

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Efecto de uso de factores de seguridad para el diseño de sistemas de aislación sísmica elastomérica en el desempeño sísmico de infraestructura crítica.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Estructuras civiles sismorresistentes

Presentado por:

Luis Alejandro Naspud Redrován

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2026

DEDICATORIA

A mis padres Luis y Patricia, y a mi hermana Katherine, por ser el lugar al que siempre se puede volver. Su aliento no fue ruidoso, fue constante y eso vale más. A mi tío Juan, en quien habita una calidad humana poco común. Su calidez, presencia y confianza en mí lo convierten en una de las personas más importantes de mi vida. Este logro es tan suyo como mío.

A mis abuelos César, Segundo y Cecilia, por todo lo construido que hoy sostiene lo que soy y a Lucrecia, mi mamuca, cuya presencia no se va del todo. Ojalá pudiera leer estas páginas.

A la memoria de mi tío Rubén: honestidad como forma de existir, rectitud como carácter, resiliencia frente a lo difícil. Pocas personas dejan una huella tan clara de lo que significa vivir bien.

Y a Aldo, que jamás entendió una ecuación, pero escuchó cada una de mis frustraciones. No sabe lo que es un sismo, pero sabe cuándo necesito compañía. El mejor compañero de tesis.

AGRADECIMIENTOS

Al **PhD. Rodrigo Retamales**, por su orientación rigurosa y su acompañamiento determinante a lo largo de todo el proceso investigativo.

A la **PhD. Natividad García**, por su disponibilidad permanente y el apoyo oportuno en cada momento que fue requerido.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y a su programa de Maestría en Estructuras Civiles Sismorresistentes, por el espacio académico y los recursos que hicieron posible esta formación.

A mi familia, por el sostén emocional y material que hizo posible mi dedicación plena a este programa.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Luis Alejandro
Naspud Redrovan

Time Stamping
Security Data

.....
Luis Alejandro Naspud Redrován

EVALUADORES



Samantha Hidalgo Astudillo
PROFESOR DE LA MATERIA



Nadia Quijano Arteaga
PROFESOR DE LA MATERIA



Rodrigo Retamales Saavedra
PROFESOR TUTOR

Natividad García Troncoso
PROFESOR CO -TUTOR

RESUMEN

La infraestructura hospitalaria constituye un sistema crítico cuya funcionalidad post sismo es indispensable para la respuesta de emergencia. Los sistemas de aislación sísmica elastomérica representan la tecnología más efectiva para garantizar esta operatividad; sin embargo, la disparidad de factores de seguridad entre normativas internacionales genera incertidumbre sobre su efecto real en el desempeño sísmico. El presente estudio evalúa el efecto de uso de factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico de aisladores elastoméricos para un hospital de diez pisos, mediante análisis dinámico incremental y curvas de fragilidad derivadas analíticamente, con el objetivo de proveer evidencia cuantitativa para la selección de criterios normativos apropiados en el contexto de países carentes de normativa para aislación sísmica. Se diseñaron cuatro sistemas de aislación elastomérica aplicando los requisitos de los estándares: Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011. El sistema de aislación sísmica comprendió 163 dispositivos distribuidos en cuatro tipos, definidos según el nivel de carga vertical completa. Los sistemas diseñados fueron implementados en un modelo estructural no lineal y sometidos a análisis dinámico incremental utilizando 22 pares de registros sísmicos con magnitud $M_w \geq 7.5$ y alto contenido energético en el rango de períodos de 3 a 5 segundos. Las curvas de fragilidad resultantes revelaron que el Eurocódigo 8, NCh 2745 y NTE E.031 producen medianas del estado límite de los aisladores críticos entre 0.65g y 0.67g, niveles estadísticamente equivalentes y superiores al PGA de diseño del sitio. La normativa GB 50011 generó la mayor vulnerabilidad sísmica con una mediana de 0.50g, pese a producir el sistema dimensionalmente más robusto con 164.5 m^3 . La selección del marco normativo determina de manera significativa tanto las dimensiones como el desempeño sísmico del sistema de aislación, siendo el Eurocódigo 8 la alternativa de mayor eficiencia en la relación desempeño-material para las condiciones analizadas. El conservadurismo volumétrico no garantiza mayor seguridad sísmica. La distribución adecuada de mecanismos histeréticos constituye el factor determinante del desempeño del sistema de aislación.

Palabras Clave: Aislación sísmica, factores de seguridad normativos, análisis dinámico incremental, curvas de fragilidad, infraestructura hospitalaria.

ABSTRACT

Hospital infrastructure represents a critical system whose post-seismic functionality is essential for emergency response. Elastomeric seismic isolation systems constitute the most effective technology to ensure this operational continuity; however, the disparity in safety factors among international standards generates uncertainty regarding their actual effect on seismic performance. This study evaluates the effect of normative safety factors on the seismic performance of elastomeric isolators for a ten-story hospital, through incremental dynamic analysis and analytical fragility curves, with the objective of providing quantitative evidence for the selection of appropriate normative criteria in the Ecuadorian context. Four elastomeric isolation systems were designed applying the requirements of Eurocode 8, NCh 2745, NTE E.031, and GB 50011, resulting in 163 devices distributed in four types according to vertical load level. The designed systems were implemented in a nonlinear structural model and subjected to incremental dynamic analysis using 22 pairs of seismic records with moment magnitude $M_w \geq 7.5$ and high energy content in the period range of 3 to 5 seconds. The resulting fragility curves revealed that Eurocode 8, NCh 2745, and NTE E.031 produce median limit-state values for the critical isolators between 0.65g and 0.67g, statistically equivalent levels exceeding the site design PGA. The GB 50011 standard generated the greatest seismic vulnerability with a median of 0.50g, despite producing the dimensionally most robust system with 164.5 m³. The selection of the normative framework significantly determines both the dimensions and the seismic performance of the isolation system, with Eurocode 8 being the most efficient alternative in the performance-to-material ratio for the analyzed conditions. Volumetric conservatism does not guarantee greater seismic safety; the adequate distribution of hysteretic mechanisms constitutes the determining factor of system performance.

Keywords: *Seismic isolation, normative safety factors, incremental dynamic analysis, fragility curves, hospital infrastructure.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	5
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
CAPÍTULO 1	15
Introducción	15
1.1 Introducción del proyecto de graduación	15
1.2 Antecedentes	16
1.3 Problemática a resolver	19
1.4 Justificación.....	20
1.5 Objetivos	22
1.5.1 Objetivo General	22
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO 2	23
Desarrollo del proyecto	23
2.1 Marco conceptual	23
2.1.1 Fundamentos de aislación sísmica.	23
2.1.2 Sistemas de aislación sísmica elastomérica.	24
2.1.3 Criterios normativos y factores de seguridad.	25
2.1.4 Infraestructura hospitalaria y requisitos de desempeño.	30

2.1.5	Análisis dinámico incremental (IDA).....	30
2.1.6	Curvas de fragilidad sísmica.....	32
2.2	Marco metodológico	33
2.2.1	Solución por diseñar	35
CAPÍTULO 3	.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	38
3.1	Resultados	38
3.1.1	Características de los sistemas de aislación diseñados.....	38
3.1.2	Resultados del análisis dinámico incremental (IDA).....	44
3.1.3	Curvas de fragilidad.....	50
3.2	Análisis de resultados	52
3.2.1	Efecto de uso de los factores de seguridad normativos en las dimensiones y propiedades dinámicas de los aisladores.....	52
3.2.2	Comportamiento de los aisladores bajo excitación sísmica incremental.....	58
3.2.3	Evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad.....	60
3.2.4	Síntesis cuantitativa y análisis costo-beneficio.....	60
3.2.5	Implicaciones para infraestructura hospitalaria.....	62
CAPÍTULO 4	.....	64
Conclusiones Y Recomendaciones	.....	64
Conclusiones.	.....	64
Recomendaciones.	.....	66
Bibliografía	.....	68
PLANOS Y ANEXOS	.....	72

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EDP	Parámetro de Demanda Ingenieril
FU	Factor de utilización
IDA	Análisis Dinámico Incremental
IM	Intensidad Sísmica
LRB	Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
PBEE	Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño
PGA	Aceleración máxima del suelo
RB	Aisladores elastoméricos

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m ³	Metro cúbico
MPa	Mega pascal
Tonf	Tonelada fuerza
B _M	Factor de reducción por amortiguamiento
θ	Mediana
β	Desviación estándar logarítmica
σ	Esfuerzo
Δ	Desplazamiento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes de un aislador sísmico elastomérico de bajo y alto amortiguamiento [22].	24
Figura 2.2 Componentes de un aislador sísmico elastomérico con núcleo de plomo [22].	25
Figura 2.3 Curvas de análisis dinámico incremental [32].	31
Figura 2.4 Curvas de fragilidad sísmica mostrando la probabilidad de exceder diferentes estados de daño en función de la aceleración espectral [38].	32
Figura 3.1 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según Eurocódigo 8.	46
Figura 3.2 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según NCh 2745.	47
Figura 3.3 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según NTE E.031.	48
Figura 3.4 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según GB 50011.	49
Figura 3.5 Comparativa de Curvas de Fragilidad Sísmica según Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011.	51
Figura 4.1 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios del Eurocódigo 8.	73
Figura 4.2 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios de la NCh 2745.	74
Figura 4.3 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios de la NTE E.031.	75
Figura 4.4 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios del GB 50011.	76
Figura 4.5 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según Eurocódigo 8.	78
Figura 4.6 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según Eurocódigo 8.	78
Figura 4.7 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según Eurocódigo 8.	79
Figura 4.8 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según Eurocódigo 8.	79
Figura 4.9 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según Eurocódigo 8.	80

Figura 4.10 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según Eurocódigo 8.	80
Figura 4.11 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según Eurocódigo 8.	81
Figura 4.12 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según Eurocódigo 8.	81
Figura 4.13 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según Eurocódigo 8.	82
Figura 4.14 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según Eurocódigo 8.	82
Figura 4.15 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según Eurocódigo 8.	83
Figura 4.16 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según Eurocódigo 8.	83
Figura 4.17 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según Eurocódigo 8.	84
Figura 4.18 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según Eurocódigo 8.	84
Figura 4.19 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según Eurocódigo 8.	85
Figura 4.20 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según Eurocódigo 8.	85
Figura 4.21 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según Eurocódigo 8.	86
Figura 4.22 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según Eurocódigo 8.	86
Figura 4.23 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según Eurocódigo 8.	87
Figura 4.24 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según Eurocódigo 8.	87
Figura 4.25 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según Eurocódigo 8.	88

Figura 4.26 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según Eurocódigo 8.	88
Figura 4.27 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según NCh 2745.	89
Figura 4.28 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según NCh 2745.	89
Figura 4.29 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según NCh 2745.	90
Figura 4.30 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según NCh 2745.	90
Figura 4.31 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según NCh 2745.	91
Figura 4.32 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según NCh 2745.	91
Figura 4.33 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según NCh 2745.	92
Figura 4.34 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según NCh 2745.	92
Figura 4.35 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según NCh 2745.	93
Figura 4.36 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según NCh 2745.	93
Figura 4.37 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según NCh 2745.	94
Figura 4.38 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según NCh 2745.	94
Figura 4.39 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según NCh 2745.	95
Figura 4.40 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según NCh 2745.	95
Figura 4.41 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según NCh 2745.	96

Figura 4.42 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según NCh 2745.	96
Figura 4.43 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según NCh 2745.	97
Figura 4.44 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según NCh 2745.	97
Figura 4.45 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según NCh 2745.	98
Figura 4.46 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según NCh 2745.	98
Figura 4.47 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según NCh 2745.	99
Figura 4.48 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según NCh 2745.	99
Figura 4.49 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según NTE E.031.	100
Figura 4.50 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según NTE E.031.	100
Figura 4.51 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según NTE E.031.	101
Figura 4.52 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según NTE E.031.	101
Figura 4.53 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según NTE E.031.	102
Figura 4.54 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según NTE E.031.	102
Figura 4.55 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según NTE E.031.	103
Figura 4.56 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según NTE E.031.	103
Figura 4.57 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según NTE E.031.	104

Figura 4.58 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según NTE E.031.	104
Figura 4.59 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según NTE E.031.	105
Figura 4.60 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según NTE E.031.	105
Figura 4.61 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según NTE E.031.	106
Figura 4.62 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según NTE E.031.	106
Figura 4.63 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según NTE E.031.	107
Figura 4.64 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según NTE E.031.	107
Figura 4.65 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según NTE E.031.	108
Figura 4.66 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según NTE E.031.	108
Figura 4.67 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según NTE E.031.	109
Figura 4.68 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según NTE E.031.	109
Figura 4.69 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según NTE E.031.	110
Figura 4.70 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según NTE E.031.	110
Figura 4.71 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según GB 50011.	111
Figura 4.72 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según GB 50011.	111
Figura 4.73 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según GB 50011.	112

Figura 4.74 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según GB 50011.	112
Figura 4.75 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según GB 50011.	113
Figura 4.76 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según GB 50011.	113
Figura 4.77 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según GB 50011.	114
Figura 4.78 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según GB 50011.	114
Figura 4.79 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según GB 50011.	115
Figura 4.80 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según GB 50011.	115
Figura 4.81 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según GB 50011.	116
Figura 4.82 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según GB 50011.	116
Figura 4.83 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según GB 50011.	117
Figura 4.84 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según GB 50011.	117
Figura 4.85 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según GB 50011.	118
Figura 4.86 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según GB 50011.	118
Figura 4.87 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según GB 50011.	119
Figura 4.88 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según GB 50011.	119
Figura 4.89 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según GB 50011.	120

Figura 4.90 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según GB 50011.	120
Figura 4.91 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según GB 50011.	121
Figura 4.92 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según GB 50011.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros de diseño de los aisladores elastoméricos.	26
Tabla 3.2 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con Eurocódigo 8.	38
Tabla 3.3 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con NCh 2745.	39
Tabla 3.4 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con NTE E.031.	40
Tabla 3.5 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con GB 50011.	42
Tabla 3.6 Síntesis comparativa de configuraciones normativas.	61

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción del proyecto de graduación

La protección sísmica representa uno de los desafíos más significativos para la ingeniería estructural a nivel global, particularmente en regiones de alta actividad tectónica como Latinoamérica. La vulnerabilidad de las infraestructuras esenciales, como los hospitales, ante estos eventos naturales, puede tener consecuencias humanitarias y sociales devastadoras. Tradicionalmente, el diseño sismorresistente se ha fundamentado en el principio de disipación de energía, el cual permite que los elementos estructurales experimenten daños durante un sismo severo, protegiendo la vida humana, pero comprometiendo, en muchos casos, la funcionalidad del edificio [1].

En respuesta a esta limitación, a partir de la segunda mitad del siglo XX, surgió la aislación sísmica como una tecnología innovadora. Su principio fundamental radica en desacoplar la estructura del movimiento del terreno mediante la incorporación de dispositivos altamente flexibles en la base [2]. Esta estrategia permite extender de forma significativa el periodo de vibración principal de la estructura. Como resultado, las fuerzas sísmicas que debe soportar el edificio resultan considerablemente menores. No obstante, aunque la eficacia de los aisladores sísmicos de base ha sido ampliamente comprobada, conseguir su diseño y aplicación óptimos resulta complejo debido a la variedad de criterios que exigen los diferentes estándares y normativas. Estándares de diseño, como el euro código, y las normas chilena, peruana y china, entre otros, establecen requisitos de detallamiento y, especialmente, factores de seguridad distintos para el dimensionamiento de estos dispositivos. El presente proyecto de graduación propone abordar esta problemática mediante una evaluación cuantitativa del efecto que tienen los factores de seguridad de distintas normativas en el desempeño sísmico de un hospital equipado con aisladores sísmicos elastoméricos. A través de análisis no lineal de respuesta en el tiempo, se evaluará el desempeño sísmico de la estructura montada sobre aisladores sísmicos diseñados bajo la aplicación de diferentes criterios de diseño. El estudio busca generar evidencia técnica que permita correlacionar los factores de

seguridad con parámetros críticos de desempeño, como la seguridad de los estados límite de los aisladores [3].

Los hallazgos de esta investigación aspiran a proporcionar recomendaciones fundamentadas para la selección de criterios normativos adecuados, contribuyendo así a la optimización del diseño sismorresistente de infraestructura hospitalaria en Ecuador y otros países de la región con contextos sísmicos similares, con el fin último de alcanzar su resiliencia y operatividad continua frente a eventos extremos [1].

1.2 Antecedentes

La constante exposición a amenazas sísmicas en regiones como América Latina ha impulsado la evolución de las estrategias de diseño estructural. Durante décadas, el paradigma predominante en ingeniería sismorresistente se basó en el concepto de disipación de energía, donde los elementos estructurales están diseñados para dañarse de manera controlada durante un terremoto, salvaguardando la vida humana a expensas de posibles daños materiales y la interrupción operativa del edificio. Sin embargo, este enfoque resulta insuficiente para infraestructuras críticas o estratégicas como los hospitales, cuya función debe preservarse intacta durante y después de un evento sísmico para atender la emergencia sanitaria [4]. Como respuesta a esta necesidad, la aislación sísmica de base emergió como una tecnología innovadora. Su principio fundamental es el desacoplamiento de la superestructura del movimiento del terreno mediante la inserción de dispositivos altamente flexibles, conocidos como aisladores sísmicos, en la base del edificio. Esta estrategia permite extender significativamente el periodo fundamental de vibración de la estructura, desplazando la demanda sísmica hacia zonas del espectro con considerablemente menor energía. El resultado es una reducción drástica de las aceleraciones y fuerzas internas transmitidas a la superestructura, protegiendo tanto los componentes estructurales como los no estructurales y el costoso equipamiento médico en su interior [5].

A pesar de la eficacia comprobada de esta tecnología, su implementación óptima se enfrenta a un desafío práctico significativo: la disparidad de criterios en los estándares y normativas internacionales. Distintos países, como Chile, China, Perú y los de la Unión Europea (Eurocódigo 8), han establecido requisitos y, crucialmente, factores de seguridad diferentes para el diseño de los aisladores. Parámetros clave como el segundo factor de forma, deformación por corte máxima total permitida y presión de contacto

admisible (en tracción y compresión), entre otros, varían entre un código y otro, generando incertidumbre en la práctica profesional. Esta falta de estandarización plantea una problemática central: actualmente no existe claridad sobre cómo estas diferencias normativas influyen cuantitativamente en el desempeño sísmico real y en la economía del proyecto. Esta incertidumbre puede conducir a dos escenarios problemáticos. Por un lado, la aplicación de factores excesivamente conservadores podría derivar en diseños sobredimensionados, incrementando los costos de construcción de manera innecesaria y limitando la viabilidad técnica y económica de la tecnología en contextos con recursos limitados. Por otro lado, la adopción de criterios menos rigurosos podría comprometer la seguridad y la funcionalidad post-sismo de la infraestructura esencial. Por lo tanto, se identifica una clara necesidad de investigación que evalúe de manera comparativa y cuantitativa el efecto de estos distintos niveles de exigencia normativa en el desempeño final de las estructuras aisladas, particularmente en edificios hospitalarios donde el equilibrio entre seguridad, funcionalidad y costo es primordial [5].

Los grandes terremotos que han sacudido distintas regiones del mundo como el de Chile en 2010, el de México en 2017 o el de Japón en 2011 dejaron una lección clara para la ingeniería estructural: los hospitales construidos bajo criterios sísmicos tradicionales presentaban puntos débiles que iban más allá de lo estructural. Si bien en muchos casos los edificios no colapsaron, su funcionalidad quedó gravemente comprometida. Daños en tabiques, cielos falsos, ductos y, lo que es más preocupante, en equipos médicos esenciales como tomógrafos, resonadores magnéticos y mesas de cirugía, dejaron inoperantes quirófanos, unidades de cuidados intensivos y servicios de diagnóstico en el momento de mayor necesidad.

La incorporación de factores de seguridad en el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos es esencial para proteger infraestructura crítica como hospitales. Sin embargo, su aplicación siguiendo referencias como el estándar ASCE/SEI 7 de EE. UU. o la norma chilena NCh2745 puede generar efectos complejos y no siempre beneficiosos en la respuesta final de la estructura. Buscan crear una alternativa ante la variabilidad del material y la fuerza sísmica, pero un diseño excesivamente conservador puede alterar la dinámica del sistema. Por ejemplo, aumentar demasiado la rigidez para cumplir con factores de seguridad para cargas puede acortar el periodo del sistema de aislamiento, acercando la estructura a rangos donde la aceleración sísmica es mayor y, contra

intuitivamente, incrementando las fuerzas que actúan sobre el edificio y sus contenidos. Esto es particularmente delicado en instalaciones hospitalarias, donde el funcionamiento continuo y la protección de equipos sensibles son prioritarios [6].

Experiencias documentadas en proyectos reales y estudios académicos ilustran estas contradicciones. Un caso analizado por [7], en un centro de salud en Japón, demostró que la aplicación de factores de sobre resistencia normativos condujo a aisladores tan rígidos que las aceleraciones en los pisos superiores casi igualaron las de una estructura convencional, comprometiendo el objetivo principal del aislamiento. Por otro lado, [8] documentó el caso de un hospital en California donde los factores de seguridad aplicados al desplazamiento resultaron en una junta de aislamiento perimetral de dimensiones tan grandes que complicaron severamente las conexiones de servicios médicos y las salidas de emergencia, aumentando costos y riesgos operativos. Estos ejemplos muestran que un enfoque normativo excesivamente prescriptivo, sin considerar las interacciones físicas completas, puede diluir los beneficios del aislamiento.

Asimismo, investigaciones como las de [6] en puentes aislados, y de [9] en edificios, subrayan que la incertidumbre inherente en las propiedades del elastómero es un argumento clave para adoptar factores de seguridad.

En el estado del arte más reciente, [10] realizaron una comparación sistemática de los requisitos normativos de aislación sísmica vigentes en seis países, incluyendo China (GB 50011) y Chile (NCh 2745), aplicada al diseño de edificios hospitalarios en zonas de alta y media sismicidad. Sus resultados confirmaron que las diferencias en los factores de seguridad y en las metodologías de diseño entre normativas producen variaciones sustanciales en las dimensiones de los sistemas de aislación, y que ningún código es universalmente superior, sino que su idoneidad depende del contexto sísmico regional. Esta evidencia subraya la necesidad de estudios que cuantifiquen el efecto real de dichas diferencias en el desempeño sísmico, no solo en el dimensionamiento de los dispositivos. En la misma línea, [11] realizaron una revisión sistemática de los aisladores elastoméricos con y sin núcleo de plomo, confrontando sus comportamientos bajo distintas normativas. El estudio identificó que la presencia del núcleo de plomo es el factor determinante en la capacidad de disipación histerética del sistema y, en consecuencia, en el desempeño sísmico del edificio, particularmente en el rango de periodos largos propio de estructuras aisladas. Los autores concluyeron que la

comparación de parámetros de rigidez equivalente y amortiguamiento entre códigos revela divergencias metodológicas que la práctica profesional aún no ha resuelto de manera sistemática. Estos antecedentes evidencian que la pregunta sobre el efecto cuantitativo de los factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico real de aisladores elastoméricos sigue sin una respuesta comprehensiva en la literatura, particularmente para el contexto normativo latinoamericano y en aplicaciones hospitalarias.

No obstante, estos trabajos también proponen que un enfoque probabilístico, que maneje dichas incertidumbres de forma explícita en lugar de mediante factores fijos, puede conducir a diseños más eficientes y confiables. [12] avanza en esta línea, desarrollando un marco de diseño donde los factores de seguridad se calibran para cumplir objetivos específicos de desempeño y niveles aceptables de riesgo, en lugar de aplicarse de manera genérica.

Esta situación llevó a replantear por completo el enfoque del diseño sísmico para infraestructuras críticas. Ya no bastaba con diseñar para prevenir colapso; sino se requería que el hospital siguiera funcionando incluso después de un sismo severo. Este cambio de mentalidad impulsó la adopción de sistemas de aislamiento sísmico en la base, que pasaron de ser una tecnología novedosa a una solución estratégica e imprescindible. Entre estas soluciones, los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo han demostrado ser particularmente eficaces, ya que permiten controlar tanto las aceleraciones como las derivas de piso. La elección del tipo de aislador no es arbitraria: requiere un estudio detallado que tenga en cuenta las características sísmicas del lugar, los desplazamientos esperados, la capacidad del suelo y, sobre todo, el nivel de funcionamiento que se espera del hospital tras el evento. El objetivo final es claro: asegurar que la infraestructura sanitaria no solo resista, sino que siga operativa, salvaguardando vidas cuando más se necesita [12].

1.3 Problemática a resolver

Los sistemas de aislación sísmica han demostrado ser una tecnología altamente efectiva para la protección de estructuras críticas como hospitales, reduciendo significativamente las demandas sísmicas en la superestructura y permitiendo la continuidad operacional después del evento. Sin embargo, existe una notable disparidad en los criterios, requisitos y sobre todo en los factores de seguridad que establecen las normativas

internacionales para el diseño de estos sistemas. Normativas como el euro código, la norma chilena NCh2745, el código peruano E.031 y la normativa china GB 50011 presentan enfoques metodológicos diferenciados, con niveles de conservadurismo variables que responden a contextos sísmicos, tradiciones ingenieriles y filosofías de diseño particulares de cada región.

Esta heterogeneidad normativa genera una problemática técnica fundamental: actualmente existe una carencia de claridad respecto a cómo la variación de los factores de seguridad prescritos por estos códigos influye cuantitativamente en la respuesta sísmica real de estructuras aisladas. Esta incertidumbre resulta particularmente crítica en edificaciones esenciales como hospitales, cuya funcionalidad post sismo es indispensable para la atención de emergencias. La falta de comprensión sobre el impacto real de estos factores puede conducir a dos escenarios igual de indeseables: diseños excesivamente conservadores que pueden incrementar innecesariamente los costos de construcción sin una mejora proporcional en el desempeño, o diseños subóptimos que no aprovechan completamente el potencial de protección que ofrece la aislación sísmica. La problemática se agudiza por la ausencia de estudios comparativos rigurosos que evalúen sistemáticamente cómo los diferentes niveles de conservadurismo normativo se traducen a parámetros tangibles de desempeño estructural. Los profesionales enfrentan decisiones de diseño sin evidencia cuantitativa suficiente sobre las implicaciones reales de adoptar un código sobre otro, particularmente en contextos como Ecuador, donde la alta sismicidad demanda criterios de diseño robustos y económicamente viables.

Por tanto, se hace necesario realizar un análisis comparativo exhaustivo mediante análisis no lineal de respuesta en el tiempo que permita cuantificar el efecto específico de aplicar distintos factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico real de estructuras hospitalarias equipadas con sistemas de aislación sísmica de base de tipo elastomérico. Este estudio permitirá establecer correlaciones cuantitativas entre los requisitos normativos y la respuesta estructural, proporcionando a la comunidad profesional criterios técnicamente fundamentados para la selección apropiada de estándares de diseño según objetivos de desempeño específicos.

1.4 Justificación

La resolución de este proyecto se realiza por múltiples razones de relevancia técnica, económica y social. En primer lugar, los hospitales constituyen infraestructura crítica

esencial que debe mantener operatividad continua durante e inmediatamente después de eventos sísmicos severos, permitiendo atención médica. La incertidumbre actual sobre el impacto real de los factores de seguridad por cada normativa puede conducir a dos tipos de escenarios igualmente problemáticos: i) diseños excesivamente conservadores, que incrementan innecesariamente los costos de construcción, limitando la implementación de esta tecnología de protección sísmica en países con recursos económicos limitados; o ii) diseños subóptimos, que pudieran no maximizar la seguridad y funcionalidad post sismo de estructuras esenciales.

Este estudio proporcionará evidencia cuantitativa que permitirá a los profesionales tomar decisiones informadas sobre la selección de criterios normativos apropiados en sus diseños, optimizando la relación costo-beneficio sin comprometer la seguridad estructural. La generación de matrices de decisión y recomendaciones técnicas basadas en análisis rigurosos representa una contribución directa para mejorar las prácticas de diseño sismorresistente en el contexto ecuatoriano y latinoamericano.

En cuanto a los objetivos de desarrollo sostenible, este proyecto contribuye directamente a:

- Objetivo de desarrollo sostenible 3 (Salud y Bienestar): Permitiendo que la infraestructura hospitalaria permanezca operativa después de sismos, protegiendo vidas y alcanzando la continuidad en servicios de salud esenciales para las comunidades más vulnerables.
- Objetivo de desarrollo sostenible 9 (Industria, Innovación e Infraestructura): Mediante la promoción de infraestructuras resilientes y la optimización de tecnologías innovadoras de protección sísmica, contribuyendo al desarrollo de construcciones sostenibles y seguras.
- Objetivo de desarrollo sostenible 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles): Fortaleciendo la resiliencia urbana ante desastres naturales, particularmente en zonas de alta sismicidad, y promoviendo la implementación de estándares de construcción que reduzcan significativamente el número de pérdidas humanas y económicas causadas por terremotos.

La optimización del diseño de sistemas de aislación sísmica no solo representa un avance técnico, sino una inversión estratégica en la resiliencia comunitaria y la sostenibilidad económica de la infraestructura crítica, alineándose perfectamente con los

compromisos internacionales de desarrollo sostenible y reducción del riesgo de desastres.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de uso de factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico de un hospital equipado con sistemas de aislación sísmica elastoméricos, mediante análisis no lineales de respuesta en el tiempo, cuantificando la influencia del sistema de aislación en parámetros críticos de desempeño sísmico estructural, generando recomendaciones de diseño conservadoras pero razonables.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son los siguientes:

- Efectuar análisis crítico de los procedimientos y requisitos de varias normativas internacionales vigentes, aplicables al diseño de sistemas de aislación sísmica.
- Desarrollar el diseño de los sistemas de aislación sísmica para una estructura hospitalaria considerando los distintos estándares de referencia disponibles.
- Efectuar análisis dinámico incremental a fin de la elaboración de curvas de fragilidad requeridas para la evaluación de desempeño sísmico de estructuras equipadas con aisladores sísmicos diseñados considerando los distintos niveles de seguridad de los estándares de referencia adoptados.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Fundamentos de aislación sísmica.

La ingeniería estructural contemporánea reconoce dos paradigmas fundamentales para enfrentar las solicitaciones sísmicas, siendo estas: el enfoque tradicional basado en resistencia y ductilidad, y el enfoque de control de respuesta mediante dispositivos especializados. El primer paradigma acepta implícitamente que la estructura experimentará daño durante eventos sísmicos severos, confiando en la capacidad de deformación inelástica de los elementos estructurales para disipar energía. En contraste, los sistemas de aislación sísmica representan una estrategia diferente, orientada a evitar el daño mediante la modificación de las características dinámicas del sistema estructural [13].

El principio físico que sustenta la aislación sísmica radica en la interposición de elementos de baja rigidez horizontal entre la cimentación y la superestructura. Esta configuración altera drásticamente el periodo fundamental de vibración del conjunto, desplazándolo hacia valores significativamente mayores que los de una estructura convencional de base fija [14]. Como consecuencia de este alargamiento de periodo, la demanda de aceleración espectral se reduce considerablemente, ya que los espectros de respuesta típicos presentan amplificaciones máximas en rangos de periodos cortos y medios, decreciendo hacia periodos largos [15].

La efectividad de esta tecnología se fundamenta en tres mecanismos simultáneos que operan de manera complementaria. Primero, la flexibilidad horizontal de los dispositivos permite concentrar la deformación lateral en el plano de aislación, limitando las deformaciones en la superestructura. Segundo, la mayoría de los aisladores incorporan mecanismos de disipación de energía, ya sea mediante comportamiento histerético de materiales elastoméricos o mediante dispositivos adicionales, como núcleos de plomo, lo que reduce las demandas de desplazamientos del sistema. Tercero, el desacoplamiento dinámico limita la transferencia de aceleraciones desde el suelo hacia

los niveles superiores, protegiendo tanto elementos estructurales como componentes no estructurales y equipamiento crítico [16]

2.1.2 Sistemas de aislación sísmica elastomérica.

Los aisladores elastoméricos constituyen la tipología más ampliamente utilizada en la práctica profesional internacional. Estos dispositivos se componen de láminas alternadas de elastómero vulcanizado y placas de acero, configuración que les confiere propiedades mecánicas altamente anisótropas como: elevada rigidez vertical para soportar cargas gravitacionales con deformaciones mínimas, combinada con elevada flexibilidad horizontal que permite acomodar grandes desplazamientos laterales [17].

Existen dos categorías principales dentro de esta familia de dispositivos [18]. Los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento utilizan caucho natural, proporcionando amortiguamiento inherente del orden del cuatro a cinco por ciento del crítico, como máximo. Los aisladores de alto amortiguamiento incorporan compuestos elastoméricos especialmente formulados con aditivos que incrementan la disipación de energía, alcanzando valores de amortiguamiento efectivo, típicamente, entre ocho y doce por ciento [19]. El comportamiento mecánico de estos elementos presenta características no lineales que deben ser adecuadamente representadas en los modelos analíticos [20]. La rigidez efectiva varía en función del nivel de deformación, velocidad de carga, número de ciclos y temperatura de operación. Adicionalmente estos dispositivos pueden exhibir efectos de primer ciclo, dependencia de la historia de carga y efectos de envejecimiento que pueden modificar sus propiedades a lo largo de la vida útil de la estructura [21].

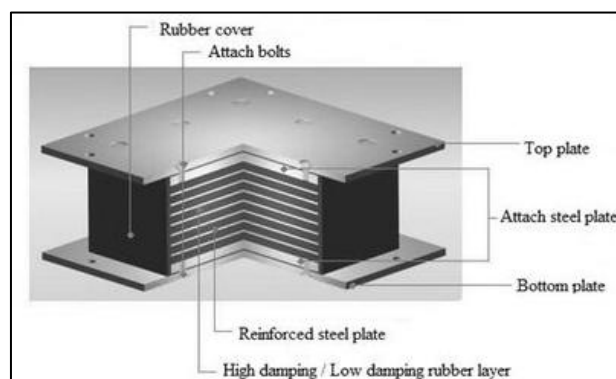


Figura 2.1 Componentes de un aislador sísmico elastomérico de bajo y alto amortiguamiento [22].

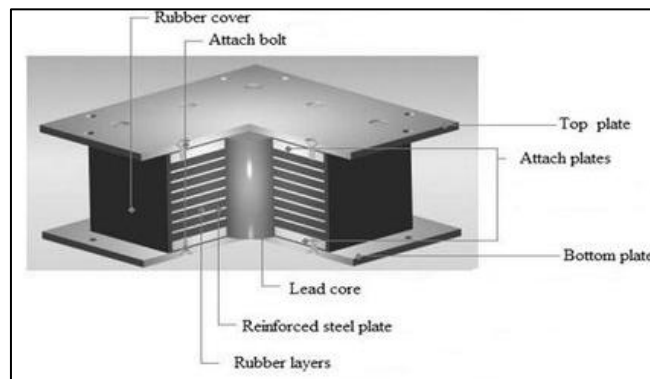


Figura 2.2 Componentes de un aislador sísmico elastomérico con núcleo de plomo [22].

2.1.3 Criterios normativos y factores de seguridad.

Las normativas internacionales que regulan el diseño de sistemas de aislación sísmica han evolucionado incorporando lecciones aprendidas de eventos sísmicos reales y resultados de investigaciones experimentales. Sin embargo, cada código refleja condiciones de sismicidad regional, tradiciones de diseño locales y niveles de conservadurismo que responden a contextos particulares [23]

El euro código 8 parte 2 [24] establece un marco metodológico basado en análisis dinámicos y criterios de desempeño explícitos. La normativa chilena [25] incorpora factores de seguridad específicos producto de la experiencia sísmica nacional, particularmente tras el terremoto de 2010. El código peruano [26] adapta principios internacionales al contexto sísmico andino. La normativa china GB 50011 [27] refleja décadas de investigación y aplicación extensiva de tecnologías de control sísmico.

Estas normativas difieren fundamentalmente en aspectos que influyen en el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos, los factores de seguridad aplicados a las cargas, los requisitos de desplazamiento de diseño y las metodologías de análisis prescritas [28]. Los factores de seguridad sobre las propiedades mecánicas de los aisladores varían típicamente entre valores unitarios y factores superiores a 1.5, reflejando diferentes niveles de incertidumbre asumidos respecto a la variabilidad de fabricación, efectos de envejecimiento y condiciones de servicio [29].

La Tabla 2.1 presenta una síntesis comparativa de los requisitos establecidos por los cuatro estándares internacionales para sistemas de aislación sísmica elastomérica considerados en este estudio.

Tabla 2.1 Parámetros de diseño de los aisladores elastoméricos.

Norma	NCh 2745:2013	NTE E.031	GB50011: 2016	Euro código 8
Factor de modificación por amortiguamiento β	$0.65 \geq B_M \geq 3.02$	$0.8 \geq B_M \geq 1.9$	$\beta = \eta_2 \left(\frac{T_{gm}}{T_1}\right)^\gamma$	-
Deformación inicial por retracción	$D_0=50\text{mm}$	-	-	-
Rigidez vertical	$k_z = \frac{E_c A}{H_r}$	-	-	$K_v = \frac{E_c A'}{h_r}$
Segundo factor de forma	-	-	$\frac{B}{h_r}$	-
Factor de modificación de propiedades	-	λ	-	λ
Módulo elástico	-	$E_0=fG$	-	-
Módulo de compresión	$\frac{1}{E_c} = \left(\frac{1}{6G_{ef}S^2} + \frac{4}{3K}\right)$	$E_c=E_0(1 + 2kS^2)$	-	$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E'_c} + \frac{1}{E_b}$
Fuerza de restitución lateral	$F(D_{TD}) - F(0.5D_{TD}) \geq 0.025W$	$F(D_M) - F(0.5D_M) \geq 0.025P$	-	-
Presión máxima de contacto	$\sigma_y \leq 18 \text{ MPa}$	-	$\sigma_y \leq 12 \text{ MPa}$	-
Deformación por corte debido a deformación	-	$\gamma_D = \frac{D_{TM}}{H_r} \leq 2.5$	-	$\varepsilon_{q,d} = \frac{V_{xy,d}}{T_q} \leq 1$
Deformación por corte debido a compresión	-	$\gamma_C = \frac{6PS}{E_c A_R}$	-	$\varepsilon_{c,d} = \frac{1.5F_{z,d}}{G A_R S}$
Deformación por corte debido a deformación angular	-	$\gamma_\theta = \frac{0.375D_e^2 \theta}{t_r H_r}$	-	$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \alpha_{a,d} + b'^2 \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum (t_i^3)}$

Deformación total por corte	$\gamma_{total} = \frac{0.85\varepsilon_u}{1.5}$	$\gamma_D + \gamma_C + 0.5\gamma_\theta \leq 6$	-	$\varepsilon_{t,d} \leq \frac{7}{\gamma_m}$
Límite de desplazamientos	-	-	$u_i = \min(0.55B, 3h_r)$	-
Capacidad de pandeo	-	$P_{cr} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} GS \frac{D_e}{Nt_r} A_R$	-	$P_{cr} = \frac{\lambda G A_r B S}{T_q}$
Estabilidad al volteo	-	-	-	$d_{bd} \leq \frac{1N_{Ed,min} a'}{\gamma_R (K_b T_b + N_{Ed,min})}$
Factor de seguridad estático	$FS \geq 3$	$FS \geq 3$	-	-
Factor de seguridad sísmico	$FS \geq 1$	$FS \geq 1$	-	-

El análisis comparativo de la Tabla 2.1 revela divergencias significativas en las aproximaciones metodológicas, niveles de prescripción y filosofías de diseño adoptadas. El factor de modificación del amortiguamiento presenta rangos considerablemente diferentes entre las normativas sudamericanas. La NCh 2745 admite el espectro más amplio de variación, mientras que la NTE E.031 establece límites más restrictivos. El código chino adopta una formulación, vinculando directamente el factor de amortiguamiento con la relación entre el período del modo de aislación y el período fundamental del primer modo. Esta diversidad refleja enfoques distintos para cuantificar la reducción espectral atribuible a la disipación de energía en los dispositivos.

