

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO CON AISLADORES
TRIPLE PÉNDULO FRICCIÓN EN EL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA
RED ASISTENCIAL CAJAMARCA – ESSALUD**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bach. JHÉRSÓN ANTHONY RABANAL ZELADA

ASESOR:

Ing. MARCOS MENDOZA LINARES

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

DNI: 74931930

Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL

2. **Asesor:** Ing. MARCOS MENDOZA LINARES

Facultad: INGENIERÍA

3. **Grado académico o título profesional**

☐ Bachiller

☒ Título profesional

☐ Segunda especialidad

☐ Maestro

☐ Doctor

4. **Tipo de Investigación:**

☒ Tesis

☐ Trabajo de investigación

☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico

5. **Título de Trabajo de Investigación:**

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO
FRICCIÓN EN EL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA – ESSALUD**

6. **Fecha de evaluación:** 07/10/2025

7. **Software antiplagio:**

☒ TURNITIN

☐ URKUND (OURIGINAL) (*)

8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 8%

9. **Código Documento:** oid:::3117:509361420

10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 07/10/2025



FIRMA DEL ASESOR

Ing. MARCOS MENDOZA LINARES

DNI: 26612819



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 07/10/2025 23:08:48-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *ANÁLISIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO FRICCIÓN EN EL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA - ESSALUD*

ASESOR : *Ing. Marcos Mendoza Linares.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0704-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 27 de octubre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintinueve días del mes de octubre de 2025**, siendo las ocho horas (08:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Vocal : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Secretario : M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *ANÁLISIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO FRICCIÓN EN EL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA - ESSALUD*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil **JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA**, asesorado por el Ing. Marcos Mendoza Linares, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 06 PTS.

EVALUACIÓN PÚBLICA : 12 PTS.

EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS. DIECIOCHO (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de DIECIOCHO (18) acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las NUEVE horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Presidente


Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal


M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.
Secretario


Ing. Marcos Mendoza Linares
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres, Wilder Rabanal y Gladis
Zelada, por ser los pilares fundamentales
en mi vida y en mi formación profesional
y haberme hecho la persona que hoy en
día soy.

AGRADECIMIENTO

A DIOS, por ser guía y fortaleza para lograr
alcanzar con éxito esta meta trazada.

A mis padres, por brindarme su apoyo
incondicional e incesable para poder culminar
esta etapa de mi formación profesional.

Al asesor, Ing. Marcos Mendoza Linares, por
el apoyo y disposición en el desarrollo de la
presente investigación.

Un agradecimiento especial al PhD, Ing.
Civil. Nelson M. Lafontaine por su
asesoramiento externo durante el desarrollo
de esta tesis, brindándome su amplio
conocimiento profesional en el tema
investigado.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRAC	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Formulación de hipótesis.....	2
1.4. Justificación de la investigación.....	2
1.4.1. Justificación teórico-científica.....	2
1.4.2. Justificación práctica	2
1.5. Alcance de la investigación.....	3
1.6. Delimitación de la investigación.....	3
1.7. Limitaciones.....	3
1.8. Objetivos	3
1.8.1. Objetivo general	3
1.8.2. Objetivos específicos.....	3
1.9. Descripción de contenido de los capítulos.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes teóricos.....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales	5
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	6
2.2. Bases teóricas.....	7
2.2.1. Aislamiento sísmico	7
2.2.1.1. Tipos de aisladores sísmicos	8
2.2.2. Sistema de péndulo friccional.....	9
2.2.2.1. Tipos de aisladores de péndulo fricción	10
2.2.3. Aislador triple péndulo fricción (FPT)	11
2.2.3.1. Relación Fuerza – Desplazamiento.....	12

2.2.3.2. Fases de movimiento del aislador triple péndulo fricción (FPT).....	13
2.2.4. Análisis sísmico	26
2.2.4.1. Fuerza de restauración lateral	27
2.2.4.2. Métodos de análisis sísmicos	27
2.2.4.2.1. Análisis estático: Método de fuerza lateral equivalente (ELF)	28
2.2.4.2.2. Análisis dinámico: Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)	34
2.3. Definición de términos básicos	35
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1. Ubicación del objeto de estudio.....	36
3.1.1. Ubicación política	36
3.1.2. Ubicación geográfica	37
3.2. Tiempo o época de investigación.....	37
3.3. Materiales y equipos	37
3.4. Metodología	37
3.4.1. Enfoque de investigación	37
3.4.2. Tipo de investigación.....	37
3.4.3. Nivel de investigación.....	37
3.4.4. Diseño de la investigación	38
3.4.5. Método de investigación.....	38
3.5. Población.....	38
3.6. Muestra de estudio	38
3.7. Unidad de análisis	38
3.8. Técnicas e instrumentos de investigación	38
3.9. Procedimiento.....	39
3.9.1. Descripción de la edificación	40
3.9.2. Cargas de la edificación	41
3.9.3. Peligro sísmico	43
3.9.4. Mecanismo del aislador triple péndulo fricción (FPT)	46
3.9.4.1. Materiales del aislador FPT	46
3.9.4.2. Propiedades geométricas y mecánicas del aislador FPT	46
3.9.4.3. Relación fuerza cortante normalizada – Desplazamiento del aislador FPT	48
3.9.5. Análisis sísmico	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Evolución del aislador de péndulo fricción	10
Tabla 2 Ecuaciones de fuerzas y desplazamientos del aislador FPT “Sarlis y Constantinou”	25
Tabla 3 Ubicación geográfica del Hospital Especializado en la Red Asistencial Cajamarca – EsSalud ...	37
Tabla 4 Pesos específicos para la carga muerta	42
Tabla 5 Cargas de tabiquería fija de muros internos y muros cortina	42
Tabla 6 Pesos específicos para la carga viva	42
Tabla 7 Cargas de la edificación por niveles.....	43
Tabla 8 Factores sísmicos para la aceleración espectral.....	44
Tabla 9 Aceleración espectral para DE y MCE_R	45
Tabla 10 Propiedades geométricas del aislador FPT.....	46
Tabla 11 Propiedades mecánicas del aislador FPT	47
Tabla 12 Radio de curvatura efectivo	47
Tabla 13 Relación de fuerza cortante normalizada – Desplazamiento del aislador FPT	48
Tabla 14 Amortiguamiento efectivo y coeficiente de amortiguamiento efectivo.....	52
Tabla 15 Propiedades del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT	56
Tabla 16 Registros sísmicos para el análisis dinámico con el método NLRHA	58
Tabla 17 Propiedades geométricas para la fricción del aislador FPT en ETABS	63
Tabla 18 Propiedades lineales del aislador FTP en ETABS	66
Tabla 19 Propiedades no lineales del aislador FPT para ETABS – Límite inferior (Lower Bound)	67
Tabla 20 Propiedades no lineales del aislador FPT para ETABS – Límite superior (Upper Bound).....	67
Tabla 21 Resultados de desplazamientos máximos D_M – Límite inferior (Lower Bound)	79
Tabla 22 Resultados de desplazamientos máximos D_M – Límite superior (Upper Bound).....	79
Tabla 23 Resultados de fuerzas cortantes V_b – Límite inferior (Lower Bound).....	80
Tabla 24 Resultados de fuerzas cortantes V_b – Límite superior (Upper Bound)	80
Tabla 25 Resultados de fuerzas cortantes V_{st} – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB).....	81
Tabla 26 Combinaciones con efectos de cargas sísmicas de los 10 aisladores seleccionados.....	82
Tabla 27 Fuerza cortante con el método de análisis ELF	87
Tabla 28 Límites de fuerza Cortante V_s con el método de análisis ELF	88
Tabla 29 Distribución de fuerza cortante – Límite superior (Upper Bound)	88
Tabla 30 Derivas máximas de la edificación con el MCE_R – Límite superior (Upper Bound).....	89
Tabla 31 Requerimiento de acuerdo a la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031 – Método ELF ..	90
Tabla 32 Desplazamientos totales máximos con el método de análisis NLRHA	92
Tabla 33 Desplazamientos totales máximos (D_{TM}) – Métodos de análisis ELF y NLRHA.....	92
Tabla 34 Fuerzas cortantes (V_b) – Métodos de análisis ELF y NLRHA.....	93
Tabla 35 Fuerzas cortantes (V_s) – Métodos de análisis ELF y NLRHA	94
Tabla 36 Derivas máximas de la edificación con el método de análisis NLRHA – Límite superior (UB)...	94
Tabla 37 Combinaciones con efectos de cargas sísmicas de los 184 aisladores.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Respuesta sísmica de un edificio sin aislación y con aislación sísmica.....	7
Figura 2 Cambio de período en edificaciones con aislamiento sísmico	8
Figura 3 Aisladores elastoméricos (parte superior) y aisladores pendulares (parte inferior).....	9
Figura 4 Funcionamiento de un péndulo convencional y de fricción con deslizador.....	9
Figura 5 Componentes del aislador triple péndulo fricción	11
Figura 6 Fuerza – Desplazamiento del rodamiento del aislador triple péndulo fricción	12
Figura 7 Fase I del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre	14
Figura 8 Curva de histéresis de la fase I del aislador FPT	15
Figura 9 Fase II del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre	16
Figura 10 Curva de histéresis de la fase II del aislador FPT	17
Figura 11 Fase III del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre	18
Figura 12 Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT.....	19
Figura 13 Fase IV del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre	21
Figura 14 Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT	22
Figura 15 Fase V del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre	23
Figura 16 Curva de histéresis de la fase V del aislador FPT	24
Figura 17 Idealización a) Sistema de múltiples grados de libertad b) Sistema de 1 grado de libertad.....	26
Figura 18 Elementos de una edificación aislada (Interfaz de Aislación)	26
Figura 19 Desplazamiento de Diseño, Máximo y Total Máximo.....	31
Figura 20 Ubicación política del Hospital Especializado en la Red Asistencial Cajamarca – EsSalud.....	36
Figura 21 Diagrama de flujo del análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT.....	39
Figura 22 Vista en 3D del hospital especializado en la red asistencial de Cajamarca – EsSalud.....	40
Figura 23 Vista en 3D del interfaz del sistema de aislamiento sísmico.....	41
Figura 24 Aceleración espectral para DE y MCE_R	44
Figura 25 Modelo AISL-T1 (FPT8833/16-12R/12-7)	46
Figura 26 Histéresis para el desplazamiento $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite inferior (LB).....	48
Figura 27 Histéresis para el desplazamiento $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite superior (UB).....	49
Figura 28 Histéresis para el desplazamiento D_M y curva $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite inferior (LB).....	50
Figura 29 Histéresis para el desplazamiento D_M y curva $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite superior (UB).....	54
Figura 30 Histéresis de límite inferior (LB) y límite superior (UB) del aislador FPT – Método ELF	57
Figura 31 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Lima 1966.....	59
Figura 32 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Ancash 1970	59
Figura 33 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Lima 1974	60
Figura 34 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Moquegua 2001	60
Figura 35 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Pisco 2007	60
Figura 36 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Coquimbo 2015.....	61
Figura 37 Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Manabí 2016.....	61

