



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO
MARCO ARRIOSTRADO
CONCÉNTRICO SOMETIDO A
TERREMOTOS SUBDUCTIVOS.
ANÁLISIS COMPARATIVO NEC-SE 15,
NCH2369.OF2003 Y PRNCH2369.**

PEDRO ROBERTO ESPINOZA HERNÁNDEZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

MIGUEL MEDALLA RIQUELME

Santiago de Chile, mayo, 2020.

A mi padre, a quien no pude acompañar en sus últimos días por cumplir esta meta, espero esté orgulloso de mi como yo siempre lo he estado de usted.

A ti, mi Mateito, papá te ama.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT por el auspicio con la beca entregada para poder llevar a cabo el cumplimiento de este objetivo tan importante.

Al profesor Miguel Medalla Riquelme por el apoyo, guía, supervisión y sobre todo por el tiempo y predisposición tan grandes que me supo brindar para elaborar el presente trabajo de grado.

A mi madre y hermanos, sin ellos no pudiera estar el día de hoy cumpliendo esta meta, gracias infinitas.

Finalmente, a mi esposa e hijo quienes han sido partícipes de todo este caminar desde el comienzo, un eterno agradecimiento ya que nada de esto hubiera sido posible sin el sacrificio que ambos realizaron. Me quedarán cortos mis días para devolverles todo lo que entregaron en este proceso. Los amo.

INDICE GENERAL

Pág.

AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
I. MOTIVACIÓN.....	1
II. INTRODUCCIÓN.....	2
III. OBJETIVOS	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
IV.1 Filosofía de diseño sismorresistente	4
IV.2 Peligro sísmico en el Ecuador y sus efectos a nivel local	5
IV.3 Principales consideraciones de la NEC-SE2015. Pórticos especiales arriostrados concéntricamente (PEAC).....	6
V. TRABAJOS PREVIOS.....	8
VI. DIFERENCIAS PRINCIPALES ENTRE NORMATIVAS	9
VI.1 Componente vertical del sismo de diseño	9
VI.2 Fuerza de diagonal para desbalance	9
VI.3 Secciones compactas	9
VII. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DETALLE DE TRABAJO ACTUAL	

VII.1	Materiales	12
VII.2	Cargas aplicadas	12
VII.2.1	Cargas permanentes	12
VII.2.2	Sobrecargas	13
VII.2.3	Carga sísmica	14
VII.3	Combinaciones de carga	17
VII.4	Diseño obtenido	17
VII.4.1	Vigas	18
VII.4.2	Columnas	19
VII.4.3	Diagonales	19
VII.5	Análisis Modal	20
VII.6	Peso sísmico y cortante basal	21
VII.7	Factores de utilización	21
VII.8	Comparativo con diseño en base a la Norma Chilena	22
VIII.	MODELACIÓN NO LINEAL DEL PÓRTICO ARRIOSTRADO CONCÉNTRICAMENTE	24
VIII.1	Vigas	25
VIII.2	Columnas	25
VIII.3	Diagonales	27
VIII.4	Placas Gusset	29
VIII.4.1	Zonas rígidas	30
VIII.4.2	ZeroLength element (Resorte Gusset)	31
VIII.5	ZeroLength element (Resortes IMK)	35
IX.	RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE DEMANDAS REGISTRADAS EN TERREMOTOS SEVEROS	36
IX.1	Registros seleccionados	36
IX.1.1	Eventos MT	37
IX.2	Respuestas obtenidas	40
IX.2.1	Desplazamientos de piso	41
IX.2.2	Corte basal versus desplazamiento de techo	49
IX.2.3	Drifts de entrepiso	55
IX.2.4	Deformación axial vs fuerza axial en diagonales	58

IX.2.5 Ductilidad en vigas.....	62
X. VERIFICACIÓN AL CAPÍTULO 16 DEL ASCE7-16.....	67
X.1 Registros seleccionados	68
X.2 Criterios de cumplimiento.....	73
X.2.1 Criterio global.....	73
X.2.2 Criterio local.....	73
X.3 Respuestas obtenidas	74
X.3.1 Desplazamientos de piso	74
X.3.2 Corte basal versus desplazamiento de techo	92
X.3.3 Drifts de entrepiso	108
X.3.4 Deformación axial vs fuerza axial en diagonales	117
X.3.5 Ductilidad en vigas y columnas.....	126
XI. CONCLUSIONES	142
XII. BIBLIOGRAFÍA	146
XIII. APENDICE.....	148
XIII.1 Desplazamiento de piso	149
XIII.2 Drift de entrepiso	152
XIII.3 Cortante basal.....	158
XIII.4 Deformación axial y fuerza axial en diagonales	161
XIII.5 Ductilidad en vigas	164

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla VII-1 Características de aceros utilizados en la modelación	12
Tabla VII-2 Parámetros para espectro de diseño	16
Tabla VII-3 Periodos y porcentajes de participación modal	20
Tabla VII-4 Cortante basal y peso de la estructura.	21
Tabla VII-5 Factores de utilización de elementos para cada combinación de carga	21
Tabla VII-6 Comparativo de parámetros principales de diseño.....	22
Tabla VII-7 Comparación de perfiles utilizados en base a cada código	22
Tabla VIII-1 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las columnas NEC2015.....	27
Tabla VIII-2 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las columnas NCh2369.Of2003 y NCh/2017	27
Tabla VIII-3 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las diagonales NEC2015.....	28
Tabla VIII-4 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las diagonales NCh2003	28
Tabla VIII-5 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las diagonales NCh/2017	29
Tabla VIII-6 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NEC2015.....	32
Tabla VIII-7 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NCh2003	33
Tabla VIII-8 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NCh/2017	33
Tabla VIII-9 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NEC2015.....	34
Tabla VIII-10 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NCh2003	34

Tabla VIII-11 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NCh/2017	34
Tabla VIII-12 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NEC2015.....	35
Tabla VIII-13 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NCh2003	35
Tabla VIII-14 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NCh/2017	35
Tabla IX-1 Características de registros acelerográficos MT.....	38
Tabla IX-2 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico.....	43
Tabla IX-3 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1.....	47
Tabla IX-4 Cortes basales máximos en el pórtico.....	54
Tabla IX-5 Drifts de piso máximos en el pórtico.....	56
Tabla IX-6 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico.....	65
Tabla IX-7 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario.....	66
Tabla IX-8 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario	66
Tabla X-1 Registros seleccionados y factor de escalamiento para la comprobación ASCE7-16.....	72
Tabla X-2 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica MCE_R . 79	
Tabla X-3 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica DLE ...	80
Tabla X-4 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica OLE ...	80
Tabla X-5 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda MCE_R	90
Tabla X-6 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda DLE.....	91
Tabla X-7 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda OLE.....	91
Tabla X-8 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda MCE_R	106
Tabla X-9 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda DLE.....	106
Tabla X-10 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda OLE.....	107
Tabla X-11 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica MCE_R	113
Tabla X-12 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica DLE	113
Tabla X-13 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica OLE	113

Tabla X-14 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda MCE_R	132
Tabla X-15 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda DLE	132
Tabla X-16 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda OLE	132
Tabla X-17 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda MCE_R	138
Tabla X-18 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda DLE	138
Tabla X-19 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda OLE	138
Tabla X-20 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda MCE_R	139
Tabla X-21 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda MCE_R	139
Tabla X-22 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda DLE	140
Tabla X-23 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda DLE	140
Tabla X-24 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda OLE	141
Tabla X-25 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda OLE	141

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura VII-1 Esquema general de la estructura y pórtico en estudio	11
Figura VII-2 Espectro elástico de diseño en aceleraciones	14
Figura VII-3 Espectro reducido de diseño	16
Figura VII-4 Esquema general de pórtico diseñado.....	17
Figura VIII-1 Esquema general pórtico en Opensees	24
Figura VIII-2 Detalle de configuración de sección de fibra en columnas doble T	26
Figura VIII-3 Detalle de configuración de sección de fibra en diagonales tubulares	28
Figura VIII-4 Detalle de imperfección geométrica modelada en diagonales.....	29
Figura VIII-5 Esquema de modelación de gusset	30
Figura VIII-6 Espacio libre para deformación inelástica en una conexión esquinera o mitad del vano	31
Figura IX-1 Espectros de registros MT.....	39
Figura IX-2 Mediana de registros MT vs Espectros Elásticos de normas	40
Figura IX-3 Desplazamientos de piso	42
Figura IX-4 Desplazamientos horizontales de piso comparativo.....	43
Figura IX-5 Historias de desplazamientos de techo máximos	44
Figura IX-6 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma	46
Figura IX-7 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma.....	46
Figura IX-8 Corte basal versus desplazamiento de techo	49
Figura IX-9 Corte basal en apoyos del pórtico	51
Figura IX-10 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D	53
Figura IX-11 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C	53
Figura IX-12 Drifts de entrepiso máximos	55
Figura IX-13 Drifts de entrepiso comparativo	57
Figura IX-14 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso.....	58
Figura IX-15 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso.....	60
Figura IX-16 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso.....	61

Figura IX-17 Demanda de Ductilidad en vigas.....	63
Figura IX-18 Demanda de ductilidad total en NCh2369.Of2003	64
Figura X-1 Espectros elásticos de Diseño Objetivos	70
Figura X-2 Registros seleccionados.....	70
Figura X-3 Registros seleccionados escalados.....	71
Figura X-4 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica MCE _R	75
Figura X-5 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica DLE.....	77
Figura X-6 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica OLE.....	78
Figura X-7 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica MCE _R	80
Figura X-8 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica DLE .	81
Figura X-9 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica OLE .	81
Figura X-10 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica MCE _R .	82
Figura X-11 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica DLE....	84
Figura X-12 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica OLE....	85
Figura X-13 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE _R	87
Figura X-14 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE _R	88
Figura X-15 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE	88
Figura X-16 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE.....	89
Figura X-17 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE	89
Figura X-18 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE.....	90
Figura X-19 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica MCE _R	93
Figura X-20 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica DLE.....	94
Figura X-21 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica OLE.....	96
Figura X-22 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica MCE _R	98
Figura X-23 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica DLE	99
Figura X-24 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica OLE.....	101
Figura X-25 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda MCE _R	102

Figura X-26 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda MCE _R	103
Figura X-27 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda DLE.....	103
Figura X-28 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda DLE	104
Figura X-29 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda OLE.....	104
Figura X-30 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda OLE	105
Figura X-31 Drift de entrepiso Demanda Sísmica MCE _R	108
Figura X-32 Drift de entrepiso Demanda Sísmica DLE	110
Figura X-33 Drift de entrepiso Demanda Sísmica OLE	111
Figura X-34 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica MCE _R	114
Figura X-35 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica DEL.....	114
Figura X-36 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica OLE.....	115
Figura X-37 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda MCE _R	117
Figura X-38 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda DLE	118
Figura X-39 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda OLE	119
Figura X-40 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda OLE. Registro 29	121
Figura X-41 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE _R	122
Figura X-42 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE	123
Figura X-43 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE	123
Figura X-44 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE _R	125

Figura X-45 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE	125
Figura X-46 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE	126
Figura X-47 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda MCE_R	127
Figura X-48 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda DLE	129
Figura X-49 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda OLE	130
Figura X-50 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda MCE_R	133
Figura X-51 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda DLE	135
Figura X-52 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda OLE	136
Figura XIII-1 Modelo Opensees modificado	148
Figura XIII-2 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica MCE_R	149
Figura XIII-3 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica DLE	149
Figura XIII-4 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica OLE	150
Figura XIII-5 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica MCE_R	150
Figura XIII-6 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica DLE	151
Figura XIII-7 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica OLE	151
Figura XIII-8 Drift de entrepiso Demanda Sísmica MCE_R	152
Figura XIII-9 Drift de entrepiso Demanda Sísmica DLE	152
Figura XIII-10 Drift de entrepiso Demanda Sísmica OLE	153
Figura XIII-11 Drifts de entrepiso comparativo Demanda Sísmica MCE_R	153
Figura XIII-12 Drifts de entrepiso comparativo Demanda Sísmica DLE	154
Figura XIII-13 Drifts de entrepiso comparativo Demanda Sísmica OLE	154
Figura XIII-14 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R ..	155
Figura XIII-15 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE	155
Figura XIII-16 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE	156
Figura XIII-17 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R	156
Figura XIII-18 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE ..	157
Figura XIII-19 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE ..	157

Figura XIII-20 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica MCE _R	158
Figura XIII-21 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica DLE	158
Figura XIII-22 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica OLE	159
Figura XIII-23 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda MCE _R	159
Figura XIII-24 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda DLE	160
Figura XIII-25 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda OLE	160
Figura XIII-26 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE _R	161
Figura XIII-27 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE	161
Figura XIII-28 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE	162
Figura XIII-29 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE _R ..	162
Figura XIII-30 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE	163
Figura XIII-31 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE	163
Figura XIII-32 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda MCE _R	164
Figura XIII-33 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda DLE	164
Figura XIII-34 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda OLE	165

RESUMEN

Este trabajo realiza una comparación de la respuesta o comportamiento esperado de un pórtico arriostrado concéntricamente sometido a registros sísmicos de origen subductivo, respuestas analizadas bajo la normativa ecuatoriana *NEC-SE 2015*, la *NCh2369.Of2003* y Anteproyecto de Modificación *NCh2369/2017*, utilizando el software *Opensees* para capturar la no linealidad esperada. Se analizan diferencias o similitudes existentes entre ítems como el desplazamiento de piso, drift de entrepiso, entre otros.

Adicionalmente, para cada escenario descrito, se desarrolla la verificación respecto de lo indicado en el capítulo 16 del *ASCE7-16*.

Respecto de las normativas utilizadas, se observa que lo obtenido en base a la *NEC-SE 2015* y *NCh2369/2017* son diseños de características similares.

De la verificación del *ASCE7-16* se concluye que el marco diseñado bajo la *NCh2369.Of2003* no cumple con los requisitos establecidos dado que hubo un gran nivel de rotación plástica en las vigas centrales lo que no permite cumplir con los criterios de aceptación establecidos.

A nivel de desempeño de drifts, para la demanda operacional, todas las normativas se mantuvieron bajo el 0,5% recomendado por el *FEMA356* para que una estructura se mantenga en el rango de ocupación inmediata.

Las respuestas de distorsiones de piso para la demanda de diseño en ningún caso superaron el rango de seguridad de vida de 1,5% recomendado en el *FEMA356*.

En los marcos mediante la *NEC-SE 2015* y *NCh2369/2017* las diagonales presentaron demanda no lineal superior a lo obtenido en la *NCh2369.Of2003* donde dicha demanda se concentró en sectores no deseados como las vigas centrales.

Respecto a las demandas para niveles del sismo máximo considerado un 18% de casos bajo la normativa ecuatoriana superan el límite de prevención de colapso recomendado en el *FEMA356* para el drift, contrario con las normativas chilenas donde el 100% de los casos se mantiene en el rango de seguridad de vida.

ABSTRACT

This study compares the response or expected behavior of a concentrically braced frame subject to seismic records raising from subduction earthquakes.

Responses that are analyzed with a braced frame designed under the current Ecuadorian regulations *NEC-SE 2015*, the Chilean code *NCh2369.Of2003* and the draft of the Chilean code modification *NCh2369/2017*, using Opensees software to capture the expected nonlinearity on the braced frame. Differences or similarities among important items such as floor displacement, interstory drift, among others, are analyzed.

Additionally, for the same braced frame in each of the designs described, verifications are carried out considering the chapter 16 of *ASCE7-16*.

Regarding to the regulations used for the design, it is observed that designs obtained based on the *NEC-SE 2015* and *NCh2369/2017* are pretty similar.

After *ASCE7-16* verification the braced frame designed under *NCh2369.Of2003* has not complied with the acceptance criteria because it achieves high plastic rotations in the beam of the central span.

Regarding the interstory drifts for operational level demands, all regulations remained below the 0,5% defining, according to *FEMA356*, as immediate occupation response.

The displacement and interstory drift responses for design level earthquake were always smaller, for all the different archetypes, than the life safety boundary of 1,5% recommended in *FEMA356*.

In the braced frames according to *NEC-SE 2015* and *NCh2369/2017*, the braces presented non-linear demands higher than that obtained in *NCh2369.Of2003*, where the non-linear demands were concentrated in unwanted sectors such as the beam of the central span.

Finally, for the maximum considered earthquake level the behavior 18% of the cases under Ecuadorian regulations exceed the collapse prevention limit recommended in *FEMA356* for interstory drift, contrary to the Chilean regulations where 100% of the cases remain in the life safety range.

I. MOTIVACIÓN

La participación en el programa de Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica ha demandado el desarrollo de diseños, análisis y estudios de estructuras básicamente bajo la normativa vigente en Chile.

El poder aplicar lo aprendido en el ámbito profesional en el cual desarrollaré mi carrera profesional, es decir en mi país Ecuador, ha creado la necesidad de poder llevar a cabo la implementación del conocimiento adquirido siguiendo las normas y disposiciones que rigen en dicha localidad.

Poder comparar las diferentes respuestas que estructuras semejantes, ante demandas gravitacionales y sísmicas similares, entregan tanto en Chile como en Ecuador, así como el comportamiento no lineal de ciertos elementos de dichas estructuras, entre otros particulares, han motivado el desarrollo del trabajo que se desarrolla en el presente documento.

II. INTRODUCCIÓN

En Chile el diseño sísmico de estructuras industriales se realiza dando cumplimiento a la norma *NCh2369Of2003* (INN, 2003), normativa sobre la cual al momento se está desarrollando un proceso de revisión y actualización en base a la propuesta de actualización de norma *prNCh 2369* (INN, 2017) de aquí en más *NCh2369/2017*.

En Ecuador no se cuenta con una norma que diferencie las estructuras de tipo industrial o habitacional como en Chile, contando únicamente con la Norma Ecuatoriana de la Construcción referente a la seguridad estructural de la edificaciones, *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), misma que determina normas de construcción con el fin de mejorar los mecanismos de control en los procesos constructivos, así como definir principios de diseño y montaje en obra con el fin de velar por el cumplimiento de los principios de habitabilidad y seguridad necesarios.

Las características sísmicas relativamente similares entre los dos países (demandas subductivas de manera primordial, producto del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana) permiten llevar a cabo una cierta comparación en cuanto a los resultados de diseño obtenidos dentro del análisis de una misma estructura desarrollada con las premisas de la normativa tanto chilena como ecuatoriana.

El presente trabajo presenta el análisis no lineal de un pórtico arriostrado concéntricamente, diseño realizado bajo las disposiciones de la norma vigente *NCh2369.Of2003*, el anteproyecto de la nueva norma *NCh2369/2017* (INN, 2017) y la norma ecuatoriana *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015).

La misma estructura fue objeto de estudio en el documento presentado en la 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE que lleva como título “*NCh2369 vs ASCE7 - STRENGTH vs DUCTILITY? INDUSTRIAL STEEL BRACED FRAMES*” (Peña et al, 2017), así como en el informe de actividad de graduación denominado “*EVALUACIÓN DE ANTEPROYECTO NCH2369 – APLICACIÓN MARCOS ARRIOSTRADOS*” (Muñoz, 2017) y para el efecto se realizó una comparación de los resultados obtenidos.

III. OBJETIVOS

- i) Diseñar un pórtico arriostrado concéntricamente en base a la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y comparar las principales características de diseño obtenidas con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y el anteproyecto de actualización de la norma *NCh2369/2017* (INN, 2017).
- ii) Desarrollar análisis de comportamiento esperado de los sistemas estructurales a través de análisis de respuesta no lineal, comparar las respuestas y comportamientos obtenidos en los elementos que lo conforman, así como en diferentes ítems relevantes como el cortante basal y desplazamiento de techo, entre otros.
- iii) Verificar el cumplimiento de lo indicado en el Capítulo 16 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016) frente a demandas del nivel del máximo sismo considerado (MCE_R).

IV. MARCO TEÓRICO

Los principales aspectos técnicos tomados en cuenta para el desarrollo del presente trabajo se exponen a continuación:

IV.1 Filosofía de diseño sismorresistente

La filosofía de diseño permite comprobar el nivel de seguridad de vida u otro estado límite que una estructura es capaz de aportar ante una acción sísmica.

Dicha filosofía de diseño puede ser obtenida al diseñar una estructura para que tenga la capacidad para resistir las fuerzas especificadas en una normativa en particular; presente derivas de piso, ante las cargas aplicadas, menores a las admisibles; pueda disipar energía de deformación inelástica, entre otros.

En países como Chile y Ecuador las demandas sísmicas, y sus consecuencias en las estructuras donde se presenten dichas demandas, tienen un papel preponderante respecto de otros estados de carga como pudiesen ser los gravitacionales.

Los efectos dinámicos del sismo de diseño pueden ser modelados mediante un espectro de respuesta para diseño o mediante la utilización de un grupo de acelerogramas con propiedades dinámicas representativas de los ambientes tectónicos, geológicos y geotécnicos del sitio en donde se pretenda emplazar una estructura. Para el diseño de los elementos correspondientes al pórtico del presente trabajo, se utilizó un espectro de respuesta acorde con las normativas tanto chilena como ecuatoriana.

En ambas normativas, la correcta aplicación de la filosofía de diseño sismorresistente depende de una serie de factores, relacionados con las características propias de la zona de emplazamiento de la estructura, el uso al que se destinará la misma y la reducción de la respuesta sísmica (siempre que se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla previsible y con adecuada ductilidad, con el daño concentrado en secciones que funcionen como fusibles).

La normativa ecuatoriana, *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), define dos posibles categorías para el diseño de una estructura, mismos que corresponden al diseño basado en fuerzas, DBF, y el diseño basado en desplazamientos, DBD, siendo el primero el utilizado para la

caracterización del, como se denomina en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), Pórtico Especial Arriostrado Concéntricamente (PEAC) analizado en el presente trabajo.

Las principales disposiciones que se indican en el DBF en la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015) se indican a continuación.

IV.2 Peligro sísmico en el Ecuador y sus efectos a nivel local

La respuesta de una estructura ante diferentes solicitaciones de carácter sísmico del suelo es caracterizada por las aceleraciones, velocidades y desplazamientos producidos en sus elementos, de manera particular en los pisos para el caso de edificios.

El espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a , perteneciente a la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), corresponde a una fracción de la aceleración de la gravedad, espectro que es consistente con los siguientes parámetros que se enumeran a continuación:

- i) Factor de zona sísmica,
- ii) Tipo de suelo de emplazamiento de la estructura,
- iii) Coeficientes de amplificación del suelo.

Adicional al espectro elástico de respuesta deben tomarse en cuenta, dentro de la categorización sísmica de la estructura, el llamado coeficiente de importancia cuya finalidad es la de incrementar la demanda sísmica de diseño debido a las características de utilización o importancia de permanecer dicha estructura operativa o sufrir menores daños durante y después de la ocurrencia del sismo. Otro parámetro de importancia a ser tomado en cuenta es el factor de reducción de fuerzas sísmicas, cuya utilización es permitida siempre que las estructuras y sus conexiones se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla previsible y con adecuada ductilidad, donde el daño se concentre en secciones especialmente detalladas para funcionar como rótulas plásticas.

IV.3 Principales consideraciones de la NEC-SE2015. Pórticos especiales arriostrados concéntricamente (PEAC)

A continuación, se hace una descripción de los principales requisitos manejados por la normativa ecuatoriana:

- i) Cortante basal: El valor del cortante dinámico total en la base obtenido por cualquier método de análisis dinámico, no debe ser:
< 80% del cortante basal V obtenido por el método estático (estructuras regulares)
< 85% del cortante basal V obtenido por el método estático (estructuras irregulares)
- ii) Deriva de piso: La deriva máxima para cualquier piso, expresada como un porcentaje de la altura de piso, no podrá ser mayor a 0,02 en el caso de estructuras metálicas.
- iii) Para cualquier dirección de fuerza paralela a la línea de arriostramiento, al menos el 30% pero no más que el 70% de la fuerza total horizontal a lo largo de esta línea resistida por las diagonales a tensión.
- iv) En los pórticos tipo chevron en “V” y “V” invertida, las vigas deben ser continuas entre columnas.
- v) Las vigas deben arriostrarse de manera que se cumplan los requerimientos para estabilidad de vigas.
- vi) La resistencia requerida en vigas interceptadas por los arriostramientos, sus conexiones y miembros deberá determinarse en base a las combinaciones de carga de la norma, asumiendo que los arriostramientos no proporcionan soporte para la carga viva ni para la carga muerta.
- vii) Para las combinaciones de carga que incluyan el efecto sísmico, la fuerza sísmica en la viga debe determinarse mediante lo siguiente:
 - Fuerzas arriostramientos a tensión = $R_y F_y A_g$, donde R_y es el factor de esfuerzo de fluencia probable, F_y es el mínimo esfuerzo de fluencia especificado para el tipo de acero usado, A_g es el área de la sección transversal del arriostramiento.

- Fuerza en arriostramientos a compresión = $0,3P_n$, donde P_n es la resistencia nominal a carga axial de compresión del arriostramiento.
- viii) Los arriostramientos tipo K no están permitidos para los PEAC
- ix) Los pórticos arriostrados únicamente a tensión no están permitidos para los PEAC.
- x) Las columnas y diagonales deben cumplir con los requerimientos de relaciones ancho-espesor de las secciones sísmicamente compactas de la NEC-SE2015. Las vigas deben cumplir con las relaciones ancho-espesor estipulados en la sección B4 de la Especificación AISC 360-10.
- xi) La relación de esbeltez para pandeo flexural de las diagonales debe cumplir que $Kl/r \leq 4\sqrt{E/F_y}$
- xii) La relación de pandeo local para las diagonales debe cumplir con $D/t < 0,038\frac{E}{F_y}$

V. TRABAJOS PREVIOS

En el documento presentado en la 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE que lleva como título *NCh2369 vs ASCE7 - STRENGTH vs DUCTILITY? INDUSTRIAL STEEL BRACED FRAMES* (Peña et al, 2017), se llevó a cabo el diseño del pórtico en estudio mediante la aplicación de la norma *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), además de hacer un comparativo de dicha norma con la *ASCE7-10/AISC341-10* (AISC, 2010), evidenciando diferencias al llevar a cabo la utilización de una u otra filosofía de diseño

De la misma manera, en el informe de actividad de graduación denominado “*EVALUACIÓN DE ANTEPROYECTO NCH2369 – APLICACIÓN MARCOS ARRIOSTRADOS*” (Muñoz, 2017) se procede a hacer un comparativo entre los resultados de diseñar el pórtico con el anteproyecto de la *NCh2369/2017* (INN, 2017) y la norma vigente *NCh2369.Of2003* (INN, 2003). Los resultados obtenidos se resumen en cuanto a la reducción de la respuesta de ciertos ítems, como el desplazamiento de techo, cortante basal, por ejemplo, al usar el anteproyecto de la norma *NCh2369/2017* (INN, 2017), sin que la diferencia en el peso de la estructura sea considerable.

En el presente trabajo, se utilizarán los resultados obtenidos en cuanto al diseño de las vigas, columnas y diagonales obtenidas en los estudios indicados, con el propósito de la comparación del comportamiento no lineal de los elementos de las estructuras, con los obtenidos mediante la utilización de la normativa ecuatoriana *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015).

VI. DIFERENCIAS PRINCIPALES ENTRE NORMATIVAS

VI.1 Componente vertical del sismo de diseño

La *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) en el apartado correspondiente a *Peligro Sísmico* indica que la componente vertical del sismo deberá ser incorporada cuando exista la presencia de elementos que exceden los límites de las plantas de los pisos, tales como voladizos horizontales, contrario a lo propuesto por la *NCh 2369/2017* (INN, 2017) en donde se indica que el efecto de la acción sísmica vertical se debe considerar en todos los casos y se debe combinar con las acciones sísmicas horizontales de acuerdo con las combinaciones de carga respectivas. Si bien en la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) se indican ciertos casos en los que debe tomarse en cuenta la acción vertical, para los trabajos antes citados (Muñoz, 2017) y (Peña et al, 2017) se tomó en cuenta de todas maneras la acción sísmica vertical.

VI.2 Fuerza de diagonal para desbalance

En la *NCh 2369/2017* (INN, 2017) se especifica que para definir el efecto sísmico en la viga, la tracción en la diagonal no necesita ser mayor que la determinada mediante las combinaciones de carga establecidas con el estado de carga amplificado por $0,7R_1 \geq 2,0$ o que la máxima carga que el sistema puede transferir a la viga; en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) se establece que dicho efecto debe ser determinado directamente con las propiedades esperadas del perfil de la diagonal a tracción.

VI.3 Secciones compactas

Respecto de la verificación de secciones compactas como condición de cumplimiento en un elemento a compresión, la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) se tiene que para perfiles tubulares la relación D/t debe ser menor que $0,038E/F_y$. En la normativa chilena dicho valor límite es igual a $0,11E/F_y$, tanto para la del año 2003 como 2017.

Este particular implica que en el diseño mediante la normativa ecuatoriana las diagonales del segundo y tercer nivel requieran contar con un espesor mayor para dar cumplimiento a lo indicado en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015). Si se tuviesen los mismos límites que en la normativa chilena, disminuirían los espesores de las diagonales de los niveles indicados y se tuviera un factor de utilización superior en estos elementos ante las cargas de diseño, pudiendo esto traducirse en un diseño más ajustado y con menor cantidad de acero.

VII. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DETALLE DE TRABAJO ACTUAL

La estructura en estudio corresponde a un pórtico especial arriostrado concéntricamente, mismo que pertenece a una estructura tridimensional conformada por 3 pórticos iguales en la dirección longitudinal de aplicación del sismo, y 5 pórticos ubicados en la dirección transversal de aplicación del sismo, como se observa en la figura a continuación:

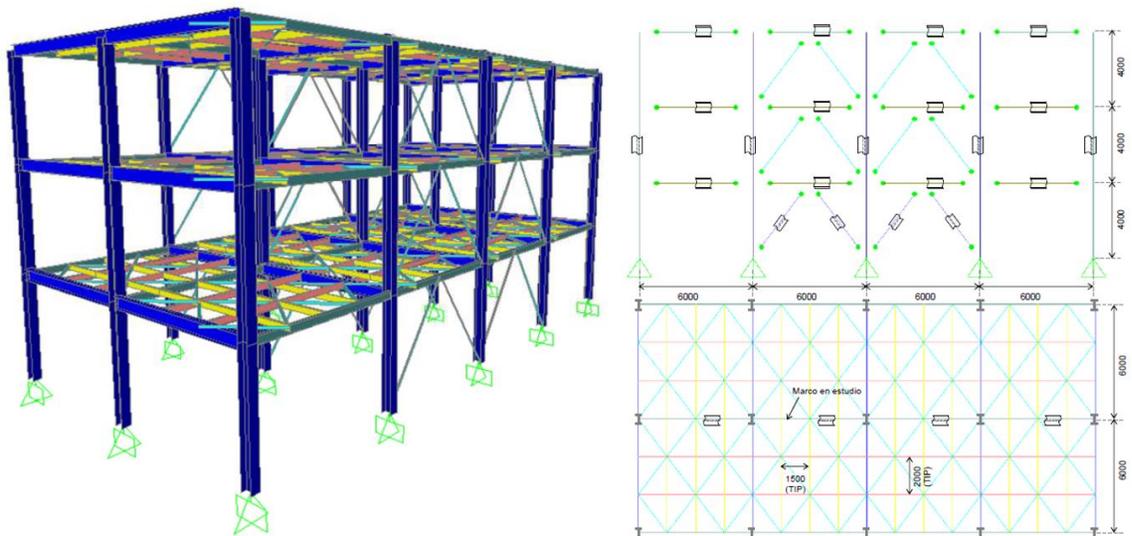


Figura VII-1 Esquema general de la estructura y pórtico en estudio

Como se observa en la Figura VII-1 el pórtico en estudio corresponde al pórtico central longitudinal, detallándose en la misma figura la planta y elevación típica del pórtico, mismo que se observa posee una separación entre columnas de 6 metros, con tres diferentes niveles de pisos, con una altura entrepiso igual a 4 metros.

En la dirección transversal se tienen pórticos resistentes a momentos. En la plataforma de cada nivel, se tiene un diafragma de piso, además las vigas que se encuentran en ella están distanciadas a 2m, con arrostramientos horizontales cada 1,50m y se soportan mediante vigas principales las cuales se apoyan sobre columnas.

Como características adicionales se observa que las vinculaciones de la estructura son todas del tipo articulado, es decir, que los apoyos únicamente son capaces de restringir desplazamientos.

VII.1 Materiales

Las características del material utilizado para la modelación de las vigas y columnas es un acero del tipo ASTM A36, y de manera similar para las diagonales de arriostramiento el acero utilizado en la modelación es uno del tipo ASTM A53. Las principales propiedades de los aceros indicados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla VII-1 Características de aceros utilizados en la modelación

	E (ton/cm ²)	F _y (ton/cm ²)	F _u (ton/cm ²)	R _y	R _t
ASTM A36	2040	2,53	4,08	1,3	1,15
ASTM A53	2040	2,5	4,08	1,6	1,2

, donde R_y y R_t son los factores de fluencia y tensión probables

VII.2 Cargas aplicadas

Para la definición de las cargas, se las divide en tres grupos principales, mismos que corresponden a las cargas permanentes, sobrecargas y carga sísmica.

VII.2.1 Cargas permanentes.

a) Peso propio

Corresponde al peso de los elementos que conforman el pórtico como tal, es decir, las vigas, columnas y diagonales de acero.

b) Peso de plataformas

Corresponde al peso de cada uno de los pisos, cargas que corresponden a las siguientes:

- i) Carga distribuida en las vigas: 200kg/m
 - ii) Peso de plataformas interiores: Carga puntual de 1,2ton en las columnas centrales y 0.6ton en las columnas exteriores.
 - iii) Peso del Grating: Carga puntual de 1,2ton en las columnas centrales y 0,6ton en las columnas exteriores.
- c) Peso de equipos:

Para el modelamiento, se considera la ubicación de los equipos únicamente en el primer piso, con cargas puntuales de 50ton en la columna central y cargas de 25ton en las columnas internas.

VII.2.2 Sobrecargas

a) Sobrecarga en niveles 1 y 2

Corresponde al uso que se le dará a la estructura en los pisos 1 y 2, modelado mediante las cargas a continuación presentadas:

- i) Carga distribuida en las vigas: 1600kg/m
- ii) Carga en columnas centrales: 19,2ton
- iii) Carga en columnas exteriores: 9,6ton

b) Sobrecarga en nivel 3

Corresponde al uso que se le dará a la estructura en el piso 3, modelado mediante las cargas a continuación presentadas:

- i) Carga distribuida en las vigas: 800kg/m
- ii) Carga en columnas centrales: 9,6ton
- iii) Carga en columnas exteriores: 4,8ton

VII.2.3 Carga sísmica

Para la carga sísmica se trabajó con el espectro elástico de diseño de la norma *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), desarrollando un análisis modal espectral. Un esquema gráfico de dicho espectro se presenta a continuación:

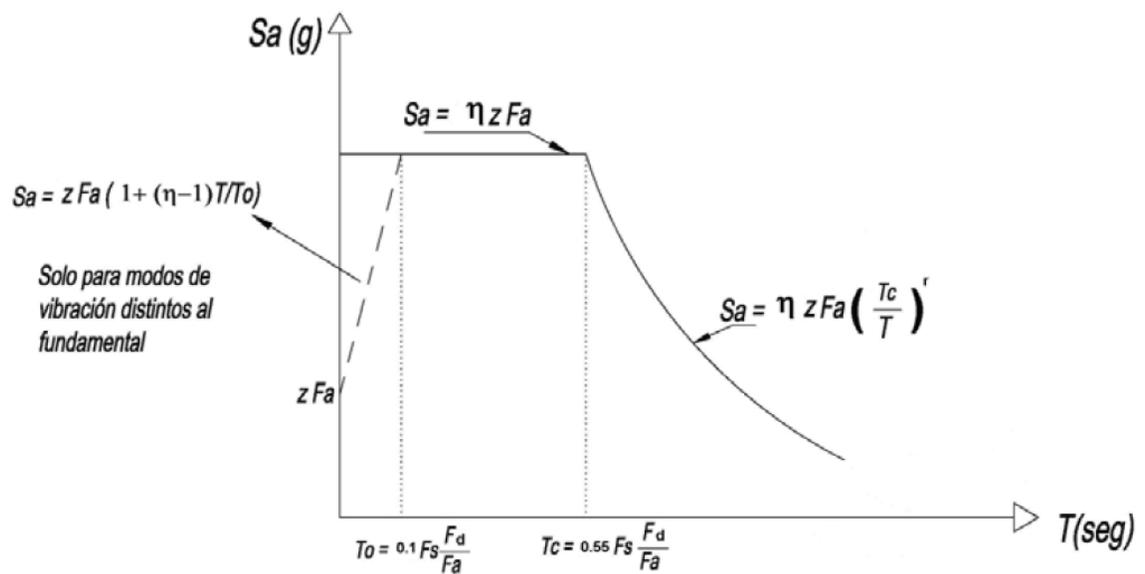


Figura VII-2 Espectro elástico de diseño en aceleraciones

Para tener relación con los trabajos anteriores (normativa chilena) se idealizó que la estructura estaría emplazada en la costa ecuatoriana en la ciudad de Esmeraldas, correspondiente a la provincia de Esmeraldas, teniendo lo siguiente:

i) Zonificación sísmica:

El factor de zona Z , que corresponde a la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, corresponde a una categoría VI, es decir, un Z igual a 0,50 con una caracterización de peligro sísmico muy alta.

ii) Tipo de suelo:

Se escogió un tipo de perfil C, mismo que corresponde a un perfil de suelo muy denso o de roca blanda, con velocidad de onda de corte entre $760\text{m/s} > V_s > 360\text{ m/s}$ y un índice de penetración estándar N mayor a 50. Este perfil de suelo es equiparable al tipo de suelo II de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003).

iii) Coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d y F_s :

Estos coeficientes dependen del perfil de suelo C y factor de zona Z elegidos. El coeficiente F_a corresponde a la amplificación de suelo en la zona de período corto con un valor de 1,18; F_d corresponde a la amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca con un valor de 1,06; finalmente el coeficiente F_s corresponde al comportamiento no lineal de los suelos con un valor de 1,23.

iv) Razón entre aceleración espectral y PGA η

Corresponde a la relación de amplificación espectral S_a/Z , que para la localidad escogida (Esmeraldas) este factor tiene el valor de 2,48

v) Coeficiente de importancia

De la misma manera, para tener una relación respecto de lo realizado bajo la normativa chilena, la estructura ha sido categorizada como de un tipo *Otras Estructuras*, cuyo tipo de uso, destino e importancia corresponde a *todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores*, siendo dichas categorías anteriores como edificaciones esenciales o de ocupación especial. El coeficiente de importancia para este caso es igual a 1.

vi) Ductilidad y factor de reducción de resistencia sísmica

El factor de reducción sísmica, de acuerdo con la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), corresponde a un valor de 8, mismo que está categorizado como un valor para sistemas estructurales dúctiles, sistema dual, correspondiente a un pórtico especial sismorresistente de acero, con diagonales rigidizadoras concéntricas.

Una vez que se cuenta con todos los insumos para la elaboración del espectro de diseño de la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), se tiene lo siguiente:

Tabla VII-2 Parámetros para espectro de diseño

Espectro de respuesta		
Zona sísmica=	VI	Esmeraldas, costa ecuatoriana
Tipo de suelo=	C	Suelo muy denso.
I=	1	Factor importancia
Z=	0,5	Aceleración efectiva (g)
g=	9,81	Gravedad (m/s^2)
R=	8	Factor reducción de respuesta
ζ_s =	0,05	Amortiguamiento
η =	2,48	Razón entre acel espectral y PGA
F_a =	1,18	Amplificación de suelo
F_d =	1,06	Amplificación ordenadas para roca
F_s =	1,23	Comportamiento no lineal de suelos
T_0 =	0,110	
T_c =	0,608	

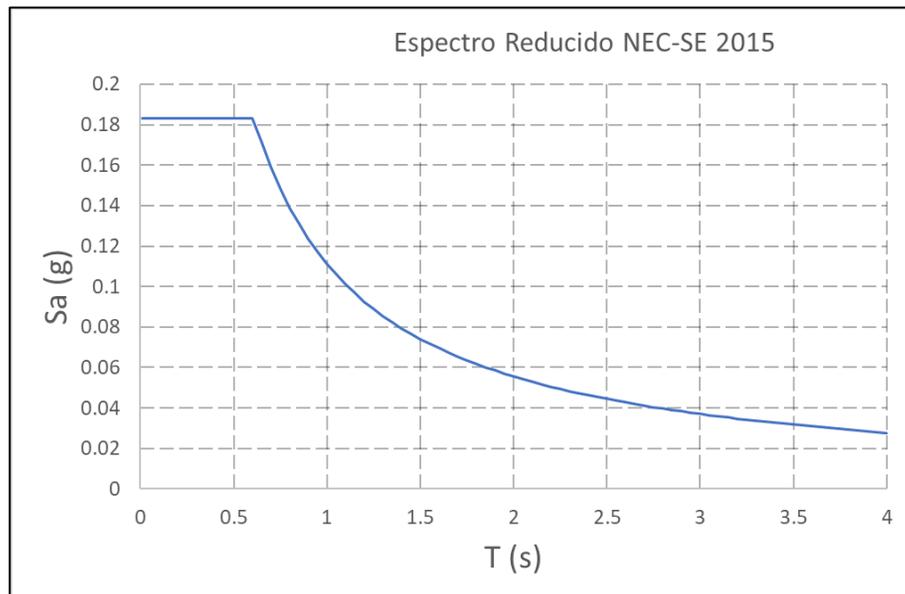


Figura VII-3 Espectro reducido de diseño

VII.3 Combinaciones de carga

La *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), en su capítulo correspondiente a cargas y combinaciones, define a las siguientes para proceder con el diseño:

- i) Combinación 1: 1,4D
- ii) Combinación 2: 1,2D + 1,6L
- iii) Combinación 3: 1,2D + 1,0L + 1,0E
- iv) Combinación 4: 0,9D + 1,0E

En donde D corresponde a la carga permanente, L a la sobrecarga y E la carga sísmica.

VII.4 Diseño obtenido

Una vez desarrollado el correspondiente análisis y modelamiento de la estructura, se obtuvo el resultado que se presenta en la figura a continuación:

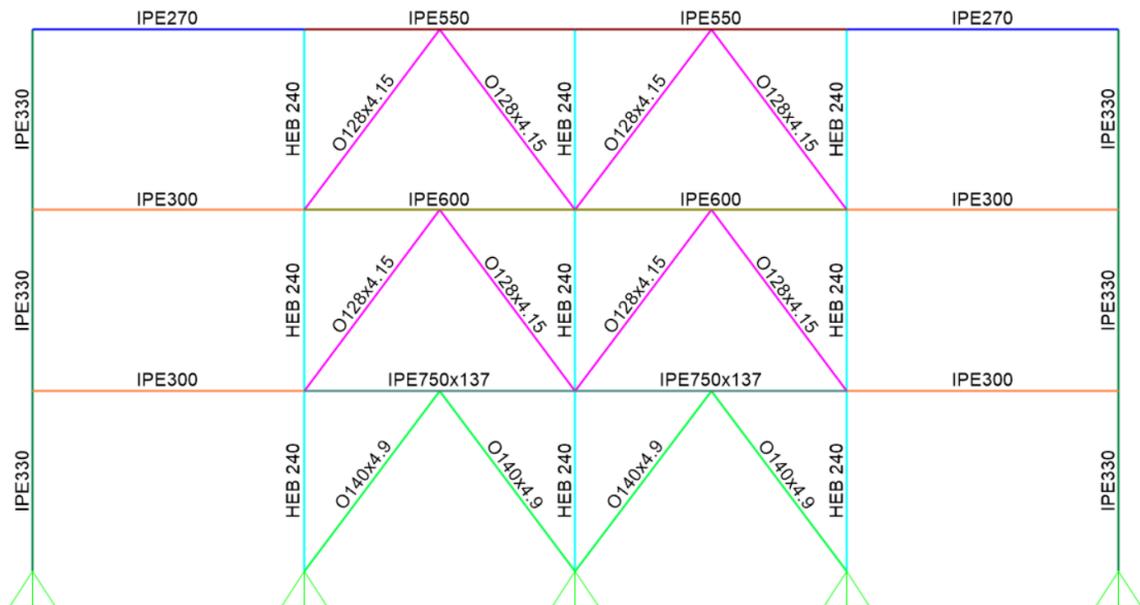


Figura VII-4 Esquema general de pórtico diseñado

Para el análisis y diseño del PEAC de acuerdo con la normativa ecuatoriana se utilizaron los perfiles comerciales que se disponen en Ecuador, llegando a obtener la definición de estructura que se presenta a continuación:

VII.4.1 Vigas

a) Vigas centrales:

i) Piso 1:

Para el nivel +4,00 se utilizó una viga doble T “IPE 750x137”, cuyas dimensiones principales son 75,3cm de altura del alma, 26,3cm de ancho de alas y espesores de 1,15cm y 1,7cm para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de 172,11cm² y su peso por unidad de longitud es de 135 kg/m.

ii) Piso 2:

Para el nivel +8,00 se utilizó una viga doble T “IPE600”, cuyas dimensiones principales son 60cm de altura del alma, 22cm de ancho de alas y espesores de 1,2cm y 1,9cm para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de 151,04cm² y su peso por unidad de longitud es de 119kg/m.

iii) Piso 3:

Para el nivel +12,00 se utilizó una viga doble T “IPE550”, cuyas dimensiones principales son 55cm de altura del alma, 21cm de ancho de alas y espesores de 1,1cm y 1,72cm para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de 129,47cm² y su peso por unidad de longitud es de 102 kg/m.

b) Vigas exteriores:

iv) Pisos 1 y 2:

Para los niveles +4,00 y +8,00 se utilizó una viga doble T “IPE300”, cuyas dimensiones principales son 30cm de altura del alma, 15cm de ancho de alas y espesores de 0,71cm y 1,07cm para el alma y alas, respectivamente. El área

de la sección transversal es de $51,88\text{cm}^2$ y su peso por unidad de longitud es de 41kg/m .

v) Piso 3:

Para el nivel $+12,00$ se utilizó una viga doble T “IPE270”, cuyas dimensiones principales son 27cm de altura del alma, $13,5\text{cm}$ de ancho de alas y espesores de $0,66\text{cm}$ y $1,02\text{cm}$ para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de $44,01\text{cm}^2$ y su peso por unidad de longitud es de 35kg/m .

VII.4.2 Columnas

a) Columnas centrales:

Para las columnas centrales se utilizó una viga doble T “HBE240”, cuyas dimensiones principales son 24cm de altura del alma, 24cm de ancho de alas y espesores de $1,0\text{cm}$ y $1,7\text{cm}$ para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de $102,20\text{cm}^2$ y su peso por unidad de longitud es de 80kg/m .

b) Columnas exteriores:

Para las columnas exteriores se utilizó una viga doble T “IPE330”, cuyas dimensiones principales son 33cm de altura del alma, 16cm de ancho de alas y espesores de $0,75\text{m}$ y $1,15\text{cm}$ para el alma y alas, respectivamente. El área de la sección transversal es de $59,83\text{cm}^2$ y su peso por unidad de longitud es de 47kg/m .

VII.4.3 Diagonales

a) Piso 1:

Para las diagonales entre los niveles $+0,00$ y $+4,00$ se utilizó un perfil tubular hueco, con un diámetro de $14,0\text{cm}$ y un espesor de $0,49\text{cm}$. El área de la

sección transversal es de 20,80cm² y su peso por unidad de longitud es de 16kg/m.

b) Pisos 2 y 3:

Para las diagonales entre los niveles +4,00 y +12,00 se utilizaron perfiles tubulares huecos, con un diámetro de 12,8cm y un espesor de 0,415cm. El área de la sección transversal es de 15,96cm² y su peso por unidad de longitud es de 12,5kg/m.