Únicamente la normativa chilena prescribe explícitamente una deformación inicial por retracción que debe incorporarse en el dimensionamiento geométrico. Esta disposición responde a efectos de retracción de fraguado del hormigón, cuya omisión podría subestimar estados de tensión reales bajo cargas de servicio. La ausencia de este requisito en las demás normativas sugiere aproximaciones simplificadas o la consideración implícita dentro de márgenes de seguridad globales.

Tres de las cuatro normativas establecen expresiones para el cálculo de la rigidez vertical del aislador. La NCh 2745 define en su formulación variables como el módulo de compresión, área transversal y la altura total de goma. El eurocódigo 8 involucra el área

reducida para considerar efectos de forma. La NTE E.031 omite esta especificación, presumiblemente confiando en las propiedades certificadas por el fabricante. El código chino introduce adicionalmente el segundo factor de forma como parámetro de verificación geométrica, criterio ausente en los estándares sudamericanos y europeo, sin embargo, se verificará en todos los diseños.

Las aproximaciones al comportamiento constitutivo del material elastomérico difieren sustancialmente. La norma peruana define el módulo elástico inicial, en el que actúa un factor de corrección geométrica y el módulo de corte, estableciendo posteriormente el módulo de compresión en función del primer factor de forma. La NCh 2745 adopta una formulación inversa más compleja, incorporando tanto el módulo de corte efectivo como el módulo volumétrico. El eurocódigo en su formulación planteada, se diferencia la contribución del elastómero confinado y efectos de borde. El código chino introduce un factor de modificación de propiedades en su formulación.

Las normativas chilena y peruana coinciden conceptualmente al exigir que la diferencia de fuerza lateral entre el desplazamiento total de diseño y la mitad de dicho desplazamiento supere el 2.5% del peso sísmico. Este criterio garantiza rigidez post elástica suficiente para el recentrado del sistema tras la excitación sísmica. La ausencia de este requisito explícitamente en GB 50011 y eurocódigo 8 no implica necesariamente su omisión, pudiendo estar integrado en verificaciones de estabilidad o desempeño global.

Para aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), únicamente las normativas chilena y china establecen límites para la presión de contacto, existiendo una divergencia significativa, lo que significa diferencia en las consideraciones sobre degradación cíclica, efectos de temperatura y confiabilidad del mecanismo disipativo. El criterio más restrictivo del código chino podría derivar de experiencias con sismos de larga duración o condiciones climáticas extremas.

El tratamiento de las deformaciones por corte constituye quizás la diferencia más notable entre normativas. La NTE E.031 desagrega explícitamente tres componentes, estableciendo finalmente un límite combinado. El código chino adopta un enfoque similar en la deformación total por corte.

El eurocódigo 8 emplea notación y filosofía diferentes, definiendo deformaciones para corte por desplazamiento, para compresión vertical y para deformación angular, el límite

global introduce un factor parcial de material, característico del enfoque probabilístico europeo de estados límite.

Únicamente el código chino establece un límite explícito al desplazamiento admisible, condicionándolo al menor valor entre el 55% del diámetro efectivo del aislador y tres veces la altura total de goma. Este criterio dual controla simultáneamente la estabilidad geométrica y la capacidad de deformación del elastómero. La ausencia de límites análogos en las demás normativas transfiere esta verificación al diseñador mediante análisis de estabilidad y cumplimiento de deformaciones límite por corte.

Las normativas peruana y europea especifican expresiones para la carga crítica de pandeo del aislador. La NTE E.031 relaciona la capacidad con el módulo de corte, el primer factor de forma, el diámetro efectivo, el número de capas de goma y el área reducida. El eurocódigo incorpora un factor λ , el diámetro efectivo, el primer factor de forma y el espesor total de la goma. Aunque conceptualmente equivalentes, las diferencias en coeficientes numéricos y parámetros geométricos considerados generarán variaciones en los márgenes de seguridad calculados.

Los factores de seguridad prescriptivos para condiciones estáticas y sísmicas no exhiben variabilidad considerable. Para el estado estático, la NCh 2745 al igual que la NTE E.031 requieren un factor mayor o igual que tres, mientras que para las normativas china y europea se omite esta especificación directa, presumiblemente confiando en los coeficientes parciales de seguridad. Para la condición sísmica, Chile y Perú exigen un factor igual o mayor que uno, China y Europa nuevamente no especifica valores explícitos. Esta similitud en las normativas sudamericanas entre factores de seguridad refleja niveles similares de incertidumbre asumidos respecto a la variabilidad de propiedades bajo carga cíclica y efectos de envejecimiento.

Esta heterogeneidad normativa plantea desafíos significativos para la práctica profesional internacional particularmente para contextos como el ecuatoriano, donde no existe normativa específica de aislación sísmica. La adopción de un código u otro puede resultar en dimensionamientos sustancialmente diferentes para una misma estructura. Mientras algunas normativas como la NTE E.031 favorecen la prescripción detallada de verificaciones explícitas paso a paso, otras como el eurocódigo 8 prefieren un marco conceptual flexible.

Los niveles de conservadurismo también varían: el código chino tiende hacia criterios restrictivos en múltiples parámetros, mientras que la norma chilena incorpora consideraciones específicas derivadas de experiencia sísmica nacional.

El análisis comparativo de desempeño desarrollado en el capítulo 3 permitirá cuantificar cómo estas diferencias metodológicas y de conservadurismo se traducen en variaciones de respuesta estructural real, proporcionando evidencia empírica para orientar la selección de criterios apropiados en función de objetivos de desempeño específicos, limitaciones económicas y contexto sísmico.

2.1.4 Infraestructura hospitalaria y requisitos de desempeño.

Las edificaciones hospitalarias constituyen infraestructura esencial cuya operatividad posterior al sismo resulta crítica para la respuesta de emergencia y resiliencia comunitaria. A diferencia de estructuras convencionales donde se acepta daño estructural controlado, los hospitales requieren mantener funcionalidad inmediata tras eventos sísmicos, incluyendo la protección de equipamiento médico sensible y sistemas vitales [30].

Este nivel de desempeño extraordinario justifica la adopción de tecnologías avanzadas como la aislación sísmica. Los objetivos de diseño trascienden la simple prevención al colapso, abarcando la limitación de aceleraciones absolutas que puedan afectar equipos médicos, el control de derivas para prevenir daño en elementos no estructurales y la accesibilidad inmediata post evento [31].

2.1.5 Análisis dinámico incremental (IDA).

El análisis dinámico incremental es un método de análisis paramétrico que ha emergido en diversas formas para estimar de manera más exhaustiva el desempeño estructural bajo cargas sísmicas. Involucra someter un modelo estructural a uno o más registros sísmicos, cada uno escalado a múltiples niveles de intensidad, produciendo así una o más curvas de respuesta parametrizadas versus el nivel de intensidad [32].

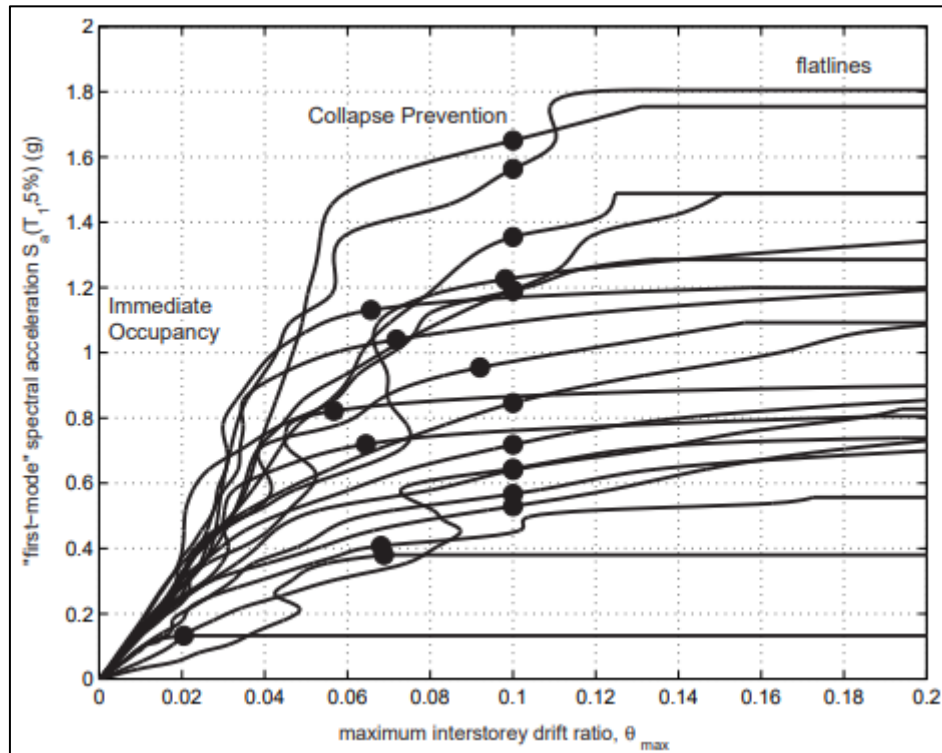


Figura 2.3 Curvas de análisis dinámico incremental [32].

La metodología IDA proporciona una caracterización completa del comportamiento estructural desde la respuesta elástica inicial hasta el colapso dinámico global. El uso del escalamiento de registros de aceleración sísmica para determinar la respuesta de una estructura a niveles crecientes de intensidad constituye una técnica establecida que permite forzar a la estructura a través de todo su rango de comportamiento, desde el comportamiento elástico hasta la inestabilidad dinámica global [32].

El procedimiento IDA típicamente emplea una medida de intensidad sísmica (IM) como la aceleración espectral en el periodo fundamental o la aceleración máxima del suelo, y un parámetro de demanda ingenieril (EDP) como la deriva máxima de entrepiso o la aceleración de piso. El IDA es presentado como una herramienta para evaluar la variabilidad de demanda y capacidad sísmica de modelos estructurales [33].

Para estructuras con sistemas de aislamiento sísmica, el IDA permite evaluar el desempeño considerando tanto la respuesta de los aisladores como de la superestructura [34]. Los parámetros críticos que pueden monitorearse incluyen: desplazamiento máximo del sistema de aislamiento, deformación por corte total en los aisladores, estabilidad del sistema de aislamiento, derivas de entrepiso en la superestructura, aceleraciones absolutas de piso y fuerzas en elementos estructurales. Esta información es fundamental para

verificar que los aisladores diseñados bajo diferentes criterios normativos cumplan con los estados límite establecidos [35].

2.1.6 Curvas de fragilidad sísmica.

Las curvas de fragilidad son representaciones gráficas que muestran la probabilidad de que una estructura experimente diferentes niveles de daño o deterioro bajo intensidades variables de movimiento del suelo. Son herramientas cruciales en la evaluación del riesgo sísmico, ayudando a comprender la vulnerabilidad de una estructura ante sismos [36]; [37].

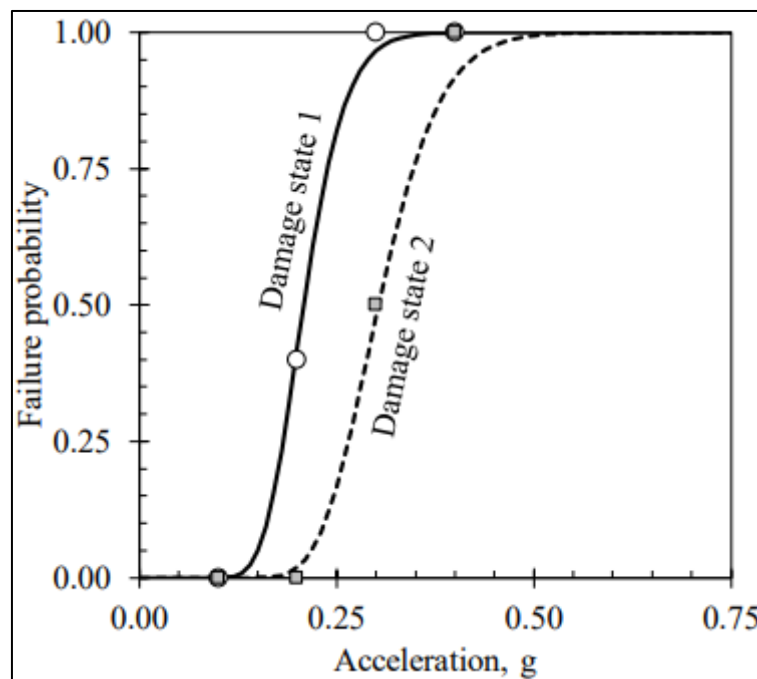


Figura 2.4 Curvas de fragilidad sísmica mostrando la probabilidad de exceder diferentes estados de daño en función de la aceleración espectral [38].

Las curvas de fragilidad se desarrollan relacionando la probabilidad de exceder un estado de daño específico con la severidad del movimiento del suelo, típicamente utilizando métricas como la aceleración máxima del suelo o la aceleración espectral [39]. Para desarrollar curvas de fragilidad, las demandas estructurales, las medidas de intensidad sísmica y las incertidumbres respecto a la demanda y capacidad deben ser definidas. Enfocándose en el desarrollo de curvas de fragilidad analíticas, procedimientos de análisis dinámico no lineal deben ser ejecutados [40].

El marco de Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño (PBEE) ofrece un enfoque más detallado al integrar al análisis de amenaza, análisis de respuesta estructural, análisis de

daños y análisis de pérdidas. Las curvas de fragilidad vinculan la respuesta estructural con los estados de daño, proporcionando insumos para los modelos de consecuencias y la toma de decisiones [41].

Existen diversos enfoques para generar curvas de fragilidad: métodos empíricos basados en datos de daños observados post sismo, métodos analíticos que emplean modelos de elementos finitos y análisis no lineales, métodos de juicio experto y métodos híbridos que combinan información de múltiples fuentes [38]. Los procedimientos de análisis dinámico no lineal pueden ser ejecutados para generar muestras de pares EDP-IM [40].

Para estructuras con aislación sísmica, las curvas de fragilidad pueden desarrollarse considerando múltiples estados límite relevantes tanto para el sistema de aislación como para la superestructura [42]. Estos estados límite pueden incluir: inicio de daño en aisladores, excedencia de desplazamientos/fuerzas de diseño, inicio de fluencia en elementos estructurales, daño moderado en componentes no estructurales, y pérdida de funcionalidad operacional [43].

La integración del IDA con el desarrollo de curvas de fragilidad permite cuantificar la probabilidad condicional de que una estructura equipada con aisladores sísmicos elastoméricos exceda diversos estados de daño para diferentes niveles de intensidad sísmica [44].

El uso combinado de IDA y curvas de fragilidad en el contexto de estructuras aisladas sísmicamente permite evaluar cómo los diferentes factores de seguridad normativos impactan la probabilidad de excedencia de estados límite críticos. Esta información resulta fundamental para establecer criterios técnicamente fundamentados que balanceen seguridad estructural, desempeño operacional y viabilidad económica en el diseño de infraestructura hospitalaria esencial [45].

2.2 Marco metodológico

El presente estudio adopta un enfoque metodológico cuantitativo basado en análisis numérico avanzado, con el objetivo de evaluar de manera rigurosa el efecto de los factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico de un hospital de mediana altura equipado con un sistema de aislación sísmica elastomérico. La metodología se estructura en fases secuenciales e integradas, que comprenden desde la caracterización

inicial de la estructura hasta el modelado estructural detallado y el análisis dinámico no lineal.

La investigación se centra en un edificio hospitalario de pórticos de hormigón armado, conformado por varios vanos en la dirección longitudinal y vanos en la transversal, con cierta separación en ambas direcciones. La estructura presenta cierta altura en los diferentes niveles. Todos los elementos estructurales serán modelados con sus propiedades nominales.

Inicialmente, se desarrollará un modelo tridimensional de elementos finitos de la estructura con base fija utilizando el software gratuito de análisis no lineal. Este modelo permitirá caracterizar el comportamiento dinámico fundamental de la estructura a través de un análisis modal, identificando sus periodos naturales, formas modales y factores de participación de masa. Análisis modal espectral será considerado para diseñar el sistema de aislación sísmica de la estructura.

Posteriormente, se procederá a efectuar análisis no lineal de respuesta en el tiempo. Para ello, se seleccionará un conjunto de registros sísmicos representativos de la amenaza sísmica del sitio, los que serán utilizados para efectuar análisis dinámico incremental. Los resultados de este análisis se procesarán para obtener curvas de fragilidad en función de la aceleración máxima del terreno, estableciendo así una línea base de vulnerabilidad del sistema de aislación para la estructura analizada.

La fase central de la metodología consiste en el diseño e implementación del sistema de aislación sísmica de base. Se optará por una solución basada en aisladores elastoméricos con y sin núcleo de plomo (LRB/RB), seleccionando un máximo de cuatro tipos distintos para su distribución en planta. El diseño de los aisladores se realizará siguiendo un enfoque comparativo, aplicando los factores de seguridad y requisitos específicos estipulados en normativas internacionales clave, como el Eurocódigo 8, la norma chilena NCh2745, el código peruano E.031 y la normativa china GB 50011.

Para cada normativa, se calcularán las propiedades mecánicas nominales de los aisladores, incluyendo rigideces efectivas, amortiguamiento equivalente y capacidades de carga y desplazamiento. El dimensionamiento geométrico se llevará a cabo verificando parámetros críticos como los factores de forma, la deformación máxima por corte y la presión de contacto admisible según cada código. Se elaborarán planos detallados a escala de los dispositivos resultantes. La demanda sísmica para el diseño

del sistema de aislación se basará en el sismo máximo considerado para el sitio, definiendo un nivel de amortiguamiento objetivo y un desplazamiento total máximo del sistema de aislación.

Una vez diseñados los aisladores, se modificará el modelo en el software gratuito de análisis no lineal para incorporar el sistema de aislación en la base de la estructura. Los aisladores se modelarán utilizando elementos link no lineales con propiedades histeréticas bilineales, capturando así su comportamiento real bajo carga cíclica. Se ejecutarán análisis dinámico incremental de la estructura aislada, sometiéndola al mismo conjunto de registros sísmicos utilizados para la estructura de base fija.

La evaluación final consistirá en una comparación sistemática de las curvas de fragilidad asociadas a los parámetros de respuesta de la estructura con base fija versus la estructura aislada. Se contrastarán curvas de fragilidad para derivas de entrepiso, aceleraciones de piso y fluencia de la estructura. Adicionalmente, se analizarán y compararán las curvas de fragilidad desarrolladas para ambos escenarios (base fija y aislada), cuantificando la reducción en la probabilidad de excedencia de los estados límite gracias al sistema de aislación. Finalmente, se analizará cómo las diferencias en los factores de seguridad normativos aplicados en el diseño de los aisladores se traducen en variaciones en los parámetros de desempeño estructural antes mencionados, permitiendo establecer correlaciones cuantitativas y generar recomendaciones técnicas fundamentadas para la práctica profesional.

2.2.1 Solución por diseñar

La solución metodológica propuesta para abordar la problemática identificada se estructura en cinco fases que permitirán evaluar cuantitativamente el efecto de uso de los factores de seguridad normativos en el desempeño sísmico de infraestructura crítica con aislación sísmica elastomérica.

2.2.1.1 Caracterización de la estructura de referencia

Se modelará un edificio hospitalario tipo de mediana altura, de 10 pisos, sin sótanos, con sistema estructural de pórticos de hormigón armado. La estructura será modelada mediante software especializado, incorporando propiedades nominales de sus materiales según normas vigentes. Se realizará un análisis modal para caracterizar su

comportamiento dinámico fundamental y un análisis modal espectral para establecer la línea de base de desempeño convencional.

2.2.1.2 Diseño comparativo de sistemas de aislación.

Se diseñará sistemas de aislación sísmica elastomérica aplicando los requisitos y factores de seguridad de cuatro normativas y estándares internacionales: euro código 8 Parte 2, Norma Chilena NCh2745, Código Peruano E.031, y Norma China GB 50011. Para cada código se determinarán las propiedades mecánicas y dimensiones geométricas de aisladores elastoméricos, verificando parámetros críticos como diámetro total del aislador, altura total, desplazamiento de diseño, entre otros.

2.2.1.3 Modelación no lineal y análisis dinámico incremental.

Los aisladores diseñados serán implementados en el modelo estructural mediante elementos enlace con comportamiento histerético bilineal, modelados según las propiedades calculadas en la fase previa. Se ejecutarán análisis dinámicos no lineales de respuesta en el tiempo utilizando un conjunto de 22 pares de registros sísmicos reales. La selección de los registros responde a criterios específicamente orientados a la evaluación de sistemas de aislación sísmica: magnitud de momento $M_w \geq 7.5$ y alto contenido energético en el rango de períodos de 3 a 5 segundos, intervalo que abarcará los períodos efectivos del sistema de aislación diseñado bajo las cuatro normativas evaluadas. Este criterio garantiza que los registros sean capaces de excitar el sistema en su rango de respuesta dominante, evitando la subestimación de las demandas sobre los aisladores que resultaría del empleo de registros con bajo contenido espectral en períodos largos. El escalamiento de los registros se realizará conforme a los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción del año 2015 (NEC-15).

2.2.1.4 Evaluación probabilística de desempeño.

Con los resultados del IDA se construirán curvas de fragilidad analíticas para el sistema de aislación sísmica, adoptando como estado límite de evaluación la excedencia del Factor de Utilización unitario ($FU \geq 1$), definido como el cociente entre la demanda de deformación por corte del aislador y su capacidad normativa máxima admisible. Este criterio refleja directamente el agotamiento de la capacidad de deformación del dispositivo según cada marco normativo analizado, sin extender la evaluación al comportamiento de la superestructura ubicada sobre la interfaz de aislación. Las curvas

de fragilidad se ajustarán mediante distribuciones log normales, cuantificando la mediana y desviación estándar logarítmica.

2.2.1.5 Análisis comparativo y generación de recomendaciones.

Se realizará un análisis comparativo sistemático entre las curvas de fragilidad obtenidas para cada configuración normativa, cuantificando las diferencias en probabilidad de excedencia de estados límite. Adicionalmente, se evaluará la eficiencia económica mediante un análisis costo-beneficio que relacione el incremento dimensional de los aisladores en términos de volumen con la reducción en vulnerabilidad sísmica. Los resultados permitirán establecer recomendaciones técnicas fundamentadas para la selección apropiada de criterios normativos en función de objetivos de desempeño específicos y restricciones presupuestarias.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Características de los sistemas de aislación diseñados

Se diseñaron cuatro configuraciones de sistemas de aislación sísmica aplicando los requisitos y factores de seguridad establecidos por las normativas Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011. Cada configuración emplea cuatro tipos distintos de aisladores elastoméricos designados como A, B, C y D distribuidos en planta según los niveles de carga vertical que deben soportar. El sistema comprende un total de 163 dispositivos: 95 unidades tipo A, 38 tipo B, 13 tipo C y 17 tipo D.

Las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 presentan las propiedades geométricas y mecánicas de los aisladores diseñados bajo el Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011 respectivamente.

Tabla 3.2 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con Eurocódigo 8.

Propiedades	Simbología	Tipo				Unidad
		A	B	C	D	
Número de aisladores	N	95	38	13	17	-
Diámetro exterior	D_e	1160	1160	1160	1160	mm
Diámetro interior	D_i	50	340	50	250	mm
Espesor de la capa de goma	t_r	9	8	8	8	mm
Número de capas de goma	n_r	43	48	48	48	-
Altura del elastómero	h_r	387	384	384	384	mm
Primer factor de forma	S	31.17	35.06	35.06	35.06	-
Módulo de compresión	E_c	1076.74	1192.20	1192.20	1192.20	MPa
Rigidez vertical	k_z	279956	284276	312398	297479	Tonf/m

Rigidez post fluencia	k_d	111.18	102.61	112.05	107.04	Tonf/m
Rigidez inicial	k_u	1111.8	1026.13	1120.49	1070.43	Tonf/m
Resistencia característica	Q_d	0	74.07	0	40.04	Tonf
Rigidez efectiva	k_{eff}	118.18	228.37	112.05	175.03	Tonf/m
Amortiguamiento efectivo	β	0	30.3	0	23	%
Capacidad de carga	P_{cr}	5054.21	5247.86	5730.41	5474.41	Tonf
Deformación por corte	γ	2.9	2.69	2.39	2.27	-
Peso sísmico de la estructura	W	101380.3				Tonf
Período efectivo	T_{eff}	4.152				segundos
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	14				%
Volumen del sistema de aislación	V	104.2				m ³
Desplazamiento de diseño	D_{TM}	73.28				cm

Tabla 3.3 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con NCh 2745.

Propiedades	Simbología	Tipo				Unidad
		A	B	C	D	
Número de aisladores	N	95	38	13	17	-
Diámetro exterior	D_e	1360	1260	1160	1050	mm
Diámetro interior	D_i	50	370	220	270	mm
Espesor de la capa de goma	t_r	8	8	7	7	mm
Número de capas de goma	n_r	52	49	52	47	-

Altura del elastómero	h_r	416	392	364	329	mm
Primer factor de forma	S	42.5	39.38	41.43	37.5	-
Módulo de compresión	E_c	1114.40	1069.04	1099.59	1038.46	MPa
Rigidez vertical	k_z	396283	316851	313836	260274	Tonf/m
Rigidez post fluencia	k_d	142.24	118.56	114.17	100.25	Tonf/m
Rigidez inicial	k_u	1422.41	1185.55	1141.65	1002.54	Tonf/m
Resistencia característica	Q_d	0	87.71	31.01	46.71	Tonf
Rigidez efectiva	k_{eff}	142.24	271.2	168.13	181.54	Tonf/m
Amortiguamiento efectivo	β	0	30.7	19.4	25.9	%
Capacidad de carga	P_{cr}	3167.61	1971.03	1528.95	824.07	Tonf
Deformación por corte	γ	3.03	2.95	2.91	2.9	-
Peso sísmico de la estructura	W	101380.3				Tonf
Período efectivo	T_{eff}	3.746				Segundos
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	15.1				%
Volumen del sistema de aislación	V	136.1				m ³
Desplazamiento de diseño	D_{TM}	73.52				cm

Tabla 3.4 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con NTE E.031.

Propiedades	Simbología	Tipo				Unidad
		A	B	C	D	
Número de aisladores	N	95	38	13	17	-
Diámetro exterior	D_e	1360	1260	1160	1050	mm

Diámetro interior	D_i	50	330	280	310	mm
Espesor de la capa de goma	t_r	8	8	7	7	mm
Número de capas de goma	n_r	53	52	54	49	-
Altura del elastómero	h_r	424	416	378	343	mm
Primer factor de forma	S	42.5	39.38	41.43	37.5	-
Módulo de compresión	E_c	4047.6	3474.48	3846.17	3451.6	MPa
Rigidez vertical	k_z	1412184	989111	1032645	740588	Tonf/m
Rigidez post fluencia	k_d	139.56	113.87	107.39	94	Tonf/m
Rigidez inicial	k_u	1395.58	1138.72	1073.95	939.95	Tonf/m
Resistencia característica	Q_d	0	69.77	50.23	61.57	Tonf
Rigidez efectiva	k_{eff}	139.56	235.57	195.01	201.39	Tonf/m
Amortiguamiento efectivo	β	0	29	26	29.6	%
Capacidad de carga	P_{cr}	3224.82	1978.61	1519.18	831.97	Tonf
Deformación por corte	γ	3.77	4.08	3.91	4.72	-
Peso sísmico de la estructura	W	101380.3				Tonf
Período efectivo	T_{eff}	3.806				Segundos
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	15.2				%
Volumen del sistema de aislación	V	139.63				m ³
Desplazamiento de diseño	D_{TM}	71.87				cm

Tabla 3.5 Propiedades de aisladores elastoméricos diseñados con GB 50011.

Propiedades	Simbología	Tipo				Unidad
		A	B	C	D	
Número de aisladores	N	95	38	13	17	-
Diámetro exterior	D_e	1550	1450	1260	1160	mm
Diámetro interior	D_i	260	50	280	290	mm
Espesor de la capa de goma	t_r	8	8	8	7	mm
Número de capas de goma	n_r	47	44	50	53	-
Altura del elastómero	h_r	376	352	400	371	mm
Primer factor de forma	S	45.85	44.07	36.18	37.39	-
Módulo de compresión	E_c	5045.96	4661.13	3142.03	3356.03	MPa
Rigidez vertical	k_z	2509536	2227084	949438	913919	Tonf/m
Rigidez post fluencia	k_d	198.93	191.12	120.87	108.93	Tonf/m
Rigidez inicial	k_u	1989.34	1911.2	1208.69	1089.29	Tonf/m
Resistencia característica	Q_d	43.31	0	50.23	53.88	Tonf
Rigidez efectiva	k_{eff}	274.14	191.12	208.09	202.5	Tonf/m
Amortiguamiento efectivo	β	16.7	0	24.5	26.6	%
Capacidad de carga	P_{cr}	16122.52	13930.93	6331.66	5451.01	Tonf
Límite de desplazamiento	u	831.6	776.6	672.1	617.1	mm
Peso sísmico de la estructura	W	101380.3				Tonf
Período efectivo	T_{eff}	3.216				Segundos
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	15				%

Volumen del sistema de aislación	V	164.47	m ³
Desplazamiento de diseño	D_{TM}	66.23	cm

Los diámetros exteriores de los aisladores tipo A variaron entre 1160 mm (Eurocódigo 8) y 1550 mm (GB 50011), representando una diferencia del 33.6%. Para los aisladores tipo B, los diámetros oscilaron entre 1160 mm (Eurocódigo 8) y 1450 mm (GB 50011), con una variación del 25%. Los tipo C presentaron diámetros entre 1160 mm para las normativas sudamericanas y europea, alcanzando 1260 mm la normativa china. Los aisladores tipo D mostraron diámetros desde 1050 mm (NCh 2745 y NET E.031) hasta 1160 mm (GB 50011 y Eurocódigo 8).

La altura total del elastómero exhibió variaciones significativas entre normativas. Para el tipo A, osciló entre 376 mm (GB 50011) y 424 mm (NTE E.031). El tipo B presentó alturas entre 352 mm (GB 50011) y 416 mm (NTE E.031). Los tipo C y D mostraron rangos de 364-400 mm y 329-371 mm respectivamente. El espesor de las capas individuales de goma se mantuvo entre 7 y 9 mm para todas las configuraciones, mientras que el número de capas varió entre 43 y 54 capas según el tipo de aislador y normativa aplicada.

El primer factor de forma presentó valores entre 31.17 y 45.85. los diseños según GB 50011 alcanzaron factores de forma más elevados, mientras que el Eurocódigo 8 generó los valores más bajos. Este parámetro influye directamente en la rigidez vertical y capacidad de carga del dispositivo.

El módulo de compresión exhibió diferencias sustanciales entre normativas, atribuibles a las formulaciones constitutivas adoptadas por cada código. Para el tipo A, los valores oscilaron entre 1076.74 MPa (Eurocódigo 8) y 5045.96 MPa (GB 50011), representando una diferencia del 368%. Esta disparidad refleja las distintas aproximaciones teóricas al comportamiento del elastómero confinado implementadas en cada normativa.

La rigidez vertical presentó variaciones concordantes con los módulos de compresión. Los diseños según GB 50011 alcanzaron rigideces verticales más elevadas, mientras que el Eurocódigo 8 generó menores rigideces. Esta diferencia evidencia enfoques de diseño fundamentalmente distintos respecto al control de deformaciones verticales bajo carga gravitacional.

La rigidez post fluencia, parámetro que gobierna la capacidad de recentrado del sistema de aislación, mostró valores entre 94 Tonf/m (NTE E.031) y 198.93 Tonf/m (GB 50011). La rigidez inicial, que caracteriza el comportamiento elástico previo a la fluencia del núcleo de plomo, varió entre 939.95 Tonf/m (NTE E.031) y 1989.34 Tonf/m (GB 50011). La resistencia característica, asociada a la fuerza de fluencia del núcleo de plomo, presentó valores nulos para aisladores sin núcleo de plomo. Para los dispositivos con núcleo de plomo, osciló entre 31.01 Tonf (NCh 2745) y 87.71 Tonf (NCh 2745).

La rigidez efectiva, parámetro fundamental para el análisis sísmico del sistema de aislación, varió entre 112.05 Tonf/m (Eurocódigo 8) y 274.14 Tonf/m (GB 50011). El amortiguamiento efectivo alcanzó valores hasta 30.7% (NCh 2745), cumpliendo el objetivo de incrementar la disipación de energía mediante el comportamiento histerético del plomo.

La capacidad crítica de pandeo presentó variaciones significativas. Los diseños según GB 50011 alcanzaron las capacidades más elevadas, mientras que la NCh 2745 generó valores menores. Esta diferencia refleja tanto las distintas formulaciones para el cálculo de la carga crítica.

La deformación por corte, indicador del nivel de sollicitación del elastómero. Todos los diseños cumplieron con los límites establecidos por sus respectivas normativas.

Estas diferencias evidencian que la selección de la normativa de diseño impacta significativamente las propiedades del sistema de aislación.

3.1.2 Resultados del análisis dinámico incremental (IDA).

El análisis dinámico incremental se aplicó a las cuatro configuraciones normativas utilizando un conjunto de 22 pares de registros sísmicos con magnitud de momento $M_w \geq 7.5$, seleccionados por su alto contenido energético en el rango de períodos de 3 a 5 segundos. Este criterio de selección es consistente con los períodos efectivos del sistema de aislación obtenidos bajo las cuatro normativas que oscilan entre 3.216 s (GB 50011) y 4.152 s (Eurocódigo 8), asegurando que los registros empleados sean capaces de inducir demandas representativas sobre los aisladores en su rango de período dominante. La elección de sismos de magnitud elevada responde adicionalmente a la relevancia de eventos de subducción de gran magnitud, los cuales generan duraciones de sacudida y contenidos espectrales en períodos largos que los sismos de menor magnitud no producen adecuadamente. El tamaño del conjunto de 22 pares, superior al

mínimo normativo, garantiza una estimación estadísticamente robusta de los parámetros de la distribución log normal θ y β , reduciendo la sensibilidad de los resultados a la selección particular de los registros individuales. Para cada normativa se evaluaron ocho aisladores, correspondientes a los dos dispositivos de mayor demanda de compresión y de tensión de cada tipo (A, B, C y D), siendo los tipo A los que soportan las cargas verticales más elevadas y los tipo D los de menor sollicitación. El parámetro de demanda ingenieril adoptado es el factor de utilización (FU), definido como la relación entre la demanda sísmica instantánea sobre el aislador y su capacidad de diseño según la normativa correspondiente. El estado límite de interés se alcanza cuando $FU=1$. La medida de intensidad sísmica utilizada es la aceleración máxima del terreno (PGA). A partir de los resultados del IDA se determinaron los parámetros de la distribución log normal asociada: la mediana (θ), que representa el nivel de PGA para el cual el 50% de los registros producen una excedencia del estado límite, y la desviación estándar logarítmica (β), que cuantifica la dispersión de la respuesta ante la variabilidad del conjunto de registros sísmicos empleados.

Las figuras 3.1 a 3.4 presentan las curvas IDA para los ocho aisladores críticos en cada configuración normativa. En todas las figuras, el eje horizontal corresponde al factor de utilización y el eje vertical a la PGA en unidades de gravedad. Cada trazo representa la respuesta de un aislador específico ante un registro sísmico individual escalado a múltiples niveles de intensidad. La leyenda de cada gráfica indica los valores de la mediana y desviación estándar logarítmica correspondientes al conjunto de registros para ese tipo de aislador.

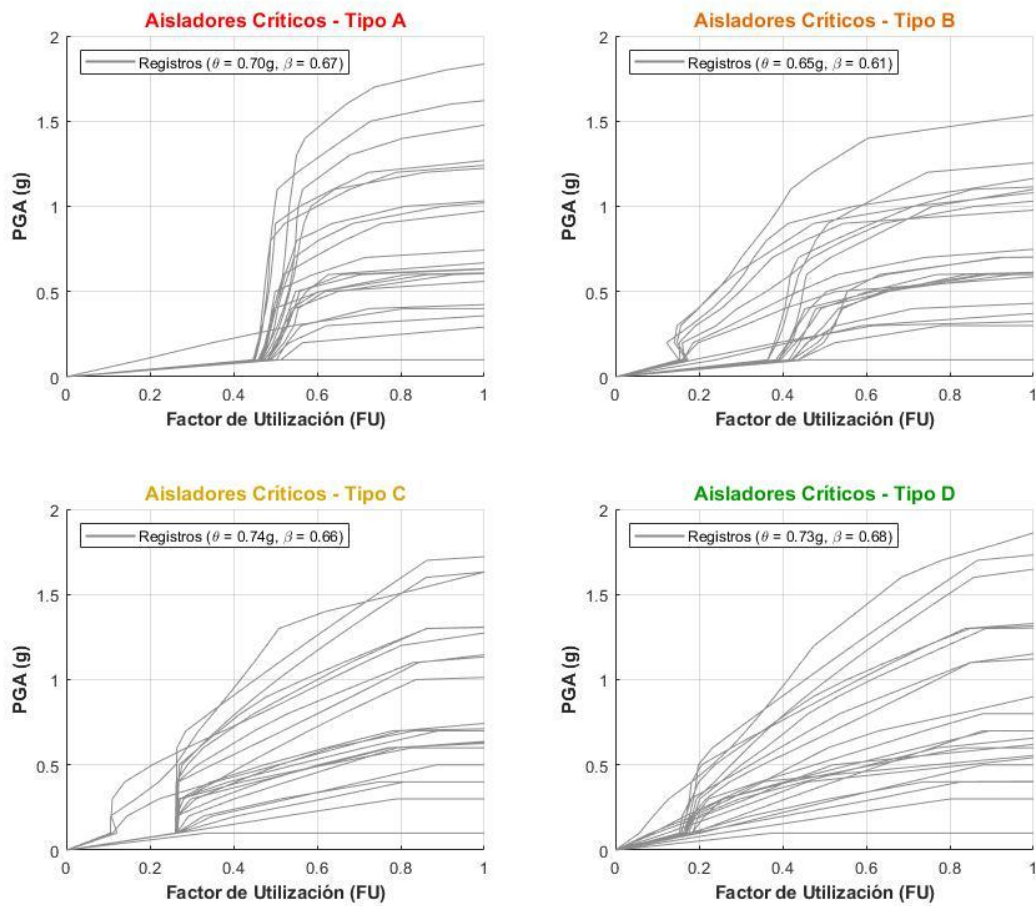


Figura 3.1 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según Eurocódigo 8.

Los aisladores diseñados bajo el Eurocódigo 8 exhiben una respuesta relativamente homogénea entre tipos, con medianas que oscilan entre 0.65g (Tipo B) y 0.74g (Tipo C). El tipo B representa el aislador más vulnerable de esta configuración, con $\theta = 0.65g$ y $\beta = 0.61$. Los tipos C y D presentan medianas de 0.74g y 0.73g respectivamente, lo que indica una capacidad sísmica superior. El tipo A, con $\theta = 0.70g$ y $\beta = 0.67$, ocupa una posición intermedia. La dispersión β , que varía entre 0.61 y 0.68, refleja un nivel moderado de incertidumbre en la respuesta, coherente con la variabilidad esperada ante diferentes contenidos de frecuencias de los registros sísmicos. La forma de las curvas IDA muestra una transición gradual desde el rango elástico hacia la excedencia del estado límite, sin pendientes abruptas que indican inestabilidad dinámica prematura.

