Secuencia de ejecución de códigos	46
Anexo 3.1. Cálculo de espectro RotD50.....	46
Anexo 3.2. Selección de registros sísmicos	47
Anexo 3.3. Análisis IDA	47
Anexo 3.4. Análisis de la variabilidad estructural	49

Anexo 1: Curvas IDA

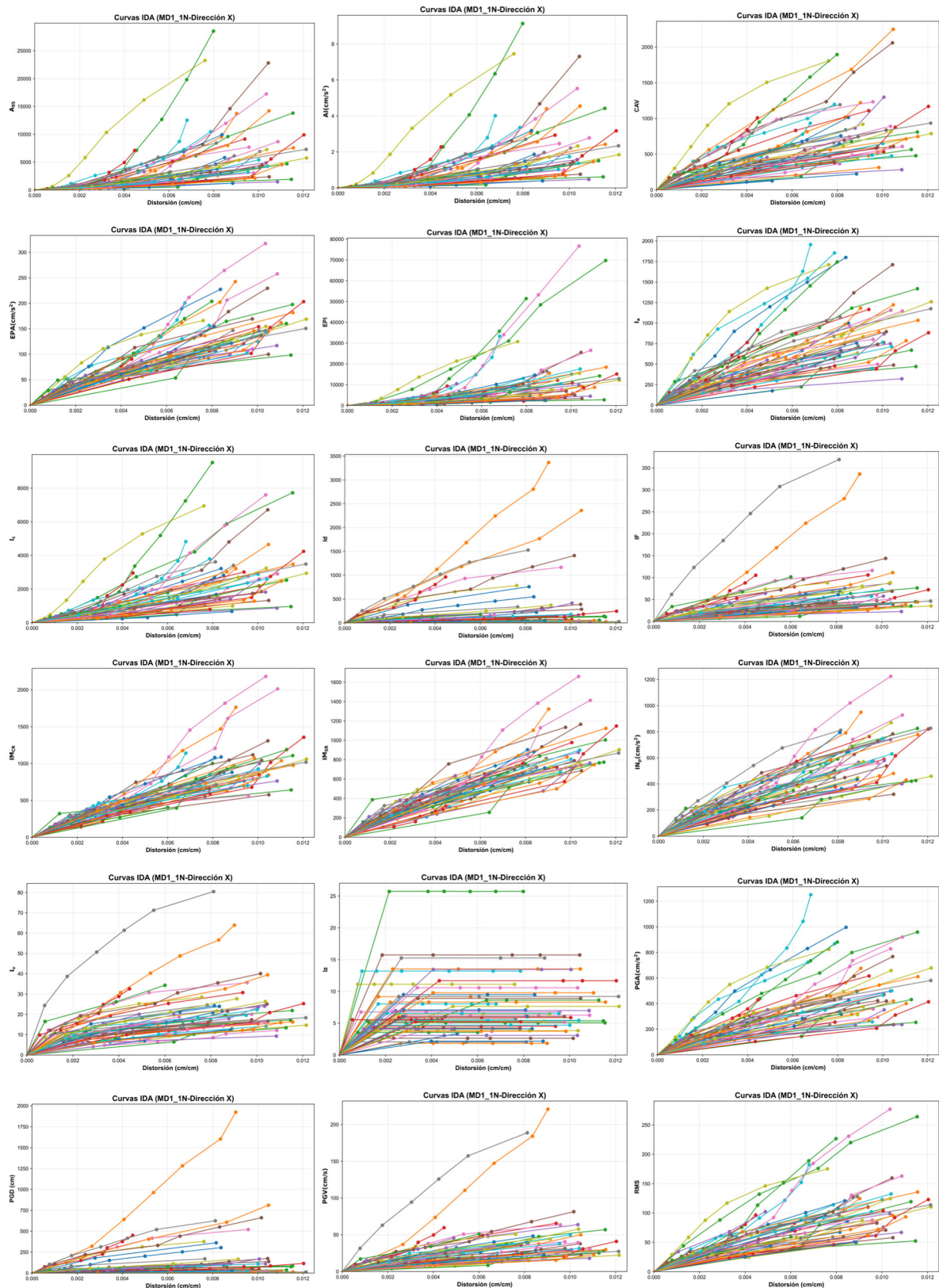


Figura Ap. 1. Curvas IDA MD1_1N

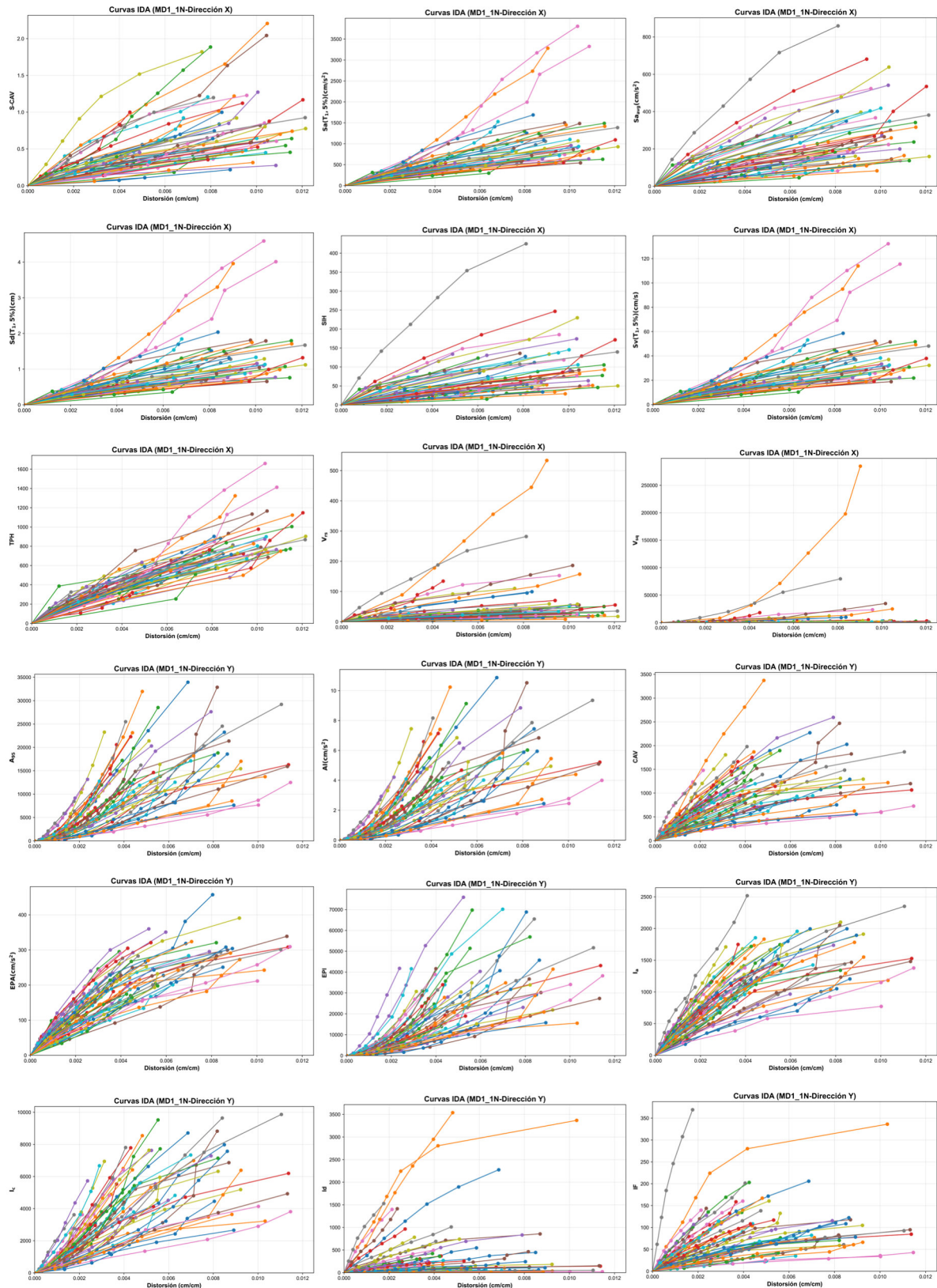


Figura Ap. 1. Curvas IDA MD1_1N (Continuación)

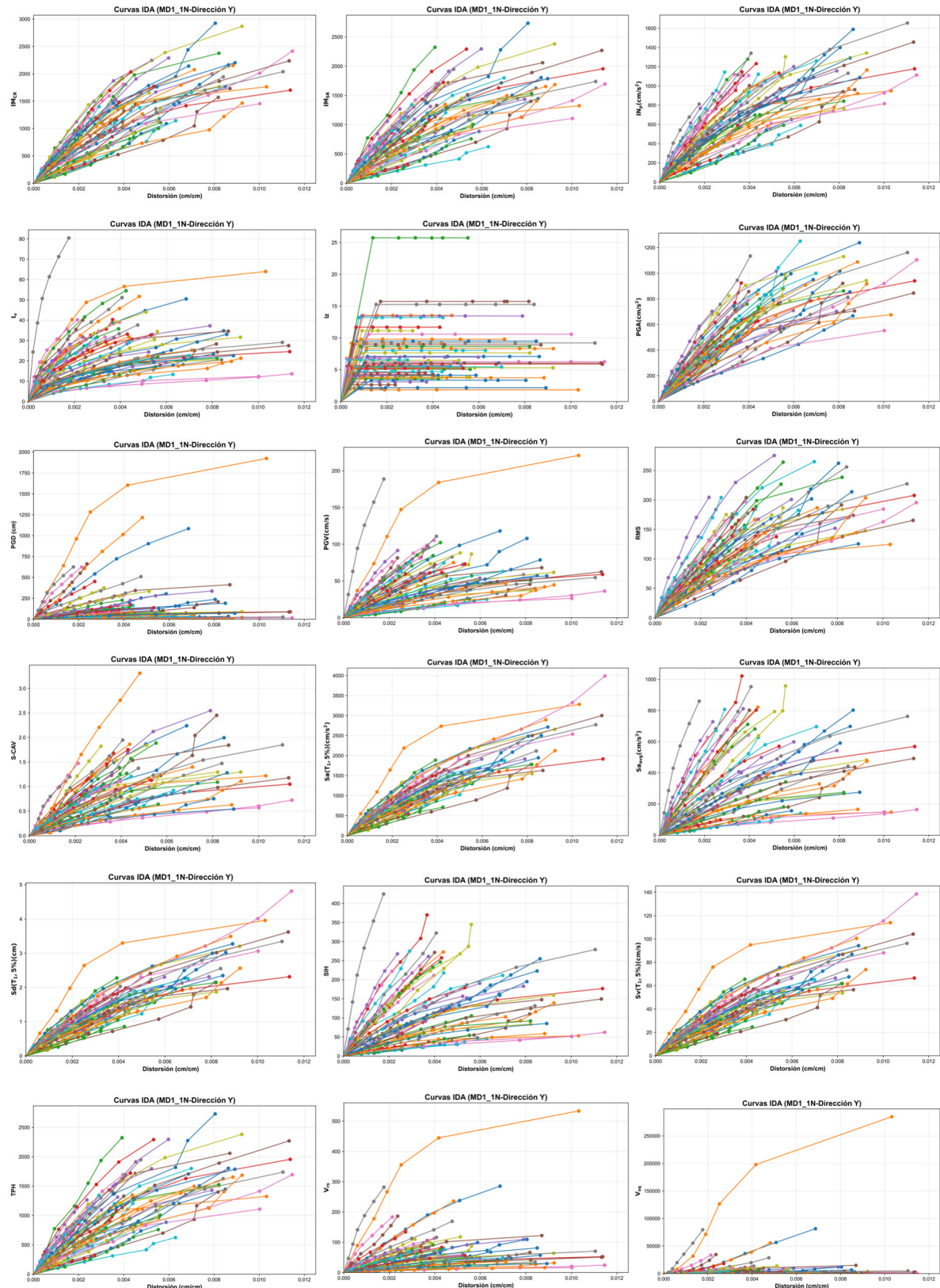


Figura Ap. 1. Curvas IDA MD1_1N (Continuación)

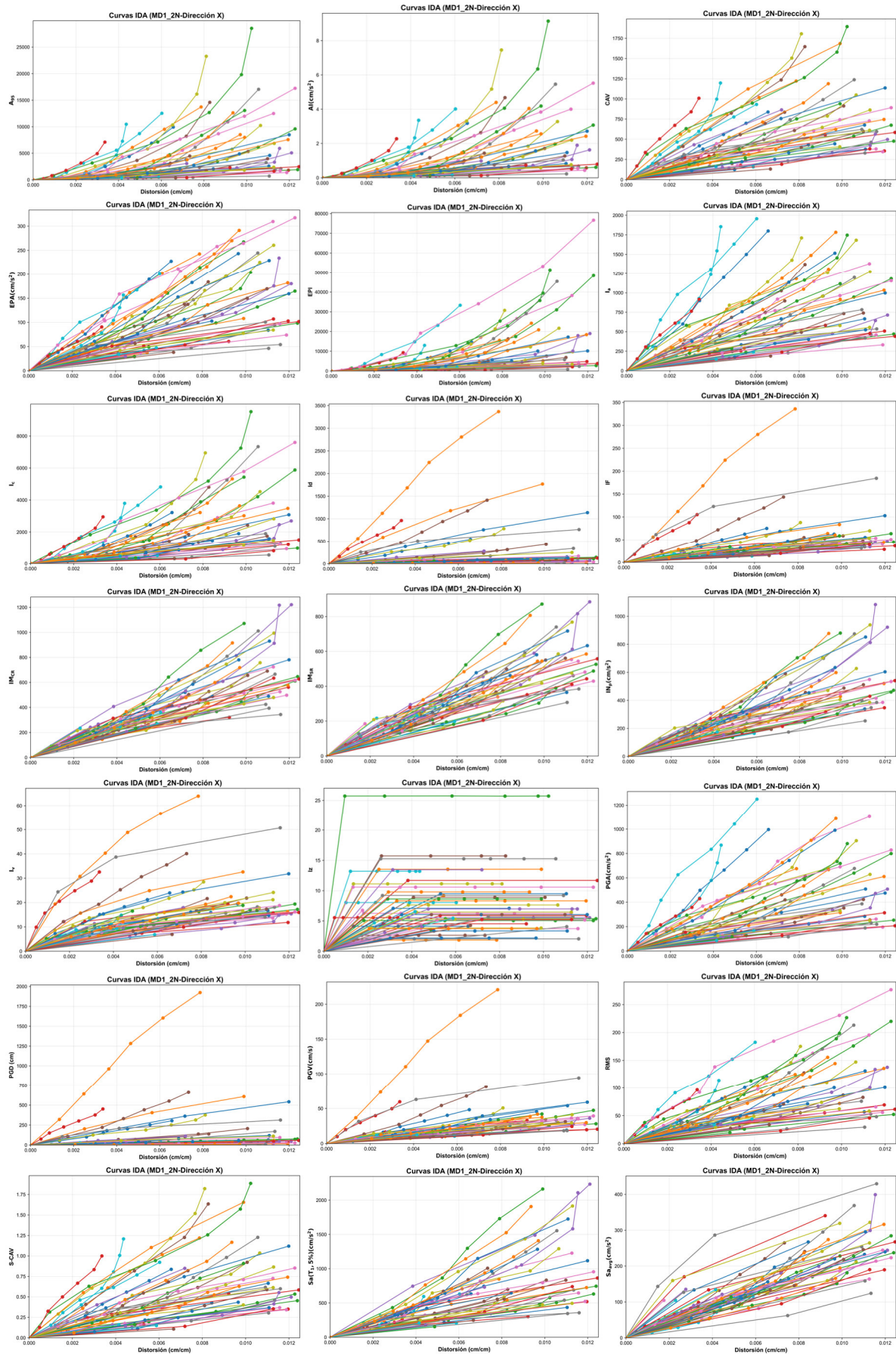


Figura Ap. 2. Curvas IDA MD1_2N

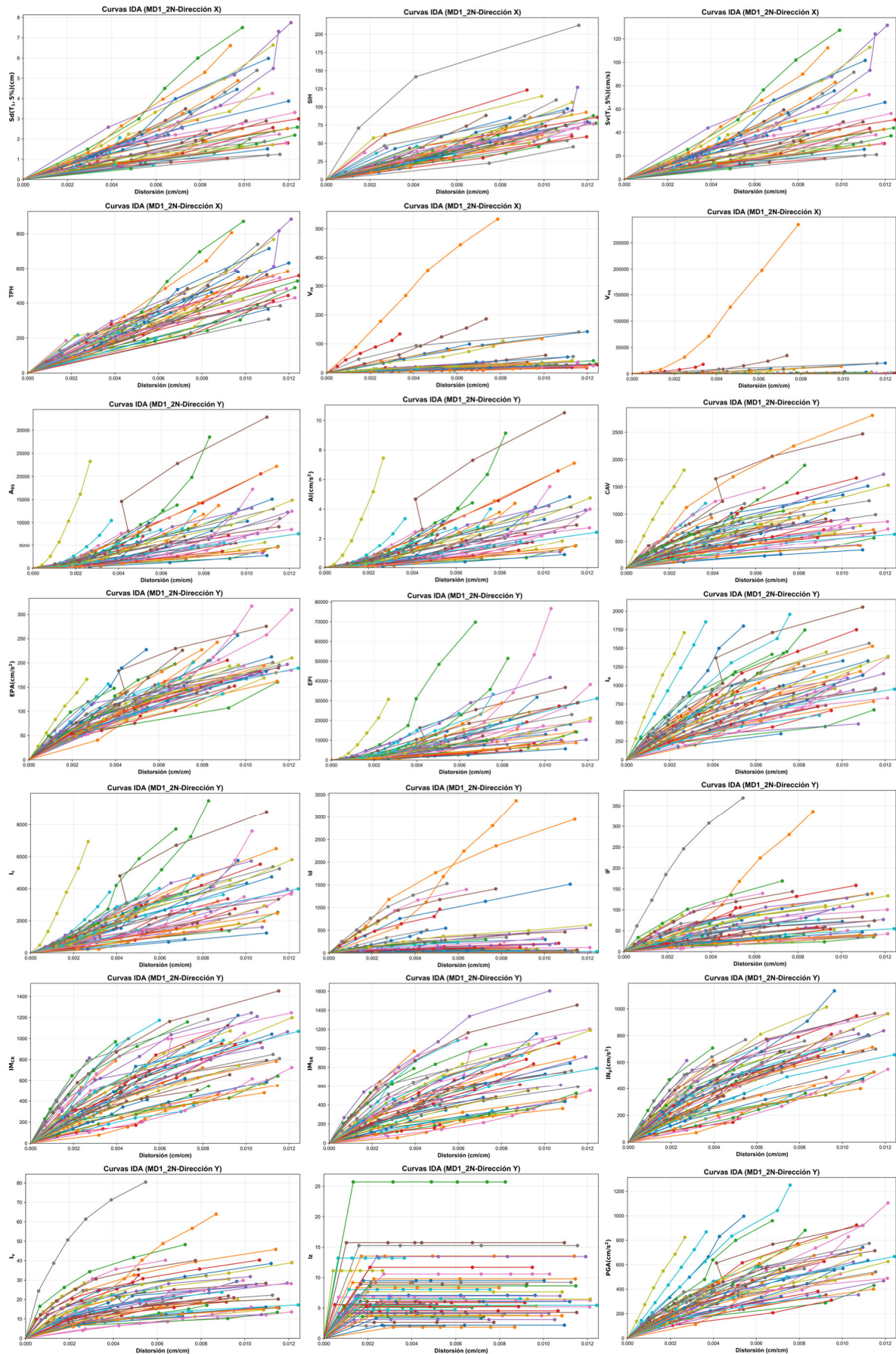


Figura Ap. 2. Curvas IDA MD1_2N (Continuación)

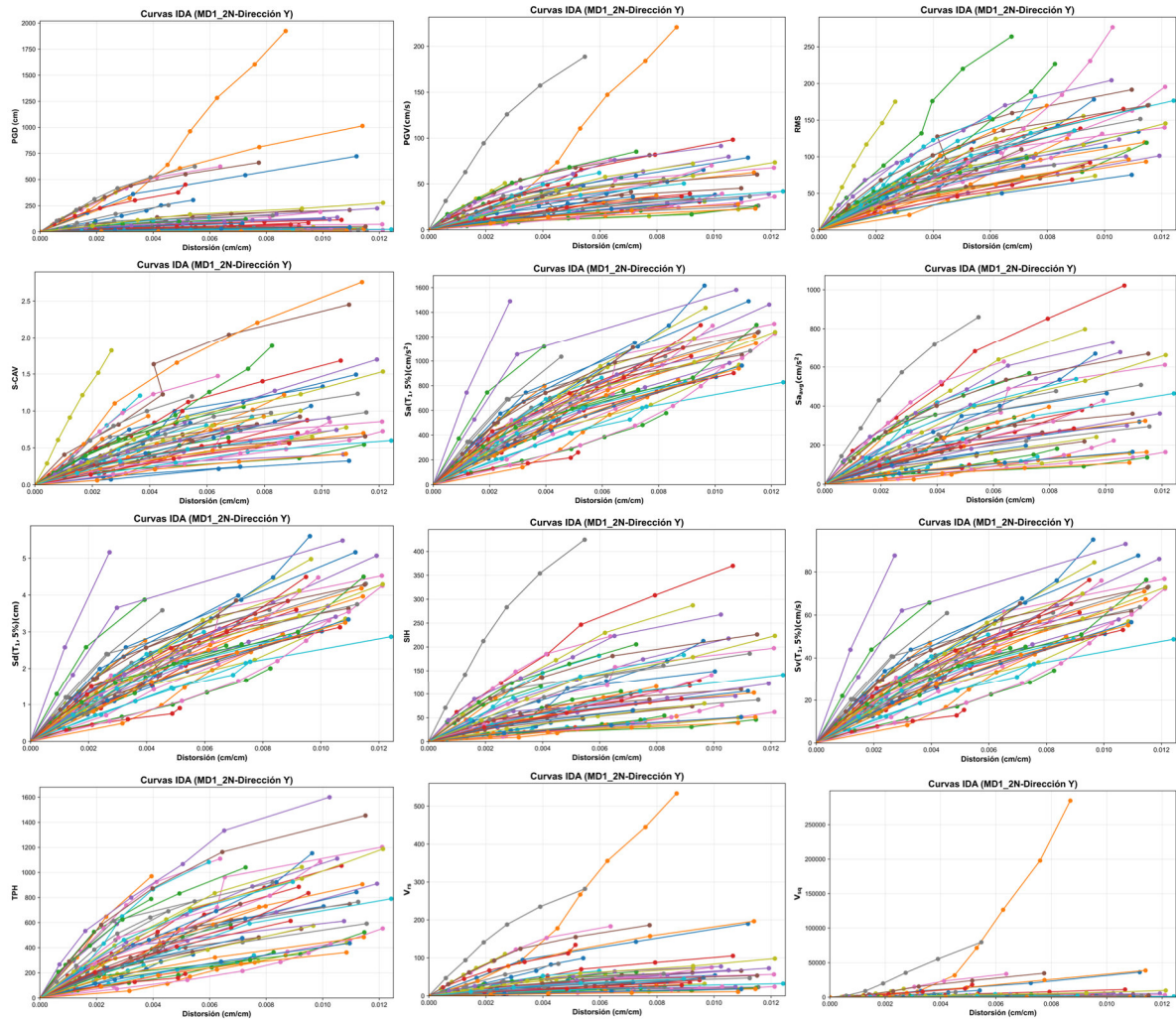


Figura Ap. 2. Curvas IDA MD1_2N (Continuación)