VII.5 Análisis Modal

Una vez definida la disposición de los elementos que conforman el pórtico, como resultado del análisis modal desarrollado, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla VII-3 Periodos y porcentajes de participación modal

Períodos y Porcentaje de Participación Modal			
Modo	Periodo	% Participación	% Acumulado
	(seg)	(%)	(%)
1	0,3180	91,86%	91,86%
2	0,1680	0,10%	91,95%
3	0,1678	0,00%	91,95%
4	0,1664	0,00%	91,95%
5	0,1664	0,00%	91,95%
6	0,1480	7,85%	99,80%
7	0,1316	0,00%	99,80%
8	0,1315	0,03%	99,83%
9	0,0855	0,06%	99,89%
10	0,0817	0,00%	99,89%
11	0,0816	0,00%	99,89%
12	0,0815	0,00%	99,89%

VII.6 Peso sísmico y cortante basal

Una vez desarrollado el análisis correspondiente, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla VII-4 Cortante basal y peso de la estructura.

Peso Estructural del marco	PP (ton)	10,50
Peso sísmico "Lateral"	Ws (ton)	192,57
Corte Sís. de diseño	Eh (ton)	36,58

Como se observa en la tabla anterior, producto de la modelación se tiene que el corte sísmico de diseño es igual a 36,58 toneladas y un peso propio del pórtico igual a 10,50 toneladas.

VII.7 Factores de utilización

De acuerdo con las cargas impuestas y los perfiles colocados para el diseño, los factores de utilización para cada una de las combinaciones de carga indicadas en VII.3 son:

Tabla VII-5 Factores de utilización de elementos para cada combinación de carga

Elemento	Perfil	Factor de utilización de acuerdo con Combinación			
		1,4D	1,2D + 1,6L	1,2D + 1,0L + 1,0E	0,9D + 1,0E
Viga central nivel 1	IPE 750x137	0,04	0,13	0,75	0,68
Viga central nivel 2	IPE600	0,02	0,16	0,84	0,74
Viga central nivel 3	IPE550	0,01	0,10	0,99	0,93
Viga ext. nivel 1 y 2	IPE300	0,10	0,84	0,57	0,07
Viga ext. nivel 3	IPE270	0,13	0,60	0,42	0,08
Columnas centrales	HEB240	0,42	0,88	0,70	0,27
Columnas exteriores	IPE330	0,13	0,93	0,62	0,08
Diagonal nivel 1	O 140x4,9	0,17	0,47	0,97	0,68
Diagonal nivel 2 y 3	O 128x4,1	0,13	0,40	0,70	0,50

VII.8 Comparativo con diseño en base a la Norma Chilena

A continuación, se procede a la comparativa del diseño realizado respecto de lo obtenido en base a la aplicación de la norma *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y el anteproyecto de actualización de la norma *NCh2369/2017* (INN, 2017).

Tabla VII-6 Comparativo de parámetros principales de diseño

Parámetro		NCh2369of2003	NCh2369/2017	NEC-SE2015
Factor de importancia	I	1	1	1
Factor Mod. Resp.	R	5	5	8
Amortiguamiento	(%)	3	3	5
Periodo primer modo	T (seg)	0.258	0.282	0.318
Masa primer modo	M (%)	90.9	89.6	91.86
Peso estructural del marco	PP (ton)	8.5	9.6	10.5
Peso Sís. "Lateral"	Ws (ton)	190.3	191.5	192.6
Corte Sís. de diseño	Eh (ton)	39.75	39.58	36.58
Fuerza Sís. Vertical	Ev (ton)	38.06	38.31	0

Tabla VII-7 Comparación de perfiles utilizados en base a cada código

Elemento	NCh2369of2003		NCh2369/2017		NEC-SE2015	
	Perfil	FU	Perfil	FU	Perfil	FU
Viga central nivel 1	IN30x44.6	0.79	IN70x126	0.95	IPE 750x137	0.75
Viga central nivel 2	IN30x44.6	0.79	IN60x83.3	0.98	IPE600	0.84
Viga central nivel 3	IN25x32.6	0.72	IN25x32.6	0.72	IPE550	0.99
Viga ext. nivel 1 y 2	IN30x44.6	0.79	IN30x44.6	0.79	IPE300	0.84
Viga ext. nivel 3	IN25x32.6	0.72	IN25x32.6	0.72	IPE270	0.60
Columnas centrales	HN30x92.2	0.85	HN30x92.2	0.85	HEB240	0.88
Columnas exteriores	IN20x45.6	0.84	IN20x45.6	0.83	IPE330	0.93
Diagonal nivel 1	O 160x6	0.75	O 150x5	0.94	O 140x4,9	0.97
Diagonal nivel 2 y 3	O 140x5	0.7	O 127x4	0.92	O 128x4,15	0.70

Como se observa en las tablas anteriores, el valor del cortante sísmico de diseño mediante la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015) tiene una reducción de 7,58% y 7,97% en comparación con la *NCh2369/2017* (INN, 2017) y *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), respectivamente.

El peso propio de la estructura también varía con la implementación de la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), valor que se modifica, respecto del anteproyecto de actualización de la

norma *NCh2369/2017* (INN, 2017) en un aumento de 9,38% y un aumento del 23,53% con relación a la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003).

Los elementos diagonales de arriostramiento tienen una disminución de sección geométrica con la aplicación de la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), que en porcentaje corresponde, para las diagonales del nivel inferior, a una reducción del área transversal del 28,36% y 8,69% respecto de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente.

Para los niveles 2 y 3 las diagonales diseñadas en base a la *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015) tienen una reducción en la sección transversal de un 23,86% respecto de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y un aumento del 4,46% en comparación con la *NCh2369/2017* (INN, 2017).

VIII. MODELACIÓN NO LINEAL DEL PÓRTICO ARRIOSTRADO CONCÉNTRICAMENTE

Para el análisis no lineal del pórtico en estudio se utilizó el software *Opensees* (McKenna et al, 2006) en su versión 3.1.0, software en donde se procedió a la modelación de las columnas, vigas, diagonales y placas de conexión (gussets) pertenecientes a los pórticos en estudio. Un esquema de la discretización de elementos con los que se trabajó en *Opensees* (McKenna et al, 2006) se presenta a continuación:

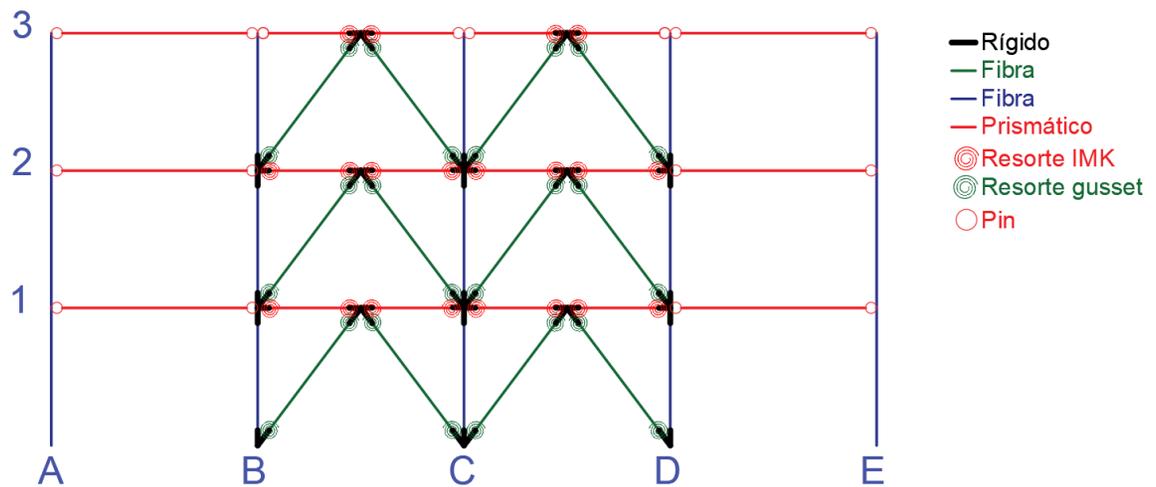


Figura VIII-1 Esquema general pórtico en Opensees

Como se observa en la figura anterior, para el modelamiento del pórtico se han utilizado elementos tipo rígido para las zonas de conexión, prismáticos para las vigas y de fibra para las columnas y diagonales.

A continuación, se procederá a indicar con mayor detalle las propiedades, parámetros y consideraciones tomadas para el modelamiento de cada uno de los elementos que conforman el pórtico:

VIII.1 Vigas

Para el modelamiento de las vigas del pórtico, se ha considerado a cada una de ellas como elementos prismáticos, debiendo distinguir dos tipos de vigas dentro del pórtico debido a las consideraciones de unión con las columnas.

Estos dos tipos de vigas corresponden a las de los vanos exteriores (entre ejes A – B y D – E) y a las de los vanos interiores (entre ejes B – C y C – D). La diferencia entre unas y otras corresponde en cuanto a que las interiores tienen, en sus extremos, placas gusset soldadas para la posterior instalación de las diagonales del pórtico, lo que hace que se forme una zona “rígida” en el extremo de la viga, zona rígida que como se indicará posteriormente es necesario que sea modelada.

Para las vigas entre los ejes A – B y D – E las uniones viga – columna, al ser uniones que de manera ideal aportan únicamente resistencia al corte, se ha utilizado un modelo con rotación elástica liberada (tipo pin), mismo que consiste en dos nodos que comparten las mismas coordenadas y están acoplados tanto para la traslación lateral como vertical mas no en cuanto al giro respecto del cual cada nodo puede tener una rotación independiente del otro.

Para cada tramo en color rojo de la Figura VIII-1 se utilizó el comando *Opensees* “*element*” del tipo “*elasticBeamColumn*” ingresando para el efecto de la modelación los nodos inicial y final del elemento, así como sus características geométricas y mecánicas tales como el área, inercia y módulo de elasticidad.

VIII.2 Columnas

Los elementos tipo *columna* corresponden a los de color azul en la Figura VIII-1 mismos que han sido modelados utilizando el comando *Opensees* (McKenna et al, 2006) “*element*”

del tipo “*dispBeamColumn*” en base a una sección de tipo fibra, como se detalla a continuación:

- Altura de la columna, sin considerar los tramos rígidos correspondientes, dividida en 4 partes iguales, con una sección transversal de elemento tipo fibra compuesta por un *patch* (McKenna et al, 2006) de 3 elementos rectangulares que componen la sección doble T de las columnas.

Número de fibras a lo largo de la altura h y ancho b de la sección transversal igual a 6.

Número de fibras a través de los espesores t_w y t_f de la sección transversal igual a 2.

Puntos de integración igual a 5.

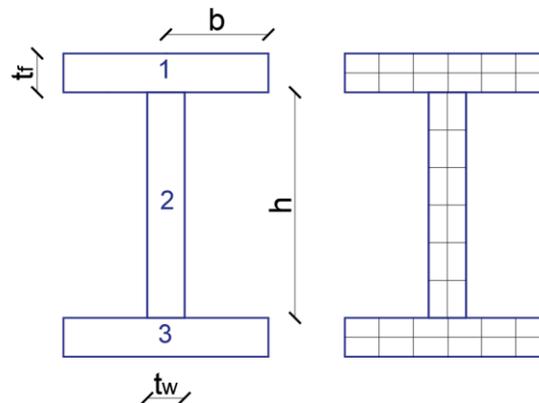


Figura VIII-2 Detalle de configuración de sección de fibra en columnas doble T

- Elemento no lineal modelado utilizando el material definido en *OpenSees* (McKenna et al, 2006) denominado como “*UniaxialMaterial Steel02*” al que se le adiciona propiedades de fatiga (Karamanci & Lignos, 2014).

Para el modelamiento del material uniaxial “*UniaxialMaterial Steel02*” y la fatiga correspondiente se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla VIII-1 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las columnas NEC2015

	Fy _{esperado} (tonf/m ²)	E0 (tonf/m ²)	R0	CR1	CR2	b	a1	a2	a3	a4	m	ε ₀
Columna IPE300	32890	20400000	20	0,93	0,25	0,001	0,01	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,0787
Columna HEB240	32890	20400000	20	0,93	0,25	0,001	0,01	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,0935

Tabla VIII-2 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las columnas NCh2369.Of2003 y NCh/2017

	Fy _{esperado} (tonf/m ²)	E0 (tonf/m ²)	R0	CR1	CR2	b	a1	a2	a3	a4	m	ε ₀
Columna IN20x45.6	32890	20400000	20	0,93	0,25	0,001	0,01	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,0883
Columna HN30x92.2	32890	20400000	20	0,93	0,25	0,001	0,01	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,0912

VIII.3 Diagonales

Los elementos tipo *diagonal* corresponden a los de color verde en la Figura VIII-1 mismos que han sido modelados utilizando el comando de *Opensees* (McKenna et al, 2006) “*element*” del tipo “*dispBeamColumn*” en base a una sección de tipo fibra, como se detalla a continuación:

- Sección transversal de elemento tipo fibra compuesta por un patch (McKenna et al, 2006) de tipo arco de circunferencia que componen la sección tubular de las diagonales.

Número de fibras a lo largo del perímetro de la circunferencia igual a 12.

Número de fibras a través del espesor de la sección igual a 4.

Puntos de integración igual a 5.

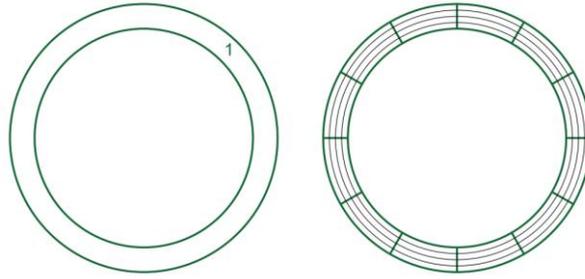


Figura VIII-3 Detalle de configuración de sección de fibra en diagonales tubulares

- Elemento no lineal modelado utilizando el material definido en *Opensees* (McKenna et al, 2006) denominado como “*UniaxialMaterial Steel02*” al que se le adiciona propiedades de fatiga (Karamanci & Lignos, 2014)
Para el modelamiento del material uniaxial “*UniaxialMaterial Steel02*” y la fatiga correspondiente se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla VIII-3 Parámetros utilizados para modelación material *Steel02* y fatiga en las diagonales *NEC2015*

	Fy _{esperado} (tonf/m ²)	E0 (tonf/m ²)	R0	CR1	CR2	b	a1	a2	a3	a4	m	ε ₀
Diagonal O128x4.15	40000	20400000	20	0,93	0,25	0,005	0,02	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,04593
Diagonal O140x4.9	40000	20400000	20	0,93	0,25	0,005	0,02	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,04989

Tabla VIII-4 Parámetros utilizados para modelación material *Steel02* y fatiga en las diagonales *NCh2003*

	Fy _{esperado} (tonf/m ²)	E0 (tonf/m ²)	R0	CR1	CR2	b	a1	a2	a3	a4	m	ε ₀
Diagonal O140x5	40000	20400000	24	0,93	0,25	0,005	0,02	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,05051
Diagonal O160x6	40000	20400000	24	0,93	0,25	0,005	0,02	1,00	0,02	1,00	-0,30	0,05489

Tabla VIII-5 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 y fatiga en las diagonales NCh/2017

	$F_{y\text{esperado}}$ (tonf/m ²)	E0 (tonf/m ²)	R0	CR1	CR2	b	a1	a2	a3	a4	m	ϵ_0
Diagonal O127x4	40000	20400000	24	0,93	0,25	0,005	0,02	1	0,02	1	-0,3	0,04497
Diagonal O150x5	40000	20400000	24	0,93	0,25	0,005	0,02	1	0,02	1	-0,3	0,04977

- Se divide a la longitud de la diagonal, sin incluir elementos rígidos, en un total de 8 segmentos con el objeto de incluir una imperfección fuera del plano del orden de $L_{\text{eff}}/1000$, como se muestra a continuación:

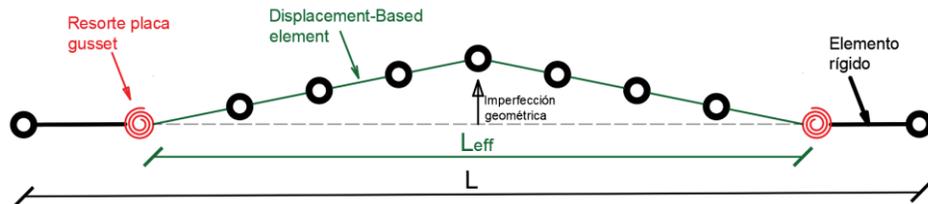


Figura VIII-4 Detalle de imperfección geométrica modelada en diagonales

Para implementar la imperfección fuera del plano se procedió a la modelación del pórtico que, si bien es un pórtico 2D, en el espacio 3D de *Opensees* (McKenna et al, 2006) de manera que se capture el pandeo de la diagonal fuera del plano, como es lo esperado. Dicha modelación tuvo especial cuidado en no permitir rotaciones ni desplazamientos del resto de elementos del pórtico tanto respecto de los ejes X e Y (rotaciones) ni Z (traslaciones), asignando condiciones de contorno a los puntos de contacto viga-columna restringiendo dichos movimientos.

VIII.4 Placas Gusset

En la unión de las diagonales del pórtico a las vigas y columnas del mismo, es necesaria la modelación de la placa de conexión o gusset, de acuerdo a lo mostrado en la figura a continuación (Hsiao & et al, 2012):

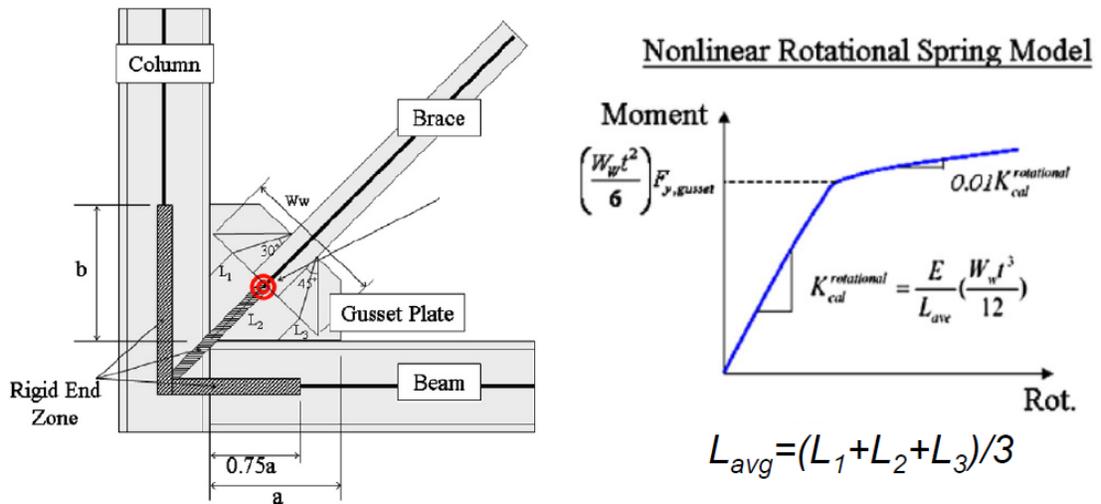


Figura VIII-5 Esquema de modelación de gusset

Como se observa en la figura anterior, la conexión que se propone consiste en indicar que debido a la placa gusset se conforman zonas rígidas en la columna, viga y diagonal que deben ser modeladas y, adicionalmente, para modelar el comportamiento de la placa gusset y la posibilidad de pandeo fuera del plano debe considerarse un elemento de *Opensees* (McKenna et al, 2006) del tipo *zeroLength* mismo que corresponde a un resorte al que se le adicionan diferentes propiedades para capturar dicho comportamiento.

VIII.4.1 Zonas rígidas

Para la modelación de las zonas rígidas se utilizaron elementos prismáticos del tipo *elasticBeamColumn*, utilizando el área e inercias respectivos de los perfiles considerados, con la modificación del módulo de elasticidad amplificado en 500 veces para considerar como rígidos dichos elementos.

Las longitudes de cada elemento rígido vienen dadas por el diseño de la placa gusset obtenido para cada una de las diferentes normativas, diseño en el que se cumplió con mantener la longitud libre en la placa para la deformación inelástica (NIST, 2017), como se muestra en la siguiente figura:

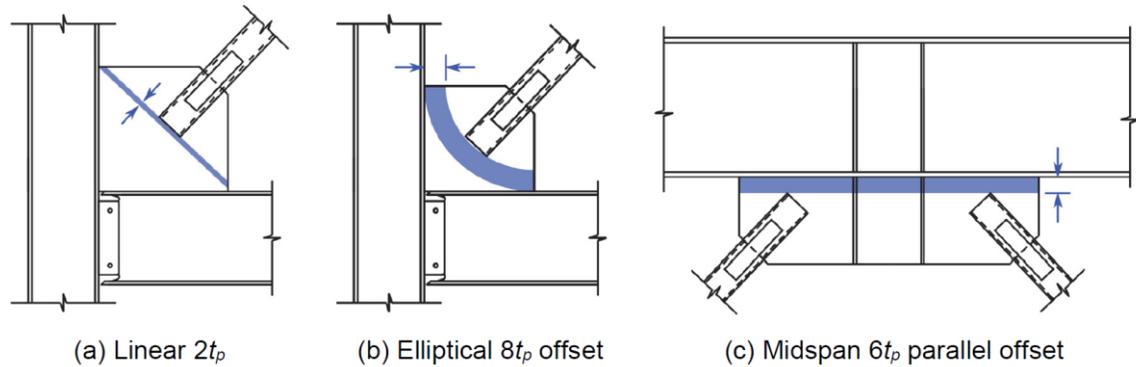


Figura VIII-6 Espacio libre para deformación inelástica en una conexión esquinera o mitad del vano

VIII.4.2 ZeroLength element (Resorte Gusset)

Para la modelación de la placa gusset, se trabajó con un elemento *zeroLength* (McKenna et al, 2006) mismo que conecta el elemento rígido con la diagonal correspondiente.

Dicho elemento está conformado a la vez por dos resortes que modelan el comportamiento fuera del plano y torsional de la placa gusset (Chen & Tirca, 2013), mismos que a continuación se detallan:

a) Comportamiento fuera del plano

El comportamiento de pandeo fuera del plano se define en base a las ecuaciones mostradas en la Figura VIII-5 en donde para la rigidez rotacional se utiliza la ecuación propuesta por (Hsiao & et al, 2012)

$$K_{gusset} = \frac{E}{L_{ave}} \left(\frac{W_w t^3}{12} \right) \quad Ec VIII.1$$

, donde:

- E: Módulo de Elasticidad del acero
- W_w : Ancho de Whitmore de acuerdo con (AISC, 2010)
- t: Espesor de la placa gusset
- L_{ave} : valor promedio entre las longitudes L1, L2 y L3 de la Figura VIII-5

El valor de la fuerza resistente (momento) en el resorte es modelado de acuerdo con (Hsiao & et al, 2012):

$$M_y = \left(\frac{W_w t^2}{6} \right) F_{ygusset} \quad \text{Ec VIII.2}$$

, donde:

- W_w : Ancho de Whitmore de acuerdo con (AISC, 2010)
- t: Espesor de la placa gusset
- $F_{ygusset}$: Límite de fluencia esperado en el acero de la placa gusset

El comportamiento no lineal fue modelado utilizando el material definido en *OpenSees* (McKenna et al, 2006) denominado como “*UniaxialMaterial Steel02*”.

Para el modelamiento del material uniaxial “*UniaxialMaterial Steel02*” se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla VIII-6 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NEC2015

	M_y (tonf-m)	K_{gusset} (tonf-m/rad)	R0	CR1	CR2	b
Conexión viga-columna Nivel +0.00	0,4227	7,0324	20	0,925	0,15	0,01
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	0,3405	4,5217	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	0,4227	9,5285	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	0,3405	7,9446	20	0,925	0,15	0,01

Tabla VIII-7 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NCh2003

	M_y (tonf-m)	K_{gusset} (tonf-m/rad)	R0	CR1	CR2	b
Conexión viga-columna Nivel +0.00	0,5230	6,5006	20	0,925	0,15	0,01
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	0,4755	5,9381	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	0,5230	11,0965	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	0,4755	10,4449	20	0,925	0,15	0,01

Tabla VIII-8 Parámetros utilizados para modelación material Steel02 en la placa gusset NCh/2017

	M_y (tonf-m)	K_{gusset} (tonf-m/rad)	R0	CR1	CR2	b
Conexión viga-columna Nivel +0.00	0,8172	12,6966	20	0,925	0,15	0,01
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	0,6018	8,4548	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	0,8172	21,4613	20	0,925	0,15	0,01
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	0,6018	14,8717	20	0,925	0,15	0,01

El comportamiento fuera del plano fue asignado al elemento *zeroLength* mediante un resorte asignando las propiedades de la Tabla VIII-6 Tabla VIII-7 y Tabla VIII-8, dependiendo la normativa con la cual se estaba trabajando, a la dirección 5 del elemento misma que corresponde a la rotación respecto del eje local Y (McKenna et al, 2006).

b) Comportamiento torsional

Para representar el comportamiento torsional de la placa gusset se adiciona al elemento *zeroLength* un resorte con una constitutiva de material elástico en el cual la rigidez torsional viene dada por GJ/L_{ave} en donde G es el módulo de corte del acero de la placa gusset, J es la constante torsional de la sección transversal de Whitmore y L_{ave} es valor promedio entre las longitudes L1, L2 y L3 de la Figura VIII-5.

El comportamiento no lineal, como se indicó, fue modelado utilizando el material definido en *Opensees* (McKenna et al, 2006) denominado como “*UniaxialMaterial Elastic*” utilizando los siguientes parámetros:

Tabla VIII-9 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NEC2015

	K_{torsional} (tonf-m/rad)
Conexión viga-columna Nivel +0.00	10,3892
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	6,9639
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	14,0568
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	15,4681

Tabla VIII-10 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NCh2003

	K_{torsional} (tonf-m/rad)
Conexión viga-columna Nivel +0.00	9,7341
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	8,8680
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	16,6162
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	15,5951

Tabla VIII-11 Parámetros utilizados para modelación material Elastic en la placa gusset NCh/2017

	K_{torsional} (tonf-m/rad)
Conexión viga-columna Nivel +0.00	18,8799
Conexión viga-columna Niveles +4.00 y +8.00	12,5771
Conexión mitad vano viga Nivel +4.00	31,9132
Conexión mitad vano viga Niveles +8.00 y +12.00	22,1178

El comportamiento fuera del plano fue asignado al elemento *zeroLength* mediante un resorte asignando las propiedades de la Tabla VIII-9 Tabla VIII-10 y Tabla VIII-11, dependiendo la normativa con la cual se estaba trabajando, a la dirección 4 del elemento mismo que corresponde a la rotación respecto del eje local X (McKenna et al, 2006).

VIII.5 ZeroLength element (Resortes IMK)

Dado que las vigas del pórtico han sido modeladas mediante elementos prismáticos, la colocación de elementos *zeroLength* en la unión de la zona rígida y la viga, en los vanos centrales del pórtico, sirve para modelar rótulas con plastificación concentrada utilizando para ello un resorte *rotSpring2DModIKModel* (McKenna et al, 2006).

Dicho elemento utiliza una constitutiva de material bilineal que para el presente caso se asocia a la dirección local 6 del elemento, misma que corresponde al giro en torno al eje Z local.

Para obtener los parámetros necesarios para la modelación del material, se trabajó utilizando lo indicado en (NIST, 2017), teniendo lo siguiente para cada elemento:

Tabla VIII-12 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NEC2015

	K_{resorte} (tonf-m)	M (tonf-m)	α	Λ	c	θ_p	θ_{pc}	Q'_R	Δ'_{ult}	D
Nivel +4.00	1090763,24	207,39	0,0028	1,7198	1	0,01976	0,1802	0,4	0,2	1
Nivel +8.00	580204,96	146,57	0,0028	2,3748	1	0,02853	0,2827	0,4	0,2	1
Nivel +12.00	334625,00	115,58	0,0028	2,3058	1	0,03287	0,2792	0,4	0,2	1

Tabla VIII-13 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NCh2003

	K_{resorte} (tonf-m)	M (tonf-m)	α	Λ	c	θ_p	θ_{pc}	Q'_R	Δ'_{ult}	D
Nivel +4.00	63539,51	30,290	0,0028	1,7704	1	0,05338	0,2254	0,4	0,2	1
Nivel +8.00	60866,71	30,290	0,0028	1,7446	1	0,05407	0,2254	0,4	0,2	1
Nivel +12.00	25264,29	18,500	0,0028	2,0633	1	0,07228	0,3032	0,4	0,2	1

Tabla VIII-14 Parámetros utilizados para modelación material Bilineal en resortes IMK NCh/2017

	K_{resorte} (tonf-m)	M (tonf-m)	α	Λ	c	θ_p	θ_{pc}	Q'_R	Δ'_{ult}	D
Nivel +4.00	969360,03	198,190	0,0028	1,3917	1	0,01929	0,1509	0,4	0,2	1
Nivel +8.00	413478,94	105,410	0,0028	1,3153	1	0,02298	0,1415	0,4	0,2	1
Nivel +12.00	25264,29	18,500	0,0028	2,0633	1	0,0722	0,3032	0,4	0,2	1

IX. RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE DEMANDAS REGISTRADAS EN TERREMOTOS SEVEROS

IX.1 Registros seleccionados

Para la primera parte de este trabajo se desarrolló la comparación de la respuesta de los tres sistemas respecto de un set de registros acelerográficos correspondientes a terremotos de características subductivas. Se ha registros provenientes de los terremotos subductivos de mayor magnitud registrados.

Los sets de registros han sido recopilados en (MEDALLA et al, 2019), documento en donde se procede a la creación de dos diferentes grupos de registros denominados *Megathrust* y *No Megathrust*, siendo ambos grupos construidos a similitud del apéndice A del procedimiento del FEMA P695 (FEMA, 2009)

En esta parte del trabajo se han considerado los eventos denominados como Megathrust, MT a partir de este momento, mismos que han sido seleccionados, como se mencionó anteriormente, en base al procedimiento de FEMA P695 (FEMA, 2009) y otros criterios adicionales teniendo entre los más importantes los siguientes:

- Magnitud: Únicamente se consideran eventos con magnitudes importantes que van desde magnitudes momento $M_w = 7,90$ hasta $M_w = 9,0$ con un promedio de $M_w = 8,1$.
- Tipo: El ser considera, en su mayoría, eventos con hipocentros profundos. El ser de MT es representativo de la zona de Sur América, Japón y el Noroeste de los Estados Unidos.

De acuerdo con lo indicado en FEMA P695 (FEMA, 2009) los registros elegidos incluyen únicamente aquellos con un valor de PGA mayor que 0,2g y un PGV mayor que 15cm/seg. El valor promedio del PGA es 0,53g y el valor promedio de PGV es 37,5 cm/seg.

IX.1.1 Eventos MT

El set de registros MT incluyen veinte y dos registros (44 componentes individuales) seleccionados en base a los criterios anteriormente mencionados, siendo todos y cada uno de ellos de mecanismo tipo subductivo.

Los veinte y dos registros han sido tomados de once eventos que han ocurrido entre los años 1985 y 2016, de los cuales siete han ocurrido en Chile, dos en Japón, uno en Ecuador y uno en Turquía.

Quince de los sitios de los registros son clasificados como Clase C (suelos muy rígidos) (ASCE, 2016) y los siete restantes como Clase D (suelos rígidos). El valor mínimo de la onda V_{s30} es 200 m/seg y la máxima V_{s30} es 846 m/seg, con un valor promedio de V_{s30} de 412 m/seg. Este valor promedio es bastante semejante el tipo de suelo considerado en las etapas de diseño.

Los valores de PGA varían desde 0,20g hasta 1,34g con un promedio de 0,53g. Los valores de PGV se encuentran entre un límite mínimo de 18,6cm/seg y uno máximo de 84,6cm/seg con un promedio de 37,5cm/seg.

En la tabla que se presenta a continuación, se resumen propiedades y características principales de los registros seleccionados.

Tabla IX-1 Características de registros acelerográficos MT

	COID	EQID Earthquake	Depth [km]	YEID Year	Mw	RupDist [km]	PGA [g]	PGV [cm/s]	Duration [s]
1	CHILE	Valparaiso	33	1985	7,90	55,6	0,68	38,61	79,3
2	CHILE	Valparaiso	33	1985	7,90	55,6	0,51	39,58	79,3
3	CHILE	Valparaiso	33	1985	7,90	36,7	0,70	43,47	89,7
4	CHILE	Valparaiso	33	1985	7,90	36,7	0,70	41,63	89,7
5	TAIWAN	Chi_Chi	8	1999	7,60	16,0	0,27	41,73	90,0
6	TAIWAN	Chi_Chi	8	1999	7,60	16,0	0,20	44,76	90,0
7	TAIWAN	Chi_Chi	8	1999	7,60	16,0	0,30	20,36	90,0
8	TAIWAN	Chi_Chi	8	1999	7,60	16,0	0,64	37,34	90,0
9	CHILE	Sur_Peru	30	2001	8,40	221,8	0,26	24,19	63,3
10	CHILE	Sur_Peru	30	2001	8,40	221,8	0,31	26,88	63,3
11	CHILE	Sur_Peru	30	2001	8,40	220,8	0,34	28,86	76,2
12	CHILE	Sur_Peru	30	2001	8,40	220,8	0,28	23,94	76,2
13	JAPON	Tokachi-Oki	42	2003	8,00	93,0	0,51	46,08	150,0
14	JAPON	Tokachi-Oki	42	2003	8,00	93,0	0,42	23,82	150,0
15	JAPON	Tokachi-Oki	42	2003	8,00	147,0	0,38	46,64	298,99
16	JAPON	Tokachi-Oki	42	2003	8,00	147,0	0,38	37,69	299,0
17	CHILE	Tocopilla	48	2007	7,70	34,2	0,53	28,51	70,9
18	CHILE	Tocopilla	48	2007	7,70	34,2	0,66	22,05	70,9
19	CHILE	Tocopilla	48	2007	7,70	29,0	0,41	30,69	150,0
20	CHILE	Tocopilla	48	2007	7,70	29,0	0,45	40,56	150,0
21	CHILE	Maule	30	2010	8,80	60,3	0,54	37,33	187,0
22	CHILE	Maule	30	2010	8,80	60,3	0,53	41,84	187,0
23	CHILE	Maule	30	2010	8,80	54,8	0,95	33,69	200,0
24	CHILE	Maule	30	2010	8,80	54,8	0,73	41,37	200,0
25	JAPON	Tohoku	24	2011	9,00	174,0	0,58	22,79	300,0
26	JAPON	Tohoku	24	2011	9,00	174,0	0,89	64,38	300,0
27	JAPON	Tohoku	24	2011	9,00	166,0	0,49	23,72	300,0
28	JAPON	Tohoku	24	2011	9,00	166,0	0,58	32,33	300,0
29	CHILE	Iquique	39	2014	8,10	61,8	0,57	27,65	300,0
30	CHILE	Iquique	39	2014	8,10	61,8	0,50	27,74	300,0
31	CHILE	Iquique	39	2014	8,10	54,2	0,67	43,66	150,0
32	CHILE	Iquique	39	2014	8,10	54,2	0,74	44,92	150,0
33	CHILE	Iquique	28	2014	7,70	68,4	0,54	31,60	150,0
34	CHILE	Iquique	28	2014	7,70	68,4	0,58	40,35	150,0
35	CHILE	Iquique	28	2014	7,70	106,2	0,34	18,61	150,0
36	CHILE	Iquique	28	2014	7,70	106,2	0,36	26,48	150,0
37	CHILE	Coquimbo	23	2015	8,20	54,4	0,25	29,81	300,0
38	CHILE	Coquimbo	23	2015	8,20	54,4	0,35	37,97	300,0
39	CHILE	Coquimbo	23	2015	8,20	50,1	0,71	30,92	150,0
40	CHILE	Coquimbo	23	2015	8,20	50,1	0,81	37,14	150,0
41	ECUADOR	Manabi	19	2016	7,80	33,7	0,30	61,68	245,0
42	ECUADOR	Manabi	19	2016	7,80	33,7	0,37	66,12	245,0
43	ECUADOR	Manabi	19	2016	7,80	20,1	1,34	84,65	175,0
44	ECUADOR	Manabi	19	2016	7,80	20,1	0,83	55,39	175,0

En la Figura IX-1 se presentan en color gris los espectros correspondientes a cada uno de los eventos sísmicos de la Tabla IX-1 y en color negro el valor mediano (μ mediana) correspondiente.

Adicionalmente en la Figura IX-2 se presentan los espectros elásticos de diseño, para cada una de las normas en análisis, versus el valor mediano (μ) obtenido de todos los eventos de la Tabla IX-1

Figura IX-1 Espectros de registros MT

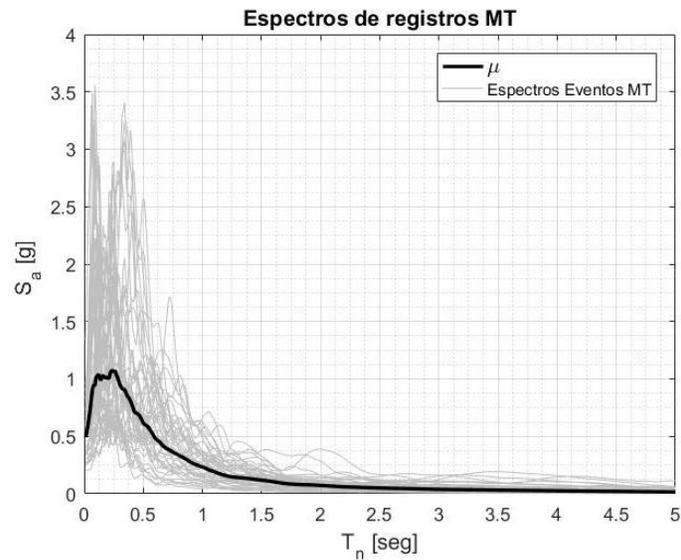
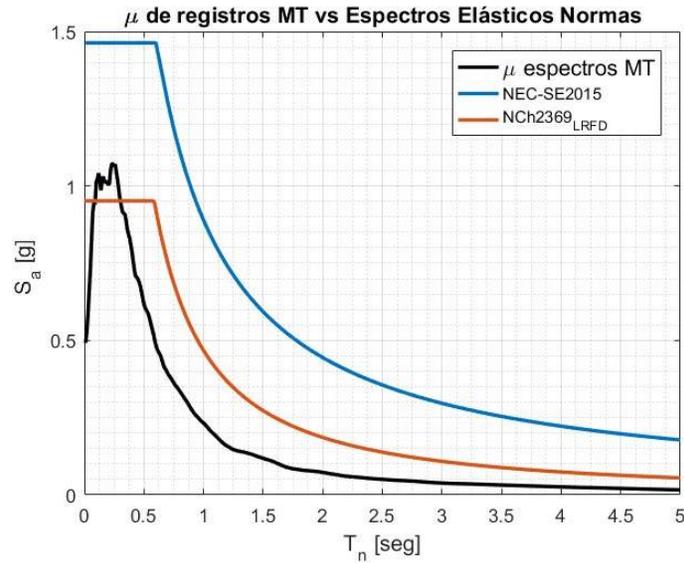


Figura IX-2 Mediana de registros MT vs Espectros Elásticos de normas



En la Figura IX-2 se puede verificar que el espectro elástico de diseño para la normativa chilena es más ajustado con la demanda mediana de los registros analizados, contrario a lo ocurrido con la norma ecuatoriana en donde se observa que la amplitud del espectro elástico de diseño respecto del espectro mediano de los registros obtenido es significativamente superior.

IX.2 Respuestas obtenidas

En este apartado se presentan las respuestas de los casos en estudio, respuestas que corresponden a los desplazamientos horizontales de piso, relación corte basal vs desplazamiento de techo, distorsiones máximas de piso, aceleraciones relativas en los pisos, cortantes basales en los apoyos y relación fuerza vs deformación axial en las diagonales. Adicionalmente se verifica si en alguno de los sistemas se activaron los resortes IMK en las vigas.

IX.2.1 Desplazamientos de piso

Las primeras respuestas presentadas corresponden al desplazamiento máximo horizontal de piso obtenidos mediante la aplicación de las tres normativas en estudio.

En la Figura IX-3 se muestran en color gris los desplazamientos horizontales máximos obtenidos para todos los registros en análisis, además en color negro se presenta el valor mediano (mediana μ) y en color azul se presentan los valores correspondientes a la mediana más la desviación estándar ($\mu + \sigma$).

Los valores antes mencionados, así como los máximos y mínimos para cada uno de los escenarios son presentados en la Tabla IX-2.

Figura IX-3 Desplazamientos de piso

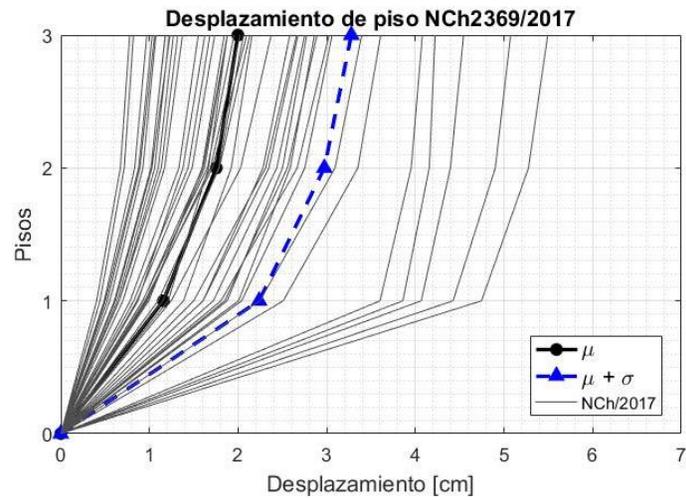
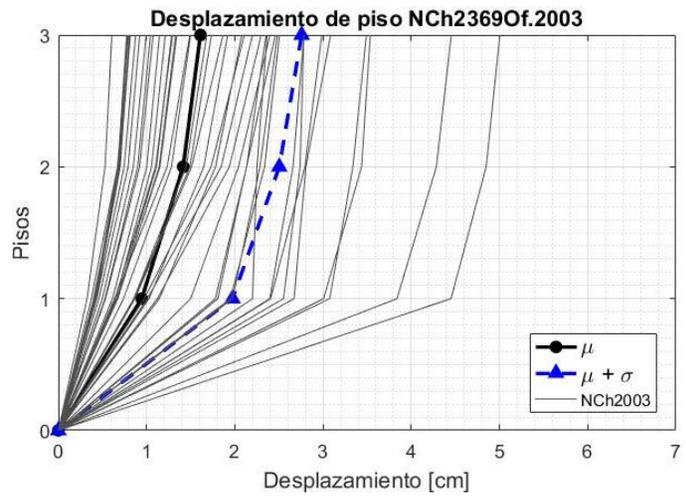
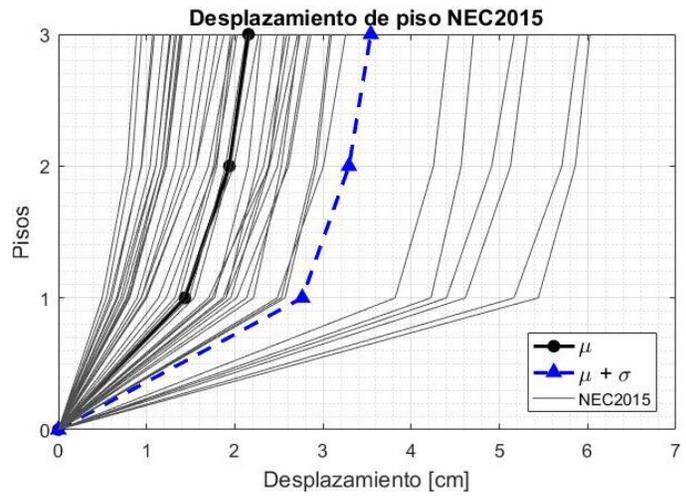
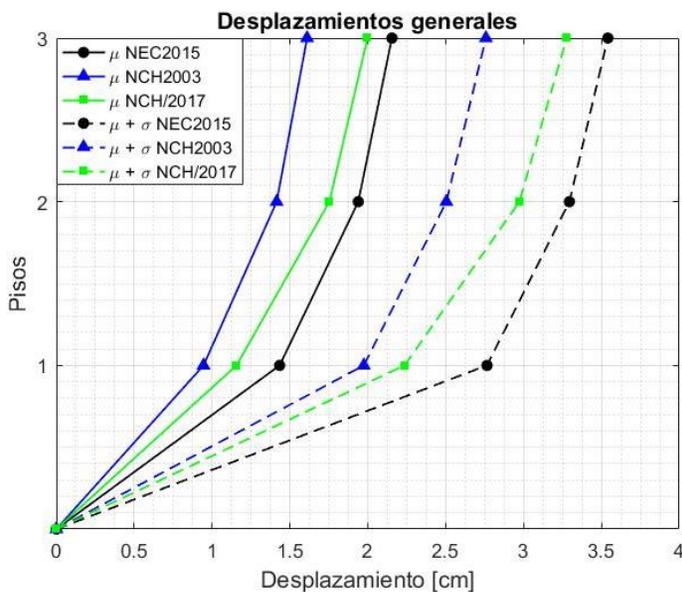


Tabla IX-2 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
δ_3 (cm)	6.0	2.2	3.5	5.0	1.6	2.8	5.5	2.0	3.3
δ_2 (cm)	5.9	1.9	3.3	4.8	1.4	2.5	5.3	1.8	3.0
δ_1 (cm)	5.4	1.4	2.8	4.5	0.9	2.0	4.7	1.2	2.2

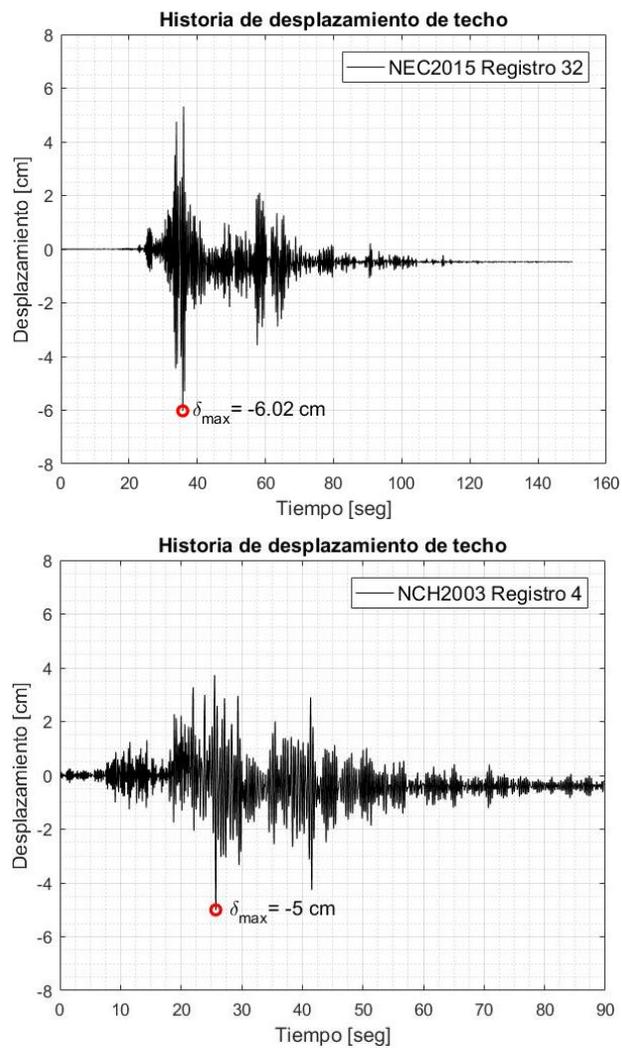
Figura IX-4 Desplazamientos horizontales de piso comparativo

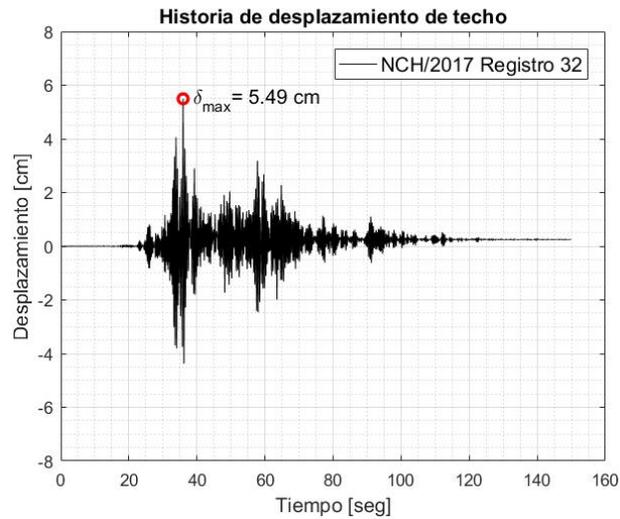


De la tabla y figura anteriores se observa que los desplazamientos laterales medianos son mayores en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), seguidos de la *NCh 2369/2017* (INN, 2017) y finalmente la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003). Dependiendo el nivel del piso se tiene que los valores medianos de la norma ecuatoriana son mayores en un 34%, 37% y 52% respecto de la norma chilena del año 2003 para los niveles 3, 2 y 1, respectivamente. De la misma manera se tiene que la norma ecuatoriana es un 8%, 11% y 24% superior a la norma chilena del año 2017, para los pisos 3, 2 y 1, en lo que respecta a desplazamientos horizontales medianos de piso.