Figura 38 Nomenclatura del aislador FPT en ETABS.....	62
Figura 39 Propiedades geométricas para fricción del aislador FPT en ETABS.....	63
Figura 40 Propiedades para la dirección U_1 en ETABS – Límite inferior (Lower Bound)	68
Figura 41 Propiedades para la dirección U_2 y U_3 en ETABS – Límite inferior (Lower Bound)	69
Figura 42 Ubicación de aisladores FPT seleccionados para el análisis dinámico (NLRHA).....	70
Figura 43 Comportamiento histerético del aislador K5295 – Límite inferior (Lower Bound).....	71
Figura 44 Comportamiento histerético del aislador K5295 – Límite superior (Upper Bound).....	72
Figura 45 Comportamiento histerético del aislador K5196 – Límite inferior (Lower Bound)	73
Figura 46 Comportamiento histerético del aislador K5196 – Límite superior (Upper Bound).....	74
Figura 47 Desplazamiento máximo D_M del aislador K5185 – Límite inferior (Lower Bound)	76
Figura 48 Desplazamiento máximo D_M del aislador K5185 – Límite superior (Upper Bound).....	77
Figura 49 Desplazamientos máximos D_M con el método de análisis NLRHA – Límite inferior (LB).....	78
Figura 50 Desplazamientos máximos D_M con el método de análisis NLRHA – Límite superior (UB).....	78
Figura 51 Levantamiento (Uplift) del aislador K5295 – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB).....	83
Figura 52 Levantamiento (Uplift) del aislador K5196 – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB).....	84
Figura 53 Comparación de levantamientos (Uplift) de los aisladores K5295 y K5196	85
Figura 54 Derivas máximas de la edificación con el MCE_R – Límite superior (Upper Bound)	89
Figura 55 Deformadas de la edificación para el sismo en “X” e “Y”	91
Figura 56 Derivas máximas de la edificación con el método de análisis NLRHA – Límite superior (UB).95	
Figura 57 Capacidad de aisladores FPT con criterio de prevención de colapso – Límite inferior (LB)	97
Figura 58 Componentes de energía acumulada para Coquimbo 2015 – Límite inferior (Lower Bound) ..	98
Figura 59 Comportamiento histerético del aislador K5298 – Límite inferior (Lower Bound).....	103
Figura 60 Comportamiento histerético del aislador K5215 – Límite inferior (Lower Bound).....	104
Figura 61 Comportamiento histerético del aislador K5333 – Límite inferior (Lower Bound).....	105
Figura 62 Comportamiento histerético del aislador K5185 – Límite inferior (Lower Bound).....	106
Figura 63 Comportamiento histerético del aislador K5301 – Límite inferior (Lower Bound).....	107
Figura 64 Comportamiento histerético del aislador K5242 – Límite inferior (Lower Bound).....	108
Figura 65 Comportamiento histerético del aislador K5187 – Límite inferior (Lower Bound).....	109
Figura 66 Comportamiento histerético del aislador K5234 – Límite inferior (Lower Bound).....	110
Figura 67 Comportamiento histerético del aislador K5298 – Límite superior (Upper Bound).....	111
Figura 68 Comportamiento histerético del aislador K5215 – Límite superior (Upper Bound).....	112
Figura 69 Comportamiento histerético del aislador K5333 – Límite superior (Upper Bound).....	113
Figura 70 Comportamiento histerético del aislador K5185 – Límite superior (Upper Bound).....	114
Figura 71 Comportamiento histerético del aislador K5301 – Límite superior (Upper Bound).....	115
Figura 72 Comportamiento histerético del aislador K5242 – Límite superior (Upper Bound).....	116
Figura 73 Comportamiento histerético del aislador K5187 – Límite superior (Upper Bound).....	117
Figura 74 Comportamiento histerético del aislador K5234 – Límite superior (Upper Bound).....	118
Figura 75 Componentes de energía acumulada para Lima 1966 – Límite inferior (Lower Bound)	124

Figura 76	<i>Componentes de energía acumulada para Ancash 1970 – Límite inferior (Lower Bound).....</i>	124
Figura 77	<i>Componentes de energía acumulada para Lima 1974 – Límite inferior (Lower Bound)</i>	125
Figura 78	<i>Componentes de energía acumulada para Moquegua 2001 – Límite inferior (Lower Bound).125</i>	
Figura 79	<i>Componentes de energía acumulada para Pisco 2007 – Límite inferior (Lower Bound).....</i>	126
Figura 80	<i>Componentes de energía acumulada para Manabí 2016 – Límite inferior (Lower Bound)</i>	126
Figura 81	<i>Componentes de energía acumulada para Lima 1966 – Límite superior (Upper Bound)</i>	127
Figura 82	<i>Componentes de energía acumulada para Ancash 1970 – Límite superior (Upper Bound).....</i>	127
Figura 83	<i>Componentes de energía acumulada para Lima 1974 – Límite superior (Upper Bound)</i>	128
Figura 84	<i>Componentes de energía acumulada para Moquegua 2001 – Límite superior (Upper Bound)128</i>	
Figura 85	<i>Componentes de energía acumulada para Pisco 2007 – Límite superior (Upper Bound)</i>	129
Figura 86	<i>Componentes de energía acumulada para Coquimbo 2015 – Límite superior (Upper Bound)129</i>	
Figura 87	<i>Componentes de energía acumulada para Manabí 2016 – Límite superior (Upper Bound)....</i>	130

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASCE: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles

B: Amortiguamiento efectivo

CR: Centro de rigidez

D: Carga muerta

DCL: Diagrama de Cuerpo libre

DE: Sismo de Diseño

d_i : Capacidad de desplazamiento

D_M : Desplazamiento máximo

D_{TM} : Desplazamiento total máximo

E : Energía total disipada

ELF: Fuerza Lateral Equivalente

F : Fuerza sísmica

F_f : Fuerza de fricción

FPD: Doble Péndulo Fricción

FPQ: Quintuple Péndulo Fricción

FPS: Simple Péndulo Fricción

FPT: Triple Péndulo Fricción

F_{res} : Fuerza de restauración lateral

h_i : Altura del mecanismo

I : Inercia rotacional

k : Rigidez de fluencia

K : Rigidez efectiva

k_v : Rigidez vertical

L: Carga Viva

LB: Límite inferior (Lower Bound)

MCE_R: Sismo Máximo Considerado

NLRHA: Análisis No Lineal Tiempo Historia

NTP: Norma Técnica Peruana

P_i : Periodo de traslación

R_{efi} : Radio efectivo de curvatura

R_i : Radio de curvatura

RSA: Método de análisis respuesta espectral

S_a : Pseudo-aceleraciones

SC: Sobre Carga

SEAOC: Asociación de Ingenieros Estructurales de California

SF: Factor de escala

T : Período efectivo

T_v : Periodo vertical

u : Desplazamiento

UB: Límite superior (Upper Bound)

V: Fuerza cortante

V_b : Fuerza cortante para el sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base

V_s : Fuerza cortante de elementos estructurales por encima del nivel de base

V_{st} : Fuerza cortante no reducida

W: Peso sísmico

β : Coeficiente de amortiguamiento efectivo

μ_i : Coeficiente de fricción

ξ_v : Razón de amortiguamiento vertical

RESUMEN

La presente investigación busca analizar el comportamiento del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud de acuerdo a la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, debido a que la estructura presenta discontinuidad de pisos en elevación y configuración en planta asimétrica la cual podría conllevar a que esta colapse ante un sismo severo. Realizando dos análisis sísmicos, un análisis estático con el método ELF y un análisis dinámico con el método NLRHA tanto para propiedades de límite inferior (Lower Bound) como para propiedades límite superior (Upper Bound). Es una investigación aplicada de nivel descriptivo – correlacional, con un enfoque cuantitativo y diseño no experimental, buscando a través de la utilización de teorías y normas de aislación sísmica, planos estructurales de la edificación y especificaciones técnicas del aislador FPT8833/16-12R/12-7 analizar el sistema de aislamiento sísmico. Con el método de análisis de ELF se calculó las propiedades requeridas para el sistema de aislamiento en su desplazamiento máximo (D_M , V_M , K_M , T_M , β_M y B_M), los resultados se basaron en “iteraciones” para recalcular el desplazamiento D_M . Teniendo como resultado un desplazamiento D_M de 343.1069 mm, una fuerza cortante V_b de 7582.5699 ton y una fuerza cortante V_s igual a 3461.8657 ton, además se obtuvo un periodo efectivo T_M de 3.6428 seg, un amortiguamiento efectivo β_M de 19.2820 %, siendo menor e igual a lo normado, una rigidez efectiva K_M de 24.9160 ton/mm y un desplazamiento total máximo D_{TM} de 396.8532 mm. Con el método de análisis NLRHA, se tomó en cuenta los resultados del método de análisis ELF para calcular las propiedades lineales y no lineales que han sido incorporadas al software ETABS con el propósito de simular el comportamiento real del sistema de aislamiento sísmico con 7 pares de registros sísmicos escalados respecto al MCE_R . Obteniendo un desplazamiento D_{TM} de 470.4199 mm, una fuerza cortante V_b de 9898.1707 ton y una fuerza cortante V_s de 2819.5489 ton en la dirección de X y de 2934.6161 ton en la dirección Y. Finalmente se evaluó en base a la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, concluyendo que el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT es adecuado, cumpliendo con lo dispuesto en las normativas. Sin embargo, al analizar cada aislador, se verificó la presencia de levantamientos (Uplift) en un aproximado del 20% de los 184 aisladores.

Palabras clave: aislamiento sísmico, aislador triple péndulo fricción, análisis estático, análisis dinámico.