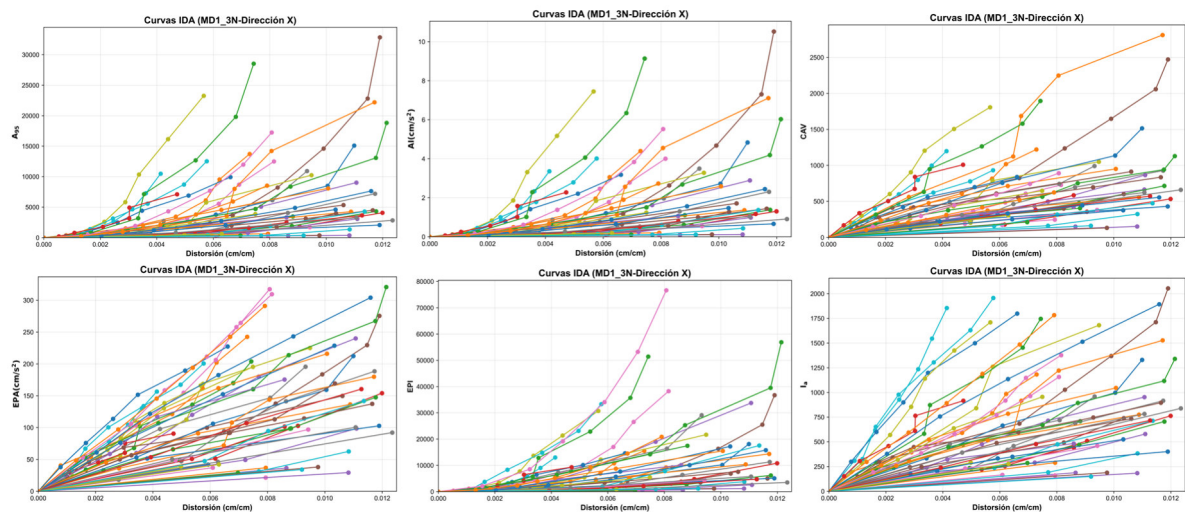


Figura Ap. 3. Curvas IDA MD1_3N



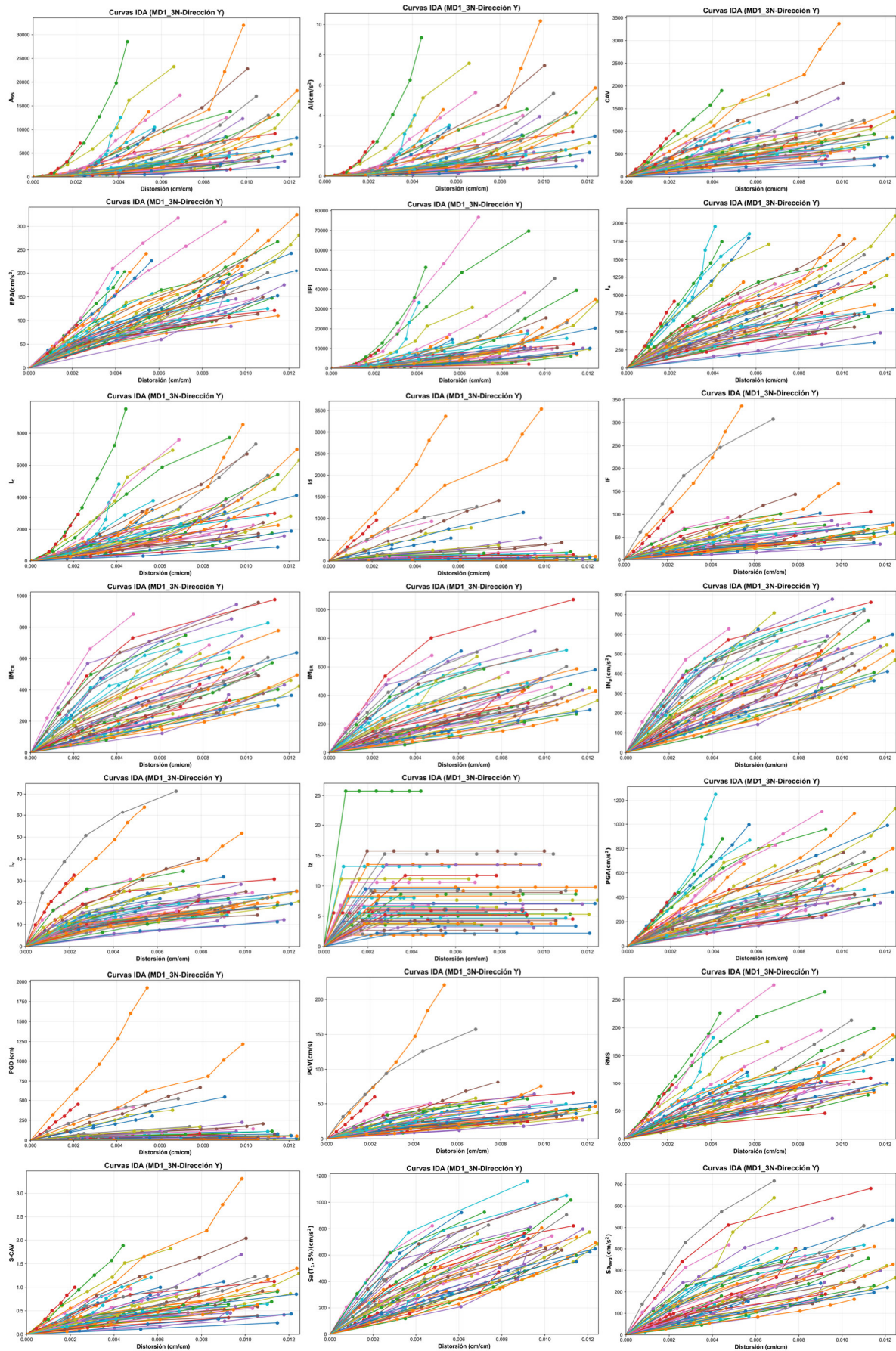


Figura Ap. 3. Curvas IDA MD1_3N (Continuación)

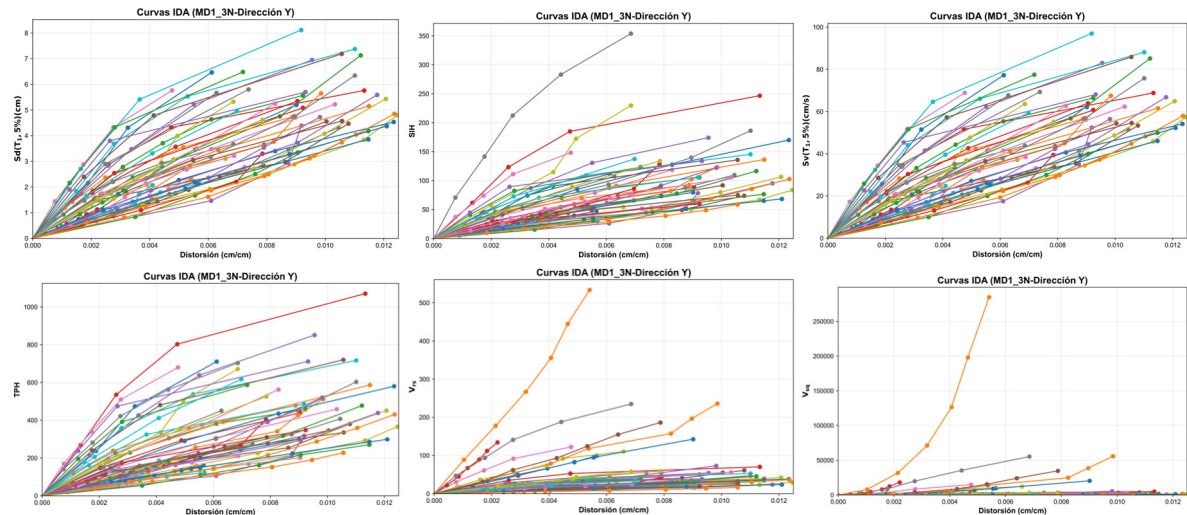


Figura Ap. 3. Curvas IDA MD1_3N (Continuación)

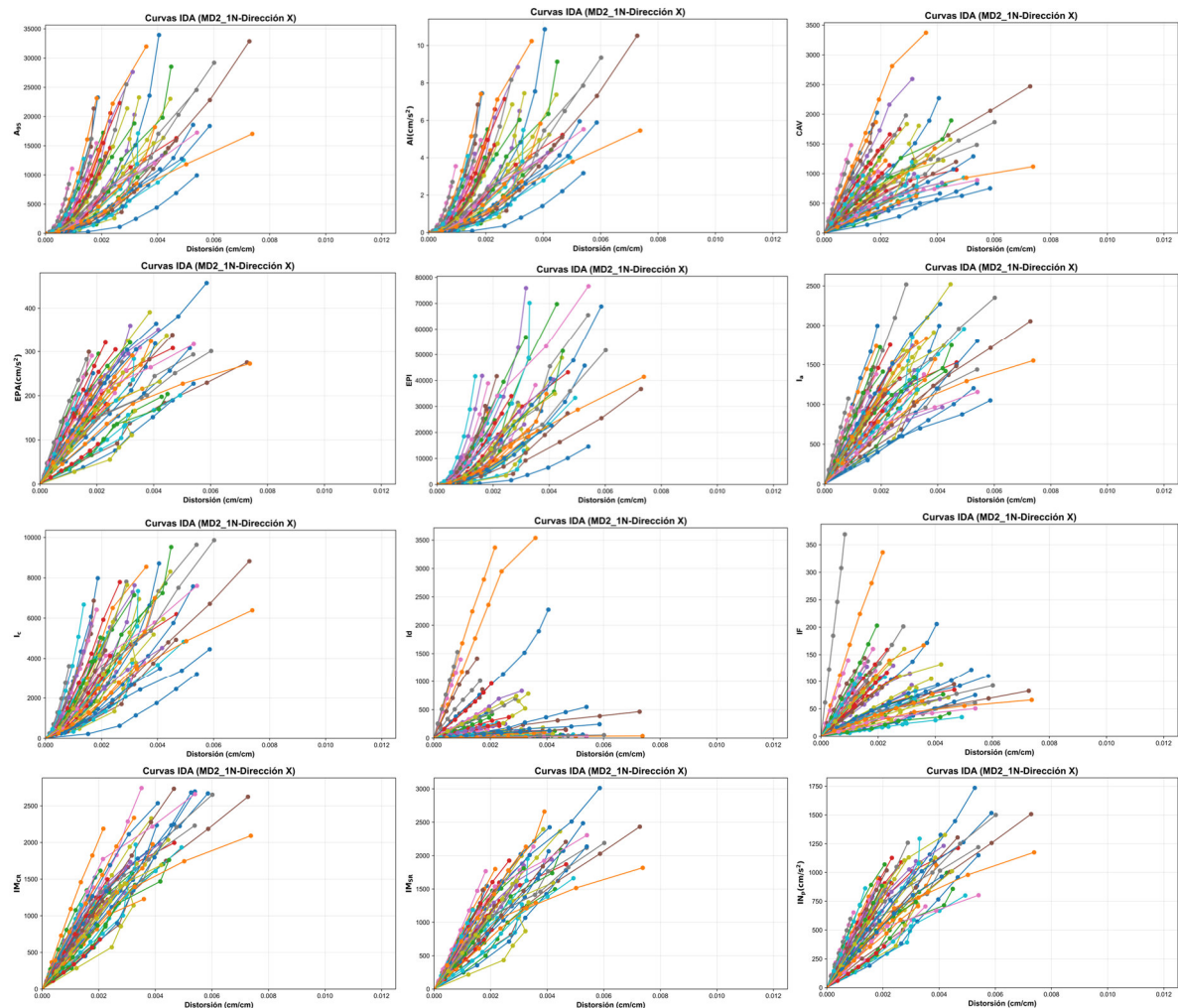


Figura Ap. 4. Curvas IDA MD2_1N

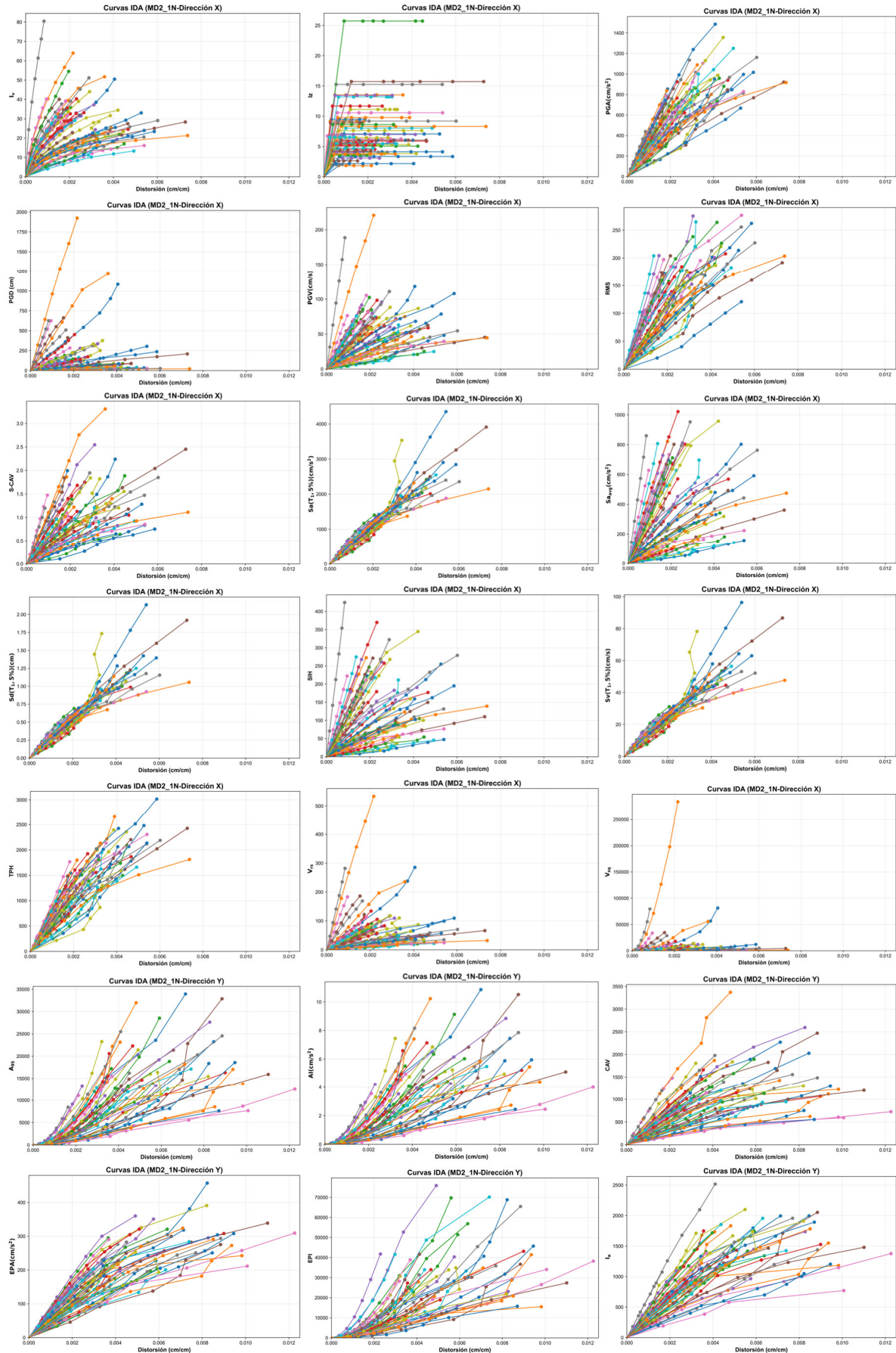


Figura Ap. 4. Curvas IDA MD2_1N (Continuación)



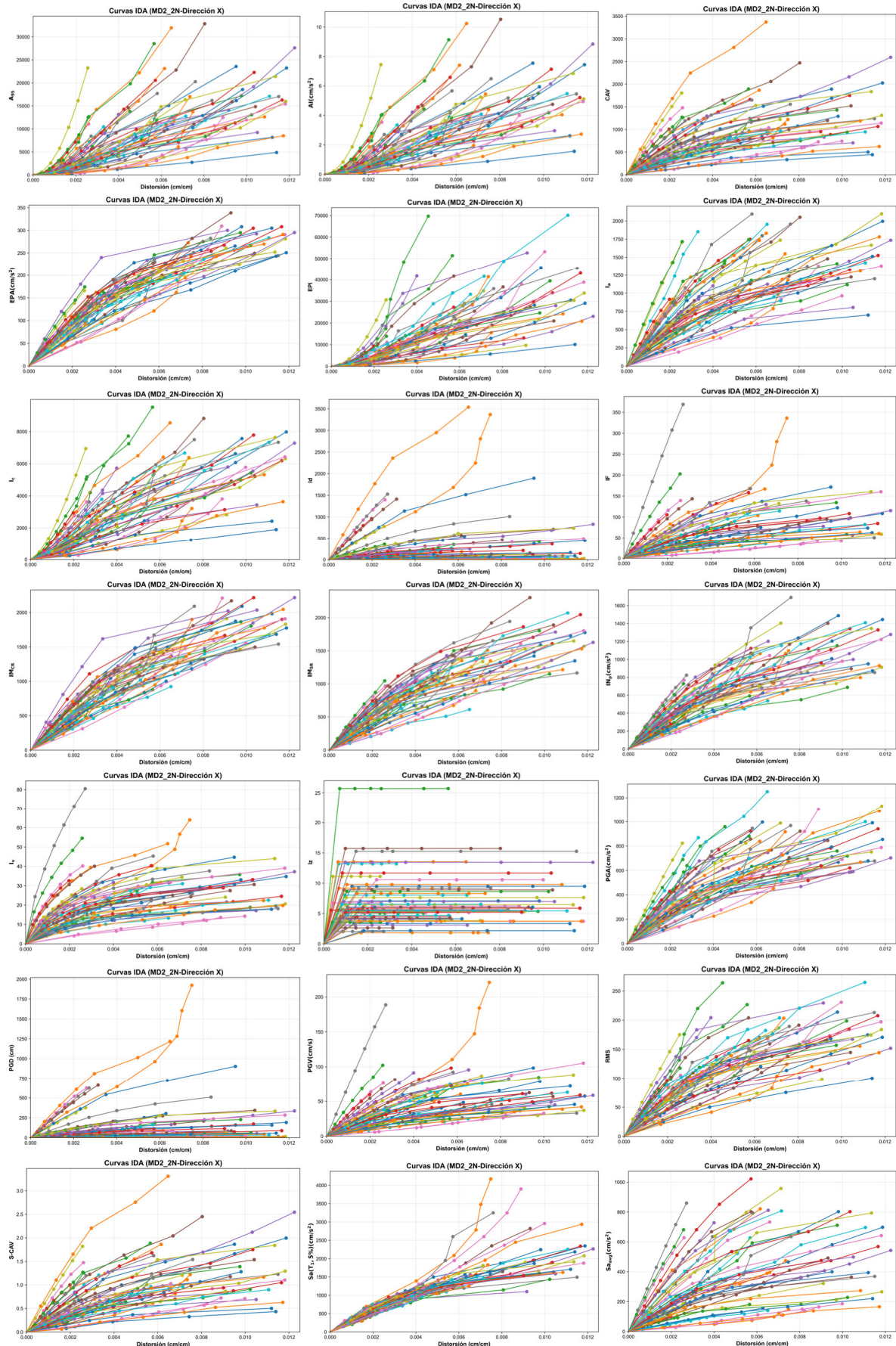


Figura Ap. 5. Curvas IDA MD2_2N

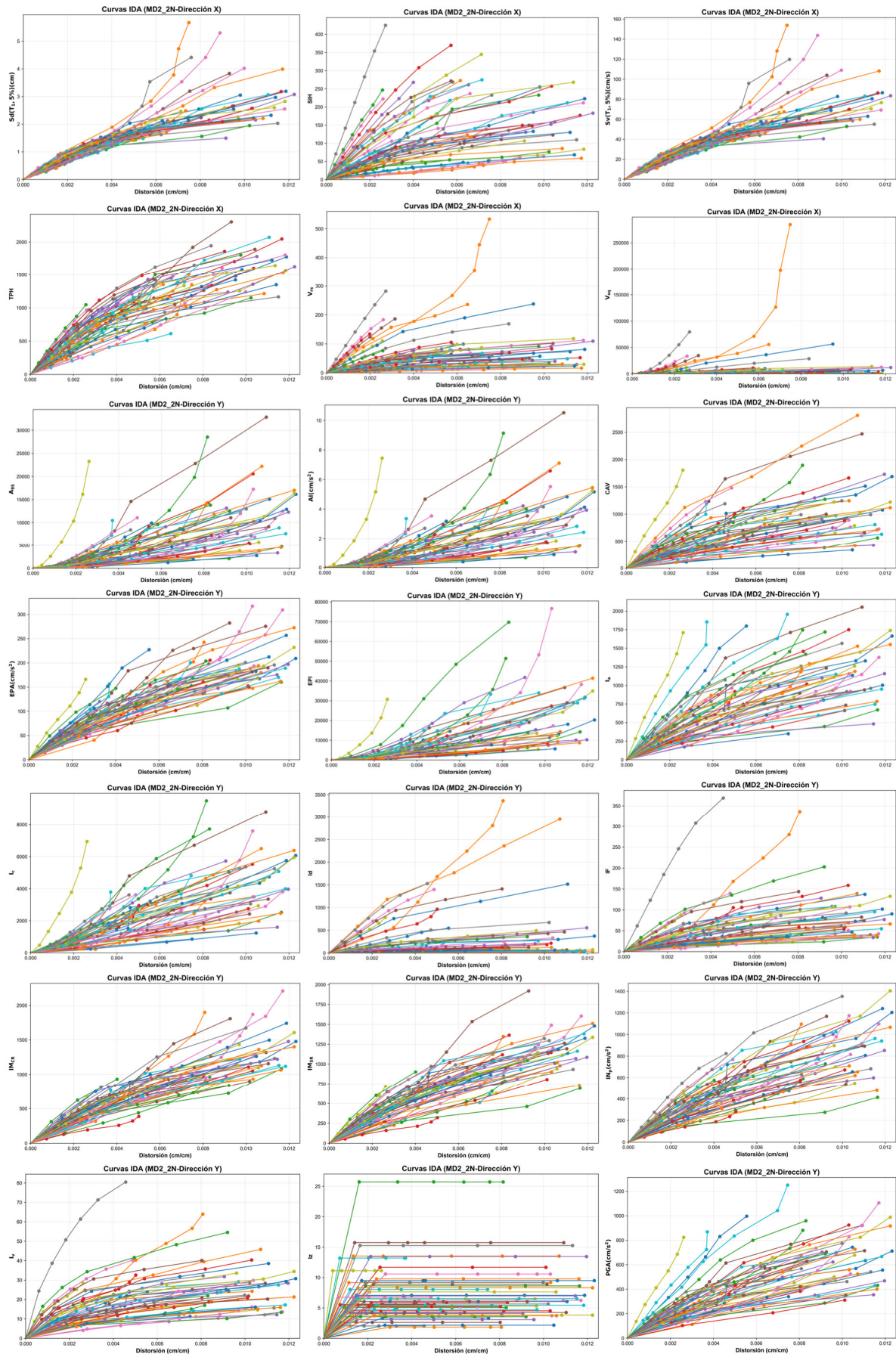


Figura Ap. 5. Curvas IDA MD2_2N (Continuación)