De la misma manera en la Figura IX-5 se puede observar que el máximo desplazamiento de techo nuevamente se da en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), seguido de la *NCh 2369/2017* (INN, 2017) y finalmente la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), debiendo indicar que la norma ecuatoriana es un 20% y 10% superior a la norma chilena del año 2003 y 2017, respectivamente. Este particular es correcto dado la mayor rigidez del sistema en base a la normativa chilena del año 2003 y la baja incursión no lineal reportada.

Figura IX-5 Historias de desplazamientos de techo máximos





En las figuras anteriores se puede observar que las estructuras presentaron deformaciones residuales, debiendo indicarse que debido a las demandas que se tienen la concentración de drifts de entrepiso se dan en el primer nivel del marco. De acuerdo con el documento FEMA 356 (FEMA356, 2000) se tiene que los niveles de desempeño estructural para marcos arriostrados de acero se dividen entre *Ocupación Inmediata* (IO), *Seguridad de Vida* (LS) y *Prevención de Colapso* (CP), teniendo como límites los valores de 0,5%, 1,5% y 2% para cada uno de los niveles de desempeño, respectivamente, respecto de la máxima distorsión de entrepiso que puede presentarse.

En la Figura IX-6 y Figura IX-7 se muestran, para cada una de las normativas, las demandas máximas y remanentes de drift de entrepiso del primer nivel, respectivamente. Debido a la diferencia de valores las figuras no han sido colocadas en la misma escala.

En la Tabla IX-3 se presenta un resumen con los valores máximos y remanentes de drift del primer nivel para cada escenario.

Figura IX-6 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma

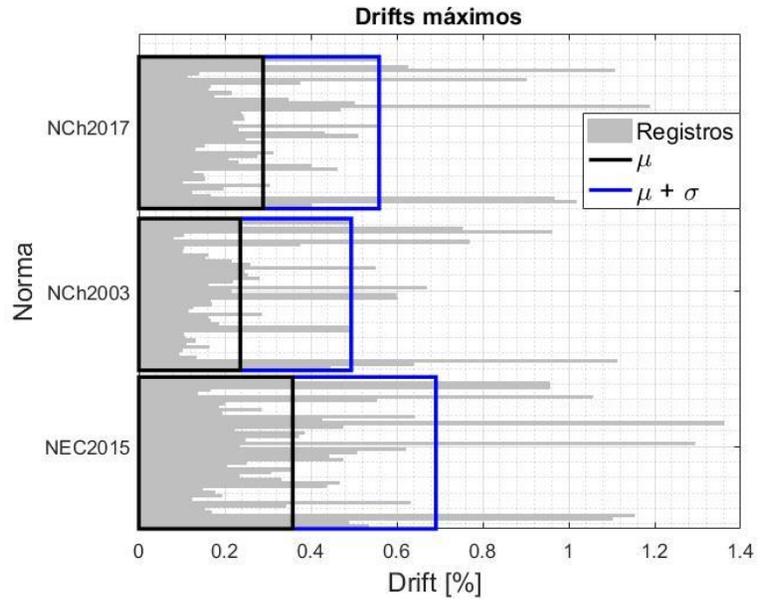


Figura IX-7 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma

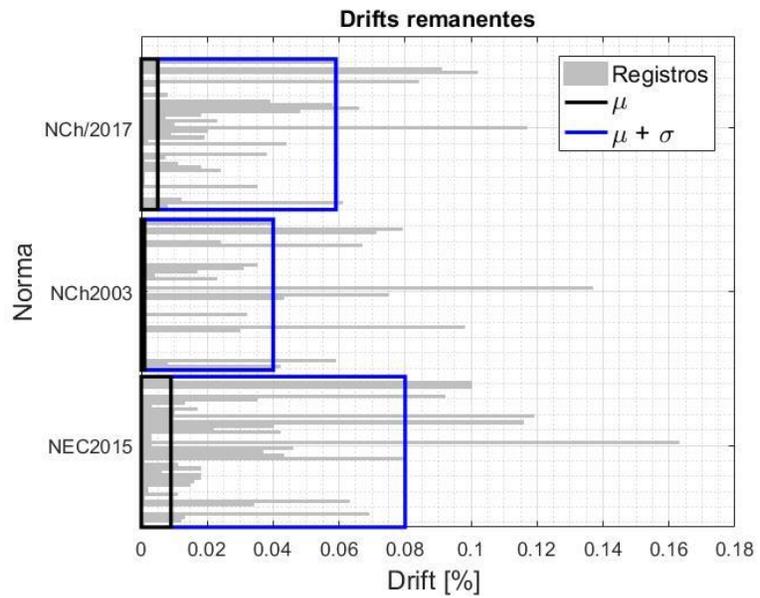


Tabla IX-3 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel I

Drifts de entrepiso. Nivel 1						
Registro	NEC 2015		NCH2003		NCH/2017	
	maximo [%]	remanente [%]	maximo [%]	remanente [%]	maximo [%]	remanente [%]
1	0.53%	0.00%	0.45%	0.03%	0.45%	0.04%
2	0.49%	0.01%	0.44%	0.04%	0.40%	0.01%
3	1.10%	0.01%	0.64%	0.01%	1.02%	0.06%
4	1.15%	0.07%	1.11%	0.06%	0.96%	0.01%
5	0.17%	0.00%	0.13%	0.00%	0.16%	0.00%
6	0.15%	0.00%	0.09%	0.00%	0.12%	0.00%
7	0.34%	0.03%	0.10%	0.00%	0.20%	0.00%
8	0.63%	0.06%	0.16%	0.00%	0.30%	0.04%
9	0.12%	0.00%	0.11%	0.00%	0.10%	0.00%
10	0.19%	0.01%	0.13%	0.00%	0.15%	0.00%
11	0.18%	0.00%	0.11%	0.00%	0.15%	0.00%
12	0.15%	0.00%	0.10%	0.00%	0.13%	0.00%
13	0.44%	0.01%	0.49%	0.03%	0.46%	0.02%
14	0.47%	0.02%	0.49%	0.10%	0.40%	0.02%
15	0.33%	0.02%	0.18%	0.00%	0.23%	0.01%
16	0.23%	0.02%	0.17%	0.00%	0.21%	0.00%
17	0.31%	0.01%	0.16%	0.00%	0.27%	0.01%
18	0.35%	0.02%	0.29%	0.03%	0.31%	0.04%
19	0.20%	0.01%	0.12%	0.00%	0.13%	0.00%
20	0.25%	0.00%	0.12%	0.00%	0.15%	0.00%
21	0.47%	0.08%	0.17%	0.00%	0.29%	0.04%
22	0.44%	0.04%	0.17%	0.00%	0.25%	0.00%
23	0.51%	0.04%	0.60%	0.04%	0.51%	0.02%
24	0.62%	0.05%	0.60%	0.08%	0.43%	0.01%
25	0.24%	0.00%	0.21%	0.00%	0.23%	0.02%
26	1.29%	0.16%	0.67%	0.14%	0.56%	0.12%
27	0.25%	0.00%	0.16%	0.00%	0.22%	0.01%
28	0.37%	0.00%	0.22%	0.00%	0.24%	0.02%
29	0.39%	0.04%	0.28%	0.02%	0.24%	0.01%
30	0.22%	0.02%	0.25%	0.00%	0.24%	0.02%
31	0.47%	0.04%	0.24%	0.02%	0.47%	0.05%
32	1.36%	0.12%	0.55%	0.03%	1.19%	0.07%
33	0.43%	0.01%	0.26%	0.04%	0.50%	0.06%
34	0.64%	0.12%	0.21%	0.00%	0.35%	0.04%
35	0.19%	0.01%	0.15%	0.00%	0.18%	0.00%
36	0.28%	0.02%	0.16%	0.00%	0.21%	0.01%
37	0.18%	0.00%	0.10%	0.00%	0.16%	0.00%
38	0.20%	0.01%	0.10%	0.00%	0.16%	0.00%
39	0.55%	0.03%	0.38%	0.07%	0.37%	0.01%
40	1.06%	0.09%	0.77%	0.02%	0.90%	0.08%
41	0.14%	0.00%	0.08%	0.00%	0.11%	0.00%
42	0.17%	0.00%	0.10%	0.00%	0.14%	0.00%
43	1.24%	0.11%	0.96%	0.07%	1.11%	0.10%
44	0.95%	0.10%	0.75%	0.08%	0.63%	0.09%
μ	0.36%	0.01%	0.24%	0.00%	0.29%	0.00%
μ+σ	0.69%	0.08%	0.49%	0.04%	0.56%	0.06%
max	1.36%	0.16%	1.11%	0.14%	1.19%	0.12%

De las figuras y tabla anterior se puede observar que para ningún evento y bajo ninguna de las normativas se supera el valor límite de seguridad de vida LS, teniendo como valores máximos un 1,36%, 1,11% y 1,19% para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente.

De la misma manera se tiene que en un 70% de los registros analizados el marco bajo la normativa ecuatoriana se mantiene dentro del límite de ocupación inmediata IO y un 30% se encuentra en el rango de seguridad de vida LS.

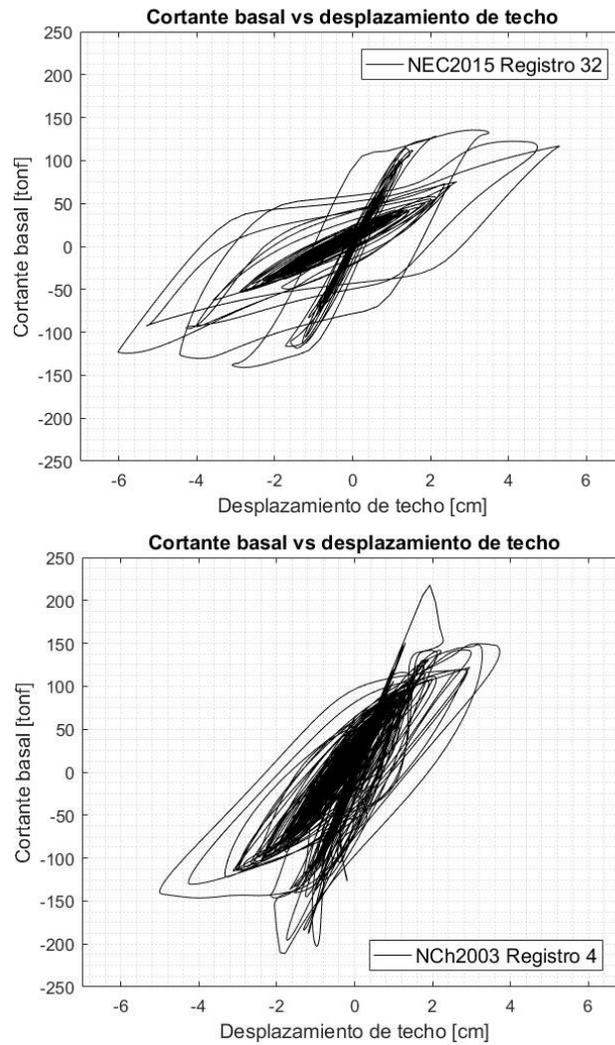
Para las normativas chilenas se tiene que un 80% de los registros analizados se mantienen en el rango de ocupación inmediata IO y el 20% restantes pasa al nivel de seguridad de vida LS.

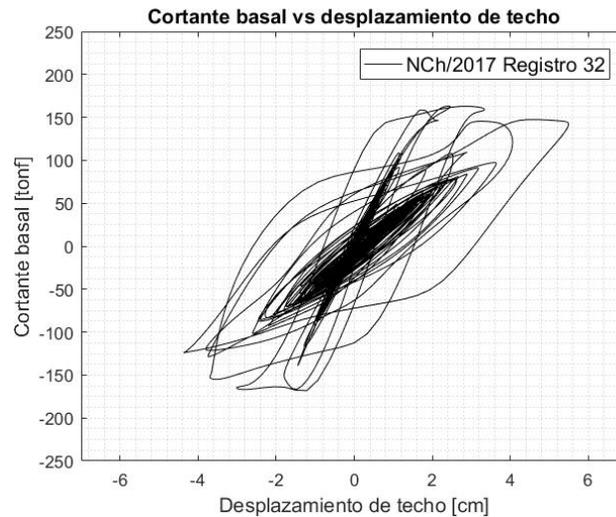
La normativa ecuatoriana no tiene una diferenciación explícita entre lo que es una construcción habitacional e industrial, en contraste a lo que ocurre con la norma chilena en donde claramente la norma *NCh2369.Of2003* (INN, NCh2369.Of2003, 2003), y por consiguiente el Anteproyecto de modificación de la misma, es para construcciones de tipo industrial, en donde se pretende que la estructura posterior al evento sísmico pueda operar de manera inmediata (entendiendo inmediato, como un plazo de semanas y no de meses). Se hace esta apreciación debido a que en la Figura IX-6 se puede observar que los valores medianos obtenidos no superan, para ninguna de las tres normativas, el valor límite de ocupación inmediata (0,5%) por lo que puede tomarse que la norma chilena para la mayoría de los casos cumple con el objetivo para el cual fue elaborada y la normativa ecuatoriana, si bien no tiene la diferenciación indicada, cumple con el requisito de que la estructura pueda ser usada inmediatamente de ocurrido el evento sísmico.

IX.2.2 Corte basal versus desplazamiento de techo

En la Figura IX-8 se muestran las relaciones de corte basal versus desplazamiento de techo para las demandas máximas de desplazamiento de techo presentadas en la sección anterior.

Figura IX-8 Corte basal versus desplazamiento de techo

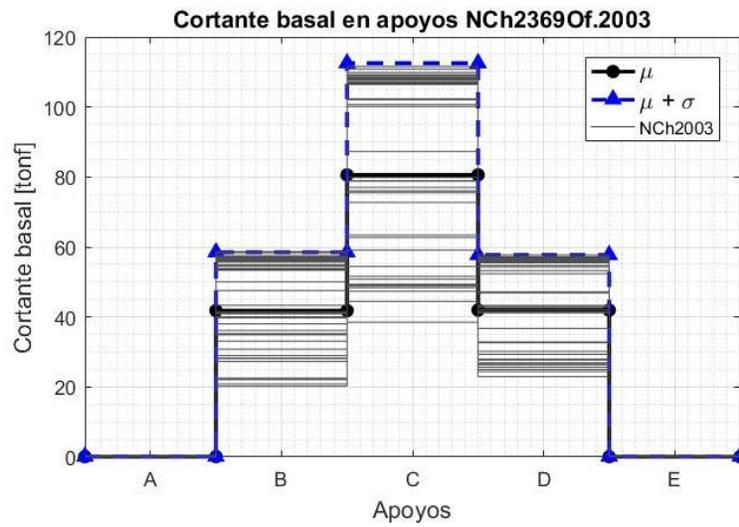
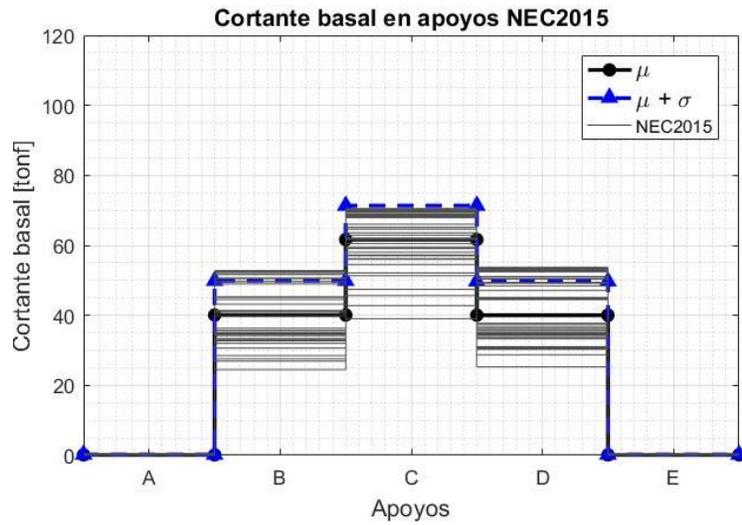


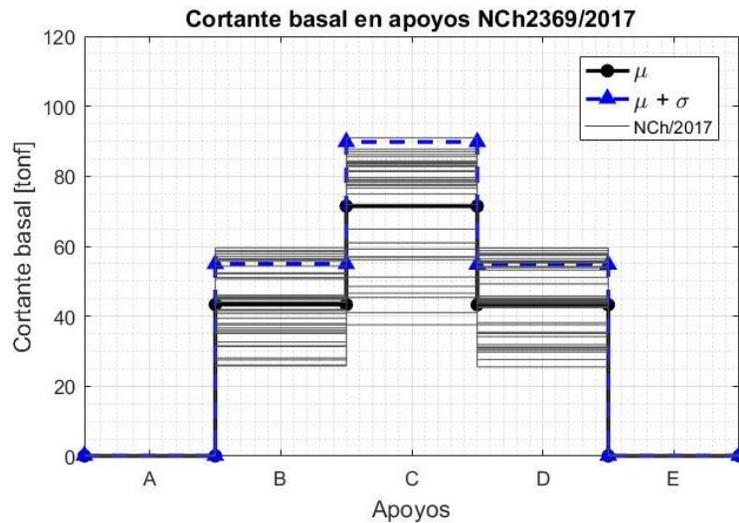


Se puede observar que la rigidez del pórtico en base a la normativa *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) es mayor que la de las otras dos normativas en análisis. De la misma manera se tiene que la disipación de energía es similar entre la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017) debido a que los diseños resultantes son relativamente similares. Notar que es posible apreciar de las curvas histéricas que tanto los resultados obtenidos para el diseño basado en *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) como para la *NCh2369/2017* (INN, 2017) presentan niveles de “pinching” superiores a los obtenidos en *NCh2369.Of2003* (INN, 2003). Esto debido principalmente a que el fenómeno de pandeo flexural de las diagonales es menor en la última normativa.

En la Figura IX-9 se presentan en color gris los valores de cortante basal máximos obtenidos para todos los registros en análisis en cada uno de los apoyos del pórtico, además en color negro se presenta el valor promedio (mediana μ) y en color azul se presentan los valores correspondientes a la mediana más la desviación estándar ($\mu + \sigma$).

Figura IX-9 Corte basal en apoyos del pórtico





En la Figura IX-10 y Figura IX-11 se presentan la razón de las respuestas en cada uno de los apoyos para cada uno de los registros analizados, así como de los valores medianos y medianos más una desviación estándar respecto de las resistencias esperadas en los apoyos.

Para las columnas en los ejes B y D (Figura VIII-1) la resistencia esperada corresponde a la proyección horizontal de la fuerza de tracción de la diagonal que llega a dicho apoyo. Para las columnas en el eje C (Figura VIII-1) la resistencia esperada corresponde a la sumatoria de las proyecciones horizontales de la capacidad esperada de la diagonal a tracción más la resistencia esperada a compresión.

Figura IX-10 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D

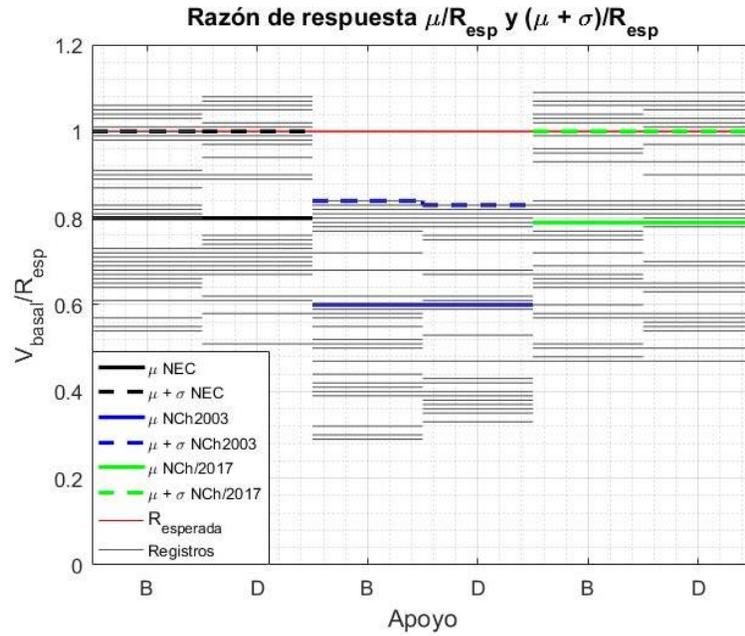
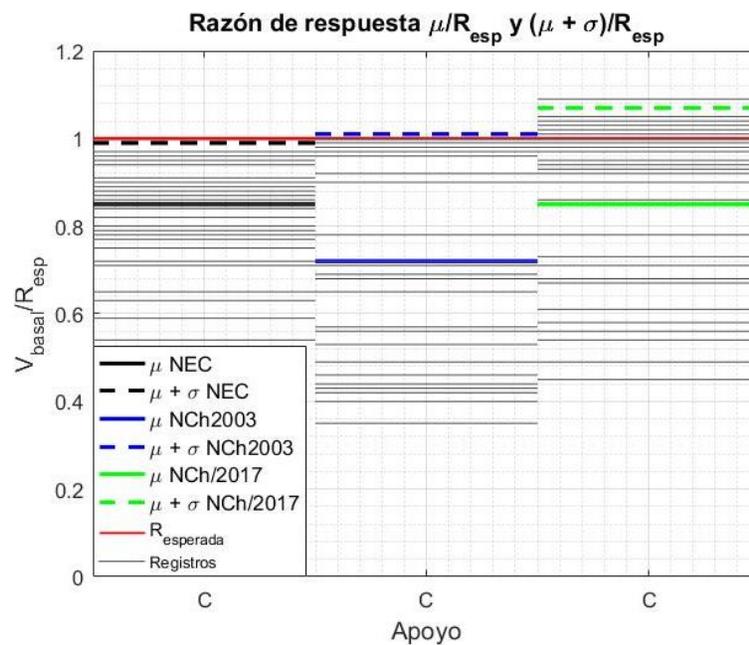


Figura IX-11 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C



Se puede observar que los valores medianos se encuentran por debajo de los valores esperados para los apoyos B, C y D, manteniéndose en un 80% del valor de la resistencia esperada en las *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y *NCh2369/2017* (INN, 2017) y entre el 60% y 70% de la resistencia esperada en la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), sin embargo el valor mediano más una desviación estándar, para todas las normativas, es similar al valor de resistencia esperada, lo que podría indicar que el diseño a corte de los pernos de anclaje y/o llaves de corte para las bases de columnas debería ser diseñado en base al valor de resistencia esperada.

Las demandas máximas de corte basal en el tiempo se presentan en

Tabla IX-4 Cortes basales máximos en el pórtico

	Corte basal (tonf)		
	NEC2015	NCH2003	NCH/2017
max	141,3	222,9	182,0
μ	123,9	160,8	143,5
$\mu + \sigma$	143,0	224,7	180,1

Nuevamente, al ser el sistema bajo la normativa del año 2003 un sistema más rígido que los otros dos escenarios, los valores medianos y máximos del cortante basal total que puede tomar dicho escenario son mayores, teniendo la *NCh2369/2017* (INN, 2017) un valor intermedio entre la norma ecuatoriana y la chilena del año 2003. La diferencia porcentual correspondiente es tal que en la normativa chilena del año 2003 el valor mediano es un 30% y 12% superior a la normativa ecuatoriana y chilena del año 2017, respectivamente.

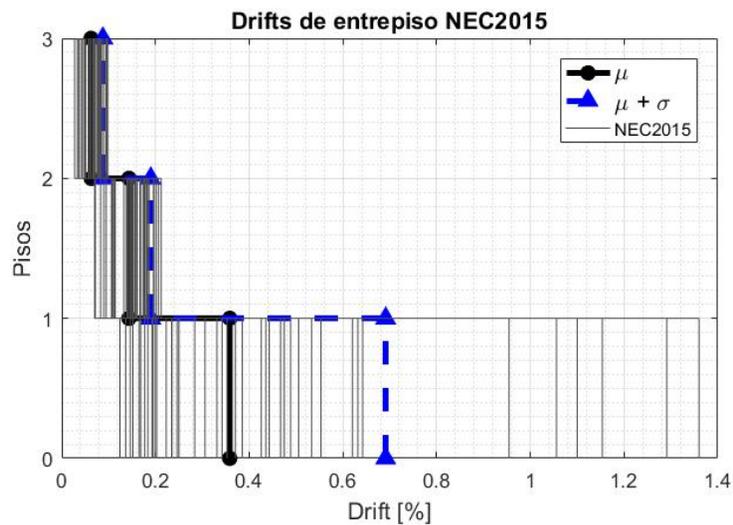
La resistencia elástica medida en cada uno de los marcos en estudio, de acuerdo a un análisis incremental es de 144,83 tonf, 222,78 tonf y 167,34 tonf para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente,

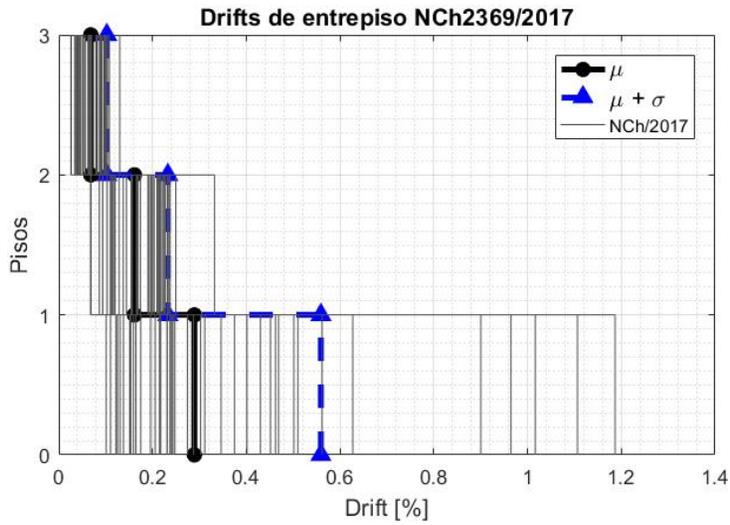
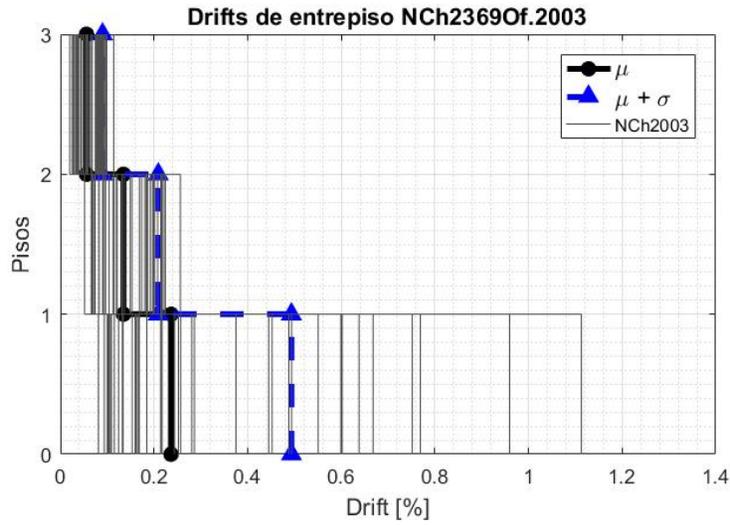
Se puede observar que los valores medianos medidos son inferiores a la resistencia elástica en un 16%, 38% y 16% para la norma ecuatoriana y chilenas del año 2003 y 2017, correspondientemente, llegando a tener la norma chilena del año 2017 un 18% de casos en donde se supera la resistencia elástica del marco.

IX.2.3 Drifts de entrepiso

En la Figura IX-12 se muestran los drifts de entrepiso obtenidos para los registros sísmicos de cada escenario, respuestas que se presentan junto con la mediana y la mediana más la desviación estándar, representadas cada una con línea de color negro y azul, respectivamente.

Figura IX-12 Drifts de entrepiso máximos



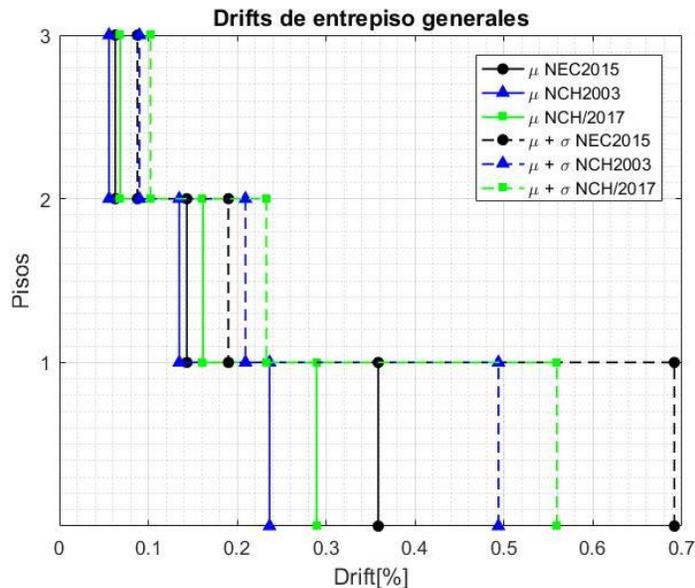


Los drifts máximos por escenarios se resumen en la Tabla IX-5.

Tabla IX-5 Drifts de piso máximos en el pórtico

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
θ_3 (%)	0.10	0.06	0.09	0.11	0.06	0.09	0.13	0.07	0.10
θ_2 (%)	0.21	0.14	0.19	0.26	0.13	0.21	0.33	0.16	0.23
θ_1 (%)	1.36	0.36	0.69	1.11	0.24	0.49	1.19	0.29	0.56
θ^{\max} (%)	1.36	0.36	0.69	1.11	0.24	0.49	1.19	0.29	0.56

Figura IX-13 Drifts de entrepiso comparativo



Al igual que para los desplazamientos horizontales de piso, el pórtico bajo la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) tiene una menor respuesta en cuanto a las distorsiones de piso comparado con los otros dos escenarios (respecto de los valores medianos es un 33% y un 18% menor que la norma ecuatoriana y chilena del año 2017, respectivamente). Debido a la reducida incursión no lineal y que el sistema bajo la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) presenta un período mayor que los otros dos escenarios tiene una respuesta mayor en cuanto a las distorsiones de piso. La *NCh2369/2017* (INN, 2017) tiene una respuesta superior a la del año 2003.

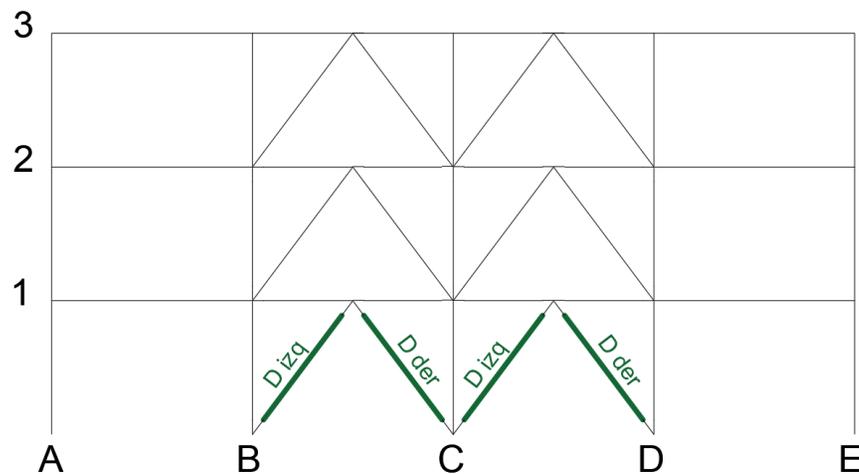
En las figuras anteriores se verifica que para ningún piso se supera el valor de 1,5% que corresponde a seguridad de vida LS indicado en *FEMA356* (FEMA356, 2000), además de lo dicho anteriormente y verificado en la Figura IX-13 respecto de que los valores medianos para todas las normativas no superan el 0,5% correspondiente al límite recomendado para ocupación inmediata IO.

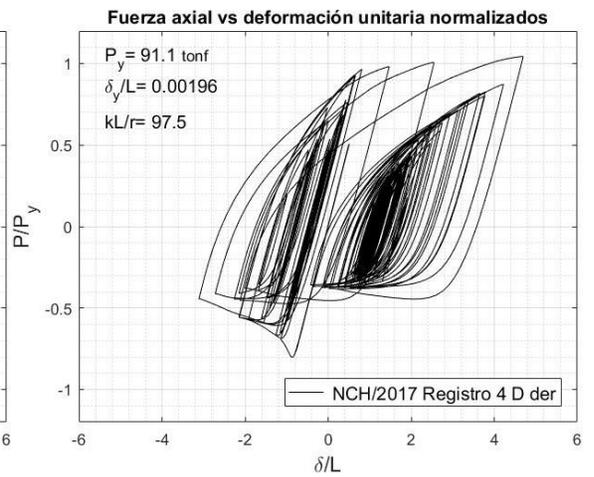
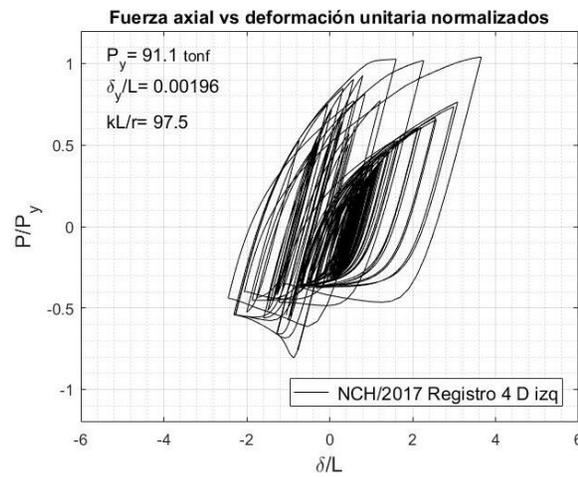
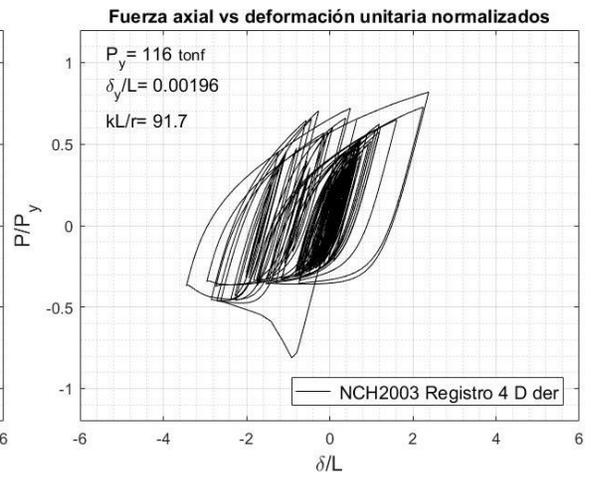
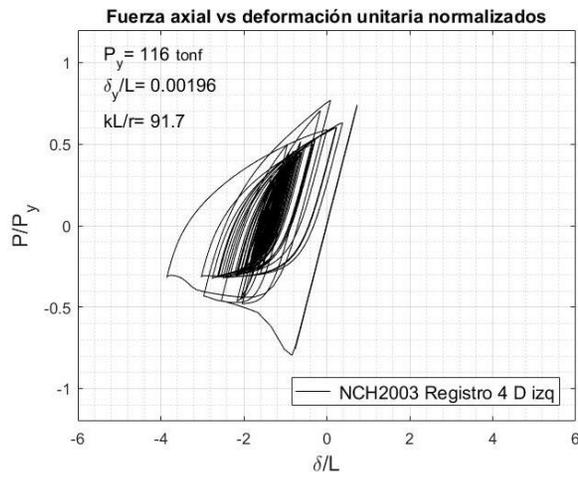
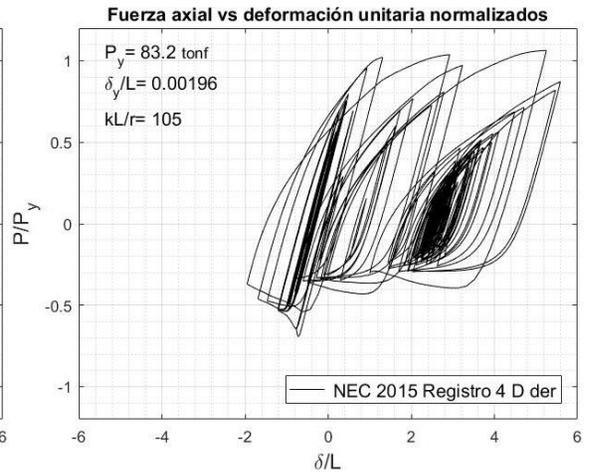
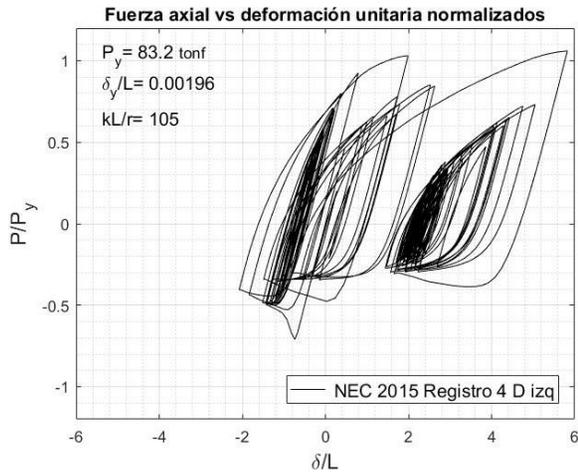
Se puede observar que en la normativa ecuatoriana, para cada uno de los niveles del marco, los drifts son superiores a los obtenidos para las normativas chilenas, particular que tiene coherencia respecto al alcance de cada uno de los objetivos de las normas ya que como se mencionó, la normativa chilena en análisis es para instalaciones de tipo industrial, cuando la norma ecuatoriana no tiene esa especificación particular pudiendo su objetivo ser visto tanto para el sector habitacional como industrial.

IX.2.4 Deformación axial vs fuerza axial en diagonales

En la Figura IX-14 se muestran las relaciones de deformación axial versus fuerza axial, en las diagonales del primer piso del pórtico, para un mismo registro a manera de comparar los resultados obtenidos con cada una de las normativas.

Figura IX-14 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso





Como se observa en las figuras anteriores, para el registro escogido para las gráficas, la incursión inelástica en las diagonales es mayor para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015)

y *NCh2369/2017* (INN, 2017) que para la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), como era de esperarse, ya que en los dos primeros casos los sistemas son menos rígidos y se esperaba que las diagonales sean las que entren altamente en rango inelástico.

En la Figura IX-15 y Figura IX-16 se presentan las razones de elongaciones y fuerzas máximas (en tracción y compresión) respecto de la deformación de fluencia y la fuerza de tracción y compresión esperadas.

Figura IX-15 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso.

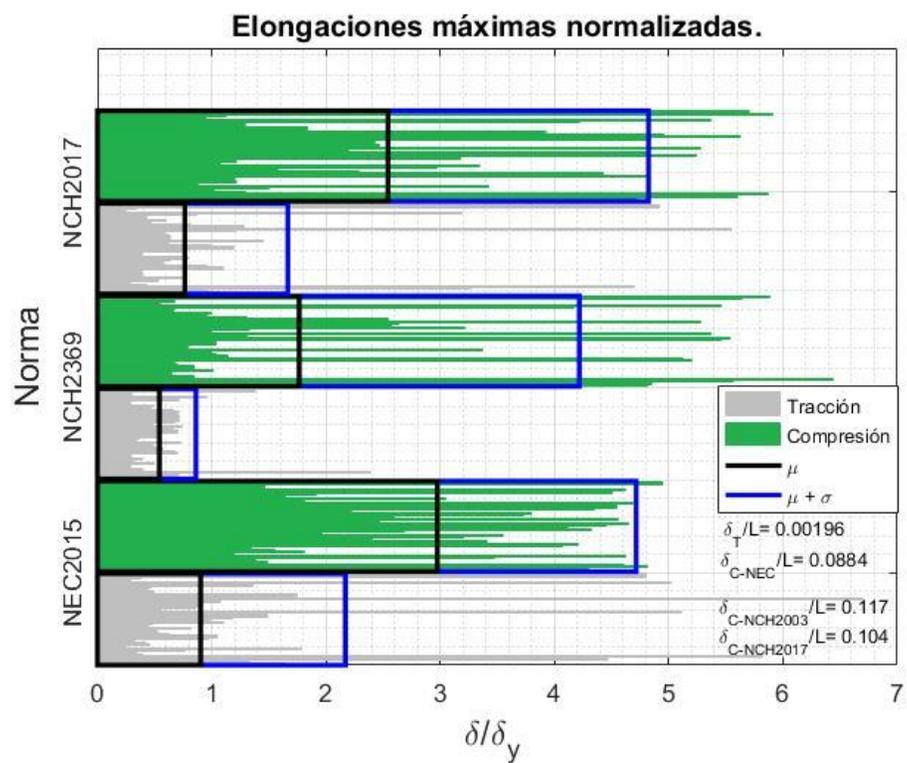
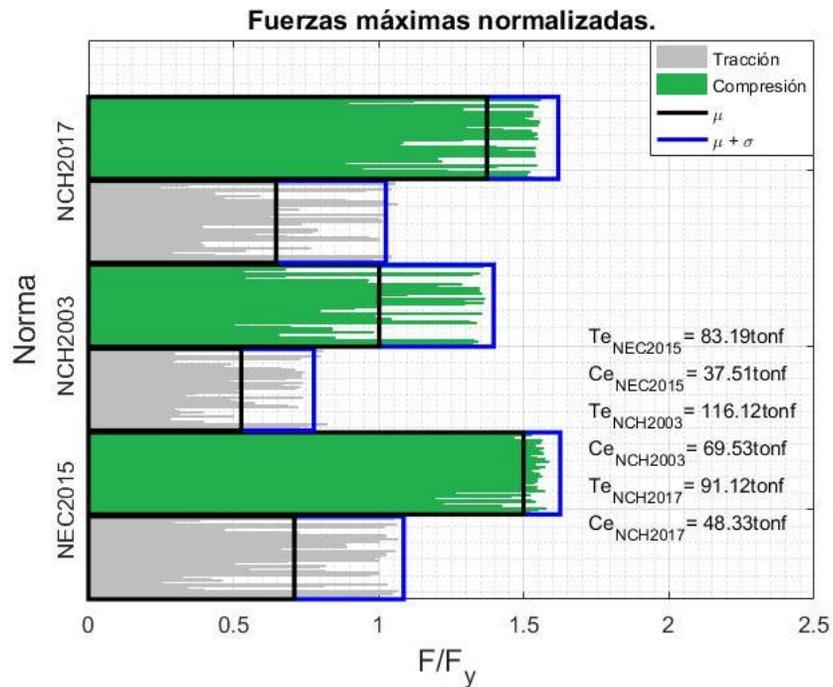


Figura IX-16 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso.



Se observa que en la normativa del año 2003 las diagonales no llegan a fluir en tensión, particular que es concordante con lo anteriormente dicho ya que al tener una mayor capacidad a tensión (27% y 39% respecto de la diagonal de la *NCh2369/2017* (INN, 2017) y *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), respectivamente), podría esperarse que dichos elementos para algunos de los registros acelerográficos testados no entren en rango inelástico.

El ASCE41-17 (ASCE, 2017) en su capítulo 9 correspondiente al apartado relacionado con estructuras de acero, indica los valores de los criterios de aceptación respecto de las demandas de ductilidad en los elementos diagonales de un marco arriostrado concéntricamente, mismos que dependiendo si la demanda es en tracción o compresión son:

- Compresión en tubos de acero:
 - Ocupación inmediata IO: 0,5
 - Seguridad de vida LS: 7

Prevención de colapso CP: 9

- Tracción en tubos de acero:
 - Ocupación inmediata IO: 0,5
 - Seguridad de vida LS: 7
 - Prevención de colapso CP: 9

En la Figura IX-15 se puede verificar que para ningún evento y bajo ninguna de las normativas se llega a superar los límites máximos recomendados, manteniéndose siempre los valores dentro del límite de seguridad de vida, como máximo.

Para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) en el 33% de los eventos sísmicos analizados la ductilidad a tracción se mantiene dentro de los límites IO (ASCE, 2017), mientras que para las normativas chilenas *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y *NC2369/2017* (INN, 2017) el 41% y 30% se mantienen en el rango IO (ASCE, 2017), respectivamente.

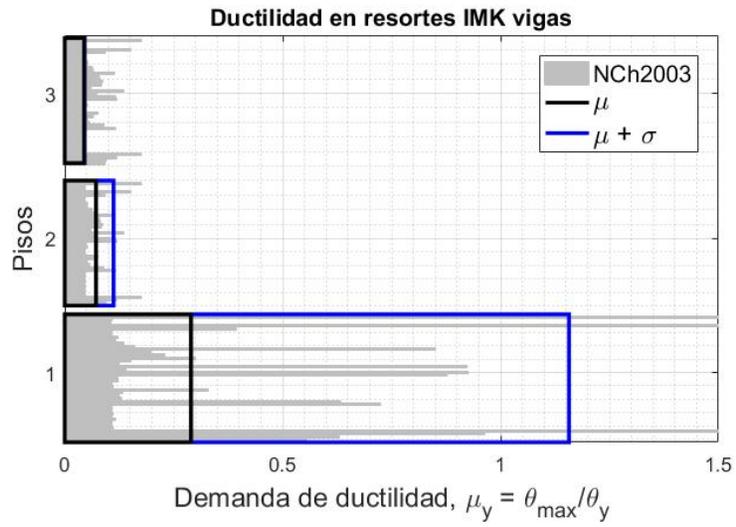
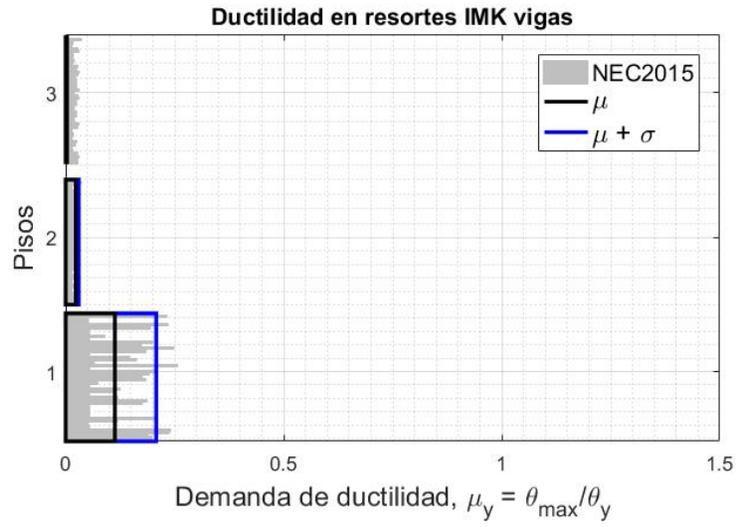
En lo referente a elongaciones de compresión, la norma del año 2003 mantiene a un 25% del total de los registros en el rango IO (ASCE, ASCE41-17, 2017), seguida de la norma chilena del año 2017 con un 2% y finalmente la normativa ecuatoriana en donde ninguno de los eventos estudiados se mantuvo en el rango IO (ASCE, 2017) para compresión.