ABSTRAC

This research seeks to analyze the behavior of the seismic isolation system with FPT isolators in the specialized hospital in the Cajamarca – EsSalud healthcare network according to ASCE/SEI 7-16 regulations and NTP E.031, because the structure presents discontinuity of floors in elevation and asymmetric plan configuration which could lead to collapse in the event of a severe earthquake. Performing two seismic analyses, a static analysis with the ELF method and a dynamic analysis with the NLRHA method for both lower bound properties and upper bound properties. It is applied research of descriptive – correlational level, with a quantitative approach and non-experimental design, seeking through the use of seismic isolation theories and standards, structural plans of the building and technical specifications of the FPT8833/16-12R/12-7 isolator to analyze the seismic isolation system. Using the ELF analysis method, the required properties for the isolation system were calculated at its maximum displacement (D_M , V_M , K_M , T_M , β_M and B_M); the results were based on “iterations” to recalculate the displacement D_M . The result was a displacement D_M of 343.1069 mm, a shear force V_b of 7582.5699 ton, and a shear force V_s equal to 3461.8657 ton. In addition, an effective period T_M of 3.6428 sec was obtained, an effective damping β_M of 19.2820%, being less than and equal to the standard, an effective stiffness K_M of 24.9160 ton/mm, and a maximum total displacement D_{TM} of 396.8532 mm. Using the NLRHA analysis method, the results of the ELF analysis method were taken into account to calculate the linear and nonlinear properties that have been incorporated into the ETABS software in order to simulate the real behavior of the seismic isolation system with 7 pairs of seismic records scaled with respect to the MCE_R . Obtaining a displacement D_{TM} of 470.4199 mm, a shear force V_b of 9898.1707 ton and a shear force V_s of 2819.5489 ton in the X direction and 2934.6161 ton in the Y direction. Finally, it was evaluated based on the ASCE/SEI 7-16 regulations and the NTP E.031, concluding that the seismic isolation system with FPT isolators is adequate, complying with the provisions of the regulations. However, when analyzing each insulator, the presence of uplift was verified in approximately 20% of the 184 insulators.

Keywords: seismic isolation, triple pendulum friction isolator, static analysis, dynamic analysis.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

A lo largo de la historia los terremotos se han originado por el constante cambio de la dinámica del suelo, llegando a producirse sismos en cualquier parte del mundo, incluso en zonas que no cuentan con antecedentes históricos. Además, no se puede asegurar que las edificaciones sean completamente resistentes ante un eventual sismo, incluso si estas cuentan con dispositivos especiales de protección sísmica como amortiguadores o aisladores. Persistiendo así el gran desafío por parte de la ingeniería sismo-estructural de garantizar su buen desempeño sísmico. *“Ningún edificio de la tierra tiene un riesgo sísmico igual a cero”*. (Aguilar, 2022)

A nivel internacional la incorporación de aisladores sísmicos de triple péndulo fricción (FPT) a edificaciones como sistema de protección sísmica, ha resultado beneficioso para mitigar el daño que puede producir un movimiento telúrico. Puesto que el Perú forma parte del “cinturón de fuego del pacífico” y presenta falla por subducción producto de la interacción de la placa Sudamericana y la placa de Nazca, ocasionando sismos de gran magnitud, en la actualidad se está implementando el uso de estos dispositivos en edificaciones de servicio hospitalario. Sin embargo, ciertas edificaciones son diseñadas sin tomar en cuenta algunos lineamientos de las normativas respecto a “aislamiento sísmico”, ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, quedando expuestas a efectos colaterales en el funcionamiento del sistema de aislación.

Uno de los efectos adversos más comunes presente en este tipo de edificaciones con sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT frente a un terremoto, son los levantamientos pronunciados de sus dispositivos que lo componen, originando un desplazamiento excesivo que podría no volver activar completamente el mecanismo del mismo, “Fuerza de restitución”. Esto se produce por la torsión que puede presentar la edificación, debido a la excentricidad de masa y de rigidez (irregularidades en planta y altura), producto de que el peso sísmico no ha sido distribuido uniformemente. (Olivares, De la Llera & Poulos, 2020)

En estructuras altas o esbeltas, se pueden producir fuerzas de tracción relativamente grandes, lo que representa un motivo de preocupación, ya que los aisladores de FPT no tienen capacidad de resistir fuerzas a tracción y se pueden levantar si las cargas axiales generadas por el peso sísmico son superadas por la fuerza vertical ocasionada por el sismo, poniendo en riesgo la estabilidad dinámica del aislador FPT y por consecuencia la del sistema de aislamiento sísmico. (Almazán y De la Llera 2003, Roussis y Constantinou 2006)

En la ciudad de Cajamarca se está construyendo el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud, el cual debido a la zonificación sísmica (Zona 3) y a la categoría de la edificación (Categoría A1), presenta un sistema de aislamiento sísmico con 184 aisladores triple péndulo fricción (FPT). Compuesto por 9 niveles y 4 bloques, presentando discontinuidad de pisos en elevación y configuración en planta asimétrica conllevando a que la estructura pueda colapsar ante un sismo severo. Es por ello que la presente investigación busca analizar si el comportamiento del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT de la edificación, es adecuado o inadecuado.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento del sistema de aislamiento sísmico con aisladores triple péndulo fricción en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud?

1.3. Formulación de hipótesis

El sistema de aislamiento sísmico con aisladores triple péndulo fricción en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud, tiene un comportamiento inadecuado.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación teórico-científica

Esta investigación se basa en la teoría de Fenz, D & Constantinou “*Comportamiento mecánico de los cojinetes de deslizamiento multi-esféricos*”, además, en la norma ASCE/SEI 7-16 capítulo 17 “*Requisitos de diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico*” y la NTP E.031 “*Aislamiento sísmico*”, verificando con estas si el comportamiento del sistema de aislamiento con aisladores triple péndulo fricción es adecuado o inadecuado, puesto que la edificación en estudio es de uso hospitalario, la cual debe tener funcionalidad durante y después de ocurrido un sismo severo.

1.4.2. Justificación práctica

Con esta investigación se busca que las futuras construcciones e investigaciones de edificaciones hospitalarias con sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT se analicen y diseñen teniendo en cuenta los requisitos mínimos establecidos en las teorías relacionadas a sistema de aislamiento sísmico y en las normativas ASCE/SEI 7-16 y NTP E.031.

1.5. Alcance de la investigación

Esta investigación desarrolla un análisis sísmico de la edificación del hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud en función a un análisis estático con el método fuerza lateral equivalente (ELF) y un análisis dinámico con el método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA) del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT. A través del uso de la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, con la finalidad de determinar si el comportamiento del sistema de aislación es el adecuado o no ante un evento sísmico.

1.6. Delimitación de la investigación

La investigación se realizó en la edificación principal del hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

1.7. Limitaciones

La presente investigación se desarrolló bajo las siguientes limitaciones:

- No se consideraron los efectos de interacción suelo-estructura.
- No se tomaron en cuenta asentamientos diferenciales del suelo.
- El análisis del sistema de aislamiento sísmico solo se realizó a nivel del desempeño de los aisladores triple péndulo fricción (FPT).

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo general

Analizar el sistema de aislamiento sísmico con aisladores triple péndulo fricción (FPT) en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

1.8.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis estático del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, usando el método de análisis fuerza lateral equivalente (ELF).
- Realizar el análisis dinámico del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, usando el método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA).
- Verificar si los aisladores FPT del sistema de aislamiento sísmico presentan levantamientos (Uplift).

1.9. Descripción de contenido de los capítulos

Esta investigación está compuesta por 5 capítulos descritos a continuación:

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN. Se presenta el contexto y planteamiento del problema, hipótesis, objetivos, justificación, alcances y limitaciones de la investigación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO. Se presenta los antecedentes internacionales y nacionales relacionados al tema de estudio, así mismo se detalla las bases teóricas que fundamentan el desarrollo de esta investigación, además de definir algunos términos básicos para un mejor entendimiento de lo abordado.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS. Describe la ubicación, materiales y metodología necesaria para el desarrollo de la investigación, mostrando el procedimiento detallado a seguir para el análisis sísmico del sistema de aislamiento con aisladores FPT, llegando a resultados que posteriormente serán evaluados.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. En este capítulo se analizó y discutió los resultados del análisis sísmico realizado en el capítulo III en base a los requisitos mínimos establecidos en la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, llegando a contrastar la hipótesis planteada.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. Se presenta las conclusiones a las que se llega en esta investigación en relación a cada objetivo planteado, además de algunas recomendaciones necesarias para futuros estudios e investigaciones relacionadas con aislamiento sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APÉNDICES

ANEXOS

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

2.1.1. Antecedentes internacionales

Morán, (2022) en su investigación *“Diseño de edificios de cuatro niveles empleando aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT para la zona sísmica #4 de Guatemala”*, establece que el uso de este tipo de aisladores con respecto a la cortante y derivas, presentan diferencias grandes en los modos de vibración, en comparación con los resultados obtenidos con la edificación sin uso de aisladores, tan grandes como entre 5 a 30 %. Concluye que, este tipo de aisladores absorben las fuerzas laterales transmitidas y reduce significativamente las derivas de entrepiso producidas por el evento sísmico a través del deslizamiento del dispositivo, haciendo que el sistema estructural superior permanezca elástico, aumentando la amortiguación del sistema.

Chimbo, (2021) en su investigación *“Análisis sísmico comparativo de un edificio de mediana altura, con base fija empotrada y con aisladores de triple péndulo de fricción”*, determina que al incorporar los aisladores de triple péndulo fricción, se produce una disminución considerable en cuanto al desplazamiento máximo con 19.9 cm, además, obtuvo un periodo aislado de 2.80 segundos y un periodo de base empotrada de 0.673 segundos representando un 314% más de este último. Con una disminución en cuanto a la cortante basal, del 78% al 73%, llegando a concluir que este tipo de aisladores reducen la demanda sísmica de la superestructura, haciendo que los elementos no estructurales estén protegidos y tengan funcionalidad.

Cango, (2018) en su investigación *“Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT”*, se enfoca en el diseño del aislador sísmico en base a la normativa ASCE 7-16, definiendo sus propiedades geométricas y mecánicas. Realizando un análisis sísmico estático (método de fuerza lateral equivalente) y un análisis dinámico (método no lineal tiempo historia). Con el método de análisis dinámico y teniendo en cuenta la no linealidad de los aisladores FPT pretende comparar si el aislador diseñado tiene la capacidad de desplazamiento suficiente para resistir los movimientos sísmicos a partir del método de análisis estático. Respecto al cortante basal este llega a tan sólo 0.18 del peso sísmico, esta reducción es producto del incremento del periodo empotrado de 0.48 segundos a un periodo aislado de 3.0 segundos y por el incremento del amortiguamiento a 28%. Deduciendo que los aisladores FPT reducen significativamente las demandas sísmicas.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Yucra & Quispe, (2020) en su investigación *“Análisis y diseño sísmico de una edificación de cinco niveles con el uso de aisladores de base tipo péndulo friccional triple”*, realiza un análisis estático y dinámico empleando aisladores de base tipo péndulo friccional triple y base empotrada. Los resultados respecto al periodo aislado oscilan alrededor de 2.70 segundos en promedio. Respecto a los desplazamientos se obtiene en el último nivel un valor de 3 cm con aislamiento sísmico y de 9 cm con base empotrada. La aceleración en el edificio aislado disminuye considerablemente respecto a la aceleración con base fija, obteniendo un valor de 0.22g en la dirección “x” y de 0.23g en la dirección “y”, representando el 43% y el 34% respectivamente. La cortante en cada piso se redujo hasta en un 67% en promedio. Concluyendo que el uso de aisladores de base péndulo friccional triple es funcional y efectivo.