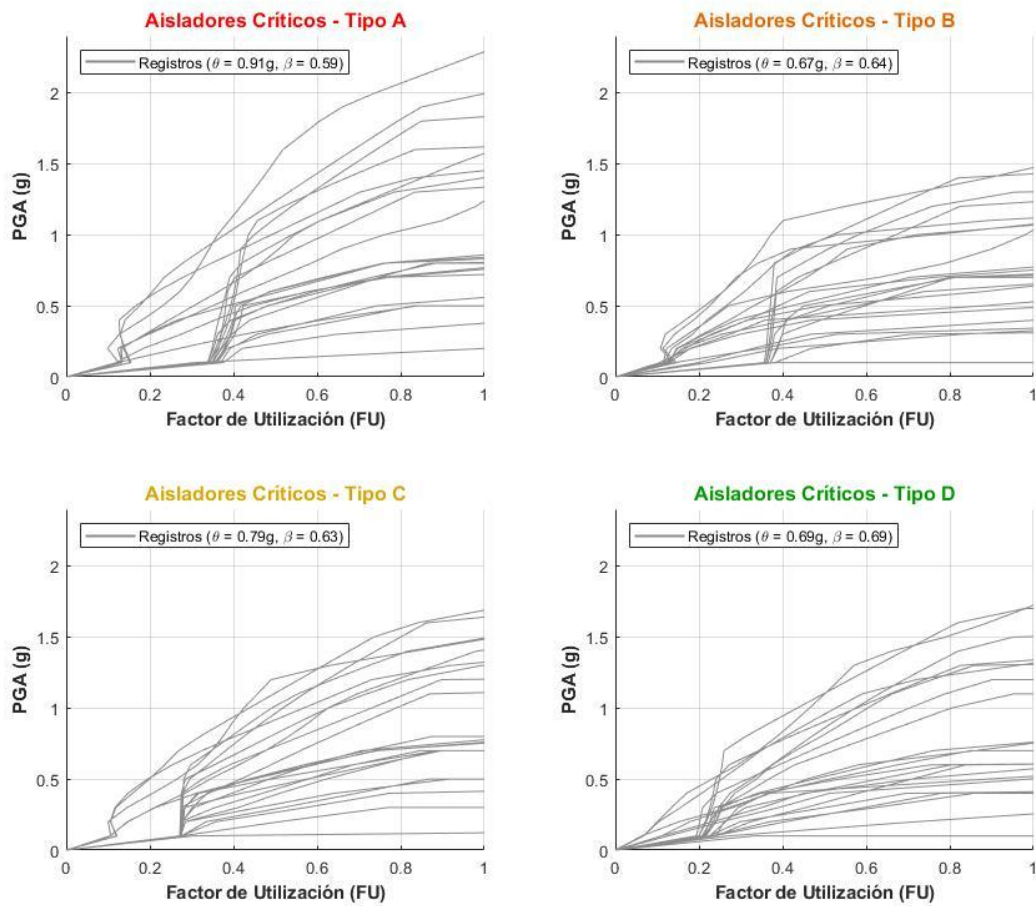


Figura 3.2 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según NCh 2745.

La configuración basada en la normativa chilena presenta los valores de mediana más elevados para los aisladores tipo A y C: $\theta = 0.91g$ y $\theta = 0.79g$ respectivamente, lo que evidencia una mayor capacidad ante intensidades sísmicas elevadas para los dispositivos de mayor carga vertical. Sin embargo, los aisladores tipo B y D demuestran medianas de $0.67g$ y $0.69g$, considerablemente inferiores a las del tipo A. La diferencia de 35.8% entre la mediana del tipo A y el tipo B constituye la mayor disparidad interna entre tipos observada en las cuatro configuraciones normativas. Este resultado sugiere que el diseño bajo NCh 2745, si bien optimiza la capacidad de los aisladores más cargados en compresión mediante sus factores de seguridad estáticos, puede generar una distribución menos uniforme de capacidades entre los distintos tipos de dispositivos. Los valores de β para esta configuración son comparables a los de las demás

normativas, con un mínimo de 0.59 para el tipo A, indicando que la mayor capacidad de este tipo va acompañada de menor dispersión relativa.

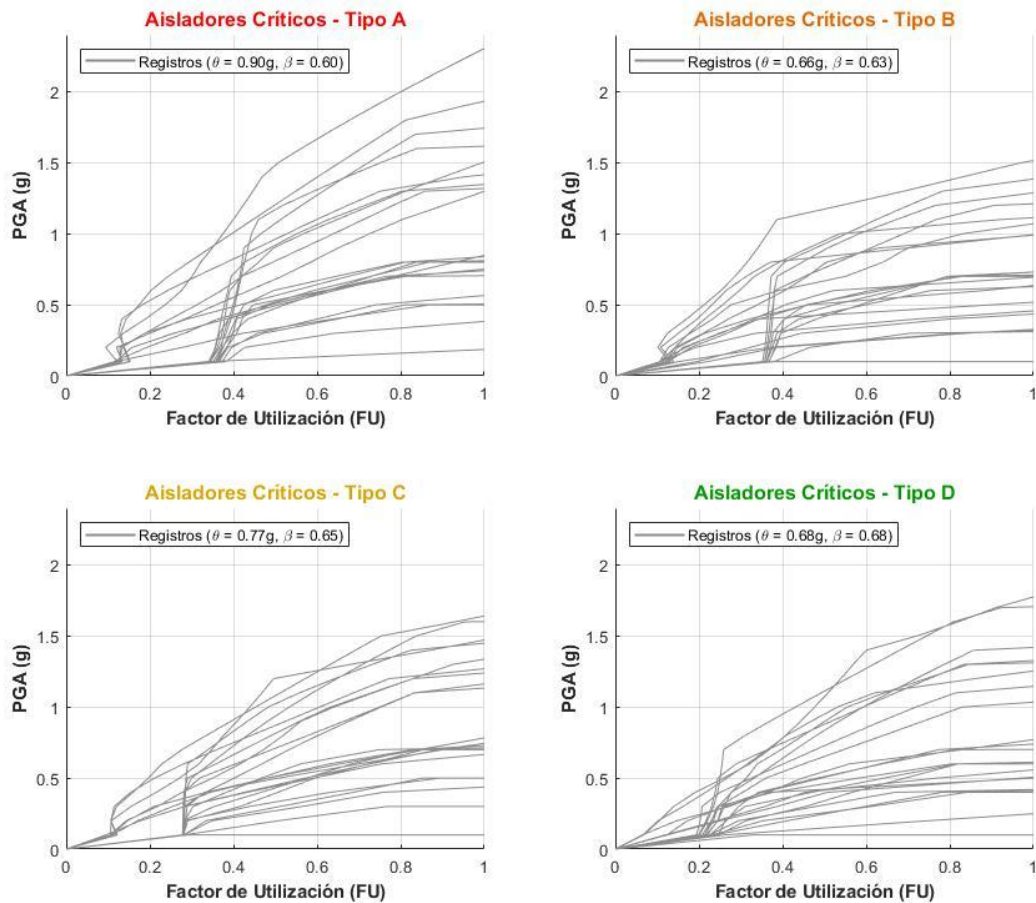


Figura 3.3 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según NTE E.031.

Los resultados del IDA para la normativa peruana guardan notable similitud con los de NCh 2745, en correspondencia con las similitudes dimensionales y metodológicas observadas en el diseño. Las medianas son: tipo A con $\theta = 0.90g$, tipo B con $\theta = 0.66g$, tipo C con $\theta = 0.77g$ y tipo D con $\theta = 0.68g$. La diferencia entre la configuración chilena y peruana no supera 1.5% en ningún tipo de aislador, confirmando la convergencia entre ambas normativas. El tipo B nuevamente es el más vulnerable, con una mediana prácticamente idéntica a la del Eurocódigo 8. Los valores de dispersión oscilan entre $\beta = 0.60$ y $\beta = 0.68$, sin diferencias significativas respecto a las demás configuraciones. La semejanza en los resultados probabilísticos de NTE E.031 y NCh 2745 constituye

evidencia de que ambas normativas, pese a sus diferencias formales, conducen a niveles de seguridad sísmica estadísticamente equivalentes en el estado límite de los aisladores.

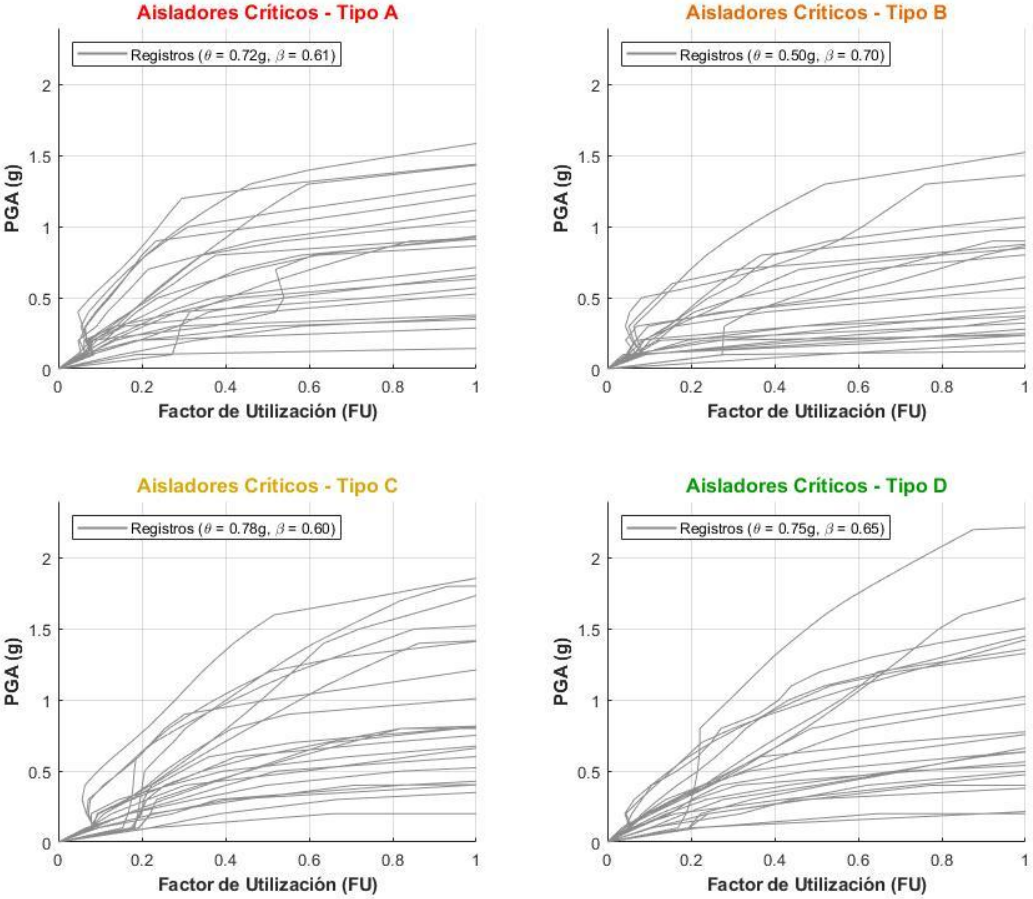


Figura 3.4 Curvas IDA de aisladores sísmicos obtenidas según GB 50011.

La configuración basada en la normativa china presenta el resultado más diferenciado. El tipo B exhibe una mediana de $\theta = 0.50g$, la más baja de todas las configuraciones y tipos analizados, con una dispersión $\beta = 0.70$ que es también la más elevada registrada en el estudio. Los demás tipos muestran medianas de $0.72g$ (tipo A), $0.75g$ (tipo C) y $0.75g$ (tipo D), valores comparables o superiores a los de las demás normativas. La diferencia entre la mediana del tipo C y la del tipo B alcanza el 56%, constituyendo la mayor disparidad interna registrada en el análisis. Esta heterogeneidad en la capacidad entre tipos es llamativa dado que GB 50011 generó el sistema dimensionalmente más robusto, con el mayor volumen total y los diámetros más elevados.

La explicación de este comportamiento reside en una característica del diseño GB 50011: el aislador tipo B se diseñó sin núcleo de plomo (resistencia característica nula), a diferencia de las demás normativas en las que el tipo B incorpora núcleo de plomo. La ausencia de este mecanismo histerético implica que el tipo B bajo GB 50011 depende exclusivamente del amortiguamiento intrínseco del elastómero, sin disipación adicional de energía. Ante niveles de intensidad sísmica crecientes, la falta de comportamiento histerético se traduce en desplazamientos acumulados mayores, alcanzando el estado límite de utilización a PGA menores. La dispersión $\beta=0.70$, considerablemente superior a la de los demás casos, refleja la mayor sensibilidad de un sistema puramente elastomérico a las características espectrales individuales de cada registro.

3.1.3 Curvas de fragilidad.

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de excedencia del estado límite de utilización ($FU \geq 1$) en función del nivel de PGA, ajustadas mediante distribución log normales con los parámetros θ y β obtenidos del IDA. La figura 3.5 presenta una comparación directa de las curvas de fragilidad para las cuatro configuraciones normativas, donde cada curva corresponde al aislador que primero alcanza el estado límite en cada diseño. En todos los casos, el aislador crítico que define la fragilidad del sistema es el tipo B, siendo éste el elemento que presenta la menor mediana en cada configuración.

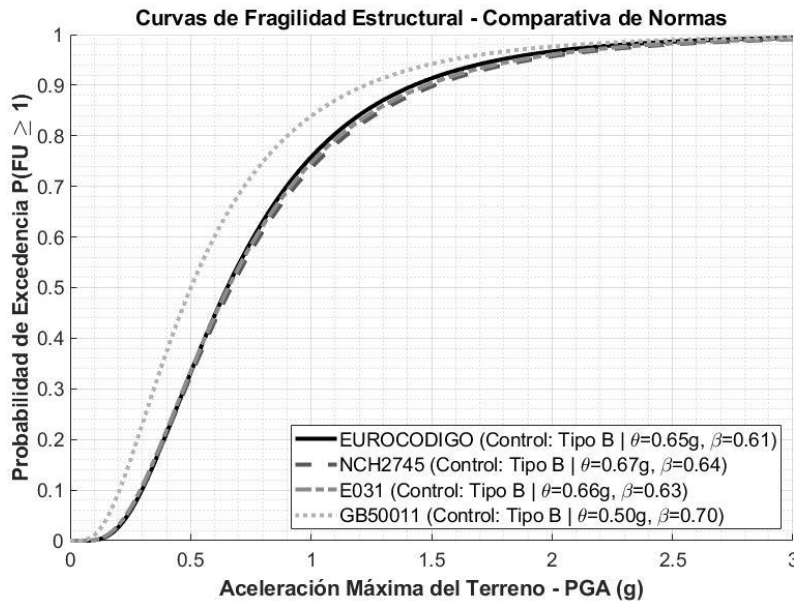


Figura 3.5 Comparativa de Curvas de Fragilidad Sísmica según Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011.

El análisis de la figura 3.5 revela una jerarquía clara entre normativas en términos de vulnerabilidad sísmica del aislador crítico. La normativa GB 50011 produce la curva de fragilidad con menor mediana ($\theta=0.50g$), posicionándose como la configuración más vulnerable. A una PGA de 0.5g, esta configuración presenta una probabilidad de excedencia del 50%, mientras que las demás normativas registran probabilidades considerablemente inferiores en ese mismo nivel de intensidad. La mayor dispersión asociada ($\beta=0.70$) amplía el rango de incertidumbre de esta curva, generando una distribución acumulada con una pendiente menor, lo que implica que la probabilidad de falla crece de forma más gradual, pero alcanza valores significativos a intensidades sísmicas relativamente bajas.

El Eurocódigo 8 muestra la segunda curva de mayor vulnerabilidad, con $\theta=0.65g$ para el aislador tipo B. La diferencia de 30% en la mediana respecto a GB 50011 es estadística y prácticamente significativa, dado que implica que se requiere un nivel de intensidad sísmica un 30% superior para alcanzar la misma probabilidad de excedencia del 50%. Sin embargo, la estrecha proximidad entre la curva del Eurocódigo 8 y las de NTE E.031 ($\theta=0.66g$) y NCh 2745 ($\theta=0.67g$) indica que estas tres normativas convergen hacia niveles de protección sísmica estadísticamente equivalentes para el estado límite de los aisladores. La diferencia de apenas 3% entre las medianas del Eurocódigo 8 y NCh 2745

no es prácticamente significativa, y las tres curvas aparecen virtualmente superpuestas en la figura 3.5.

La normativa NCh 2745 produce la curva con mayor mediana ($\theta=0.67g$) y, por lo tanto, la menor vulnerabilidad del aislador crítico, seguida muy de cerca por la NTE E.031. Este resultado es coherente con los mayores factores de seguridad explícitos prescritos por ambas normativas. La dispersión β de 0.64 y 0.63 respectivamente, ligeramente superiores a las del Eurocódigo 8 ($\beta=0.61$), indica una incertidumbre moderada comparable entre estas tres configuraciones.

Un resultado de particular relevancia es que la normativa con el sistema dimensionalmente más grande (GB 50011) produce la mayor vulnerabilidad sísmica del sistema de aislación, mientras que la normativa con el sistema más compacto (Eurocódigo 8) genera una protección prácticamente equivalente a las normativas de mayor volumen. Este hallazgo contradice la intuición de que un mayor volumen de aisladores necesariamente se traduce en mayor seguridad, y subraya que la distribución de propiedades mecánicas entre los tipos de aisladores y la presencia o ausencia de mecanismos histeréticos son determinantes más influyentes que el volumen total del sistema de aislación.

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Efecto de uso de los factores de seguridad normativos en las dimensiones y propiedades dinámicas de los aisladores.

El análisis de las configuraciones de diseño presentadas en las tablas 3.1 a 3.4 permite identificar los mecanismos por lo que los distintos enfoques normativos se traducen en variaciones geométricas y mecánicas de los sistemas de aislación. Las diferencias observadas corresponden a filosofías de diseño distintas, formulaciones constitutivas diferenciadas y criterios de verificación específicos inherentes a cada marco normativo. El volumen total del sistema de aislación varió entre 104.2 m³ (Eurocódigo 8) y 164.47 m³ (GB 50011), representando una diferencia del 57.8%. Las normativas sudamericanas NCh 2745 y NTE E.031 generaron volúmenes muy similares de 136.1 m³ y 139.63 m³ respectivamente, con una diferencia de solo 2.6%. Esta convergencia entre los códigos chileno y peruano evidencia su similitud metodológica fundamental, derivada de experiencias sísmicas regionales comparables.

La normativa china, pese a no especificar factores de seguridad explícitos como los códigos sudamericanos, generó el sistema más robusto dimensionalmente. Este resultado evidencia que el conservadurismo efectivo de una normativa no se mide exclusivamente por sus factores de seguridad numéricos explícitos de verificación.

El Eurocódigo 8, al producir el sistema más compacto, confirma su filosofía de optimización basada en análisis detallados y coeficientes parciales determinados probabilísticamente. La ausencia de factores de seguridad prescriptivos sobre propiedades mecánicas y la verificación de un límite total al corte del 700% permiten al diseñador explorar el espacio de soluciones con mayor flexibilidad, identificando configuraciones que cumplen los estados límite con el mínimo material.

El dimensionamiento robusto bajo GB 50011 se explica por la acción combinada de tres mecanismos normativos específicos: el límite restrictivo del esfuerzo de fluencia del plomo, el límite geométrico de desplazamiento y las formulaciones constitutivas que conducen a factores de forma más elevados y módulos de compresión superiores, aumentando así la capacidad de carga de los aisladores.

El límite de esfuerzo de fluencia del plomo resulta 33% inferior al prescrito por NCh 2745 (18 MPa). Esta restricción obliga a incrementar el área del núcleo de plomo para alcanzar las fuerzas características requeridas. Este núcleo más robusto requiere, consecuentemente, un diámetro exterior del elastómero proporcionalmente mayor para mantener las relaciones geométricas adecuadas entre el plomo y el caucho, preservando factores de forma apropiados.

El límite de desplazamiento para GB 50011 introduce una restricción geométrica bidireccional única de este código. Este requisito establece que el desplazamiento admisible del aislador no puede exceder el valor mínimo entre el 55% del diámetro exterior y tres veces la altura total del elastómero. Estas restricciones geométricas indirectas tienen el efecto práctico de controlar las distorsiones unitarias del elastómero al forzar relaciones dimensionales conservadoras entre el desplazamiento admisible y las dimensiones geométricas del dispositivo.

Resulta notable que el desplazamiento de diseño bajo GB 50011 sea significativamente inferior al de las demás normativas, representando una reducción del 7.9% al 9.9%. Esta diferencia no responde a una demanda sísmica menor, dado que todas las configuraciones fueron diseñadas para la misma estructura y bajo las mismas

condiciones, sino a las limitaciones geométricas impuestas por el requisito del desplazamiento.

Las normativas NCh 2745 y NTE E.031 prescriben factores de seguridad explícitos que operan mediante amplificación directa de las solicitaciones. El factor de seguridad estático implica que, bajo cargas gravitacionales de servicio, el aislador debe verificar estabilidad al pandeo con un margen del 200%. Esto se traduce en la condición en la que la capacidad crítica de pandeo sea al menos tres veces superior a la carga vertical de diseño. Dado que la capacidad de pandeo se relaciona con las dimensiones geométricas, este requisito favorece a aisladores con áreas transversales mayores, factores de forma elevados o alturas de elastómero reducidas.

El factor de seguridad sísmico, aunque aparentemente no impone conservadurismo adicional, establece que las propiedades nominales del aislador deben satisfacer las demandas sísmicas sin reducción alguna.

La práctica identidad volumétrica entre códigos sudamericanos, con diferencia de solo 2.6%, confirma que ambas normativas convergen hacia diseños similares pese a diferencias metodológicas menores. La ligera superioridad volumétrica de NTE E.031 se atribuye principalmente a la desagregación explícita de las deformaciones por corte en tres componentes y al límite combinado más restrictivo comparado con las verificaciones globales de NCh 2745.

El requisito chileno de deformación inicial por retracción, ausente en las demás normativas, también contribuye marginalmente al incremento dimensional. Esta consideración obliga a incrementar las dimensiones nominales para que, tras la retracción del hormigón por fraguado, las dimensiones efectivas sigan cumpliendo las verificaciones de estados límite.

Las diferencias dimensionales se traducen en variaciones significativas de las propiedades dinámicas del sistema aislado. El período efectivo que gobierna la demanda sísmica espectral sobre la estructura varió entre 3.216 segundos (GB 50011) y 4.152 segundos (Eurocódigo 8), representando una diferencia del 29.1%. Esta variación resulta extraordinaria considerando que todas las configuraciones fueron diseñadas para la misma estructura con peso sísmico de 101380 Tonf.

El período efectivo se relaciona con la rigidez efectiva del sistema, dando una diferencia del 66.6% en rigidez efectiva entre Eurocódigo 8 y GB 5001, explicando así la divergencia en períodos.

De manera contraintuitiva, la configuración más robusta dimensionalmente (GB 5001) generó el período efectivo más corto, mientras que la más compacta (Eurocódigo 8) produjo el período más largo. Este resultado aparentemente paradójico se explica por la relación entre la rigidez efectiva y la configuración geométrica del aislador. La rigidez post fluencia de un aislador elastomérico, domina la rigidez efectiva del sistema, entonces dispositivos con diámetros mayores y alturas menores exhiben simultáneamente mayor rigidez post fluencia.

Los aisladores diseñados bajo GB 50011 presentan precisamente esta configuración, esta geometría, aunque volumétricamente mayor, resulta mecánicamente más rígida. En contraste, el Eurocódigo 8 generó aisladores más esbeltos, produciendo rigideces post fluencia menores pese al menor volumen del elastómero.

Las configuraciones sudamericanas, con periodos efectivos intermedios (3.746 segundos NCh 2745 y 3.806 segundos NTE E.031), se posicionan en un rango que refleja su posición volumétrica intermedia. La diferencia de solo 1.6% entre ambos períodos confirma nuevamente su similitud metodológica. Estos períodos, aproximadamente 10% inferiores al del Eurocódigo 8, implican rigideces efectivas moderadamente mayores.

Los desplazamientos de diseño presentaron variaciones entre 66.23 cm (GB 50011) y 73.52 cm (NCh 2745), representando una diferencia del 11%. Esta divergencia resulta significativa dado que todas las configuraciones responden a la misma demanda sísmica de sitio. Las diferencias no reflejan distintas intensidades sísmicas consideradas, sino los distintos mecanismos mediante los cuales cada normativa controla el desplazamiento admisible del sistema de aislación.

El desplazamiento obtenido bajo GB 50011 responde directamente a la condición de desplazamiento por unidad de aislador, el desplazamiento total del sistema incorpora un margen adicional respecto a este límite, reflejando conservadurismo implícito en la aplicación del código.

Las normativas sudamericanas, con desplazamientos de 73.52 cm para NCh 2745 y 71.87 cm para NTE E.031, establecen sus límites mediante las verificaciones de

deformación por corte. Para la NCh 2745, aunque no especifica un límite explícito, las verificaciones individuales de estabilidad, presiones de contacto y deformaciones por corte determinan implícitamente el desplazamiento máximo admisible. La NTE E.031, con su límite combinado establece que la deformación por desplazamiento debe satisfacer una condición, que junto con las componentes por compresión y rotación deben totalizar un factor de hasta seis.

El Eurocódigo 8, con el desplazamiento más elevado de 73.28 cm, refleja su enfoque más flexible donde permite deformaciones totales mayores que las normativas previamente analizadas. Esta flexibilidad, combinada con alturas de elastómero mayores permite acomodar desplazamientos superiores sin exceder las deformaciones unitarias admisibles.

El amortiguamiento efectivo del sistema presentó variaciones notablemente moderadas: 14% (Eurocódigo), 15.1% (NCh 2745), 15.2% (NTE E.031) y 15% (GB 50011). Esta relativa uniformidad, con un rango de solo 1.2 puntos porcentuales, contrasta marcadamente con las diferencias sustanciales en dimensiones como 57.8% en volumen, 29.1% en periodos y 11% en desplazamientos. Esta convergencia sugiere que todas las normativas, pese a sus diferencias metodológicas, reconocen implícita o explícitamente un rango óptimo de amortiguamiento para sistemas de aislación destinados a infraestructura crítica.

El amortiguamiento efectivo revela que, para un desplazamiento máximo dado, alcanzar un amortiguamiento objetivo requiere balancear la fuerza característica con la rigidez efectiva. Sistemas más rígidos requieren fuerzas características mayores para alcanzar el mismo amortiguamiento que sistemas más flexibles. Las tablas 3.1 a 3.4 confirman este fenómeno exhibiendo fuerzas características superiores o núcleos de plomo más robustos para los aisladores diseñados bajo GB 50011 comparados con el Eurocódigo 8.

Amortiguamientos inferiores al 10% pueden resultar insuficientes para controlar desplazamientos bajo eventos extremos, demandando aisladores con rigideces post fluencia elevadas que comprometen la efectividad del aislamiento. Valores superiores al 20% incrementan excesivamente las fuerzas transmitidas a la superestructura debido a las componentes histeréticas del amortiguamiento, diluyendo los beneficios de la

reducción de aceleraciones. El rango 14-16% ofrece un balance óptimo entre control de desplazamientos y reducción de aceleraciones.

El volumen total de elastómero constituye el principal determinante del costo directo del sistema de aislación. El rango volumétrico entre el Eurocódigo 8 (104.2 m³) y GB 50011 (164.47 m³) representa una diferencia de 60.27 m³, equivalente a un incremento del 57.8%. considerando un costo unitario de 1000 USD/ m³ para elastómero con núcleo de plomo, esta diferencia volumétrica se traduce en aproximadamente 60270 USD en costos directos de material.

Las normativas sudamericanas, con volúmenes similares (136.1 m³ NCh 2745 y 139.63 m³ NTE E.031), se posicionan en un punto intermedio que representa sobrecostos de 31900-35430 USD respecto al Eurocódigo 8, pero ahorros de 24840-28370 USD respecto a GB 50011. Esta posición intermedia refleja un balance entre eficiencia económica y conservadurismo técnico que puede resultar apropiado para el contexto latinoamericano, donde las restricciones presupuestarias deben balancearse con el nivel de operatividad de la infraestructura hospitalaria.

Los costos indirectos asociados a las diferencias dimensionales afectan sustancialmente estas cifras. Aisladores de mayor diámetro demandan pedestales de cimentación con secciones transversales superiores, incrementando volúmenes de hormigón y acero de refuerzo.

El sobrecosto adicional de adoptar GB 50011 contra Eurocódigo 8 para la estructura analizada, este diferencial puede representar aproximadamente 1-1.2% del presupuesto total. Aunque porcentualmente moderado, esta cifra podría resultar significativa en contextos con restricciones presupuestarias o cuando debe priorizarse la asignación de recursos hacia equipamiento hospitalario.

Las normativas sudamericanas respecto al Eurocódigo 8, representan un incremento más moderado que podría justificarse en una evaluación de costo-beneficio. La diferencia entre NCh 2745 y NTE E.031 resulta mínima, confirmando que la selección entre ambas puede basarse en consideraciones del diseñador con el código o disponibilidad en herramientas de cálculo, sin implicaciones económicas sustanciales.

Las diferencias en períodos efectivos, desplazamientos de diseño y amortiguamiento entre configuraciones normativas, si bien cuantitativamente documentadas, adquieren su pleno significado al ser evaluadas mediante el comportamiento probabilístico del

sistema bajo excitación sísmica incremental. El análisis que se presenta en las secciones siguientes permite determinar si los sistemas de mayor dimensión y rigidez efectiva se traducen efectivamente en mayor protección sísmica de los aisladores.

3.2.2 Comportamiento de los aisladores bajo excitación sísmica incremental.

El análisis IDA revela patrones de comportamiento que no son directamente deducibles de los parámetros de diseño estático, evidenciando la necesidad de evaluaciones probabilísticas para caracterizar adecuadamente el desempeño de los sistemas de aislación.

El primer patrón destacable es la vulnerabilidad consistente del aislador tipo B como elemento crítico en las cuatro configuraciones normativas. Aunque los aisladores tipo A soportan mayores cargas verticales y, por ende, podrían intuirse como los más solicitados, la confición más crítica para los tipo B emerge de una combinación de factores: su posición en planta los expone a demandas sísmicas que combinan compresión reducida con potencial de tensión, condición que incrementa el FU de manera más pronunciada que la compresión pura. Este comportamiento es consistente con las observaciones de la literatura respecto a que los aisladores sometidos a bajas cargas de compresión o tensión durante eventos sísmicos representan la condición más desfavorable para los sistemas elastoméricos.

Las características del conjunto de registros empleados tienen implicaciones directas en la interpretación de los valores de dispersión obtenidos. Los sismos de magnitud $M_w \geq 7.5$ presentan mayor variabilidad en la forma espectral dentro del rango de 3 a 5 segundos que los registros de menor magnitud, ya que a grandes magnitudes la duración del movimiento y la evolución temporal del contenido frecuencial difieren significativamente entre eventos de distintas fuentes sismográficas y condiciones de propagación. Esta variabilidad se refleja en los valores de β entre 0.59 y 0.70 observados en el estudio, los cuales son representativos de la incertidumbre real asociada a eventos sísmicos de gran magnitud. En particular, la mayor dispersión del tipo B bajo GB 50011 no solo refleja la ausencia del mecanismo histerético, sino también la mayor sensibilidad de un aislador puramente elastomérico al contenido espectral particular de cada registro en el rango de períodos largos, donde pequeñas variaciones en la demanda espectral se amplifican en términos de desplazamiento cuando no existe disipación histerética que las controle.

El segundo patrón relevante concierne a la influencia de los mecanismos de disipación de energía. La comparación entre los tipos B bajo GB 50011, sin núcleo de plomo y los tipos B de las demás normativas, con núcleo de plomo, evidencia cuantitativamente el efecto del comportamiento histerético sobre la vulnerabilidad sísmica. La ausencia del núcleo de plomo en la configuración china reduce la mediana en un 23.1% respecto al promedio de las otras tres normativas, con un incremento simultáneo de la dispersión del 9.4 al 10.9%. Esta diferencia confirma que la presencia de un mecanismo histerético no solo incrementa el amortiguamiento efectivo del sistema, sino que homogeniza la respuesta ante registros de diversas características espectrales, reduciendo la incertidumbre.

La mayor dispersión del tipo B bajo GB 50011 ($\beta=0.70$) tiene implicaciones directas en la evaluación del riesgo sísmico: para intensidades sísmicas bajas, la probabilidad de excedencia de este diseño es inferior a la esperada dado su menor mediana, mientras que para intensidades superiores a 0.5g la probabilidad crece rápidamente, superando a las demás configuraciones. Este comportamiento es típico de curvas de fragilidad con mayor dispersión, y advierte que el diseño bajo GB 50011 sin núcleo de plomo en los tipos B presenta mayor incertidumbre en todo el rango de intensidades evaluado.

La diferencia entre los aisladores tipo A y tipo B dentro de la configuración NCh 2745 merece atención particular. La mediana del tipo A (0.91g) supera en un 35.8% a la del tipo B (0.67g), la mayor brecha interna observada. Este resultado indica que la normativa chilena, al prescribir factores de seguridad estáticos más elevados orientados fundamentalmente al pandeo bajo carga gravitacional, genera aisladores tipo A extraordinariamente seguros frente al estado límite dinámico, pero no logra una redistribución de esta seguridad adicional hacia los tipos de menor carga donde la vulnerabilidad relativa es mayor.

En contraste, el Eurocódigo 8 exhibe la distribución más uniforme de capacidades entre tipos, con medianas que varían solo entre 0.65g y 0.74g, una diferencia del 13.8%. Esta homogeneidad resulta de la filosofía del Eurocódigo 8 basada en estados límite globales, que tiende a distribuir el nivel de seguridad de manera más equitativa entre todos los elementos del sistema en lugar de concentrarlo en los más cargados.

3.2.3 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad.

La comparación de curvas de fragilidad permite extraer conclusiones de alto valor práctico para la selección de criterios normativos en el diseño de aisladores para infraestructura hospitalaria.

La primera conclusión de relevancia es que el mayor conservadurismo volumétrico de una normativa no garantiza mayor seguridad sísmica del sistema de aislación. El diseño bajo GB 50011, con un volumen 57.8% superior al del Eurocódigo 8, genera una vulnerabilidad significativamente mayor. Esta aparente paradoja se resuelve al considerar que la seguridad sísmica de un sistema de aislación depende críticamente de la presencia y caracterización adecuada de los mecanismos disipadores de energía en cada tipo de aislador, y no exclusivamente del volumen de elastómero empleado.

La segunda conclusión relevante es la equivalencia de los tres códigos no chinos en términos de fragilidad. La diferencia de apenas 3% entre las medianas del Eurocódigo 8 (0.65g) y NCh 2745 (0.67g) implica que, desde la perspectiva del desempeño sísmico del estado límite de los aisladores, estas tres normativas ofrecen niveles de protección estadísticamente indistinguibles. Esta equivalencia adquiere especial significado considerando que el Eurocódigo 8 lo consigue con un 23.5% menos de volumen que NCh 2745, lo que posiciona al código europeo como la alternativa más eficiente en términos de relación capacidad-volumen.

La tercera conclusión concierne al nivel de intensidad sísmica de referencia para el sitio de estudio. El PGA de diseño empleado, derivado del sismo máximo considerado para la NEC 2015, se sitúa en el rango donde las diferencias entre curvas de fragilidad son más pronunciadas. En este contexto, la selección del marco normativo de diseño tiene consecuencias directas sobre la probabilidad de excedencia del estado límite ante el sismo de diseño. Las tres normativas con aisladores tipo B equipados con núcleo de plomo presentan probabilidades de excedencia similares y aceptables para el nivel de intensidad sísmica de referencia, mientras que la configuración GB 50011 sin núcleo de plomo en aisladores tipo B excede esta condición con mayor probabilidad.

3.2.4 Síntesis cuantitativa y análisis costo-beneficio.

La tabla 3.6 resume los parámetros clave que permiten contrastar el desempeño sísmico y las características dimensionales de las cuatro configuraciones normativas evaluadas.

Tabla 3.6 Síntesis comparativa de configuraciones normativas.

Parámetro	Eurocódigo 8	NCh 2745	NTE E.031	GB 50011	Unidad
Volumen total del sistema de aislación	104.2	136.1	139.6	164.5	m ³
Período efectivo	4.152	3.746	3.806	3.216	s
Desplazamiento de diseño	73.28	73.52	71.87	66.23	cm
Amortiguamiento efectivo	14.0	15.1	15.2	15.0	%
Mediana del aislador crítico	0.65	0.67	0.66	0.50	g
Desviación estándar logarítmica del aislador crítico	0.61	0.64	0.63	0.70	-

Los resultados sinterizados permiten establecer una relación costo-beneficio entre el incremento del material empleado y la reducción de vulnerabilidad sísmica del sistema. Tomando como referencia el Eurocódigo 8 por su menor volumen, el incremento de volumen de NCh 2745 representa 31.9 m³ adicionales (30.6%), obteniendo a cambio una mejora de apenas 3.1% en la mediana. Esta relación indica rendimientos decrecientes evidentes: el incremento de inversión es desproporcionalmente mayor que la ganancia en capacidad sísmica. La normativa NTE E.031 presenta una situación prácticamente idéntica a NCh 2745, con 35.4 m³ adicionales respecto al Eurocódigo 8 (34.0%) por una mejora del 1.5% de mediana.

El caso de GB 50011 ilustra con mayor claridad el fenómeno de rendimientos decrecientes, llevado hasta un punto contraproducente. El incremento de 60.3 m³ respecto al Eurocódigo 8 (57.8%) resulta en una reducción de mediana del 23.1%, es decir, una disminución de capacidad sísmica a pesar de la mayor inversión de material. Esta inversión de la relación costo-beneficio es directamente atribuible a la ausencia del núcleo de plomo de los aisladores tipo B, que no fue compensada por el incremento geométrico de los dispositivos.

Desde una perspectiva económica, considerando un costo unitario del elastómero con núcleo de plomo en el rango de 800 a 1200 USD/ m³, las diferencias volumétricas entre normativas se traducen en costos adicionales aproximados de 25 500 a 38 000 USD

para NCh 2745 y NTE E.031 respecto al Eurocódigo 8, y de 48 200 a 72 400 USD para GB 50011.

Estos diferenciales, aunque moderados en el contexto del presupuesto total de una obra hospitalaria de 10 pisos, adquieren relevancia cuando se consideran los costos indirectos: cimentaciones de mayor sección, mayores juntas perimetrales de aislación y conexiones de servicios más complejas. En este escenario, el Eurocódigo 8 emerge como el marco normativo que mejor equilibra la eficiencia económica y desempeño sísmico, siempre que se verifique que la proporción de aisladores LRB y RB en el sistema mantenga el amortiguamiento equivalente dentro del rango viable del 10% al 20%. Un sistema conformado íntegramente por aisladores con núcleo de plomo excedería este rango; por ello, la asignación del mecanismo histerético debe realizarse selectivamente en los tipos de aisladores que lo requieran, priorizando el Tipo B identificado como elemento crítico en este caso de estudio.

3.2.5 Implicaciones para infraestructura hospitalaria.

Los resultados obtenidos permiten evaluar el cumplimiento del objetivo de desempeño extraordinario exigido para edificios hospitalarios, el cual requiere no solo la prevención del colapso estructural, sino la continuidad operacional inmediata posterior al evento sísmico.

Las dos configuraciones normativas sudamericanas y la europea ofrecen medianas del estado límite de los aisladores en el rango de 0.65g a 0.67g, valores que superan el PGA del sismo de diseño de la NEC 2015 para el sitio analizado. Este resultado indica que, bajo la demanda sísmica de referencia, la probabilidad de que los aisladores excedan su estado límite de utilización es inferior al 50%, condición necesaria para garantizar la funcionalidad del sistema de aislación post sismo y la operatividad de la infraestructura. La configuración bajo GB 50011 presenta una mediana de 0.50g, valor que podría situarse en torno al PGA de diseño del sitio. En este escenario, la probabilidad de excedencia del estado límite bajo el sismo de diseño aproxima al 50%, lo que compromete la confiabilidad del sistema de aislación para garantizar la continuidad operacional del hospital bajo el nivel sísmico de referencia. Esta situación resulta inadmisibles para el nivel de desempeño extraordinario requerido por instalaciones de uso crítico, donde se esperaría que la probabilidad de excedencia del estado límite bajo el sismo de diseño sea considerablemente inferior.