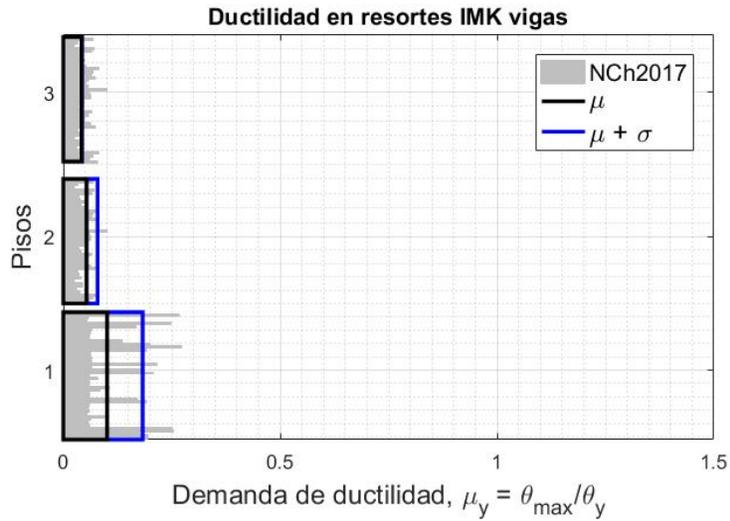
IX.2.5 Ductilidad en vigas

A continuación, se presentan las demandas de ductilidad en las rótulas plásticas de las vigas del pórtico. La demanda de ductilidad (μ_y) se define como la razón entre la rotación máxima (θ_{max}) y la rotación de fluencia (θ_y).

En la Figura IX-17 se muestran las demandas de ductilidad en las vigas para cada uno de los escenarios *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017).

Figura IX-17 Demanda de Ductilidad en vigas





En la figura anterior se muestran en la misma escala las demandas de ductilidad para cada uno de los escenarios, sin embargo para el escenario de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), en ciertos registros existen demandas de ductilidad muy superiores que debido a su magnitud no pueden ser colocados en la misma escala que los gráficos correspondientes a los otros dos escenarios en análisis, por lo que a continuación se presenta en la Figura IX-18 el gráfico completo.

Figura IX-18 Demanda de ductilidad total en *NCh2369.Of2003*

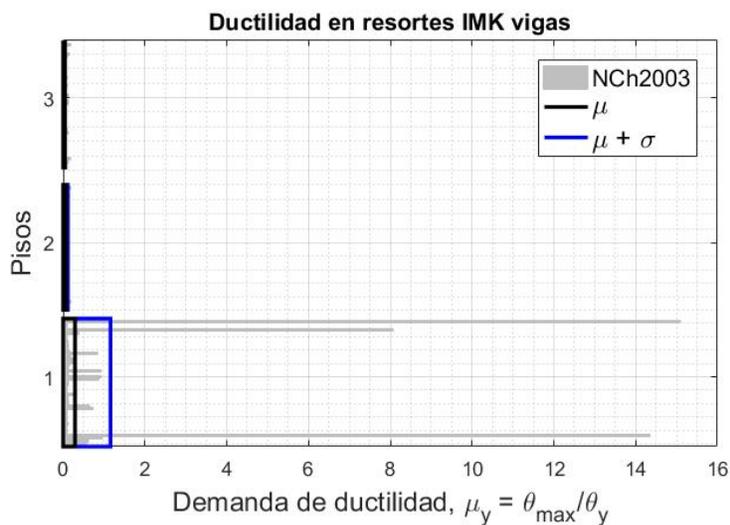


Tabla IX-6 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.003	0.003	0.003	0.048	0.045	0.046	0.045	0.042	0.043
$\mu_{y,2}$	0.035	0.023	0.030	0.205	0.072	0.112	0.225	0.054	0.079
$\mu_{y,1}$	0.257	0.113	0.208	15.09	0.290	1.157	0.274	0.101	0.183
μ_y^{\max}	0.257	0.113	0.208	15.09	0.290	1.157	0.274	0.101	0.183

El ASCE41-17 (ASCE, 2017) indica los valores de los criterios de aceptación respecto de las demandas de ductilidad en los elementos vigas sometidos a flexión mismos que son:

Ocupación inmediata IO: 2

Seguridad de vida LS: 6

Prevención de colapso CP: 8

Como se puede verificar en la Figura X-18 las demandas de ductilidad en las vigas del primer piso para la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) sobrepasan en 3 casos que corresponde a un 7%, los valores que normalmente son aceptados ($\mu_y \leq 8$) (ASCE, 2017), generando un nivel de daño mayor y no deseado dentro de la filosofía de diseño de estos sistemas.

Para las estructuras diseñadas en base a la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y *NCh2369/2017* (INN, 2017) no existe inconveniente respecto de la ductilidad de las vigas debido a que, como puede verificarse en la Tabla IX-6, el 100% de los casos tiene una demanda de ductilidad menor a 1, por lo que se encuentra en el espacio de ocupación inmediata IO (ASCE, 2017) para esta demanda local.

Finalmente, a continuación en la Tabla IX-7 y Tabla IX-8 se coloca un resumen con las respuestas máximas y medianas obtenidas en cada uno de los escenarios analizados.

Tabla IX-7 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario

Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		2.15	1.61	2.00
Cortante basal (tonf)		123.88	160.83	143.50
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	0.36%	0.24%	0.29%
	Piso 2	0.14%	0.13%	0.16%
	Piso 3	0.06%	0.06%	0.07%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	1.43	0.95	1.16
	Piso 2	1.94	1.41	1.75
	Piso 3	2.15	1.61	2.00
Ductilidad en viga	Piso 1	0.11	0.29	0.10
	Piso 2	0.02	0.07	0.05
	Piso 3	0.00	0.04	0.04
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.26%	0.21%	0.26%
	Piso 2	0.11%	0.09%	0.12%
	Piso 3	0.04%	0.04%	0.05%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	0.18%	0.11%	0.15%
	Piso 2	0.08%	0.07%	0.09%
	Piso 3	0.03%	0.02%	0.03%

Tabla IX-8 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario

Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		6.02	5.00	5.49
Cortante basal (tonf)		141.33	222.94	181.98
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	1.36%	1.11%	1.19%
	Piso 2	0.21%	0.26%	0.33%
	Piso 3	0.10%	0.11%	0.13%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	5.44	4.45	4.75
	Piso 2	5.86	4.85	5.28
	Piso 3	6.02	5.00	5.49
Ductilidad en viga	Piso 1	0.26	15.09	0.27
	Piso 2	0.04	0.21	0.22
	Piso 3	0.00	0.05	0.04
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.44%	0.76%	0.62%
	Piso 2	0.18%	0.25%	0.29%
	Piso 3	0.07%	0.07%	0.09%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	1.31%	0.47%	1.09%
	Piso 2	0.11%	0.13%	0.15%
	Piso 3	0.05%	0.06%	0.07%

X. VERIFICACIÓN AL CAPÍTULO 16 DEL ASCE7-16

Como parte integrante del presente trabajo se ha optado por desarrollar la verificación, en el pórtico en estudio, de lo indicado en el capítulo 16 del ASCE7-16 (ASCE, 2016), verificación que tiene por objetivo lograr probabilidades de colapso menores al 10% para niveles de demanda correspondientes a un MCE_R .

Una vez que se llevó a cabo el diseño del pórtico en base a la norma ecuatoriana, y contando con los diseños del pórtico para las normativas chilenas, tanto para la del año 2003 como 2017, se llevó a cabo el análisis inelástico tiempo-historia para tres diferentes demandas sísmicas definidas como se indica a continuación (Peña et al, 2017):

- Sismo de nivel operacional (OLE). Corresponde al nivel de demanda sísmica en el cual se espera que el sistema se mantenga 100% operacional después de la ocurrencia del evento. Este nivel de demanda implica un 50% de probabilidad de superarse en un periodo de 30 años (Período de retorno promedio de 43 años)
- Sismo de nivel de diseño (DLE). Corresponde a un nivel de demanda sísmica en el que se espera que el sistema presente incursión inelástica y daño limitados, para que las eventuales reparaciones sean nulas o se realicen en un periodo corto luego del evento. Este nivel de demanda implica un 10% de probabilidad de superarse en un periodo de 50 años (Período de retorno promedio de 475 años)
- Sismo máximo considerado (MCE_R). Corresponde al nivel de demanda sísmica en el cual se espera que el sistema no colapse. Este nivel de demanda implica un 2% de probabilidad de superarse en un periodo de 50 años (Período de retorno promedio de 2475 años)

Es importante establecer que las definiciones OLE y DLE son adicionales a los requisitos formales de ASCE7-16 (ASCE, 2016), (que están sólo referidas al nivel MCE_R) y han sido acá evaluadas con el objeto de recopilar mayor información.

X.1 Registros seleccionados

Para la selección de los registros se utilizó el método denominado como *Amplitude Scaling*, mismo que implica el uso de factores de amplificación en los registros originales con el fin de no perder propiedades propias de los registros tales como el contenido de frecuencia, variabilidad, etc.

Un resumen de la metodología utilizada para la selección y amplitud de los registros se presenta a continuación:

- A partir de los espectros de pseudoaceleración de los 44 registros considerados en el Capítulo IX, se definen los 11 que mayor similitud tengan desde un punto de vista de forma espectral con los espectros objetivos, a partir de la búsqueda del mínimo valor obtenido para la sumatoria del error cuadrático, tal cual se indica a continuación:

$$SSE = \sum_{j=1}^n \left(\ln Sa(T_j) - \ln Sa_{TS}(T_j) \right)^2 \quad \text{Ecuación X-1}$$

, donde:

SSE: Sumatoria del error cuadrático

Sa(T_j): Pseudoaceleración del registro en el período *j*

Sa_{TS}(T_j): Pseudoaceleración del espectro objetivo (*Target Spectrum*) en el período *j*. Se ha considerado como espectros objetivos, los espectros elásticos de cada código. En particular para el caso chileno, se ha considerado la corrección del plateau máximo indicado en la normativa por la propuesta de (BOROSCHEK & ASOCIADOS, 2017) Esto ha sido realizado para corregir dicho nivel máximo que la normativa propone para fines de diseño, pero que dista de los niveles de amplitud registrados en terremotos severos. Ambos espectros objetivos han considerado sus niveles de demanda última para los ajustes espectrales.

- Una vez que se han seleccionado los 11 registros con menor SSE se procede a realizar un ajuste a los mismos mediante un factor de escalamiento para que, en el rango de períodos entre $0,2T_1$ y $1,5T_1$ (el valor de $1,5T_1$ se utilizó para poder ajustar un mismo rango de períodos para la normativa ecuatoriana y chilenas, particular que está permitido en el ASCE7-16 (ASCE, 2016)), se logre obtener un espectro promedio, en dicho rango, igual o superior al espectro objetivo. Tal como se indicó la consideración de $1.5T_1$ en vez de $2.0 T_1$ como es acostumbrado, tiene por objetivo mejorar el ajuste de los registros con el espectro objetivo ecuatoriano, el cual presenta una caída en zona de periodos medianos y largos muy distinta a las caídas obtenidos en mega terremotos subductivos o Megathrust.
- Posterior a lo anterior se debe verificar que en el rango de períodos ninguna coordenada del espectro promedio de los 11 registros resulte menor que un 90% del valor de la coordenada espectral del espectro objetivo, en donde aparece un segundo factor de escalamiento.

A continuación, se presentan las gráficas en donde se muestra la aplicación del método indicado para obtener los correspondientes espectros promedio para cumplir lo requerido en la ASCE7-16 (ASCE, 2016), para cada normativa:

Figura X-1 Espectros elásticos de Diseño Objetivos

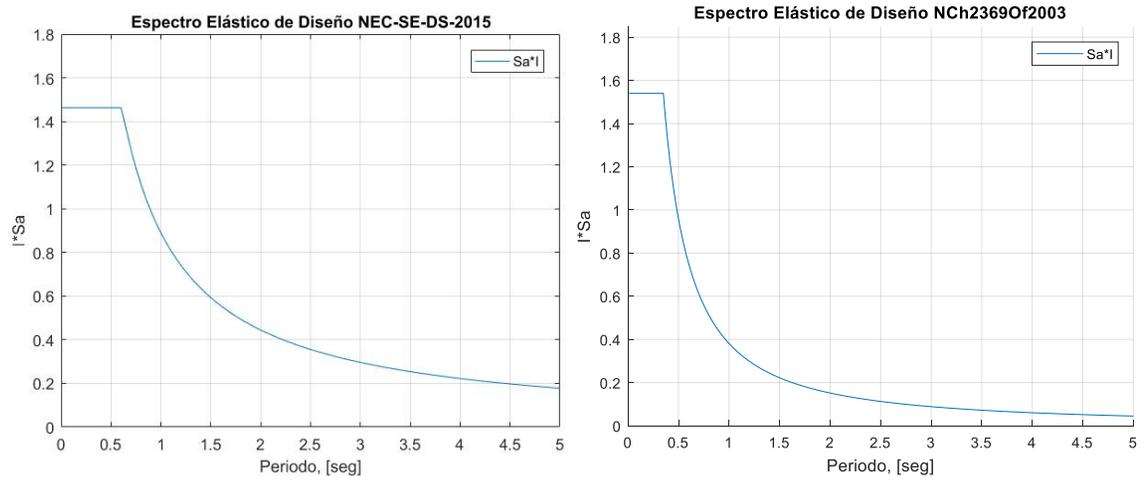


Figura X-2 Registros seleccionados

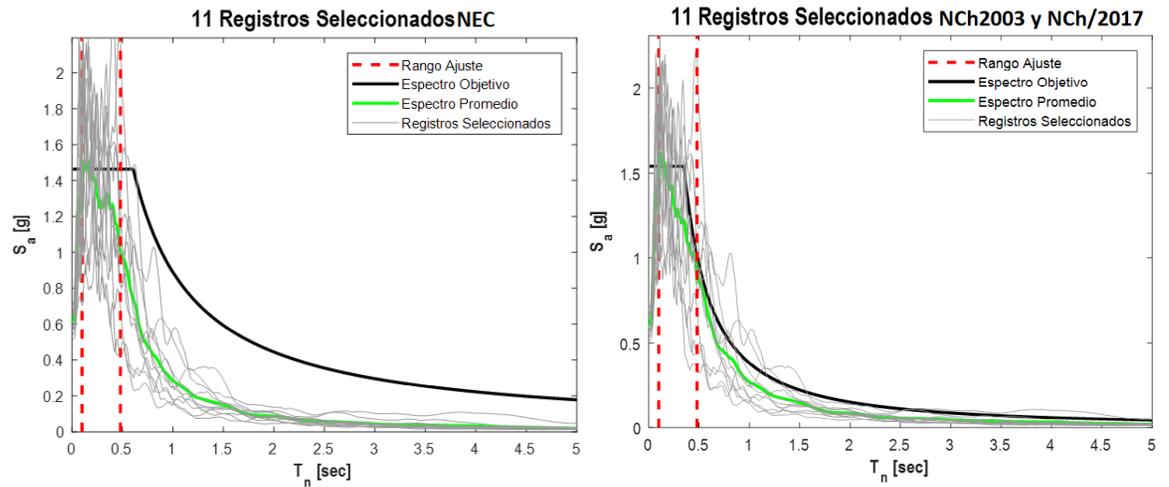
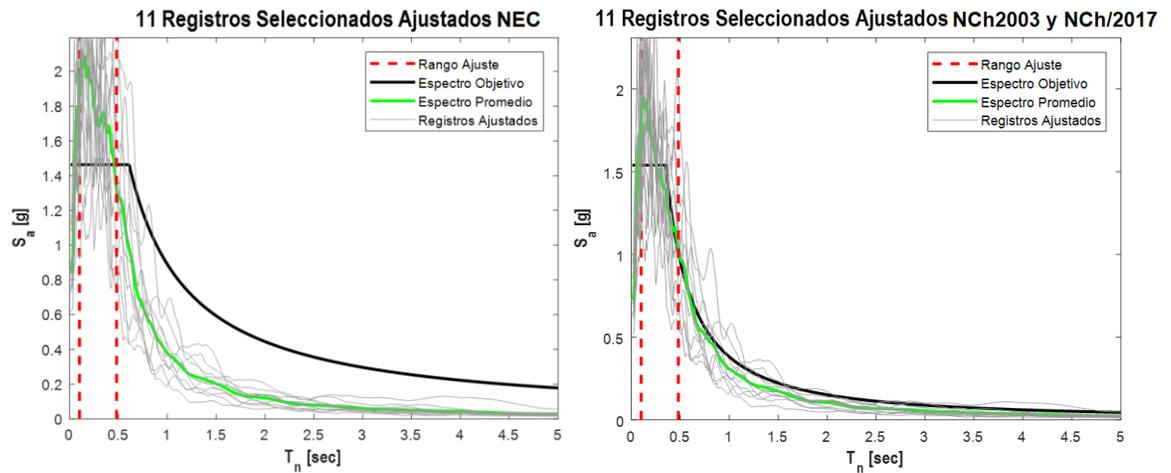


Figura X-3 Registros seleccionados escalados



Para definir los espectros asociados a los niveles de demanda anteriormente indicados (OLE, DEL y MCE_R) se debe indicar que el procedimiento realizado corresponde a un nivel de demanda del tipo DLE, indicándose que para obtener los niveles de demanda MCE_R y OLE se procede a multiplicar el factor obtenido por 1,5 y 0,6, respectivamente (Peña et al, 2017), siguiendo una distribución de probabilidad tipo poisson y los periodos de retorno indicados previamente.

Una vez que se ejecutó el procedimiento indicado, se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los escenarios en análisis:

Tabla X-1 Registros seleccionados y factor de escalamiento para la comprobación ASCE7-16

NEC-SE 2015				
	ID	MCE factor	DLE factor	OLE factor
1	CH_1985_1	1.785	1.190	0.714
2	CH_1985_2	1.795	1.197	0.718
8	TA_1999_8	1.956	1.304	0.782
18	CH_2007_18	2.522	1.681	1.009
25	JA_2011_25	1.899	1.266	0.760
28	JA_2011_28	2.173	1.449	0.869
29	CH_2014_29	2.859	1.906	1.144
31	CH_2014_31	1.675	1.117	0.670
33	CH_2014_33	2.309	1.539	0.924
34	CH_2014_34	1.958	1.306	0.783
39	CH_2015_39	1.890	1.260	0.756

NCh2003 y NCh/2017				
	ID	MCE factor	DLE factor	OLE factor
1	CH_1985_1	1.502	1.001	0.601
2	CH_1985_2	1.510	1.007	0.604
17	CH_2007_17	2.409	1.606	0.963
18	CH_2007_18	2.122	1.415	0.849
25	JA_2011_25	1.598	1.065	0.639
28	JA_2011_28	1.828	1.219	0.731
29	CH_2014_29	2.405	1.604	0.962
31	CH_2014_31	1.409	0.939	0.564
33	CH_2014_33	1.943	1.295	0.777
34	CH_2014_34	1.648	1.099	0.659
39	CH_2015_39	1.590	1.060	0.636

Como se observa en la Tabla X-1, 10 de los 11 registros elegidos para la comprobación en la normativa ecuatoriana son iguales a los escogidos para la comprobación con las normativas chilenas.

Adicional a esto debe observarse que los factores de amplificación respecto del registro original difieren significativamente entre las normativas mencionadas, todo esto se debe básicamente a la forma del espectro elástico de diseño de cada normativa, como se observa en la Figura X-1 en donde se verifica que en el espectro para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) luego del plató hay una caída más suave respecto de lo que ocurre para la normativa

NCh2369.Of2003 (INN, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, 2017) lo que tiende a hacer que para dar cumplimiento a lo especificado en la *ASCE7-16* (ASCE, 2016) se requieran valores mayores de amplificación, por lo que se espera tener respuestas mayores en el sistema diseñado bajo la normativa ecuatoriana en cada uno de los apartados que se presentarán a continuación.

X.2 Criterios de cumplimiento

El capítulo 16 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016) define un dos diferentes criterios para definir si una estructura cumple o no, criterios que son de carácter global y local.

X.2.1 Criterio global

El criterio global corresponde a que la mediana del valor de drift de entrepiso no exceda dos veces el límite definido en el capítulo 12 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016), límite que para el caso del estudio en particular corresponde al valor del 2% para una estructura de riesgo sísmico catalogada en categoría III de acuerdo con lo establecido en el capítulo I del *ASCE7-16* (ASCE, 2016). Adicionalmente, solo se permite que uno de los once eventos analizados tenga una respuesta superior.

X.2.2 Criterio local

Para el criterio local se tomará en cuenta lo que ocurre en las vigas y diagonales del marco.

El *ASCE7-16* (ASCE, 2016) indica que las respuestas locales no deben exceder el criterio de aceptación de prevención de colapso CP definido en el *ASCE41-17* (ASCE, 2017) dividido para el factor de importancia I_e que se define en la sección 1 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016), valor que para el presente estudio corresponde a 1,00.

Con lo dicho se tiene el siguiente límite de ductilidad a cumplir para las vigas y diagonales del estudio:

- Vigas: Límite CP = 8
- Diagonales:
Compresión en tubos metálicos:

NEC-SE 2015: CP = 9

NCh2369.Of2003: CP = 9* (aproximación a interpolación)

NCh2369/2017: CP = 9

Tracción en tubos metálicos: CP = 9

X.3 Respuestas obtenidas

Procesados los registros acelerográficos modificados, para cada uno de los escenarios en estudio, se presentan a continuación los resultados obtenidos tanto para la normativa ecuatoriana *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017).

Los resultados obtenidos, para cada una de las demandas sísmicas se indican a continuación, discretizando respecto de la demanda sísmica aplicada MCE_R , DLE u OLE:

X.3.1 Desplazamientos de piso

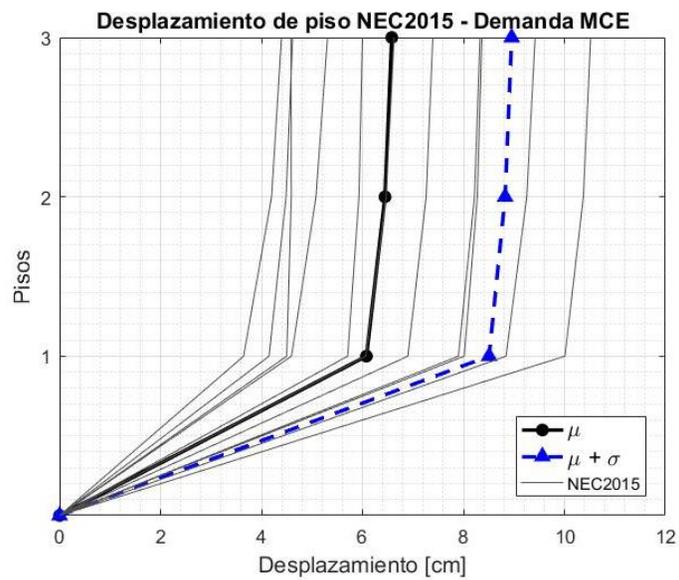
Las primeras respuestas presentadas corresponden al desplazamiento máximo horizontal de piso obtenidos mediante la aplicación de las tres normativas en estudio.

Siguiendo la metodología mostrada anteriormente, en la Figura X-4, Figura X-5 y Figura X-6 se muestran, para cada una de las demandas sísmicas, en color gris los

desplazamientos horizontales máximos obtenidos para todos los registros en análisis, además en color negro se presenta el valor mediano (mediana μ) y en color azul se presentan los valores correspondientes a la mediana más la desviación estándar ($\mu + \sigma$).

Los valores antes mencionados, así como los máximos y mínimos para cada uno de los escenarios son presentados en la Tabla X-2, Tabla X-3 y Tabla X-4.

Figura X-4 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica MCE_R



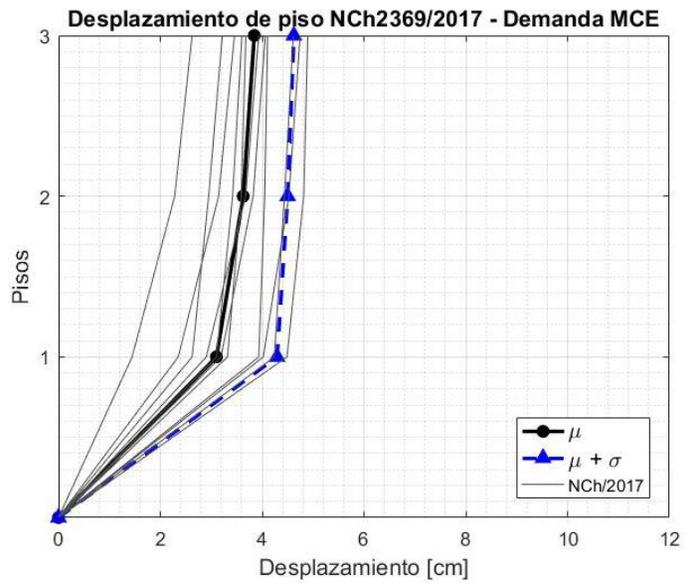
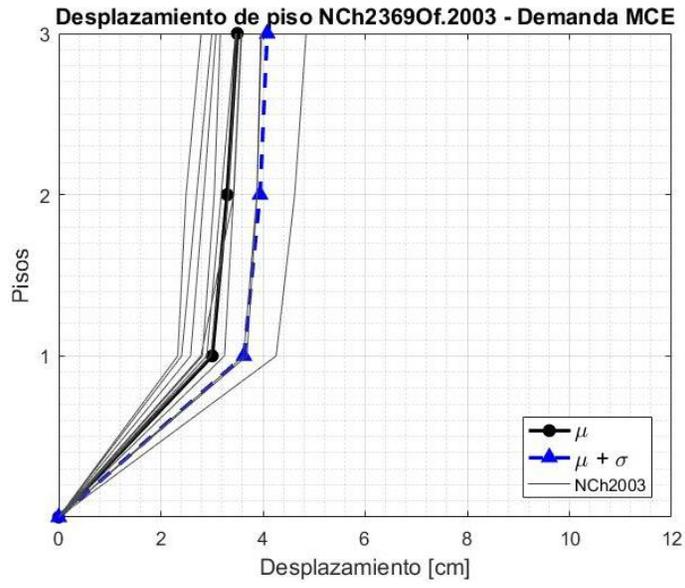
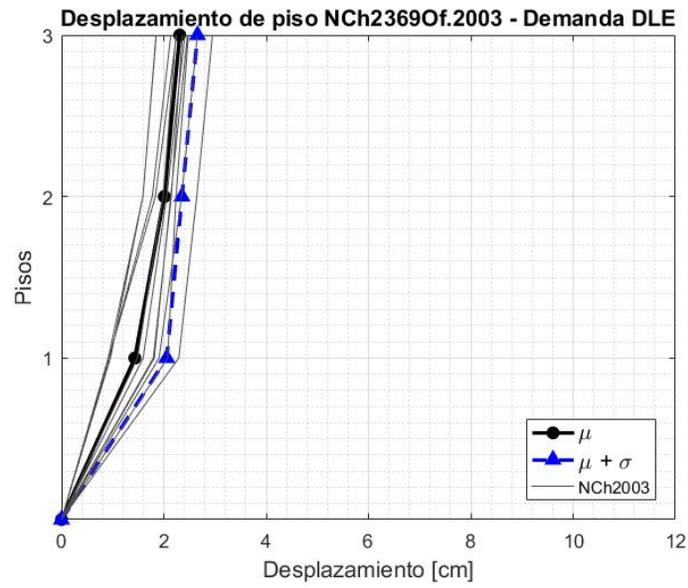
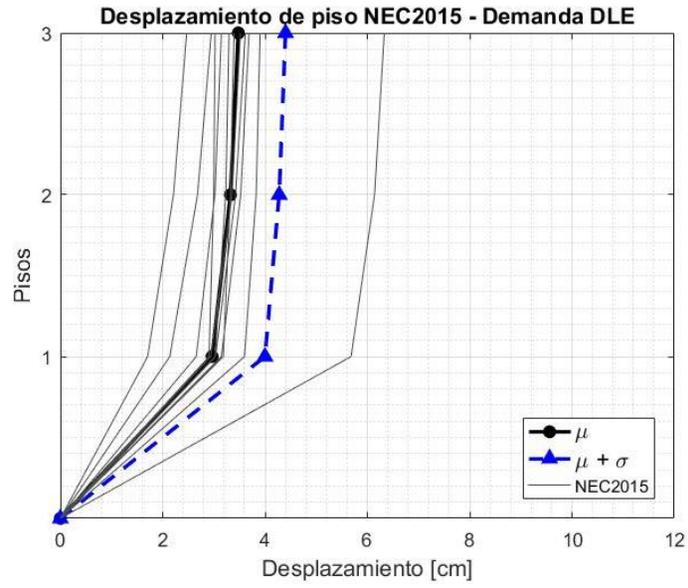


Figura X-5 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica DLE



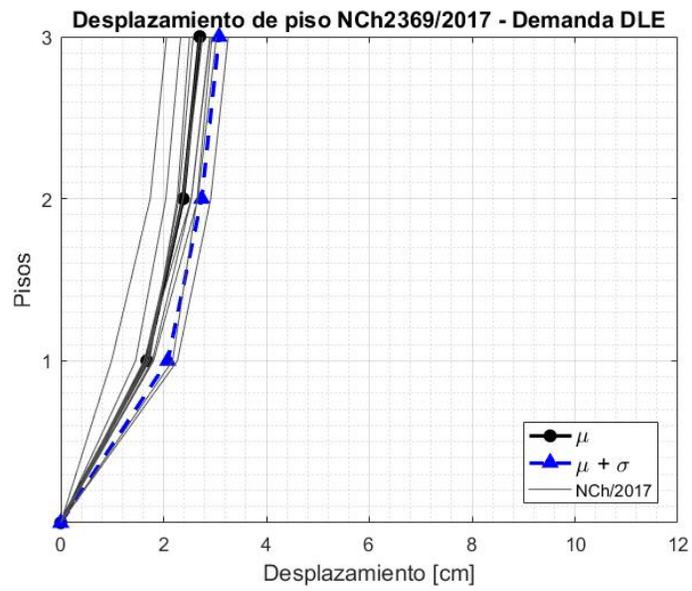
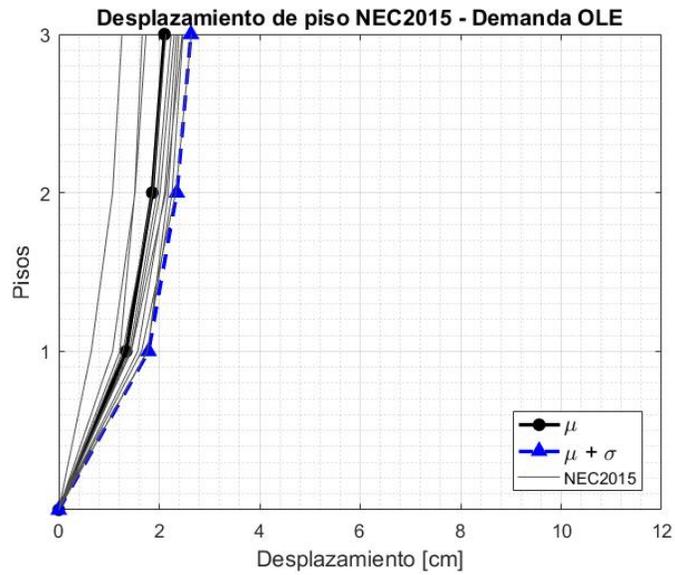


Figura X-6 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica OLE



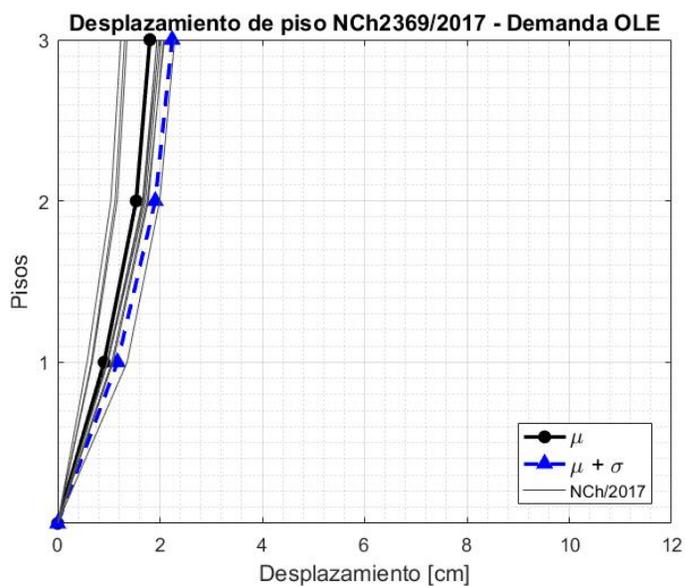
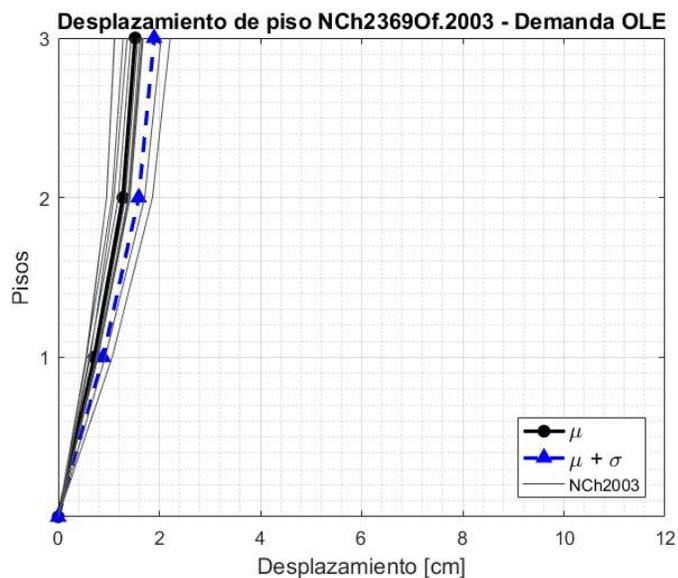


Tabla X-2 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica MCE_R

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
δ_3 (cm)	10.5	6.6	9.0	4.8	3.5	4.1	4.9	3.8	4.6
δ_2 (cm)	10.4	6.4	8.8	4.6	3.3	3.9	4.8	3.6	4.5
δ_1 (cm)	10.0	6.1	8.5	4.3	3.0	3.6	4.5	3.1	4.3

Tabla X-3 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica DLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
δ_3 (cm)	6.3	3.5	4.4	3.0	2.3	2.7	3.3	2.7	3.1
δ_2 (cm)	6.1	3.3	4.3	2.6	2.0	2.4	2.9	2.4	2.7
δ_1 (cm)	5.7	3.0	4.0	2.3	1.4	2.1	2.3	1.7	2.1

Tabla X-4 Desplazamientos horizontales de piso en el pórtico Demanda Sísmica OLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
δ_3 (cm)	2.6	2.1	2.6	2.2	1.5	1.9	2.3	1.8	2.2
δ_2 (cm)	2.3	1.9	2.4	1.9	1.3	1.6	2.0	1.5	1.9
δ_1 (cm)	1.8	1.3	1.8	1.1	0.7	0.9	1.4	0.9	1.2

Figura X-7 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica MCE_R

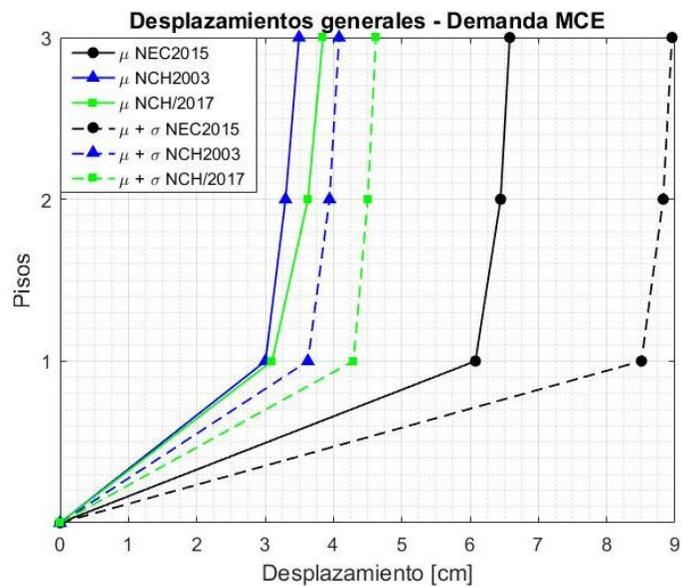


Figura X-8 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica DLE

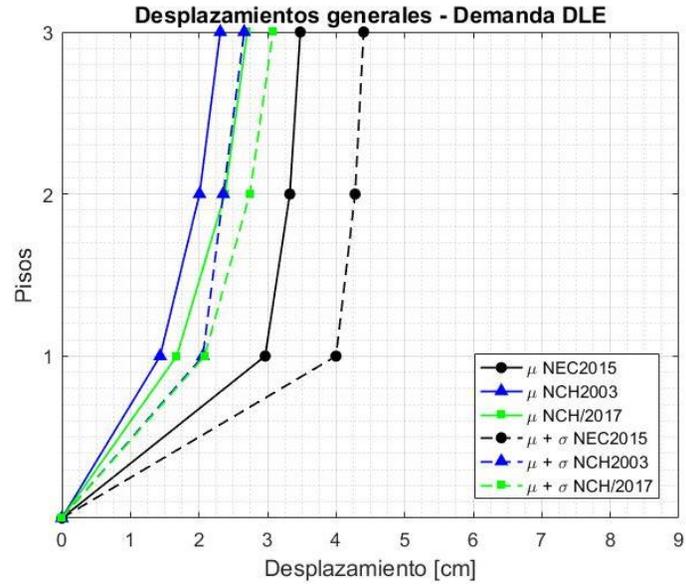
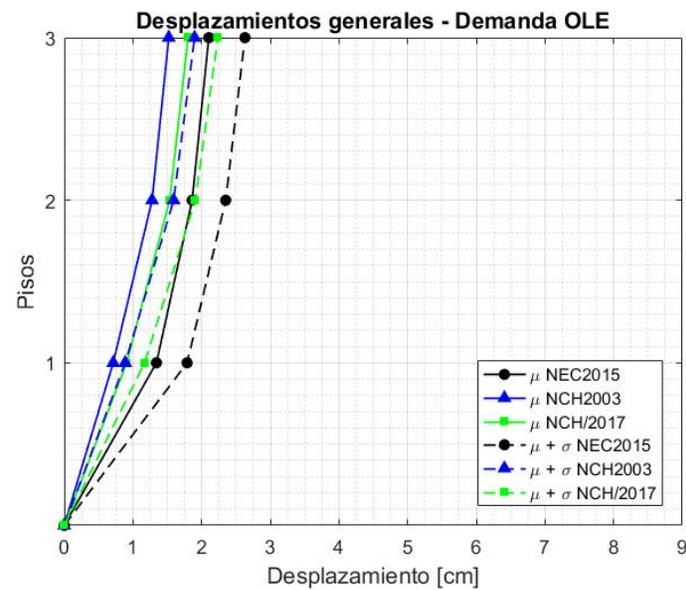


Figura X-9 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica OLE



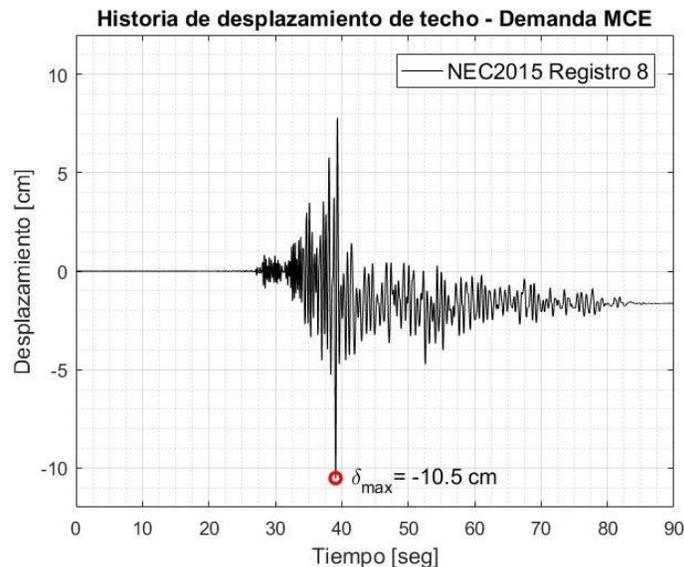
De la Tabla X-2, Tabla X-3 y Tabla X-4 así como de la Figura X-7, Figura X-8 y Figura X-9 se verifica lo dicho en cuanto a que la respuesta en el escenario de la *NCE-SE 2015* (MINDUB, 2015) sería superior a lo obtenido en base a las normativas chilenas.

Comparando las normativas chilenas, la mediana de la *NCh2369/2017* (INN, 2017) es un 9% superior a la de la *NCh2369.OF2003* (INN, 2003) para la demanda sísmica MCE_R , y aproximadamente un 20% tanto para la demanda sísmica DLE y OLE.

Lo anterior es correcto dado que para las demandas sísmicas menores (DLE y OLE) disminuye la demanda inelástica haciendo que el marco bajo la norma del año 2003 al ser más rígido, presente menor respuesta respecto de desplazamientos de piso.

De la misma manera en la Figura X-10, Figura X-11 y Figura X-12 se presentan para cada escenario y demanda sísmica las máximas sollicitaciones de desplazamiento de techo en base a la Tabla X-2, Tabla X-3 y Tabla X-4.

Figura X-10 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica MCE_R



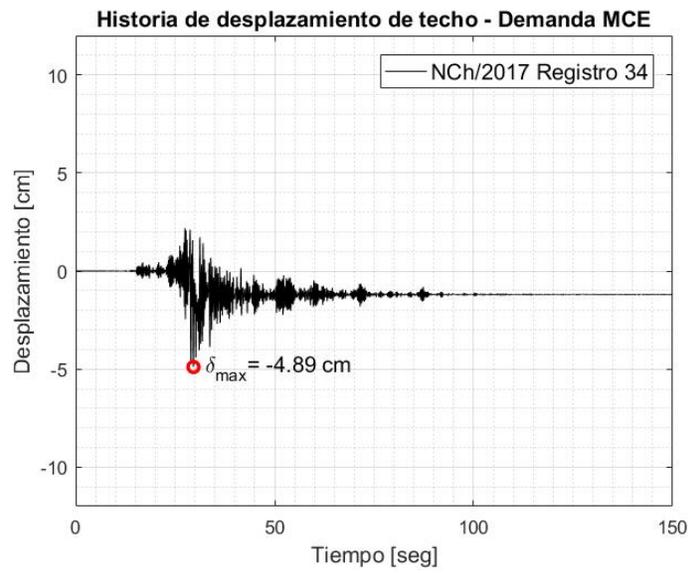
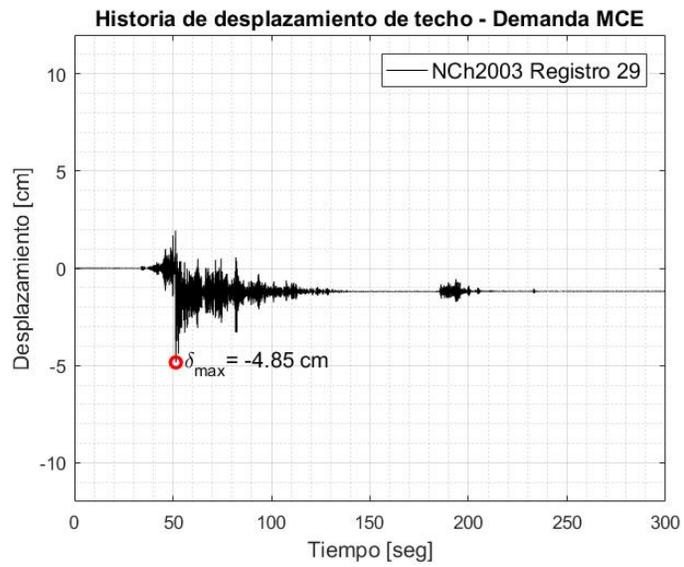
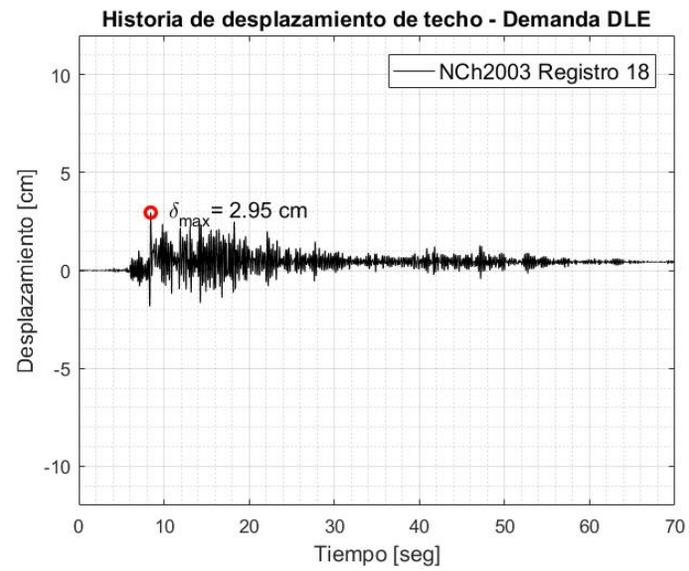
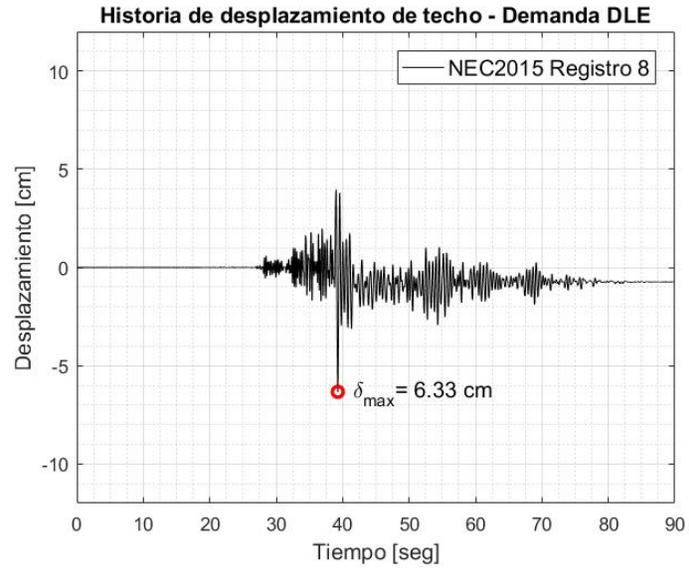


Figura X-11 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica DLE



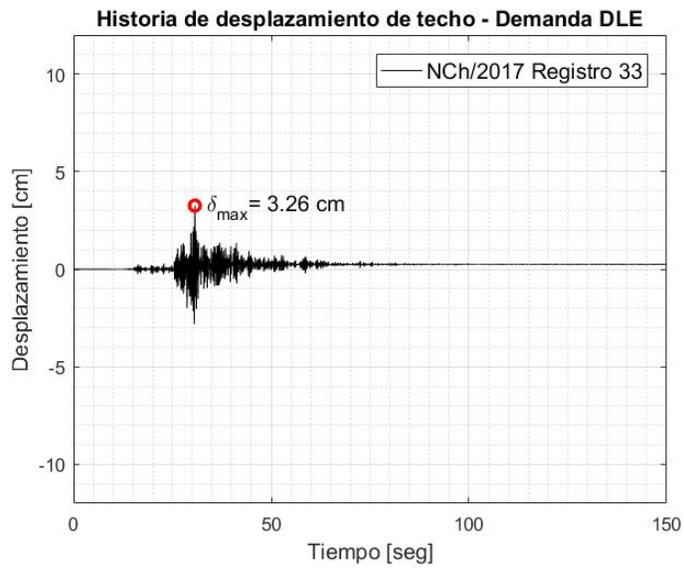
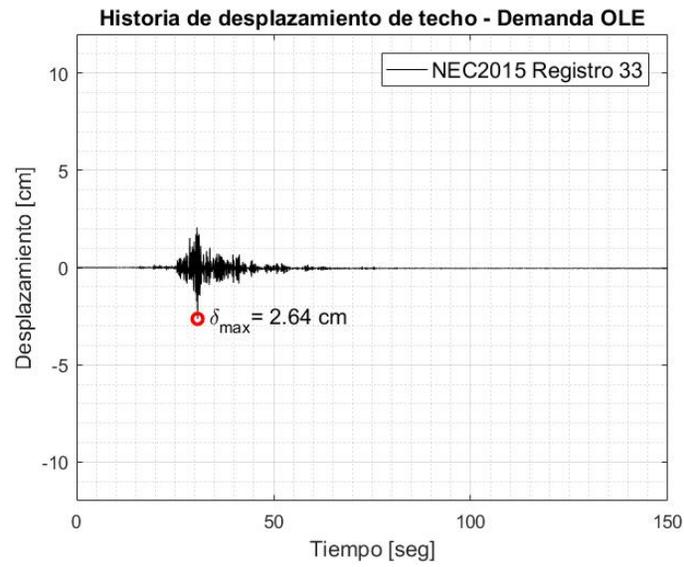
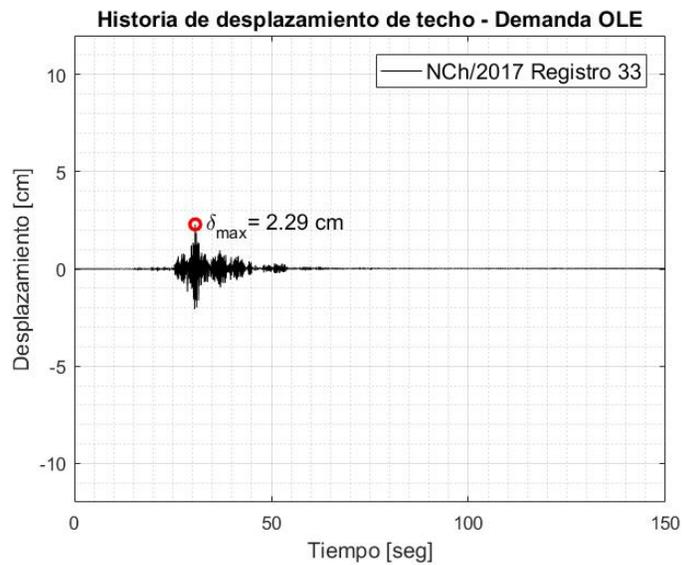
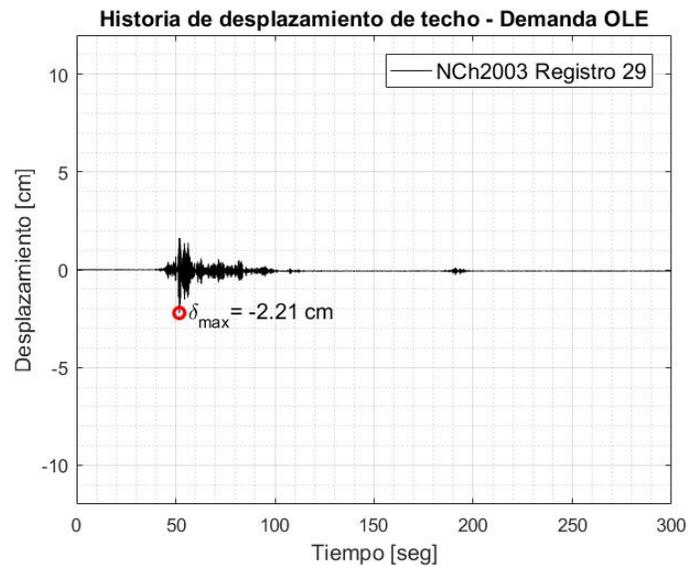


Figura X-12 Historias de desplazamientos de techo máximos Demanda Sísmica OLE





De la Figura X-13 a la Figura X-18 se muestran, para cada una de las normativas y demandas sísmicas, los valores máximos y remanentes de drift de entrepiso del primer nivel, respectivamente. Debido a la diferencia de valores las figuras no han sido colocadas en la misma escala.