Marcelo, (2019) en su investigación *“Análisis sísmico de hospitales considerando el criterio de funcionalidad continua empleando aisladores de base friccional de triple péndulo en zonas sísmicas 3 y 4 del Perú”*, compara la capacidad de estructuras con base fija y base aislada con aisladores de péndulo triple friccional. Las derivas promedio de entrepiso y aceleraciones promedio máximas obtenidas con base fija son de 0.0171 y 2.9177g, las cuales sobrepasan los límites que establece la funcionalidad que es de 0.003 y 0.4g respectivamente, mientras que para la estructura aislada alcanzan a 0.0024 y 0.3937g para propiedades de límite superior, y de 0.0021 y 0.2803g para propiedades de límite inferior, las últimas resultan inferiores a los límites ya establecidos. Concluyendo que los hospitales con este tipo de aisladores sísmicos de base, logran, a nivel de diseño reducir los daños en elementos estructurales y no estructurales.

Ruiz, (2017) en su investigación *“Análisis y diseño de edificios con aisladores sísmicos de péndulo friccional doble y triple”*, evalúa los métodos de análisis dinámico, el de tiempo historia no lineal y modal espectral basados en normativas ASCE 7-16 y FEMA 750. El resultado con respecto al periodo con base fija es de 0.07 segundos y con aislamiento sísmico es de 3.1 segundos tanto para el péndulo doble y triple, así mismo con amortiguaciones de 35% y 33%. La deriva máxima de entrepiso en los análisis tiempo historia no lineal y modal espectral resultó el 2.4 % y 1.6% respectivamente para el péndulo doble y de 2.0% y 1.6% para el péndulo triple. Con respecto a la aceleración de piso, para el péndulo doble obtuvo un valor de 0.10g y 0.58g y para el triple péndulo fueron de 0.10g y 0.20g. La cortante resultó de 9.9 % y 8.8 % del peso de la superestructura respectivamente. Concluyendo que los aisladores doble y triple péndulo tienen respuestas sísmicas similares en los dos análisis dinámicos realizados.

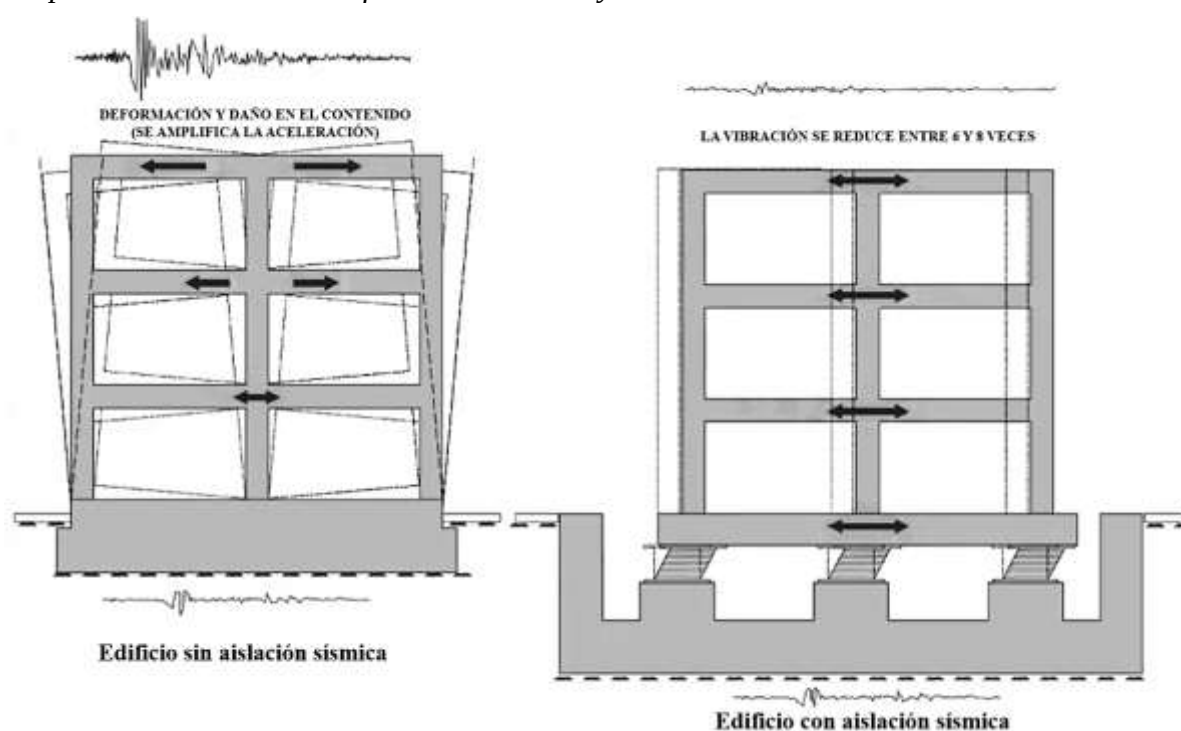
2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico (aislación en la base) tiene como principio fundamental dar flexibilidad lateral (horizontal) en la base de una edificación, así mismo introducir elementos de amortiguación (aisladores), para reducir la amplitud del movimiento causado por el terremoto. (Mayes & Naeim, 2001)

Figura 1

Respuesta sísmica de un edificio sin aislación y con aislación sísmica



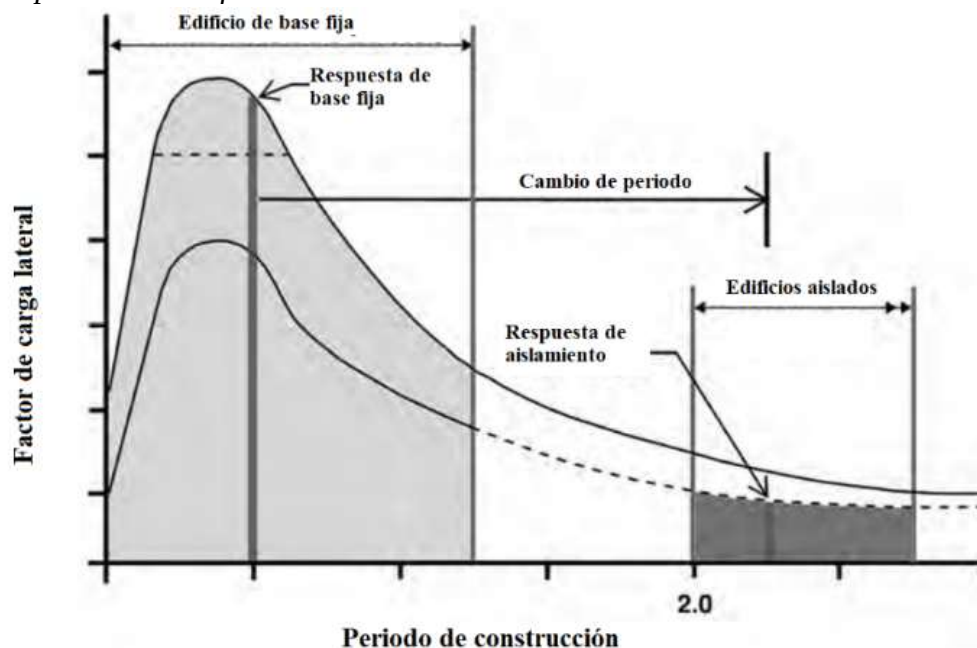
Nota. Tomado de Mayes & Naeim, 2001

La figura 1 muestra el efecto que produce la incorporación de un sistema de aislamiento sísmico en un edificio. Se compara un edificio sin aislamiento y un edificio sísmicamente aislado, en el primer caso las aceleraciones de piso y derivas de entrepiso son muy altas, mientras que, en el segundo caso se da una reducción significativa de las mismas.

Aislar la base de una edificación reduce considerablemente las fuerzas sísmicas laterales transferidas al edificio al alargar su periodo de vibración, para desacoplar la respuesta sísmica del temblor lateral del suelo. Además, reduce aún más la respuesta sísmica a través de la amortiguación histerética. (SEAO, 2012)

Figura 2

Cambio de período en edificaciones con aislamiento sísmico



Nota. Tomado de SEAOC, 2012

Es importante tener en cuenta que una mayor amortiguación disminuye las aceleraciones y el desplazamiento respecto al cortante basal dominado por la respuesta del primer modo de vibración. Sin embargo, una alta amortiguación puede aumentar las aceleraciones en modos superiores de la edificación. En el caso de edificaciones de varios pisos, la idea de que "a más amortiguación es mejor" puede no ser válida. (Trevor, 2001)

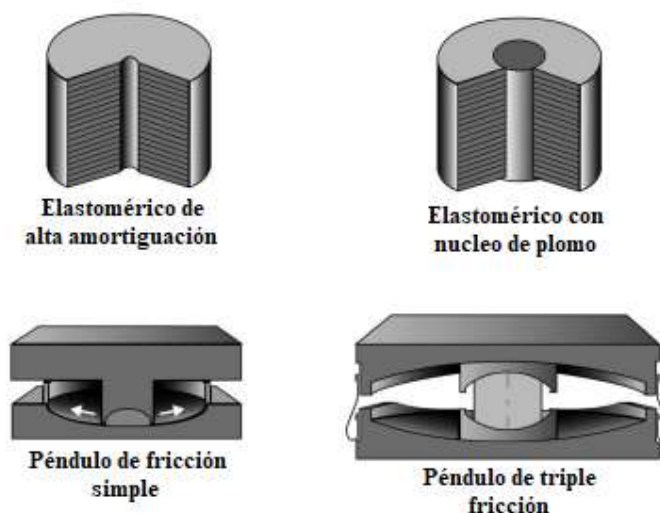
2.2.1.1. Tipos de aisladores sísmicos

Teniendo en cuenta un enfoque general, existen 2 principales tipos de aisladores sísmicos, los elastoméricos y los de péndulo fricción, cada uno utiliza diferentes propiedades mecánicas y diferentes materiales. (SEAOC, 2019)

- **Aisladores elastoméricos:** son capas alternas de caucho y cuñas de acero unidas entre sí, proporcionando rigidez y amortiguación. Con un núcleo de plomo o con aditivos especiales de caucho.
- **Aisladores pendulares:** son una adaptación de los cojinetes deslizantes. Se utiliza una superficie de acero curvada en lugar de una plana. A medida que la edificación se mueve horizontalmente, sube por la superficie curva; por lo tanto, el peso del edificio tiende a devolver la edificación a su posición inicial. Los rodamientos pendulares proporcionan amortiguación mediante fricción y rigidez debido a la forma de su curvatura.