En el contexto específico de países donde la sismicidad elevada convive con la ausencia de una normativa nacional específica de aislación sísmica y donde los profesionales deben recurrir a estándares internacionales de referencia, los resultados del presente estudio aportan evidencia cuantitativa de que la adopción del Eurocódigo 8, NCh 2745 o NTE E.031 conducen a sistemas de aislación con desempeño sísmico equivalente y satisfactorio para infraestructura hospitalaria. La adopción de GB 50011 puede ser apropiada únicamente si se garantiza la incorporación de núcleos de plomo en todos los aisladores que requieren disipación histerética, corrigiendo así la deficiencia identificada en la configuración analizada.

Es necesario precisar que las curvas de fragilidad presentadas en este estudio caracterizan el desempeño del estado límite de los aisladores y no el desempeño global de la estructura hospitalaria. La operatividad completa de un hospital post sismo depende adicionalmente del control de aceleraciones de piso para la protección de equipos médicos y del control de derivas para la protección de elementos no estructurales, aspectos que requieren evaluaciones complementarias mediante análisis de la superestructura.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

El presente estudio evaluó, mediante análisis dinámico incremental y curvas de fragilidad analíticas, el efecto de los factores de seguridad prescritos por cuatro normativas internacionales en el desempeño sísmico de un sistema de aislación elastomérica para un hospital de diez pisos. Los resultados obtenidos permiten formular las siguientes conclusiones:

El primer hallazgo de carácter fundamental es que el conservadurismo normativo, medido en términos de volumen total del sistema de aislación, no guarda una relación proporcional con el nivel de seguridad sísmica de los aisladores. La configuración más voluminosa, generada por GB 50011 con 164.5 m^3 , produjo la mayor vulnerabilidad sísmica del aislador crítico con una mediana $\theta=0.50g$, mientras que la configuración más compacta bajo el Eurocódigo 8 con 104.2 m^3 alcanzó una mediana de $0.65g$. Esta aparente paradoja demuestra que la distribución de mecanismos disipadores de energía entre los diferentes tipos de aisladores es un determinante de desempeño más relevante que el volumen total del elastómero empleado.

El Eurocódigo 8, la NCh 2745 y la NTE E.031 producen sistemas de aislación con niveles de protección estadísticamente equivalentes para el estado límite de los aisladores críticos, con medianas en el rango de $0.65g$ a $0.67g$ y dispersiones β entre 0.61 y 0.64 . Esta equivalencia en desempeño se logra con diferencias volumétricas de hasta el 34% entre el Eurocódigo 8 y las normativas sudamericanas, lo que posiciona al código europeo como el marco normativo de mayor eficiencia en la relación desempeño-material para el sistema analizado.

La vulnerabilidad del aislador tipo B como el elemento crítico es consistente en las cuatro configuraciones normativas, este comportamiento se atribuye a la combinación de cargas verticales intermedias con potencial de demandas de tensión durante la excitación sísmica, confición que incrementa el factor de utilización de manera más pronunciada que en los tipos de mayor carga vertical.

Este patrón advierte sobre la necesidad de verificar explícitamente los estados límite de los aisladores sometidos a menores cargas de compresión en cualquier configuración normativa adoptada.

La ausencia de núcleo de plomo en los aisladores tipo B bajo GB 50011 genera una reducción del 23.1% en la mediana del estado límite respecto al promedio de las otras normativas, acompañada de un incremento de la dispersión hasta 0.70. Este resultado cuantifica la contribución del comportamiento histerético no solo a la disipación de energía, sino a la homogenización de la respuesta ante diferentes contenidos espectrales, reduciendo la incertidumbre del sistema.

Desde la perspectiva de la infraestructura hospitalaria, las normativas sudamericanas y la europea satisfacen el criterio de que la mediana del estado límite supere el PGA de diseño del sitio, condición necesaria para garantizar con probabilidad de excedencia inferior al 50% la funcionalidad del sistema de aislación bajo el sismo de referencia. La configuración china no satisface esta condición, comprometiendo el objetivo de operatividad post sísmica requerida para instalaciones de salud.

El análisis costo-beneficio revela que el incremento de inversión en material entre la configuración del Eurocódigo 8 y las normativas sudamericanas, estimado en 25 500 a 38 300 USD en costos directos de elastómero para la estructura analizada, no se traduce en una mejora significativa del desempeño sísmico de los aisladores. Esta evidencia fundamenta la recomendación de emplear el Eurocódigo 8 como marco normativo de referencia prioritario para el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos en el contexto de países carentes de una normativa específica para el diseño de aislación sísmica.

Para Ecuador, país con alta sismicidad y sin normativa nacional específica de aislación sísmica, los resultados de este estudio proporcionan evidencia cuantitativa directamente aplicable para la selección de criterios normativos. La adopción del Eurocódigo 8 o las normativas sudamericanas NCh 2745 o NTE E.031 garantizan niveles de protección equivalentes y satisfactorios para infraestructura hospitalaria, siendo el código europeo la opción más eficiente económicamente. La adopción de GB 50011 requiere una verificación explícita

adicional de la configuración del núcleo de plomo en todos los tipos de aisladores para asegurar el nivel de desempeño requerido.

Recomendaciones.

Con base en los resultados y conclusiones del presente estudio, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a la práctica profesional y a la investigación futura en el ámbito de la aislación sísmica para infraestructura crítica:

Se recomienda que los profesionales que diseñen sistemas de aislación sísmica en países carentes de normativa nacional para aislación sísmica adopten el Eurocódigo 8 o las normativas NCh 2745 y NTE E.031 como marcos de referencia principales, dado que estas tres normativas producen niveles de protección estadísticamente equivalentes y satisfactorios para el estado límite de los aisladores bajo la demanda sísmica representativa del territorio ecuatoriano en este caso de estudio. La selección entre ellas puede basarse en el acceso a herramientas de cálculo y en la experiencia del profesional con cada código, sin implicaciones sustanciales sobre el desempeño sísmico resultante.

En cualquier configuración normativa adoptada, se recomienda verificar explícitamente la presencia de mecanismos histeréticos adecuados en todos los tipos de aisladores del sistema, en particular en aquellos sometidos a menores cargas de compresión o potenciales demandas de tensión. La ausencia de núcleo de plomo en aisladores que deberían disponer de él puede comprometer significativamente el desempeño del sistema completo, independientemente del nivel de conservadurismo geométrico del diseño.

Se recomienda que futuros estudios extiendan el análisis a la evaluación del desempeño sísmico de la superestructura hospitalaria, incluyendo curvas de fragilidad para aceleraciones de piso y derivas de entrepiso. Estos parámetros son determinantes para la operatividad post sísmica del equipamiento médico y los elementos no estructurales, y su evaluación complementaría los resultados del presente estudio centrado en estados límite de los aisladores.

Se recomienda incorporar en estudios futuros la variabilidad de las propiedades mecánicas de los aisladores como fuente de incertidumbre en el análisis de fragilidad. Los efectos del envejecimiento, la temperatura y la historia de carga

sobre la rigidez y amortiguamiento del sistema de aislación pueden modificar los parámetros θ y β de las curvas de fragilidad, y su consideración explícita permitiría caracterizar de manera más completa la confiabilidad a largo plazo del sistema. Para el contexto ecuatoriano específicamente, se recomienda que organismos de regulación y colegios profesionales consideren los resultados de estudios como el presente para fundamentar la elaboración de un capítulo normativo nacional sobre aislación sísmica, que establezca criterios de desempeño adaptados a las características sísmicas y constructivas del país. La convergencia de resultados entre Eurocódigo 8, NCh 2745 y NTE E.031 sugiere que cualquiera de estas normativas podría servir como base para tal instrumento, con adaptaciones específicas al contexto nacional.

Finalmente, se recomienda que el análisis dinámico incremental y las curvas de fragilidad se adopten como herramientas de verificación complementarias en el diseño de sistemas de aislación sísmica elastomérica para infraestructura crítica, más allá del cumplimiento normativo estático convencional. Estos instrumentos probabilísticos permiten cuantificar el desempeño real del sistema ante incertidumbres sísmicas y de fabricación, proporcionando información de valor superior a las verificaciones determinísticas prescritas por los códigos.

Bibliografía

- [1] V. Silva y e. al., «Desarrollo de un modelo global de riesgo sísmico.,» 2020.
- [2] M. D. Joyner, C. Gardner, B. Puentes y M. Sasani, «Diseño Sísmico de Edificios Basado en Resiliencia a través de Optimización Multiobjetivo 1.,» 2021.
- [3] E. Nastri y A. Pisapia, «Diseño Sísmico Basado en el Rendimiento. En Ciencias Aplicadas.,» *Instituto Multidisciplinario de Publicaciones Digitales (MDPI).*, vol. 15, nº 5, 2025.
- [4] Al-Janabi, «Mejora de la resiliencia estructural para infraestructuras sostenibles: Una revisión global de las prácticas de aislamiento sísmico y disipación de energía.,» *Instituto Multidisciplinario de Publicaciones Digitales (MDPI).*, vol. 17, nº 16, 2025.
- [5] W. Gbenankpon Djima , A. Can Zulfikar y C. Tüzün, «Diseño basado en el rendimiento para centros de salud. En Peligros naturales: impactos, ajustes y resiliencia.,» 2021.
- [6] M. & B. S. Dicleli, «Efecto de la incertidumbre del módulo de corte de los apoyos elastoméricos en el comportamiento sísmico de puentes aislados.,» *Revista de Ingeniería de Puentes.*, 2017.
- [7] M. & B. C. J. Kikuchi, *Factores de sobrerresistencia para apoyos de aislamiento sísmico: Evaluación y recomendaciones para códigos de diseño.*, 2019.
- [8] T. A. & M. S. A. Morgan, «La influencia de los factores de seguridad en la respuesta no lineal y el riesgo de colapso de edificios aislados sísmicamente.,» de *16ª Conferencia Europea sobre Ingeniería Sísmica.*, 2019.
- [9] C. P. & S. S. P. Providakis, Evaluación basada en la confiabilidad de los factores de seguridad prescritos por la normativa para apoyos de aislamiento sísmico de plomo-caucho. *Dinámica de Suelos e Ingeniería Sísmica.*, 2020.
- [10] F. López-Almansa, C. M. Piscal, J. Carrillo, S. L. Maldonado Leiva y Y. F. Moscoso, «Survey on Major Worldwide Regulations on Seismic Base Isolation of Buildings.,» *Advances in Civil Engineering*, 2022.

- [11] D. Patel, V. K. Mourya, G. Pandey y R. Kumar, «Advancements in base isolation for seismic mitigation: Perspectives on elastomeric and lead rubber bearings.,» *Research on Engineering Structures & Materials*, 2024.
- [12] K. L. & C. A. K. Ryan, Diseño sísmico basado en el desempeño de estructuras aisladas: Un marco que incorpora factores de seguridad explícitos. *Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural.*, 2021.
- [13] I. G. N. S. & F. K. Buckle, «Estabilidad de cojinetes de aislamiento elastoméricos: estudio experimental.,» 2002.
- [14] R. I. R. W. H. & M. G. H. Skinner, «Introducción al aislamiento sísmico.,» 1993.
- [15] A. K. Chopra, *Dinámica de estructuras: teoría y aplicaciones a la ingeniería sísmica* (5ª ed.), 2017.
- [16] G. e. a. Warn, *Una revisión del aislamiento sísmico para edificios: desarrollo histórico y necesidades de investigación.*, 2012.
- [17] e. a. Kalpakidis, *Desempeño de hardware de aislamiento sísmico bajo servicio y carga sísmica.*, 2007.
- [18] AASHTO, *Especificaciones de la Guía para el Diseño de Aislamiento Sísmico* (4.^a ed.). Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte, Washington, D.C., 2010.
- [19] C. S. & K. J. M. Tsai, *Análisis de rigidez de aisladores elastoméricos reforzados con fibras.*, 2005.
- [20] D. N. F. G. L. & W. A. S. Grant, *Modelado bidireccional de cojinetes de caucho de alta amortiguación.*, 2004.
- [21] I. V. & C. M. C. Kalpakidis, *Efectos del calentamiento sobre el comportamiento de cojinetes de plomo-caucho.*, 2009.
- [22] S. S. & D. S. Roy, *Componentes del cojinete de caucho de amortiguación baja/alta y del cojinete de caucho de plomo.*, 2018.
- [23] K. L. Ryan, *Estimación de demandas sísmicas sobre aisladores en edificaciones asimétricas mediante análisis no lineal*, 2004.
- [24] C. Eurocode, *Diseño de estructuras resistentes a terremotos - Parte 2: Puentes*. Comité Europeo de Normalización, Bruselas., 2005.

- [25] I. NCh2745, Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica. Instituto Nacional de Normalización, Santiago de Chile, 2013.
- [26] S. N. E.031, Norma E.031 Aislamiento Sísmico. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, Lima, Perú, 2019.
- [27] MOHURD, Código para el Diseño Sísmico de Edificios. Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural de China, Pekín., 2010.
- [28] C. P. Providakis, Efecto de los aisladores LRB y amortiguadores viscosos suplementarios en edificios aislados sísmicamente bajo excitaciones cercanas a fallas., 2008.
- [29] I. G. & L. H. Buckle, Cargas críticas de aisladores elastoméricos a alta deformación cortante., 1994.
- [30] FEMA, Evaluación del Desempeño Sísmico de Edificios, Volumen 1 – Metodología. FEMA P-58-1, Agencia Federal para el Manejo de Emergencias., 2012.
- [31] R. D. R. M. G. & F. A. Retamales, Fragilidad sísmica experimental de muros divisorios de yeso con estructura de acero conformado en frío., 2013.
- [32] D. & C. C. A. Vamvatsikos, Análisis dinámico incremental aplicado., 2004.
- [33] D. & F. M. Vamvatsikos, Análisis dinámico incremental para estimar la sensibilidad y la incertidumbre del desempeño sísmico., 2010.
- [34] Y. B. T. C. & H. H. Bao, Falla de cojinetes de péndulo de doble fricción bajo movimientos de tipo pulso., 2017.
- [35] D. & P. G. Cardone, Desarrollo de curvas de fragilidad y funciones de pérdida para muros de relleno de mampostería., 2015.
- [36] C. A. J. F. H. R. O. & F. D. A. Cornell, Base probabilística para las directrices de marcos de momento de acero de la Agencia Federal de Gestión de Emergencias del SAC 2000., 2002.
- [37] B. R. C. O. C. & K. K. Ellingwood, Evaluación de la fragilidad de los sistemas estructurales de construcción en Mid-America., 2007.
- [38] K. A. Porter, Una guía para principiantes sobre la fragilidad, la vulnerabilidad y el riesgo., 2020.

- [39] J. W. Baker, Ajuste eficiente de la función de fragilidad analítica mediante análisis estructural dinámico., 2015.
- [40] M. & F. M. Flenga, Curvas de fragilidad y modelos probabilísticos de demanda sísmica en la evaluación sísmica de pórticos de hormigón armado sometidos a impactos estructurales, 2021.
- [41] J. & D. G. G. Moehle, Una metodología marco para la ingeniería sísmica basada en el desempeño., 2004.
- [42] S. & C. M. C. Kitayama, Comportamiento sísmico de edificios con sistemas de amortiguamiento viscoso diseñados según ASCE/SEI 7-16., 2018.
- [43] D. C. N. & D. A. Cardone, Influencia de las variaciones temporales de la demanda sísmica en la evaluación de la fragilidad de edificaciones de CR., 2019.
- [44] D. Vamvatsikos, Estimación de la incertidumbre del desempeño sísmico mediante IDA con muestreo progresivo de hipercubos latinos por acelerograma., 2014.
- [45] P. P. B. & D. V. P. Castaldo, Análisis de costo de ciclo de vida y confiabilidad sísmica de sistemas 3D equipados con FPS., 2017.

ANEXOS

Las figuras 4.1 a 4.4 presentan las curvas de fragilidad sísmica individuales para los cuatro tipos de aisladores (A, B, C y D) correspondientes a cada una de las normativas evaluadas: Eurocódigo 8, NCh 2745, NTE E.031 y GB 50011, respectivamente. Cada gráfica muestra, en el eje horizontal, la aceleración máxima del terreno (PGA) en unidades de g, y en el eje vertical, la probabilidad de excedencia de estados límite de utilización ($FU \geq 1$). Las curvas se obtuvieron ajustando distribuciones log normales a los resultados del análisis dinámico incremental, con parámetros de mediana θ y desviación estándar logarítmica β determinados para cada tipo de aisladore en cada configuración normativa. La comparación entre tipos dentro de cada figura permite identificar el aisladore crítico que primero alcanza el estado límite, siendo consistentemente el tipo B el elemento de mayor vulnerabilidad en las cuatro normativas.

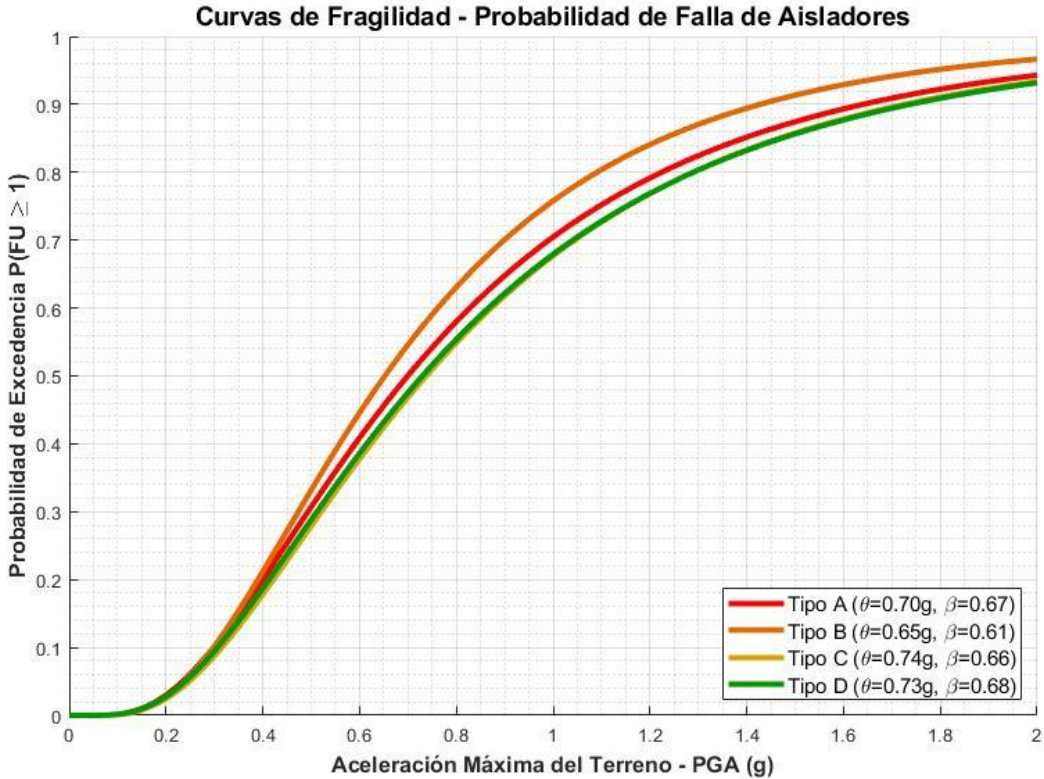


Figura 4.1 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios del Eurocódigo 8.

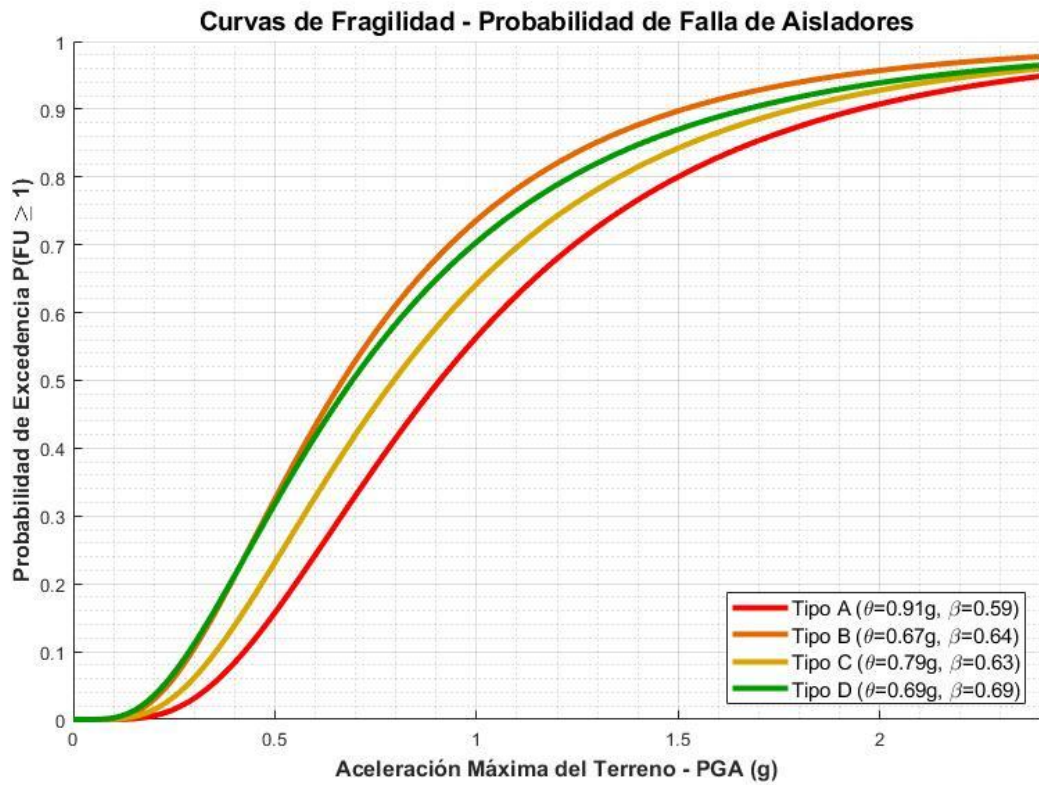


Figura 4.2 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios de la NCh 2745.

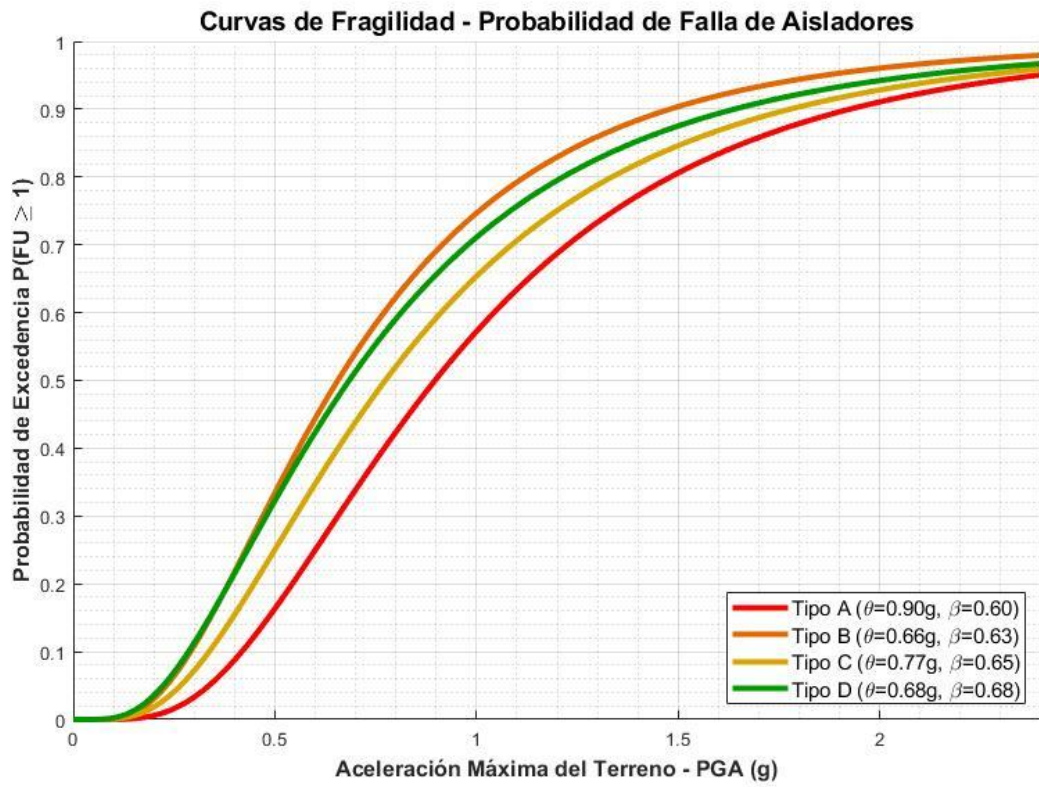


Figura 4.3 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios de la NTE E.031.

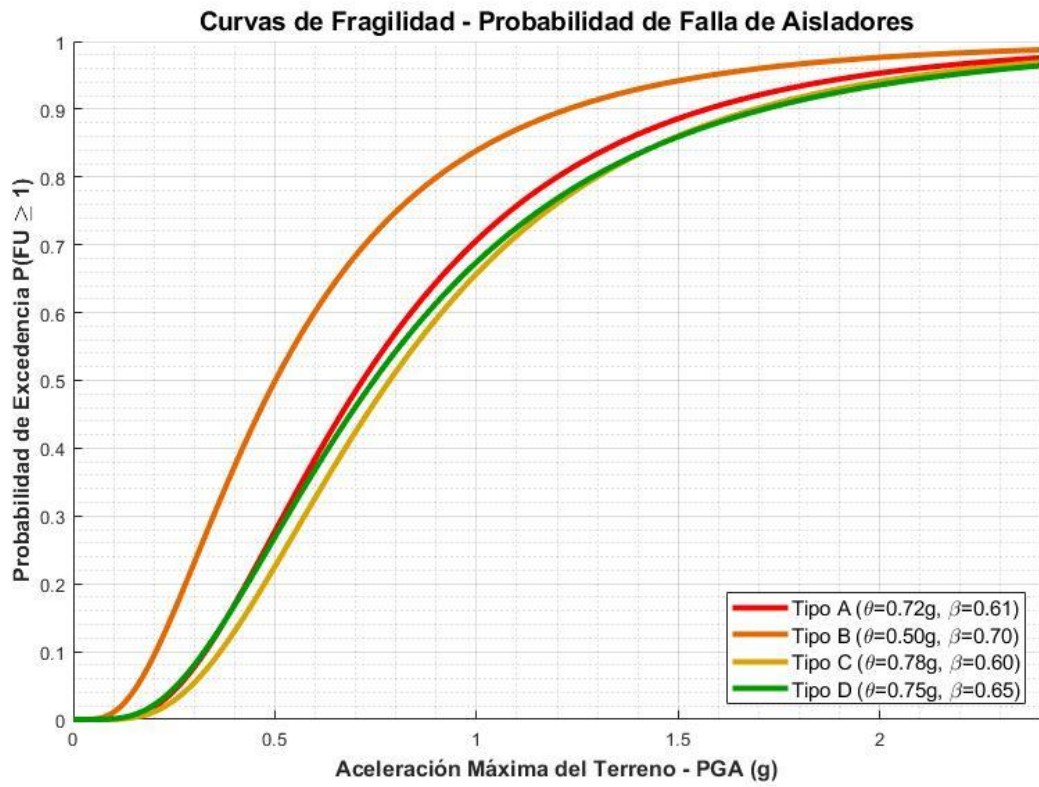


Figura 4.4 Curvas de Fragilidad para Aisladores Sísmicos conforme a los criterios del GB 50011.

Las figuras 4.5 a 4.92 presentan las curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de los aisladores sísmicos críticos para cada uno de los 22 pares de registros sísmicos empleados en el análisis dinámico incremental, organizadas por normativa. En cada gráfica, el eje horizontal corresponde al desplazamiento lateral del aislador en centímetros y el eje vertical al esfuerzo de corte actuante en MPa. Se representan los 8 aisladores críticos analizados por configuración normativa: los dos dispositivos de mayor demanda de compresión y de tensión para cada tipo (A, B, C y D). El aislador que alcanza primero su estado límite de utilización para cada tipo se identifica en color rojo, permitiendo la visualización directa del elemento crítico al momento de la falla. La variabilidad entre registros evidencia el efecto del contenido espectral de los 22 pares sobre la demanda de desplazamientos, particularmente pronunciada para registros con alta energía en el rango de períodos de 3 a 5 segundos, consistente con los períodos efectivos del sistema de aislación obtenidos bajo las cuatro normativas evaluadas.

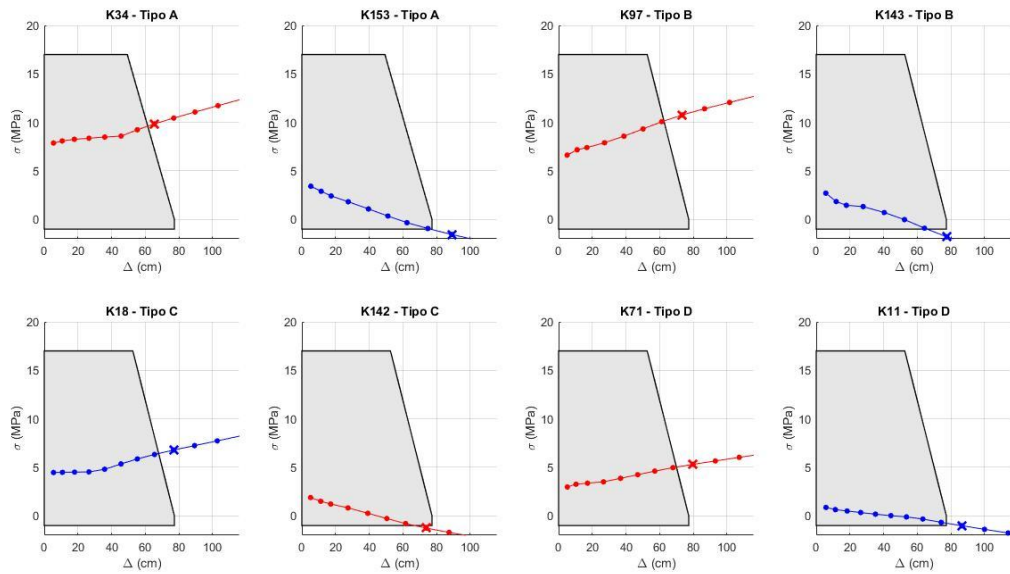


Figura 4.5 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según Eurocódigo 8.

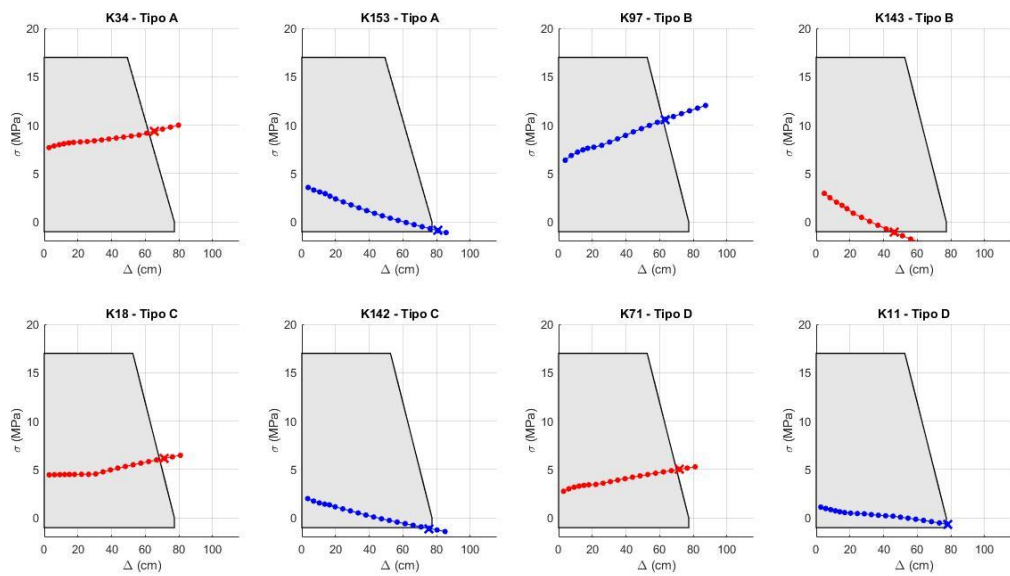


Figura 4.6 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según Eurocódigo 8.

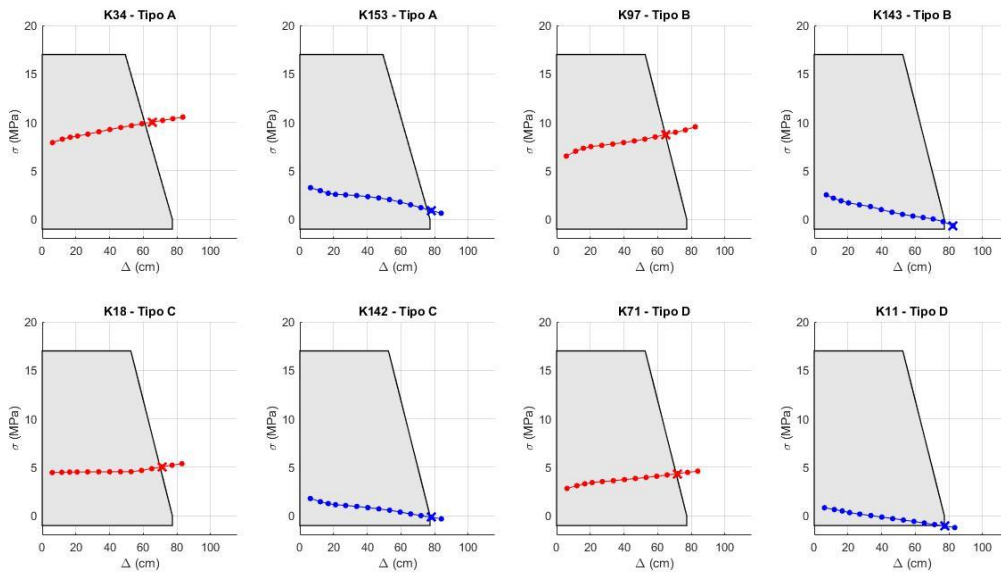


Figura 4.7 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según Eurocódigo 8.

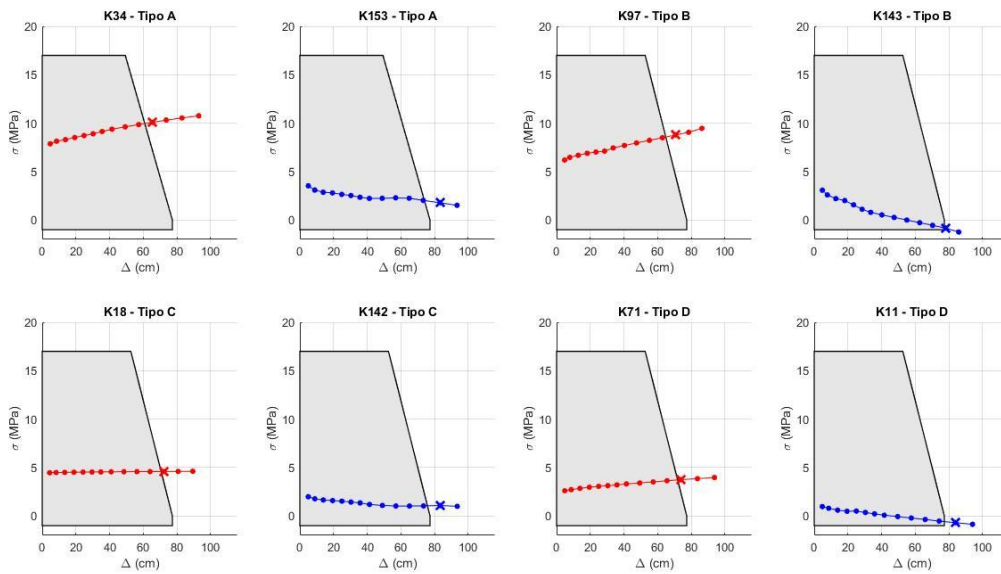


Figura 4.8 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según Eurocódigo 8.

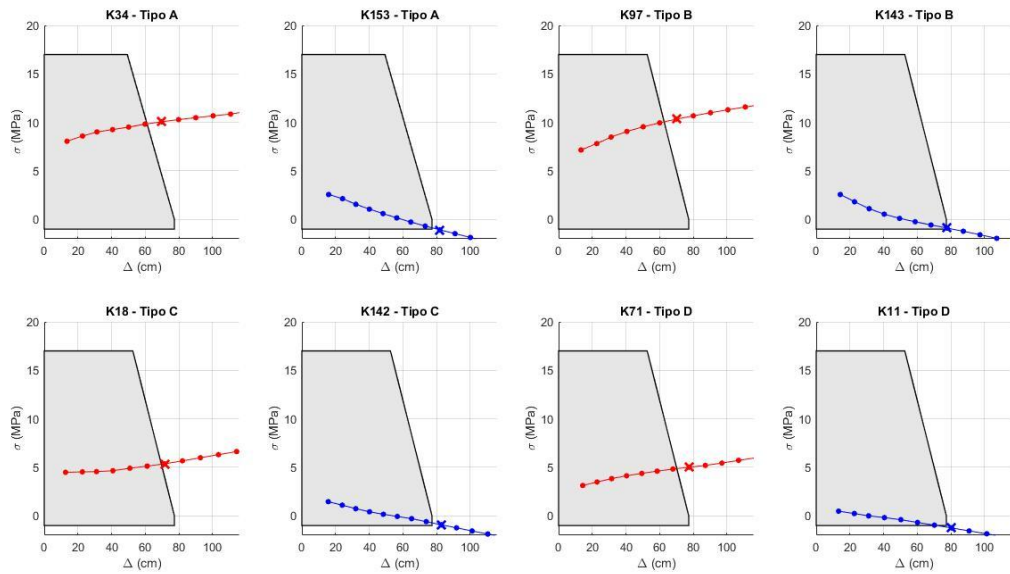


Figura 4.9 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según Eurocódigo 8.

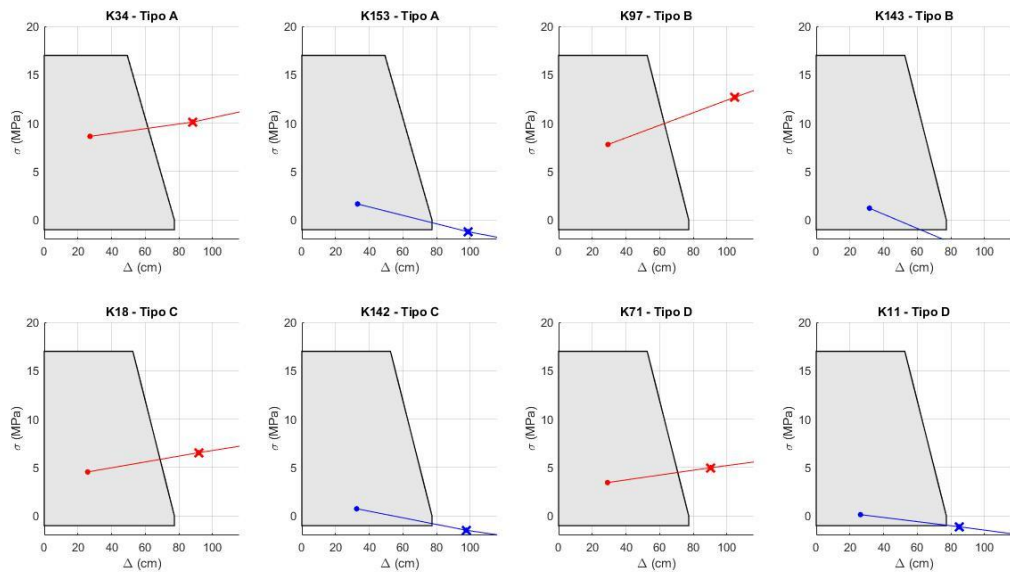


Figura 4.10 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según Eurocódigo 8.