De la Tabla X-5 a la Tabla X-7 se presenta un resumen con los valores máximos y remanentes de drift del primer nivel para cada escenario.

Figura X-13 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R

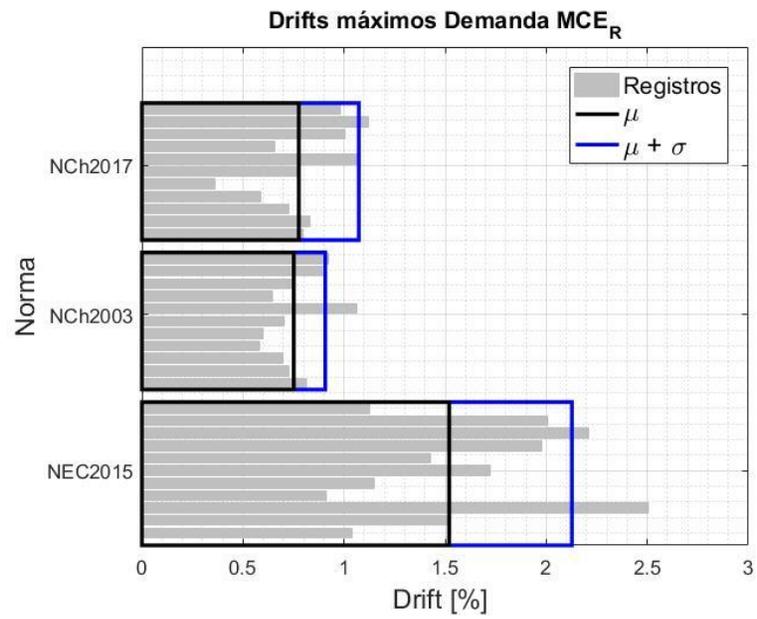


Figura X-14 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R

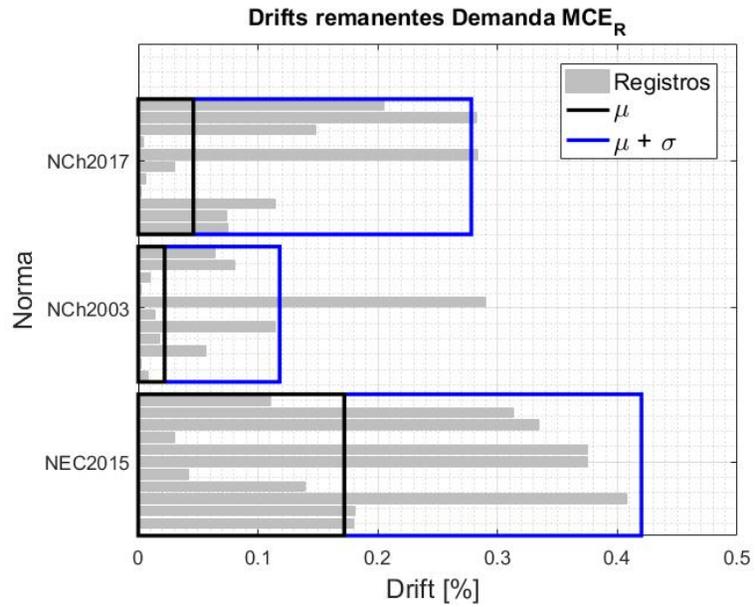


Figura X-15 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE

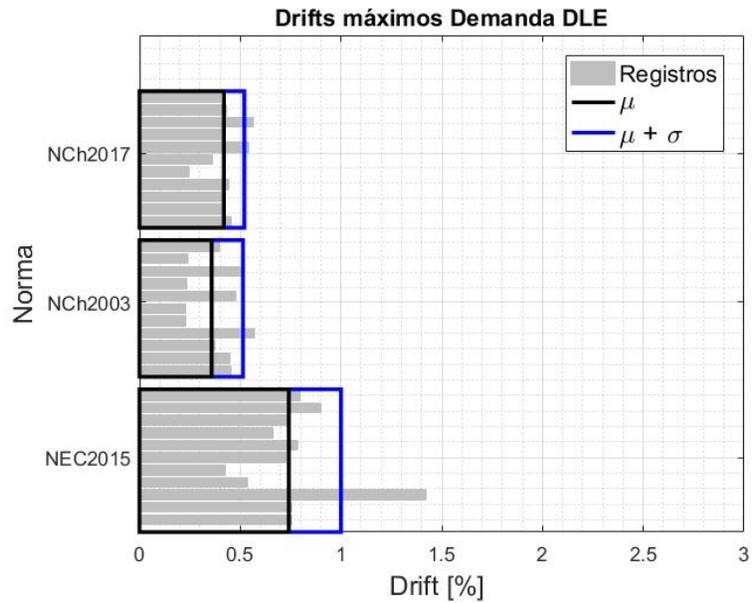


Figura X-16 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE

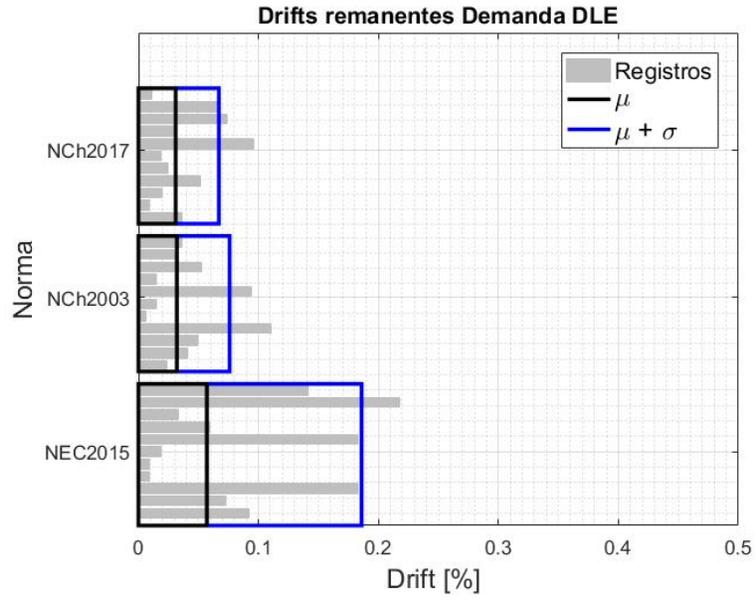


Figura X-17 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE

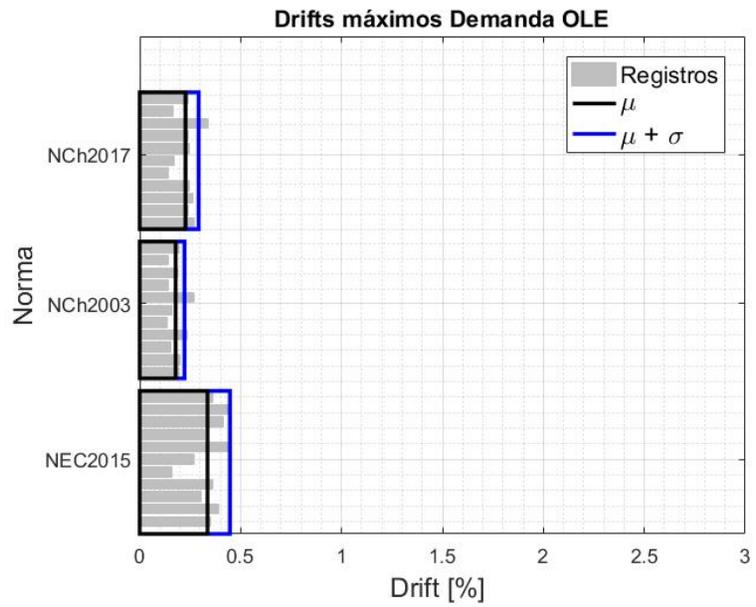


Figura X-18 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE

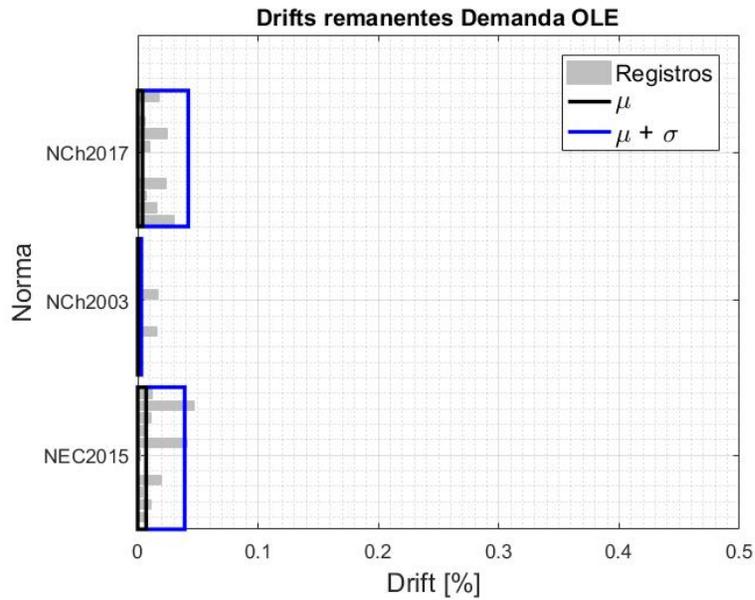


Tabla X-5 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda MCE_R

Drifts de entpiso. Nivel 1. Demanda MCE						
Registro	NEC2015		NCH2003		NCH2017	
	máximo	remanente	máximo	remanente	máximo	remanente
1	1.04%	0.18%	0.81%	0.01%	0.80%	0.07%
2	1.52%	0.18%	0.73%	0.00%	0.83%	0.07%
3	2.50%	0.41%	0.70%	0.06%	0.73%	0.11%
4	0.91%	0.14%	0.58%	0.02%	0.59%	0.00%
5	1.15%	0.04%	0.60%	0.11%	0.36%	0.01%
6	1.73%	0.38%	0.70%	0.01%	0.78%	0.03%
7	1.43%	0.38%	1.06%	0.29%	1.06%	0.28%
8	1.98%	0.03%	0.65%	0.00%	0.66%	0.00%
9	2.21%	0.33%	0.74%	0.01%	1.01%	0.15%
10	2.00%	0.31%	0.91%	0.08%	1.12%	0.28%
11	1.12%	0.11%	0.92%	0.06%	0.98%	0.20%
μ	1.52%	0.17%	0.75%	0.02%	0.78%	0.05%
μ + σ	2.13%	0.42%	0.91%	0.12%	1.07%	0.28%
max	2.50%	0.41%	1.06%	0.29%	1.12%	0.28%

Tabla X-6 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda DLE

Drifts de entrepiso. Nivel 1. Demanda DLE						
Registro	NEC2015		NCH2003		NCH2017	
	máximo	remanente	máximo	remanente	máximo	remanente
1	0.76%	0.09%	0.45%	0.02%	0.45%	0.04%
2	0.76%	0.07%	0.45%	0.04%	0.41%	0.01%
3	1.42%	0.18%	0.37%	0.05%	0.42%	0.02%
4	0.53%	0.01%	0.57%	0.11%	0.45%	0.05%
5	0.43%	0.01%	0.23%	0.01%	0.25%	0.03%
6	0.73%	0.02%	0.23%	0.02%	0.36%	0.02%
7	0.79%	0.18%	0.48%	0.09%	0.54%	0.10%
8	0.66%	0.06%	0.23%	0.01%	0.42%	0.03%
9	0.73%	0.03%	0.52%	0.05%	0.57%	0.07%
10	0.90%	0.22%	0.24%	0.03%	0.43%	0.07%
11	0.80%	0.14%	0.40%	0.04%	0.40%	0.01%
μ	0.74%	0.06%	0.36%	0.03%	0.42%	0.03%
μ + σ	1.00%	0.19%	0.51%	0.08%	0.52%	0.07%
max	1.42%	0.22%	0.57%	0.11%	0.57%	0.10%

Tabla X-7 Resumen de drifts máximos y remanentes en el nivel 1. Demanda OLE

Drifts de entrepiso. Nivel 1. Demanda OLE						
Registro	NEC2015		NCH2003		NCH2017	
	máximo	remanente	máximo	remanente	máximo	remanente
1	0.35%	0.01%	0.19%	0.000%	0.27%	0.03%
2	0.39%	0.01%	0.20%	0.001%	0.24%	0.02%
3	0.30%	0.00%	0.15%	0.000%	0.26%	0.01%
4	0.36%	0.02%	0.23%	0.016%	0.25%	0.02%
5	0.16%	0.00%	0.14%	0.000%	0.14%	0.00%
6	0.27%	0.00%	0.16%	0.000%	0.17%	0.00%
7	0.44%	0.04%	0.27%	0.017%	0.24%	0.01%
8	0.32%	0.00%	0.14%	0.000%	0.24%	0.03%
9	0.41%	0.01%	0.19%	0.000%	0.34%	0.01%
10	0.44%	0.05%	0.14%	0.000%	0.16%	0.00%
11	0.36%	0.01%	0.20%	0.000%	0.24%	0.02%
μ	0.34%	0.01%	0.18%	0.000%	0.23%	0.00%
μ + σ	0.45%	0.04%	0.22%	0.003%	0.29%	0.04%
max	0.44%	0.05%	0.27%	0.017%	0.34%	0.03%

De las figuras y tablas anteriores se puede verificar que para ninguna de las normativas y ninguno de los diferentes escenarios de demanda sísmica se supera el valor del criterio de cumplimiento requerido en el ASCE7-16 (ASCE, 2016).

Se tiene que para la norma ecuatoriana el valor de la mediana, para la demanda sísmica MCE_R es igual a 1,52% con un máximo valor de 2,50% de drift de entrepiso. Para la norma chilena del año 2003 se tiene que el valor de la mediana es igual a 0,75% con un valor máximo de 1,06% y finalmente para la normativa del año 2017 se tiene que el valor de la mediana del drift es igual a 0,78% con un valor máximo de 1,12%.

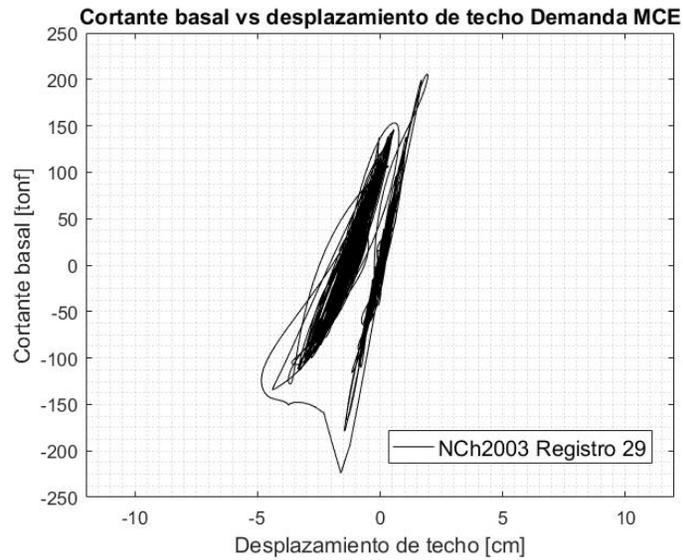
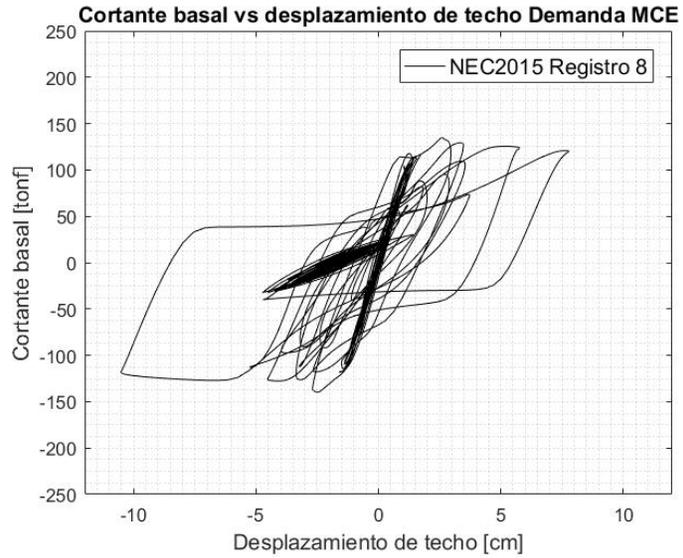
De acuerdo con los criterios de aceptación de drift del (FEMA, 2009), se tiene que la en la demanda sísmica MCE_R el marco diseñado con la NEC-SE 2015 (MINDUB, 2015) se encuentra en el rango de prevención de colapso CP. Los marcos diseñados bajo la normativa chilena, en base al mismo criterio, se encuentran dentro de la categoría de seguridad de vida LF.

Es importante observar que para la demanda sísmica operacional OLE, todas las normativas tienen una valor mediano y máximo inferiores a 0,5%, lo que concuerda con el criterio de aceptación del FEMA356 (FEMA356, 2000) en donde para una ocupación inmediata el valor máximo de drift de entrepiso no debe ser superior a 0,5%.

X.3.2 Corte basal versus desplazamiento de techo

En la Figura X-19, Figura X-20 y Figura X-21 se muestran las relaciones de corte basal versus desplazamiento de techo para las demandas máximas de desplazamiento de techo presentadas en la sección anterior.

Figura X-19 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica MCE_R



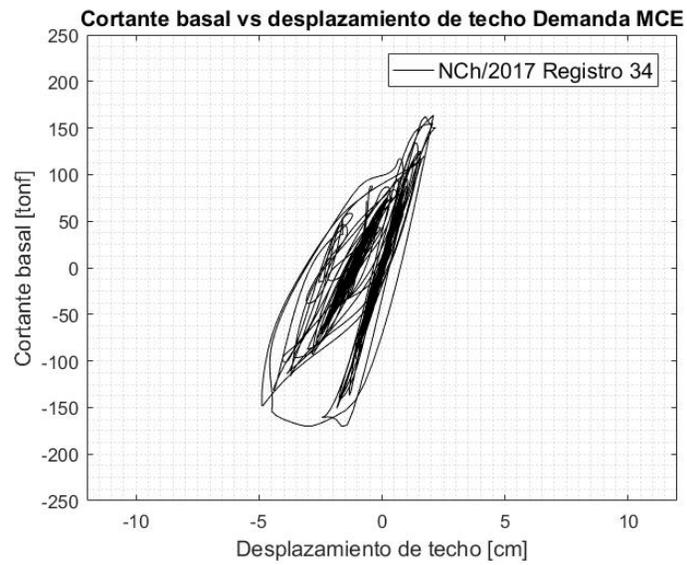
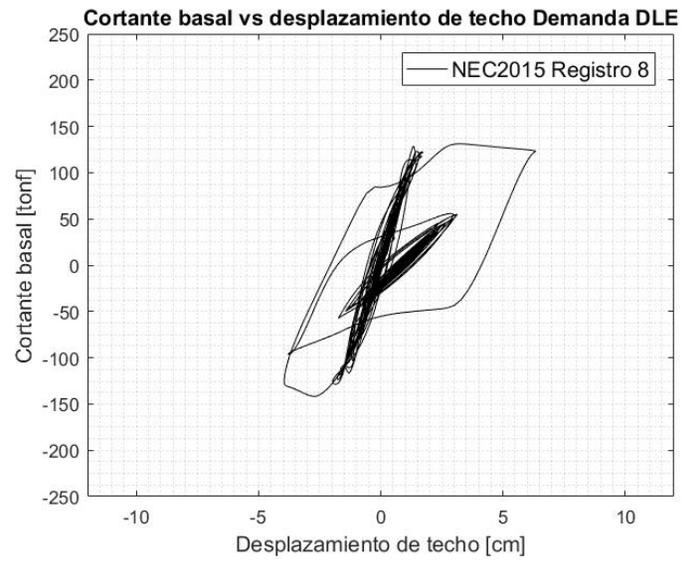


Figura X-20 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica DLE



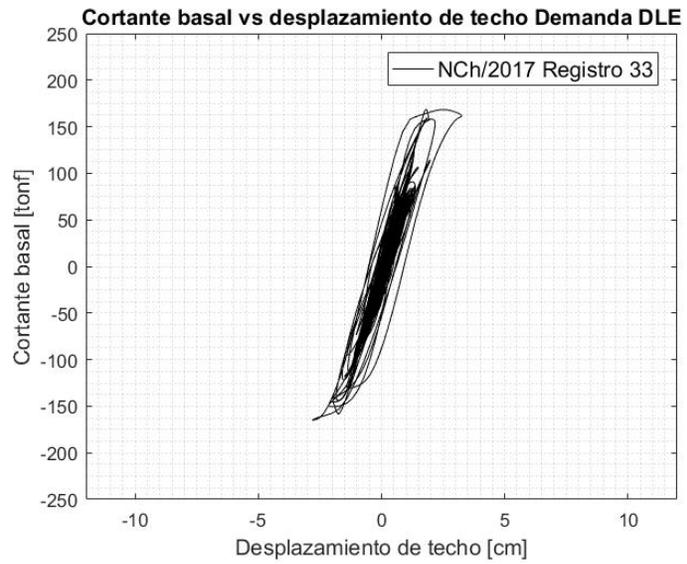
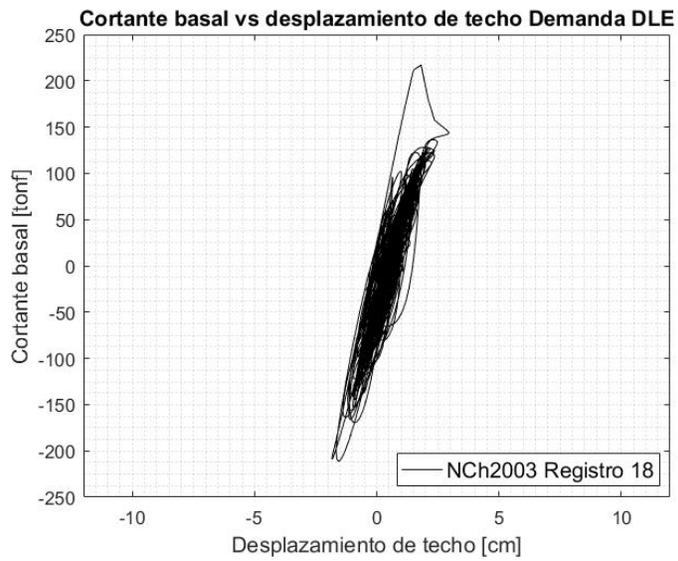
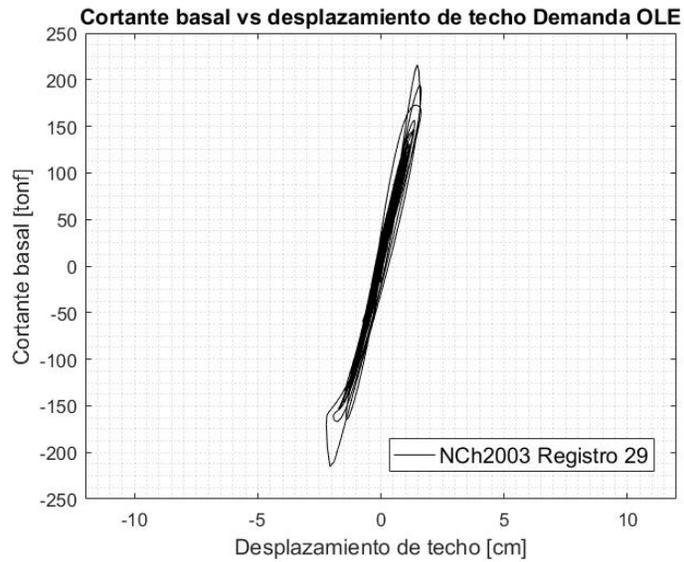
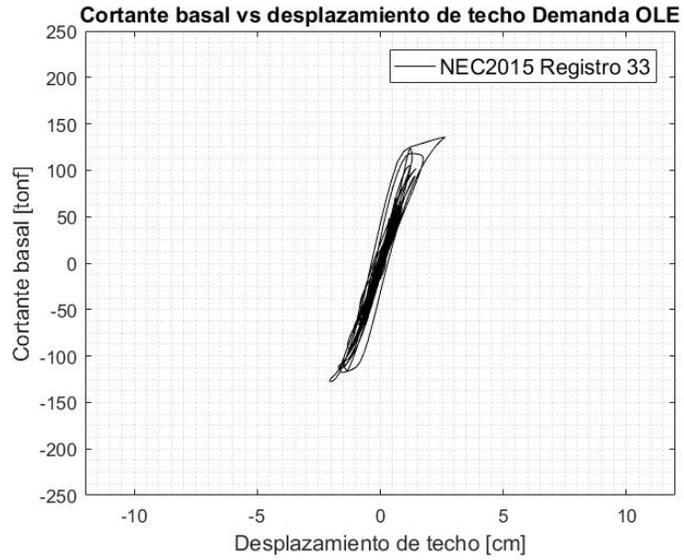
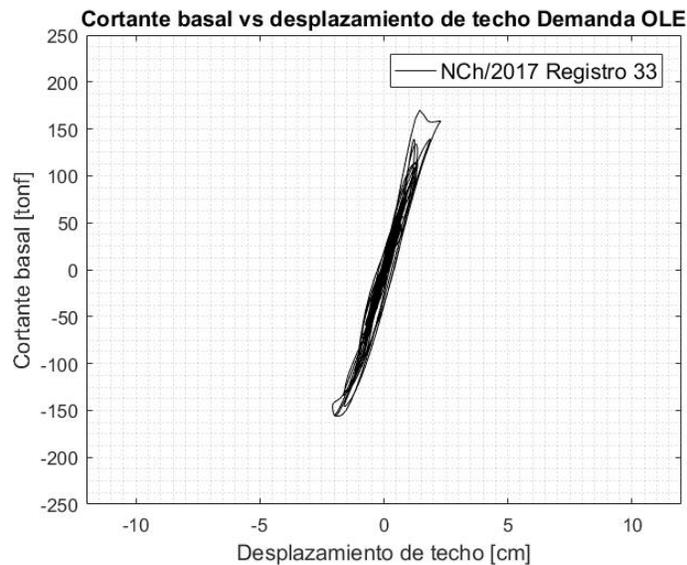


Figura X-21 Corte basal versus desplazamiento de techo Demanda Sísmica OLE



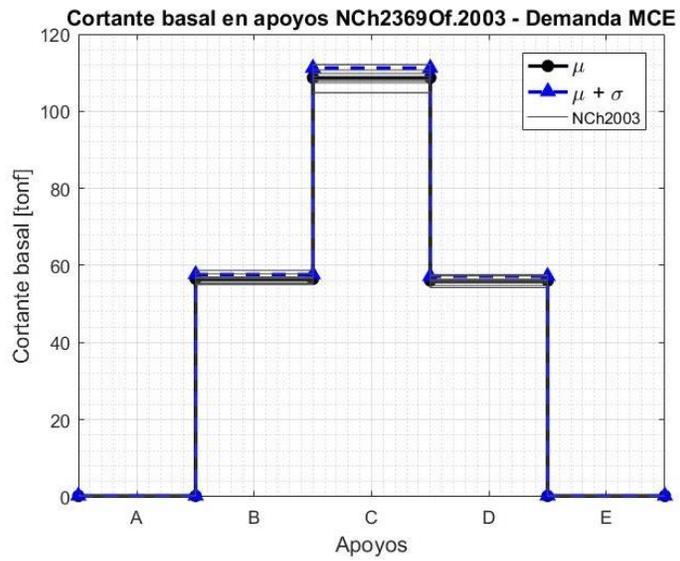
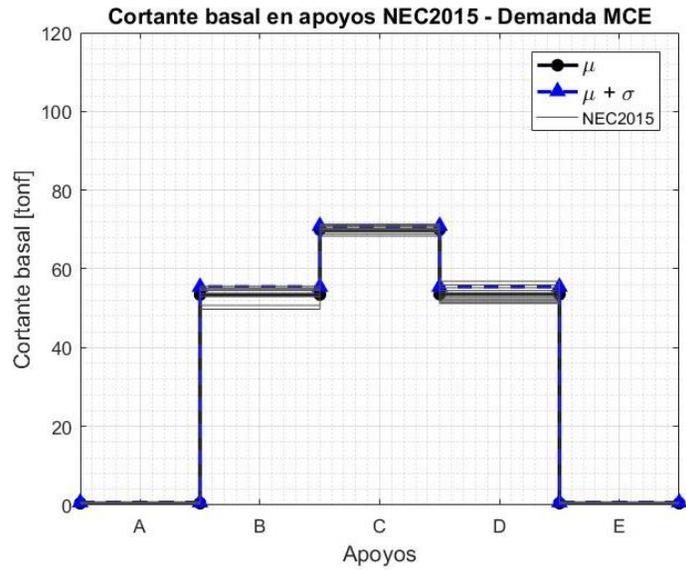


Se observa que la rigidez del pórtico en base a la normativa *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) es mayor que la de las otras dos normativas en análisis por lo que tiene una capacidad mayor de tomar cortante basal para cada una de las demandas sísmicas estudiadas.

A nivel de desempeño de la normativa chilena, se observa particularmente que para terremotos de nivel de diseño los sistemas bajo dicha normativa tienen una incursión no lineal menor, respetando el objetivo de continuidad de operación para dicho nivel. El código ecuatoriano, al no estar pensado para la continuación operacional desarrolla un nivel mayor de daño.

En la Figura X-22, Figura X-23 y Figura X-24 se presentan en color gris los valores de cortante basal máximos obtenidos para todos los registros en análisis en cada uno de los apoyos del pórtico, además en color negro se presenta el valor promedio (mediana μ) y en color azul se presentan los valores correspondientes a la mediana más la desviación estándar ($\mu + \sigma$).

Figura X-22 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica MCE_R



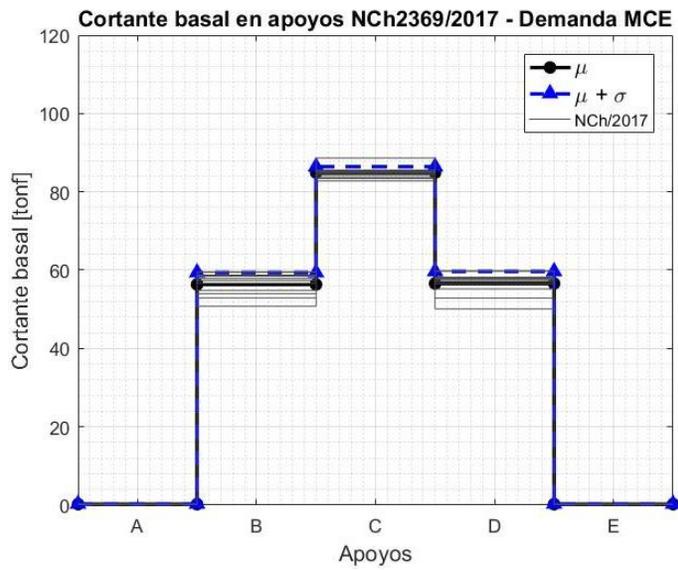
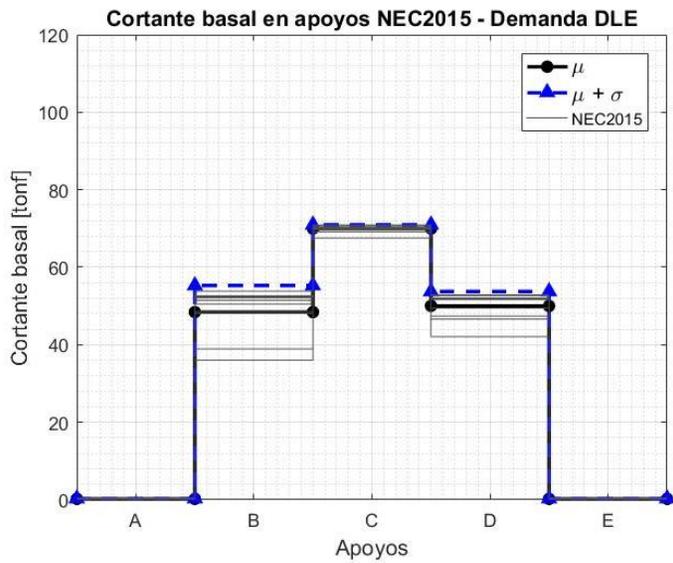


Figura X-23 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica DLE



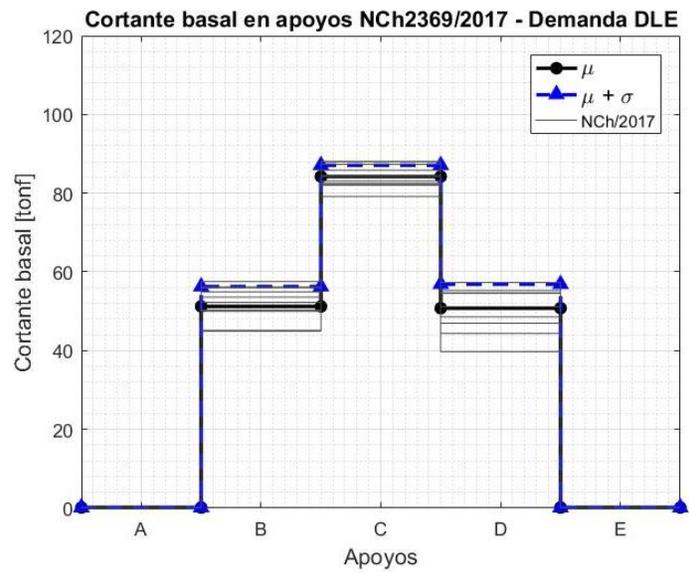
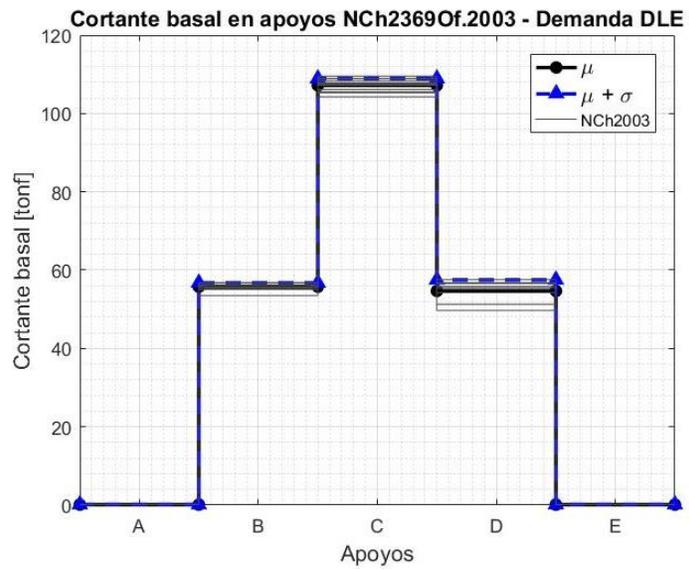
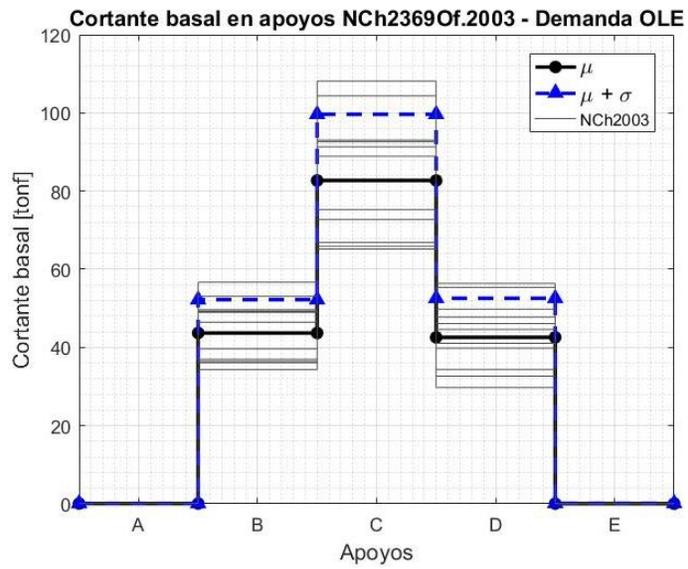
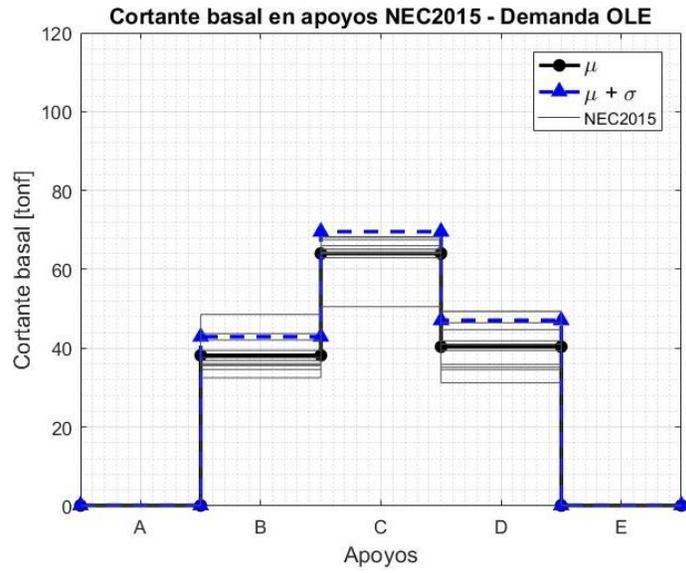
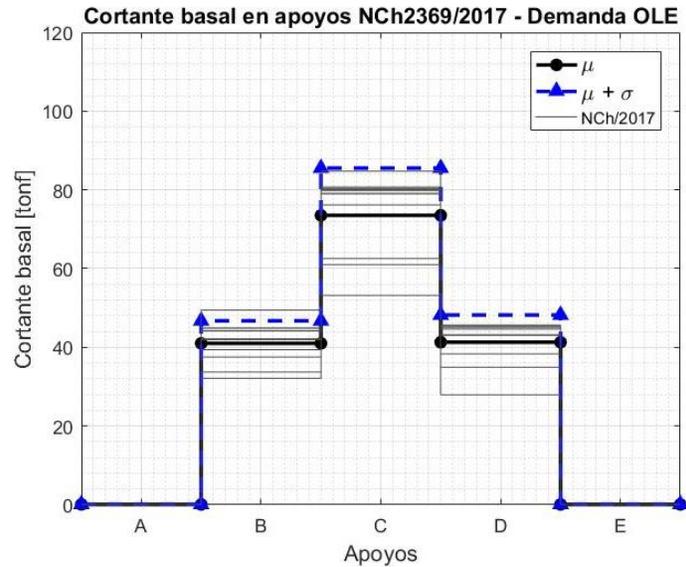


Figura X-24 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica OLE





De la Figura X-25 a la Figura X-30 se presentan la razón de las respuestas en cada uno de los apoyos para cada uno de los registros analizados, así como de los valores medianos y medianos más sigma respecto de las resistencias esperadas en los apoyos, bajo el mismo criterio de análisis que para las demandas registradas de terremotos severos presentados anteriormente.

Figura X-25 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda MCE_R

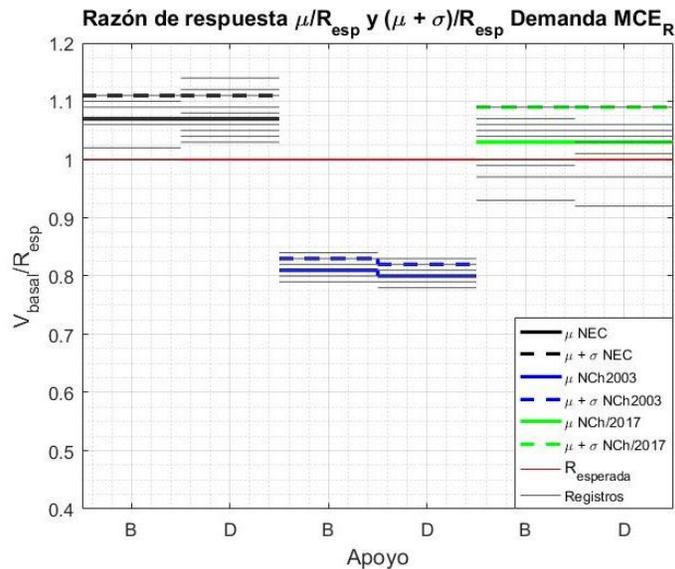


Figura X-26 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda MCE_R

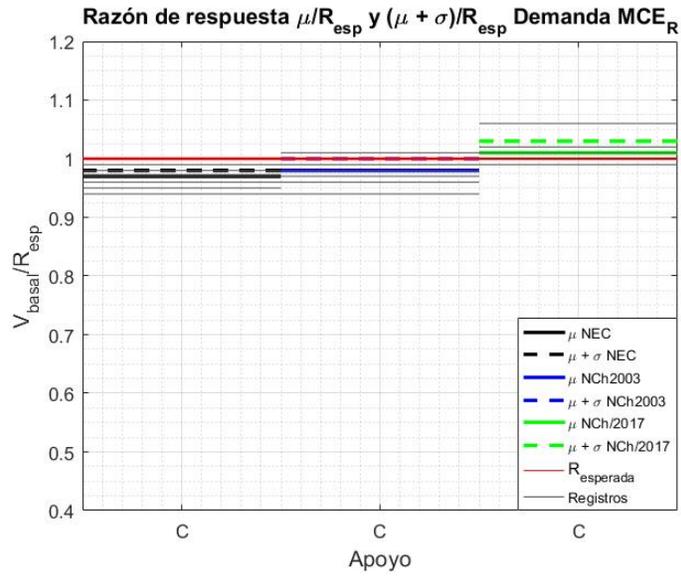


Figura X-27 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda DLE

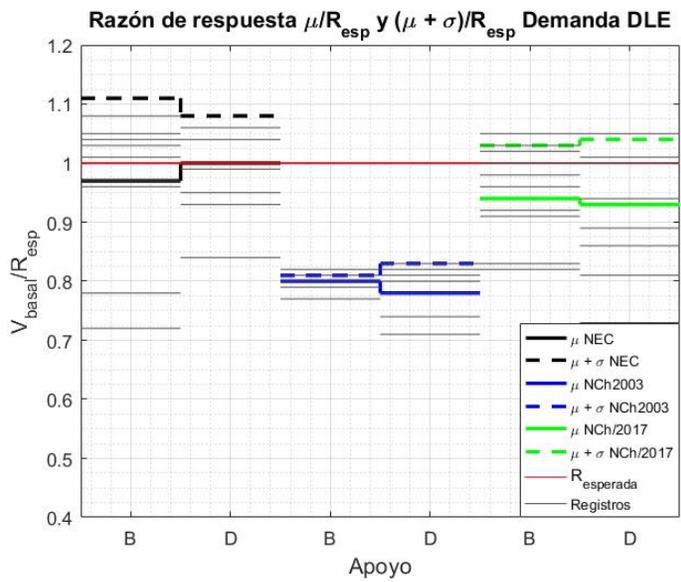


Figura X-28 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda DLE

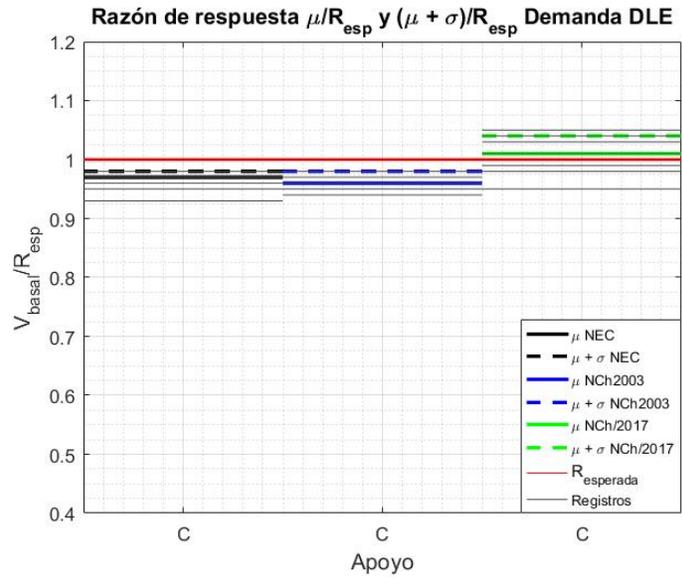


Figura X-29 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B y D Demanda OLE

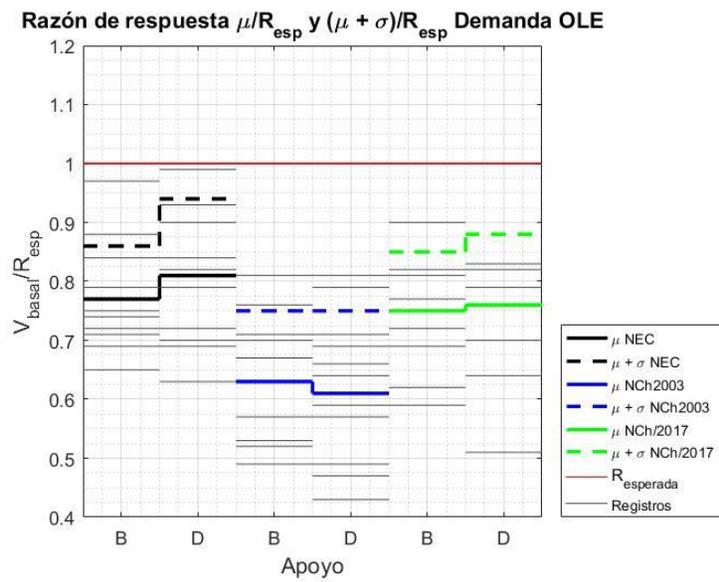
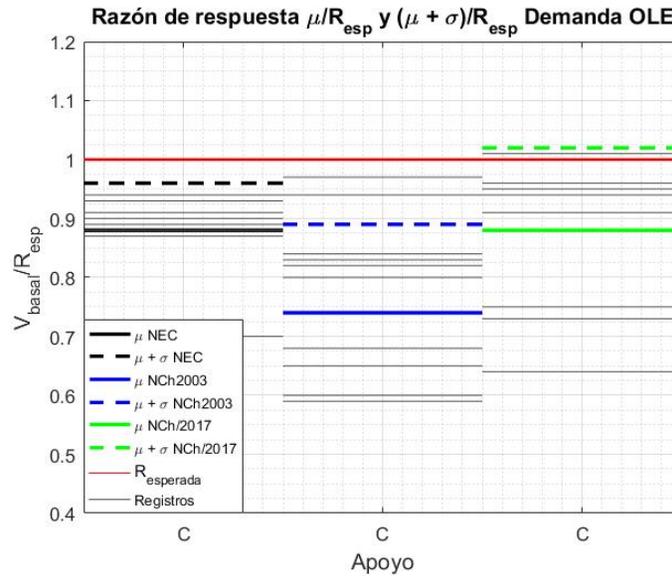


Figura X-30 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyo C Demanda OLE



Se puede observar que para la demanda sísmica MCE_R en los apoyos B y D, para la norma ecuatoriana y la chilena del año 2017, el valor de la mediana es superior al valor esperado en un 7,5% y 2,5%, respectivamente, contrario a lo que ocurre en el apoyo C en donde dichos valores son aproximadamente el valor esperado.