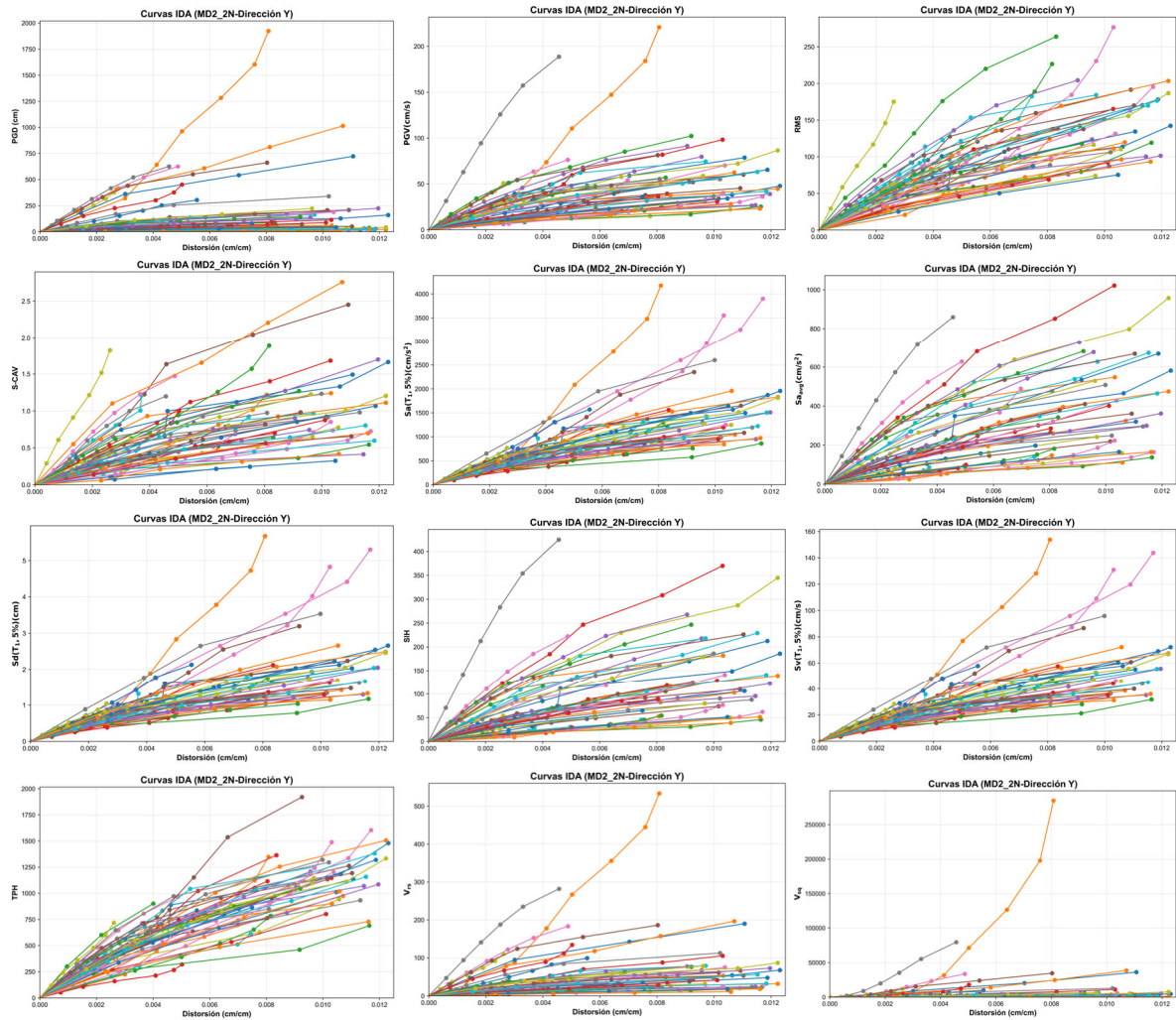


Figura Ap. 5. Curvas IDA MD2_2N (Continuación)

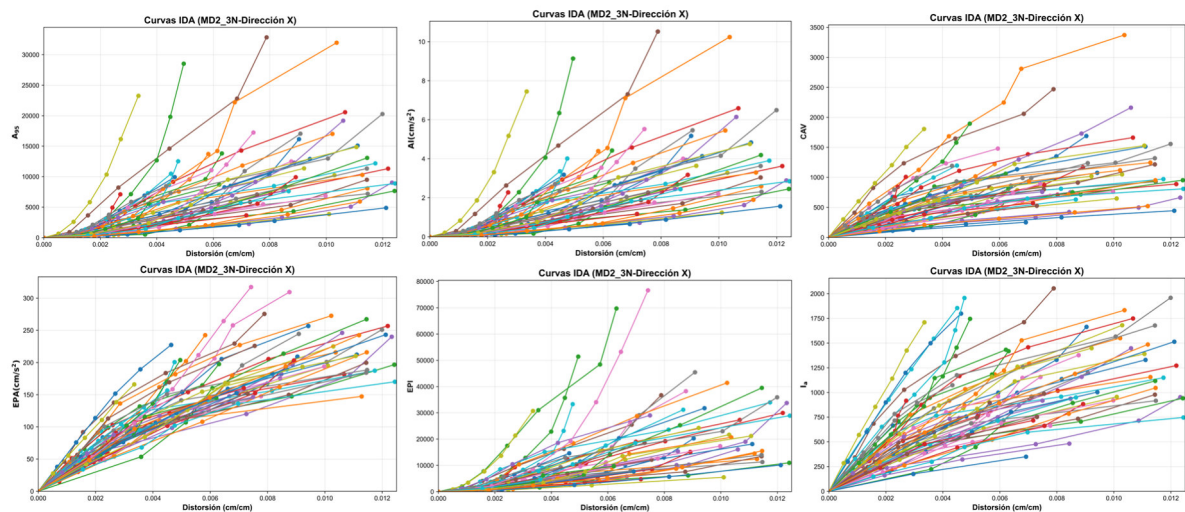
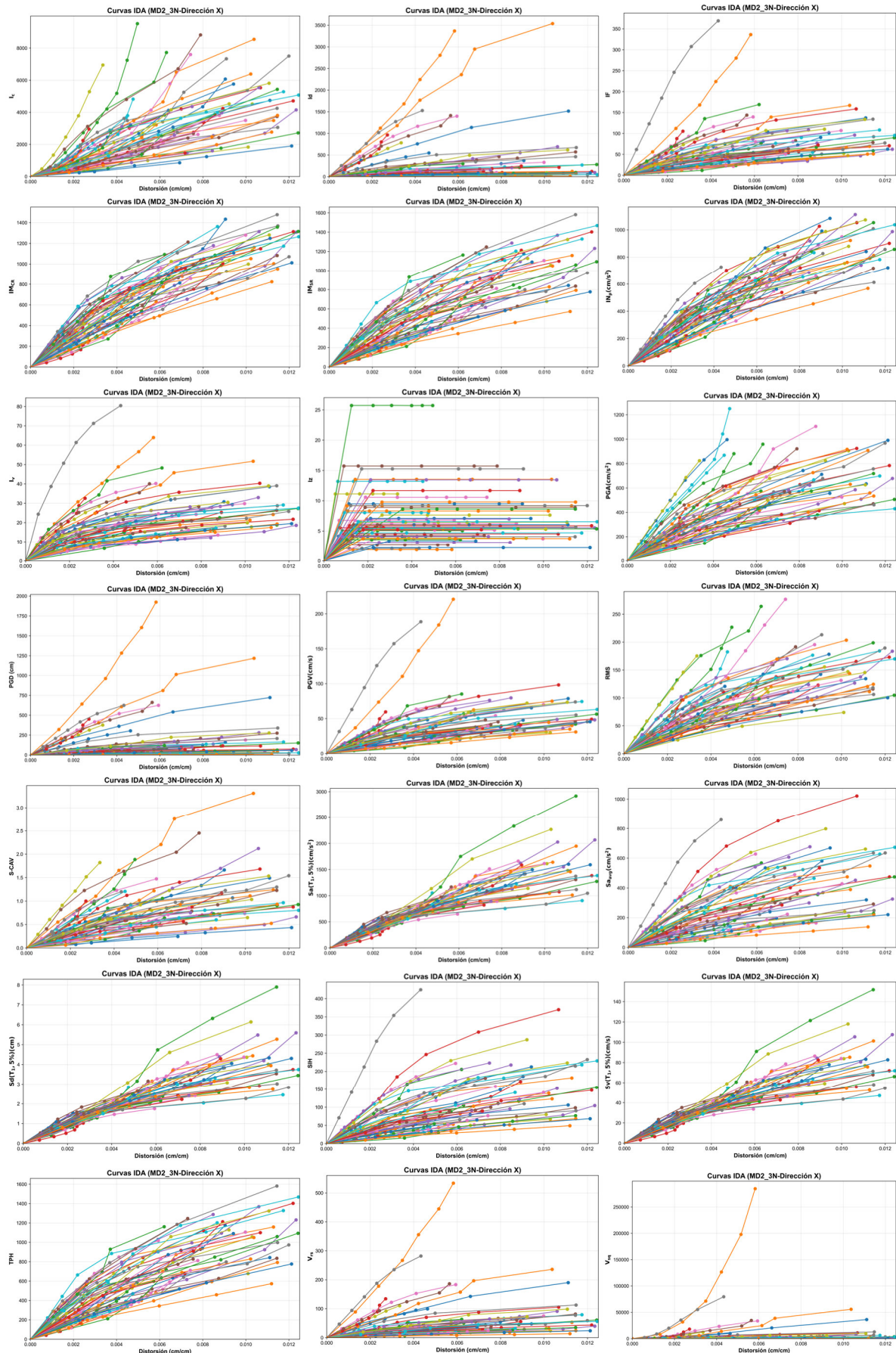


Figura Ap. 6. Curvas IDA MD2_3N



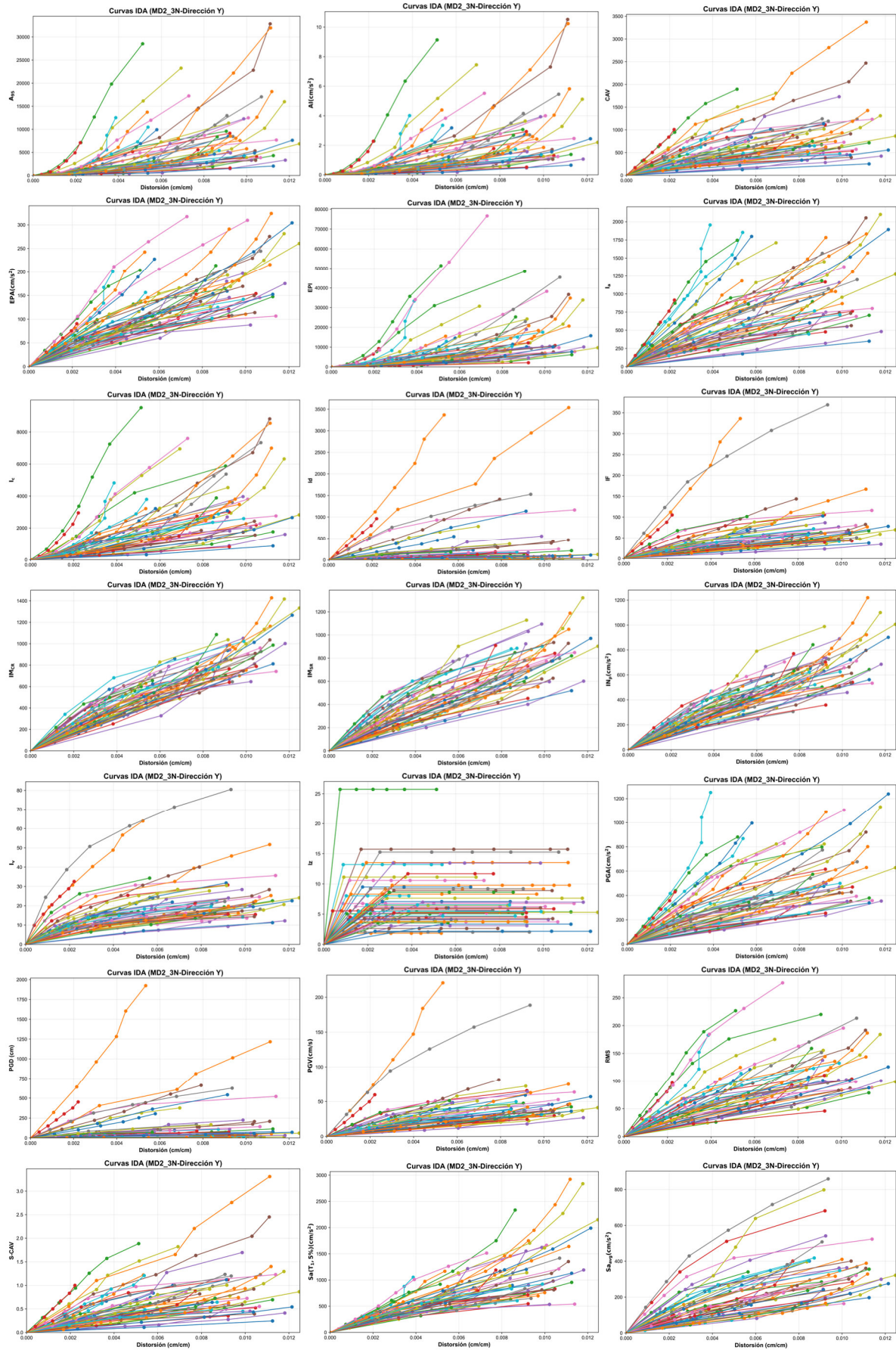


Figura Ap. 6. Curvas IDA MD2_3N (Continuación)

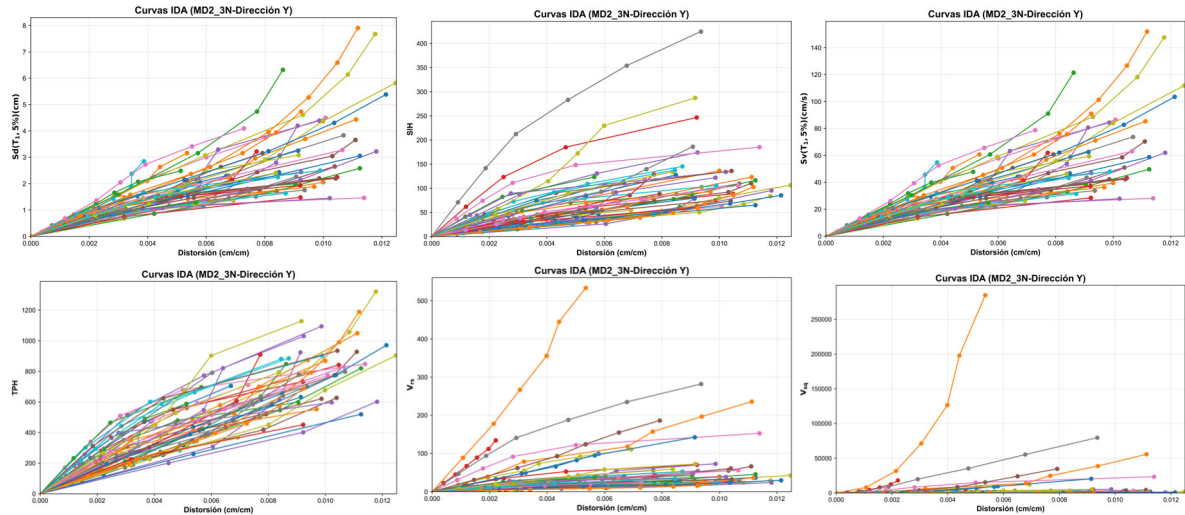


Figura Ap. 6. Curvas IDA MD2_3N (Continuación)

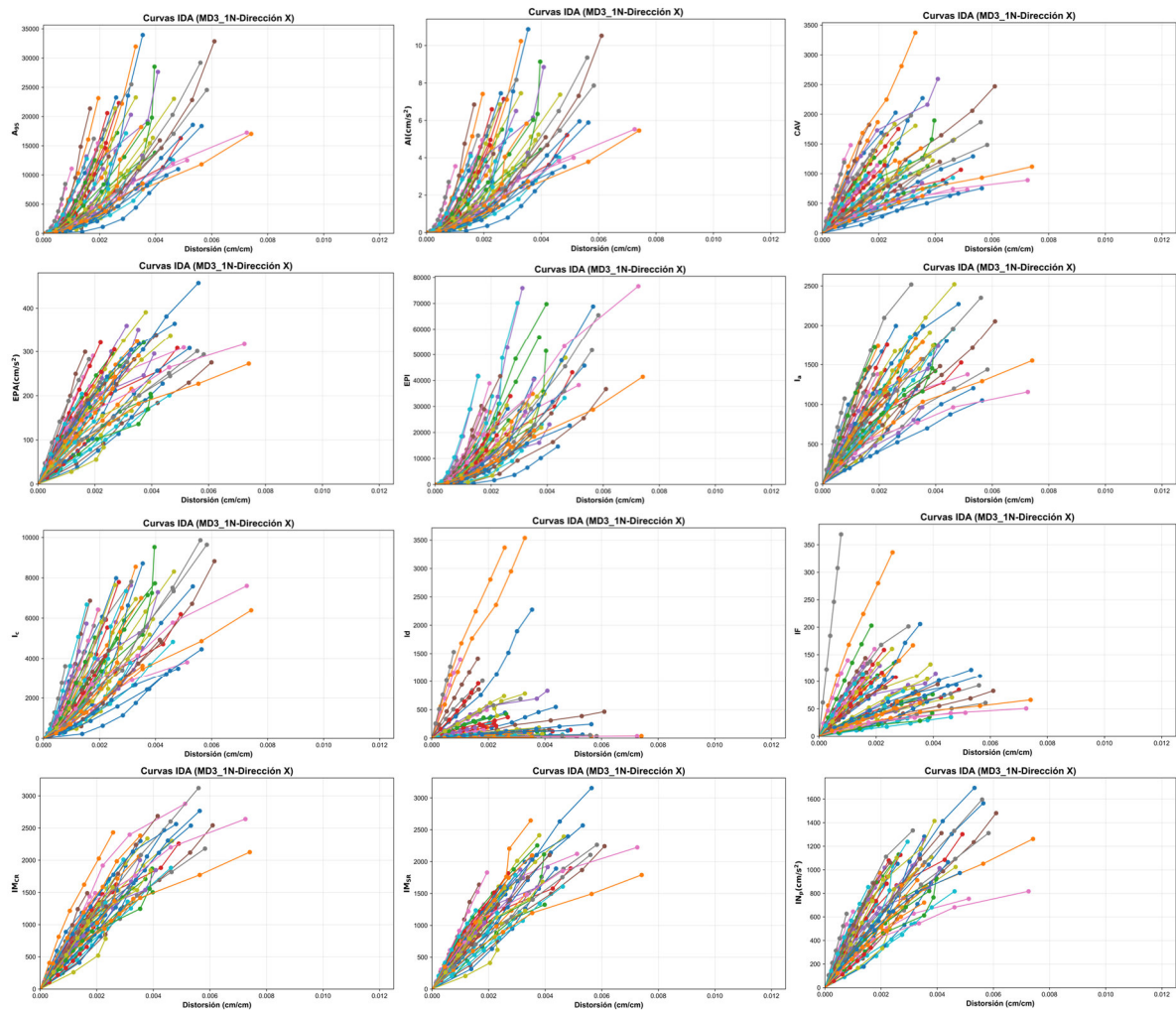
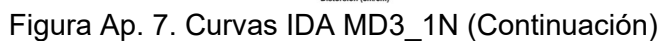