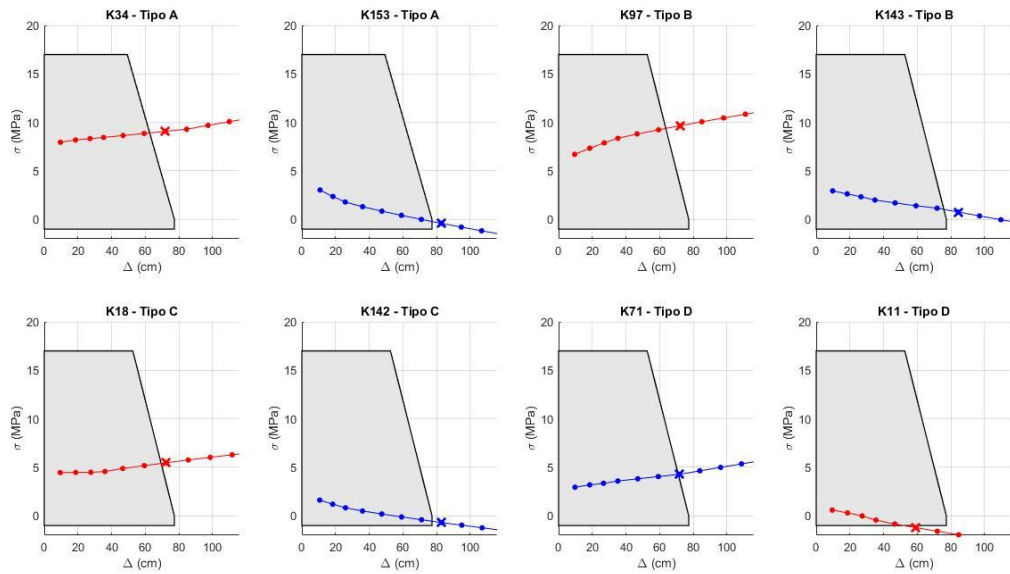


Figura 4.11 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según Eurocódigo 8.

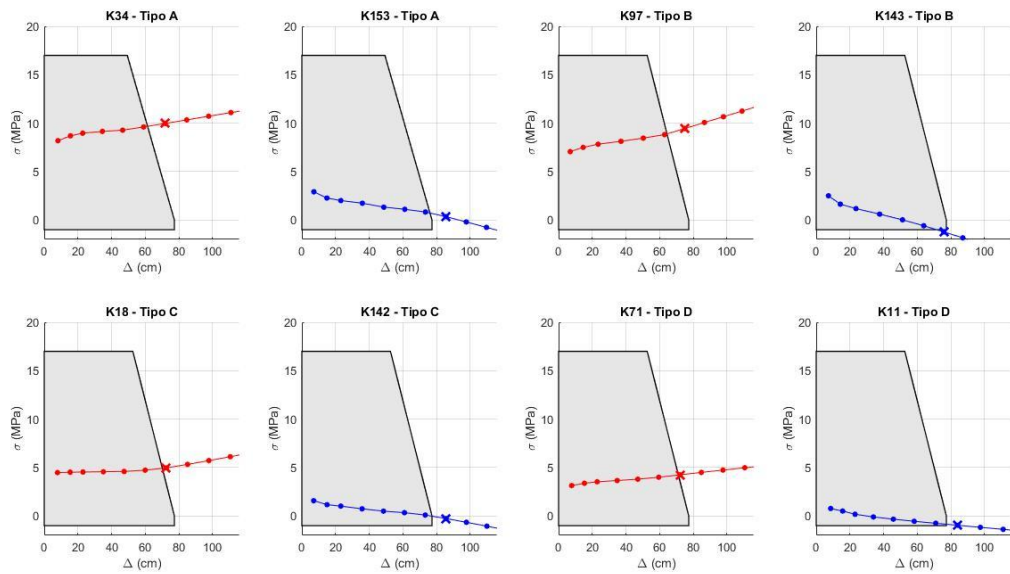


Figura 4.12 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según Eurocódigo 8.

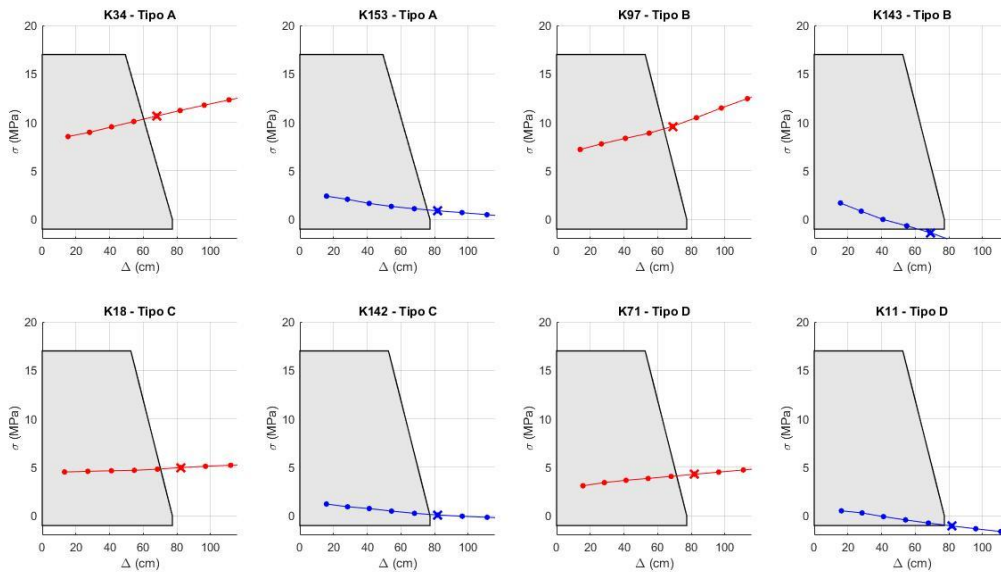


Figura 4.13 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según Eurocódigo 8.

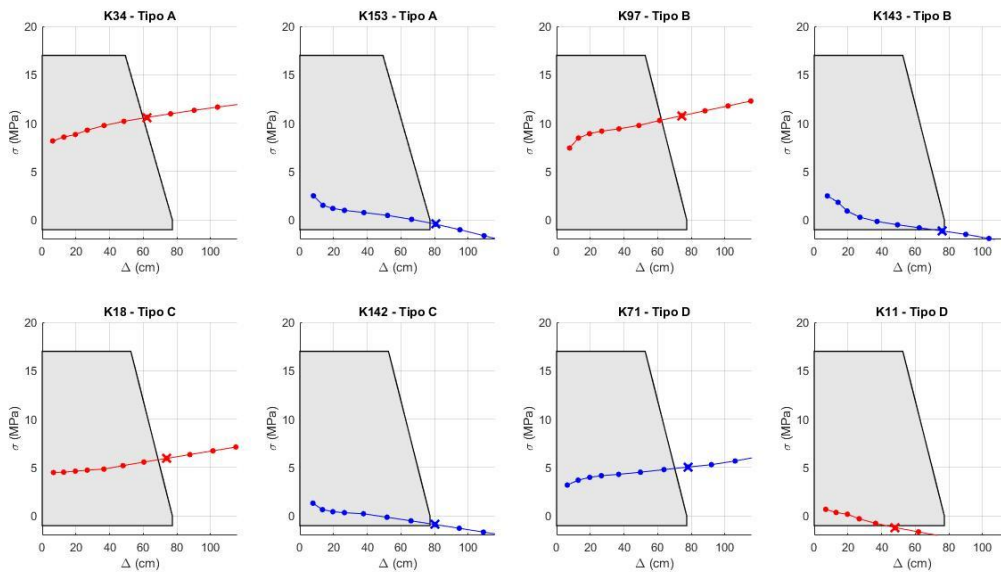


Figura 4.14 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según Eurocódigo 8.

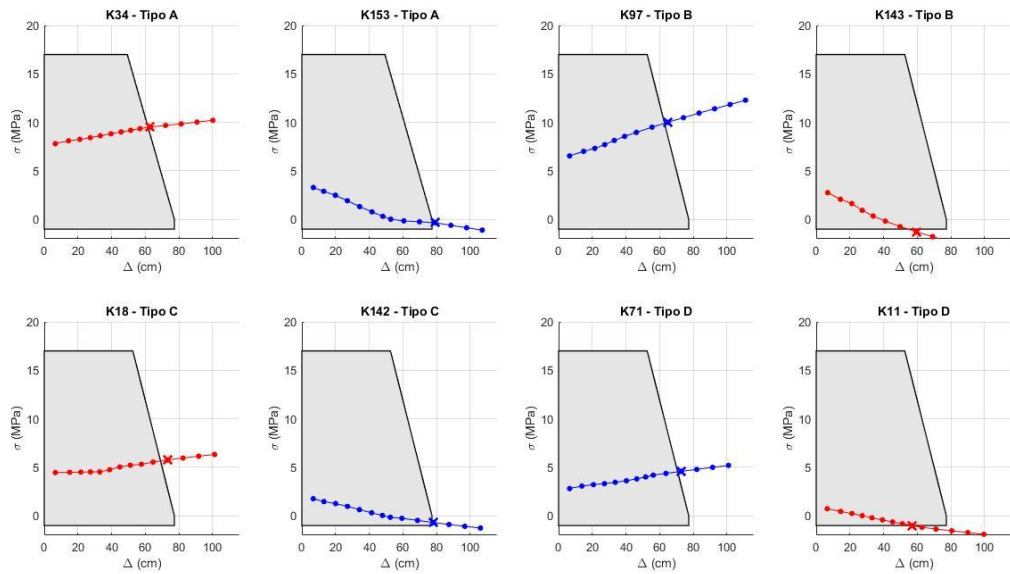


Figura 4.15 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según Eurocódigo 8.

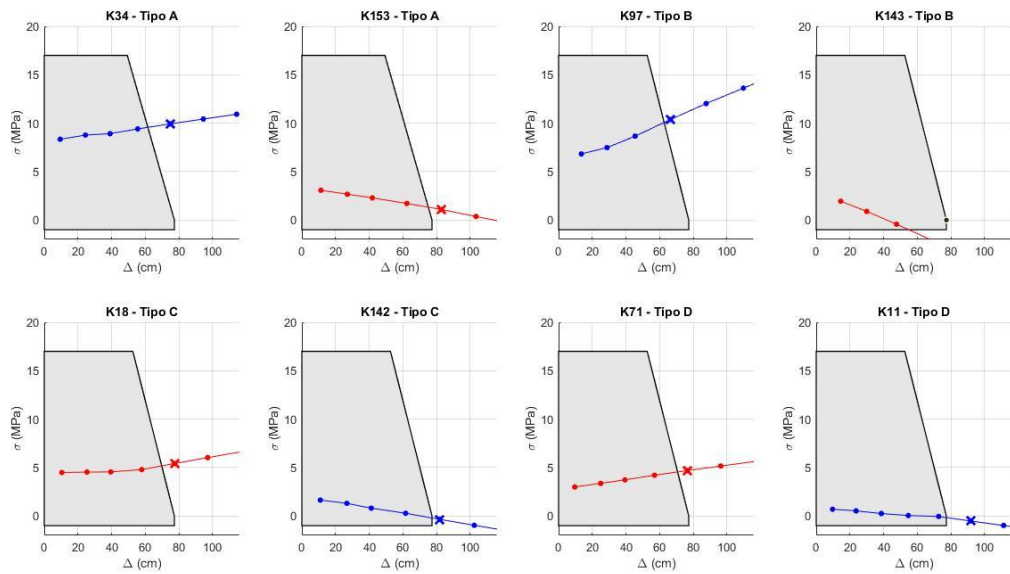


Figura 4.16 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según Eurocódigo 8.

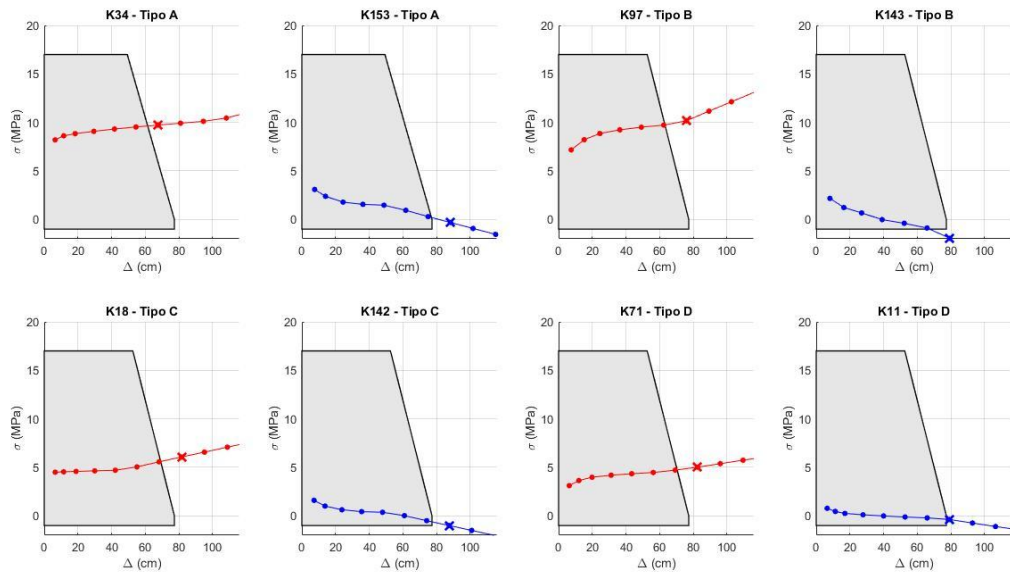


Figura 4.17 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según Eurocódigo 8.

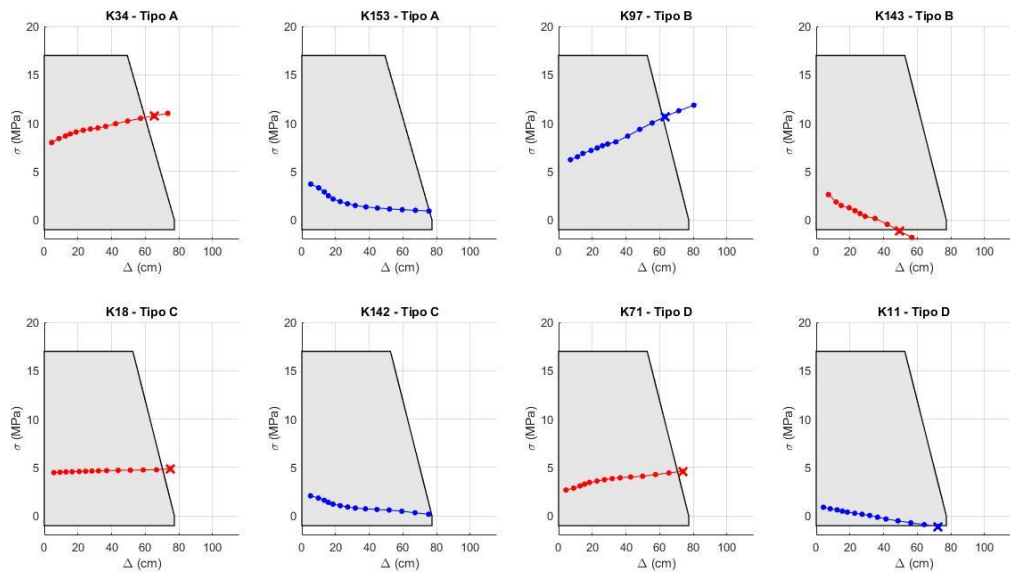


Figura 4.18 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según Eurocódigo 8.

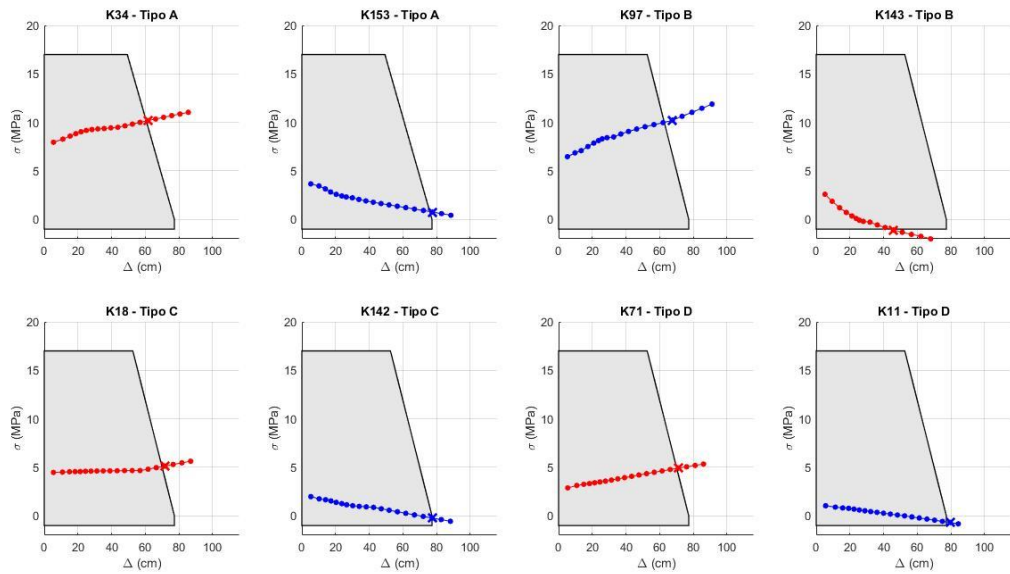


Figura 4.19 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según Eurocódigo 8.

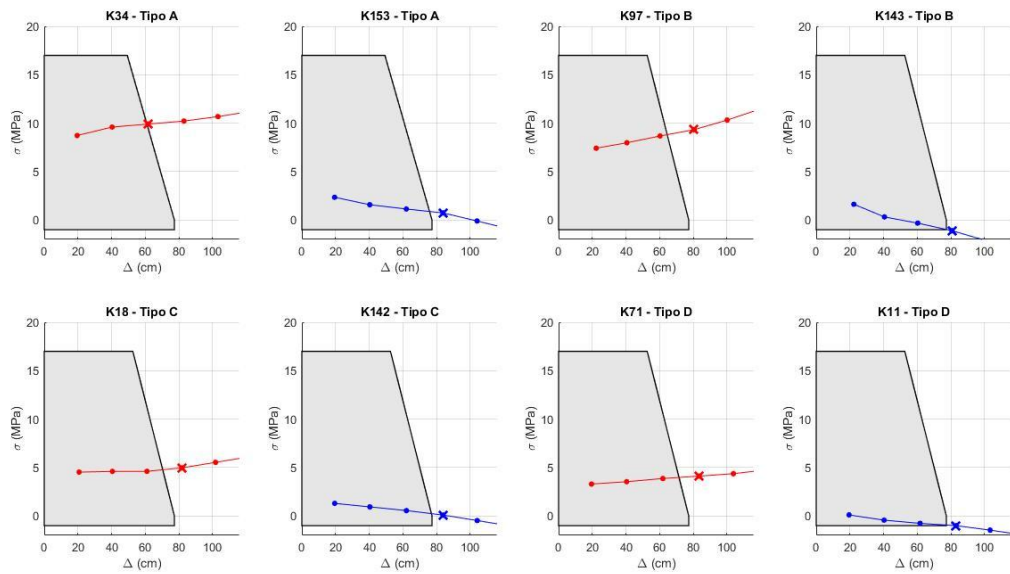


Figura 4.20 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según Eurocódigo 8.

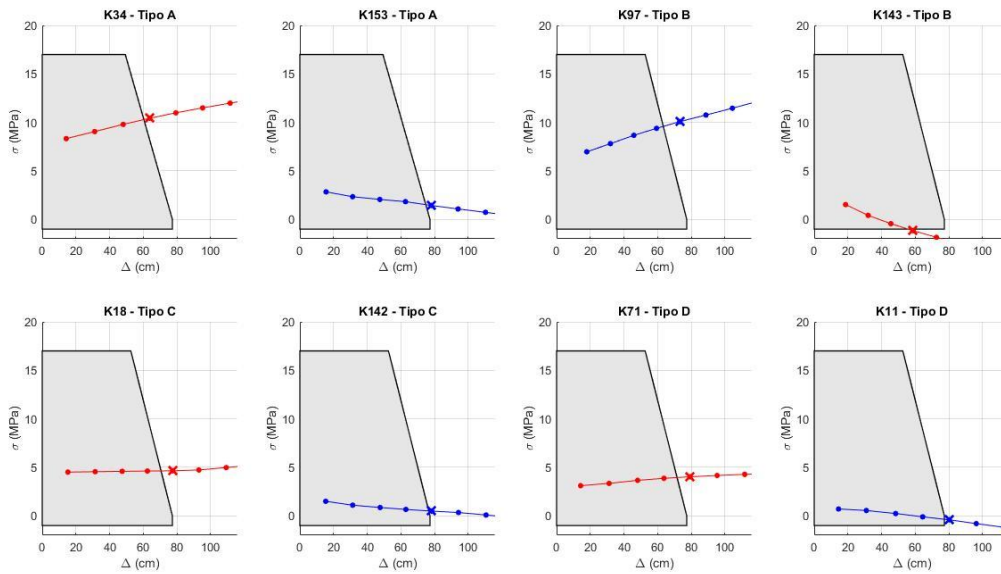


Figura 4.21 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según Eurocódigo 8.

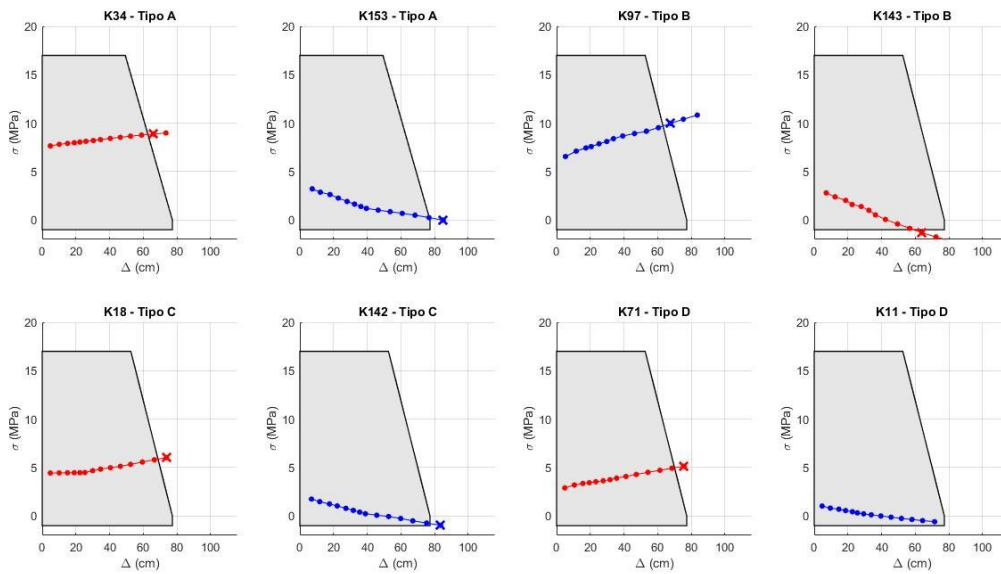


Figura 4.22 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según Eurocódigo 8.

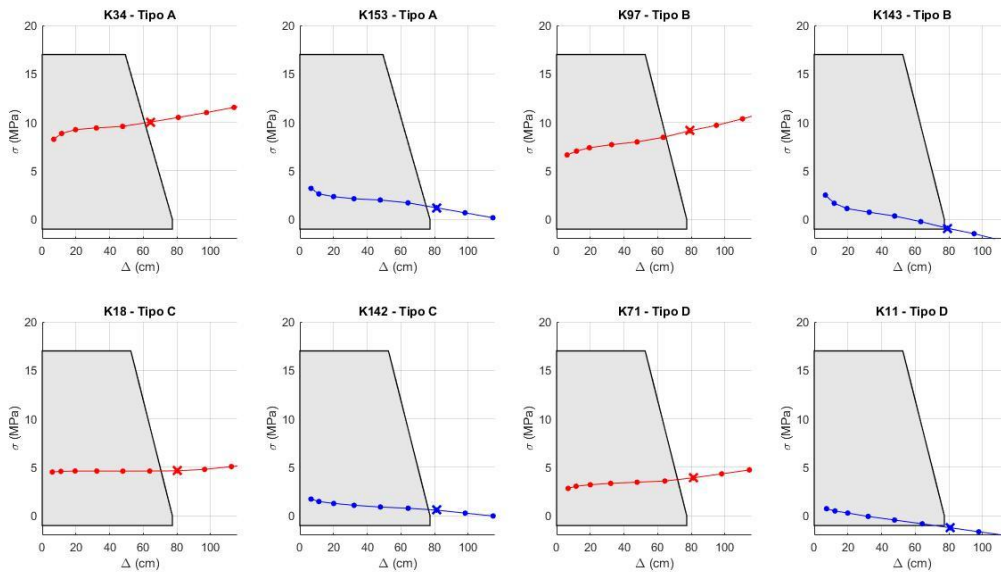


Figura 4.23 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según Eurocódigo 8.

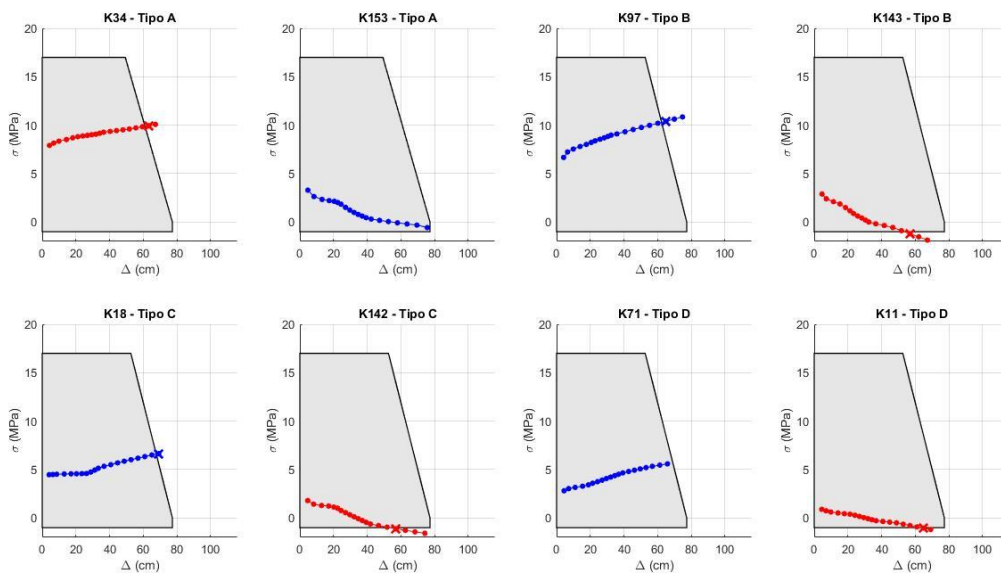


Figura 4.24 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según Eurocódigo 8.

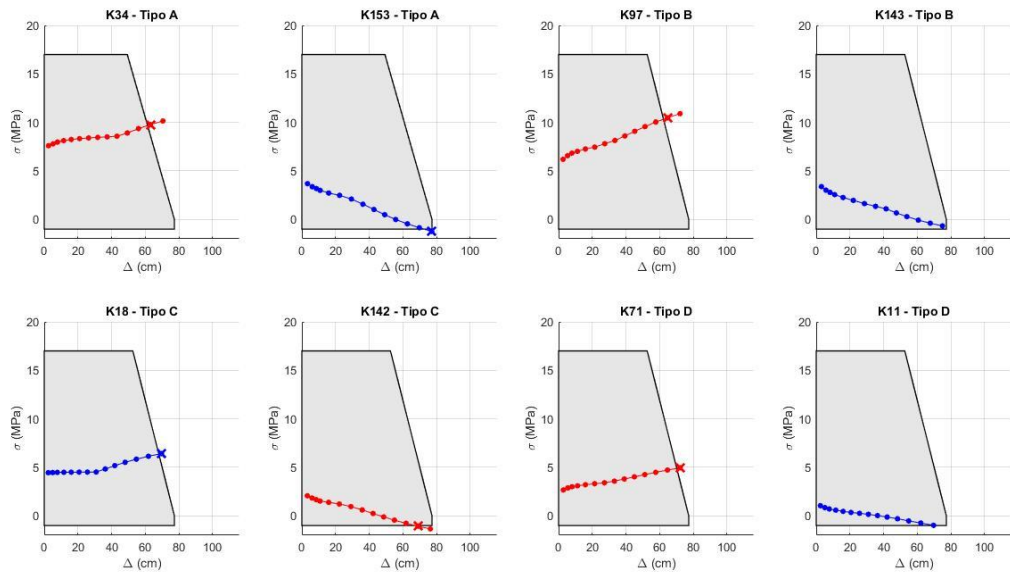


Figura 4.25 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según Eurocódigo 8.

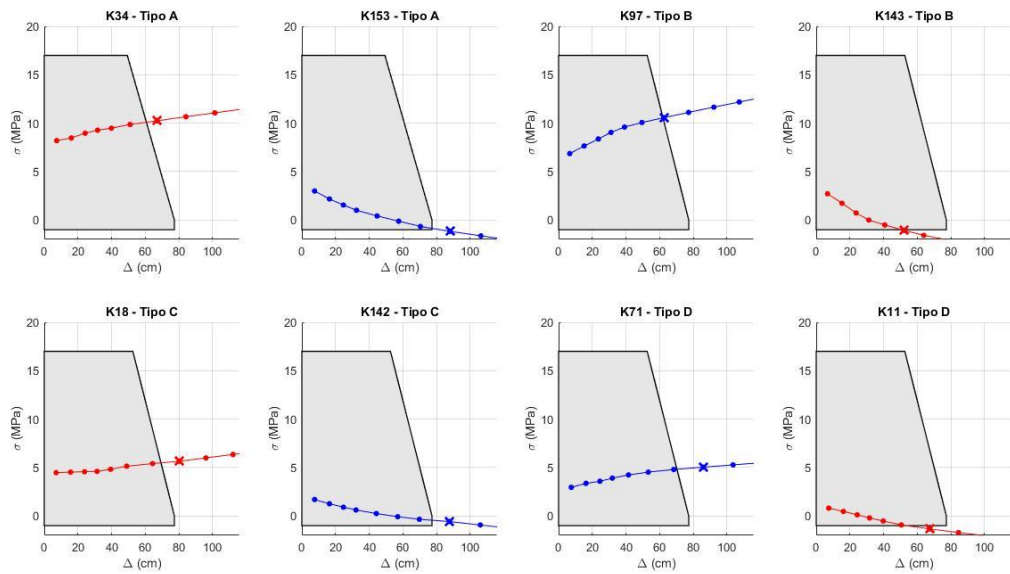


Figura 4.26 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según Eurocódigo 8.

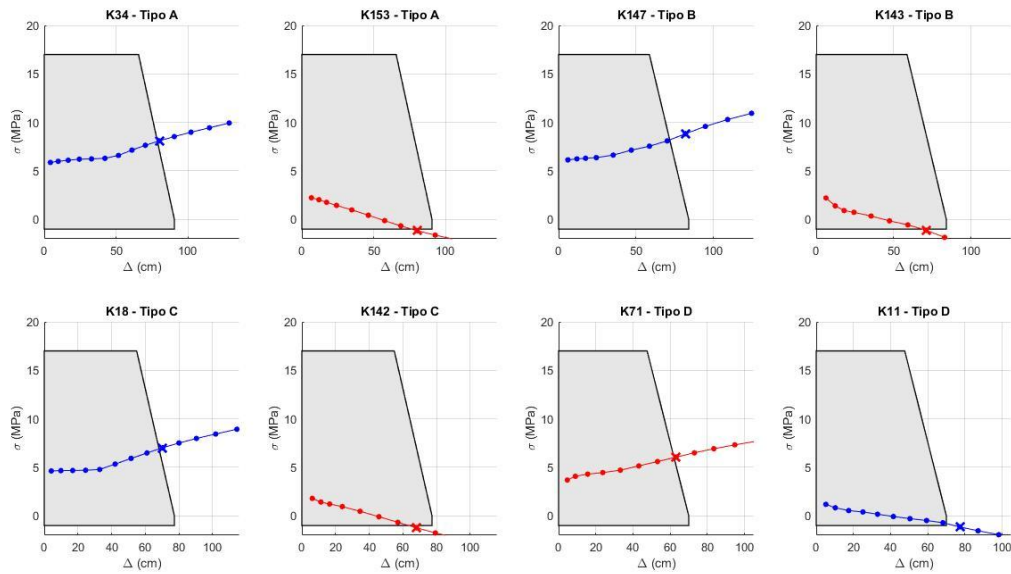


Figura 4.27 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según NCh 2745.

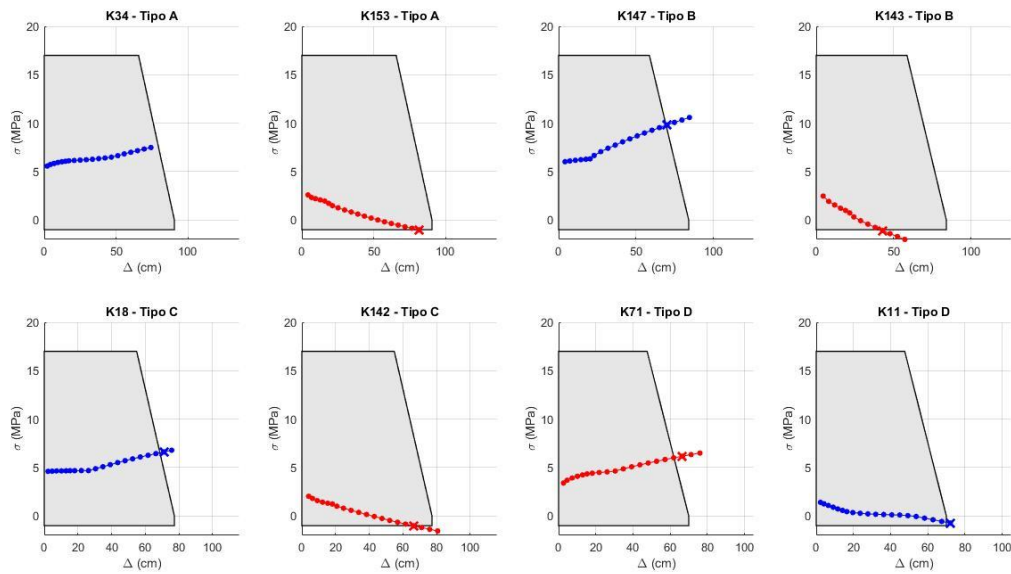


Figura 4.28 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según NCh 2745.

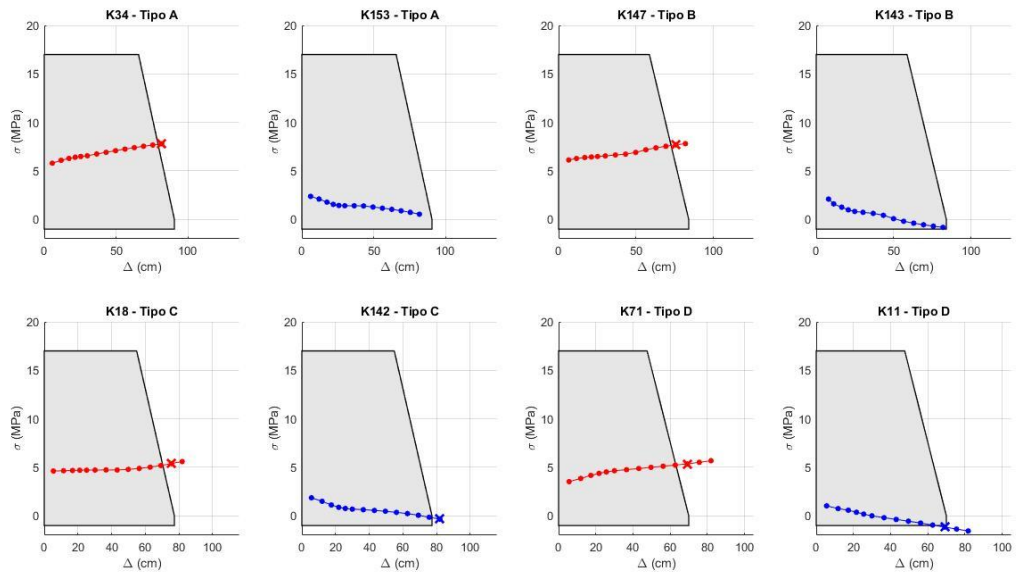


Figura 4.29 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según NCh 2745.

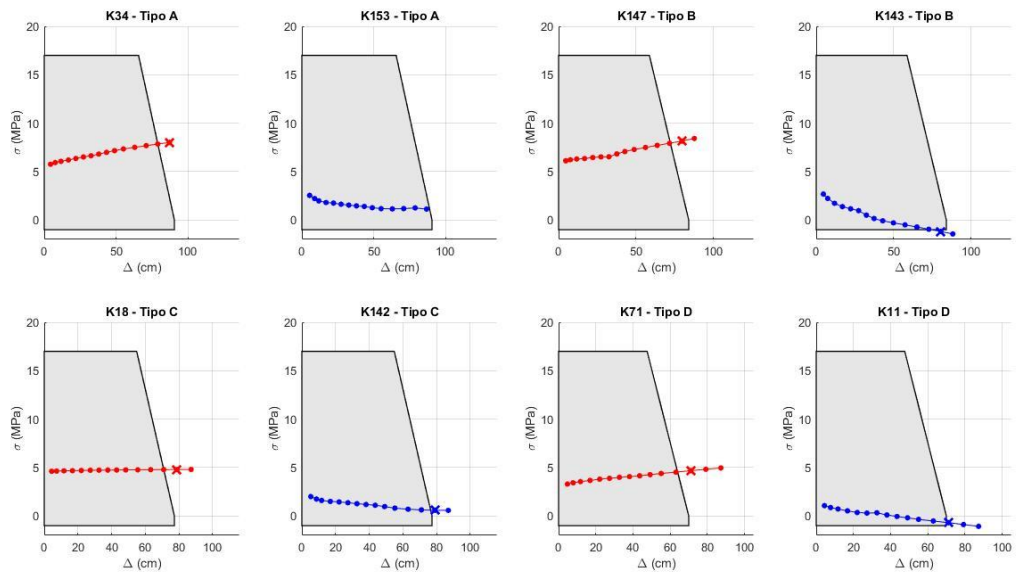


Figura 4.30 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según NCh 2745.

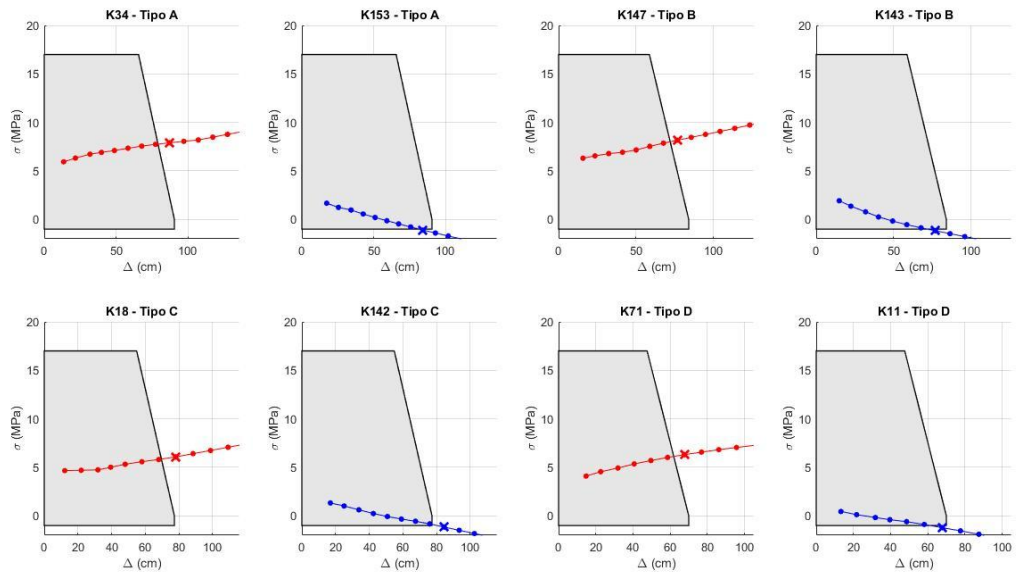


Figura 4.31 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según NCh 2745.