Figura 3

Aisladores elastoméricos (parte superior) y aisladores pendulares (parte inferior)



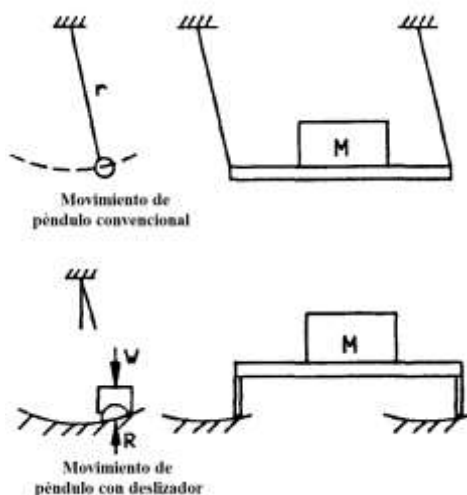
Nota. Tomado de SEAOC, 2019

2.2.2. Sistema de péndulo friccional

El sistema de péndulo friccional es un innovador sistema de aislamiento sísmico, que presenta avances en términos de resistencia y flexibilidad. Este tipo de sistema se fundamenta en principios de ingeniería ampliamente reconocidos como el movimiento pendular. El movimiento del deslizador es similar al movimiento de una masa suspendida (péndulo convencional), aprovecha su geometría y la fuerza gravitatoria para proporcionar amortiguación por fricción, la cual absorbe la energía del terremoto y así logra alcanzar los efectos deseados del aislamiento sísmico. (Zayas, 1989)

Figura 4

Funcionamiento de un péndulo convencional y de fricción con deslizador



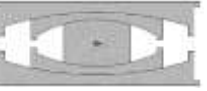
Nota. Tomado de Zayas, 1989

2.2.2.1. Tipos de aisladores de péndulo fricción

Luego de la invención del sistema de péndulo de fricción simple, se buscó mejorar el comportamiento en el mismo aislador, implementando su mecanismo. Es por ello que hoy los aisladores pendulares son de 4 tipos: el simple, doble, triple y quíntuple péndulo de fricción como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Evolución del aislador de péndulo fricción

	Aislador de simple péndulo fricción	Aislador de doble péndulo fricción	Aislador de triple péndulo fricción	Aislador de quíntuple péndulo fricción
Configuración				
Péndulos efectivos	1	2	3	5
Número de fases	1	3	5	9

Nota. Tomado de Lee & Constantinou, 2015

El aislador de simple péndulo fricción (FPS), está compuesto por un deslizador articulado que se mueve sobre la placa cóncava. Su mecanismo eleva la masa soportada, lo que hace que la edificación oscile como un péndulo simple. (Zayas, 1989)

El aislador de doble péndulo fricción (FPD), tiene un deslizador articulado y dos superficies cóncavas de contacto superior e inferior. Este diseño produce efectos de calentamiento reducidos y mayor capacidad de desplazamiento. (Fenz & Constantinou, 2008)

El aislador triple péndulo fricción (FPT), compuesto por un deslizador rígido y cuatro placas cóncavas, dos externas y dos internas. Presenta una mayor capacidad de comportamiento adaptativo que el aislador FPD, ocasionando cambios considerables en cuanto a la rigidez y la resistencia, con una amplitud de desplazamiento creciente. El aislador FPT al igual que aislador FPS y FPD requiere solamente de la consideración de equilibrio de fuerzas. (Sarlis & Constantinou, 2013)

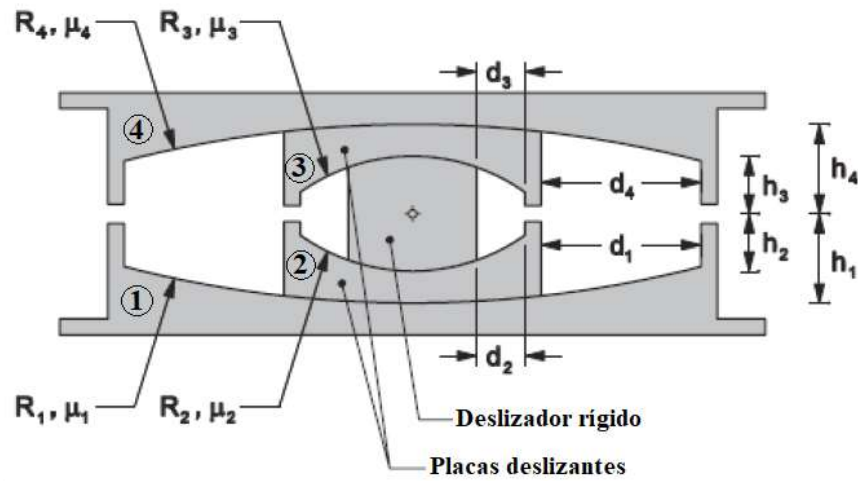
El aislador de quíntuple péndulo fricción (FPQ), tiene un deslizador rígido y 6 placas cóncavas, 2 externas y 4 internas, a diferencia de los anteriores aisladores mencionados el aislador FPQ requiere de la consideración del equilibrio de fuerzas y momentos, teniendo como resultado una complejidad mayor. Los supuestos básicos de la teoría de los aisladores FPQ son paralelos a los de los aisladores FPT. (Lee & Constantinou, 2015)

2.2.3. Aislador triple péndulo fricción (FPT)

El aislador FPT, presenta un mecanismo más complejo a comparación del FPS y FPD con 5 fases de movimiento, ocasionando cambios en su rigidez y resistencia. Está compuesto por un deslizador rígido y cuatro placas cóncavas, dos externas (placa 1 y 4) y dos internas (placa 2 y 3). Su comportamiento depende de sus propiedades geométricas como el radio de curvatura (R_1, R_2, R_3 y R_4), altura (h_1, h_2, h_3 y h_4), su capacidad de desplazamiento (d_1, d_2, d_3 y d_4), además de sus propiedades de fricción como el coeficiente de fricción (μ_1, μ_2, μ_3 y μ_4), como se muestra en la figura 5. (Sarlis & Constantinou, 2013)

Figura 5

Componentes del aislador triple péndulo fricción



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

La configuración estándar del aislador de triple péndulo fricción es normalmente usada para aplicaciones en ingeniería, con la finalidad de simplificar la cantidad de propiedades geométricas y de fricción del dispositivo; teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Radios de curvatura efectivos de las placas externas: $R_{ef1} = R_{ef4}$
- Radios de curvatura efectivos de las placas internas: $R_{ef2} = R_{ef3}$

Donde: $R_{ef2} = R_{ef3} \ll R_{ef1} = R_{ef4}$

Además, se debe cumplir que:

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} \rightarrow F_{f1} < F_{dr2}$$

$$d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{ef3} \rightarrow F_{f4} < F_{dr3}$$

$$F_{f4} < F_{dr1}$$

Si el radio efectivo para cada placa cóncava es:

$$R_{efi} = R_i - h_i \text{ (Para } i=1,2,3 \text{ y } 4)$$

- Coeficientes de fricción que actúan en las placas externas: $\mu_1 < \mu_4$
- Coeficientes de fricción que actúan en las placas internas: $\mu_2 = \mu_3$

Donde: $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$

2.2.3.1. Relación Fuerza – Desplazamiento

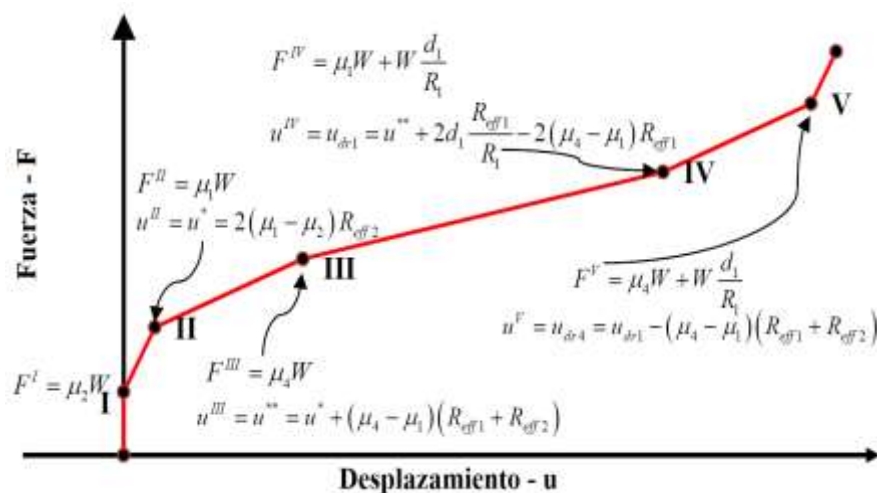
En el modelo de Fenz y Constantinou (2008) para la relación fuerza – desplazamiento, se da el producto entre el coeficiente de fricción y los radios de curvatura relacionados, en el cual el coeficiente de fricción es sacado de las pruebas de los deslizamientos. El coeficiente de fricción efectivo es 4 veces mayor que el coeficiente real. Dicha relación es establecida bajo la restricción de la siguiente condición.

$$\mu_2 \frac{R_2}{R_{ef2}} < \mu_3 \frac{R_3}{R_{ef3}} < \mu_1 \frac{R_1}{R_{ef1}} < \mu_4 \frac{R_4}{R_{ef4}}$$

El procedimiento seguido para el cálculo de la relación fuerza – desplazamiento del mecanismo del aislador FPT durante cada fase de movimiento, se caracteriza por el inicio o la detención del movimiento en uno o más placas deslizantes. En la figura 6, se observa que la rigidez se reduce gradualmente ante el incremento del desplazamiento, produciendo un aumento del periodo de vibración. (Sarlis & Constantinou, 2013)

Figura 6

Fuerza – Desplazamiento del rodamiento del aislador triple péndulo fricción



Nota. Tomado de Sarlis & Constantinou, 2013

El movimiento está inicialmente en reposo y se aplica una fuerza lateral suficientemente pequeña como para que el movimiento solo ocurra en las placas 2 y 3 (es decir, las placas 1 y 4 no experimentan ningún movimiento). No obstante, el comportamiento tras el inicio del movimiento (más allá del punto de transición I) se da cuando la fricción en las superficies de placas 2 y 3 son desiguales. (Sarlis & Constantinou, 2013)

2.2.3.2. Fases de movimiento del aislador triple péndulo fricción (FPT)

En base a la teoría de Fenz & Constantinou, 2008 se muestra las 5 fases de movimiento:

- **Fase de movimiento I**

En esta fase se desplazan las placas 2 y 3, permaneciendo detenidas las placas 1 y 4, se inicia cuando la fuerza sísmica F supera las fuerzas de fricción F_{f2} y F_{f3} ($F \geq F_{f1}$ y $F \geq F_{f3}$) con la condición de que $F_{f1} = F_{f2}$, el deslizamiento ocurre simultáneamente en ambas placas.