El valor de la mediana en los apoyos B y D en la norma chilena del año 2003 es aproximadamente de un 80% del valor esperado, y para el apoyo C es aproximadamente el valor esperado.

Para las demandas de diseño DLE, el valor de cortante basal en los apoyos B, C y D son aproximados al valor esperado para la normativa ecuatoriana y chilena del año 2017. Para la normativa del año 2003 se mantiene la misma relación que para la demanda MCE_R , por lo que el diseño de los pernos de anclaje o llave de corte en la base de las columnas nuevamente podría verificarse que deberían ser diseñados con los valores de resistencia esperada.

Para las demandas operacionales, se tiene que los valores medianos son aproximadamente un 80%, 70% y 80% para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369.Of2003* (INN, NCh2369.Of2003, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, NCh2369/2017, 2017), respectivamente, por lo que el criterio de diseño de las bases de columna con el valor esperado cumpliría con el requerimiento.

Las demandas máximas de corte basal en el tiempo, para cada uno de los escenarios de demanda sísmica, se presentan en las tablas a continuación:

Tabla X-8 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda MCE_R

	Corte basal (tonf)		
	NEC2015	NCH2003	NCH/2017
max	142.9	224.0	177.8
μ	140.1	217.1	170.3
$\mu + \sigma$	141.9	222.1	173.3

Tabla X-9 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda DLE

	Corte basal (tonf)		
	NEC2015	NCH2003	NCH/2017
max	142.0	218.5	176.7
μ	140.1	214.0	168.8
$\mu + \sigma$	142.0	217.3	174.5

Tabla X-10 Cortes basales máximos en el pórtico Demanda OLE

	Corte basal (tonf)		
	NEC2015	NCH2003	NCH/2017
max	136.9	215.9	170.1
μ	128.6	165.1	147.7
$\mu + \sigma$	139.5	198.9	171.7

Al ser el sistema bajo la normativa del año 2003 un sistema más rígido que los otros dos escenarios, los valores medianos y máximos del cortante basal total que puede tomar dicho escenario son mayores para cada una de las demandas sísmicas, teniendo la *NCh2369/2017* (INN, 2017) un valor intermedio entre la norma ecuatoriana y la chilena del año 2003. La diferencia porcentual correspondiente es tal que en la normativa chilena del año 2003 el valor mediano es un 55% y 28% superior a la normativa ecuatoriana y chilena del año 2017, respectivamente.

Como se había indicado, la resistencia elástica medida en cada uno de los marcos en estudio, de acuerdo a un análisis incremental es de 144,83 tonf, 222,78 tonf y 167,34 tonf para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente,

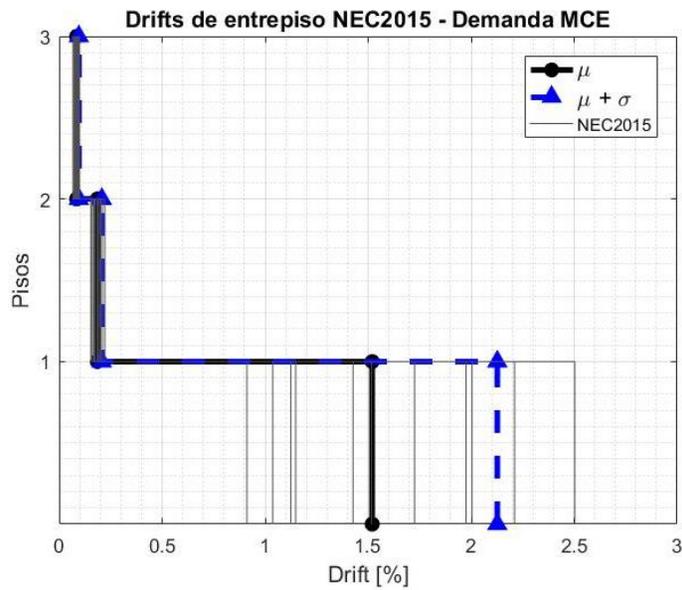
Para los niveles de demanda sísmica MCE_R y DLE se tiene que los valores medianos son aproximadamente los valores de la resistencia elástica, siendo un 96%, 97% y 101% del elástico para la norma ecuatoriana, la chilena del año 2003 y la chilena del año 2017, respectivamente.

A nivel operacional los porcentajes de los valores medios de cortante basal corresponden a un 88%, 74% y 88% para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369Of.2003* (INN, 2003) y *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente.

X.3.3 Drifts de entrepiso

En la Figura X-31, Figura X-32 y Figura X-33 se muestran los drifts de entrepiso obtenidos para los registros sísmicos de cada escenario, respuestas que se presentan junto con la mediana y la mediana más la desviación estándar, representadas cada una con línea de color negro y azul, respectivamente.

Figura X-31 Drift de entrepiso Demanda Sísmica MCE_R



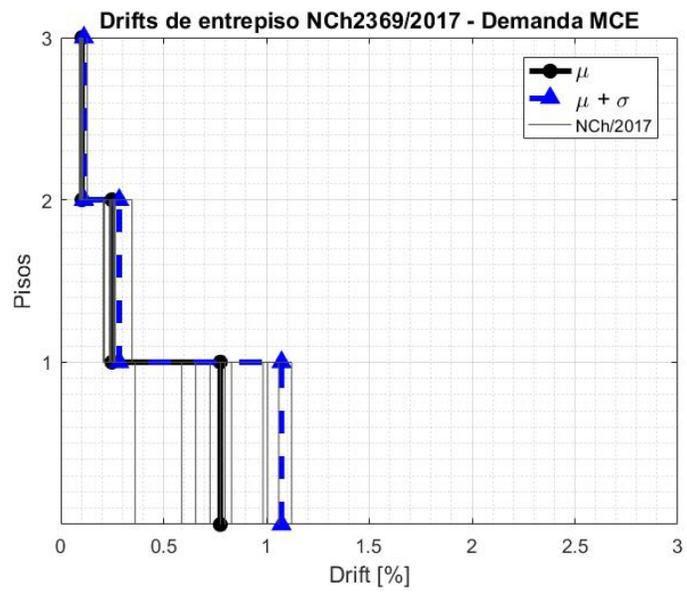
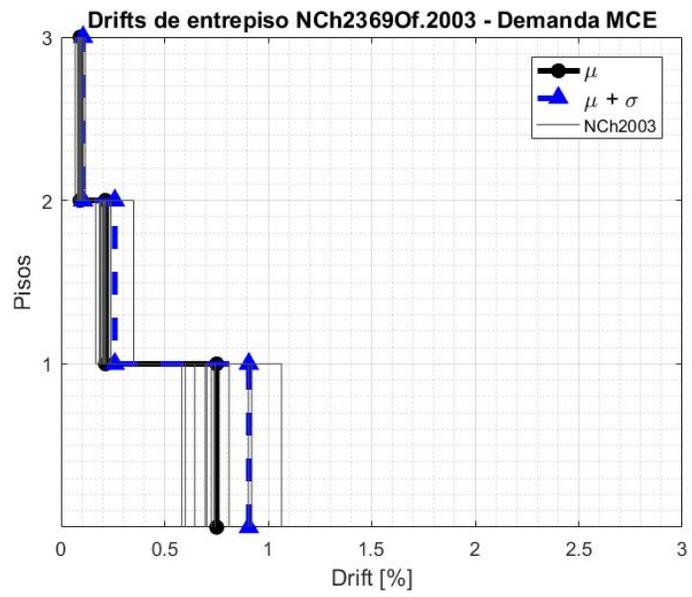
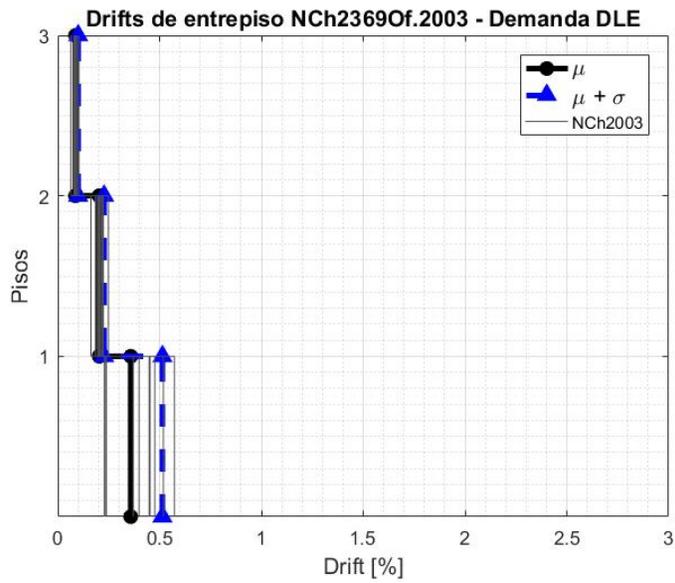
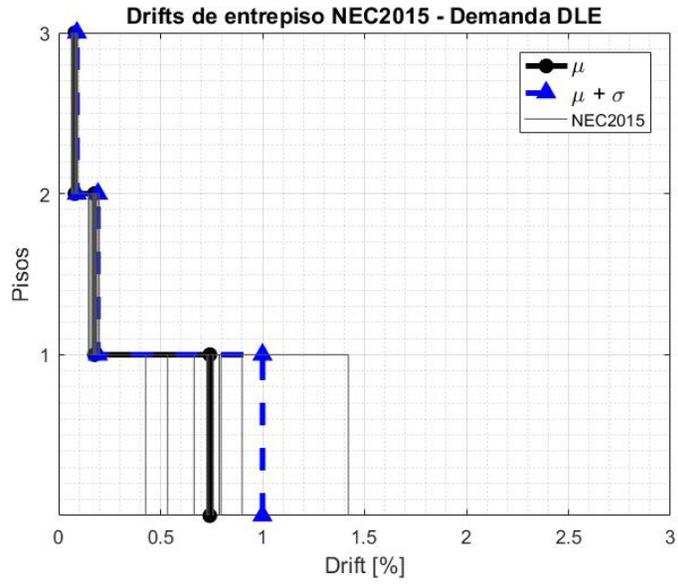


Figura X-32 Drift de entrepiso Demanda Sísmica DLE



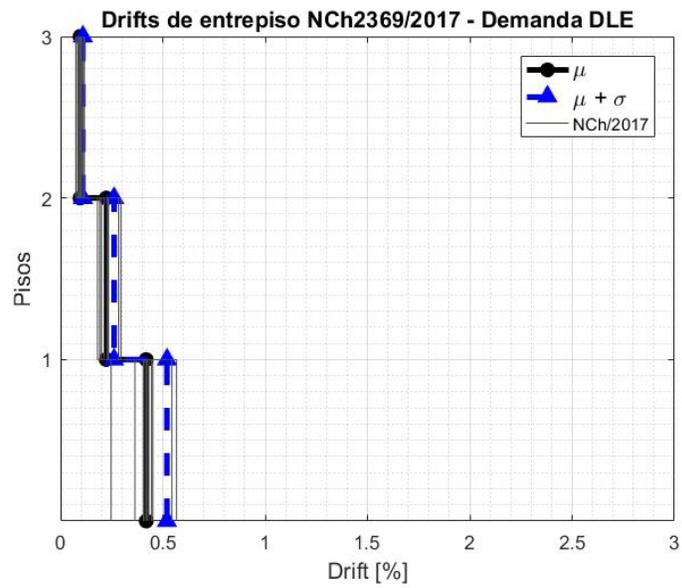
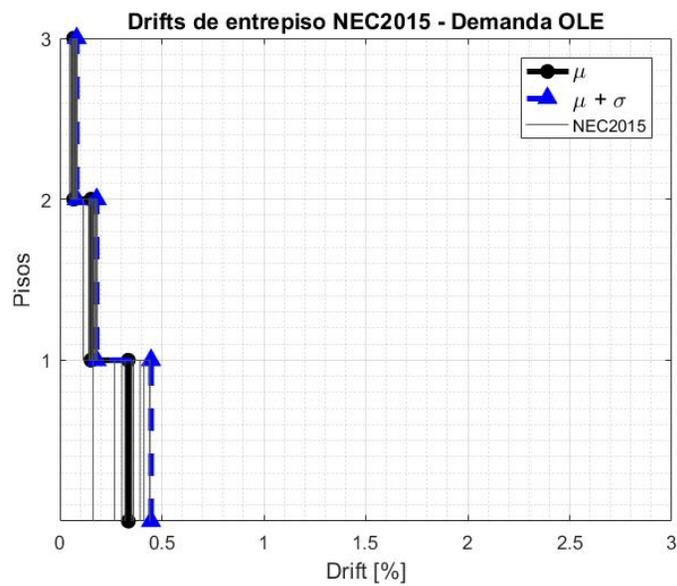
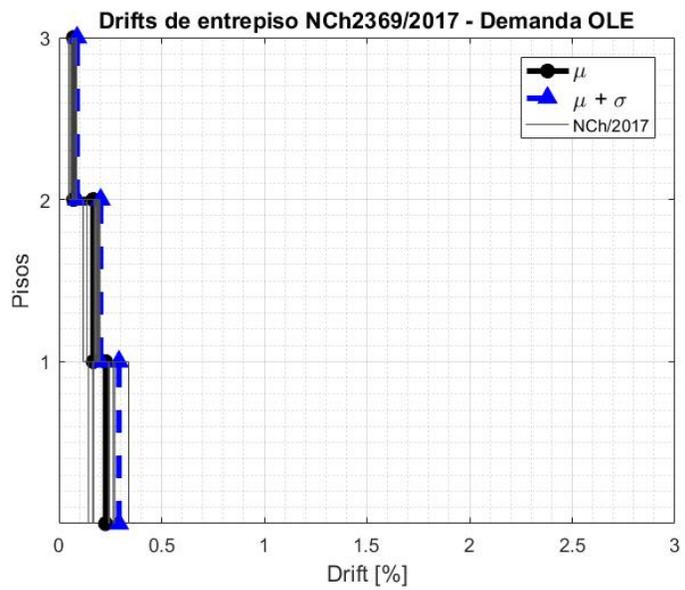
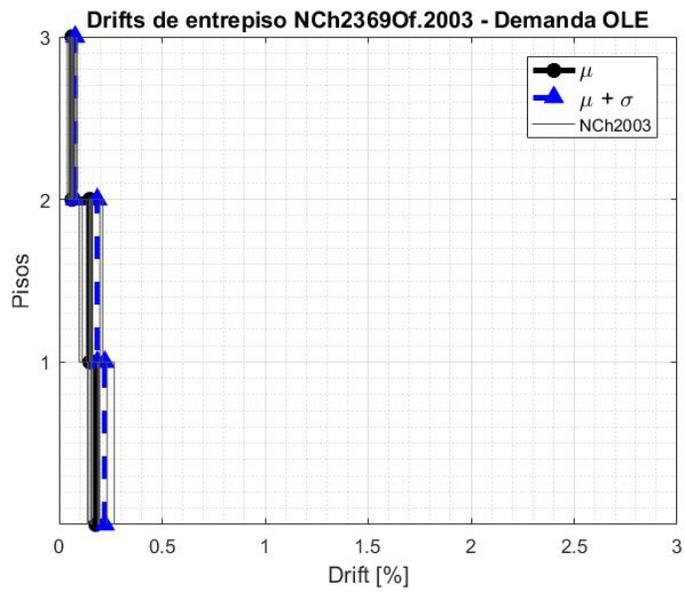


Figura X-33 Drift de entrepiso Demanda Sísmica OLE





Los drifts máximos por escenarios y demanda sísmica se resumen en la Tabla X-11, Tabla X-12 y Tabla X-13.

Tabla X-11 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica MCE_R

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
θ_3 (%)	0.10	0.08	0.10	0.12	0.09	0.11	0.13	0.10	0.11
θ_2 (%)	0.22	0.19	0.21	0.35	0.21	0.26	0.35	0.25	0.28
θ_1 (%)	2.50	1.52	2.13	1.06	0.75	0.91	1.12	0.78	1.07
θ^{\max} (%)	2.50	1.52	2.13	1.06	0.75	0.91	1.12	0.78	1.07

Tabla X-12 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica DLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
θ_3 (%)	0.09	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.12	0.10	0.11
θ_2 (%)	0.20	0.18	0.19	0.25	0.20	0.23	0.30	0.22	0.26
θ_1 (%)	1.42	0.74	1.00	0.57	0.36	0.51	0.57	0.42	0.52
θ^{\max} (%)	1.42	0.74	1.00	0.57	0.36	0.51	0.57	0.42	0.52

Tabla X-13 Drifts de piso máximos en el pórtico. Demanda sísmica OLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
θ_3 (%)	0.09	0.07	0.08	0.09	0.06	0.08	0.09	0.07	0.09
θ_2 (%)	0.18	0.15	0.18	0.21	0.15	0.19	0.20	0.17	0.20
θ_1 (%)	0.44	0.34	0.45	0.27	0.18	0.22	0.34	0.23	0.29
θ^{\max} (%)	0.44	0.34	0.45	0.27	0.18	0.22	0.34	0.23	0.29

Figura X-34 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica MCE_R

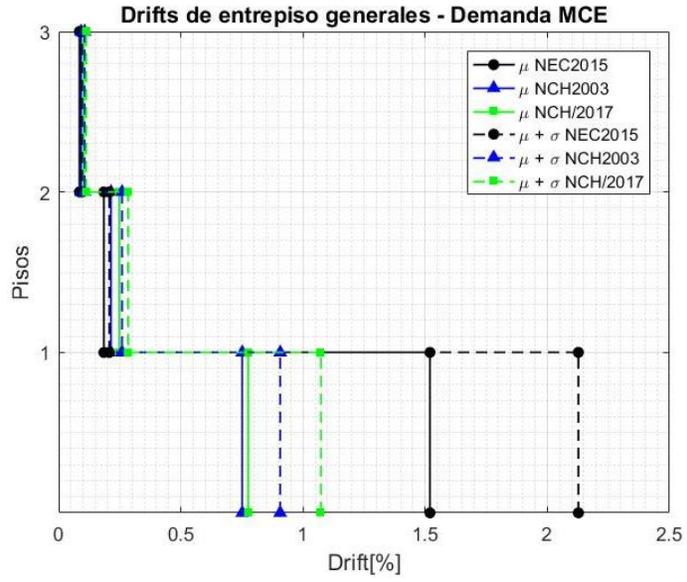


Figura X-35 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica DEL

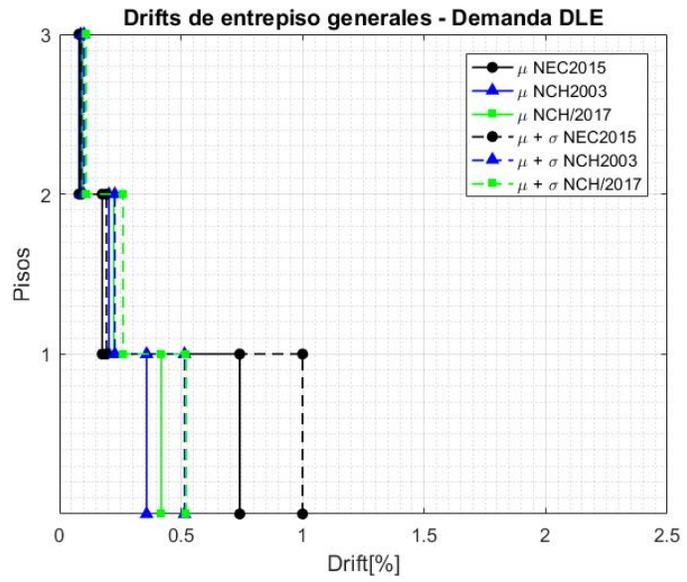
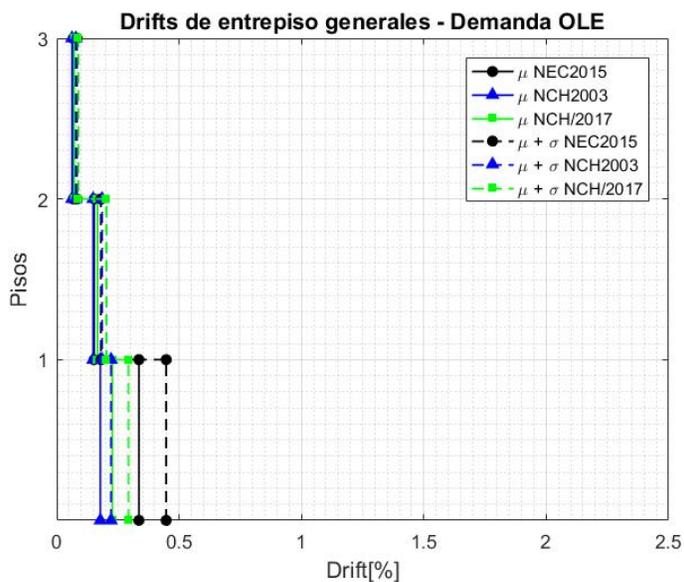


Figura X-36 Drifts de entrepiso comparativo. Demanda Sísmica OLE



De la Tabla X-11 Tabla X-12 y Tabla X-13 así como de la Figura X-34, Figura X-35 y Figura X-36 se observa que los drifts son mayores en la normativa NCh2369/2017 (INN, 2017) que en la NCh2369.Of2003 (INN, 2003).

Los drifts en la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) son superiores a los resultantes con las normativas chilenas, al igual que lo ocurrido con los desplazamientos horizontales de piso.

Referente al drift de entrepiso se puede observar que para la demanda sísmica MCE_R ninguna de las normativas supera el valor límite de criterio de aceptación recomendado en el *ASCE7-16* (ASCE, 2016) mismo que es del 4%, teniendo como valores máximos un 2,50%, 1,06% y 1,12% para la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015), la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente, por lo que al no superar

el valor requerido se concluye que cumplen con lo establecido en el capítulo 16 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016) a nivel global.

A nivel de desempeño se puede observar que bajo la demanda sísmica MCE_R y bajo la norma ecuatoriana *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) se supera el valor límite de seguridad de vida LS recomendados en el *FEMA356* (FEMA356, 2000) que corresponde a un 2% para el rango de probabilidad de colapso CP, teniendo como valor máximo de drift un 2,50%, contrario a lo que ocurre con la normativa chilena en donde se tiene un 1,06% y 1,12% para la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017), respectivamente.

Para la demanda MCE_R bajo la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) se tiene que un 36% de los eventos se encuentra en el rango de prevención de colapso CP, un 45% dentro de la categoría de seguridad de vida LS y un 18% superan el rango de prevención de colapso CP. Ningún registro se encuentra en la categoría de ocupación inmediata. Para la demanda MCE_R bajo la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) se tiene que el 100% de los eventos se encuentra en el rango de seguridad de vida LS. Para la demanda MCE_R bajo la *NCh2369/2017* (INN, 2017) se tiene que un 91% de los eventos se encuentra en el rango de seguridad de vida LS y el 9% restante dentro de la categoría de ocupación inmediata. Ningún registro se encuentra en la categoría de prevención de colapso.

Para nivel de diseño DLE bajo la norma ecuatoriana un 91% de los eventos se encuentra en la categoría de seguridad de vida y un 9% en la de ocupación inmediata. En la norma chilena, tanto del año 2003 y 2017, un 18% de eventos se encuentran en la categoría de seguridad de vida y un 82% en la de ocupación inmediata.

A nivel operacional, para las 3 normativas, el 100% de los eventos estudiados permanecen en la categoría de ocupación inmediata IO.

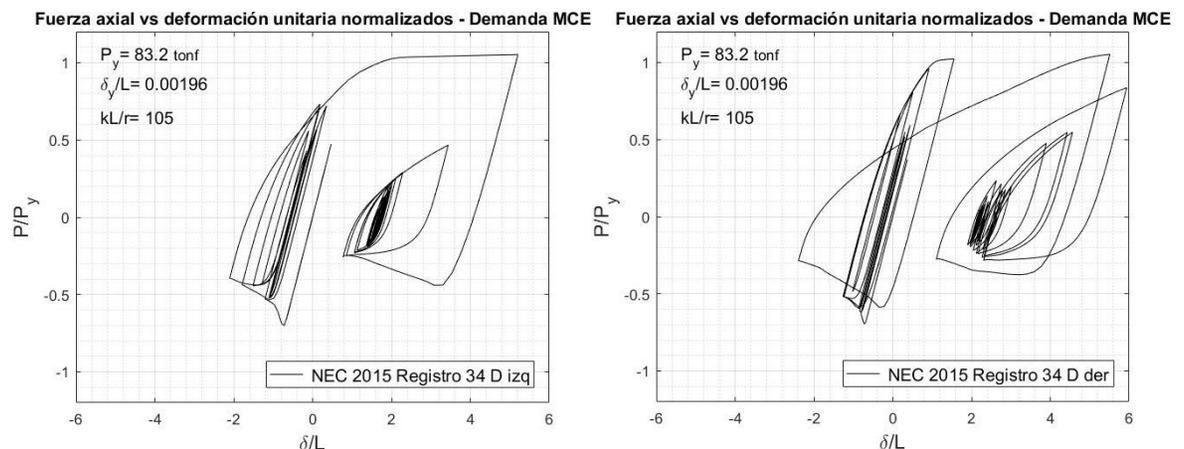
De lo anotado puede verificarse que la normativa chilena, al ser elaborada para un uso de tipo industrial, tiene un mejor desempeño en cuanto a las respuestas de drift de entepiso dado que para la categoría de diseño DLE la mayoría de los eventos se encuentran en la categoría de ocupación inmediata.

La normativa ecuatoriana no tiene una definición o diferenciación entre lo habitacional y lo industrial, por lo que a nivel de diseño se cumple con el objetivo de salvaguardar las vidas ya que ninguna se encuentra en la categoría de prevención de colapso, más sin embargo a nivel industrial podría significar la detención de operación de ciertas industrias, lo que podría causar inconvenientes en otros aspectos.

X.3.4 Deformación axial vs fuerza axial en diagonales

En la Figura X-37, Figura X-38 y Figura X-39 se muestran las relaciones de deformación axial versus fuerza axial, en las diagonales del primer piso del pórtico para un mismo registro a manera de comparar los resultados obtenidos con cada una de las normativas.

Figura X-37 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda MCE_R



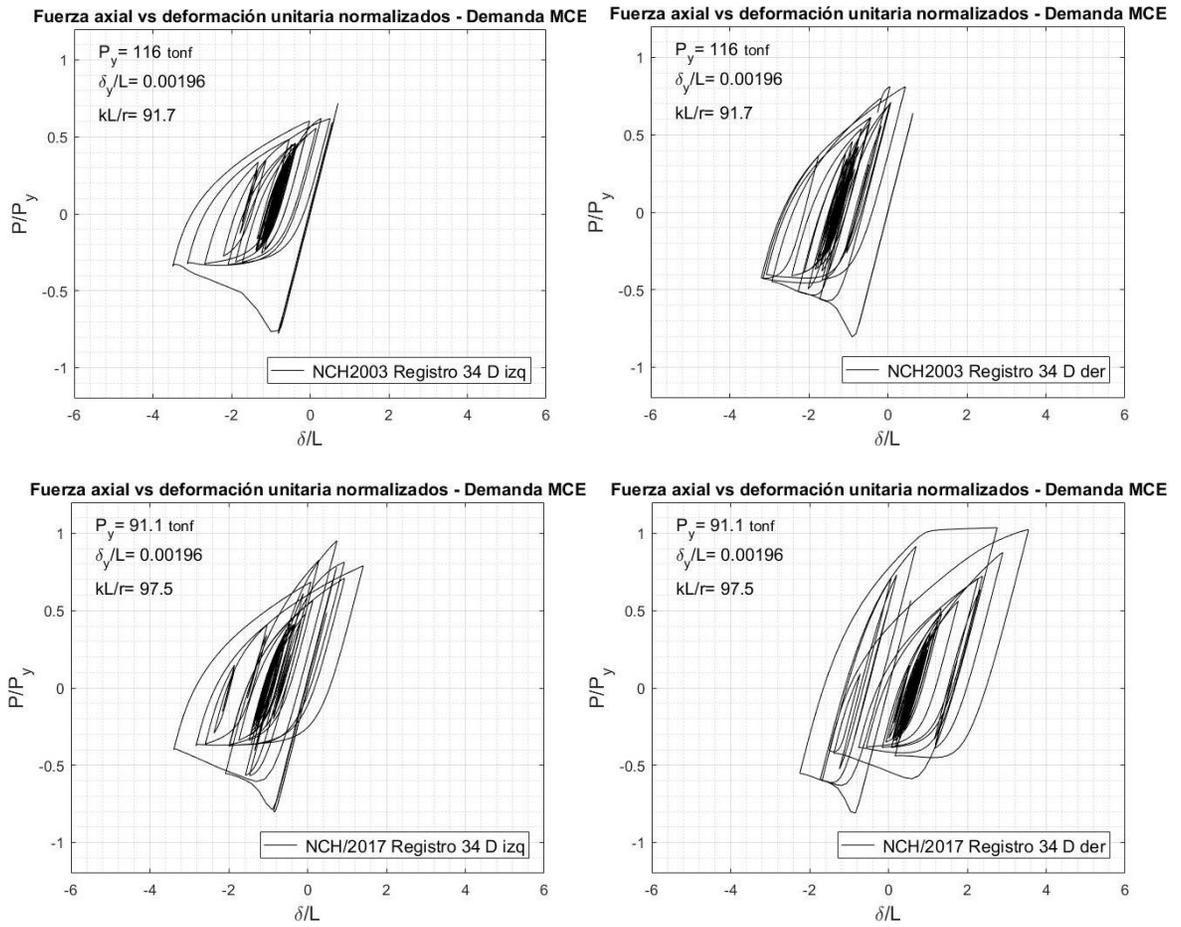
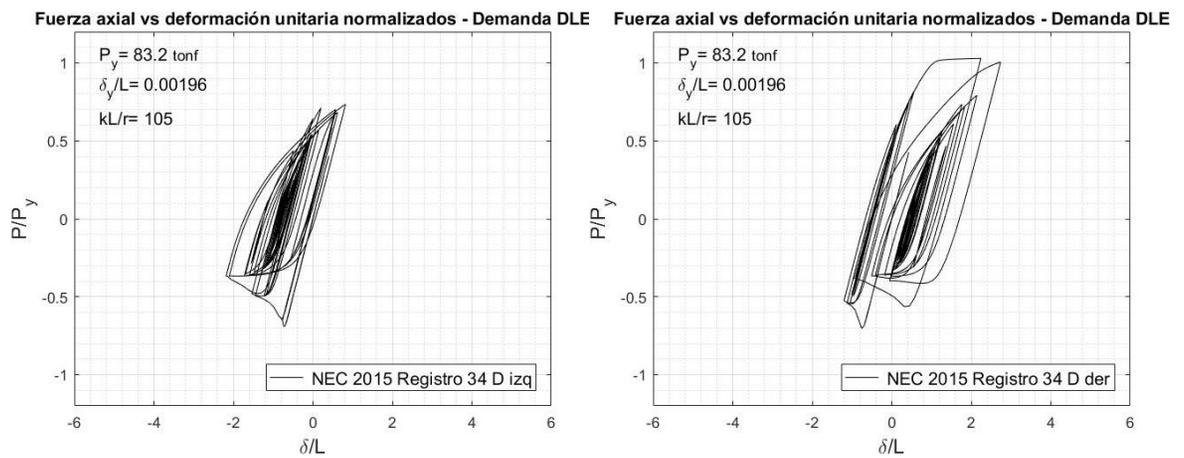


Figura X-38 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda DLE



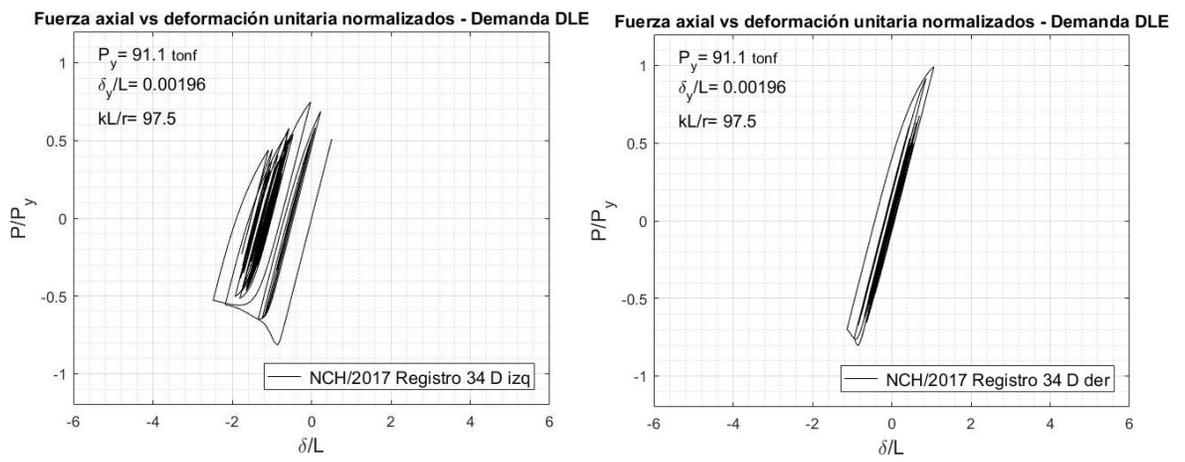
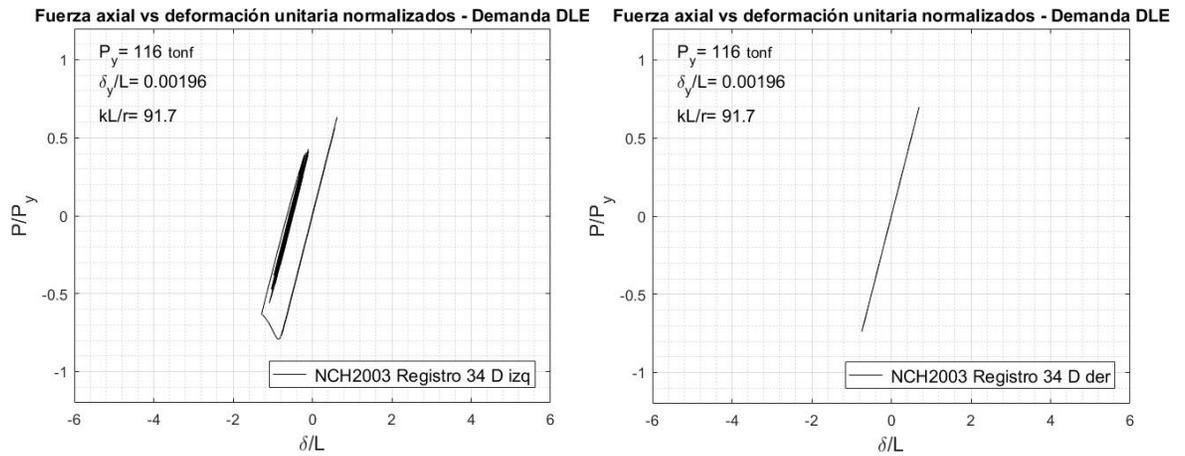
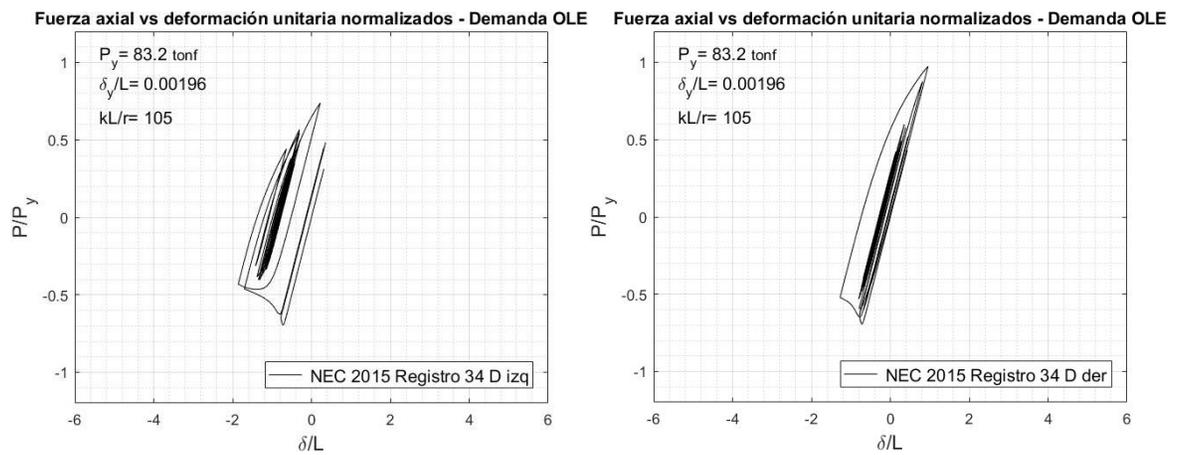
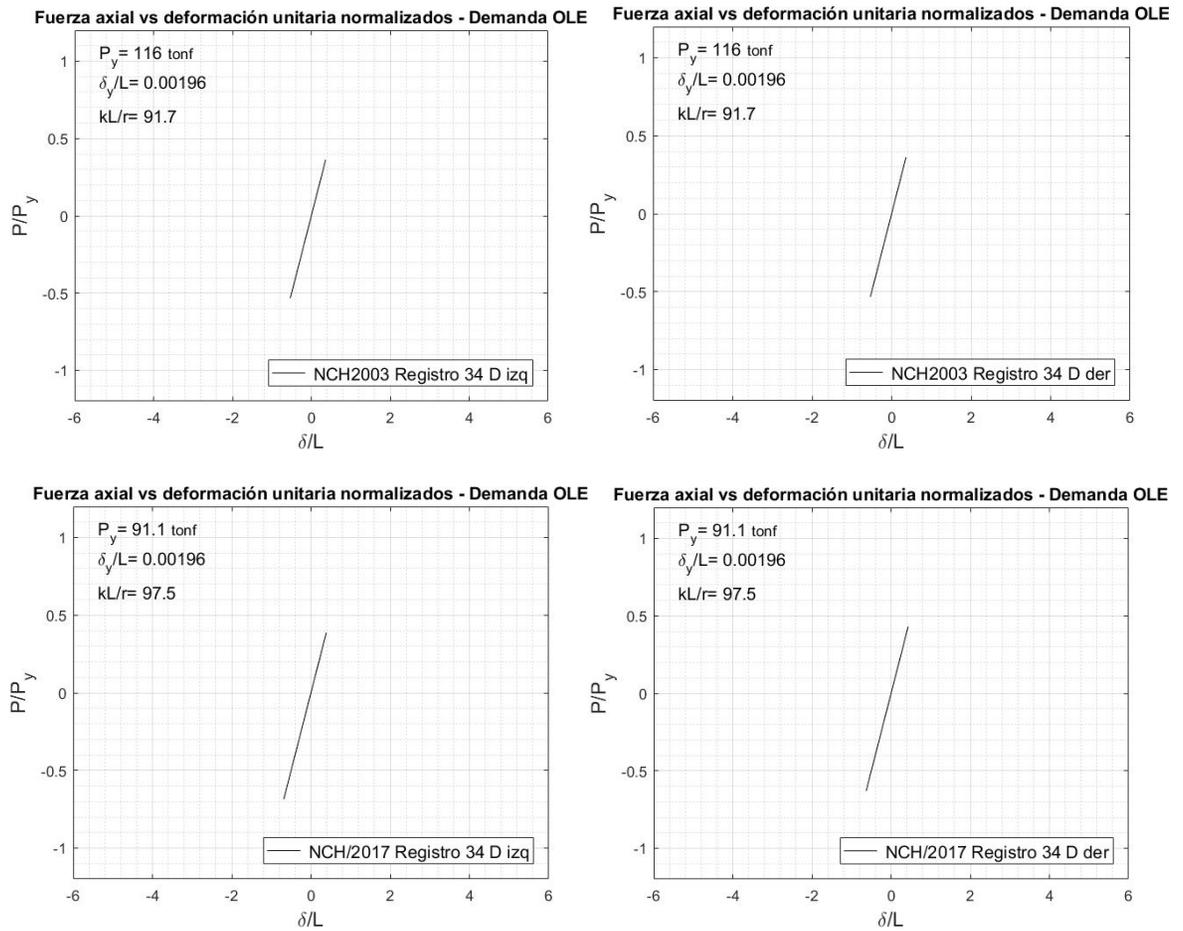


Figura X-39 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda OLE

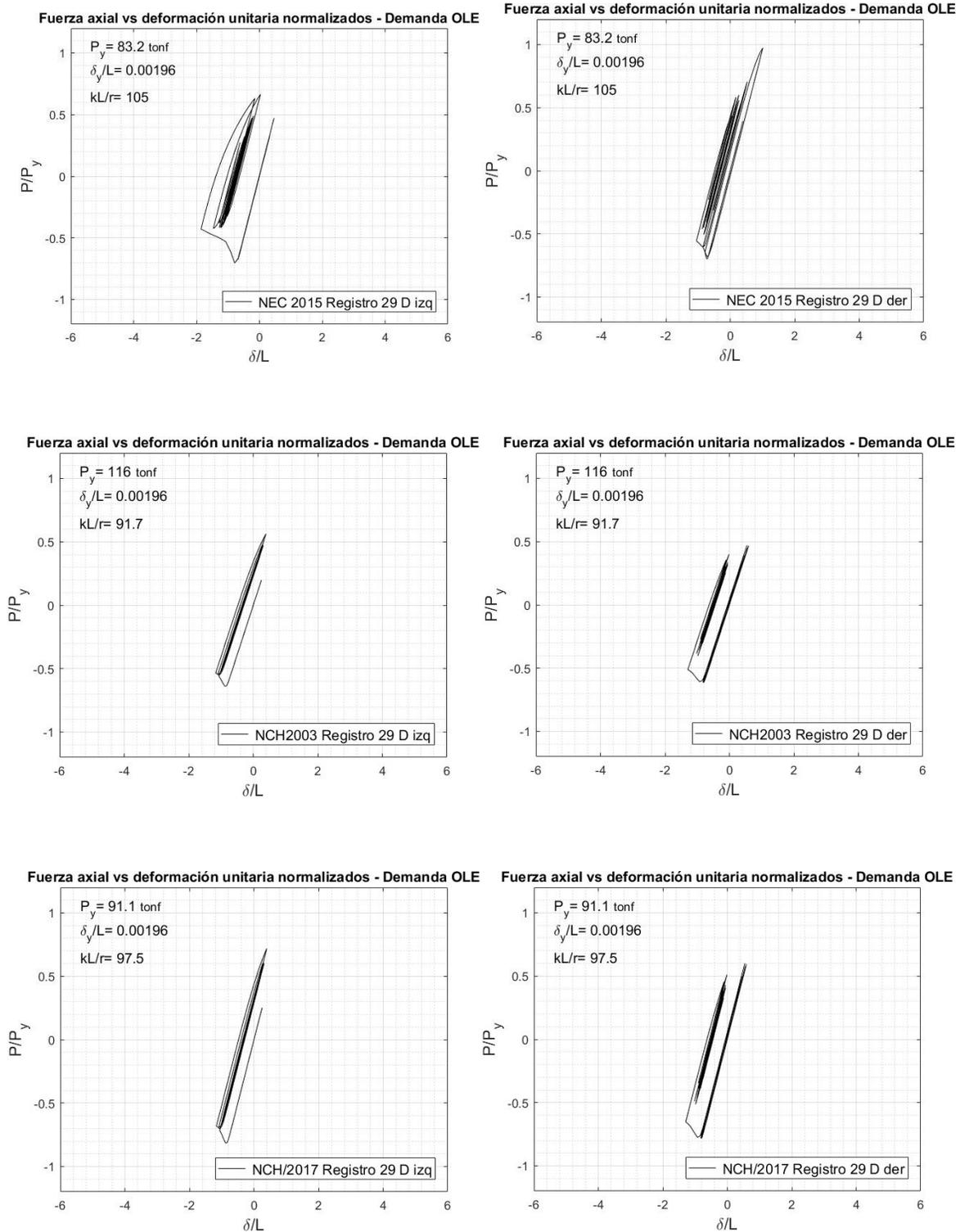




En el caso de demanda sísmica operacional, para el registro seleccionado en las figuras, se observa que el caso de la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) tiene incursión no lineal, a diferencia de lo que ocurre con las normativas chilenas en estudio en donde las diagonales se mantienen elásticas para el evento escogido

Si bien en el registro escogido para la comparación resultó que en la demanda operacional las diagonales diseñadas en base a las normativas chilenas no incursionaban en rango inelástico, debe indicarse que existen otros casos en donde la normativa chilena tanto del año 2003 como 2017 tienen una demanda inelástica leve localizada, como se presenta para el registro a continuación:

Figura X-40 Deformación axial versus Fuerza axial diagonales primer piso. Demanda OLE. Registro 29



Se puede verificar la mayor incursión inelástica, en los casos de demanda sísmica MCE_R y DLE, en la *NCh2369/2017* (INN, 2017) que en la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003).

Para la verificación de cumplimiento del ASCE7-16 (ASCE, 2016) se requiere determinar las elongaciones máximas, a tracción y compresión, de las diagonales. Para el presente estudio se analizan únicamente las diagonales del primer piso, ya que son las que incursionan mayoritariamente en rango inelástico.