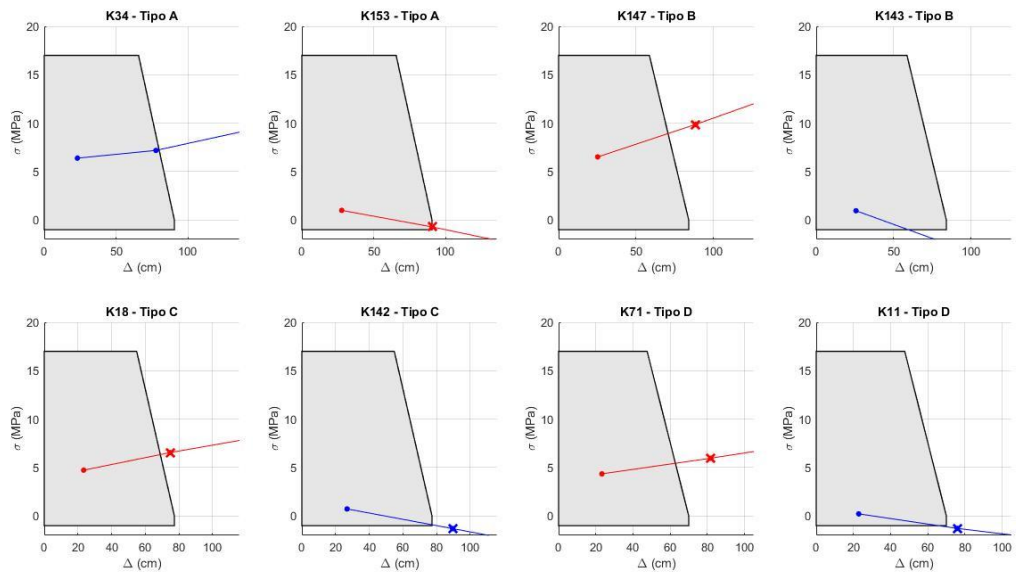


Figura 4.32 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según NCh 2745.

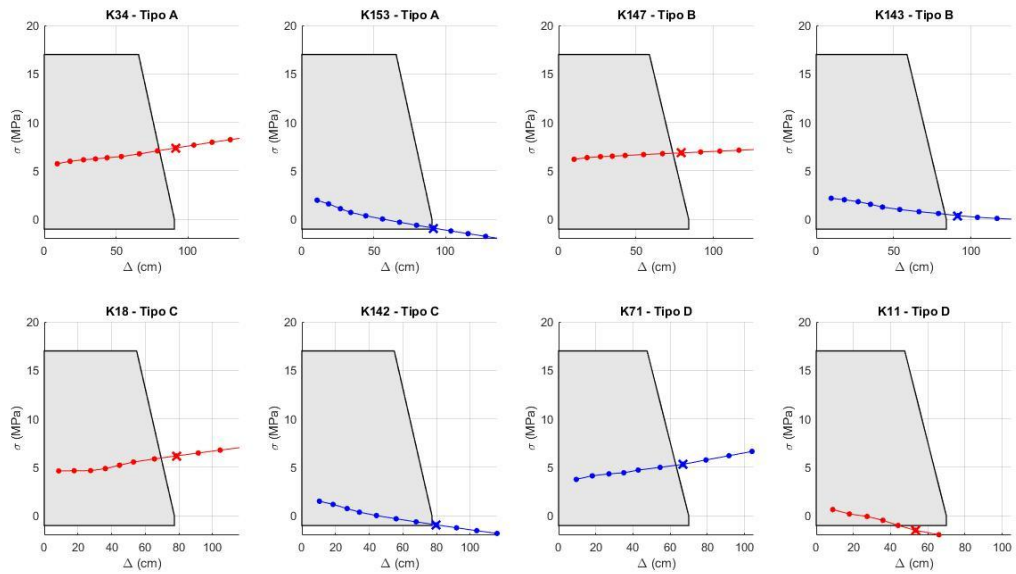


Figura 4.33 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según NCh 2745.

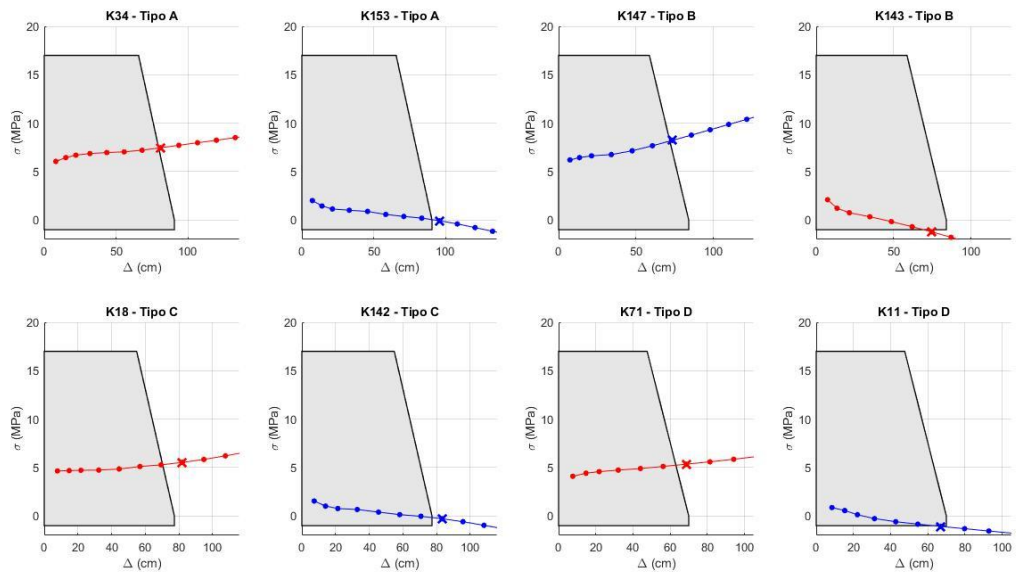


Figura 4.34 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según NCh 2745.

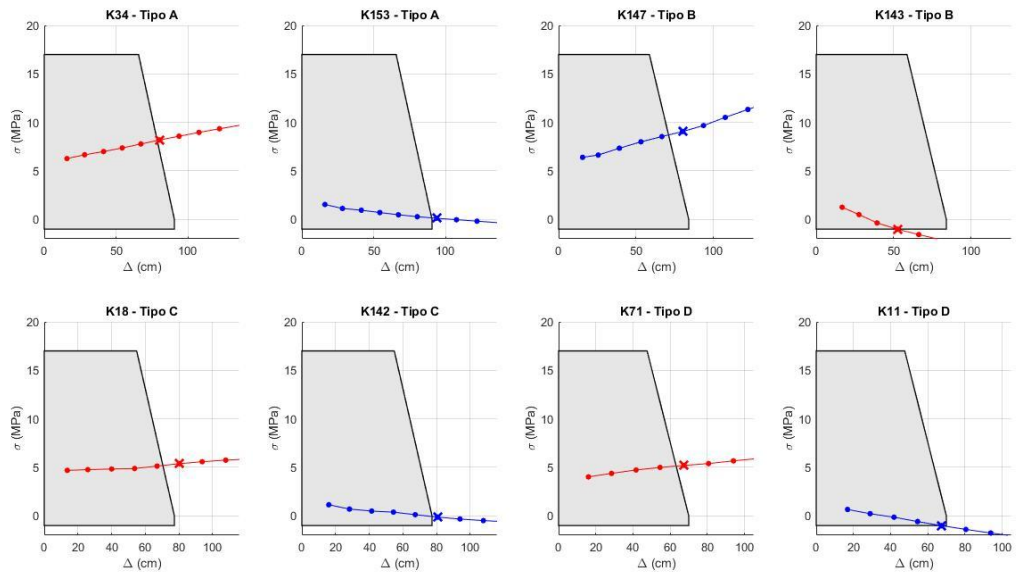


Figura 4.35 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según NCh 2745.

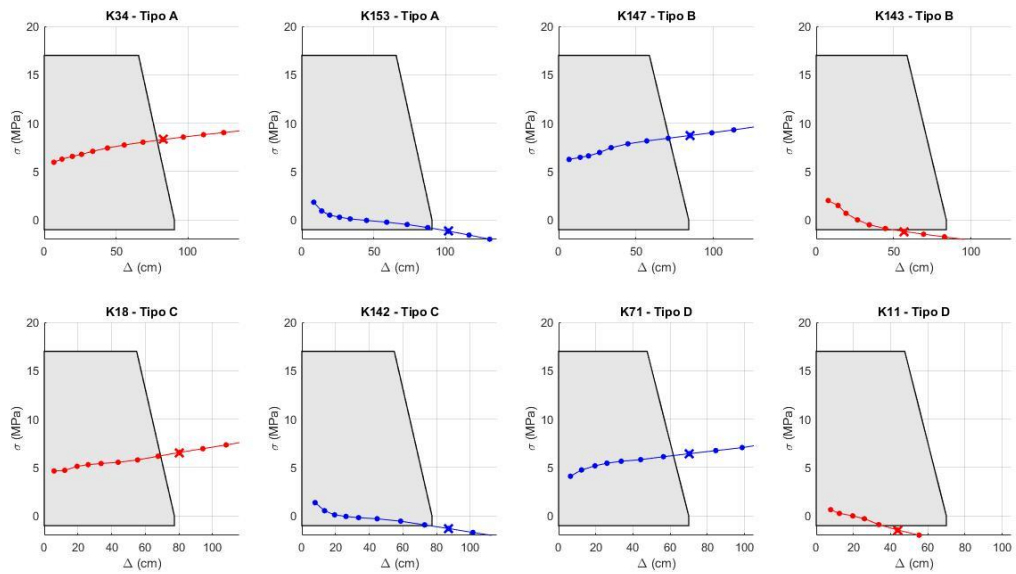


Figura 4.36 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según NCh 2745.

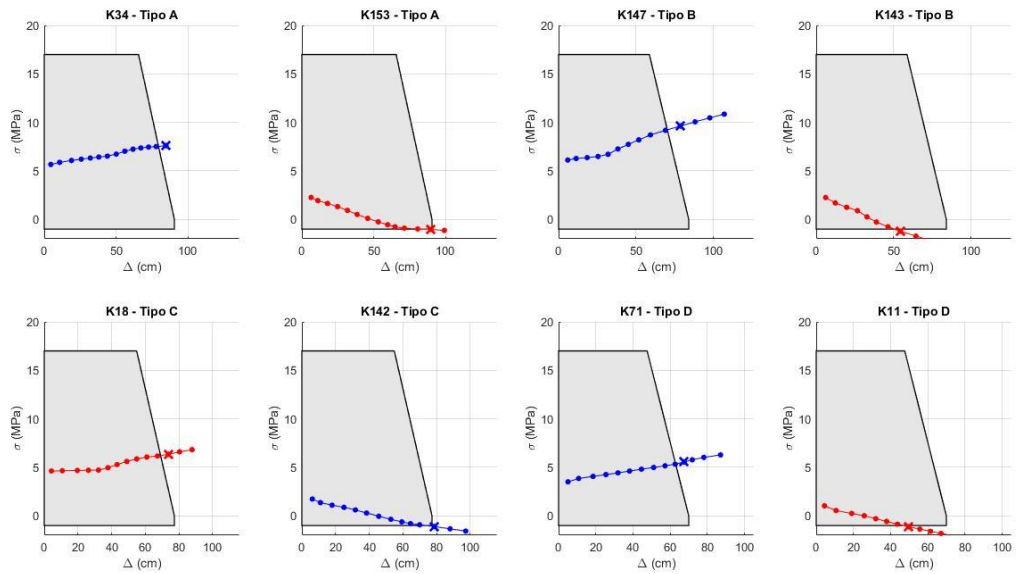


Figura 4.37 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según NCh 2745.

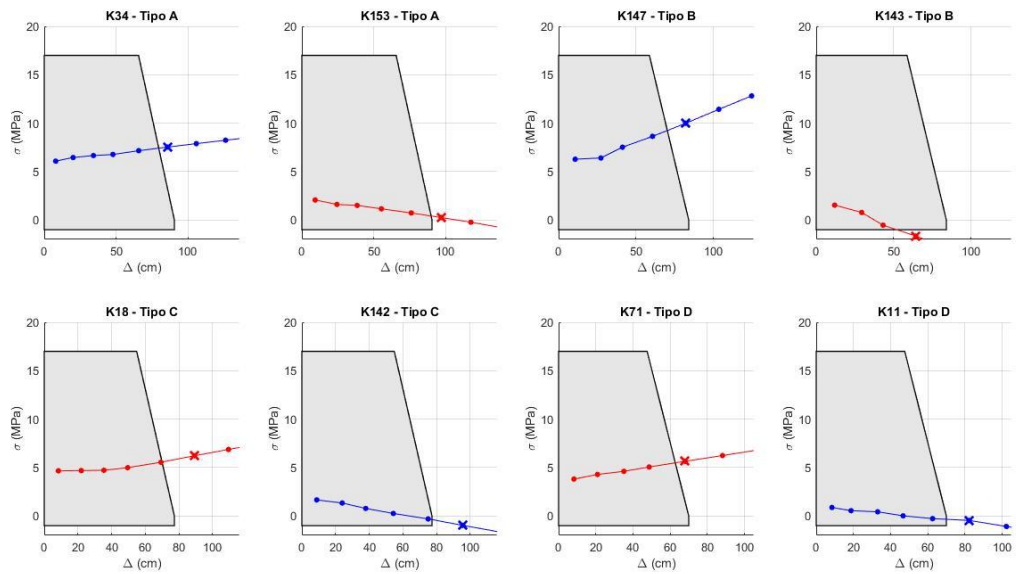


Figura 4.38 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según NCh 2745.

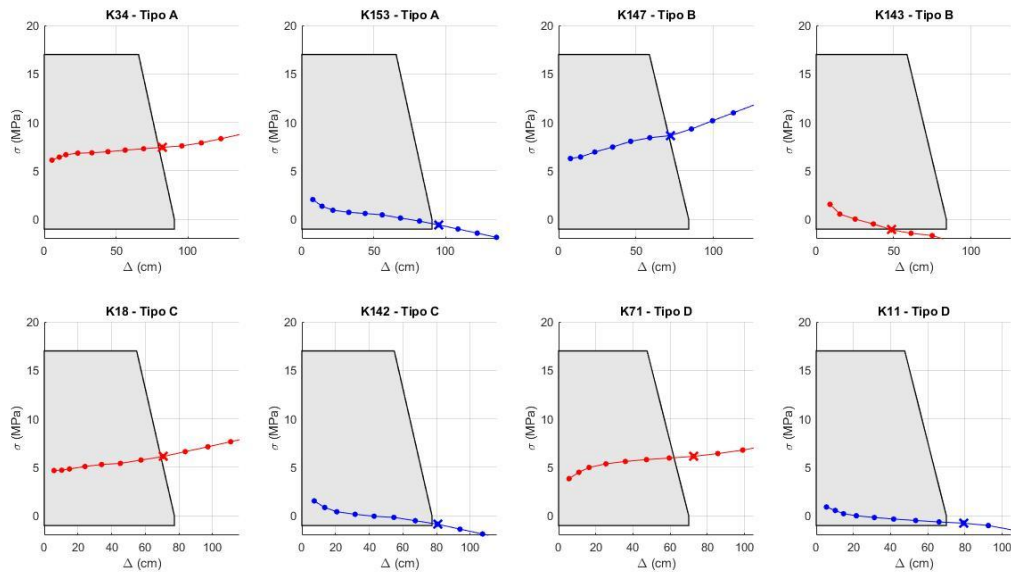


Figura 4.39 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según NCh 2745.

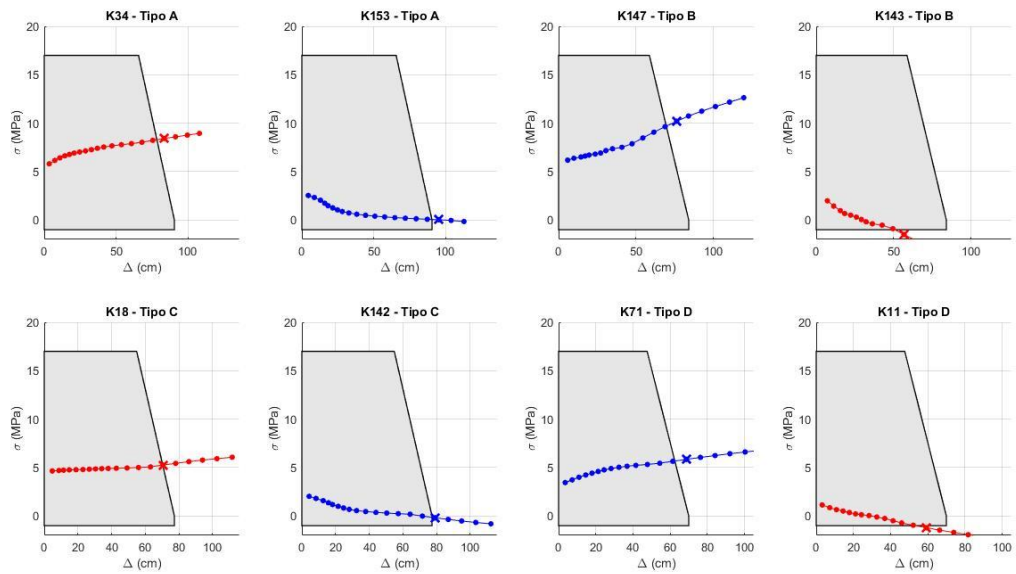


Figura 4.40 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según NCh 2745.

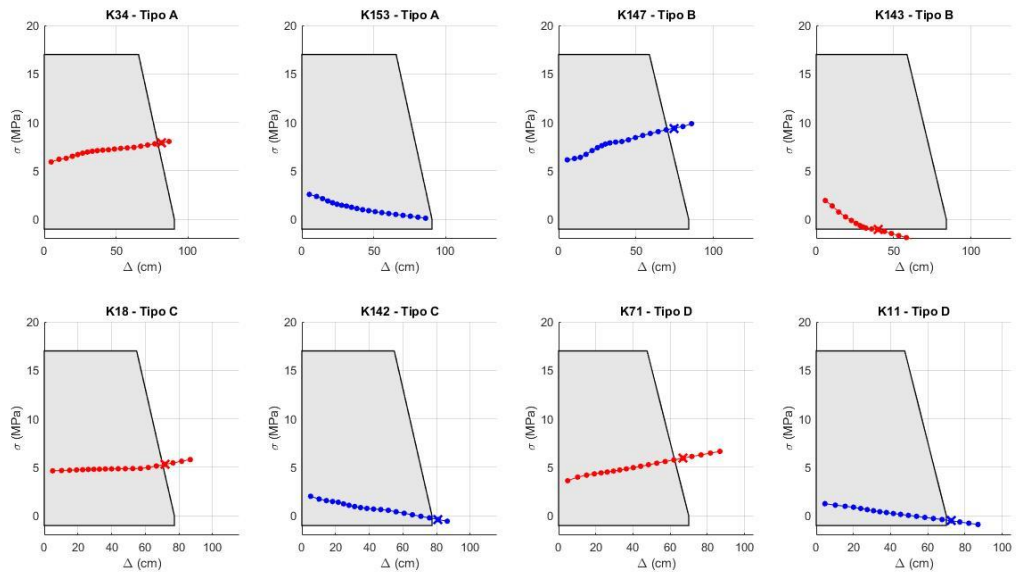


Figura 4.41 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según NCh 2745.

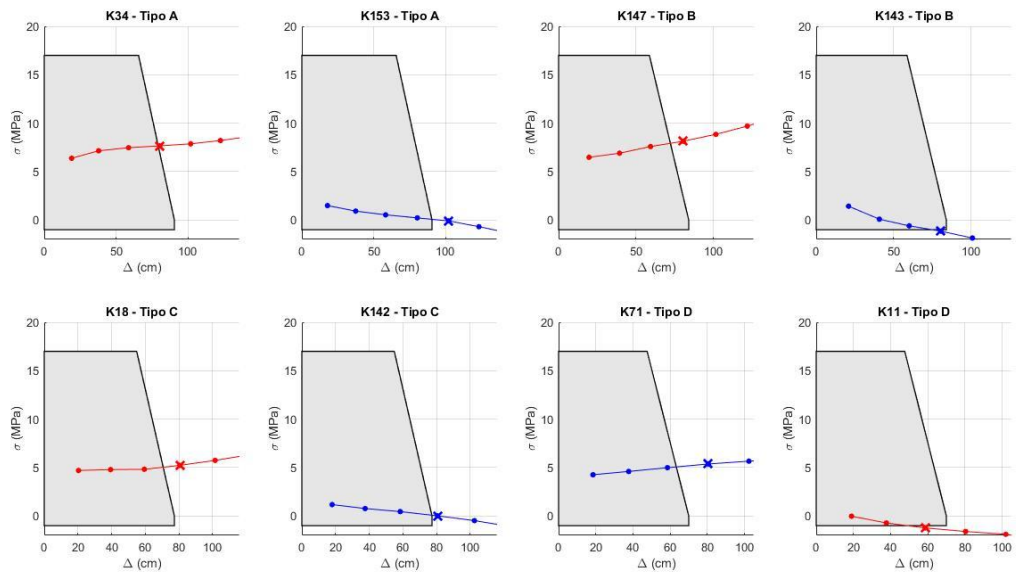


Figura 4.42 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según NCh 2745.

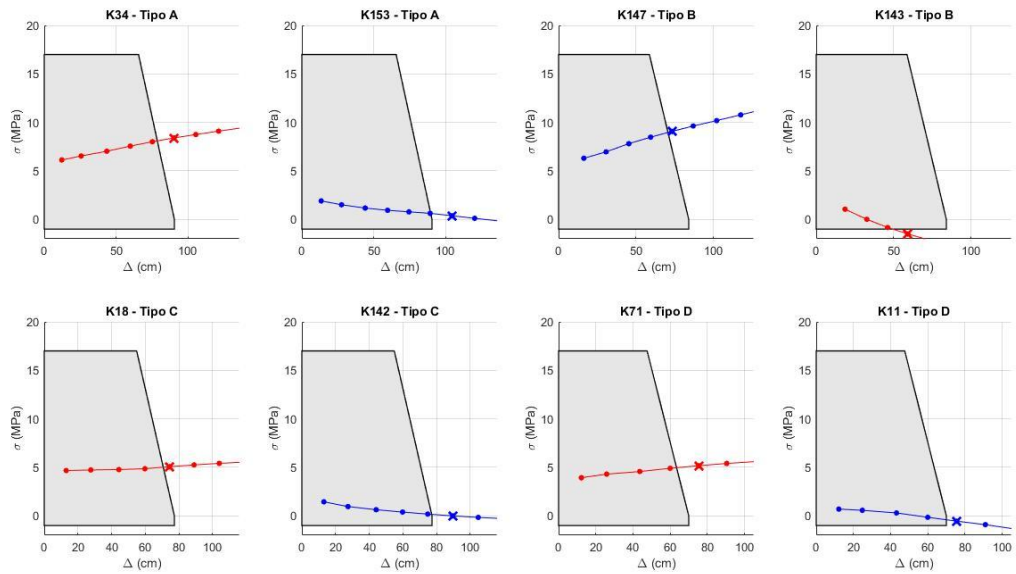


Figura 4.43 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según NCh 2745.

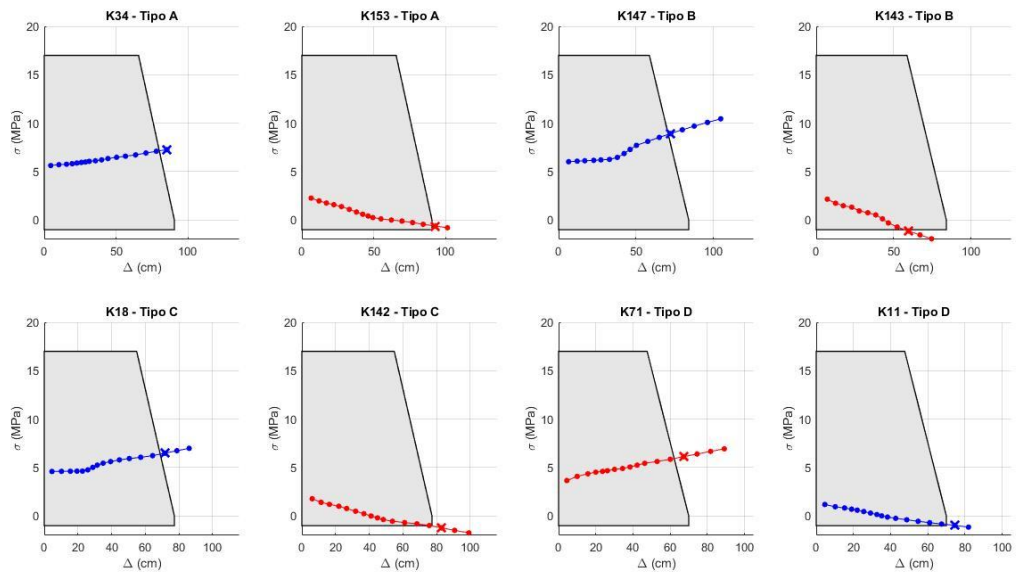


Figura 4.44 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según NCh 2745.

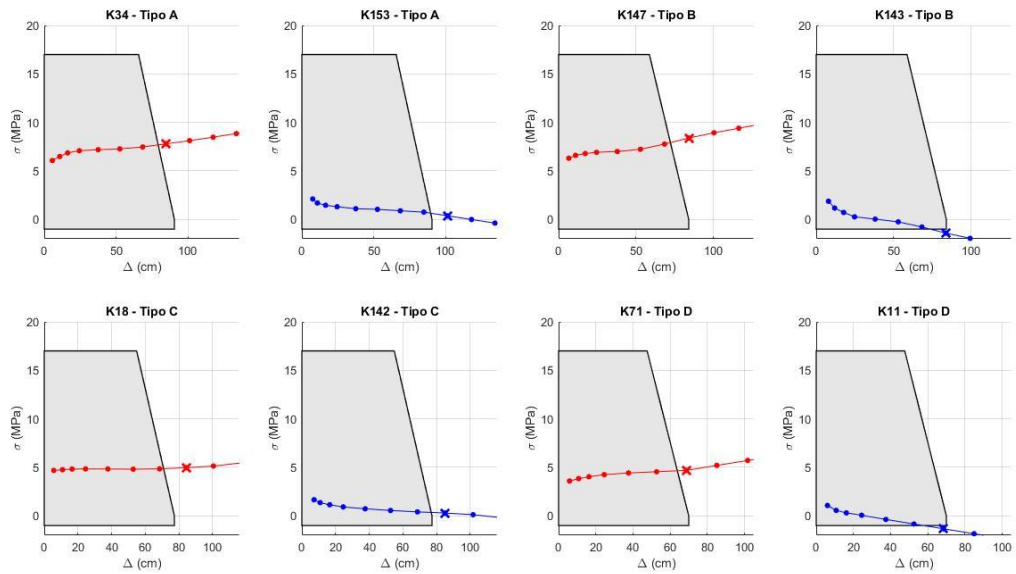


Figura 4.45 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según NCh 2745.

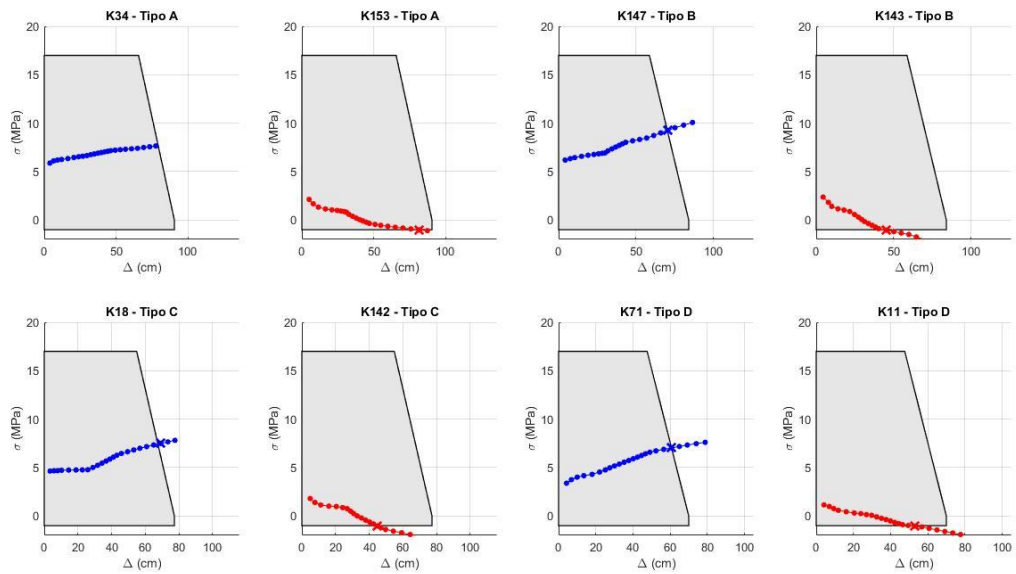


Figura 4.46 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según NCh 2745.

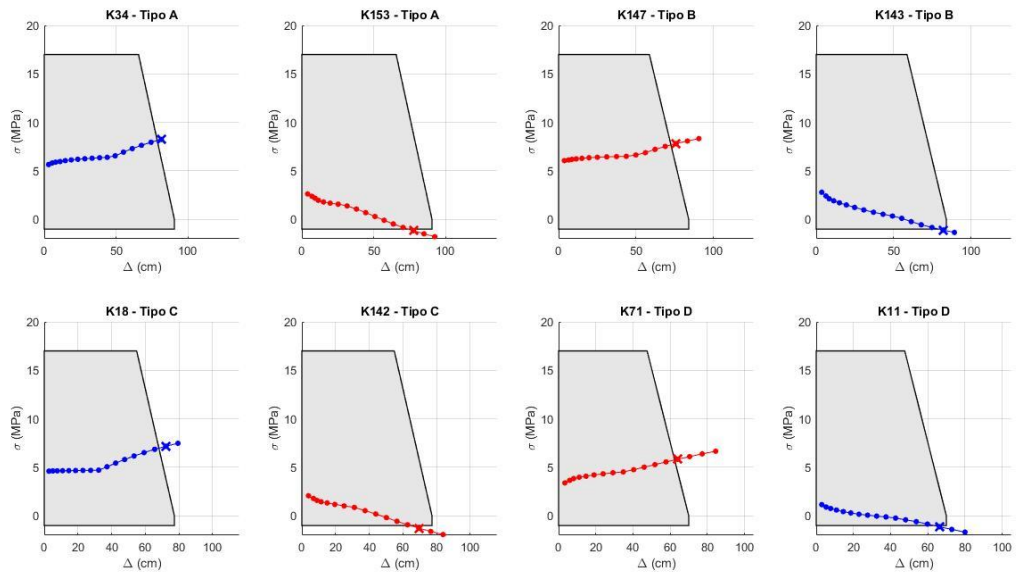


Figura 4.47 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según NCh 2745.

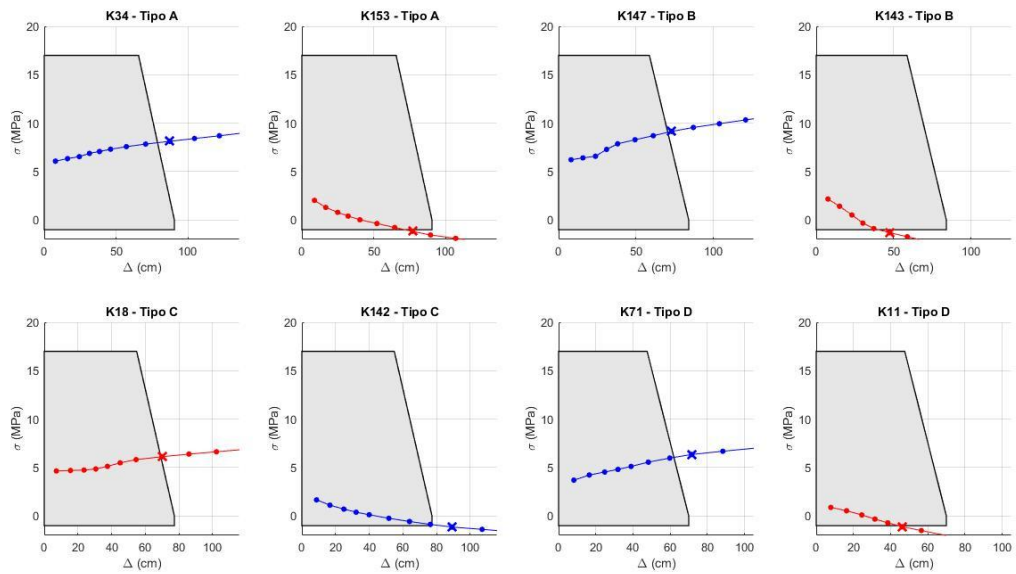


Figura 4.48 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según NCh 2745.

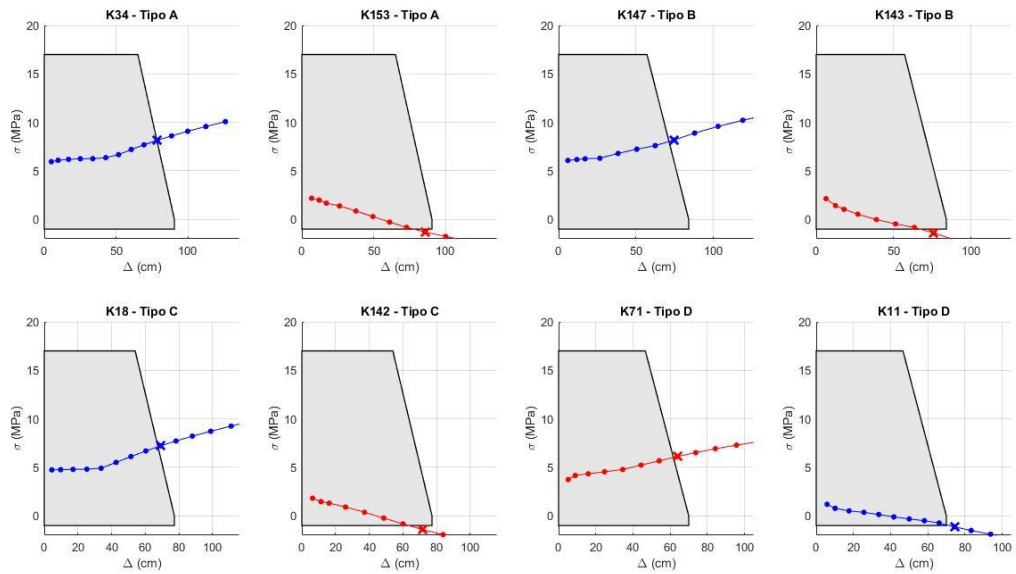


Figura 4.49 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según NTE E.031.

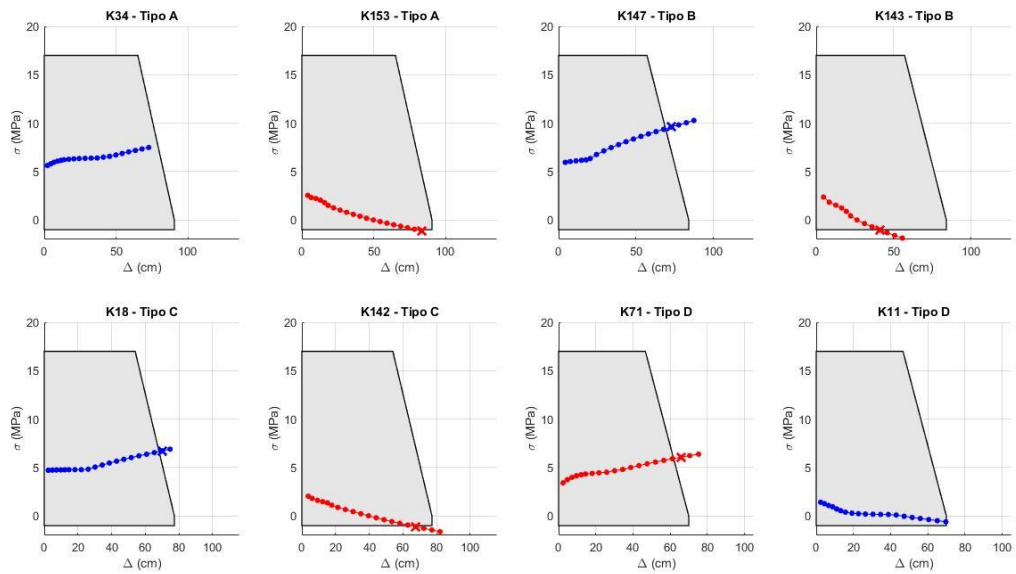


Figura 4.50 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según NTE E.031.

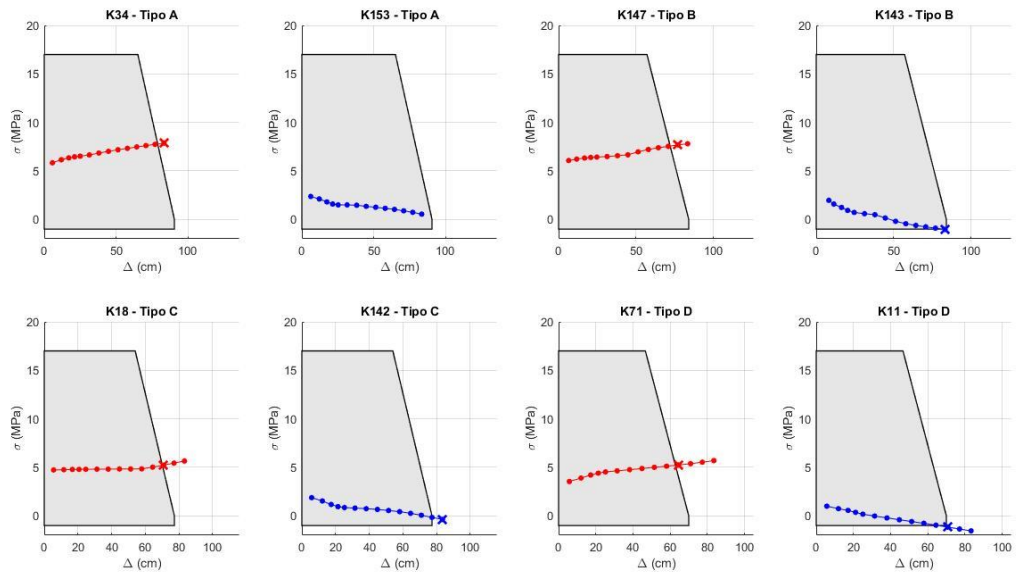


Figura 4.51 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según NTE E.031.