El desplazamiento de la placa 2 respecto a su geometría es:

$$u_2 = R_{ef2} \sin \theta_2 \quad (1)$$

Del diagrama de cuerpo libre (DCL – III) de la figura 7 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (2-a)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (2-b)$$

Del diagrama de cuerpo libre (DCL – IV) de la figura 7 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F = F_{f1} \quad (3-a)$$

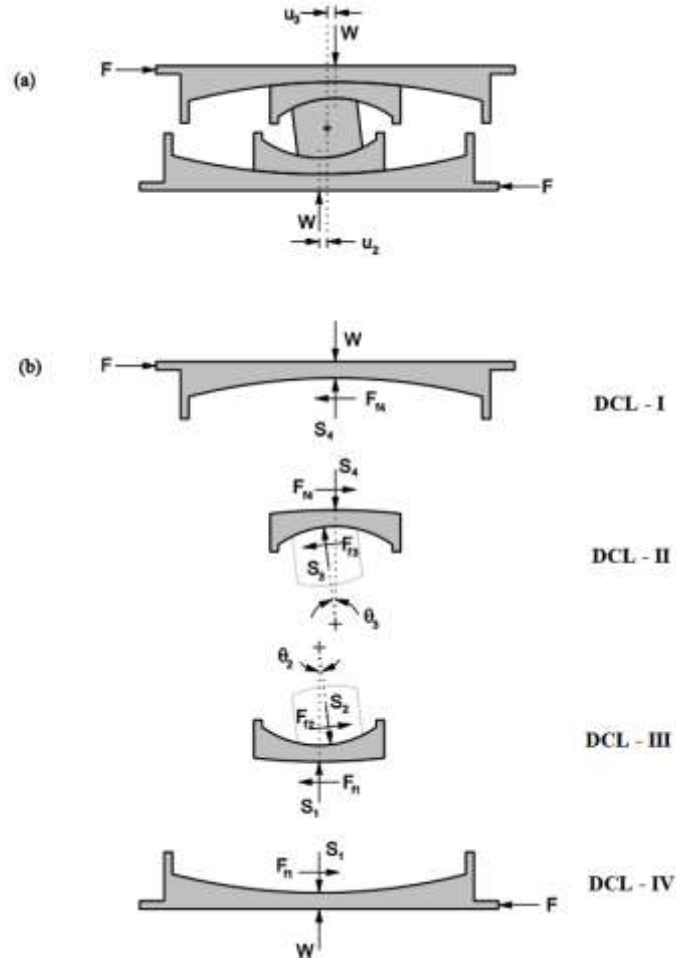
$$\sum F_y = 0 \rightarrow W = S_1 \quad (3-b)$$

De las ecuaciones (2) y (3), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para la placa 2. (ver anexo A)

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (4)$$

Figura 7

Fase I del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre



Nota. Adaptado de Fenz & Constantinou, 2008

Haciendo un similar análisis para las ecuaciones de la (2) a la (4), pero utilizando el DCL – I y DCL – II de la figura 7 (b), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para la placa 3.

$$F = \frac{W}{R_{ef3}} u_3 + F_{f3} \quad (5)$$

El desplazamiento total, está dado por:

$$u = u_2 + u_3 \quad (6)$$

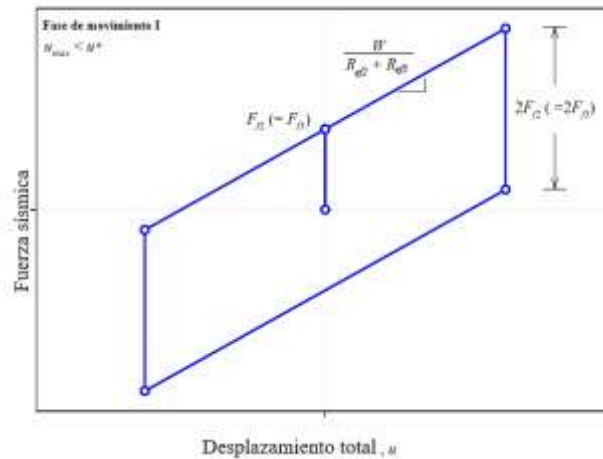
De las ecuaciones (4), (5) y (6), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento total. (ver anexo A)

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f2} R_{ef2} + F_{f3} R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \quad (7)$$

La figura 8 muestra la curva de histéresis de la fase de movimiento I que, al invertir el movimiento la fuerza sísmica se reduce a $2F_{f2} = 2F_{f3}$, con una rigidez de $W/(R_{ef2} + R_{ef3})$. El comportamiento es idéntico al de un movimiento de péndulo fricción doble con radios de curvatura y fricciones iguales.

Figura 8

Curva de histéresis de la fase I del aislador FPT



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

• Fase de movimiento II

La transición a la fase de movimiento II ocurre en el desplazamiento u^* . (ver anexo B.1)

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{ef3} \quad (8)$$

Al superar el desplazamiento de u^* , la fuerza sísmica F sobrepasa a la fuerza de fricción F_{f1} (cuando $u \geq u^* \rightarrow F \geq F_{f1}$) ocasionando que la placa 1 inicie su deslizamiento, mientras que la placa 2 detiene su deslizamiento y la placa 3 continúa deslizándose.

El desplazamiento de las placas 1 y 2 respecto a su geometría es:

$$u_1 = R_{ef1} \sin \theta_1 \quad (9-a)$$

$$u_2 = R_{ef2} \sin \theta_2 \quad (9-b)$$

Del diagrama de cuerpo libre (DCL – III) de la figura 9 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 = S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (10-a)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 = S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \sin \theta_1 \quad (10-b)$$

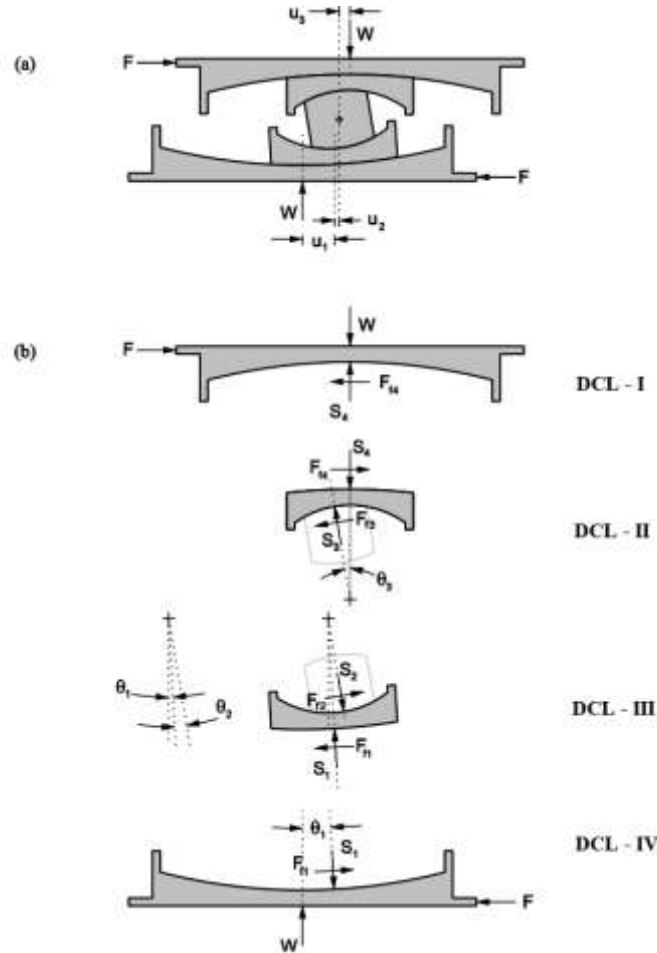
Del diagrama de cuerpo libre (DCL – IV) de la figura 9 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow S_1 \sin \theta_1 + F_{f1} \cos \theta_1 = F \quad (11-a)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f1} \sin \theta_1 + W = S_1 \cos \theta_1 \quad (11-b)$$

Figura 9

Fase II del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

De las ecuaciones (10), se obtiene la relación fuerza – desplazamiento para la placa 1. (ver anexo B.2)

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (12)$$

De las ecuaciones (10) y (11), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para las placas 1 y 2. (ver anexo B.2)

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (13)$$

Similar al análisis realizado para las ecuaciones de la (2) a la (4) de la fase de movimiento I y bajo las condiciones de equilibrio del DCL – III y DCL – IV de la figura 9 (b), se obtiene la relación de fuerza - desplazamiento para la placa 3.

$$F = \frac{W}{R_{ef3}} u_3 + F_{f3} \quad (14)$$

El desplazamiento total, está dado por:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (15)$$

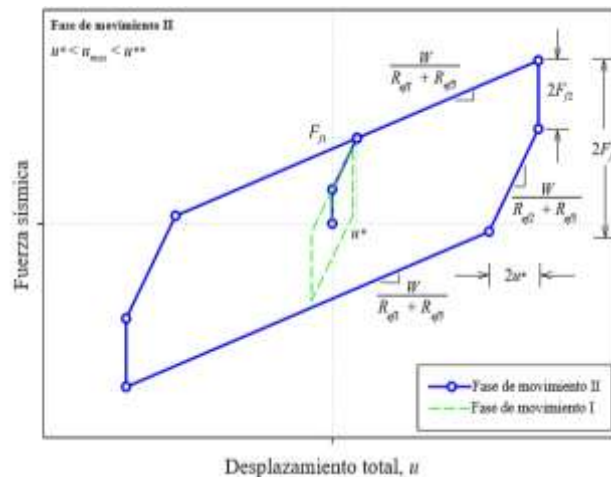
De las ecuaciones (12), (13), (14) y (15), se obtiene la relación fuerza – desplazamiento total. (ver anexo B.2)

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}} \quad (16)$$

La figura 10 muestra la curva de histéresis de la fase de movimiento II que, al invertir el movimiento la fuerza sísmica se reduce primero a $2F_{f2} = 2F_{f3}$ y finalmente se reduce a $2F_{f1}$, con una rigidez de $W/(R_{ef1} + R_{ef3})$.