Figura Ap. 7. Curvas IDA MD3_1N



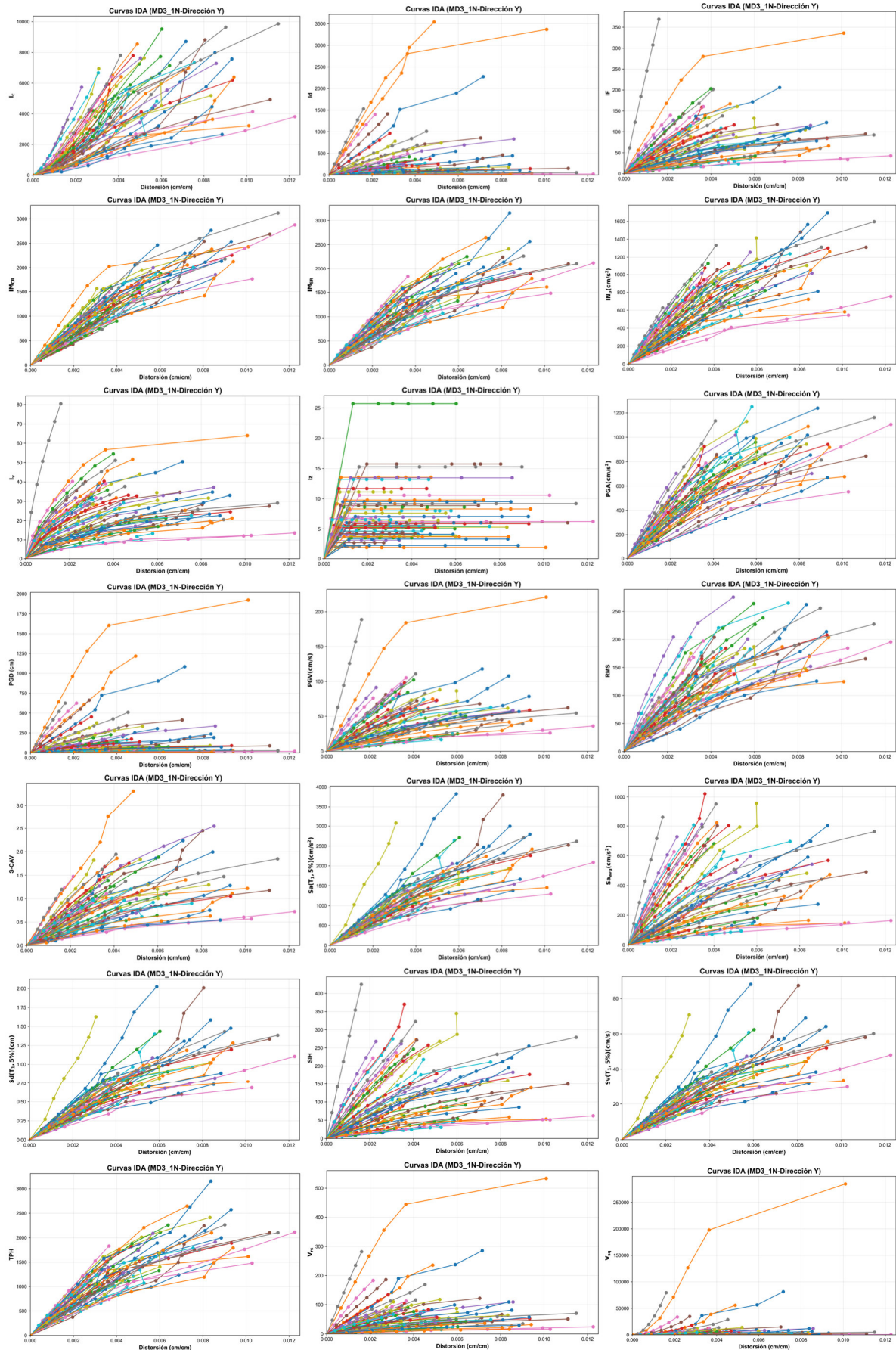


Figura Ap. 7. Curvas IDA MD3_1N (Continuación)

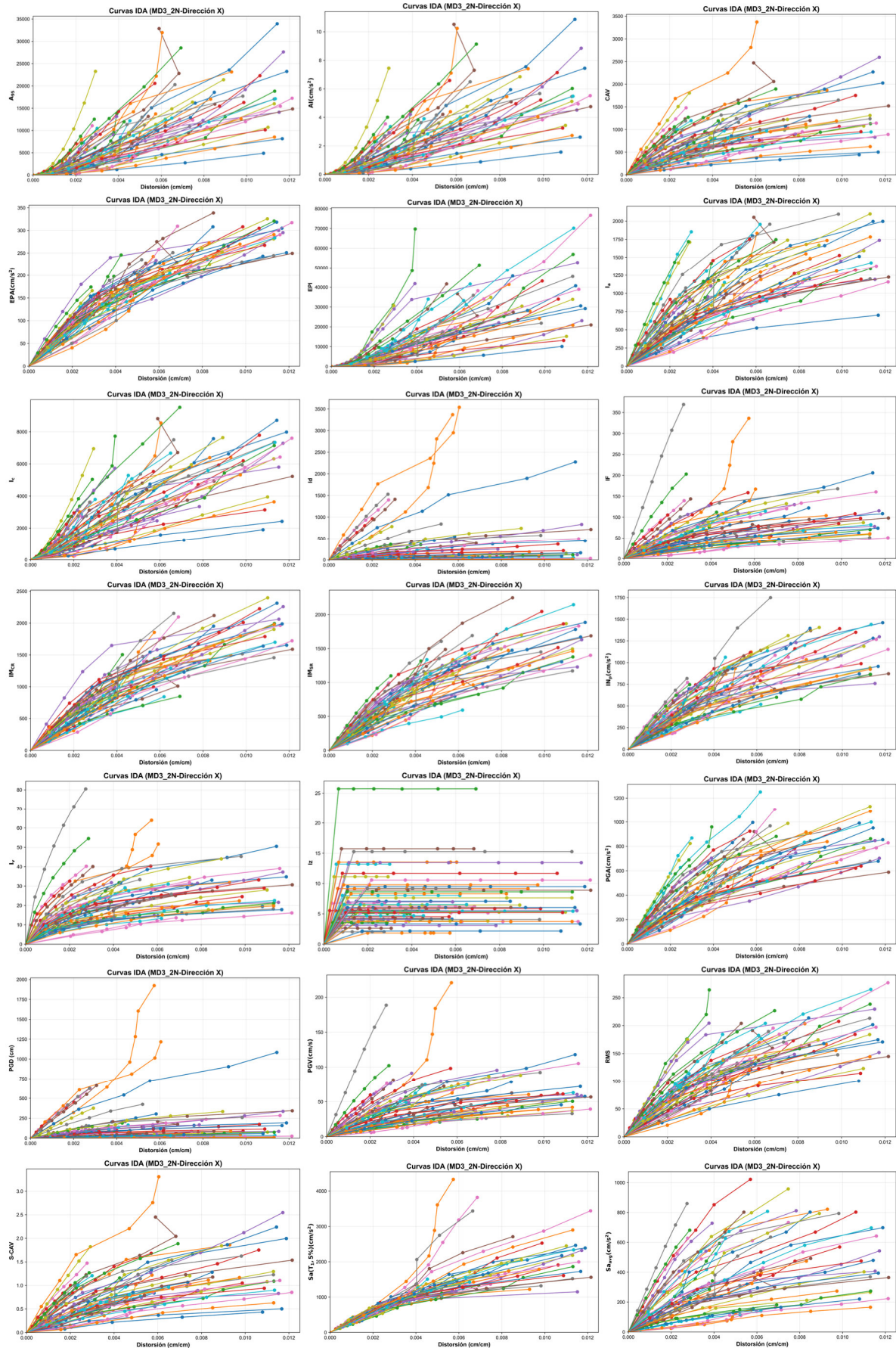


Figura Ap. 8. Curvas IDA MD3_2N

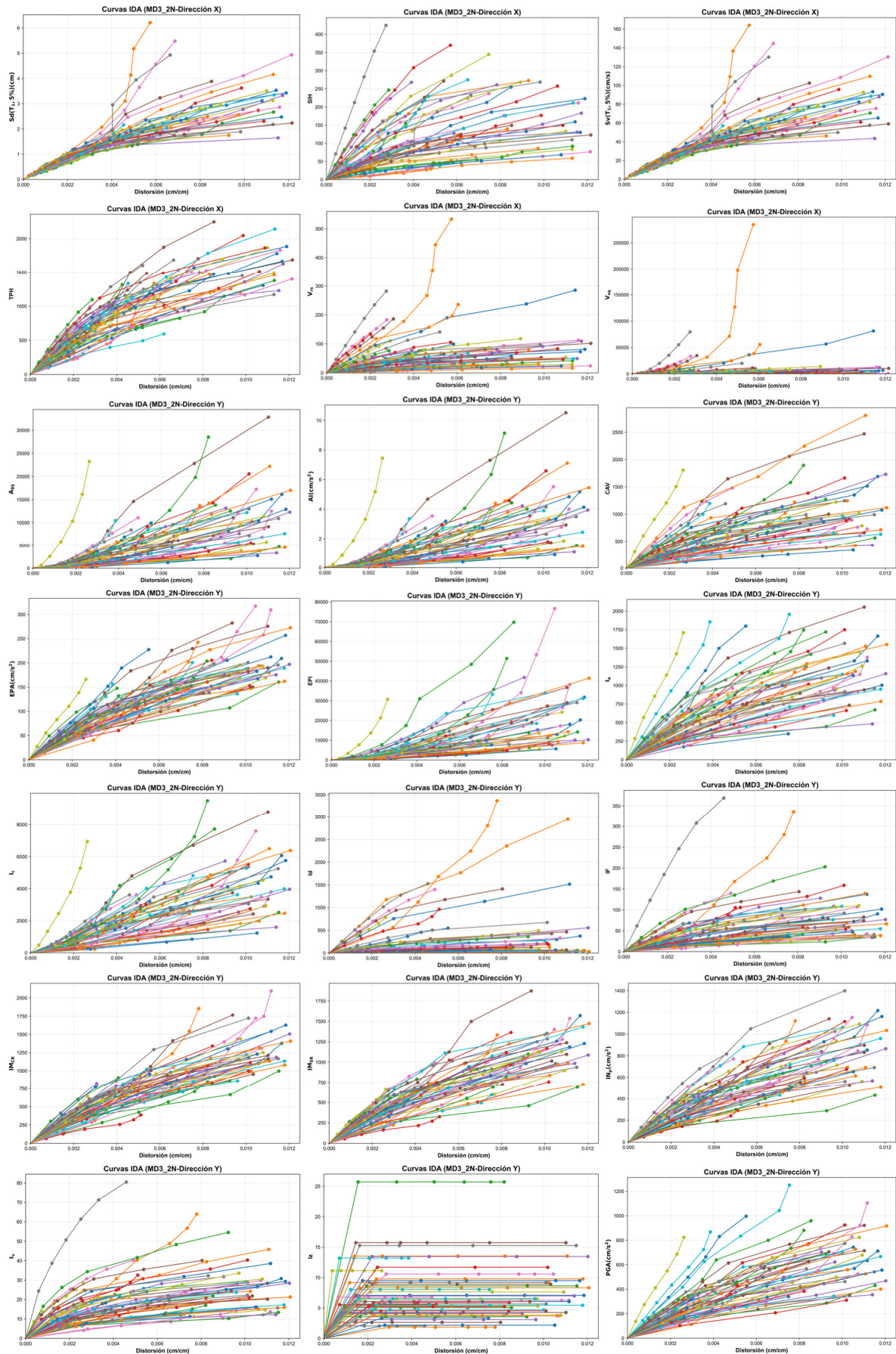


Figura Ap. 8. Curvas IDA MD3_2N (Continuación)

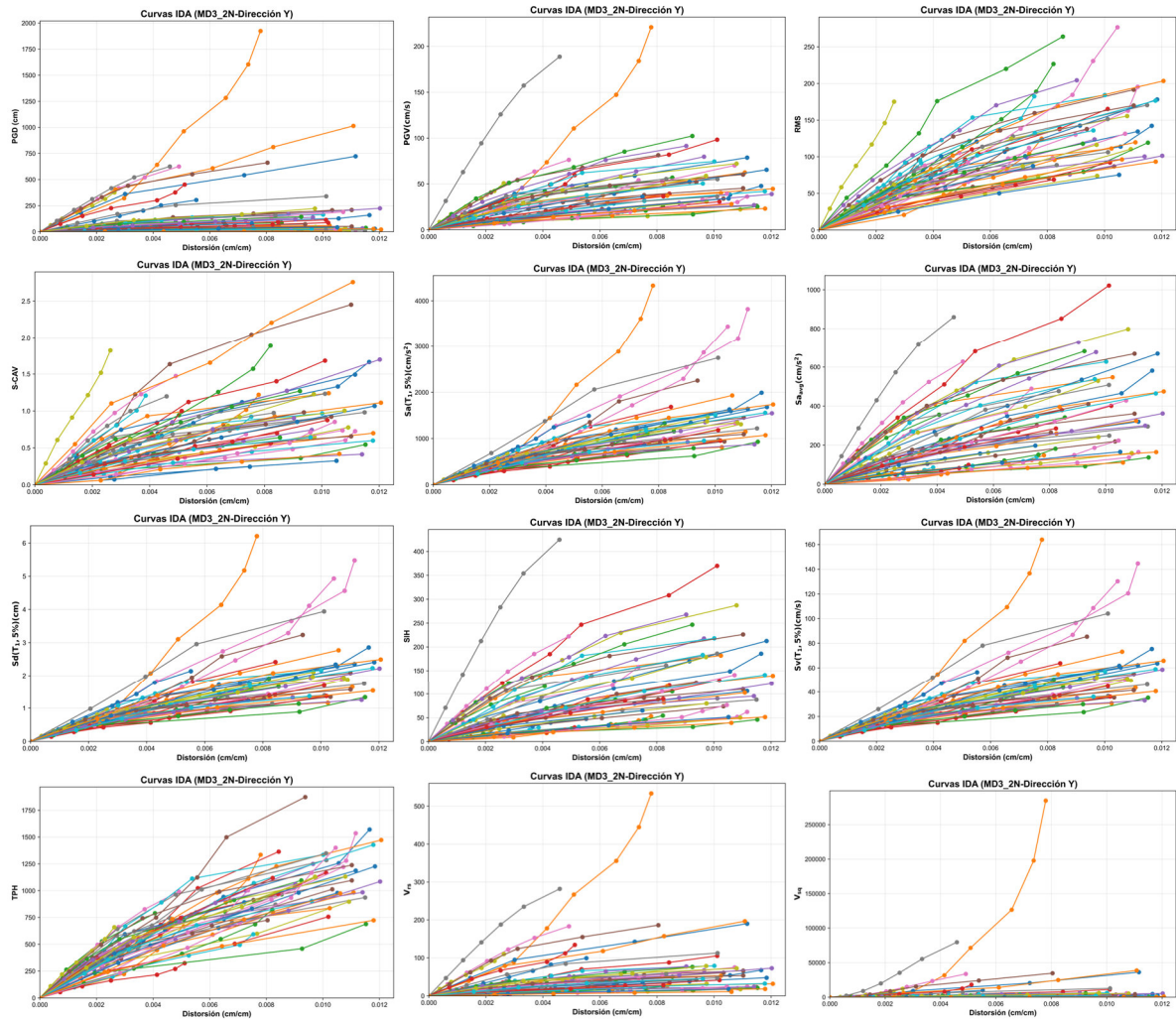


Figura Ap. 8. Curvas IDA MD3_2N (Continuación)

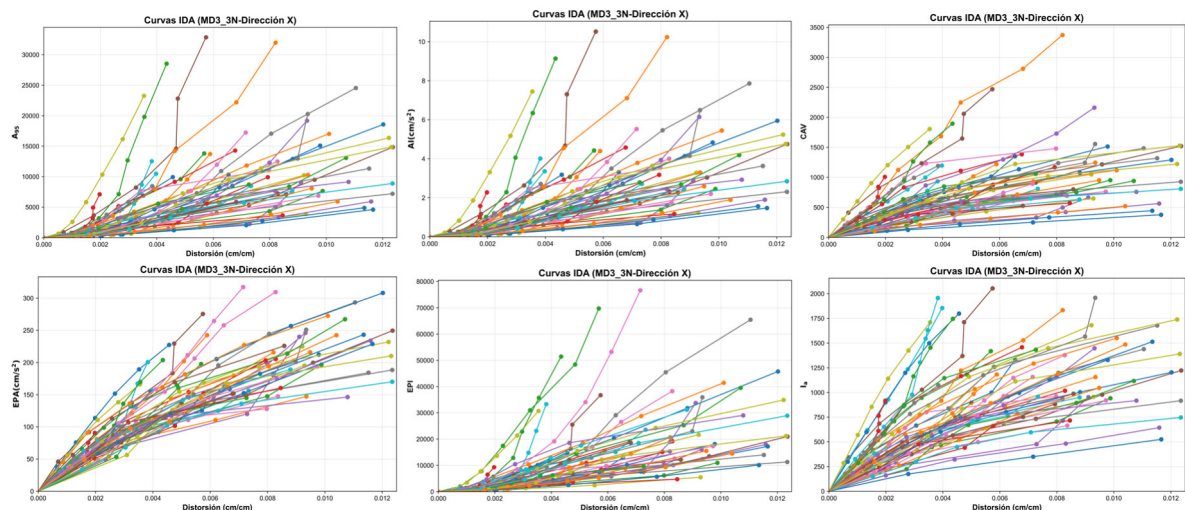


Figura Ap. 9. Curvas IDA MD3_3N

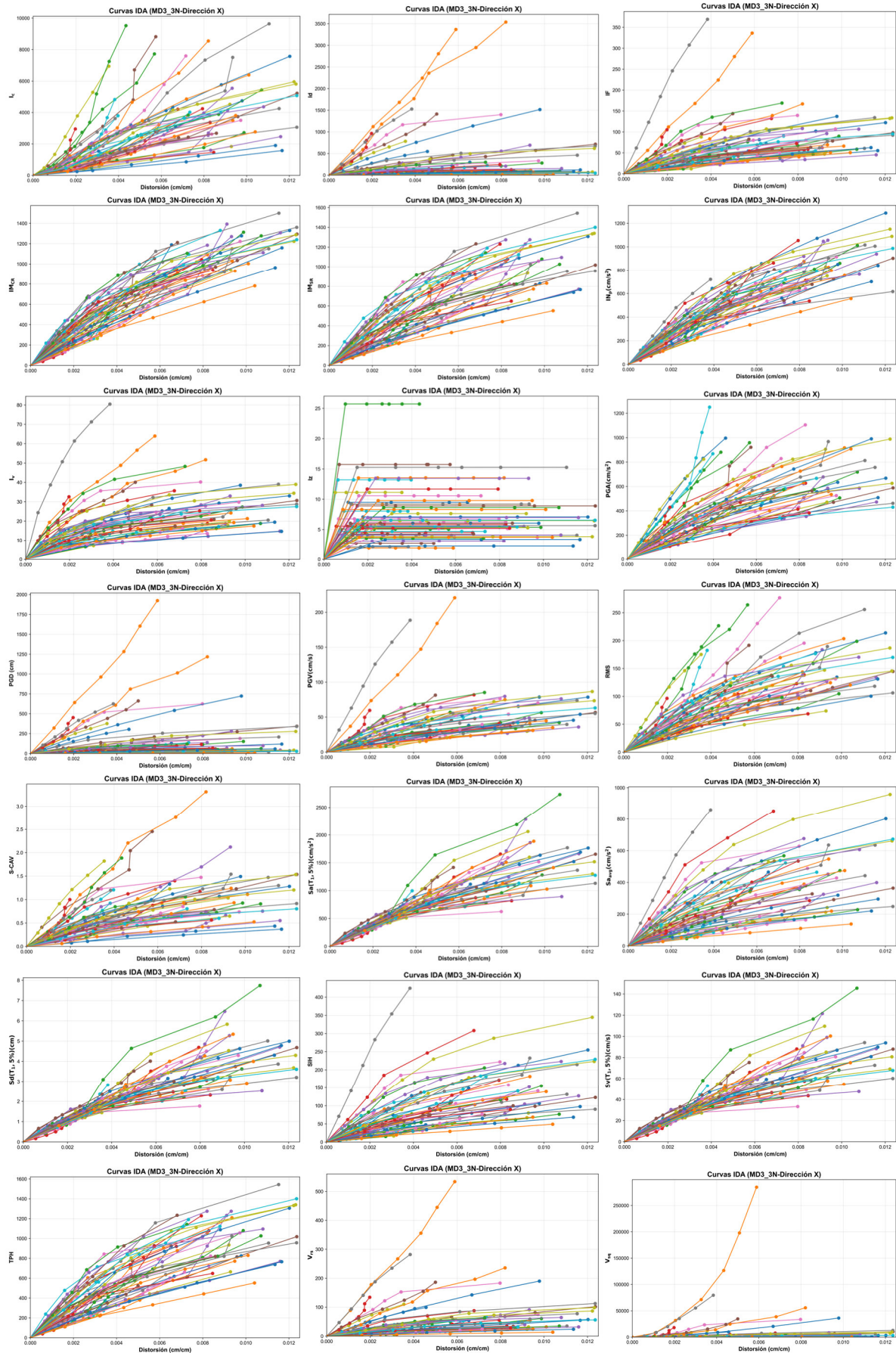


Figura Ap. 9. Curvas IDA MD3_3N (Continuación)