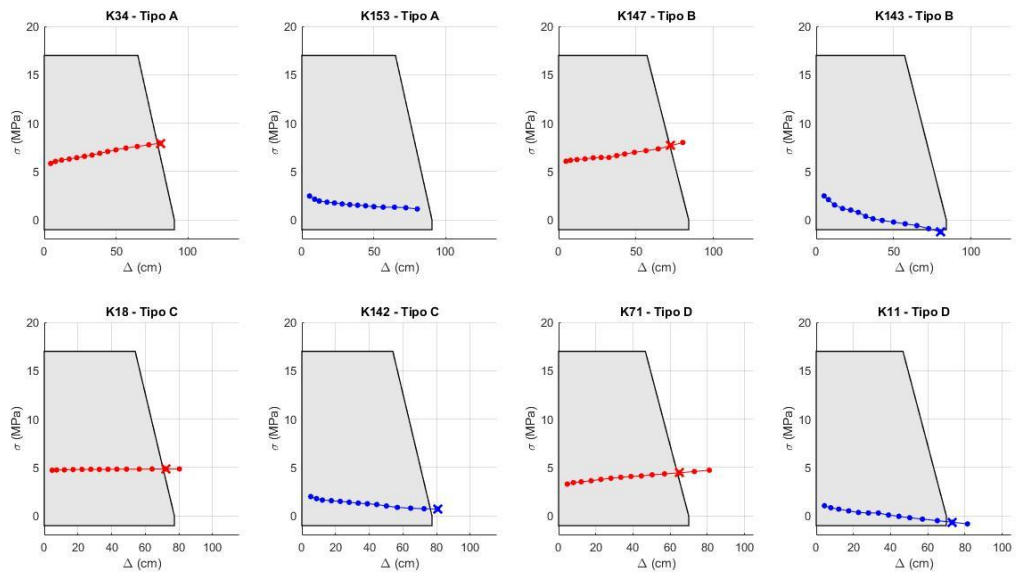


Figura 4.52 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según NTE E.031.

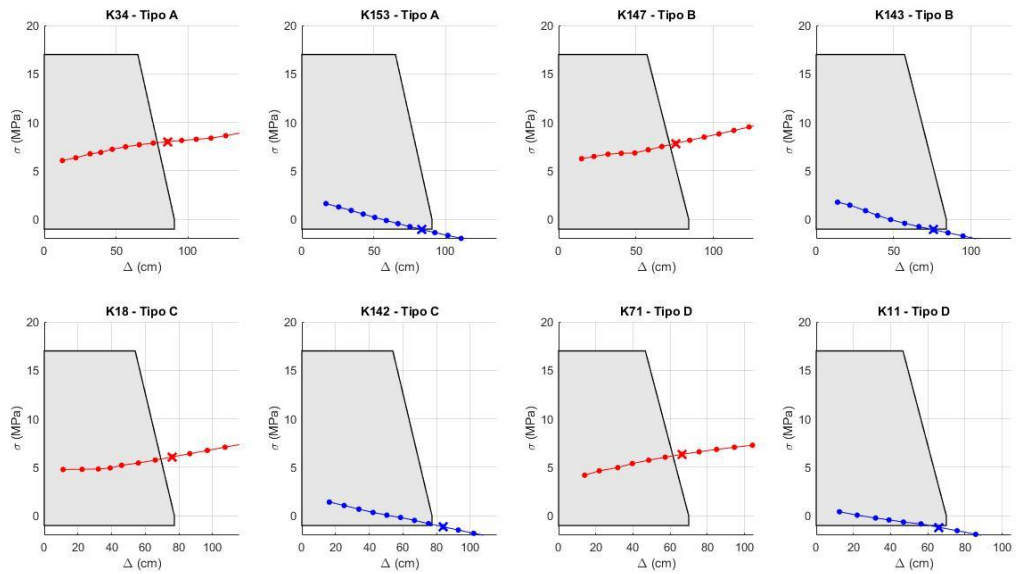


Figura 4.53 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según NTE E.031.

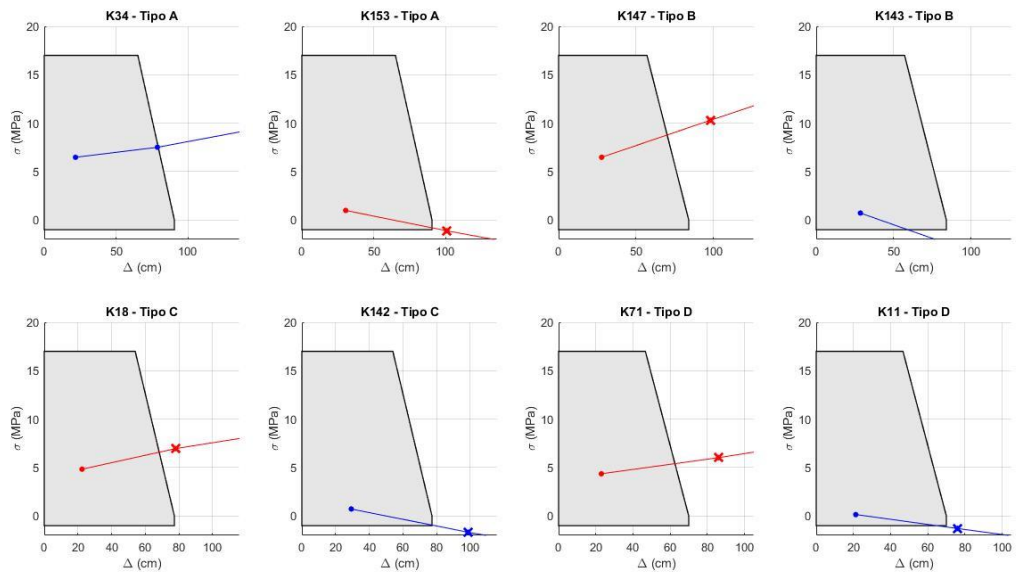


Figura 4.54 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según NTE E.031.

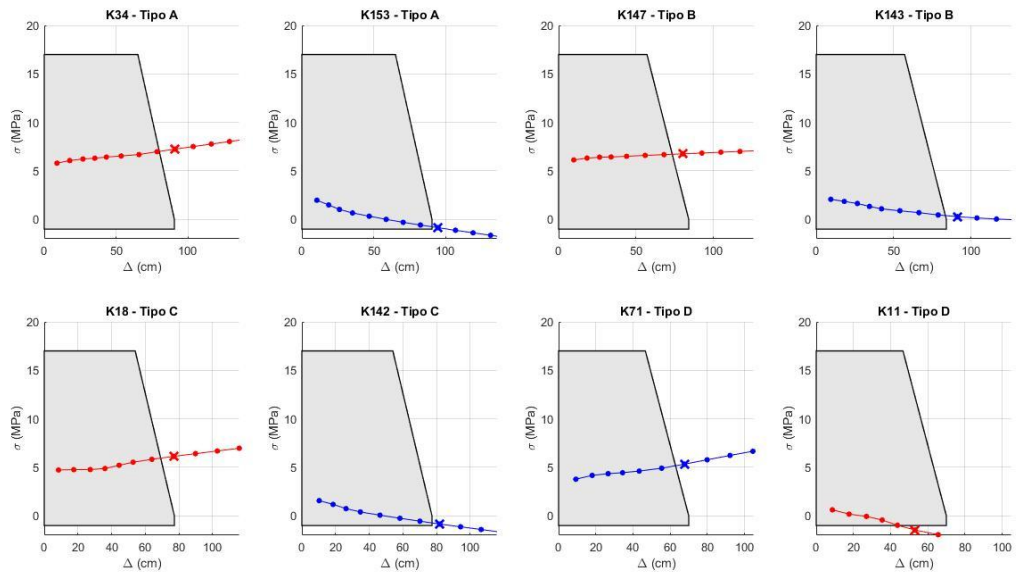


Figura 4.55 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según NTE E.031.

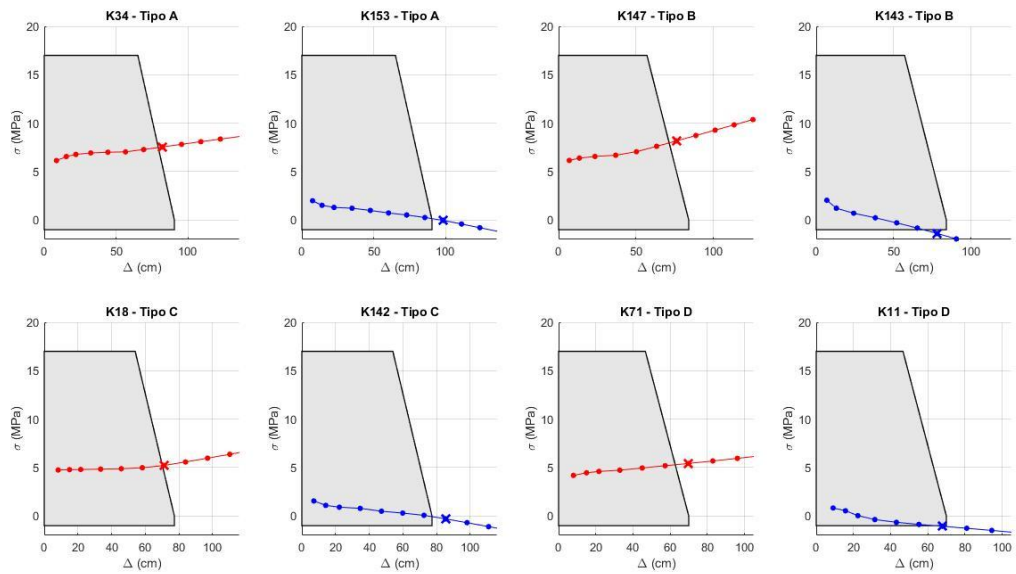


Figura 4.56 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según NTE E.031.

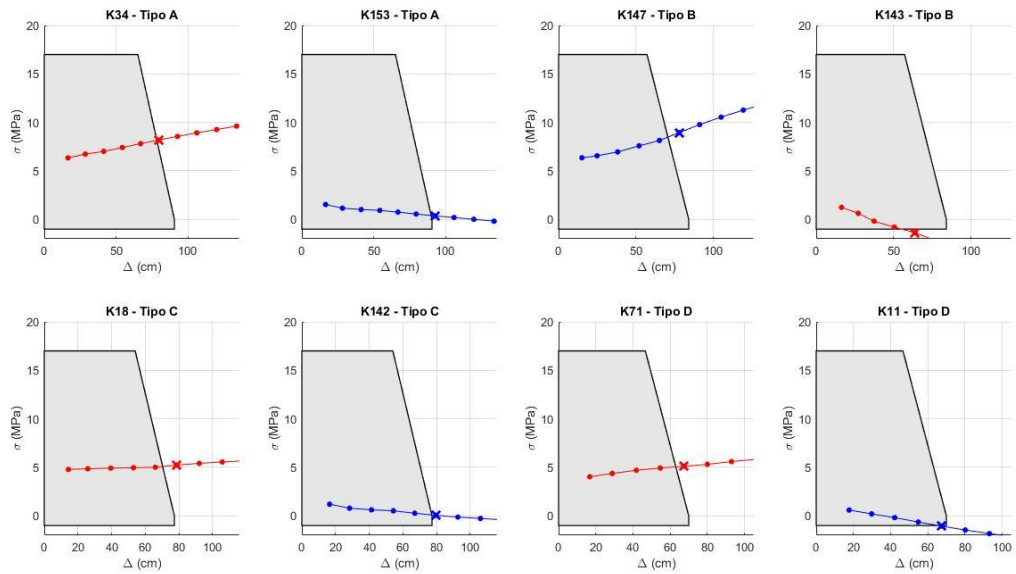


Figura 4.57 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según NTE E.031.

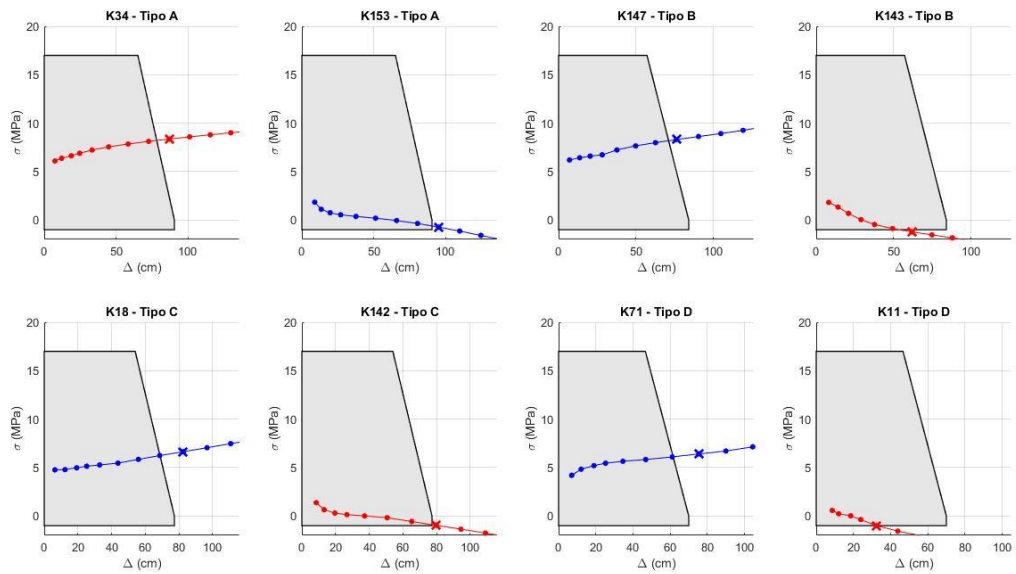


Figura 4.58 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según NTE E.031.

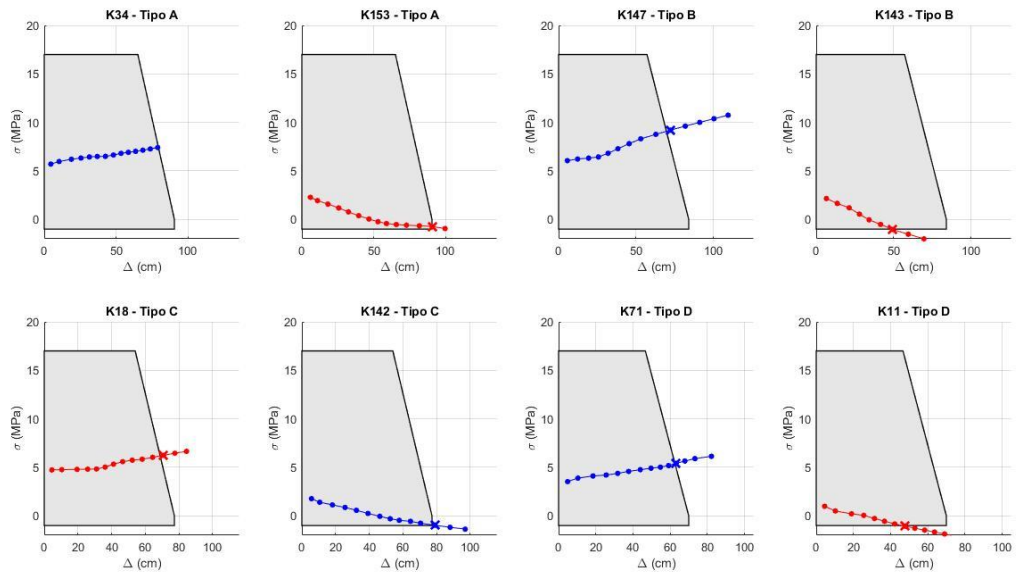


Figura 4.59 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según NTE E.031.

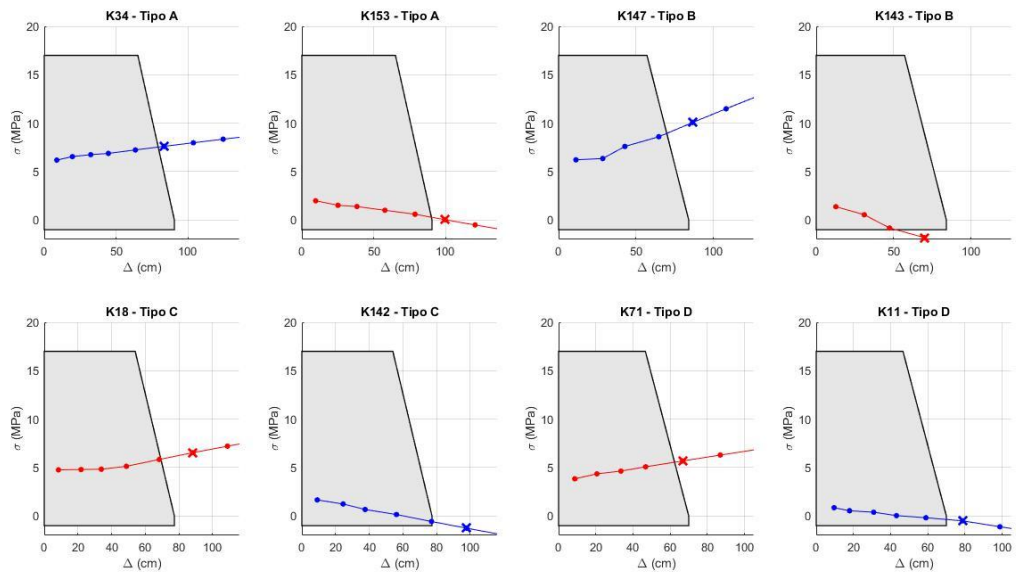


Figura 4.60 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según NTE E.031.

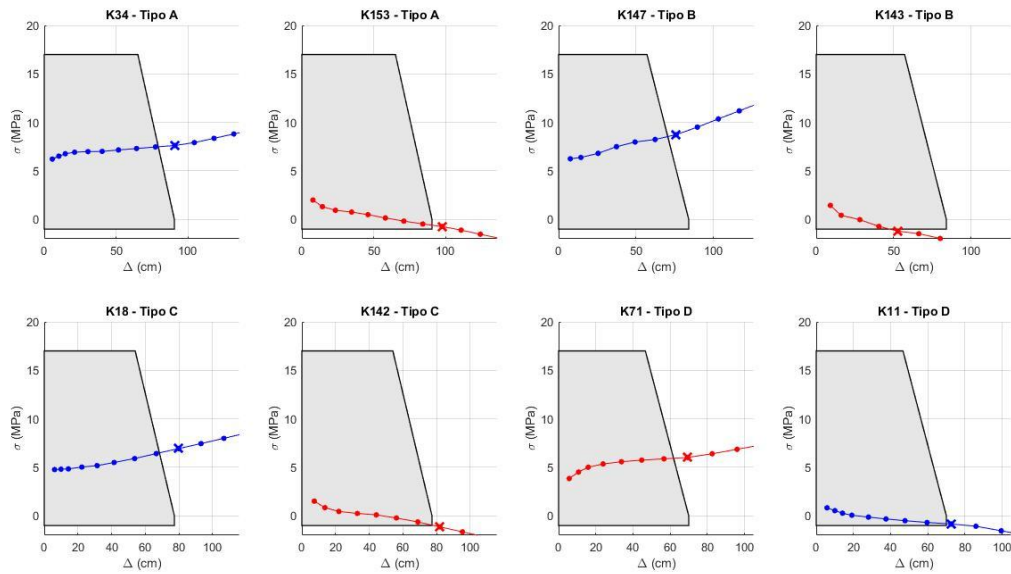


Figura 4.61 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según NTE E.031.

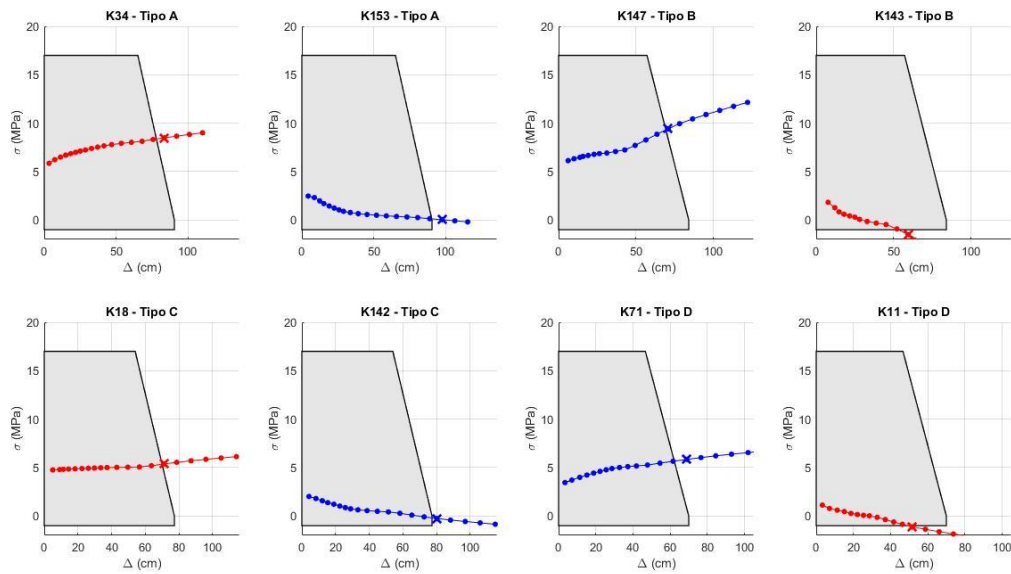


Figura 4.62 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según NTE E.031.

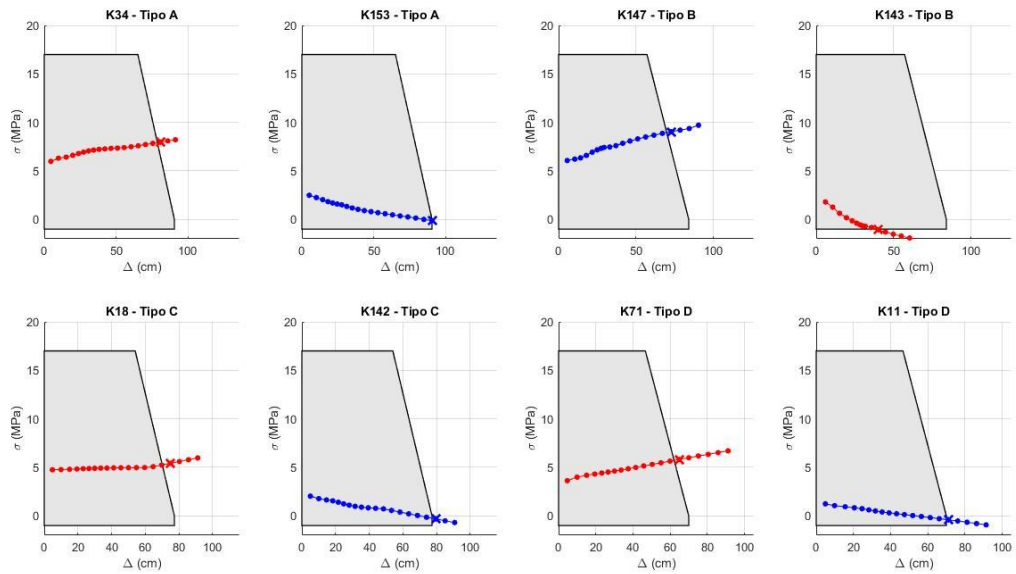


Figura 4.63 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según NTE E.031.

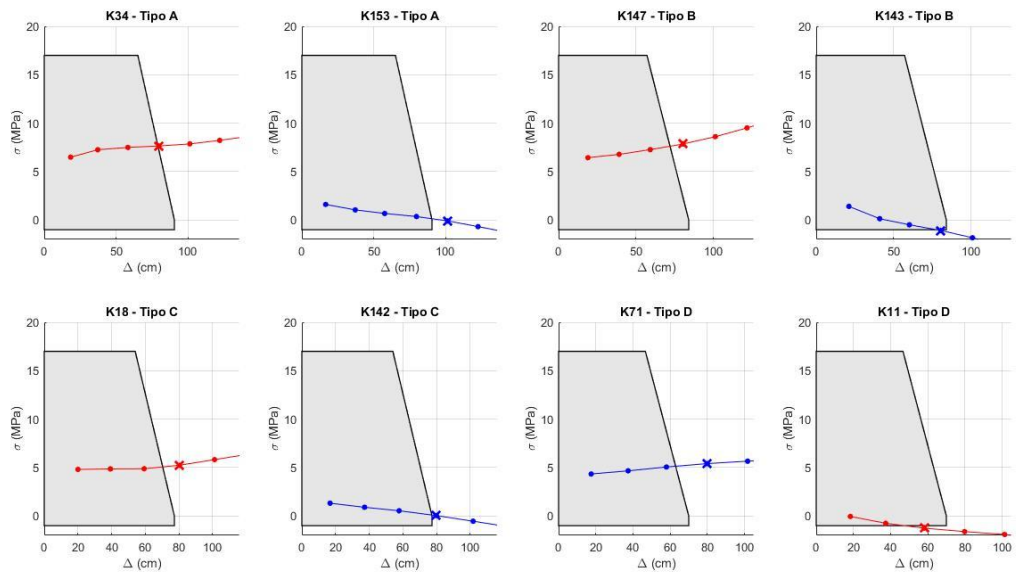


Figura 4.64 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según NTE E.031.

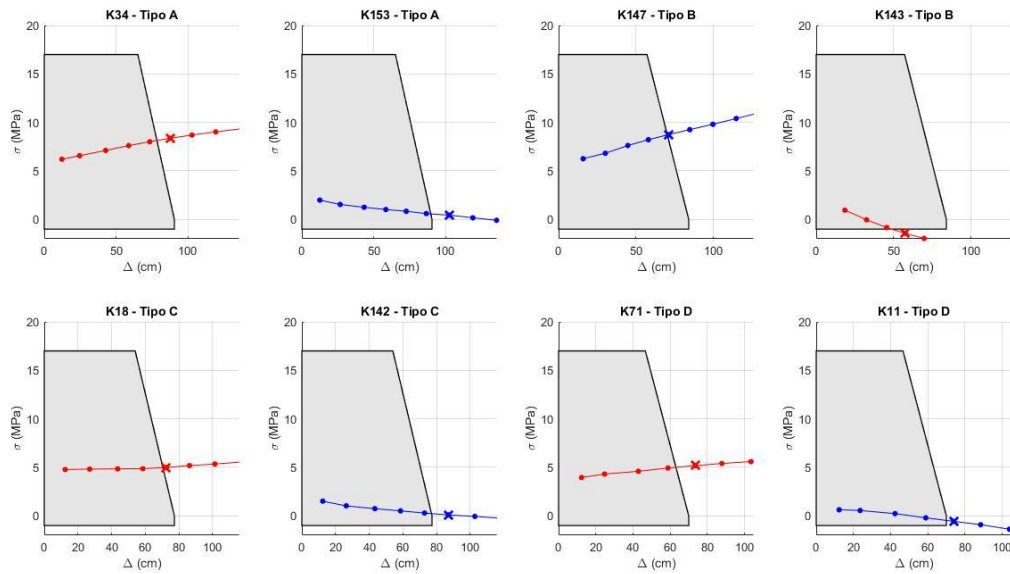


Figura 4.65 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según NTE E.031.

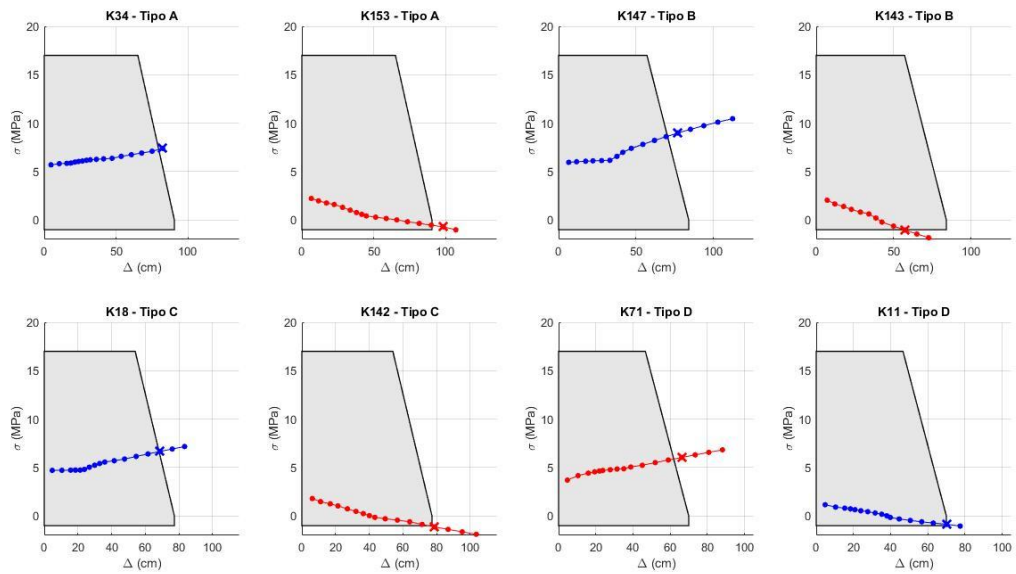


Figura 4.66 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según NTE E.031.

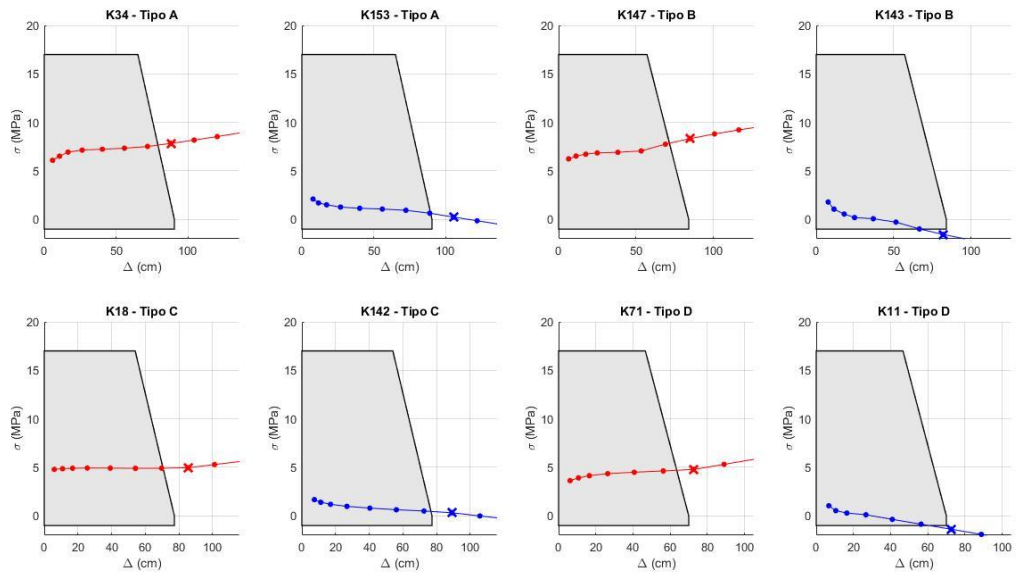


Figura 4.67 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según NTE E.031.

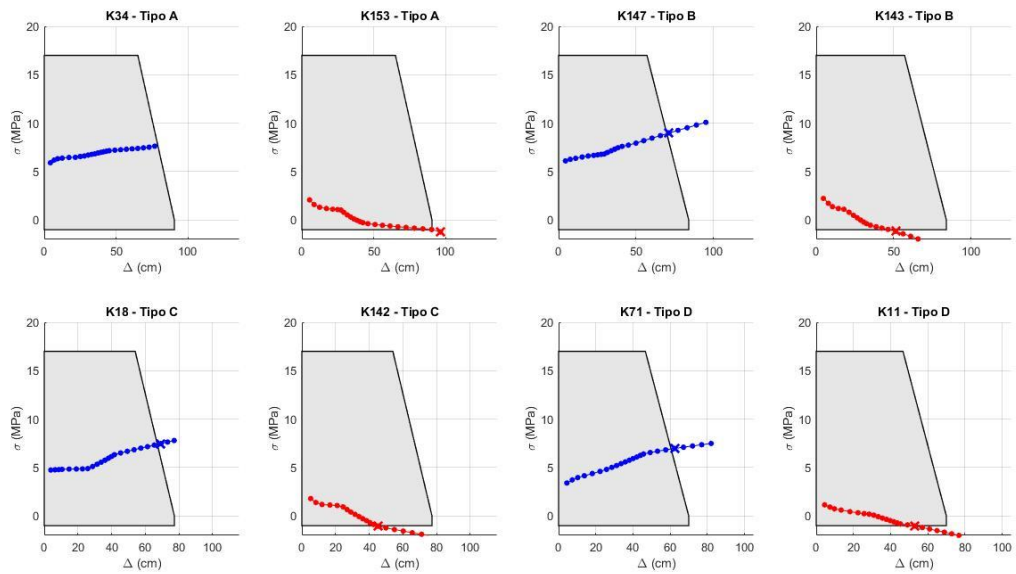


Figura 4.68 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según NTE E.031.

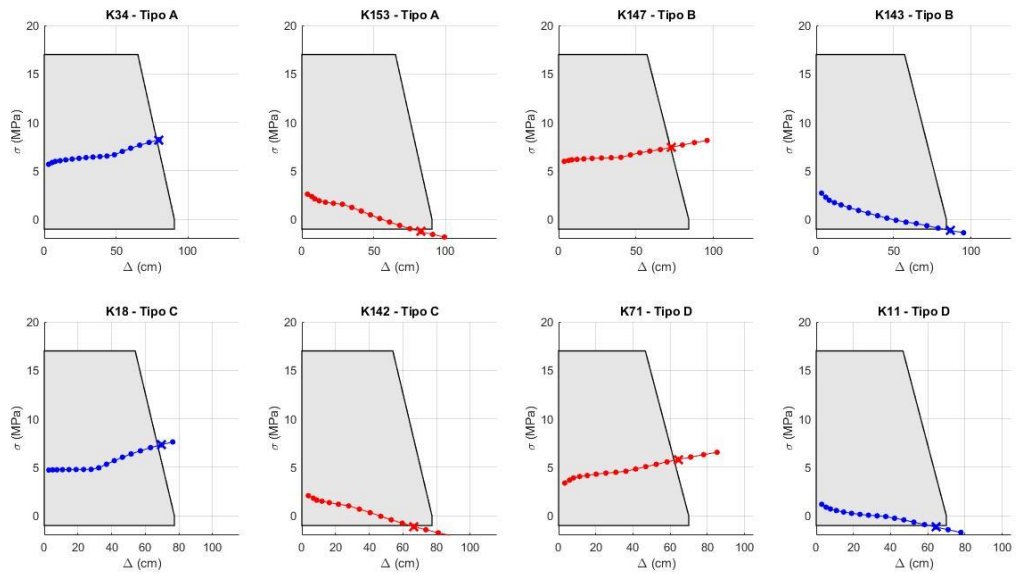


Figura 4.69 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según NTE E.031.

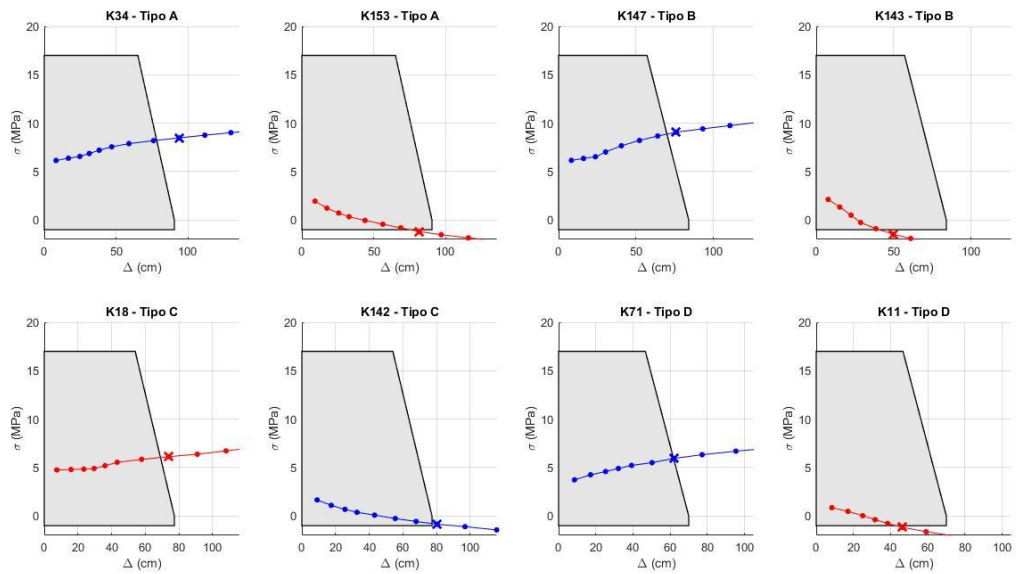


Figura 4.70 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según NTE E.031.

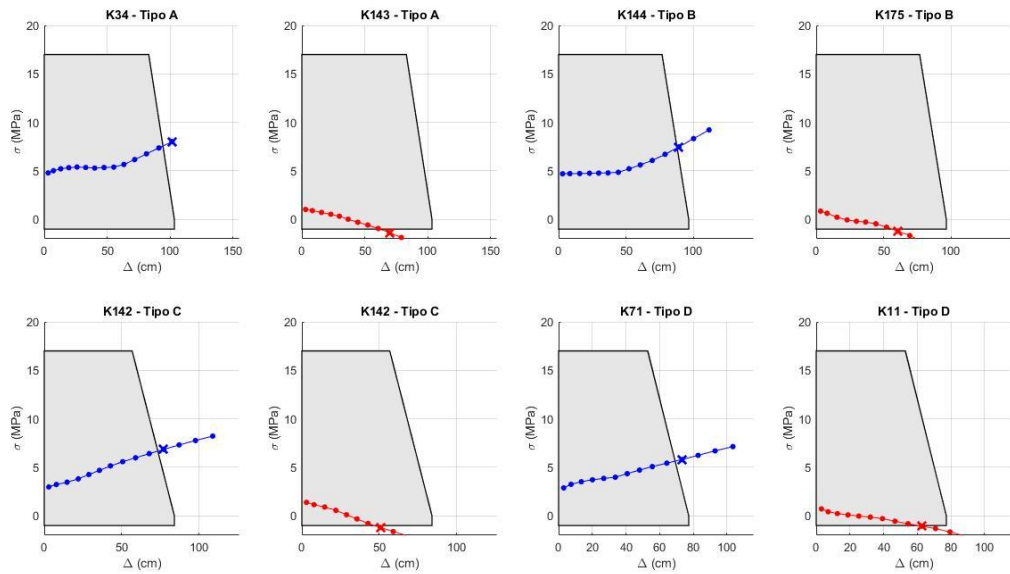


Figura 4.71 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 1 según GB 50011.

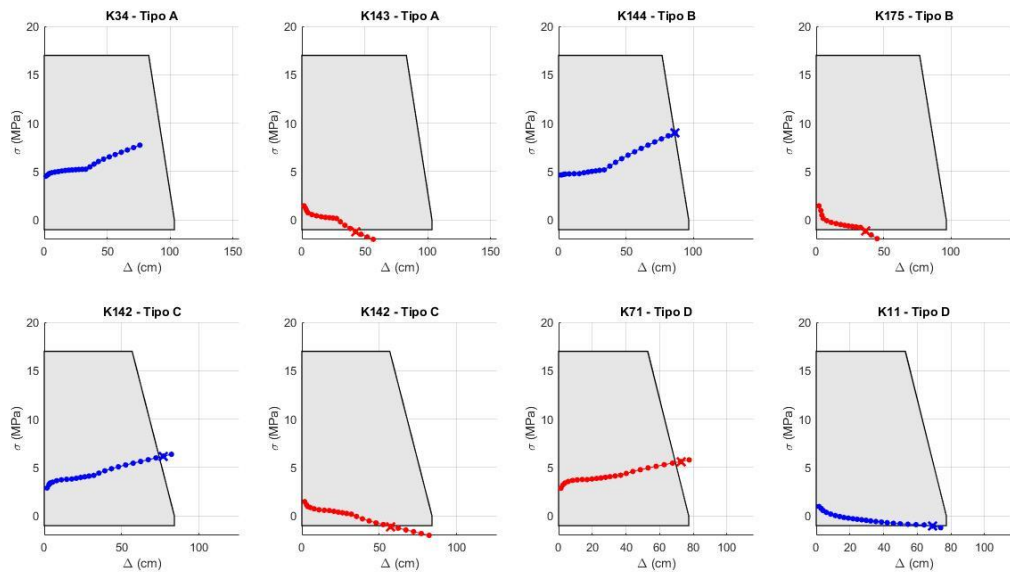


Figura 4.72 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 2 según GB 50011.