En la Figura X-41, Figura X-42 y Figura X-43 se presentan las elongaciones máximas normalizadas, para cada demanda sísmica, de las diagonales del primer piso. En color verde se presentan los resultados de compresión, en color gris los de tracción, y en color azul y negro los valores medianos y medianos más sigma, respectivamente.

Figura X-41 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE_R

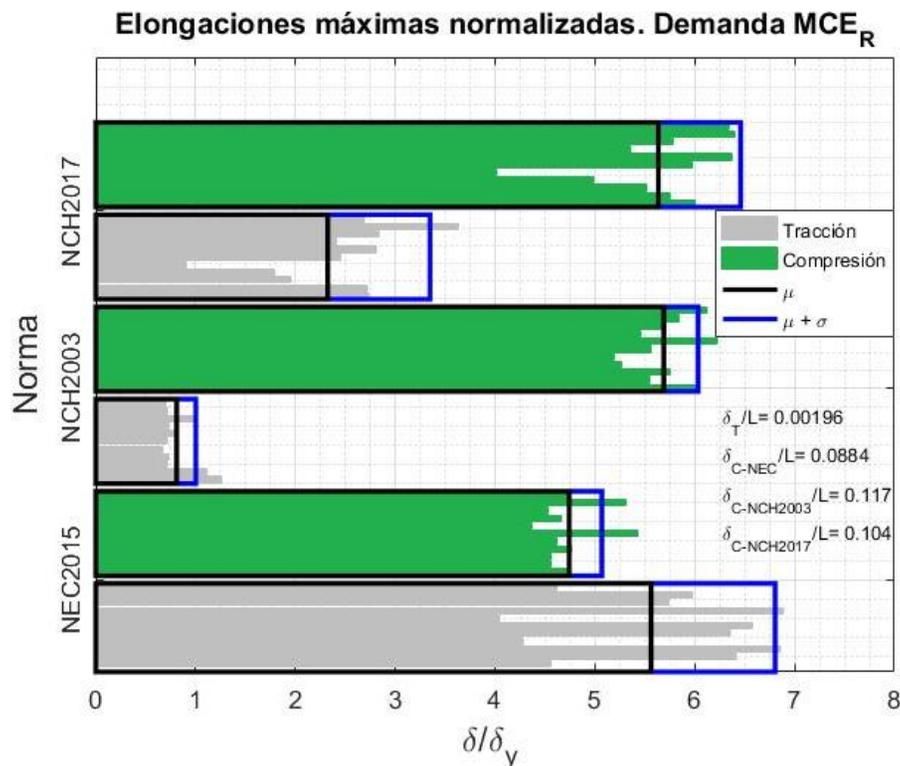


Figura X-42 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE

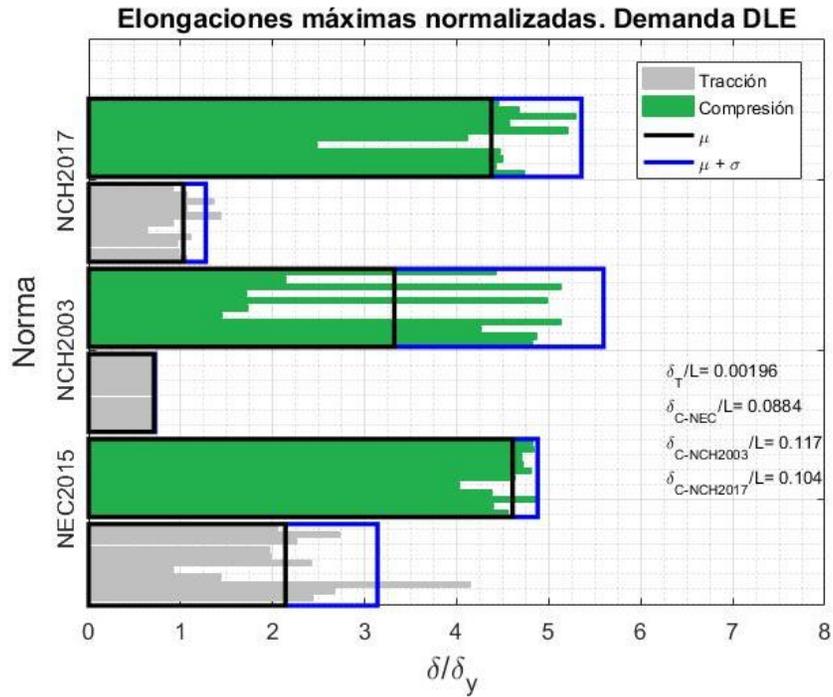
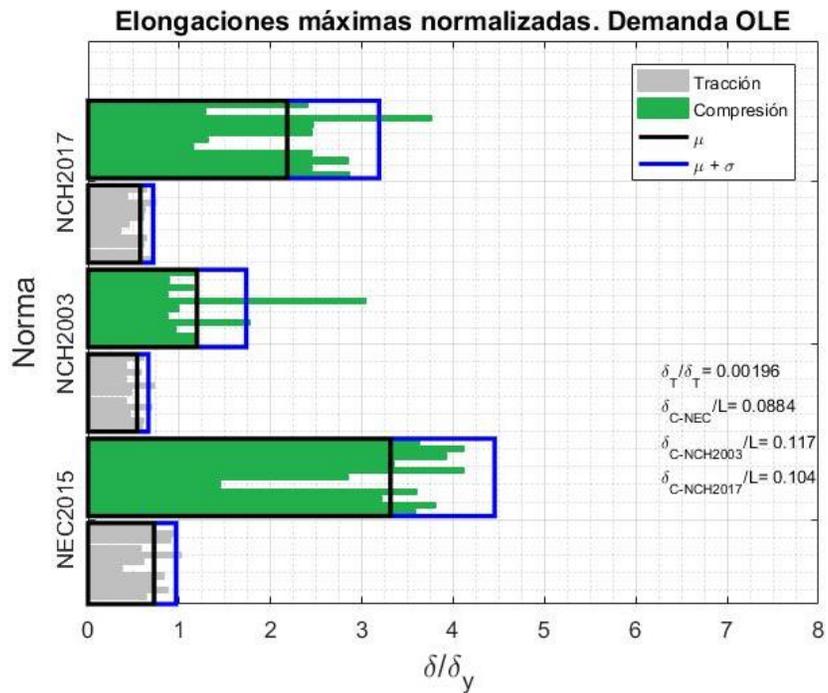


Figura X-43 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE



De la Figura X-41 se verifica que los diseños del marco, de acuerdo a las tres normativas en análisis, cumplen con el criterio de aceptación del ASCE41-17 (ASCE, 2017), por lo que dan cumplimiento a la condición local requerida en el ASCE7-16 (ASCE, 2016) anotado en la sección X.2.2 Criterio local del presente documento.

A nivel de desempeño se tiene que, para el caso de demanda sísmica MCE_R y de diseño DLE, el marco bajo las normativas ecuatoriana y chilenas tienen un 100% de los casos en el rango de seguridad de vida LS tanto para el caso de diagonales en tracción como en compresión.

Para la demanda operacional OLE, el 91% y 100% de los registros en la normativa ecuatoriana se mantienen en el rango de seguridad de vida LS para tracción y compresión, respectivamente. En la norma chilena del 2003 se tiene que el 45% y 100% de los registros se mantienen en el rango de seguridad de vida LS para tracción y compresión, respectivamente. En la norma chilena del 2017 se tiene que el 72% y 100% de los registros se mantienen en el rango de seguridad de vida LS para tracción y compresión, respectivamente.

Figura X-44 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE_R

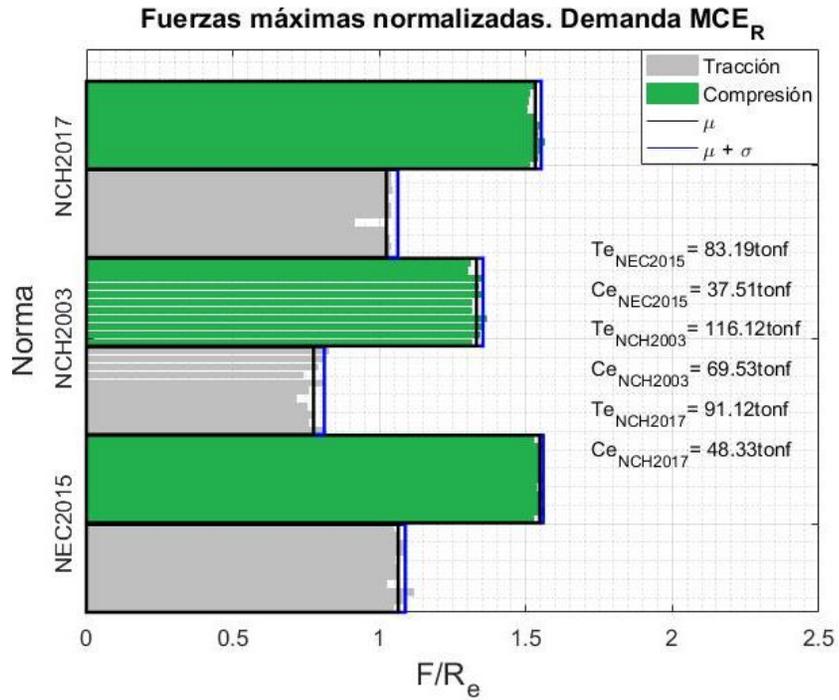


Figura X-45 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE

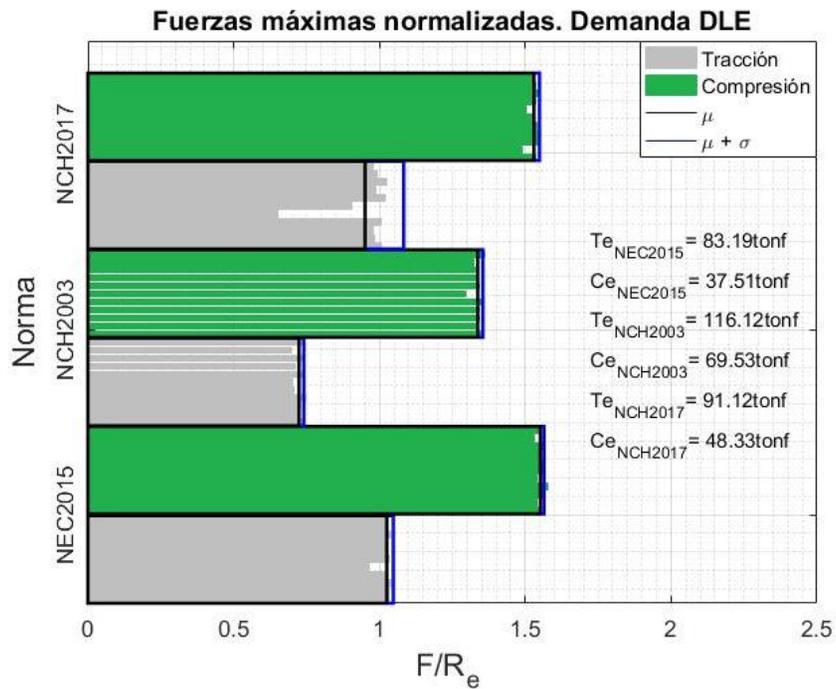
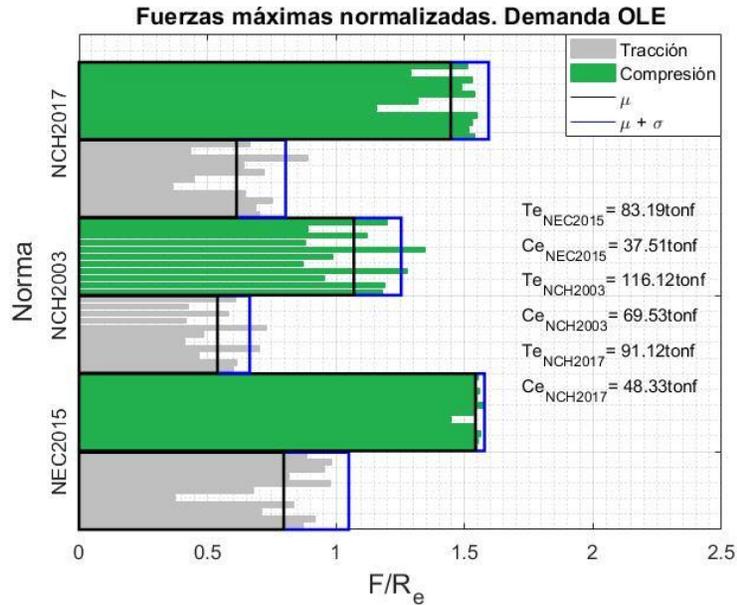


Figura X-46 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE



Respecto de las fuerzas de tracción se puede observar que para la norma del año 2003 no se llega a alcanzar la fuerza de fluencia para ninguno de los escenarios de demanda sísmica.

Se observa que los casos de la normativa ecuatoriana y la norma chilena del año 2017 tienen comportamiento similar para las demandas sísmicas MCE_R y DLE , tanto para tracción y compresión. Respecto del comportamiento en tracción los valores medios son aproximados al esperado, sin embargo en compresión se alcanzan valores superiores en un 50% al esperado.

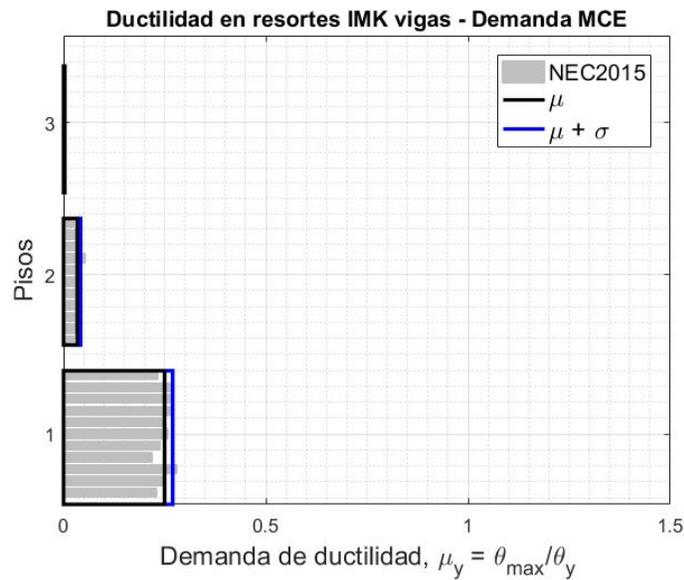
X.3.5 Ductilidad en vigas y columnas

A continuación, se presentan las demandas de ductilidad en las rótulas plásticas de las vigas y columnas del pórtico.

En la Figura X-47 a la Figura X-52 se muestran las demandas de ductilidad en las vigas y columnas para cada uno de los escenarios *NEC-SE2015* (MINDUB, 2015), *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017) y cada una de las demandas sísmicas MCE_R , DLE y OLE.

Es importante indicar que en cuanto a la figura correspondiente a la ductilidad local en las vigas bajo la normativa *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) y sometida a la demanda sísmica MCE_R no puede colocarse en la misma escala que el resto de normativas, dado que los valores obtenidos son, por mucho, superiores.

Figura X-47 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda MCE_R



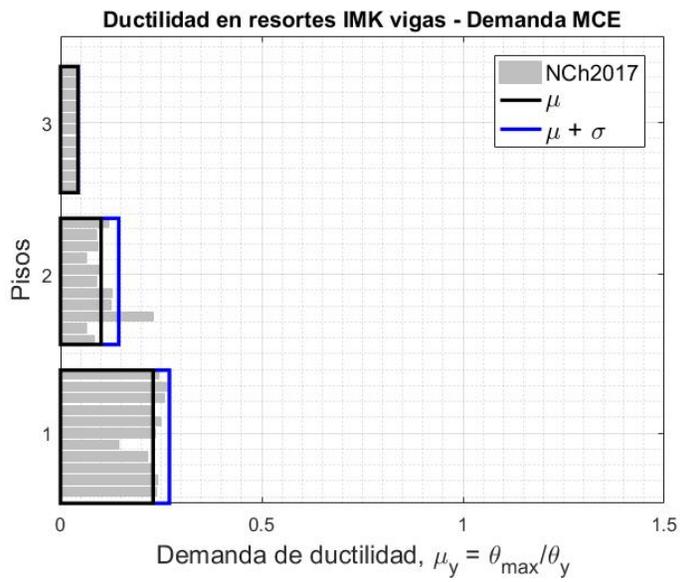
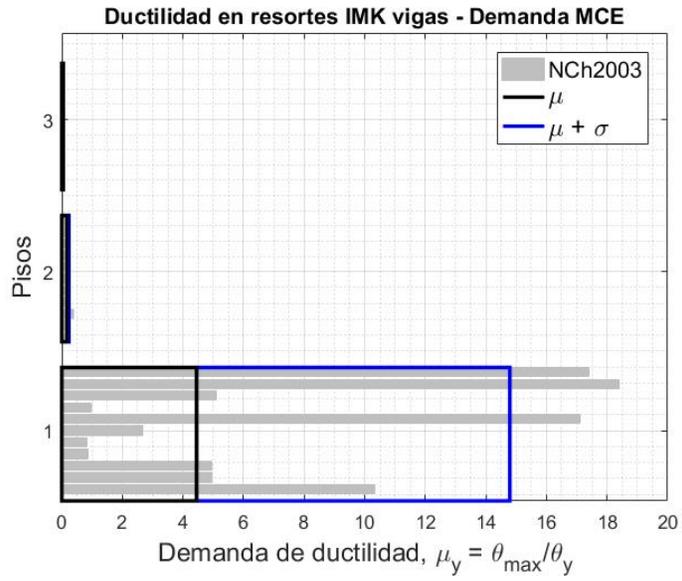
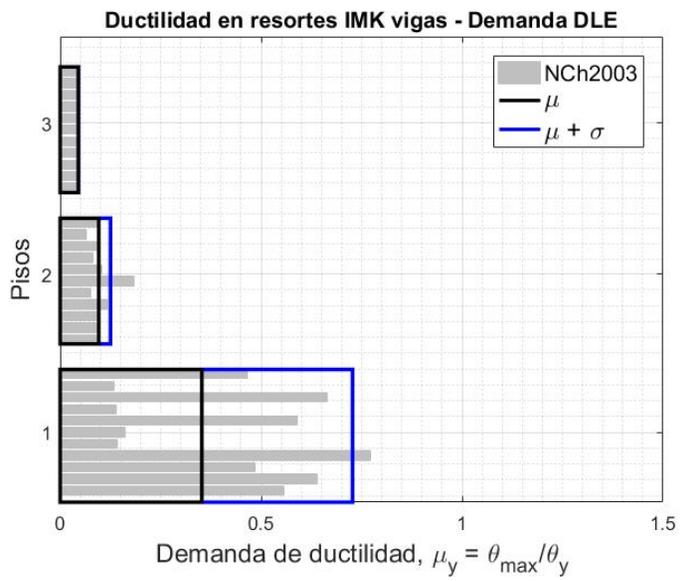
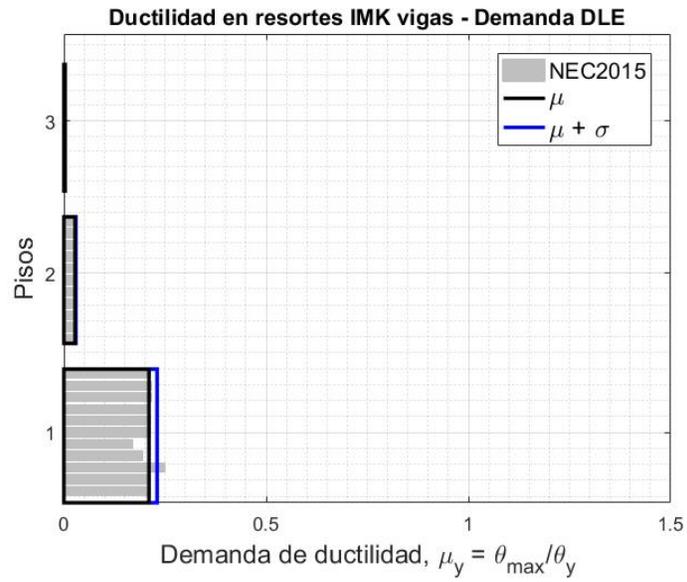


Figura X-48 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda DLE



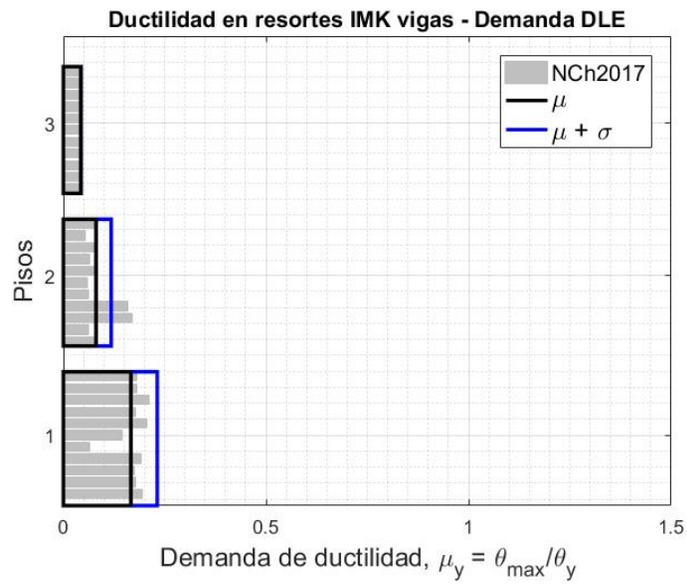
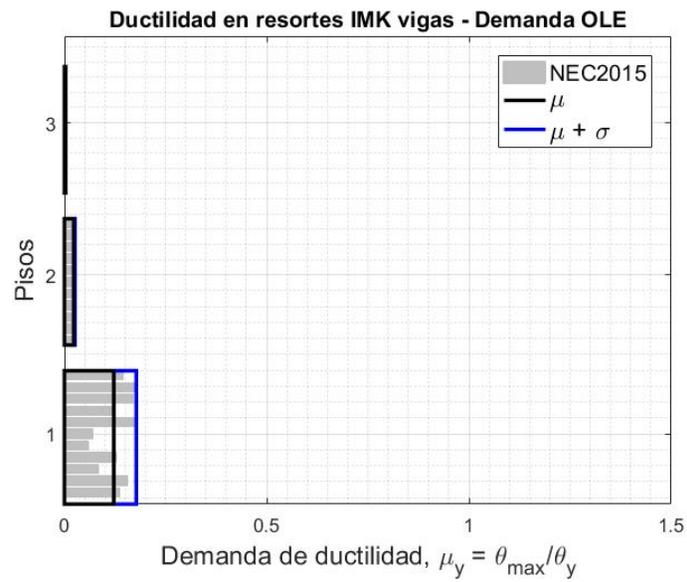
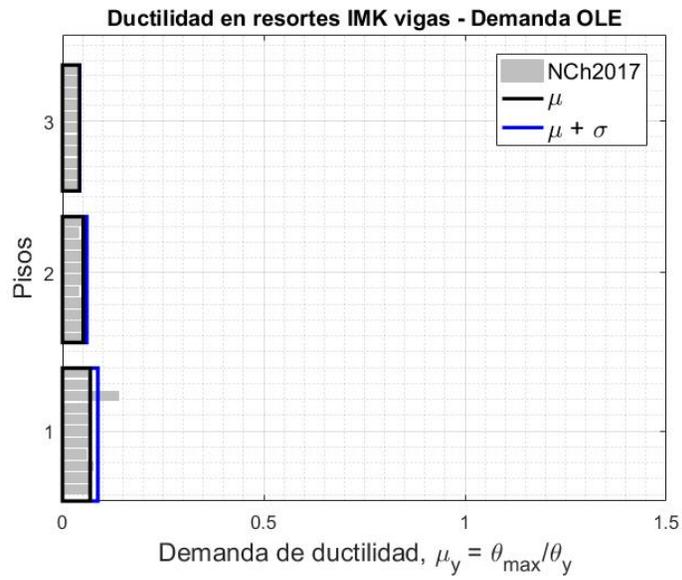
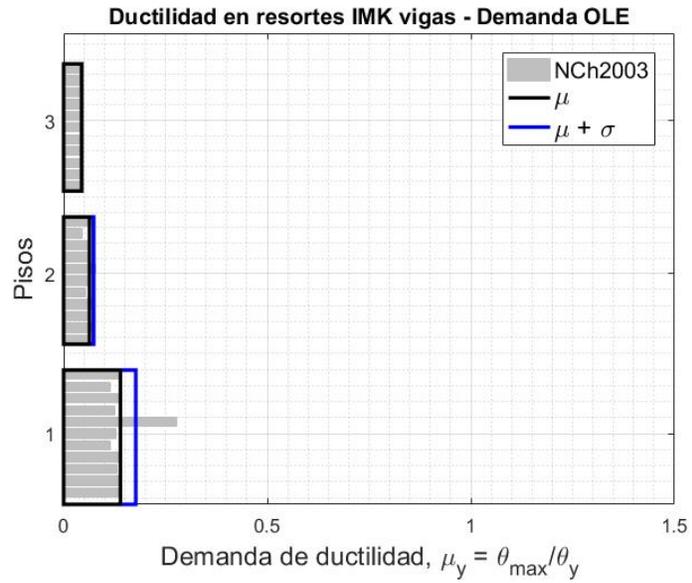


Figura X-49 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda OLE





Las demandas de ductilidad local en vigas se resumen en la Tabla X-14, Tabla X-15 y Tabla X-16.

Tabla X-14 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda MCE_R

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.003	0.003	0.003	0.049	0.047	0.048	0.045	0.044	0.044
$\mu_{y,2}$	0.053	0.034	0.042	0.396	0.170	0.233	0.230	0.101	0.145
$\mu_{y,1}$	0.281	0.250	0.270	18.39	4.451	14.79	0.265	0.230	0.271
μ_y^{\max}	0.281	0.250	0.270	18.39	4.451	14.79	0.265	0.230	0.271

Tabla X-15 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda DLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.003	0.003	0.003	0.047	0.045	0.046	0.044	0.043	0.044
$\mu_{y,2}$	0.032	0.028	0.030	0.184	0.096	0.125	0.169	0.081	0.118
$\mu_{y,1}$	0.250	0.210	0.231	0.771	0.352	0.727	0.213	0.167	0.232
μ_y^{\max}	0.250	0.210	0.231	0.771	0.352	0.727	0.213	0.167	0.232

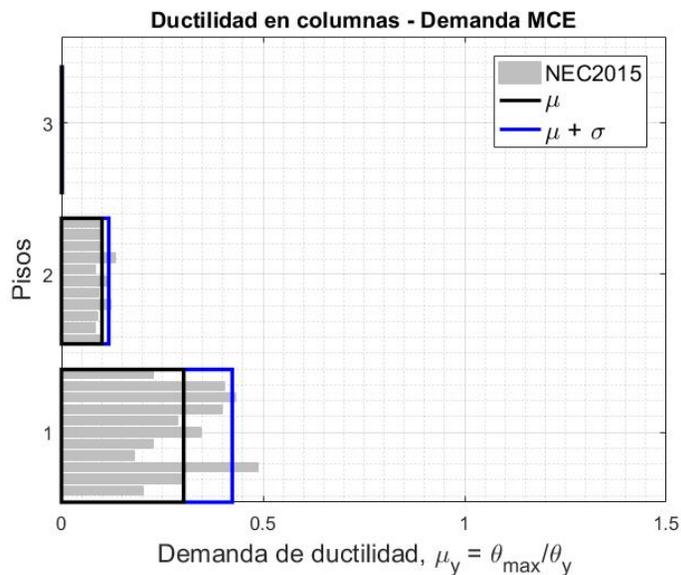
Tabla X-16 Demandas de ductilidad máximas locales de vigas en el pórtico. Demanda OLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.003	0.003	0.029	0.045	0.044	0.045	0.043	0.042	0.043
$\mu_{y,2}$	0.026	0.023	0.026	0.079	0.064	0.074	0.061	0.052	0.060
$\mu_{y,1}$	0.177	0.122	0.178	0.278	0.139	0.177	0.139	0.069	0.088
μ_y^{\max}	0.177	0.122	0.178	0.278	0.139	0.177	0.139	0.069	0.088

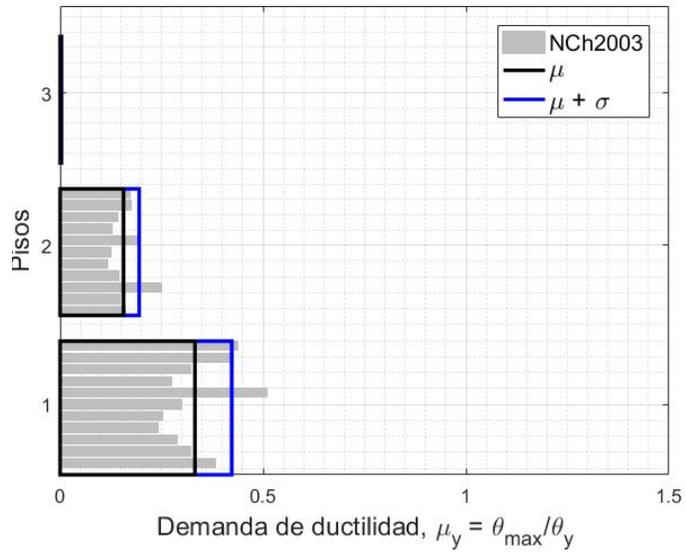
De la Figura X-47 y Tabla X-14 se puede verificar que para el caso de la *NCh2369.OF2003* (INN, 2003) se excede el valor recomendado de ductilidad local en las vigas especificado en la sección X.2.2 Criterio local del presente, por lo que este apartado no cumple, para la demanda sísmica MCE_R , con lo establecido en el capítulo 16 de la ASCE7-16 (ASCE, 2016), dado que existen 4 registros que corresponden a un 36% del total que sobrepasan el valor permitido de ductilidad de 6,4 veces la rotación de fluencia.

Para la norma ecuatoriana y la chilena del año 2017 se tiene que, para el 100% de los eventos analizados en el escenario MCE_R cumplen con el requerimiento de ductilidad permaneciendo dentro del rango de ocupación inmediata IO en todos los casos.

Figura X-50 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda MCE_R



Ductilidad en columnas - Demanda MCE



Ductilidad en columnas - Demanda MCE

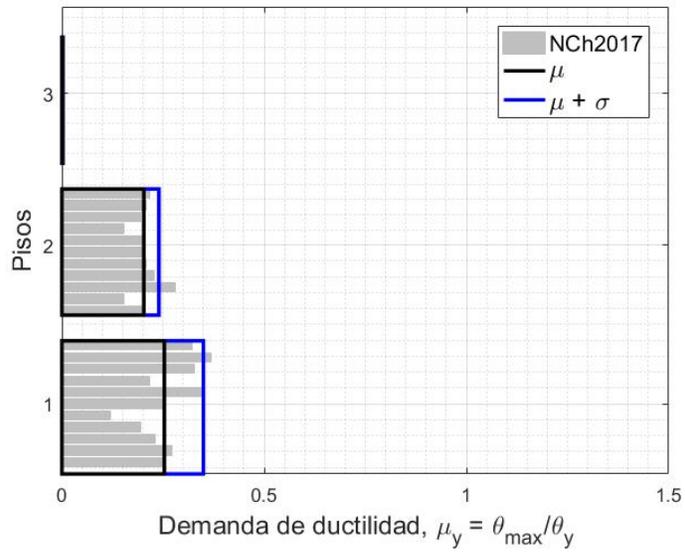
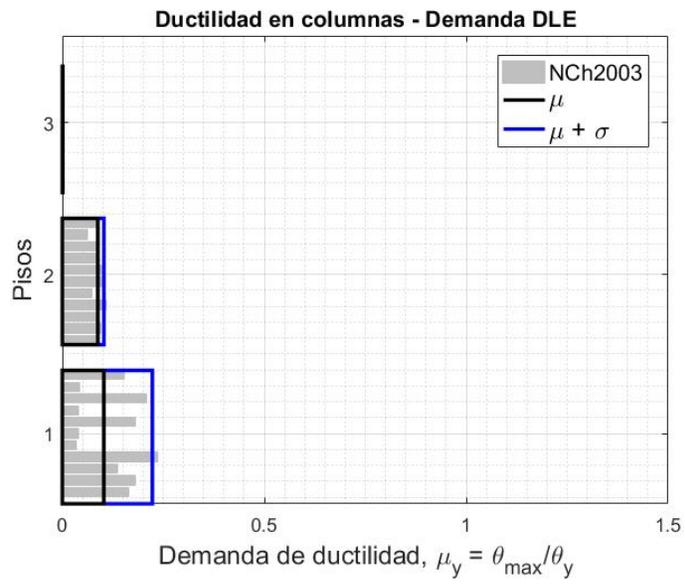
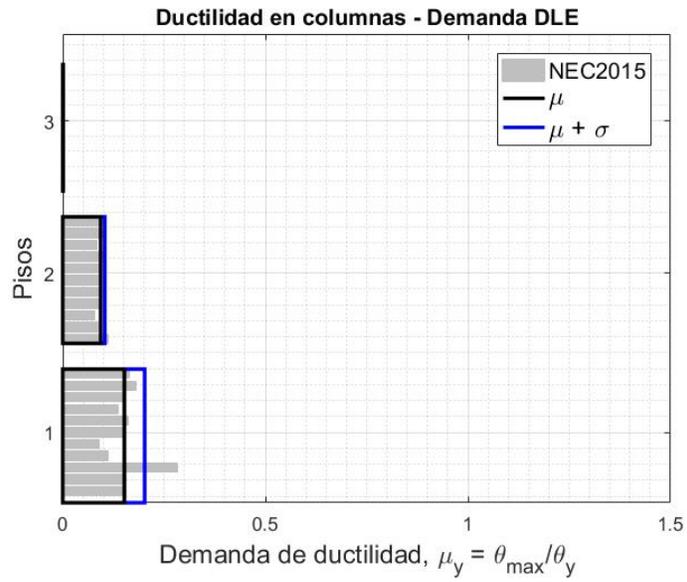


Figura X-51 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda DLE



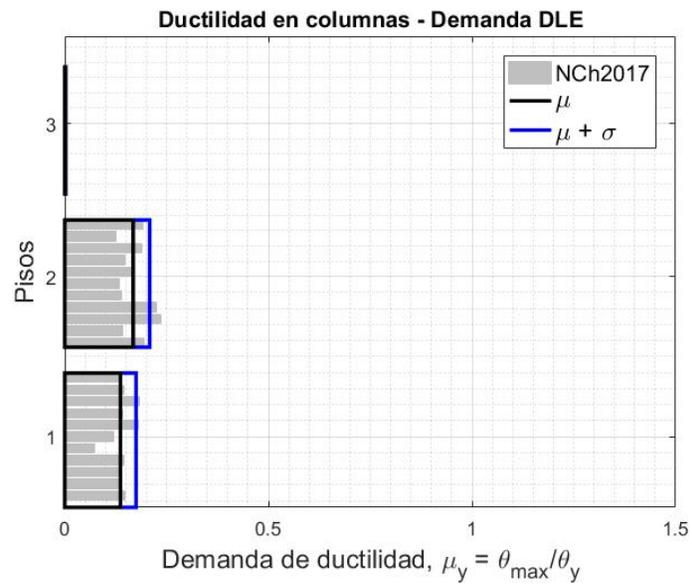
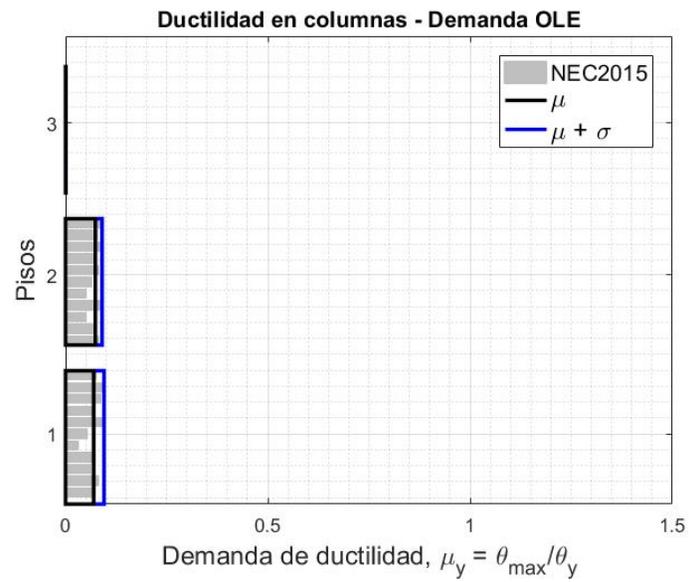
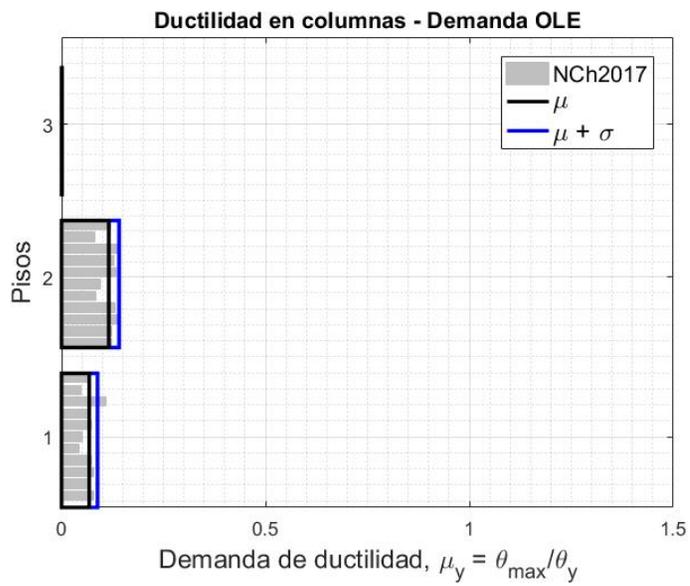
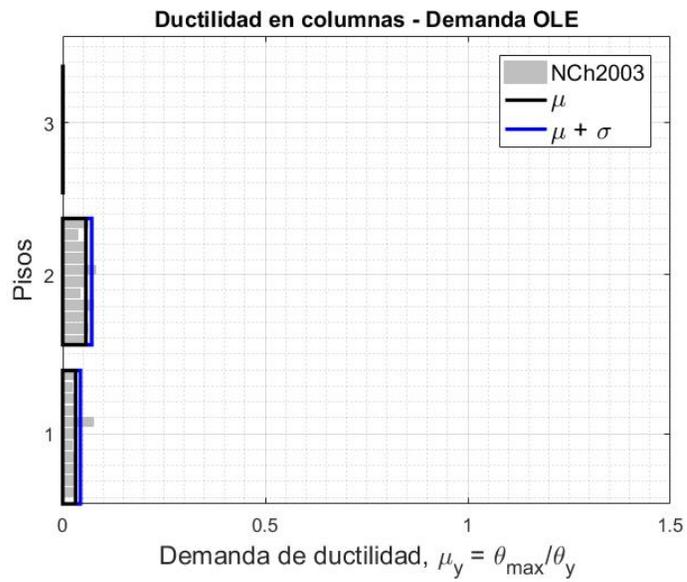


Figura X-52 Demanda de Ductilidad en columnas. Demanda OLE





Las demandas de ductilidad local en columnas se resumen en la Tabla X-17, Tabla X-18 y Tabla X-19.

Tabla X-17 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda MCE_R

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.002	0.001	0.002	0.005	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003
$\mu_{y,2}$	0.133	0.101	0.117	0.249	0.156	0.195	0.282	0.202	0.240
$\mu_{y,1}$	0.487	0.303	0.424	0.51	0.332	0.423	0.368	0.253	0.350
μ_y^{\max}	0.487	0.303	0.424	0.51	0.332	0.423	0.368	0.253	0.350

Tabla X-18 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda DLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002
$\mu_{y,2}$	0.113	0.094	0.104	0.109	0.088	0.103	0.235	0.168	0.209
$\mu_{y,1}$	0.283	0.152	0.202	0.236	0.103	0.223	0.184	0.137	0.175
μ_y^{\max}	0.283	0.152	0.202	0.236	0.103	0.223	0.235	0.168	0.209

Tabla X-19 Demandas de ductilidad máximas locales de columnas en el pórtico. Demanda OLE

Nivel	NEC2015			NCH2003			NCH/2017		
	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$	max	μ	$\mu + \sigma$
$\mu_{y,3}$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$\mu_{y,2}$	0.091	0.074	0.090	0.081	0.057	0.072	0.138	0.116	0.141
$\mu_{y,1}$	0.096	0.070	0.095	0.076	0.032	0.044	0.109	0.068	0.088
μ_y^{\max}	0.096	0.074	0.095	0.081	0.057	0.072	0.138	0.116	0.141

Todos los escenarios, para todas las demandas sísmicas probadas, cumplen con los valores de ductilidad recomendados. Se puede observar que ninguna de las columnas llega a la fluencia, particular que podía esperarse.

Finalmente, a continuación en la Tabla X-20, Tabla X-22 y Tabla X-24 se coloca un resumen con las respuestas máximas obtenidas en cada uno de los escenarios analizados

Tabla X-20 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda MCE_R

Demanda sísmica MCE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		10.52	4.85	4.89
Cortante basal (tonf)		142.86	224.02	177.80
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	2.50%	1.06%	1.12%
	Piso 2	0.22%	0.35%	0.35%
	Piso 3	0.10%	0.12%	0.13%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	10.01	4.26	4.49
	Piso 2	10.38	4.62	4.82
	Piso 3	10.52	4.85	4.89
Ductilidad en viga	Piso 1	0.28	18.39	0.27
	Piso 2	0.05	0.40	0.23
	Piso 3	0.00	0.05	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.49	0.51	0.37
	Piso 2	0.13	0.25	0.28
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.48%	0.73%	0.67%
	Piso 2	0.20%	0.36%	0.31%
	Piso 3	0.07%	0.07%	0.09%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	1.35%	0.25%	0.71%
	Piso 2	0.12%	0.13%	0.17%
	Piso 3	0.06%	0.06%	0.07%

Tabla X-21 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda MCE_R

Demanda sísmica MCE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		6.58	3.50	3.85
Cortante basal (tonf)		140.10	217.06	170.29
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	1.52%	0.75%	0.78%
	Piso 2	0.19%	0.21%	0.25%
	Piso 3	0.08%	0.09%	0.10%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	6.08	3.01	3.10
	Piso 2	6.45	3.30	3.63
	Piso 3	6.58	3.50	3.85
Ductilidad en viga	Piso 1	0.25	4.45	0.23
	Piso 2	0.03	0.17	0.10
	Piso 3	0.00	0.05	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.30	0.33	0.25
	Piso 2	0.10	0.16	0.20
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.42%	0.67%	0.59%
	Piso 2	0.15%	0.15%	0.21%
	Piso 3	0.06%	0.06%	0.07%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	1.09%	0.16%	0.46%
	Piso 2	0.10%	0.12%	0.13%
	Piso 3	0.05%	0.05%	0.05%

Tabla X-22 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda DLE

Demanda sísmica DLE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		6.33	2.95	3.26
Cortante basal (tonf)		142.00	218.50	176.67
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	1.42%	0.57%	0.57%
	Piso 2	0.20%	0.25%	0.30%
	Piso 3	0.09%	0.10%	0.12%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	5.68	2.29	2.27
	Piso 2	6.14	2.64	2.92
	Piso 3	6.33	2.95	3.26
Ductilidad en viga	Piso 1	0.25	0.77	0.21
	Piso 2	0.03	0.18	0.17
	Piso 3	0.00	0.05	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.28	0.24	0.18
	Piso 2	0.11	0.11	0.24
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.43%	0.60%	0.55%
	Piso 2	0.16%	0.23%	0.27%
	Piso 3	0.06%	0.06%	0.08%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	0.81%	0.14%	0.28%
	Piso 2	0.11%	0.13%	0.15%
	Piso 3	0.05%	0.05%	0.06%

Tabla X-23 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda DLE

Demanda sísmica DLE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		3.48	2.31	2.70
Cortante basal (tonf)		140.11	213.96	168.79
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	0.74%	0.36%	0.42%
	Piso 2	0.18%	0.20%	0.22%
	Piso 3	0.08%	0.09%	0.10%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	2.96	1.43	1.68
	Piso 2	3.32	2.01	2.38
	Piso 3	3.48	2.31	2.70
Ductilidad en viga	Piso 1	0.21	0.35	0.17
	Piso 2	0.03	0.10	0.08
	Piso 3	0.00	0.05	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.15	0.10	0.14
	Piso 2	0.09	0.09	0.17
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.41%	0.39%	0.46%
	Piso 2	0.13%	0.14%	0.17%
	Piso 3	0.06%	0.05%	0.06%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	0.42%	0.14%	0.20%
	Piso 2	0.10%	0.11%	0.12%
	Piso 3	0.04%	0.04%	0.05%

Tabla X-24 Resumen de valores máximos obtenidos para cada escenario. Demanda OLE

Demanda sísmica OLE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		2.64	2.22	2.29
Cortante basal (tonf)		136.91	215.92	170.06
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	0.44%	0.27%	0.34%
	Piso 2	0.18%	0.21%	0.20%
	Piso 3	0.09%	0.09%	0.09%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	1.77	1.07	1.36
	Piso 2	2.33	1.86	2.00
	Piso 3	2.64	2.22	2.29
Ductilidad en viga	Piso 1	0.18	0.28	0.14
	Piso 2	0.03	0.08	0.06
	Piso 3	0.00	0.04	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.10	0.08	0.11
	Piso 2	0.09	0.08	0.14
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.01%	0.01%	0.02%
	Piso 2	0.01%	0.01%	0.01%
	Piso 3	0.00%	0.00%	0.00%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	0.01%	0.01%	0.01%
	Piso 2	0.00%	0.00%	0.00%
	Piso 3	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla X-25 Resumen de valores medianos obtenidos para cada escenario. Demanda OLE

Demanda sísmica OLE				
Parámetros		NEC-SE 2015	NCh2369.Of2003	NCh2369/2017
Desplazamiento de techo (cm)		2.10	1.52	1.80
Cortante basal (tonf)		128.56	165.11	147.75
Deriva de entrepiso (%)	Piso 1	0.34%	0.18%	0.23%
	Piso 2	0.15%	0.15%	0.17%
	Piso 3	0.07%	0.06%	0.07%
Desplazamiento de piso (cm)	Piso 1	1.34	0.71	0.91
	Piso 2	1.86	1.28	1.54
	Piso 3	2.10	1.52	1.80
Ductilidad en viga	Piso 1	0.12	0.14	0.07
	Piso 2	0.02	0.06	0.05
	Piso 3	0.00	0.04	0.04
Ductilidad en columna	Piso 1	0.07	0.03	0.07
	Piso 2	0.07	0.06	0.12
	Piso 3	0.00	0.00	0.00
Deformación de la diagonal en compresión (%)	Piso 1	0.01%	0.01%	0.01%
	Piso 2	0.00%	0.00%	0.00%
	Piso 3	0.00%	0.00%	0.00%
Deformación de la diagonal en tensión (%)	Piso 1	0.01%	0.00%	0.00%
	Piso 2	0.00%	0.00%	0.00%
	Piso 3	0.00%	0.00%	0.00%

XI. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el diseño del pórtico mediante la aplicación de la *NCE-SE 2015* (MINDUB, 2015) son similares a lo que se obtiene mediante el uso de la *NCh2369/2017* (INN, 2017). Los resultados básicamente difieren respecto de las diagonales del segundo y tercer nivel, en donde la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) requiere una exigencia mayor respecto del límite de secciones compactas en perfiles tubulares lo que hace necesario colocar un perfil de mayor espesor y por ende los factores de utilización son menores comparados con los de la normativa chilena del año 2017.
- El espectro de diseño de la norma ecuatoriana y chilena se diferencian particularmente en cuanto a la forma posterior al plató en donde para la normativa chilena la caída es más rápida y pronunciada que en la norma ecuatoriana. Este particular incurre en que los factores de escalamiento para la selección de registros sísmicos para la verificación del capítulo 16 del ASCE7-16 (ASCE, 2016) no haya podido ser iguales para la norma ecuatoriana y la chilena. Si bien esto debe ratificarse con estudios más avanzados, el tener un espectro elástico objetivo, que dista de la forma espectral de registros reales, puede generar muchos problemas para análisis de desempeño en Ecuador si se considera el método de escalamiento espectral para la selección de registros.
- Se observa que, dada la cierta similitud que tienen los diseños con la *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y la *NCh2369/2017* (INN, 2017), las respuestas obtenidas son similares en cuanto a las demandas producidas por los registros severos medidos, debiendo indicar que dichas respuestas en relación a los desplazamientos horizontales de piso y derivas de entrepiso son superiores a los obtenidos en base al diseño realizado con la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003).