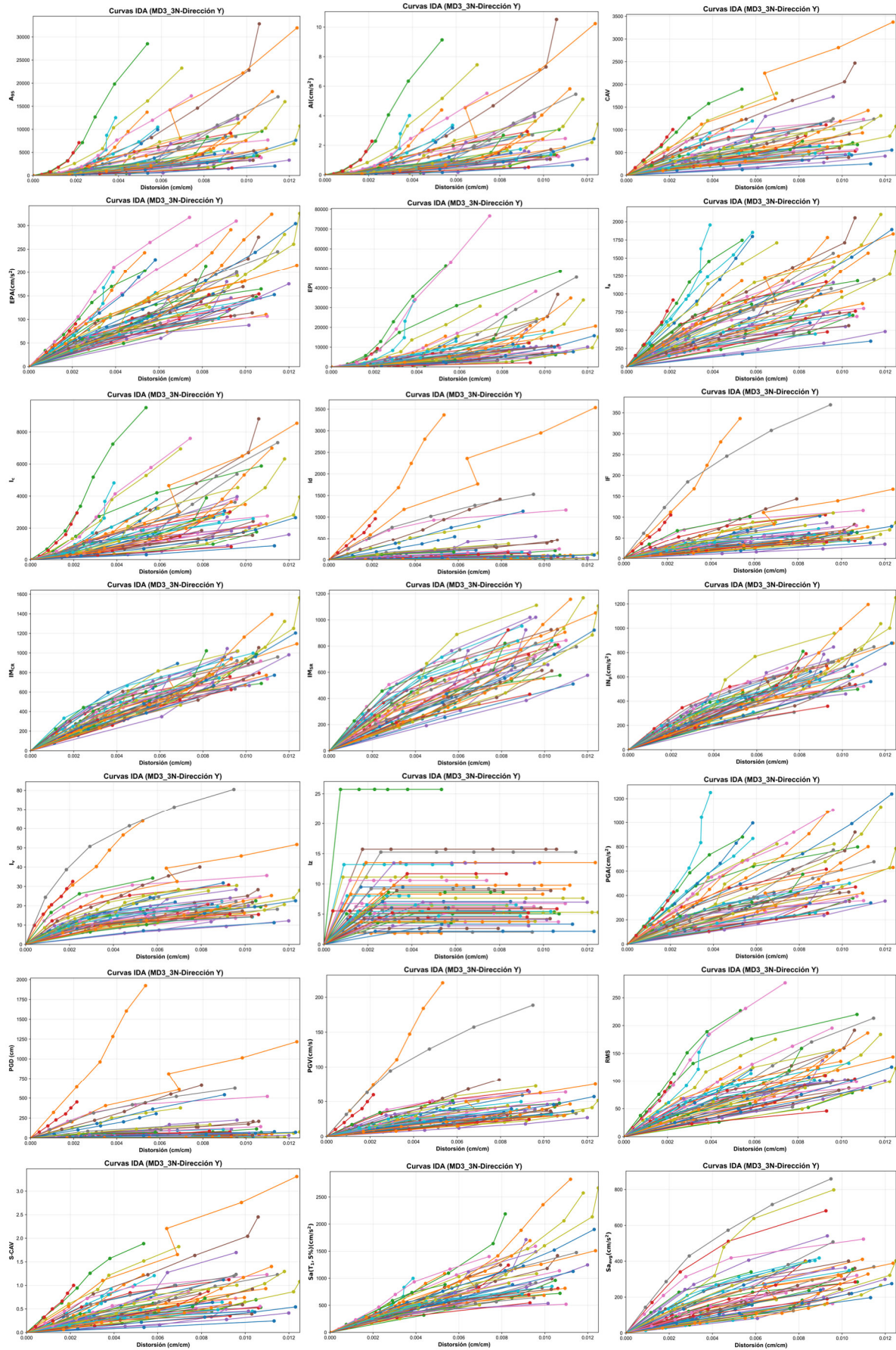


Figura Ap. 9. Curvas IDA MD3_3N (Continuación)

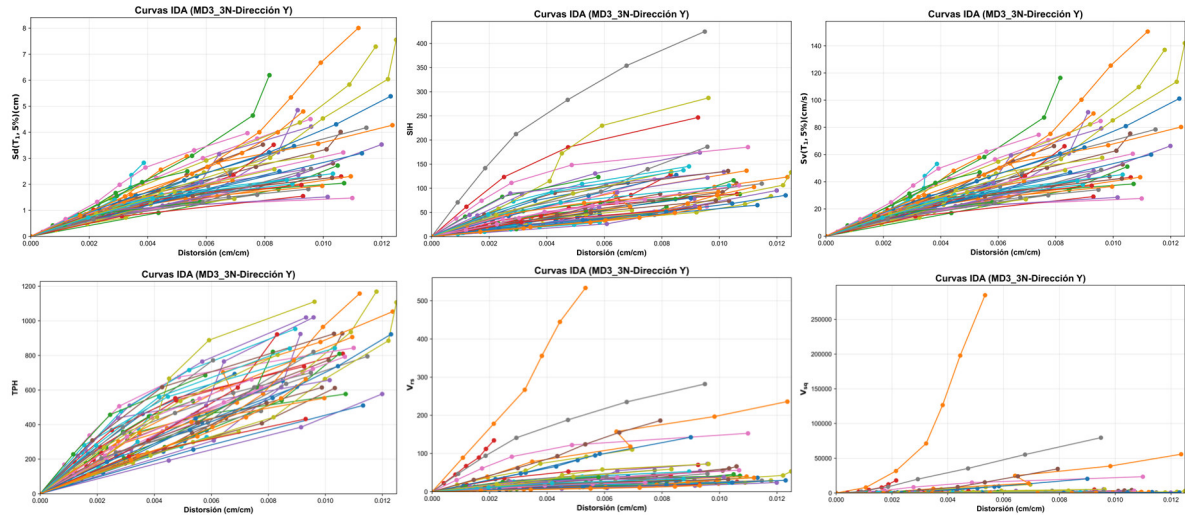


Figura Ap. 9. Curvas IDA MD3_3N (Continuación)

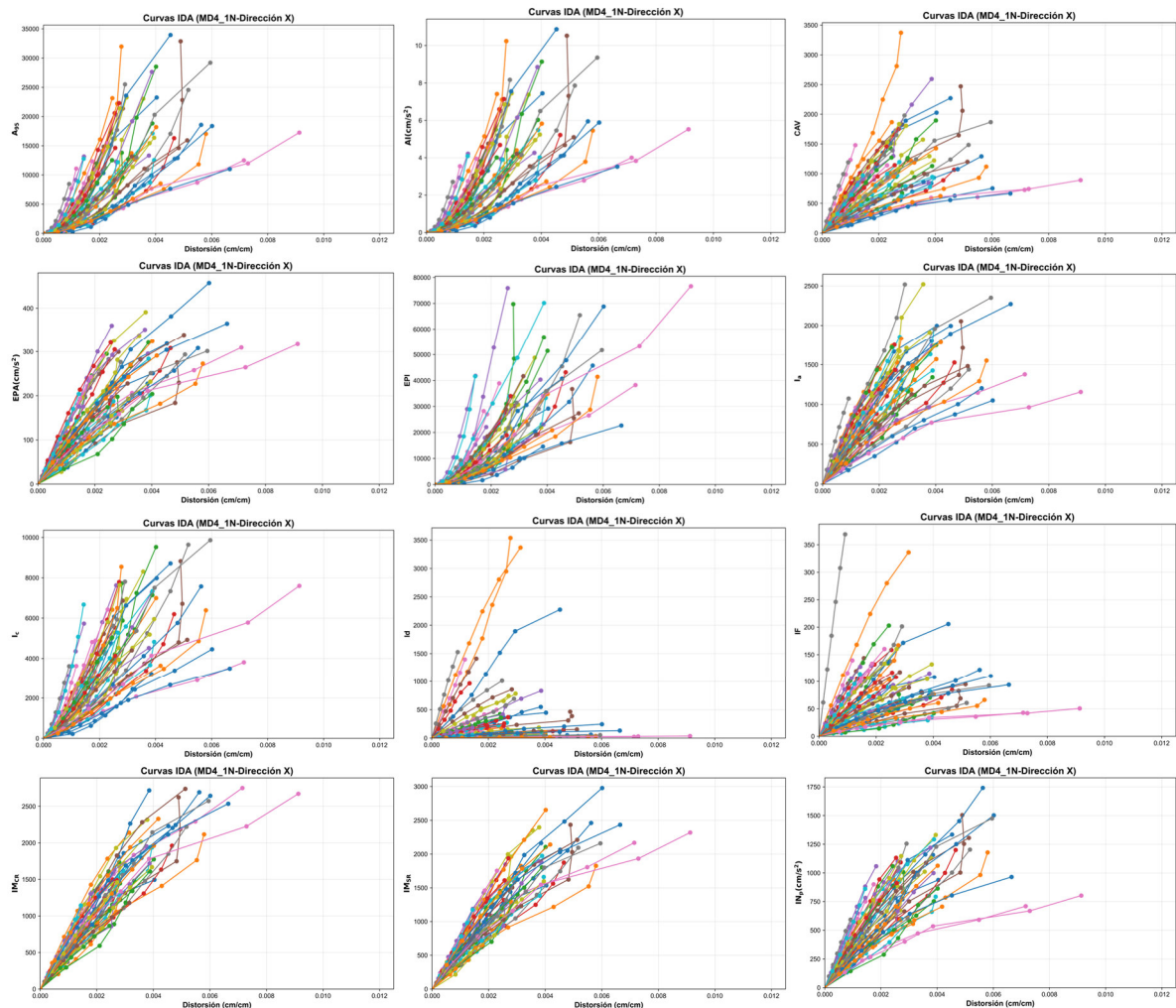


Figura Ap. 10. Curvas IDA MD4_1N

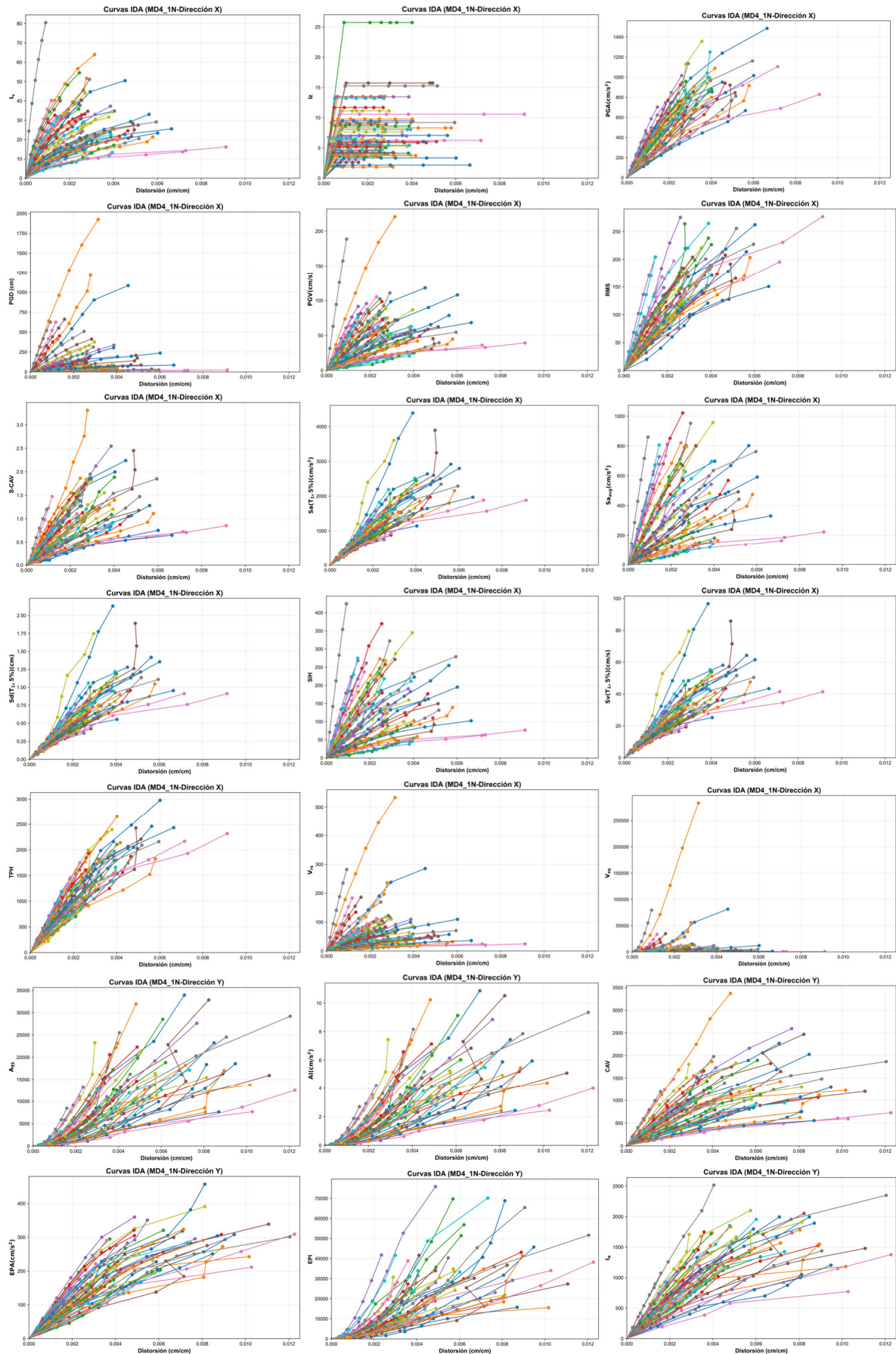


Figura Ap. 10. Curvas IDA MD4_1N (Continuación)



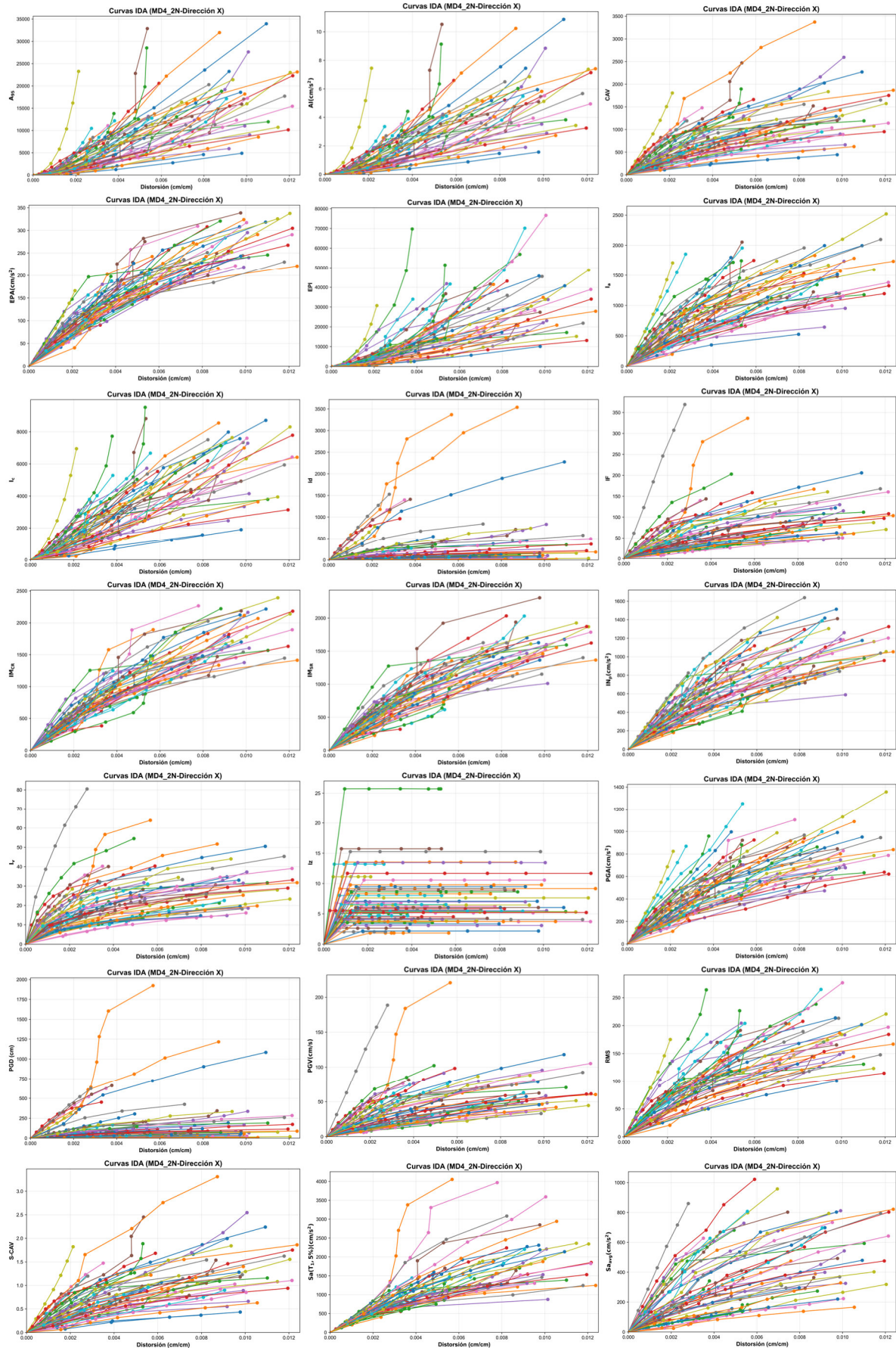


Figura Ap. 11. Curvas IDA MD4_2N



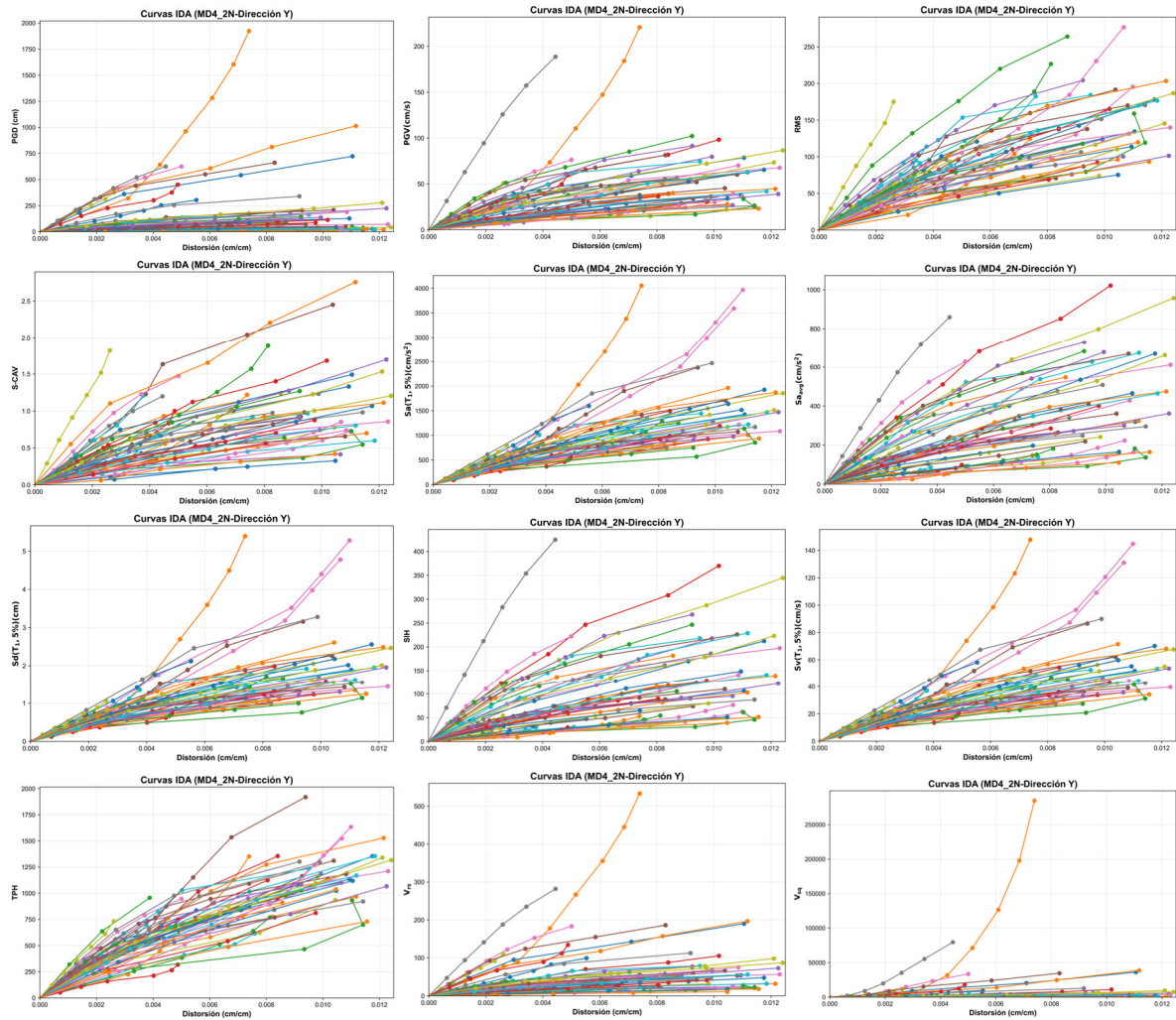


Figura Ap. 11. Curvas IDA MD4_2N (Continuación)