Figura 10

Curva de histéresis de la fase II del aislador FPT



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

- **Fase de movimiento III**

La transición a la fase de movimiento III ocurre en el desplazamiento u^{**} . (ver anexo C.1)

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3}) \quad (17)$$

Al superar el desplazamiento u^* , la fuerza sísmica F sobrepasa a la fuerza de fricción F_{f1} (cuando $u \geq u^{**} \rightarrow F \geq F_{f4}$), ocasionando que la placa 4 inicie su deslizamiento, mientras que las placas 1 y 2 continúan deslizándose y la placa 3 se detiene.

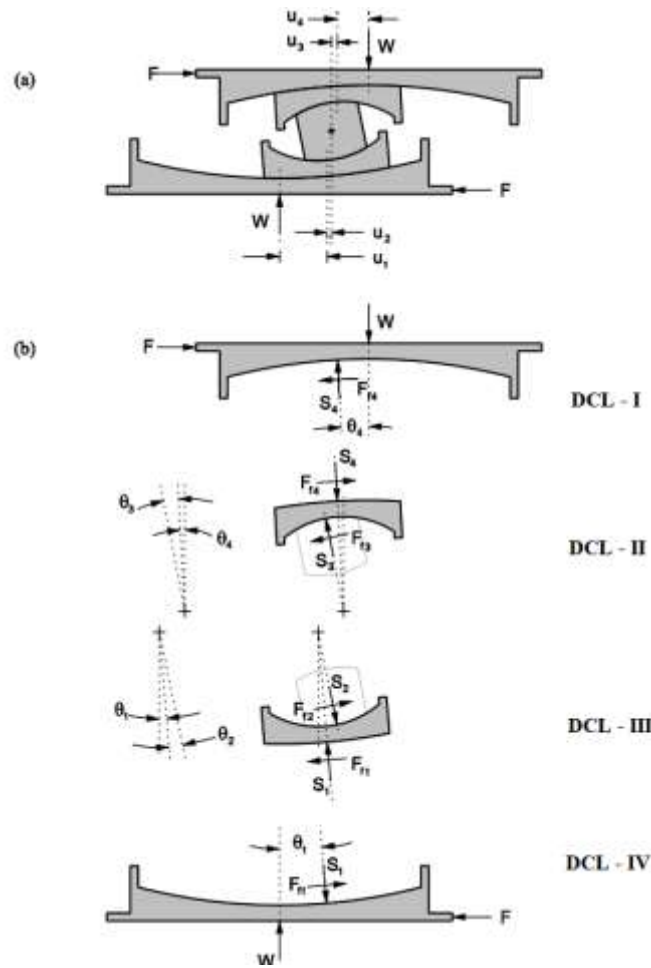
El desplazamiento de las placas 1 y 2 respecto a su geometría es:

$$u_3 = R_{ef3} \text{sen} \theta_3 \quad (18-a)$$

$$u_4 = R_{ef4} \text{sen} \theta_4 \quad (18-b)$$

Figura 11

Fase III del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

Realizando un similar análisis para la ecuación (12) de la fase de movimiento II y bajo las condiciones de equilibrio tanto para el DCL – IV y DCL – I de la figura 11 (b), se obtiene la relación de fuerza - desplazamiento para la placa 1 y 4 respectivamente.

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (19)$$

$$F = \frac{W}{R_{ef4}} u_4 + F_{f4} \quad (20)$$

Por otro lado, haciendo un análisis similar que para la ecuación (13) de la fase de movimiento II y bajo las condiciones de equilibrio tanto para el DCL – II y DCL – III de la figura 11 (b), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para la placa 2 y 3 respectivamente.

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (21)$$

$$F = W \left(\frac{u_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \quad (22)$$

El desplazamiento total, está dado por:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (23)$$

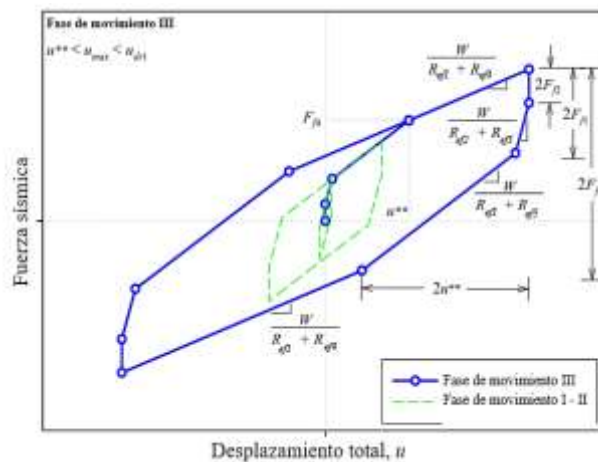
De las ecuaciones (19), (20), (21), (22) y (23), se obtiene la relación fuerza – desplazamiento total. (ver anexo C.2)

$$F = \frac{W}{R_{ef1}+R_{ef4}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1}-R_{ef2})+F_{f4}(R_{ef4}-R_{ef3})+F_{f2}R_{ef2}+F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1}+R_{ef4}} \quad (24)$$

La figura 12 muestra la curva de histéresis de la fase de movimiento III que, al invertir el movimiento la fuerza sísmica se reduce primero a $2F_{f2} = 2F_{f3}$, luego a $2F_{f1}$ y finalmente a $2F_{f4}$, teniendo una rigidez de $W/(R_{ef1} + R_{ef4})$.

Figura 12

Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

- **Fase de movimiento IV**

La transición a la fase de movimiento IV ocurre en el desplazamiento u_{dr1} , teniendo en cuenta que en la placa 1 el desplazamiento $u_1 = d_1$, la fuerza sísmica, F_{dr1} , es:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} \quad (25)$$

Produciendo un desplazamiento u_{dr1} . (ver anexo D.1)

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef4}) \quad (26)$$

Al superar el desplazamiento u_{dr1} , la fuerza sísmica F sobrepasa a la fuerza de fricción F_{dr1} (cuando $u \geq u_{dr1} \rightarrow F \geq F_{dr1}$) ocasionando que la placa 1 detenga su deslizamiento (hasta chocar con la palca 2), mientras que la placa 2 reinicia su deslizamiento, la placa 3 sigue detenida y la placa 4 continúa deslizándose.

El desplazamiento de las placas 1 y 2 respecto a su geometría es:

$$d_1 = R_{ef1} \text{sen} \theta_1 \quad (27\text{-a})$$

$$u_2 = R_{ef2} \text{sen} \theta_2 \quad (27\text{-b})$$

Del diagrama de cuerpo libre (DCL – III) de la figura 13 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + S_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) = F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \text{sen} \theta_1 + F_{r1} \quad (28\text{-a})$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f2} \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 = S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \text{sen} \theta_1 \quad (28\text{-b})$$

Del diagrama de cuerpo libre (DCL – IV) de la figura 13 (b), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow S_1 \text{sen} \theta_1 + F_{f1} \cos \theta_1 + F_{r1} = F \quad (29\text{-a})$$

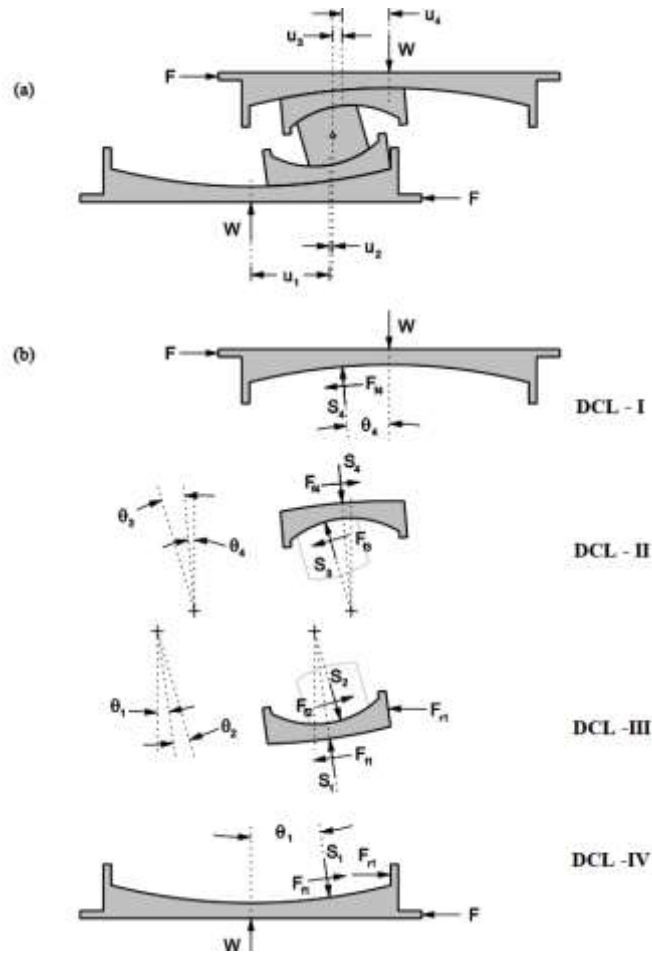
$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 \cos \theta_1 = F_{f1} \text{sen} \theta_1 + W \quad (29\text{-b})$$

De las ecuaciones (29), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para el choque de las placas 1 y 2. (ver anexo D.2)

$$F = \frac{W d_1}{R_{ef1}} + F_{f1} + F_{r1} \quad (30)$$

Figura 13

Fase IV del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

De las ecuaciones (28) y (29), se obtiene la relación de fuerza – desplazamiento para la placa 2. (ver anexo D.2)

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (31)$$

Haciendo un análisis similar al de la ecuación (20) y (22) de la fase de movimiento III y bajo las condiciones de equilibrio para DCL – I y el DCL – II de la figura 13 (b), se obtiene la relación de fuerza - desplazamiento para la placa 4 y 3 respectivamente.

$$F = \frac{W}{R_{ef4}} u_4 + F_{f4} \quad (32)$$

$$F = W \left(\frac{u_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \quad (33)$$

El desplazamiento total, está dado por:

$$u = d_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (34)$$

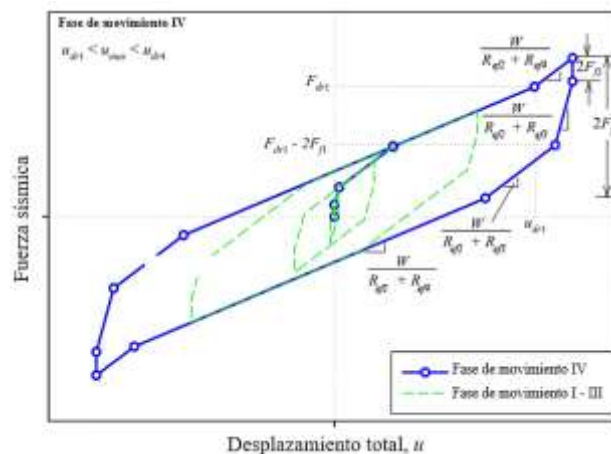
De las ecuaciones (31), (32), (33) y (34), considerando $u_1 = d_1$, se obtiene la relación fuerza – desplazamiento total. (ver anexo D.2)

$$F = \frac{W}{(R_{ef2} + R_{ef4})} (u - u_{dr1}) + \frac{Wd_1}{R_{ef1}} + F_{f1} \quad (35)$$

La figura 14 muestra la curva de histéresis de la fase de movimiento IV que, al invertir el movimiento la fuerza sísmica se reduce primero a $2F_{f2} = 2F_{f3}$; con la condición $(F_{dr1} + 2F_{f1} < 2F_{f4})$, y finalmente se reduce a $F_{dr1} - 2F_{f1}$; con una rigidez de $W/(R_{ef2} + R_{ef4})$.