- En el escenario de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), se producen plastificaciones en la viga del primer nivel debido al desbalance en dicho elemento producto del pandeo de las diagonales, tanto con los registros originalmente medidos como en los utilizados para la comprobación del *ASCE7-16* (ASCE, 2016)

En el apartado de verificación del capítulo 16 del *ASCE7-2016* (ASCE, 2016) relacionado con este tema, se puede observar en la Figura X-50 que para de 4 eventos de 11 (36,36%) bajo la demanda sísmica MCE_R se supera el valor de ductilidad recomendado, por lo que dicha normativa no cumple con el capítulo 16 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016) debido a que se sobrepasa la ductilidad local de las vigas del primer nivel en un valor superior al 10% de los registros.

Los diseños realizados bajo la norma *NEC-SE 2015* (MINDUB, 2015) y *NCh2369/2017* (INN, 2017) cumplen con la comprobación del capítulo 16 del *ASCE7-16* (ASCE, 2016).

- En las columnas de los pórticos no se llegan a generar plastificaciones, quedando en el rango elástico todos estos elementos, particular que es esperado y deseable ya que se aspira que las diagonales sean las que tengan la incursión inelástica durante el evento sísmico para, de ser necesario, proceder con la intervención de las mismas posterior al sismo sin tener que intervenir el resto de la estructura.
- Bajo nivel de desempeño relacionado con el drift, en la demanda operacional OLE, todas las normativas se mantuvieron por debajo del 0,5% quedando de esta manera dentro del rango de ocupación inmediata IO, particular que es deseable especialmente desde el punto de vista industrial, concepto que es manejado en la normativa chilena.

Las respuestas de distorsiones de piso para la demanda de diseño DLE en ningún caso superaron el rango de seguridad de vida de 1,5% recomendado en el *FEMA356*.

En los marcos mediante la *NEC-SE 2015* y *NCh2369/2017* las diagonales presentaron demanda no lineal superior a lo obtenido en la *NCh2369.Of2003* donde dicha demanda se concentró en sectores no deseados como las vigas centrales.

Para niveles del sismo máximo considerado MCE_R un 18% de casos bajo la normativa ecuatoriana superan el límite de prevención de colapso recomendado en el *FEMA356* para el drift, contrario con las normativas chilenas donde el 100% de los casos se mantiene en el rango de seguridad de vida.

Las respuestas obtenidas de desplazamientos y drifts de entrepiso son mayores para la norma ecuatoriana en comparación con la chilena, particular que es coherente con el concepto y objetivo de desempeño de cada una de estas normativas, ya que si bien la norma *NCh2369.Of2003* (INN, 2003) manejada en Chile es para estructuras de tipo industrial en donde el objetivo primordial es que la estructura continúe funcionando de manera inmediata posterior al sismo, en Ecuador la normativa está más asociada con estructuras de tipo habitacional, en donde el objetivo primordial es la seguridad de vida y no el nivel operacional.

- En el escenario de la *NCh2369.Of2003* (INN, 2003), tanto para el análisis con los registros originalmente medidos así como los de la comprobación del *ASCE7-16* (ASCE, 2016), las diagonales no alcanzan la fluencia en tensión a diferencia de lo obtenido en la norma ecuatoriana y la chilena del año 2017, por lo que dichas diagonales no tuvieron aporte en términos de disipación.
- La modelación de la placa gusset fue realizada, como se indicó en el documento, mediante la utilización de un elemento de tipo *zeroLength* bilineal de *Opensees* (McKenna et al, 2006), pudiendo implementarse para futuros trabajos una comparativa con los resultados de modelar el comportamiento de la placa gusset mediante un resorte del tipo *IMK*, como el que se utilizó para las rótulas concentradas en las vigas del presente trabajo.

- La respuesta obtenida para desplazamientos y derivas de entrepiso, al comparar las normativas chilenas del 2003 y 2017, producen resultados con variaciones que no son considerablemente importantes. Este particular pudiera estar relacionado con las condiciones de empotramiento que se les da a las vigas al momento de definir en el modelo un *elemento* rígido al inicio y final de las mismas, porción rígida que está relacionada con la rigidez que la placa gusset le entrega en la longitud de conexión con la viga.

Análisis preliminares indican que la liberación de la restricción de momento en los extremos de las vigas que reciben a las diagonales de arriostramiento genera un impacto muy relevante en el comportamiento sísmico del diseño *NCh2369.Of2003* (INN, 2003). Se establece necesario como futuro tema de análisis evaluar el nivel de empotramiento real que generan los atiesadores en las vigas y planchas de conexión de arriostramientos en las vigas a conectar con las diagonales, para así realizar análisis de desempeño que mejoren el nivel de precisión de los resultados obtenidos en el presente.

XII. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC. (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC. (2016). *ANSI/AISC341*.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS ASCE. (2016). *ASCE7-16*.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS ASCE. (2017). *ASCE41-17*.

BOROSCHEK, R., y ASOCIADOS. (2017). *Relación entre Espectros de Respuesta Horizontal y Vertical de Registros Sísmicos Chilenos y Propuesta Espectro Sismo Vertical de Diseño*.

CHEN, L. y TIRCA, L. (2013). *Simulating the Seismic Response of Concentrically Braced Frames Using Physical Theory Brace Models. The Open Civil Engineering Journal*.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY FEMA. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors FEMA P695*.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY FEMA (2000). *Prestandar and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.

HSIAO, P.-C., LEHMAN, D., ROEDER, C. (2012). *Improved analytical model for special concentrically braced frames. Journal of Constructional Steel Research 73*.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN INN. (2003). *NCh2369.Of2003*.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN INN. (2017). *NCh2369/2017*.

KARAMANCI, E., y LIGNOS, D. (2014). *Computational Approach for Collapse Assessment of Concentrically Braced Frames in Seismic Regions. Journal of Structural Engineering.*

McKENNA et al. (2006). *Opensees.*

MEDALLA, M., LÓPEZ-GARCÍA, D., ZAREIAN, F., (2019) *Peculiarities of the Response of Steel Special Moment Frames to Megathrust Earthquakes.*

MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA MINDUB. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción.*

MUÑOZ, G. (2017). *Evaluación de anteproyecto NCH2369 - Aplicación marcos arriostrados.*

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY NIST. (2017). *Recommended Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Analysis in Support of Seismic Evaluation Retrofit, and Design.*

PEÑA, C., MEDALLA, M., LÓPEZ-GARCÍA, D., ILLANES, R., (2017). *NCh2369 vs ASCE7 - Strength vs Ductility? Industrial steel braced frames. NCh2369 vs ASCE7 - Strength vs Ductility? Industrial steel braced frames.*

XIII. APENDICE

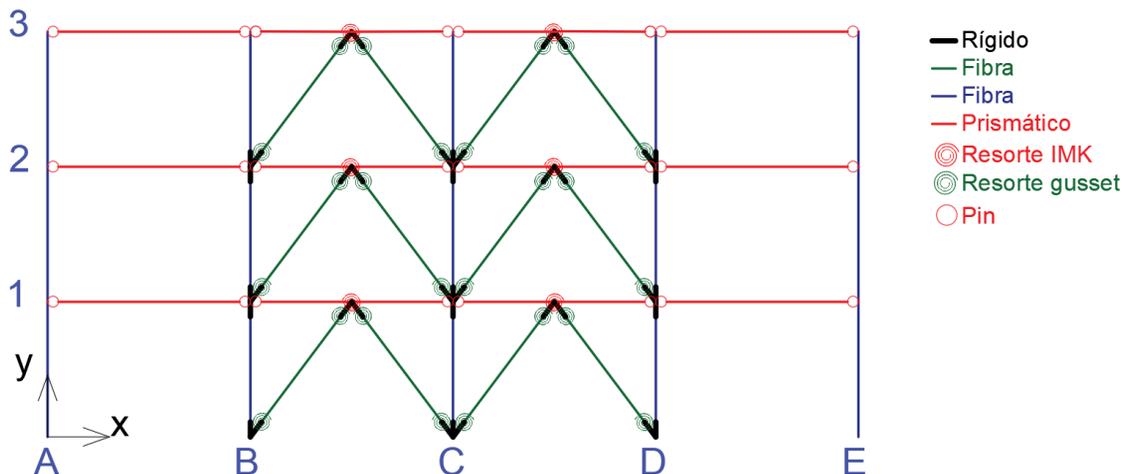
En el presente apéndice se resumen las respuestas obtenidas habiendo realizado el siguiente cambio al modelo:

- Eliminación de zonas rígidas en las vigas centrales.
- Eliminación de resortes IMK en los extremos de las vigas.
- Colocación de un único resorte IMK en el punto de llegada de las diagonales a la viga.
- Colocación de un pin en la unión de las vigas centrales con las columnas.

Debe indicarse que para la elaboración del apéndice se corrieron únicamente los registros para las normativas chilenas NCh2369.Of2003 (INN, 2003) y NCh2369/2017 (INN, 2017).

Los cambios indicados, para su comparación respecto con la Figura VIII-1 se resumen en la Figura XIII-1

Figura XIII-1 Modelo Opensees modificado



XIII.1 Desplazamiento de piso

Figura XIII-2 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica MCE_R

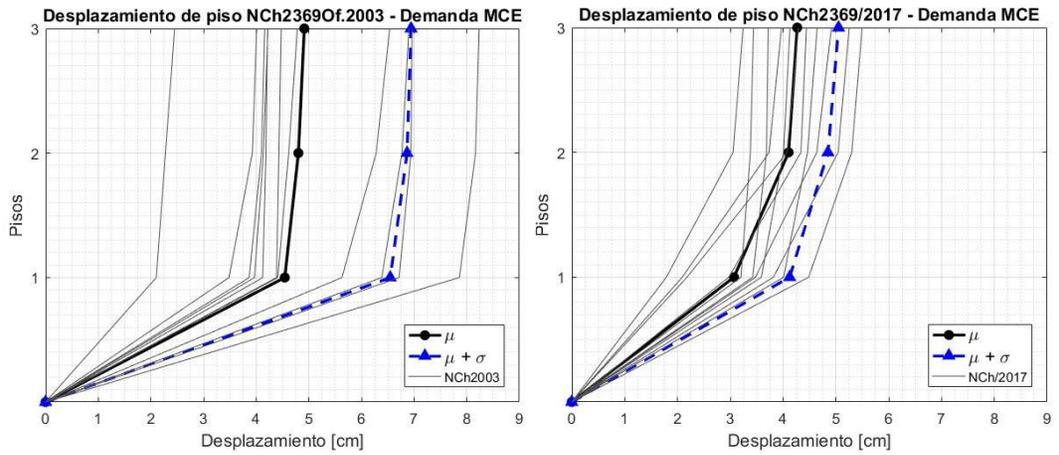


Figura XIII-3 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica DLE

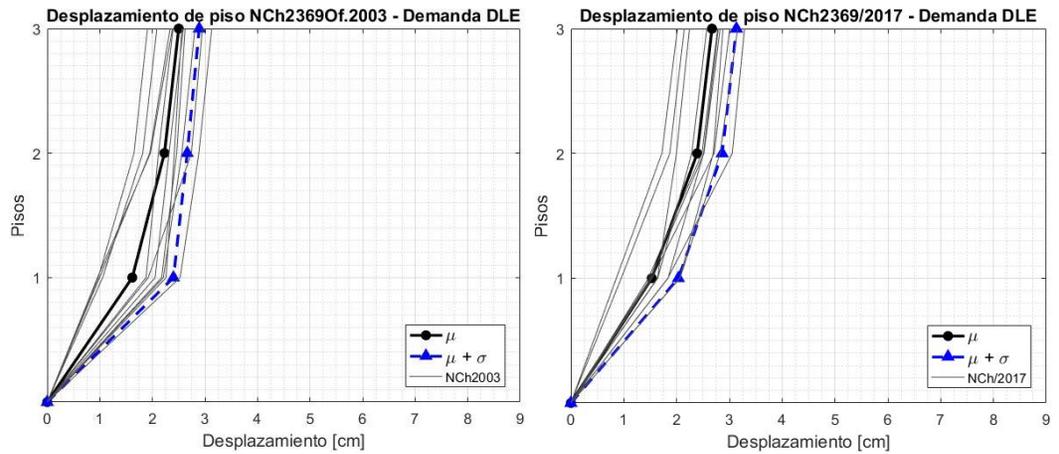


Figura XIII-4 Desplazamientos de piso Demanda Sísmica OLE

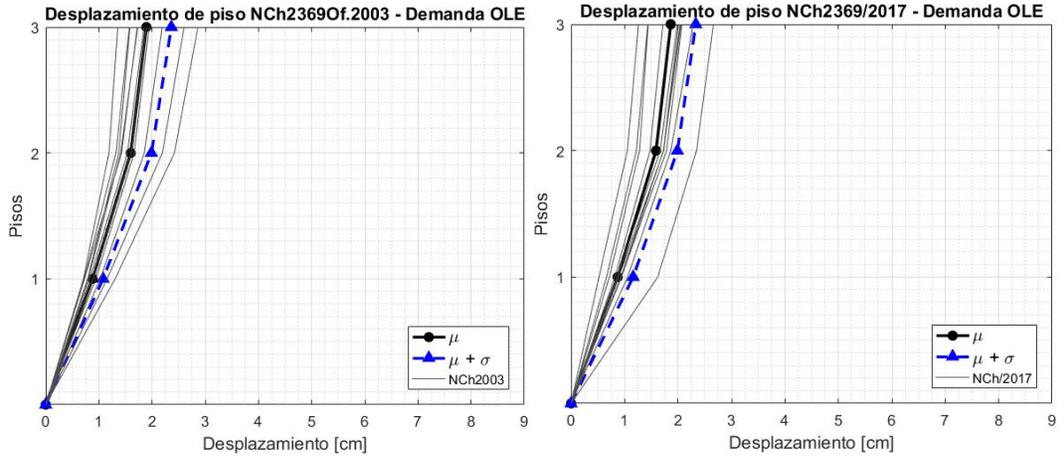


Figura XIII-5 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica MCE_R

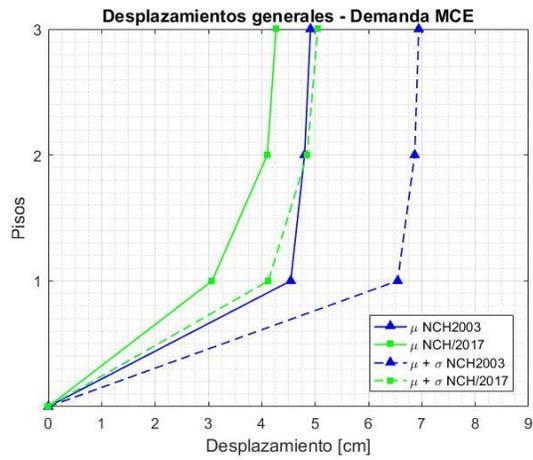


Figura XIII-6 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica DLE

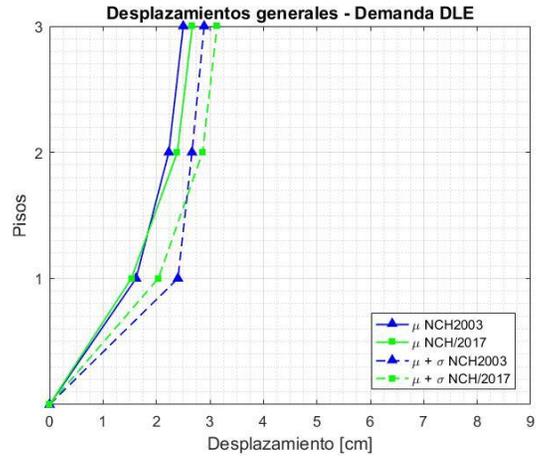
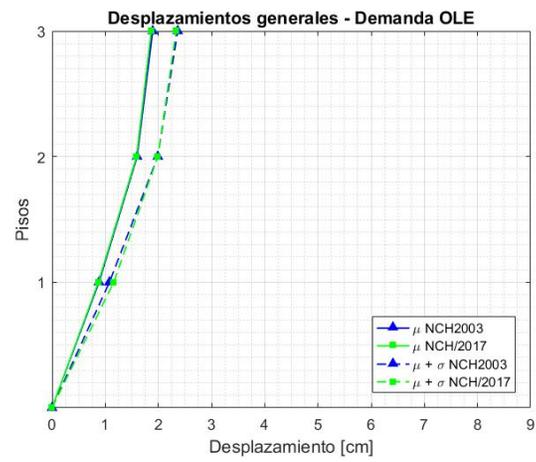


Figura XIII-7 Desplazamientos horizontales de piso comparativo Demanda Sísmica OLE



XIII.2 Drift de entropiso

Figura XIII-8 Drift de entropiso Demanda Sísmica MCE_R

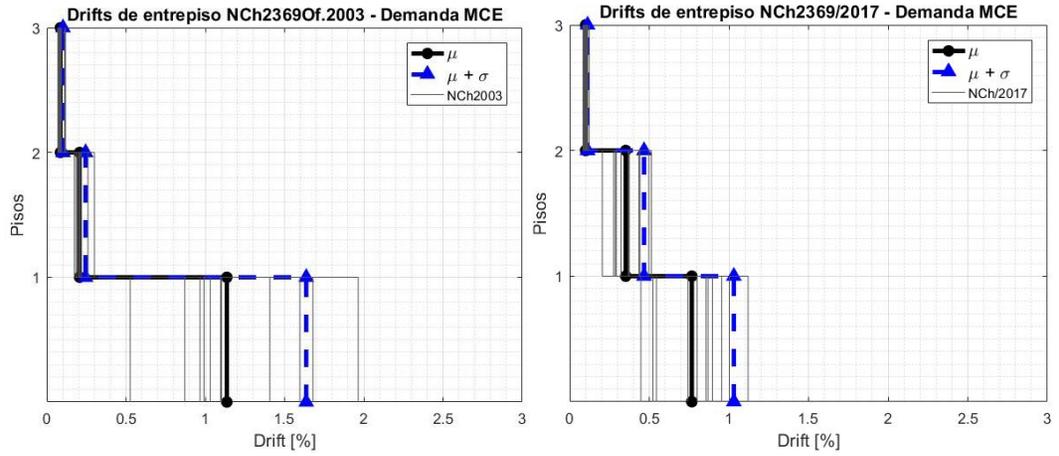


Figura XIII-9 Drift de entropiso Demanda Sísmica DLE

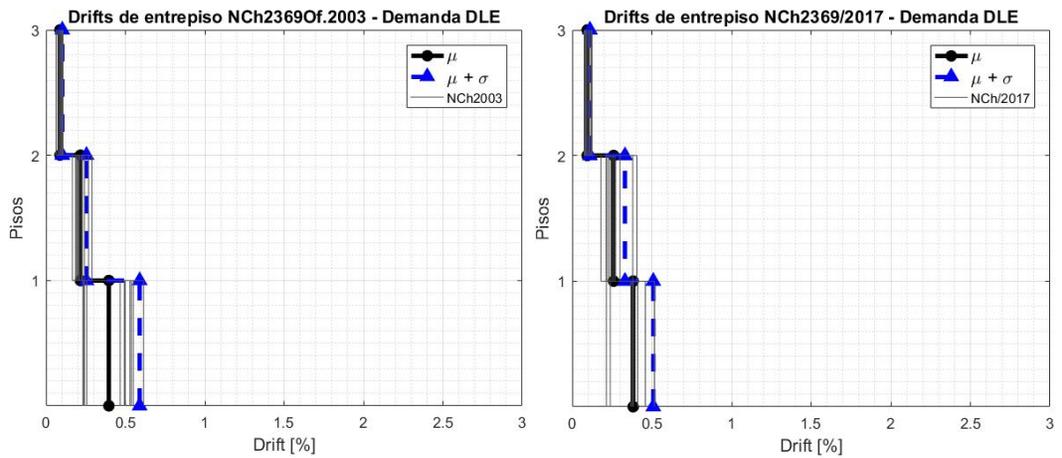


Figura XIII-10 Drift de entepiso Demanda Sísmica OLE

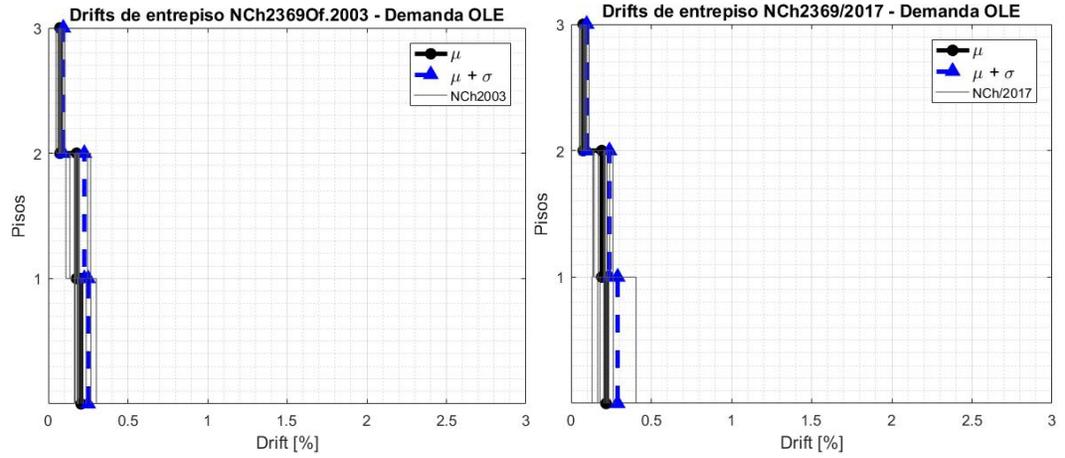


Figura XIII-11 Drifts de entepiso comparativo Demanda Sísmica MCE_R

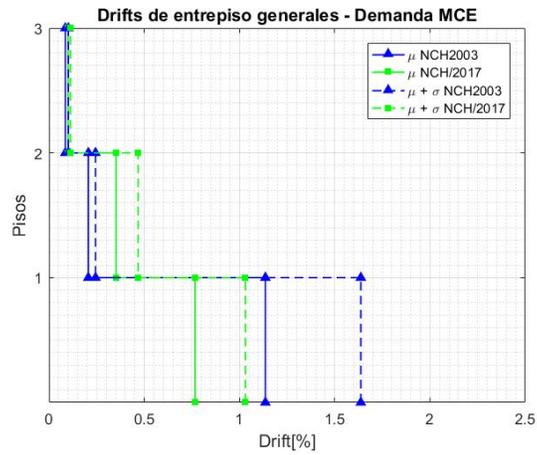


Figura XIII-12 Drifts de entrepiso comparativo Demanda Sísmica DLE

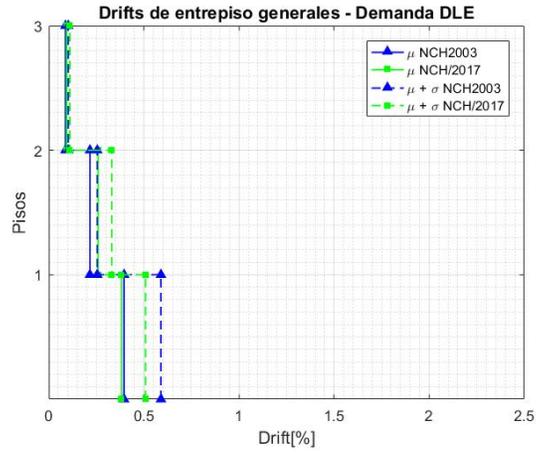


Figura XIII-13 Drifts de entrepiso comparativo Demanda Sísmica OLE

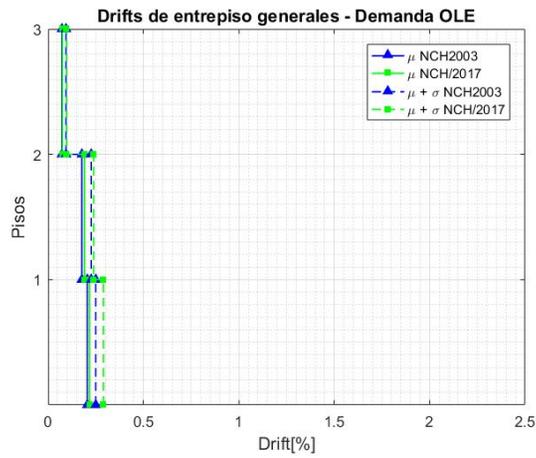


Figura XIII-14 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R

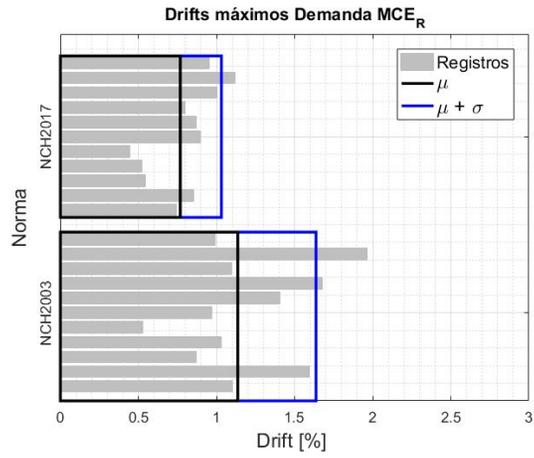


Figura XIII-15 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE

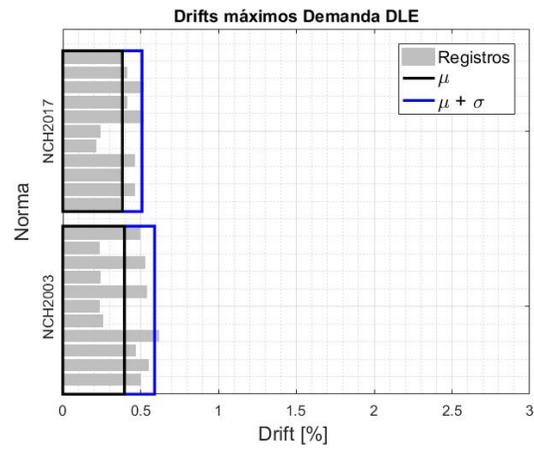


Figura XIII-16 Drifts máximos en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE

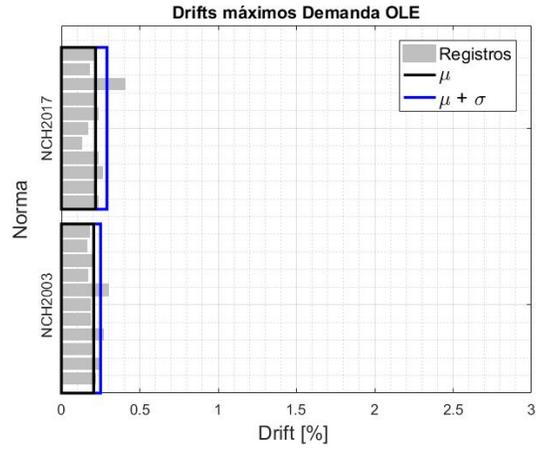


Figura XIII-17 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda MCE_R

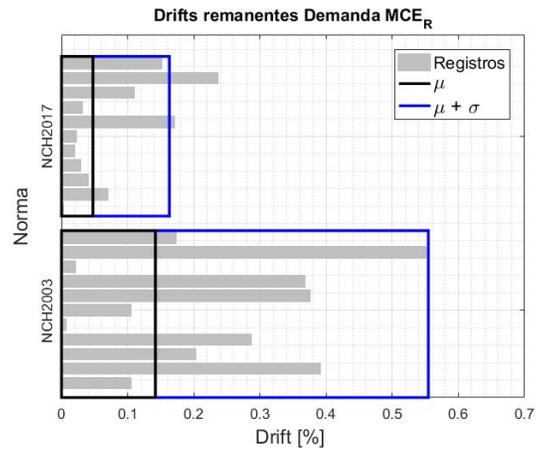


Figura XIII-18 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda DLE

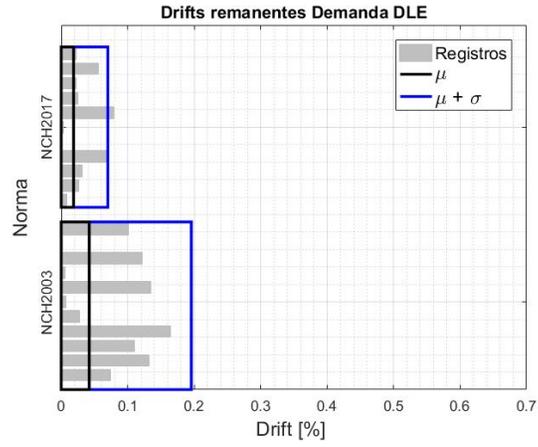
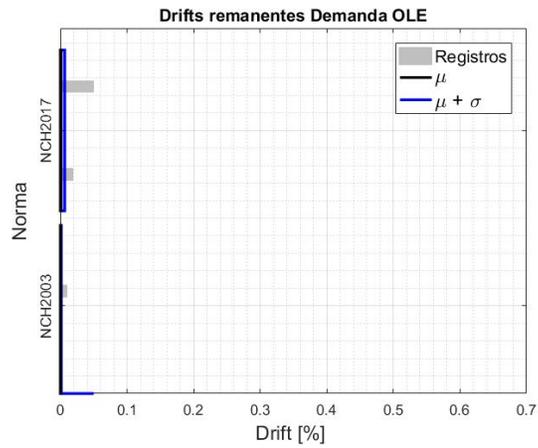


Figura XIII-19 Drifts remanentes en el primer nivel para cada norma. Demanda OLE



XIII.3 Cortante basal

Figura XIII-20 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica MCE_R

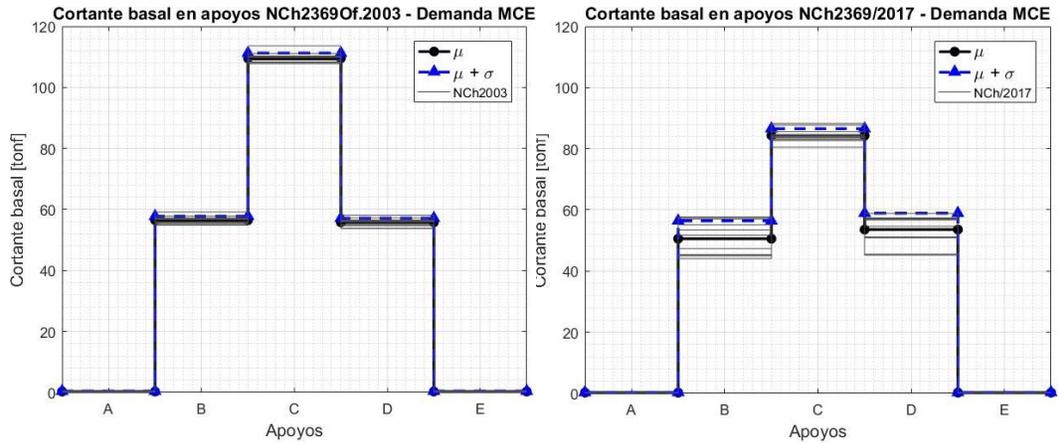


Figura XIII-21 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica DLE

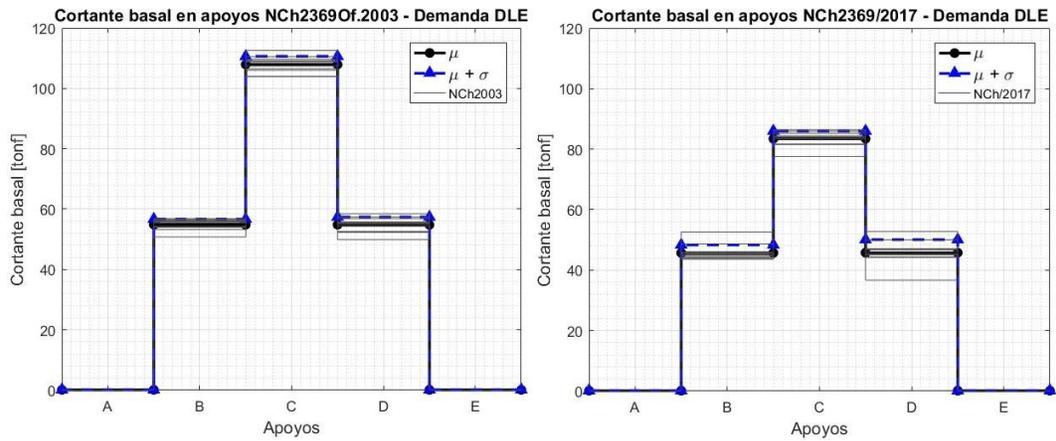


Figura XIII-22 Corte basal en apoyos del pórtico Demanda Sísmica OLE

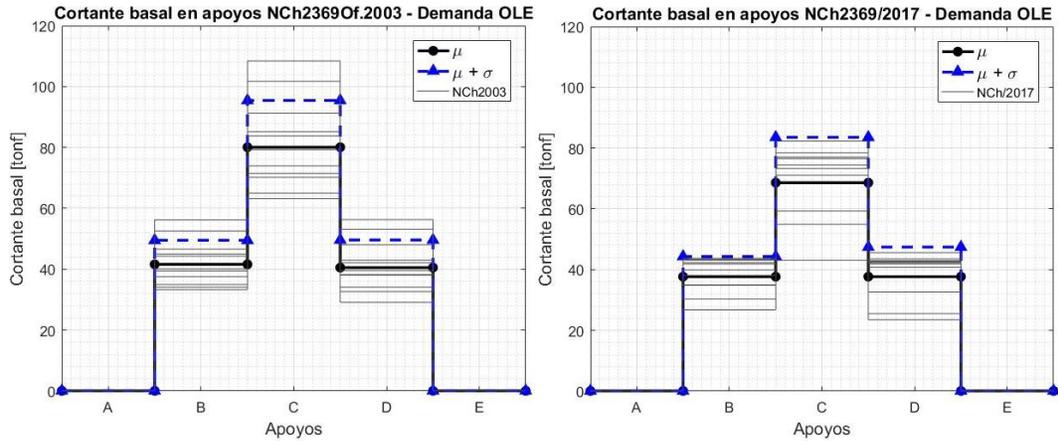


Figura XIII-23 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda MCE_R

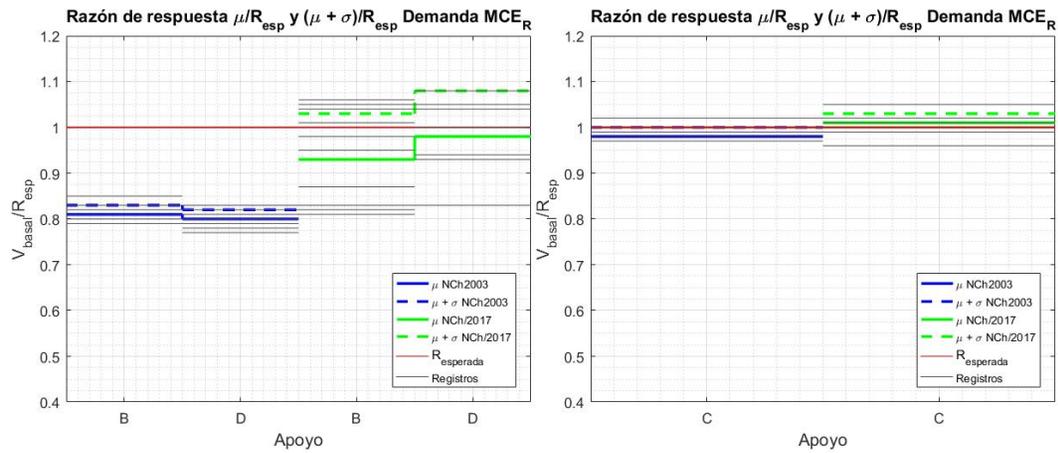


Figura XIII-24 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda DLE

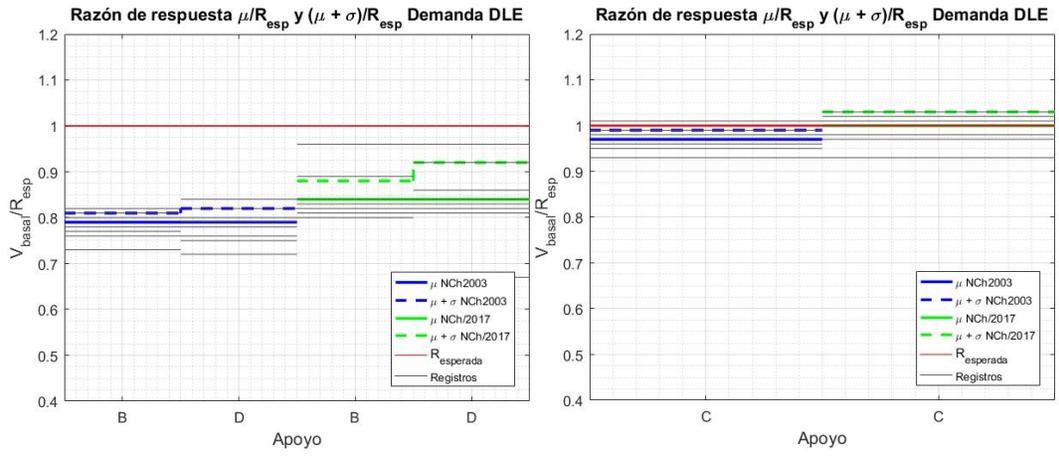
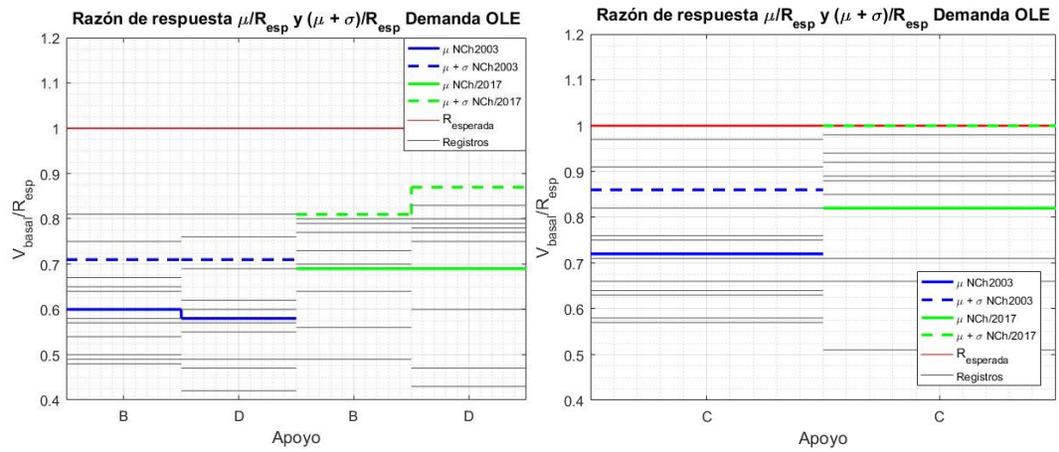


Figura XIII-25 Razón de respuesta μ y $\mu + \sigma$ respecto de esperada. Apoyos B, C y D Demanda OLE



XIII.4 Deformación axial y fuerza axial en diagonales

Figura XIII-26 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE_R

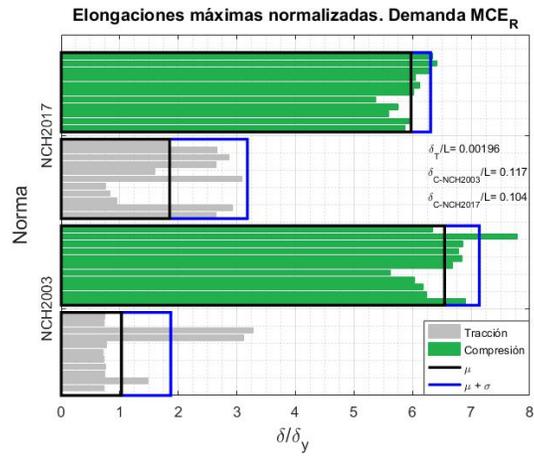


Figura XIII-27 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE

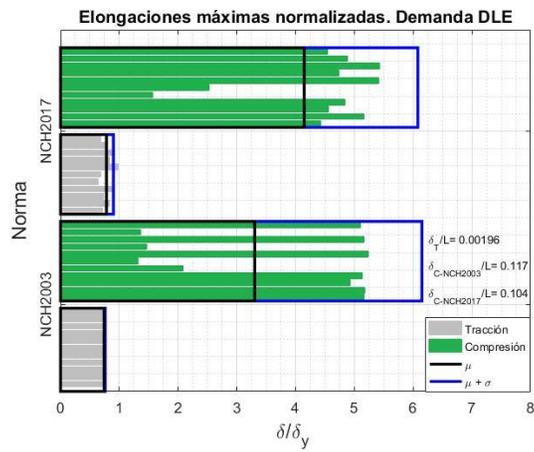


Figura XIII-28 Elongaciones máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE

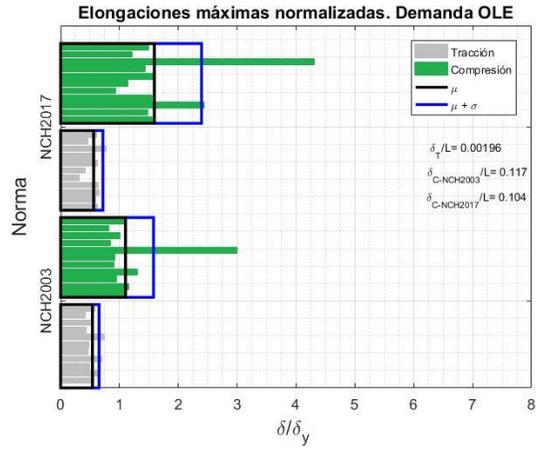


Figura XIII-29 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda MCE_R

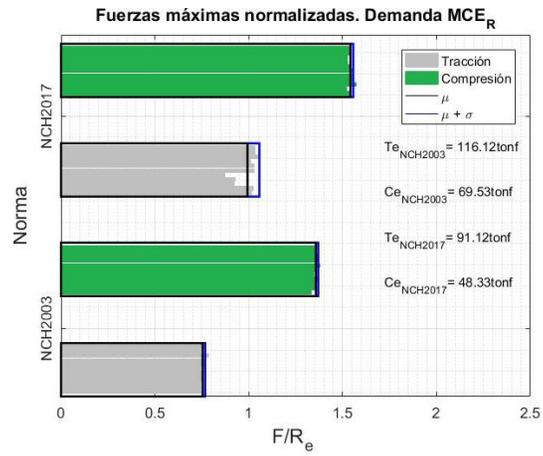


Figura XIII-30 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda DLE

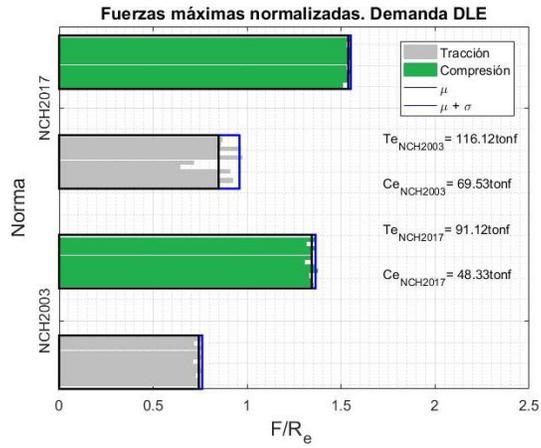
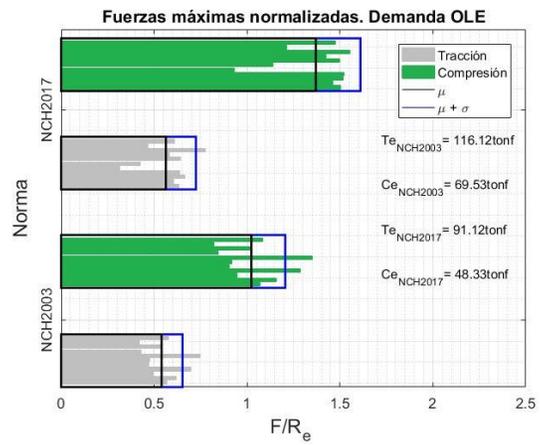


Figura XIII-31 Fuerzas máximas normalizadas diagonales 1er piso. Demanda OLE



XIII.5 Ductilidad en vigas

Figura XIII-32 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda MCE_R

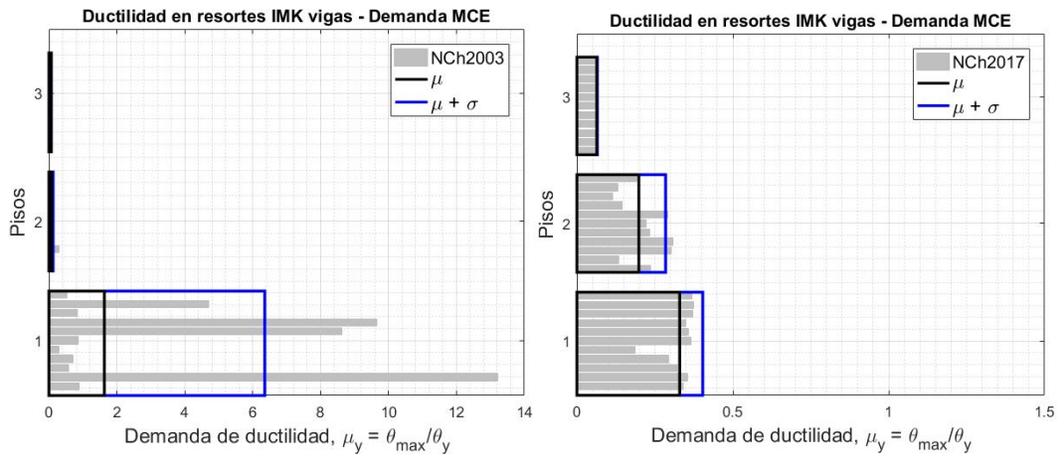


Figura XIII-33 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda DLE

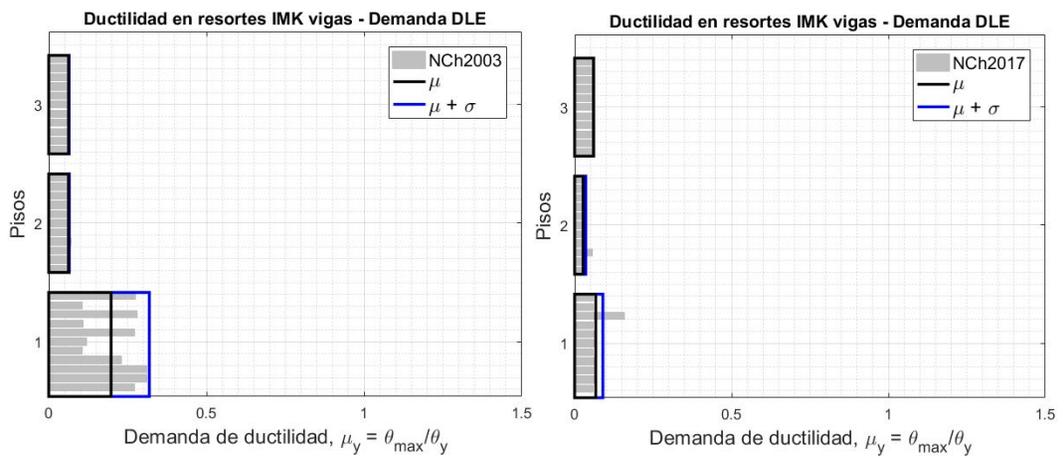


Figura XIII-34 Demanda de Ductilidad en vigas. Demanda OLE