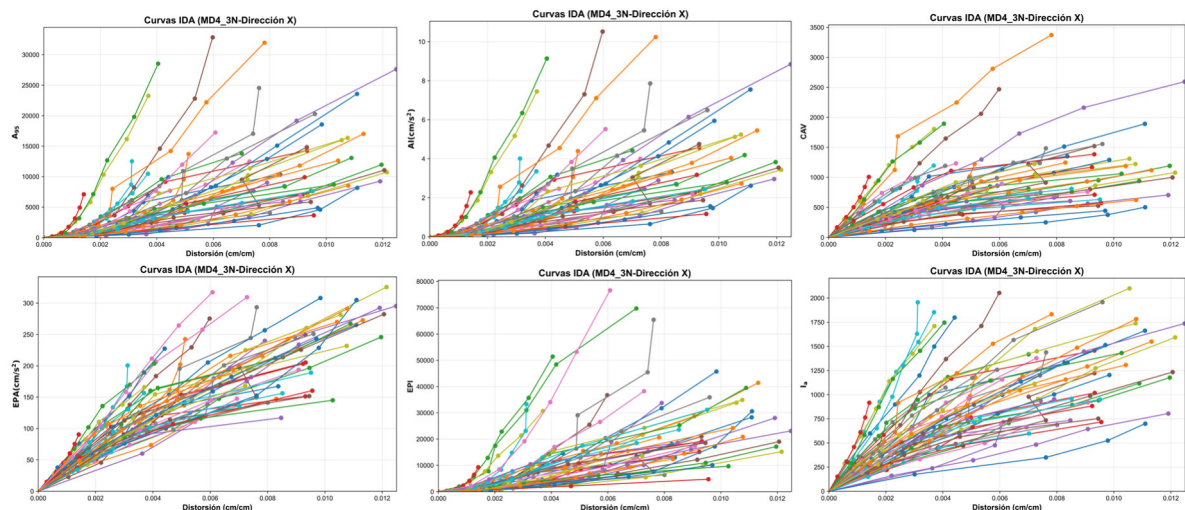


Figura Ap. 12. Curvas IDA MD4_3N

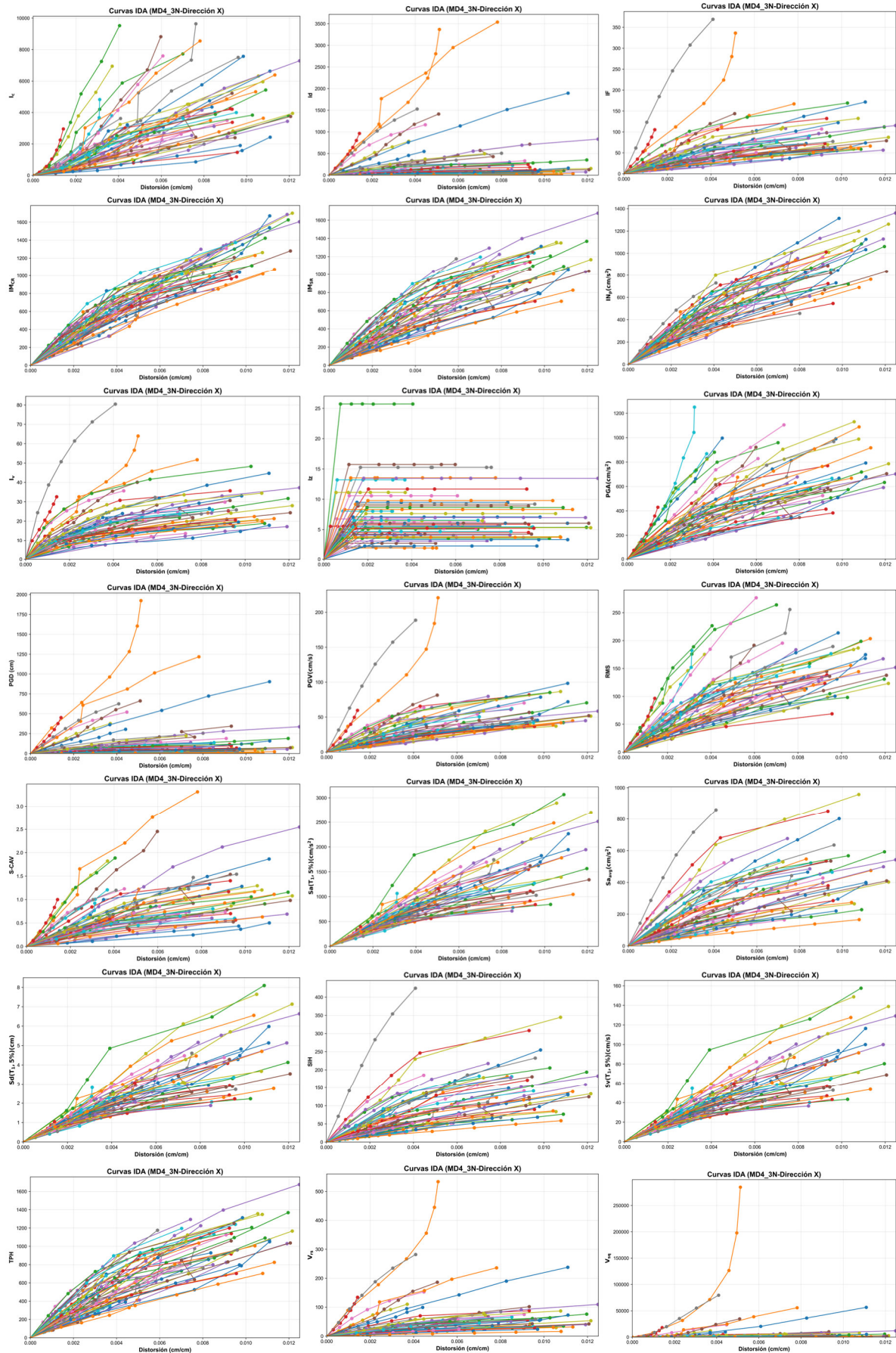


Figura Ap. 12. Curvas IDA MD4_3N (Continuación)

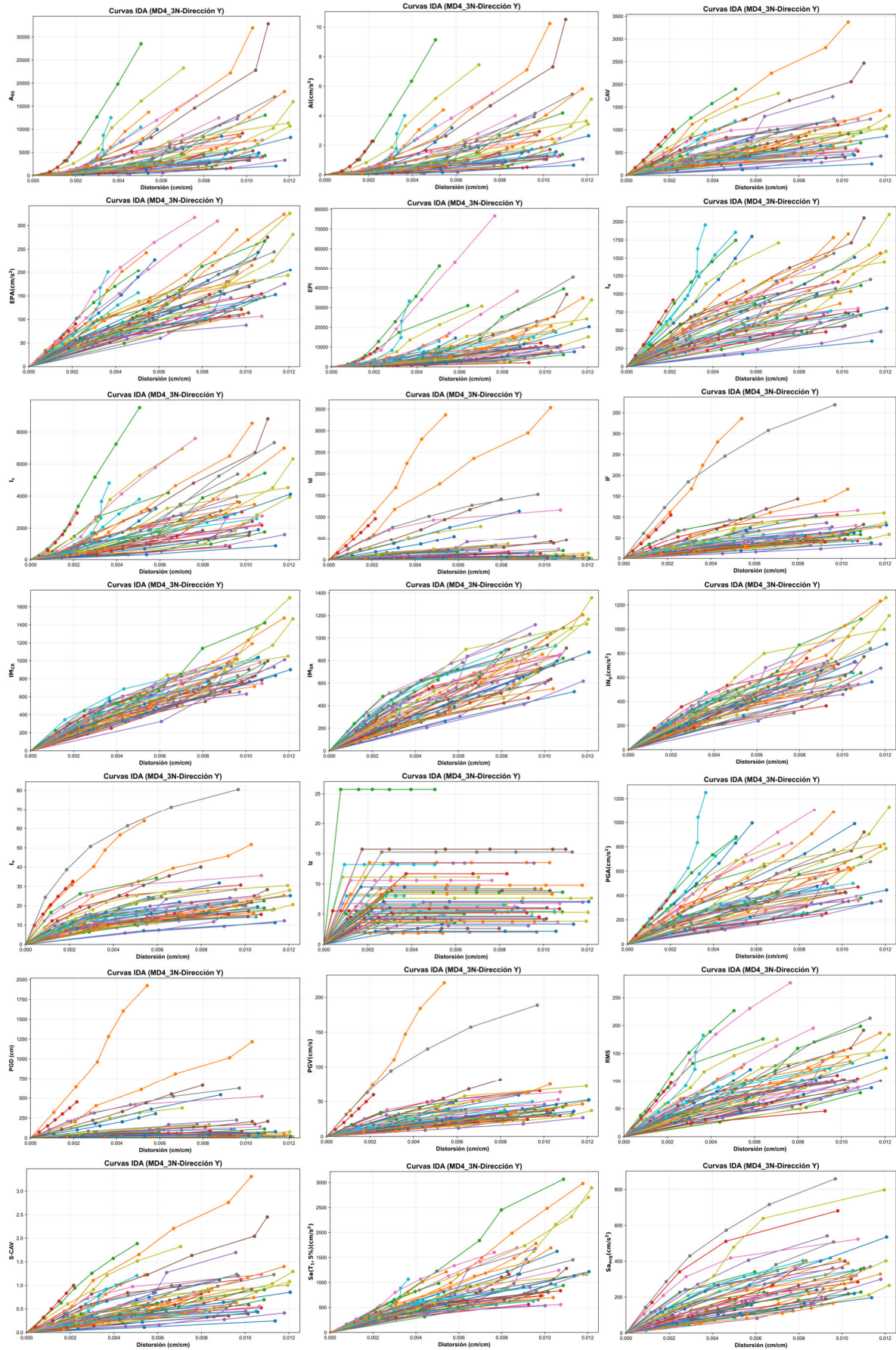


Figura Ap. 12. Curvas IDA MD4_3N (Continuación)

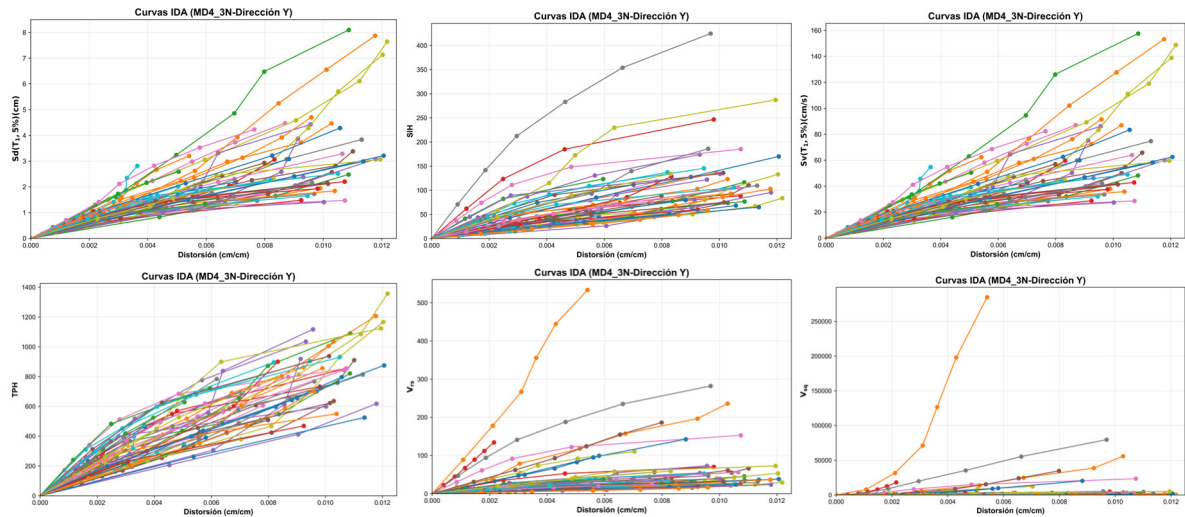


Figura Ap. 12. Curvas IDA MD4_3N (Continuación)

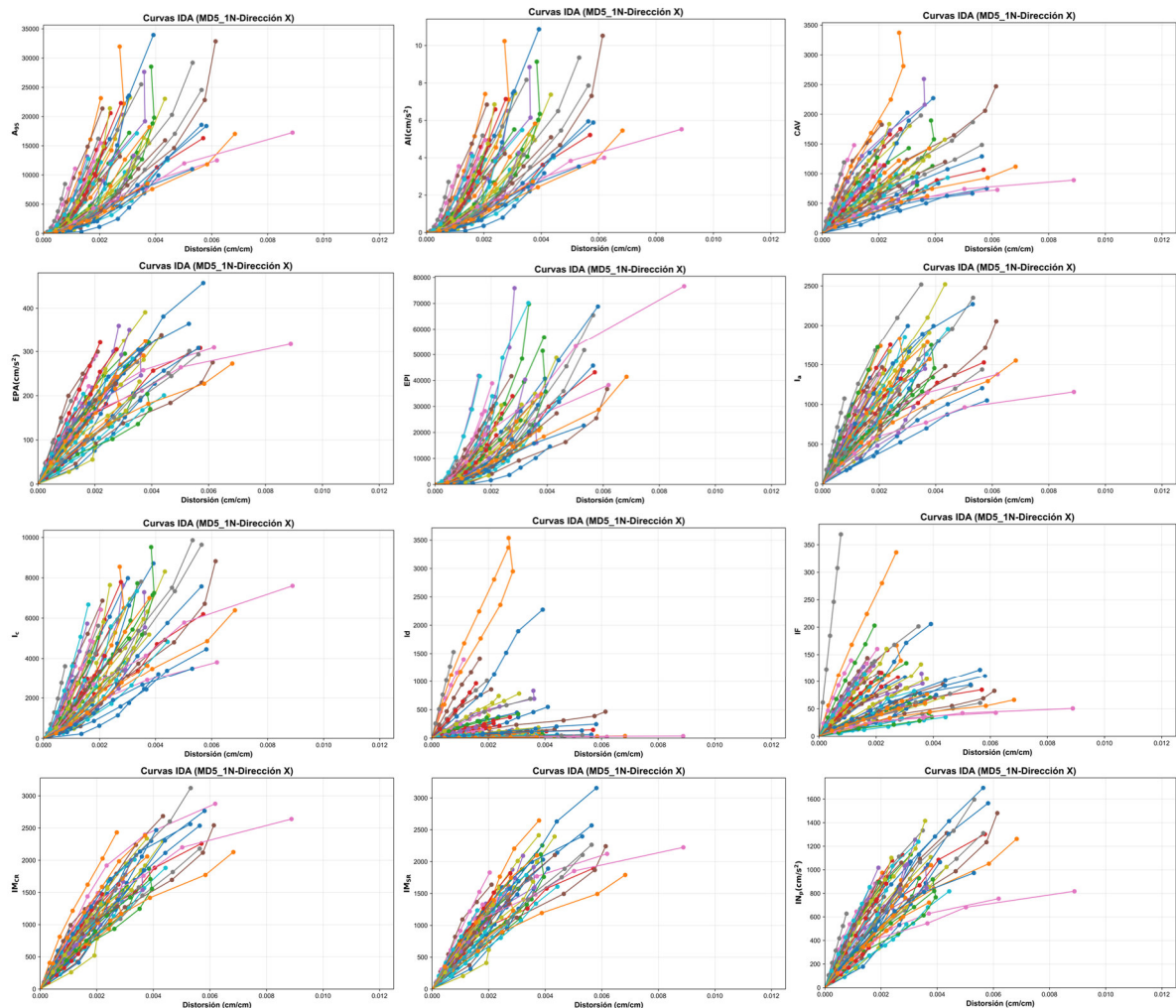


Figura Ap. 13. Curvas IDA MD5_1N





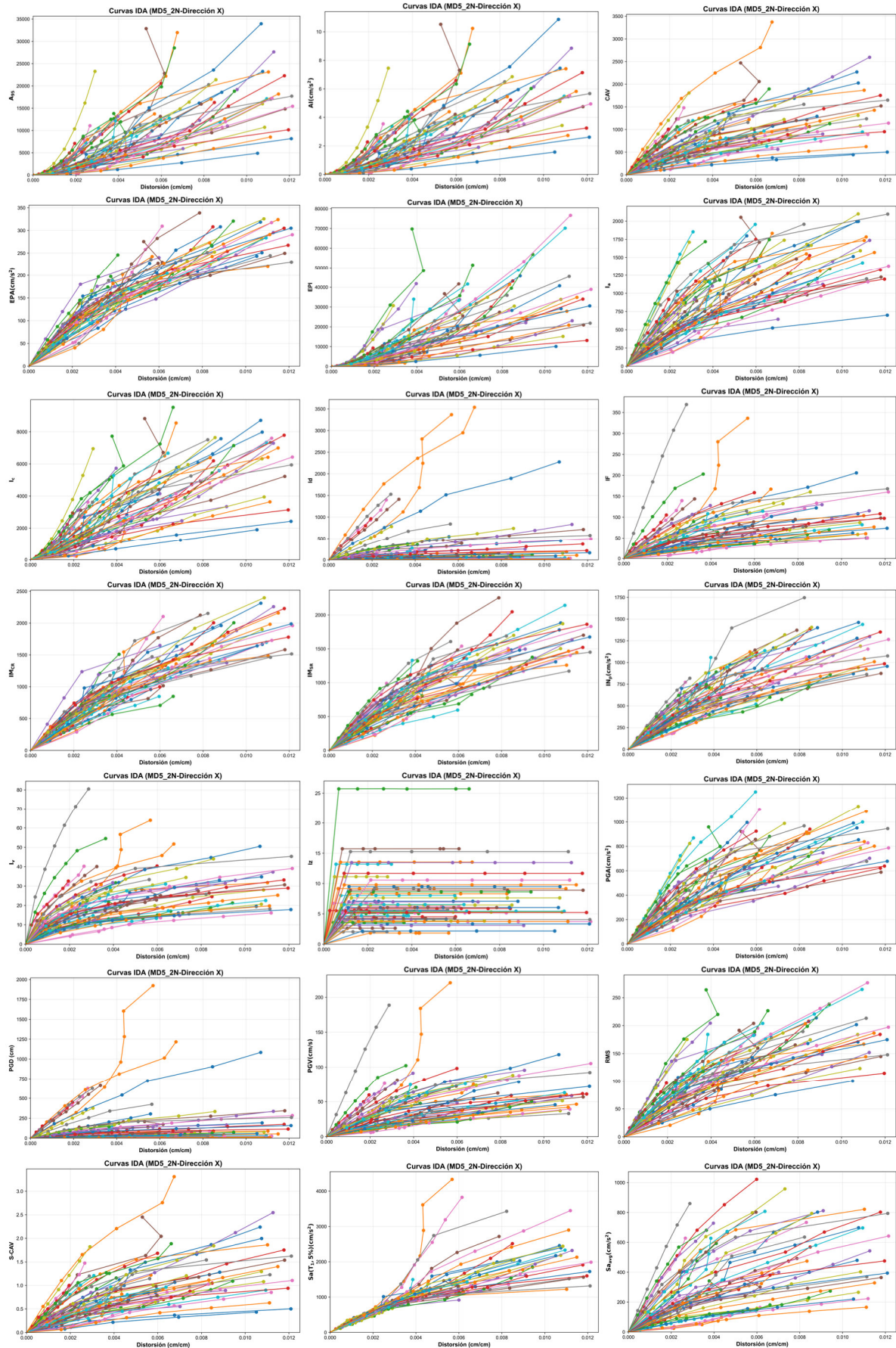


Figura Ap. 14. Curvas IDA MD5_2N

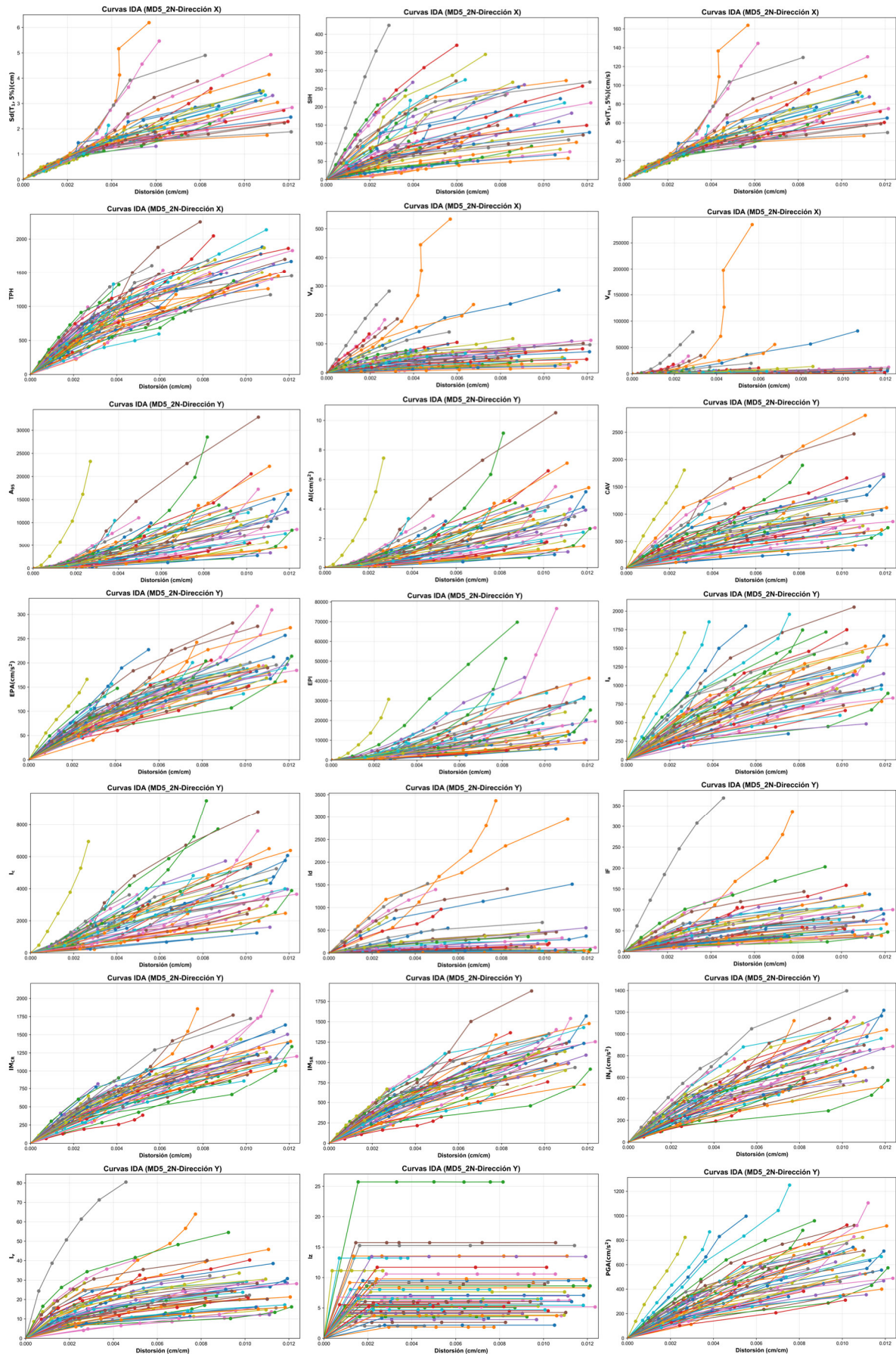


Figura Ap. 14. Curvas IDA MD5_2N (Continuación)