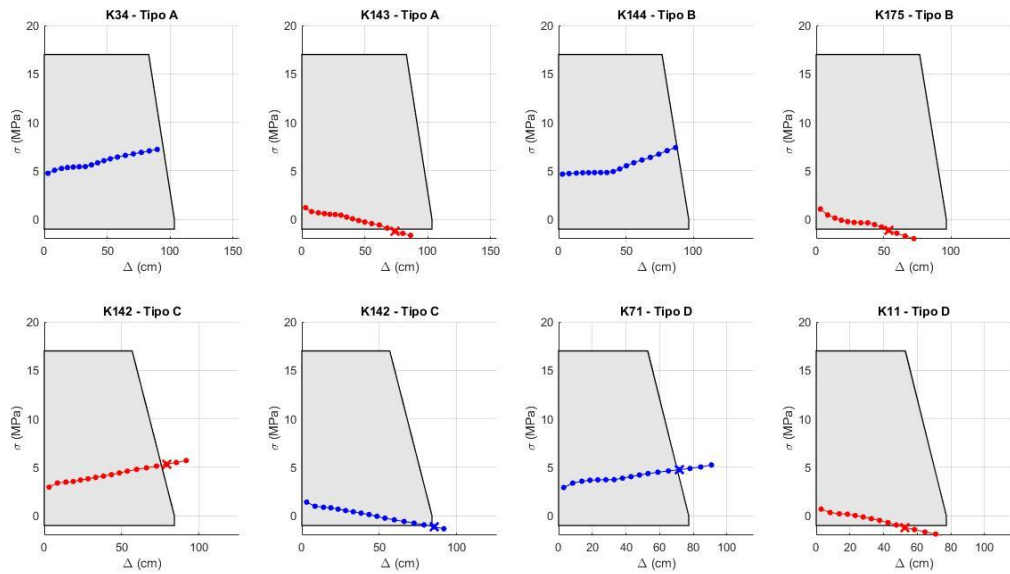


Figura 4.73 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 3 según GB 50011.

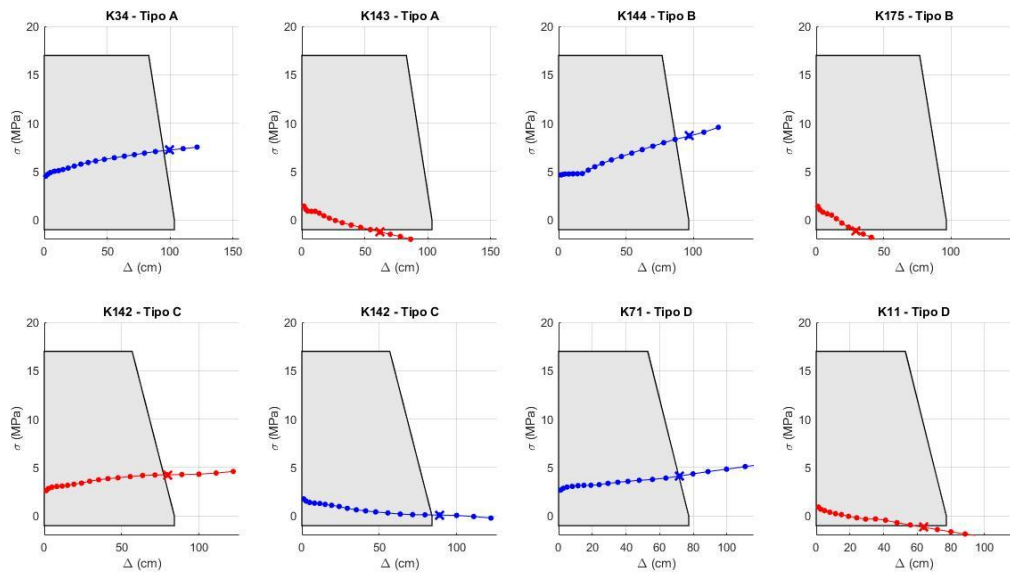


Figura 4.74 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 4 según GB 50011.

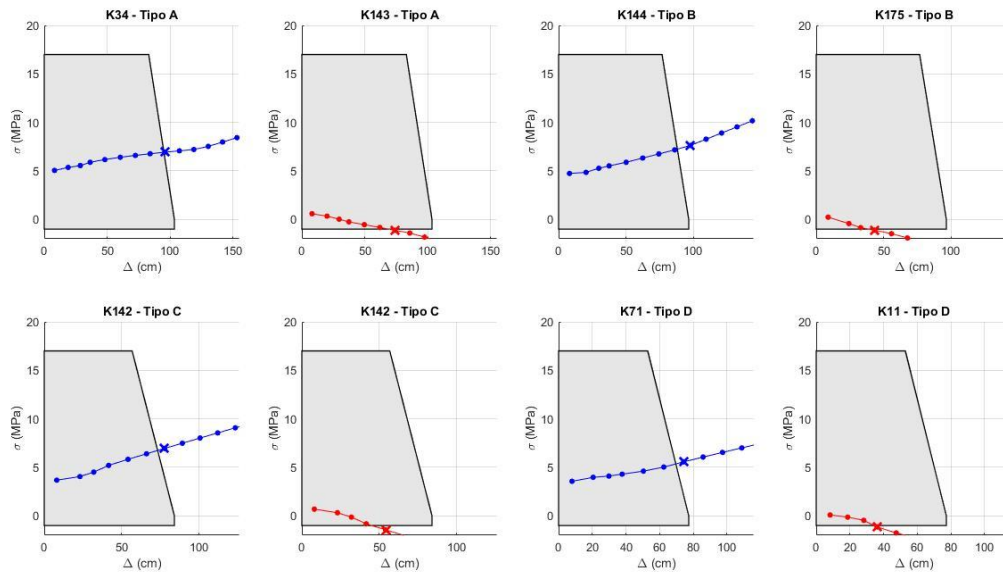


Figura 4.75 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 5 según GB 50011.

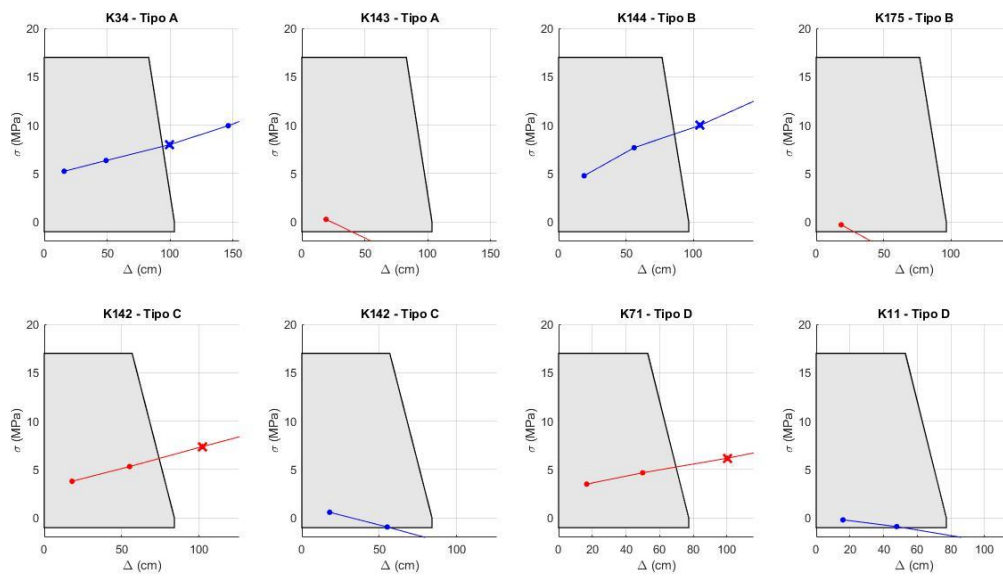


Figura 4.76 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 6 según GB 50011.

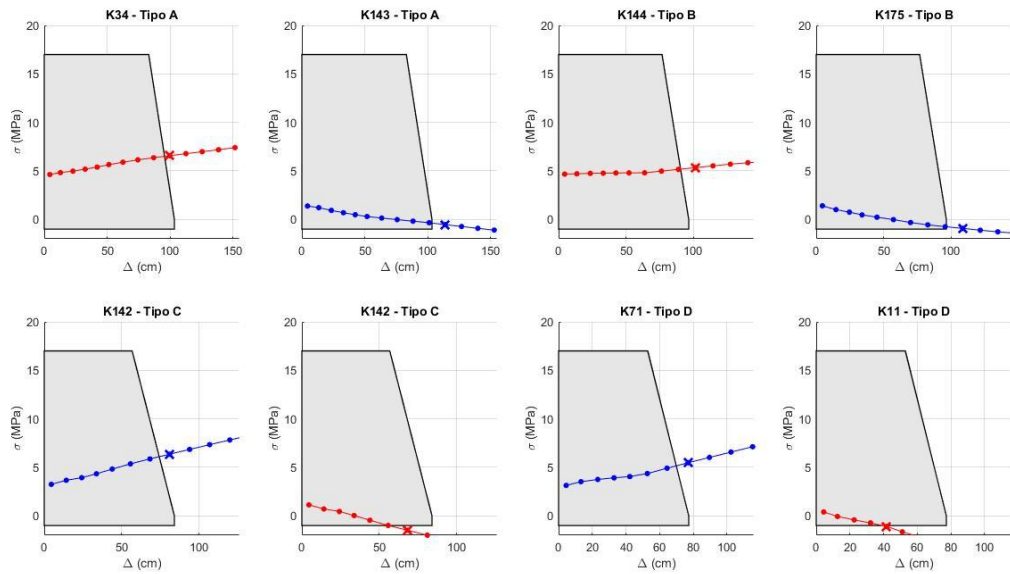


Figura 4.77 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 7 según GB 50011.

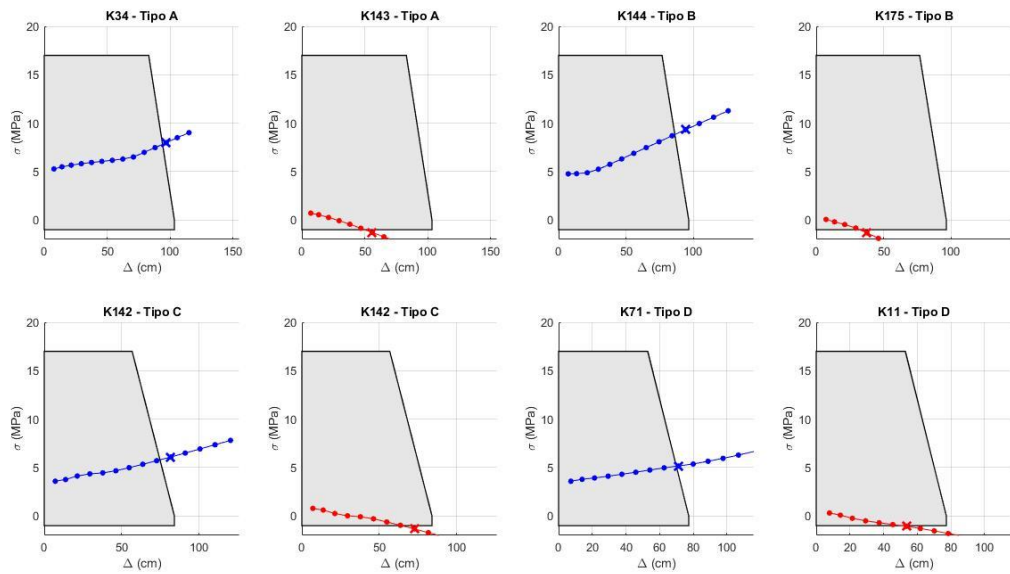


Figura 4.78 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 8 según GB 50011.

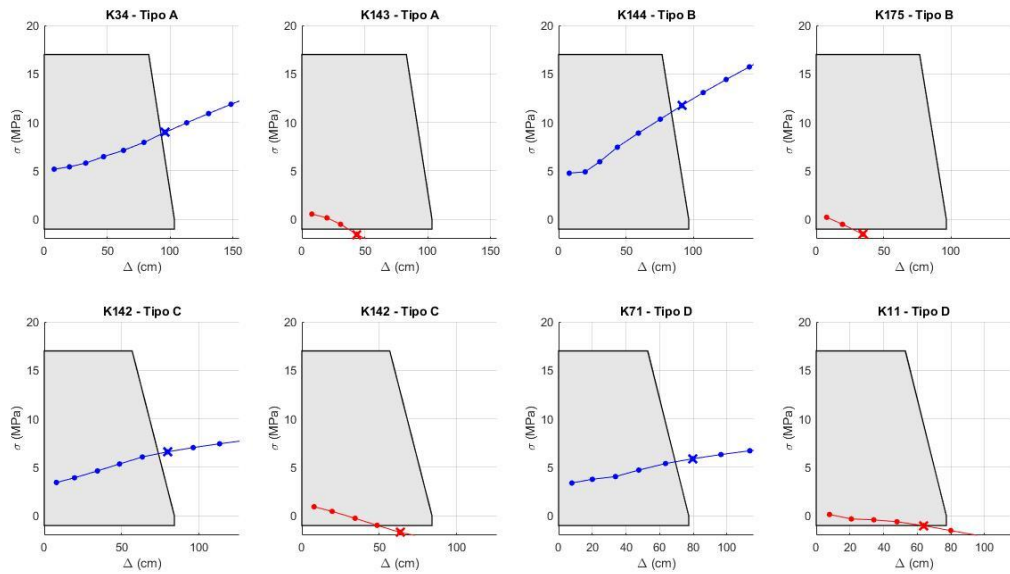


Figura 4.79 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 9 según GB 50011.

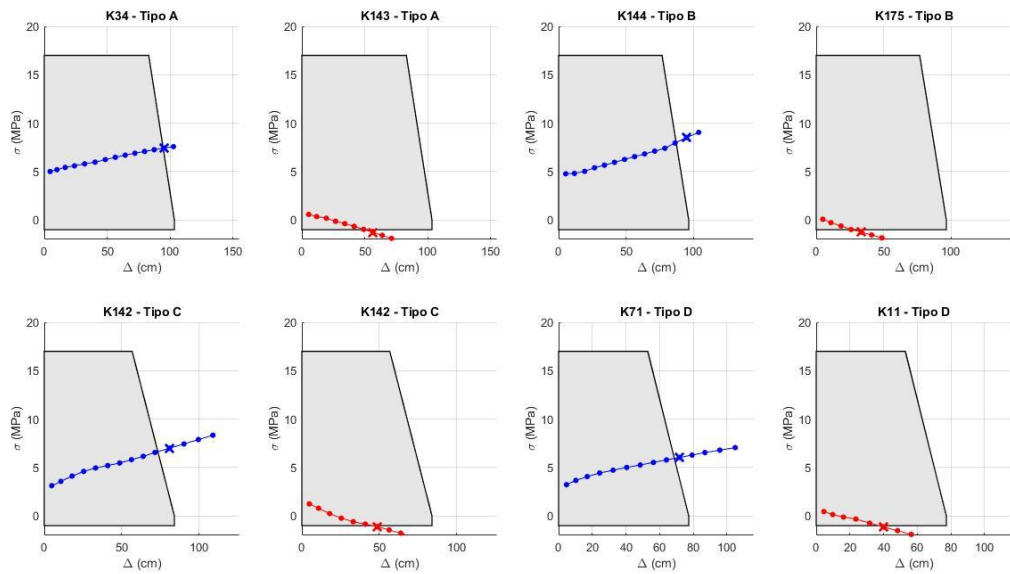


Figura 4.80 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 10 según GB 50011.

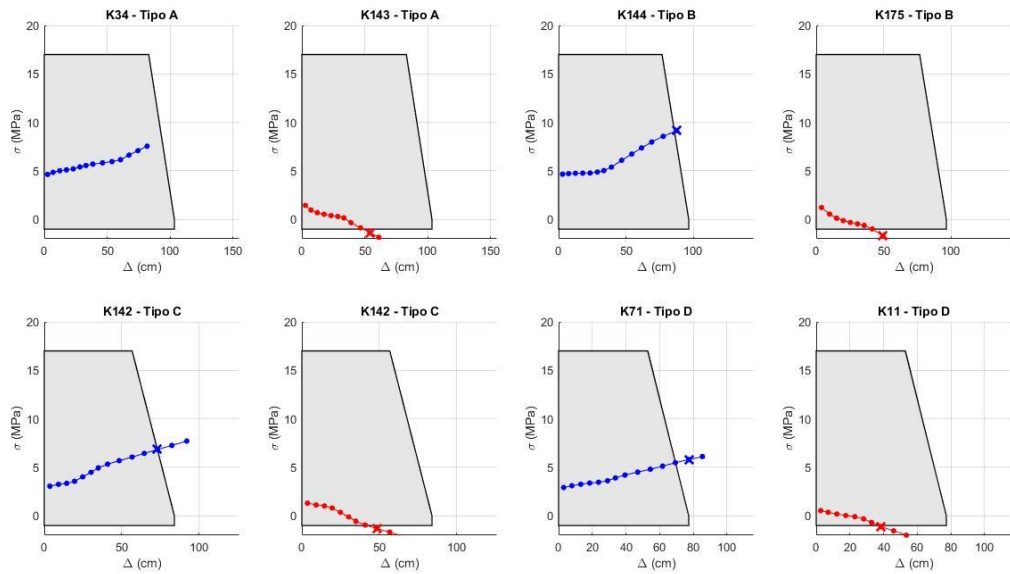


Figura 4.81 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 11 según GB 50011.

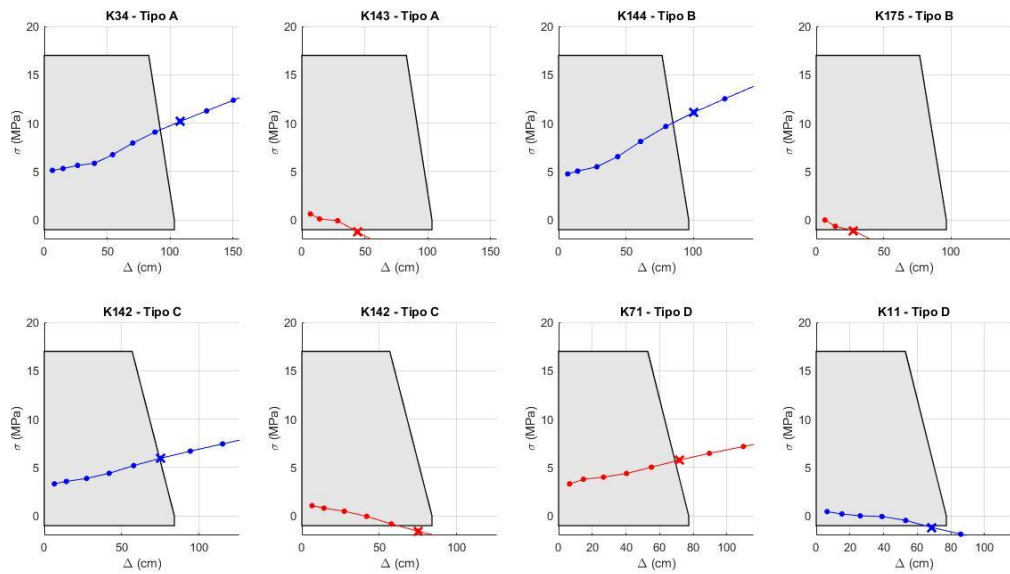


Figura 4.82 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 12 según GB 50011.

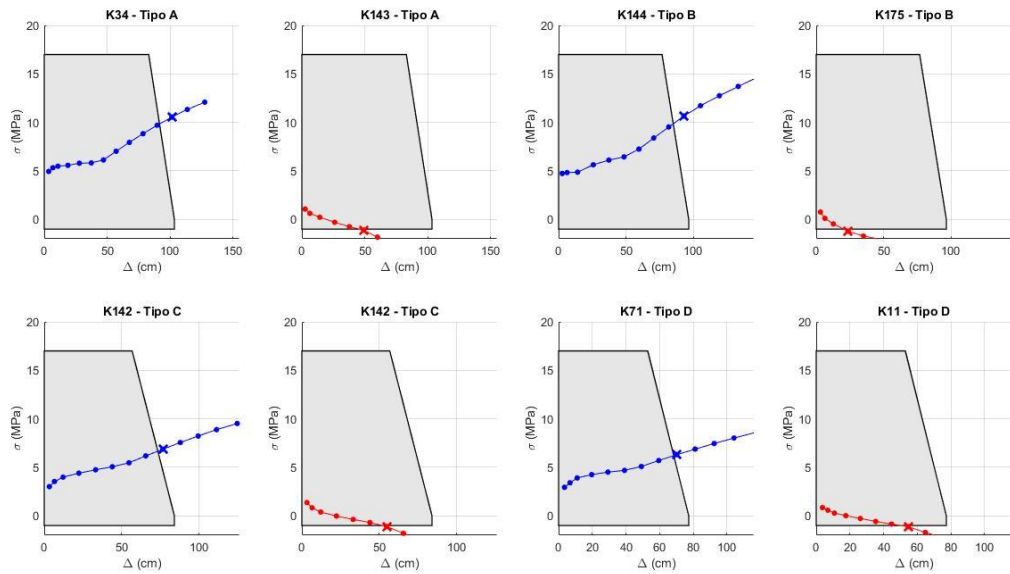


Figura 4.83 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 13 según GB 50011.

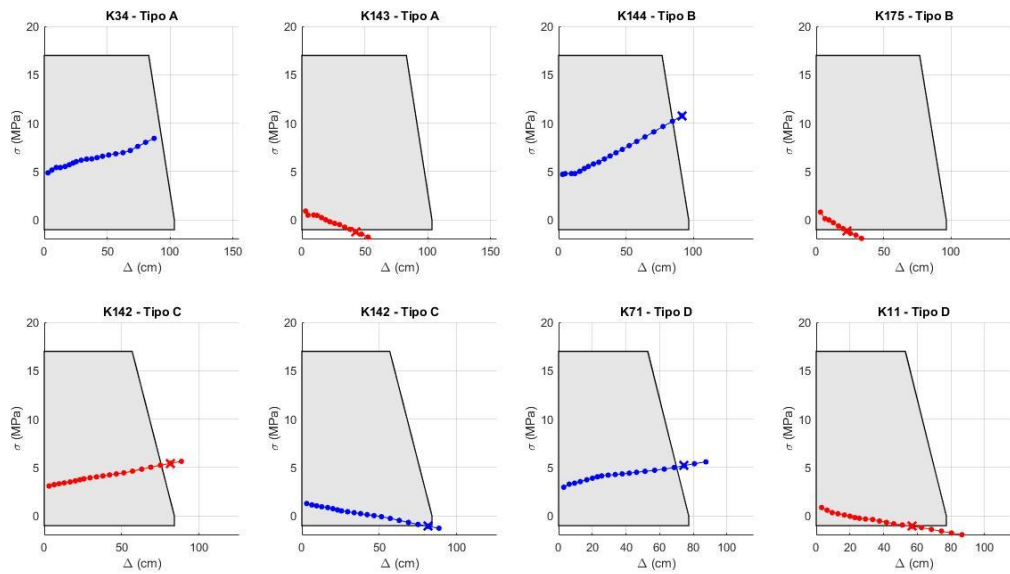


Figura 4.84 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 14 según GB 50011.

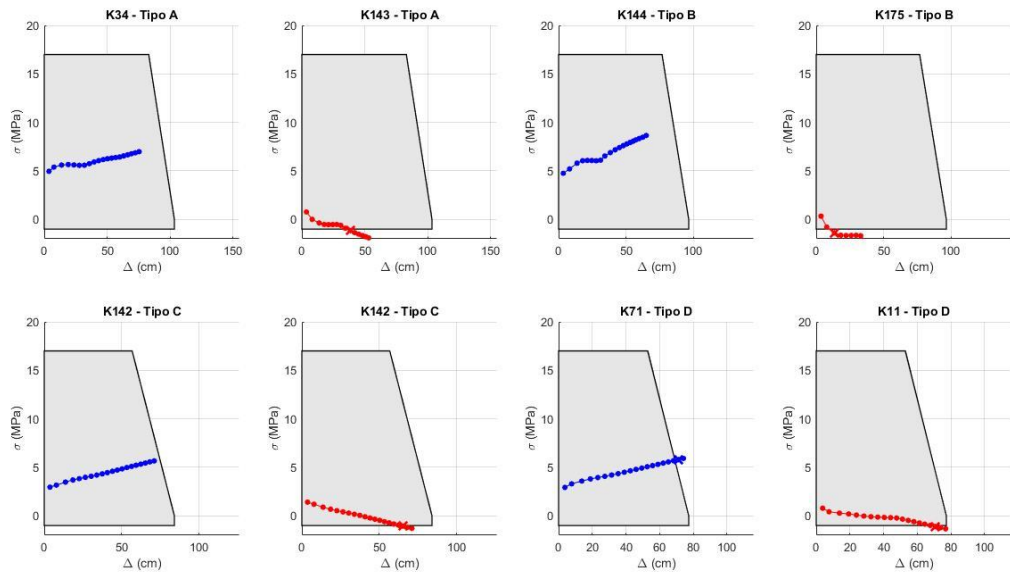


Figura 4.85 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 15 según GB 50011.

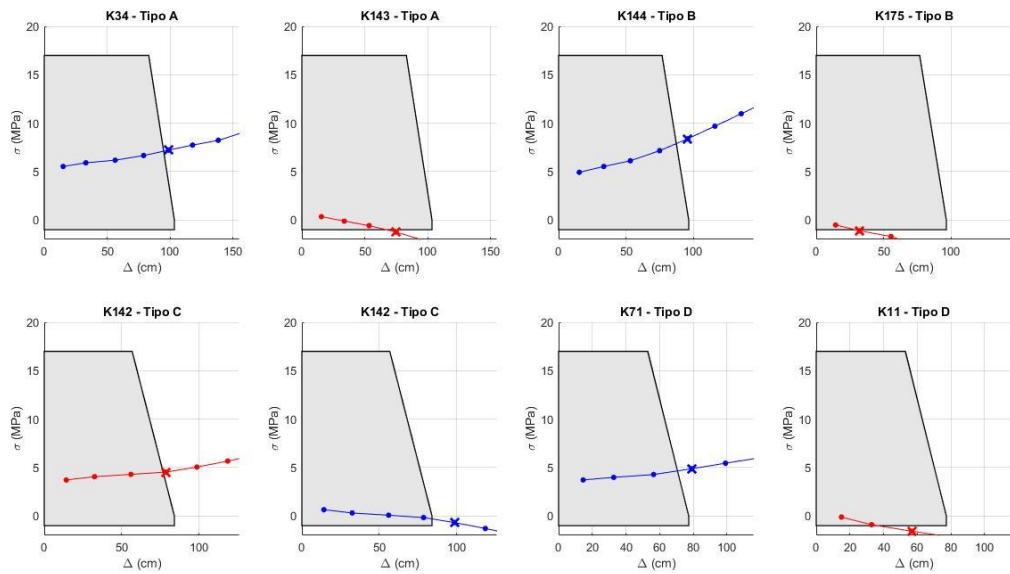


Figura 4.86 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 16 según GB 50011.

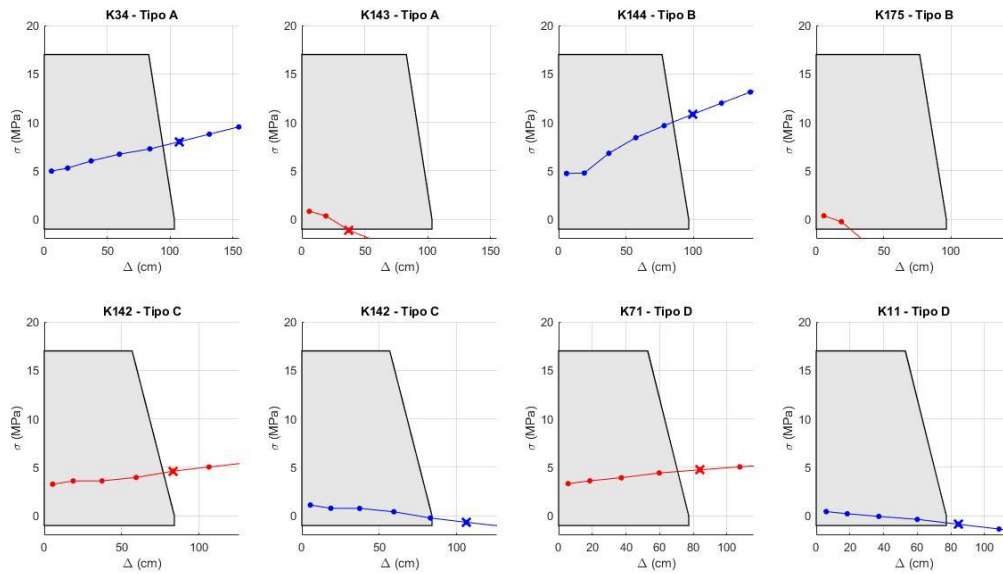


Figura 4.87 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 17 según GB 50011.

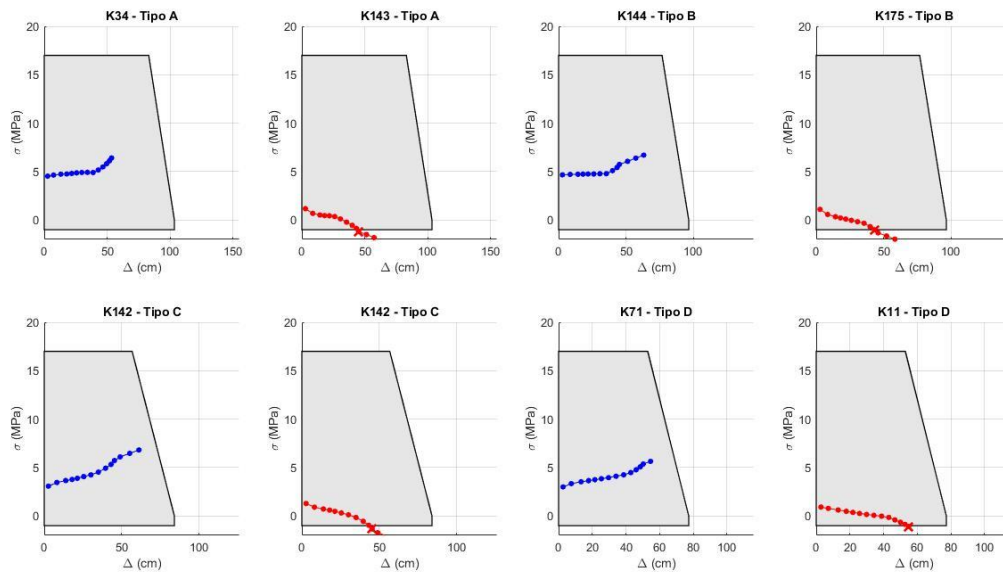


Figura 4.88 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 18 según GB 50011.

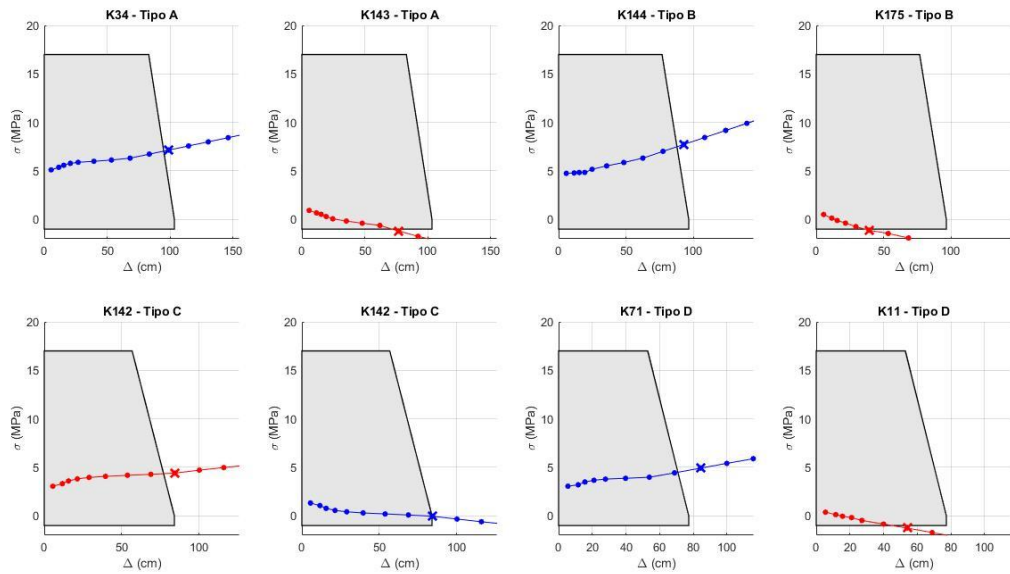


Figura 4.89 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 19 según GB 50011.

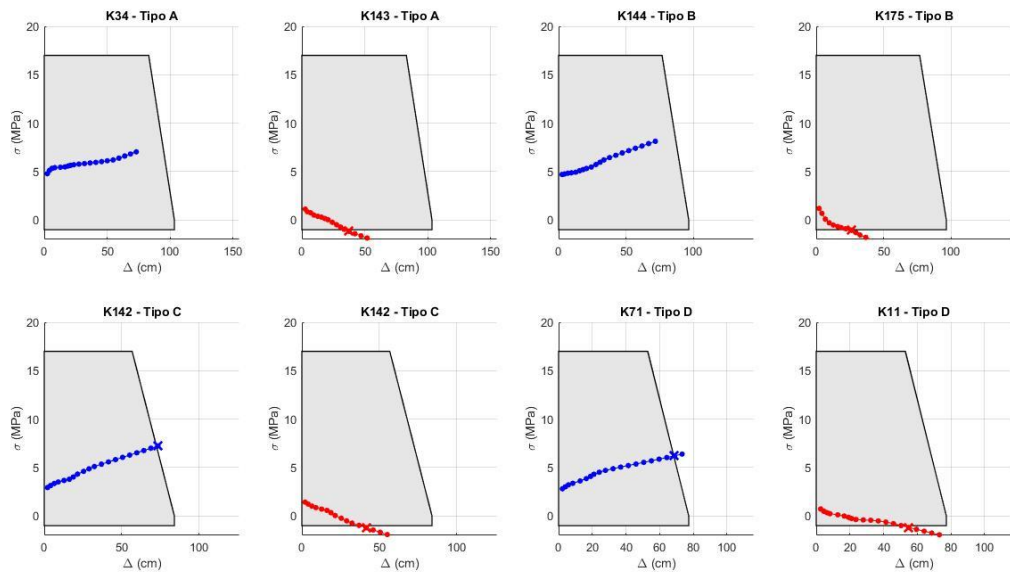


Figura 4.90 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 20 según GB 50011.

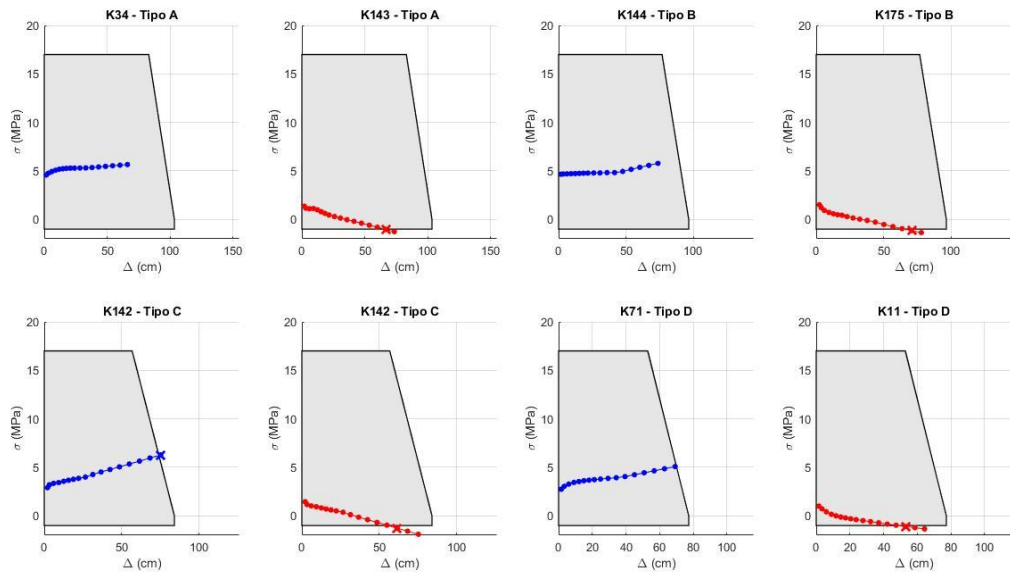


Figura 4.91 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 21 según GB 50011.

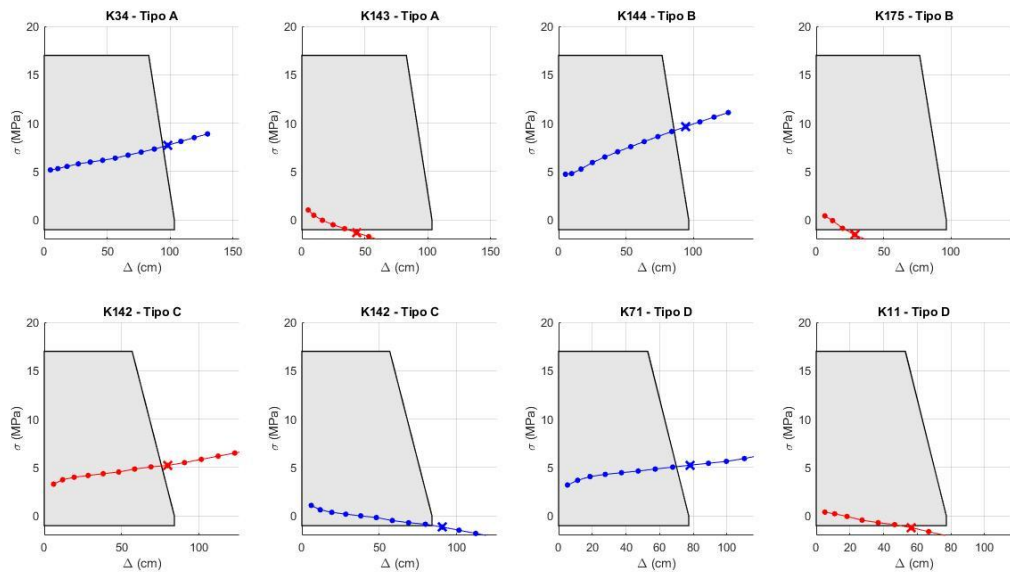


Figura 4.92 Curvas de interacción esfuerzo-desplazamiento de aisladores para registro sísmico 22 según GB 50011.

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Santiago, 13 de abril de 2026

Ph. D.

Natividad Leonor García Troncoso

Coordinador(a) del Programa

Maestría en Estructuras Civiles Sismorresistentes

En su Despacho

De mi consideración:

Yo, **Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra**, de nacionalidad chilena, portador del pasaporte No. **F57267093**, en mi calidad de Tutor del Proyecto de Titulación correspondiente a la Maestría en **Estructuras Civiles Sismorresistentes**, II Cohorte, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico lo siguiente:

Con fecha 22 de octubre del 2025, acepté la tutoría del estudiante Naspud Redrován Luis Alejandro con CI: 0302000526, para el desarrollo del proyecto de titulación denominado: *“Efecto de Uso de Factores de Seguridad para el Diseño de Sistemas de Aislación Sísmica Elastomérica en el Desempeño Sísmico de Infraestructura Crítica”*.

Certifico que este trabajo de titulación fue supervisado de manera continua durante todo su desarrollo, revisado en cada una de sus etapas y, finalmente, aprobado por mi persona en su versión final, entregada el día 8 de marzo del 2026.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines pertinentes.

Atentamente,

Powered by  Firma electrónica avanzada
RODRIGO ALFONSO
RETAMALES SAAVEDRA
2026.04.13 19:56:40 -0400

Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra, Ph. D.

Tutor del Proyecto

Correo electrónico: roretama@espol.edu.ec; rodrigo.retamales@gmail.com