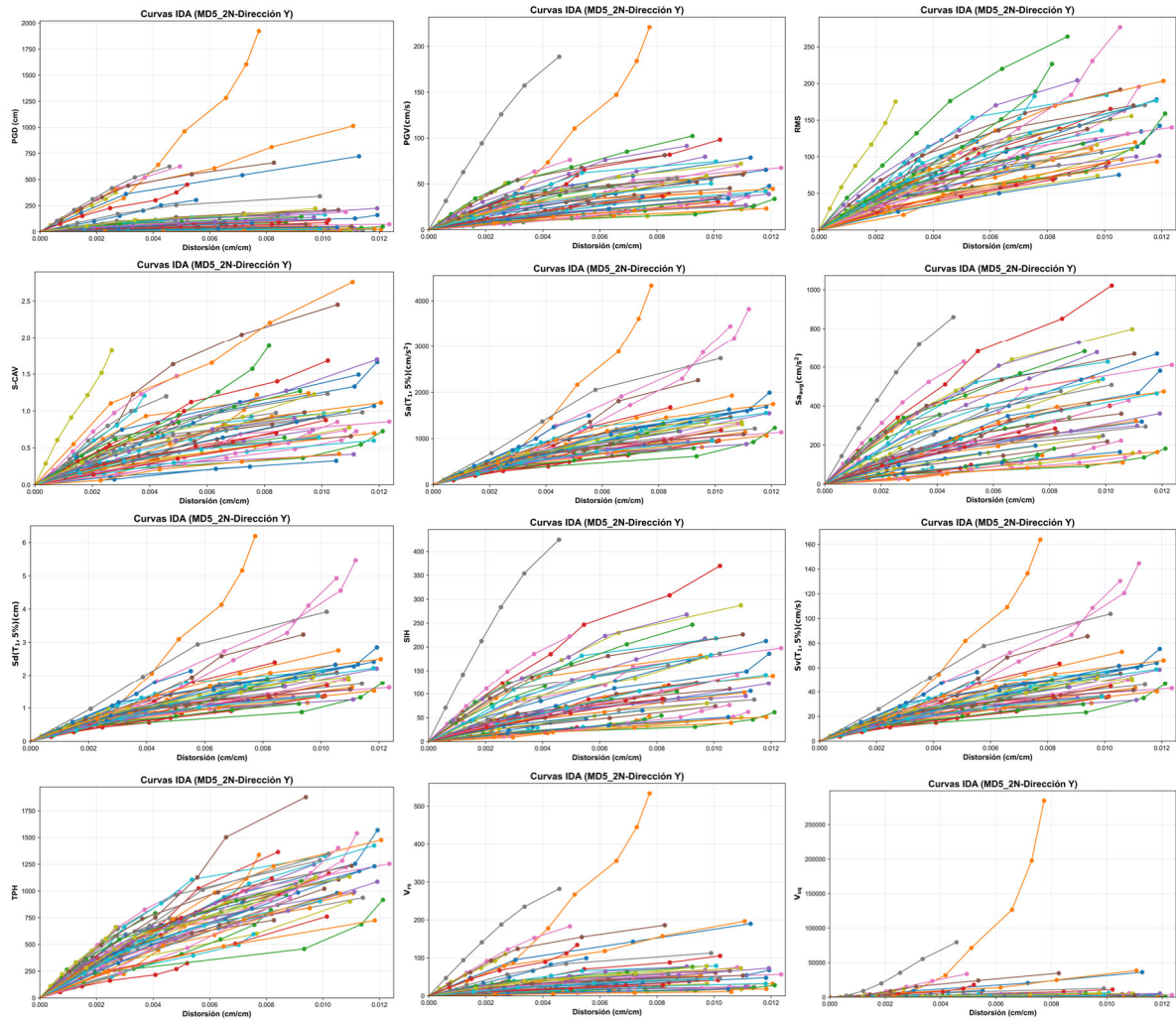


Figura Ap. 14. Curvas IDA MD5_2N (Continuación)

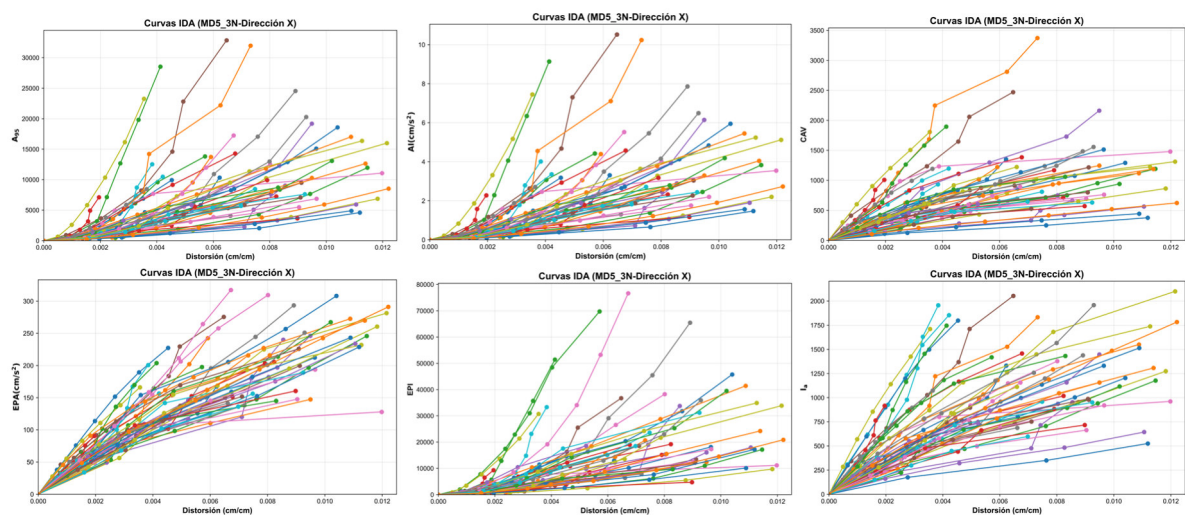
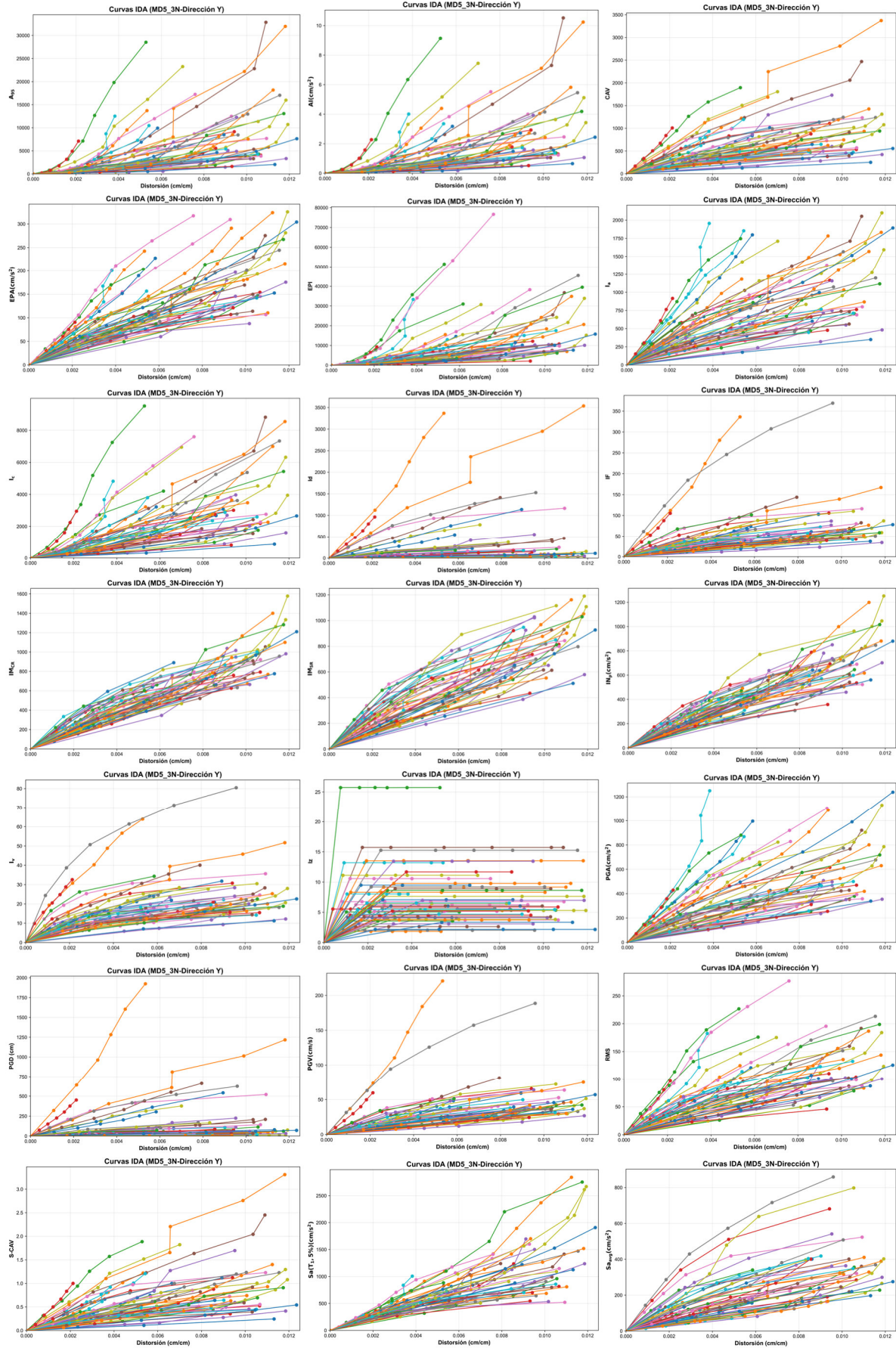


Figura Ap. 15. Curvas IDA MD5_3N





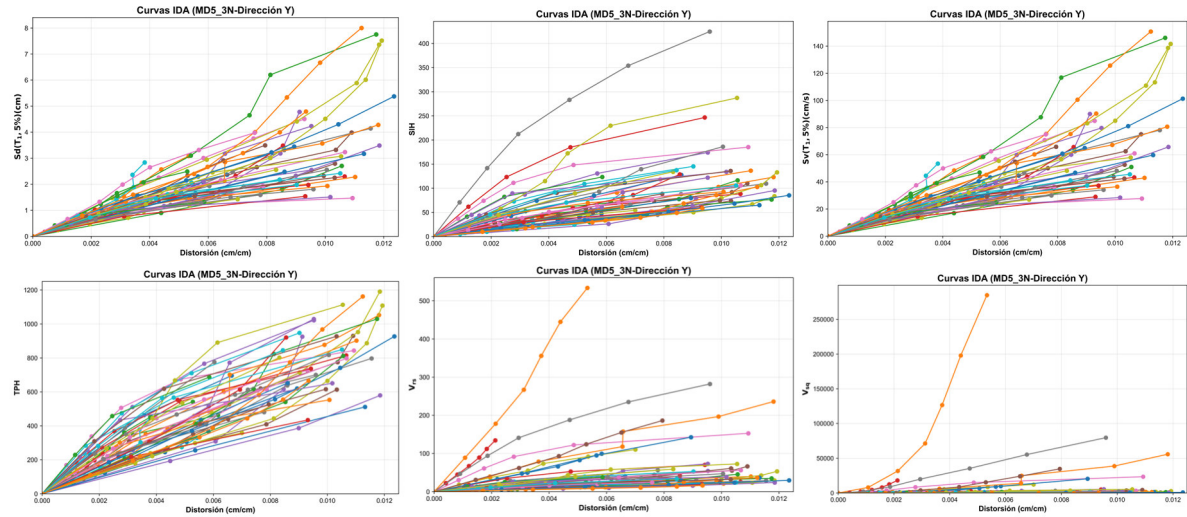


Figura Ap. 15. Curvas IDA MD5_3N (Continuación)

Anexo 2: Análisis de la variabilidad estructural por estado de daño

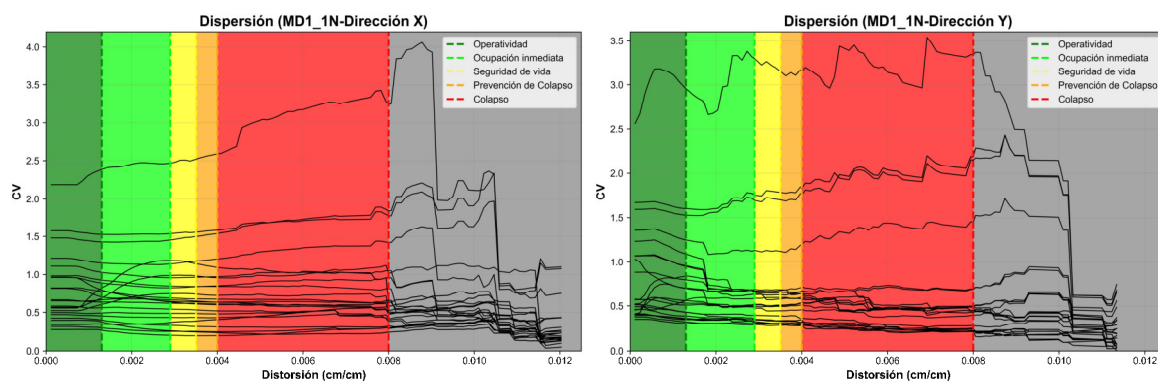


Figura Ap. 16. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD1_1N

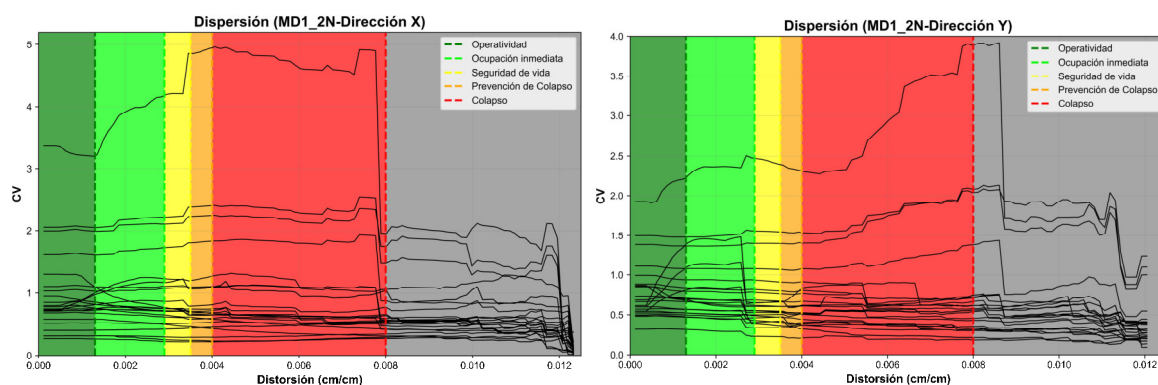


Figura Ap. 17. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD1_2N

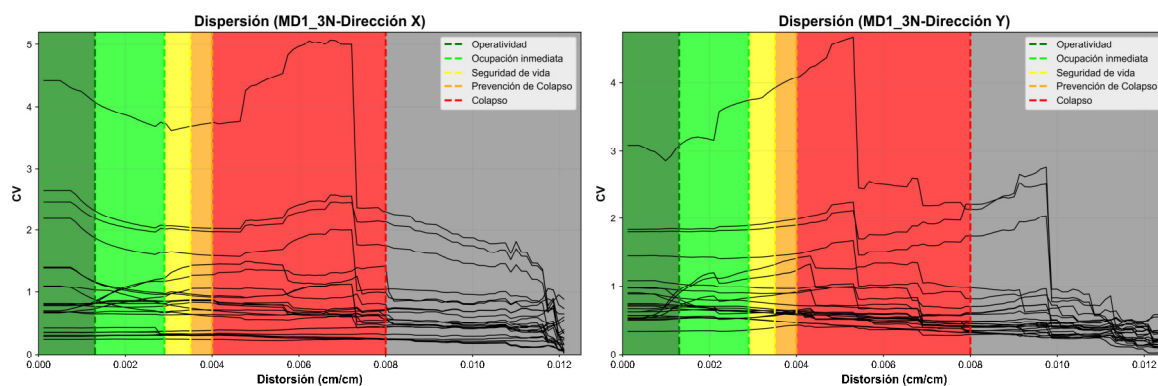


Figura Ap. 18. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD1_3N

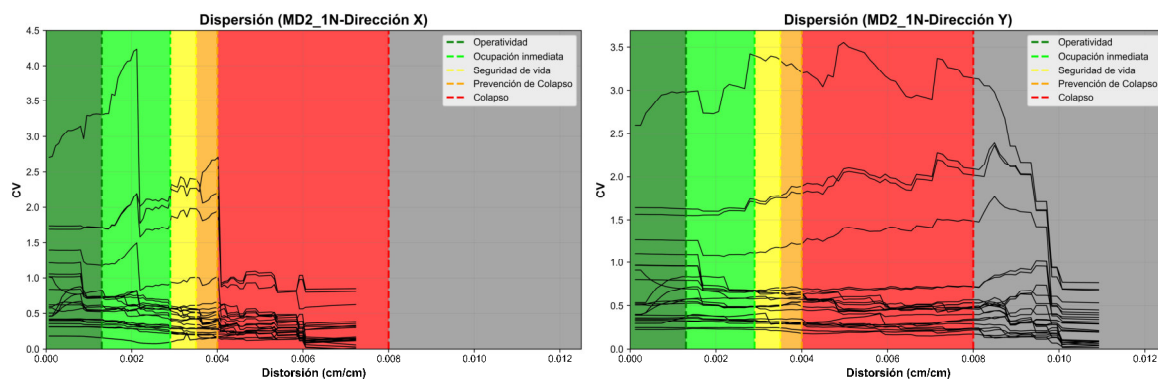


Figura Ap. 19. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD2_1N

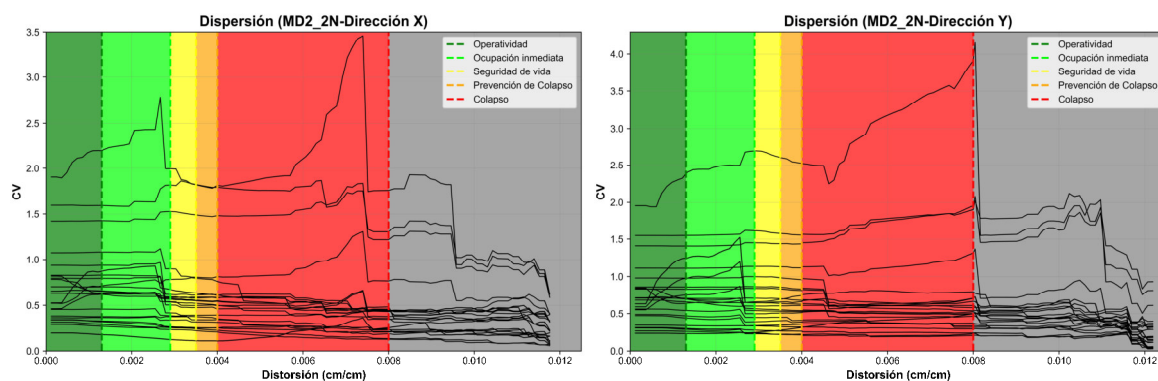


Figura Ap. 20. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD2_2N

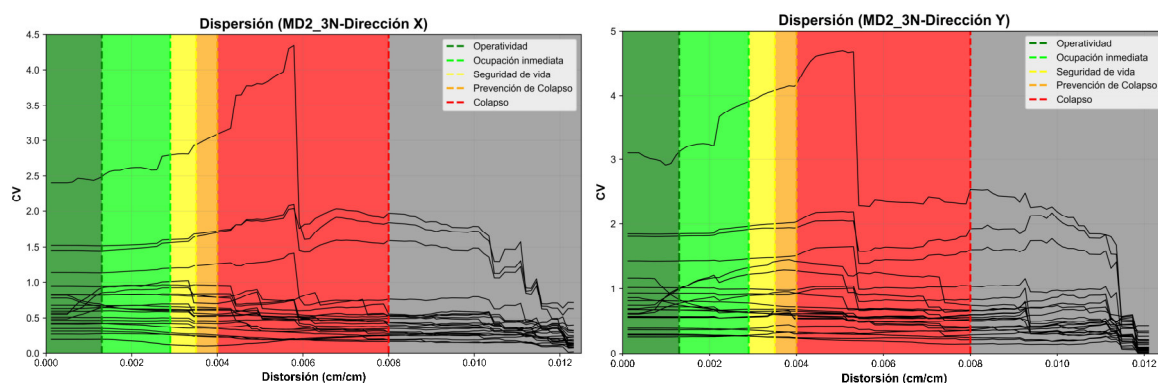


Figura Ap. 21. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD2_3N

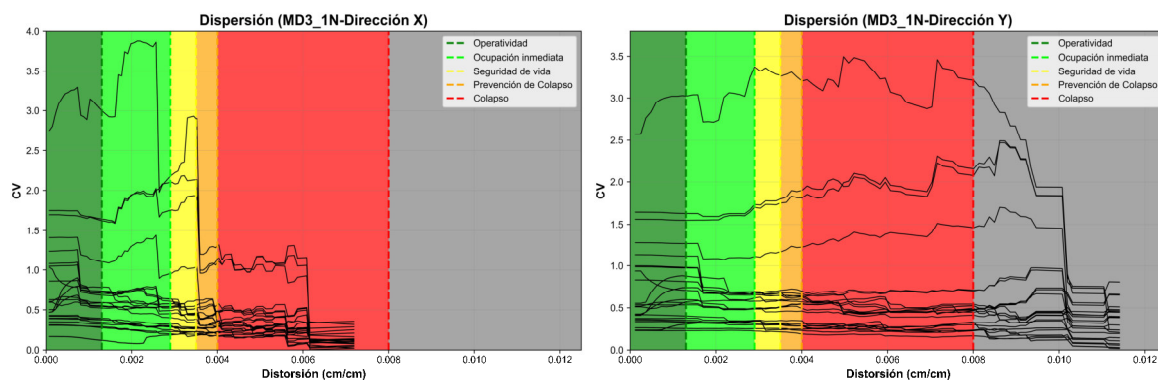


Figura Ap. 22. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD3_1N

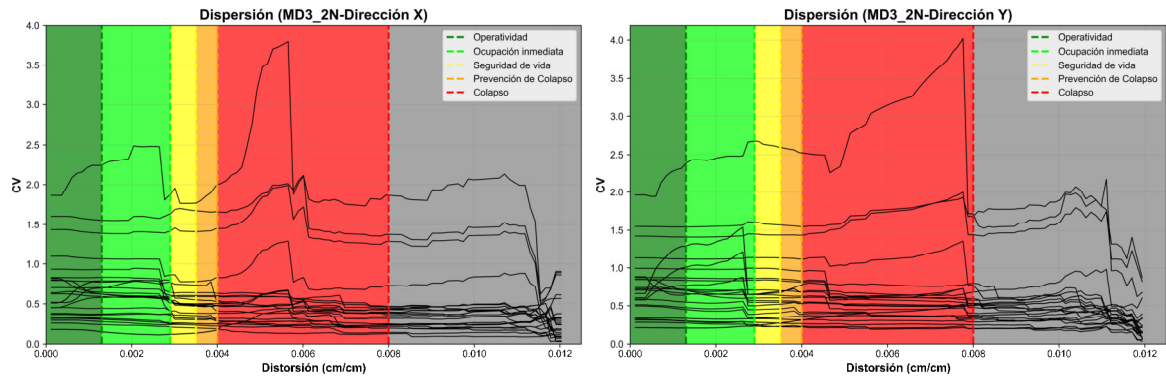


Figura Ap. 23. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD3_2N

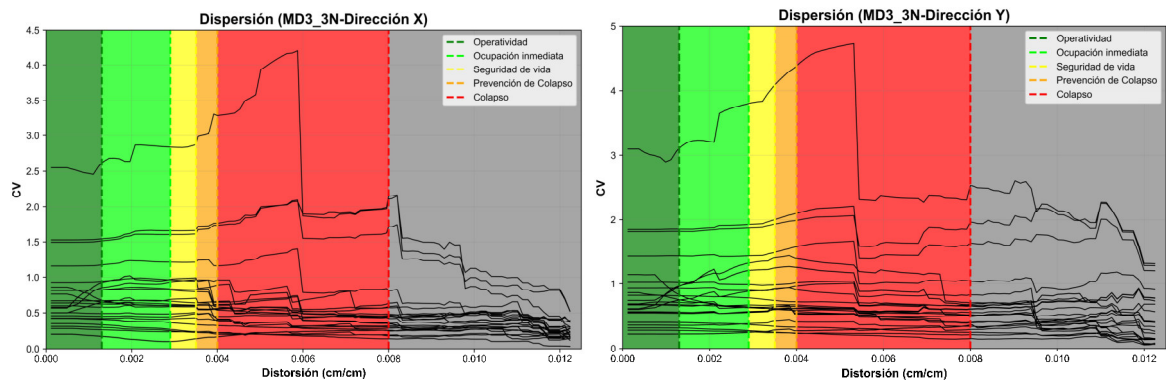


Figura Ap. 24. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD3_3N

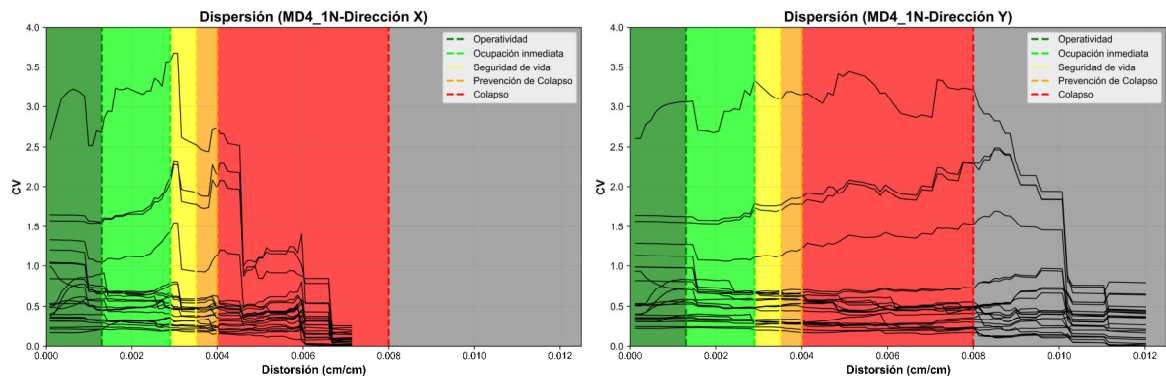


Figura Ap. 25. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD4_1N

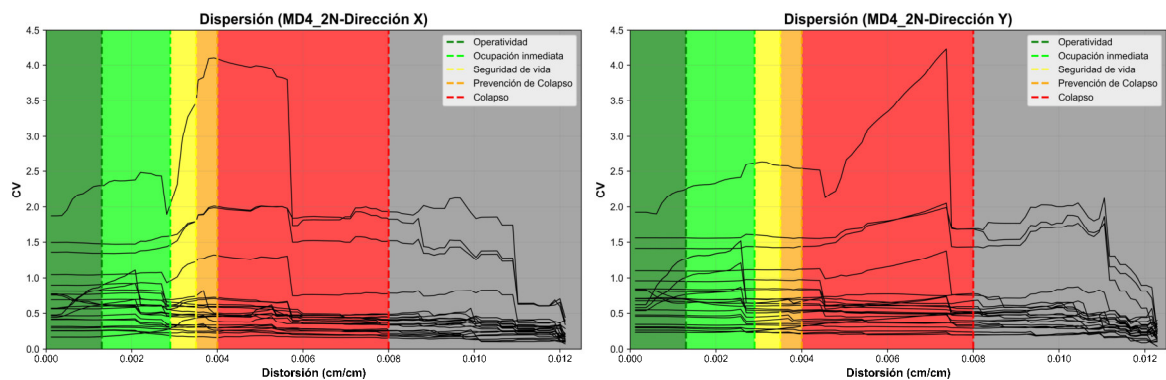


Figura Ap. 26. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD4_2N

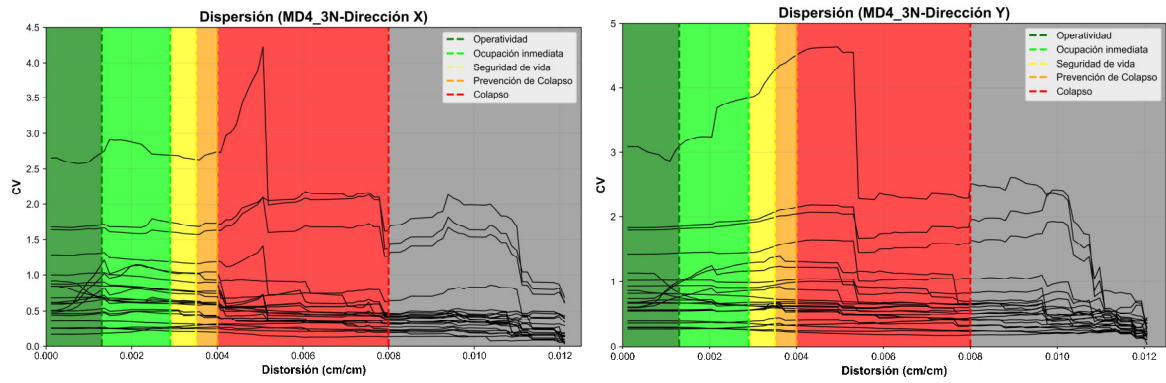


Figura Ap. 27. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD4_3N

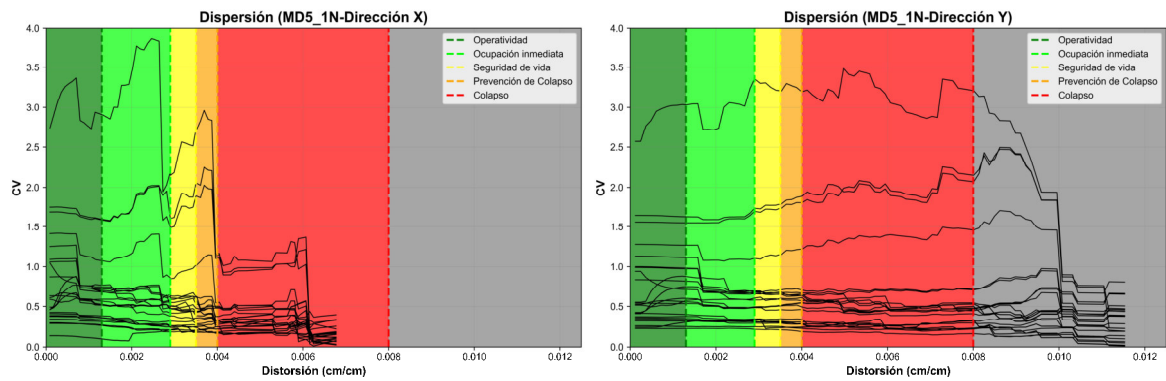


Figura Ap. 28. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD5_1N

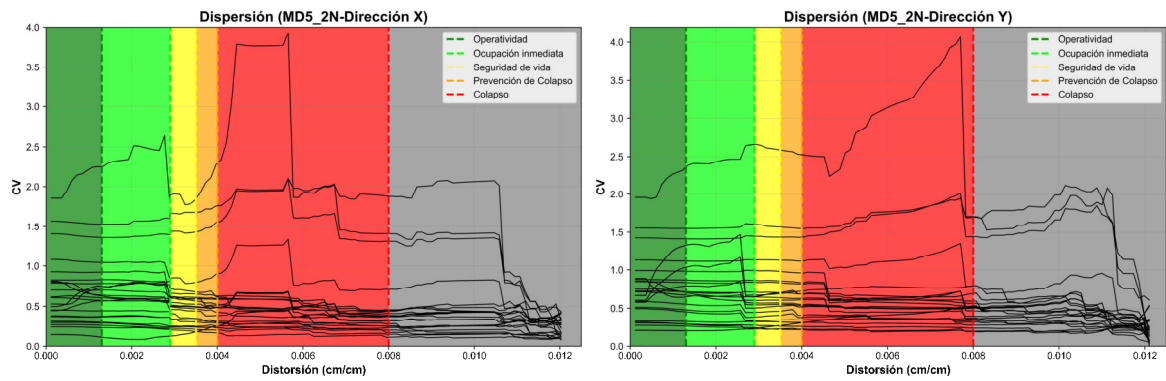


Figura Ap. 29. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD5_2N

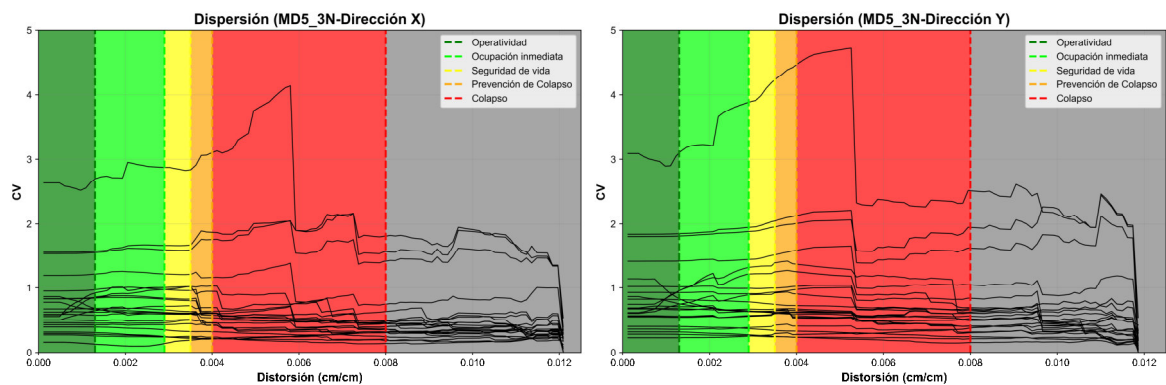


Figura Ap. 30. Variabilidad de la respuesta estructural modelo MD5_3N

Anexo 3: Secuencia de ejecución de códigos

Anexo 3.1. Cálculo de espectro RotD50

1. Definir función RotD50
 - Entrada:
 - RecordEW: señal de aceleración en dirección Este-Oeste
 - RecordNS: señal de aceleración en dirección Norte-Sur
 - Periodos: lista de períodos para el espectro de respuesta
 - Proceso:
 - Crear un DataFrame con las columnas AccEW y AccNS (aceleraciones originales)
 - Inicializar un DataFrame vacío MG para almacenar espectros combinados
 - Para cada ángulo θ desde 0° hasta 90° (cada 1°):
 - Rotar el registro hacia una nueva dirección usando:
 - $X = \text{AccEW} \cdot \cos(\theta) - \text{AccNS} \cdot \sin(\theta)$
 - $Y = \text{AccEW} \cdot \sin(\theta) + \text{AccNS} \cdot \cos(\theta)$
 - Crear señales `recordX` y `recordY` a partir de X y Y
 - Generar espectros de respuesta en los períodos indicados
 - Calcular la media geométrica entre ambos espectros
 - Almacenar cada vector MG_i como una nueva columna en el DataFrame MG
 - Para cada fila de MG (correspondiente a cada período):
 - Calcular la mediana entre los 91 valores $\rightarrow$ RotD50
 - Salida:
 - Devuelve un vector RotD50 con un valor por período
2. Definir la ruta principal que contiene subcarpetas con los registros
3. Obtener lista de carpetas dentro de la ruta
4. Para cada carpeta de registro:
 - Cambiar directorio a esa carpeta
 - Leer datos de aceleración EW y NS desde archivos '.txt'
 - Leer número total de datos (n) desde la primera línea del archivo
 - Leer intervalo de tiempo (dt) desde la segunda línea del archivo
 - Calcular RotD50 usando la función anterior
 - Crear un archivo de texto y escribir los valores de RotD50, uno por línea

Anexo 3.2. Selección de registros sísmicos

1. Definir función auxiliar
 - Función $MSE(y_{val}, y_{pred})$:
 - Calcular el promedio del cuadrado de la diferencia entre y_{val} y y_{pred}
 - Retornar mse
2. Definir lista de factores de escala
 - $SF \leftarrow$ concatenar dos rangos:
 - Desde 0.25 hasta 1.00 (sin incluir 1), 100 valores
 - Desde 1.00 hasta 4.00 (incluyendo), 100 valores
3. Creación de espectro objetivo
 - Periodos $\leftarrow$ valores entre 0 y 2 s (201 puntos)
 - Definir constantes:
 - $Z, U, S, R, T_p, T_l \leftarrow$ valores de norma E.030
 - Inicializar lista Espectro_E030 $\leftarrow []$
 - Para cada periodo T_n en Periodos:
 - Si $T_n < 0.2 \cdot T_p$:
 - $F \leftarrow$ fórmula del primer tramo
 - Si $0.2 \cdot T_p \leq T_n < T_p$:
 - $F \leftarrow$ fórmula del segundo tramo
 - Si $T_p \leq T_n < T_l$:
 - $F \leftarrow$ fórmula del tercer tramo
 - Si $T_n \geq T_l$:
 - $F \leftarrow$ fórmula del cuarto tramo
 - Añadir $981 \cdot F$ a Espectro_E030

Anexo 3.3. Análisis IDA

1. Definir funciones para determinar IM
 - Clase Intensity_Measure (aceleración, intervalo de tiempo):
 - Métodos para calcular diversas medidas de intensidad sísmica:
 - $Sa_{T1}(T1)$: espectro pseudoaceleración en $T1$
 - $PGA()$: aceleración máxima del registro
 - $Sa_{Avg}()$: promedio geométrico del espectro de respuesta de 0 a 2 s
 - $TPH(T1)$: intensidad ponderada ($T1$ y $c \cdot T1$)
 - $INp(T1)$: intensidad normalizada
 - $EPI()$: energía específica

- RMS(): raíz cuadrática media de EPI
- EPA(): área espectral (0.1 a 0.5 s)
- IMcr(T1), IMsr(T1): medidas compuestas con distintas razones R
- A95(): energía acumulada hasta el 5%
- Ic(), Ia(): intensidades combinadas con duración significativa
- CAV(), S_CAV(): valores de CAV estándar y con duración significativa
- AI(): intensidad de Arias
- PGV(): velocidad pico
- Vsq(), Vrs(): integrales y raíz cuadrada de velocidad al cuadrado
- IF(), Iv(): intensidad de velocidad
- Sv_T1(), Sd_T1(): espectros de velocidad y desplazamiento en T1
- SIH(): integral espectral de velocidad
- PGD(): desplazamiento pico
- Id(), Iz(): medidas derivadas de PGD, duración y energías

2. Proceso principal – Dirección X

- Establecer ruta de registros y obtener lista de carpetas
- Para cada registro:
 - Leer archivos de aceleración EW y NS
 - Determinar longitud 'n' y paso de tiempo 'dt'
 - Seleccionar dirección con mayor amplitud como X
- Reemplazar datos en archivos 'inputwave_x.txt' y 'inputwave_y.txt'
- Inicializar listas para almacenar medidas de intensidad por FE
- Para cada factor de escala (FE):
 - Modificar archivo de entrada para aplicar FE
 - Ejecutar STERA 3D y esperar salida
 - Leer archivo 'response_structure.txt':
 - Si hay NaN:
 - Guardar registro con error
 - Si no:
 - Leer 'max_structure.txt' y 'response_eigen.txt'
 - Calcular T1 y drx máximo
 - Usar clase Intensity_Measure con aceleración a0x
 - Calcular todas las medidas de intensidad (PGA, Sa_T1, SaAvg, etc.)
 - Guardar resultados en listas

- Almacenar resultados en un DataFrame
 - Exportar resultados a archivo '.txt' con nombre del registro y sufijo _X
3. Proceso principal – Dirección Y
- Repetir el mismo procedimiento anterior, pero:
 - Seleccionar como dirección Y la de menor amplitud (inverso al caso X)
 - Sustituir en archivos 'inputwave_x.txt' y 'inputwave_y.txt' con dirección Y
 - Guardar las medidas como PGA_Y, Sa_T1_Y, etc.
 - Almacenar en DataFrame con sufijo _Y
 - Exportar a '.txt' en carpeta de resultados DIR-Y
 - Finalmente, exportar archivo de errores encontrados en ambos ejes:
 - 'ERRORES_X.txt'
 - 'ERRORES_Y.txt'

Anexo 3.4. Análisis de la variabilidad estructural

1. Definir funciones auxiliares
- Función findcoordinate_X(lista_x, lista_y, xt):
 - Para cada valor en lista_x:
 - Si valor > xt:
 - Obtener x0, x1 y sus respectivos y0, y1
 - Retornar x0, x1, y0, y1
 - Función interpolate(x0, x1, y0, y1, xt):
 - Calcular yt por interpolación lineal
 - Retornar yt
 - Función area_curva(Y, X):
 - Si lista X está vacía:
 - Retornar 0
 - Si lista X tiene un solo valor:
 - Retornar valor de Y
 - Si no:
 - Calcular área usando regla del trapecio
 - Retornar área
 - Función CV(lista):
 - Calcular coeficiente de variación
 - Retornar CV

2. Lectura y procesamiento de datos

- Establecer ruta de registros sísmicos normalizados
- Obtener nombres de archivos de registro
- Para cada archivo:
 - Leer archivo '.txt' correspondiente
 - Convertir a DataFrame y limpiar encabezados
 - Filtrar puntos con distorsión < 0.02

3. Análisis para cada IM

- Obtener lista de columnas IM desde el primer registro
- Para cada IM:
 - Inicializar lista de curvas válidas
 - Calcular máxima distorsión de todos los registros
 - Generar lista de puntos X para interpolar (Points_to_collect)
 - Agregar valores de estados límite (si no están) y ordenar
 - Para cada registro:
 - Obtener listas de X e Y
 - Para cada punto x en Points_to_collect:
 - Si $x < \text{máximo X del registro}$:
 - Interpolar Y correspondiente
 - Almacenar en resultados[registro]
 - Guardar y en y_values_by_x[x]
 - Calcular curva media, percentiles Q5 y Q95
 - Para cada registro:
 - Verificar si todas sus Y están entre Q5 y Q95
 - Si sí, guardar como curva válida (curvas_filtradas)
 - Repetir interpolación para curvas válidas únicamente
 - Calcular curva media, CV para cada x
 - Almacenar resultados en DataFrame por cada IM

4. Cálculo de áreas bajo curvas CV por estado de daño

- Definir listas para áreas por estado de daño y tipo de métrica (CV)
- Para cada IM:
 - Inicializar listas de X, CV por estado de daño (E, C, Y, U, CP, CO)
 - Para cada punto x:
 - Determinar a qué estado de daño pertenece (según rango)
 - Agregar x, CV[x] a su lista correspondiente

- Calcular y guardar el área bajo la curva para cada estado de daño y cada métrica
- 5. Identificación de IM óptimas por estado de daño
 - Crear DataFrame con todas las áreas calculadas
 - Para cada columna (salvo la primera):
 - Encontrar el IM con menor área
 - Asociar a la lista correspondiente (CV)
 - Crear DataFrame resumen con las IM óptimas por estado de daño
- 6. Visualización: Curvas IDA y curvas medias
 - Para cada IM:
 - Crear gráfico de curvas IDA para curvas válidas
 - Guardar imagen .png
 - Crear gráfico de curvas IDA para todos los registros y su curva media
 - Guardar imagen .png
- 7. Visualización: Dispersión (CV)
 - Para cada IM:
 - Graficar curva de CV
 - Agregar líneas verticales que marcan los estados de daño:
 - Cracking, Yielding, Ultimate, Collapse Prevention, Collapse
 - Guardar imagen .jpg
- 8. Repetir pasos del 2 al 7 para la dirección Y