Figura 14

Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

• Fase de movimiento V

La transición a la fase de movimiento IV ocurre en el desplazamiento u_{dr1} , teniendo en cuenta que en la placa 4 el desplazamiento $u_4 = d_4$, la fuerza sísmica F_{dr4} es:

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} \quad (36)$$

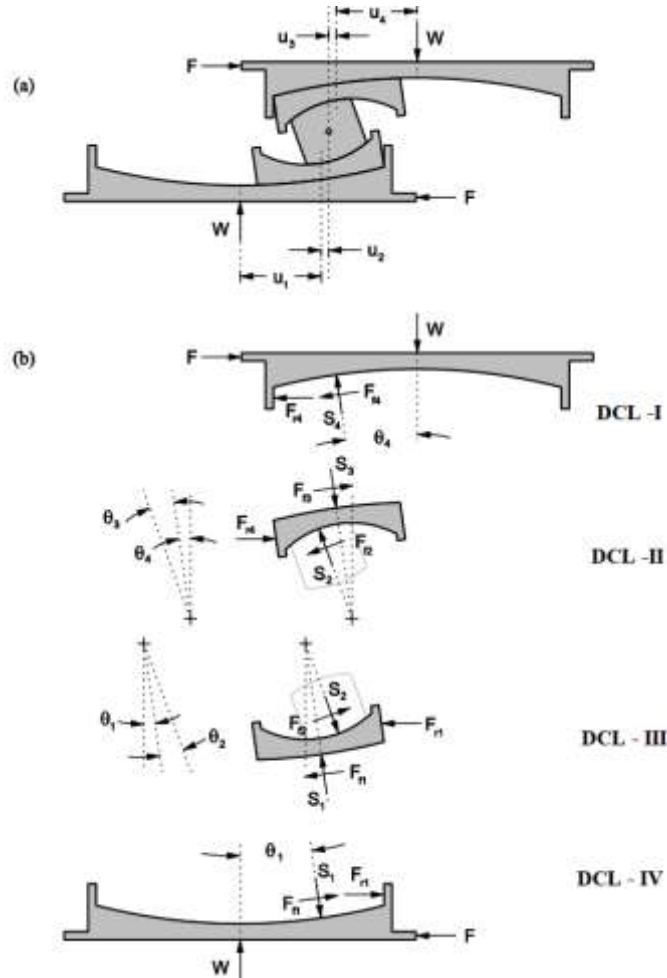
Produciendo un desplazamiento de transición u_{dr4} . (ver anexo E.1)

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{ef2} + R_{ef4}) \quad (37)$$

Al superar el desplazamiento u_{dr4} , la fuerza sísmica F sobrepasa a la fuerza de fricción F_{dr4} (cuando $u \geq u_{dr4} \rightarrow F \geq F_{dr4}$) ocasionando que la placa 4 detenga su deslizamiento (hasta chocar con la palca 3), mientras que las placas 2 y 3 reinician sus deslizamientos.

Figura 15

Fase V del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

El desplazamiento de las placas 3 y 4 respecto a su geometría es:

$$u_3 = R_{ef3} \sin \theta_3 \quad (38-a)$$

$$d_4 = R_{ef4} \sin \theta_4 \quad (38-b)$$

Realizando un similar análisis al de la ecuación (30) de la fase de movimiento IV y bajo las condiciones de equilibrio tanto para el DCL – I y DCL – IV de la figura 15 (b), se obtiene la relación de fuerza - desplazamiento para las placas 2 y 3 respectivamente.

$$F = \frac{Wd_1}{R_{ef1}} + F_{f1} + F_{r1} \quad (39)$$

$$F = \frac{Wd_4}{R_{ef4}} + F_{f4} + F_{r4} \quad (40)$$

Haciendo un análisis similar al de la ecuación (31) de la fase de movimiento IV y bajo las condiciones de equilibrio tanto para DCL – II y DCL – III de la figura 15 (b), se obtiene la relación de fuerza - desplazamiento para la placa 2 y 3.

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (41)$$

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \quad (42)$$

El desplazamiento total, está dado por:

$$u = d_1 + u_2 + u_3 + d_4 \quad (43)$$

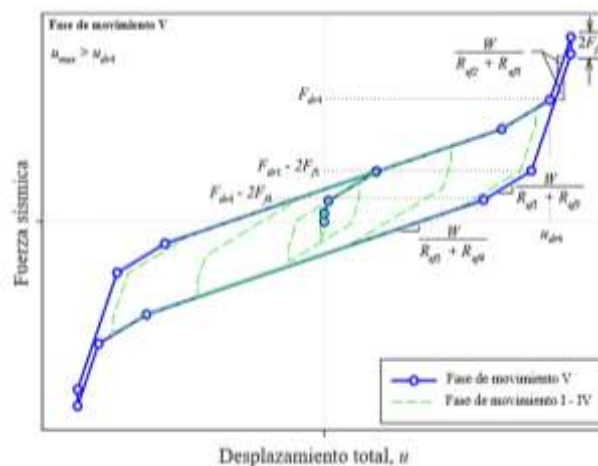
De las ecuaciones (39) y (40), (41), (42) y (43), considerando $u_1 = d_1$, y $u_4 = d_4$, se obtiene la relación fuerza-desplazamiento total. (ver anexo E.2)

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{ef4}} d_{4+} + F_{f4} \quad (44)$$

La figura 16 muestra la curva de histéresis de la fase de movimiento V que, al invertir el movimiento la fuerza sísmica se reduce primero a $2F_{f2} = 2F_{f3}$, luego a $F_{dr1} - 2F_{f1}$ y finalmente se reduce a $F_{dr4} - 2F_{f4}$; teniendo una rigidez de $W/(R_{ef2} + R_{ef3})$.

Figura 16

Curva de histéresis de la fase V del aislador FPT



Nota. Tomado de Fenz & Constantinou, 2008

La ecuación 44 se considera para desplazamientos u como:

$$u_{dr4} < u < u_{max}$$

La capacidad de desplazamiento total de aislador triple péndulo fricción (u_{max}), llega a ser la suma de las capacidades de cada superficie, cuando $d_1 = d_4$ y $d_2 = d_3$, (Sarlis & Constantinou, 2013):

$$u_{max} = \sum_{i=1}^4 \frac{R_{efi}}{R_i} d_i \quad (45)$$

El factor (R_{efi}/R_i) reduce la capacidad de desplazamiento puesto que los deslizadores no solo se trasladan, también rotan.

En la tabla 2 se muestra un resumen de las fuerzas y desplazamientos del mecanismo del aislador FPT durante cada fase de movimiento, bajo las ciertas condiciones de restricción.

Tabla 2

Ecuaciones de fuerzas y desplazamientos del aislador FPT “Sarlis y Constantinou”

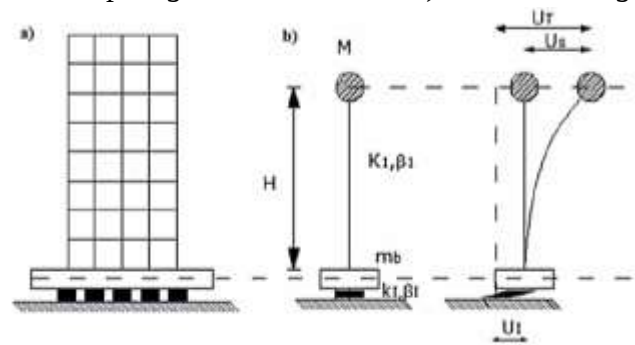
Fases	Descripción	Relación fuerza desplazamiento
I	Deslizamiento únicamente en superficies 2 y 3	$F = \frac{Wu}{R_{ef2} + R_{ef3}} + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}}$ Válido cuando: $F = F_{f1}$ $u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{ef3}$
II	El movimiento se detiene en la superficie 2: Deslizamiento en las superficies 1 y 3	$F = \frac{Wu}{R_{ef1} + R_{ef3}} + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}}$ Válido cuando: $F = F_{f4}$ $u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3})$
III	El movimiento se detiene en las superficies 2 y 3: Deslizamiento en las superficies 1 y 4	$F = \frac{Wu}{R_{ef1} + R_{ef4}} + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f4}(R_{ef4} - R_{ef3}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef4}}$ Válido cuando: $F_{dr1} = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1}$ $u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef4})$
IV	Contactos deslizantes Retenedor en la superficie 1: El movimiento permanece detenido en la superficie 3. Deslizamiento en las superficies 2 y 4	$F = \frac{(u - u_{dr1})W}{(R_{ef2} + R_{ef4})} + \frac{Wd_1}{R_{ef1}} + F_{f1}$ Válido cuando: $F_{dr4} = \frac{d_4 W}{R_{ef4}} + F_{f4}$ $u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{ef2} + R_{ef4})$
V	Los deslizadores se deslizan sobre las superficies 1 y 4: Deslizamiento sobre las superficies 2	$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{ef4}} d_{4+} + F_{f4}$
Supuestos:	$R_{ef1} = R_{ef4} > R_{ef1} = R_{ef4}; \mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4; d_1 > (u_4 - u_1)R_{ef1}; d_2 > (u_1 - u_2)R_{ef2}; d_3 > (u_4 - u_3)R_{ef3}$	

2.2.4. Análisis sísmico

Para realizar el análisis sísmico de una edificación con sistema de asilamiento es fundamental transformar el sistema de múltiples grados de libertad a un sistema de un solo grado de libertad. El modelo de un grado de libertad ignora la flexibilidad de la superestructura y concentra todas las deformaciones en el sistema de aislación, provocando que la superestructura se mueva como un cuerpo rígido. (SEAOC, 2012)

Figura 17

Idealización a) Sistema de múltiples grados de libertad b) Sistema de 1 grado de libertad

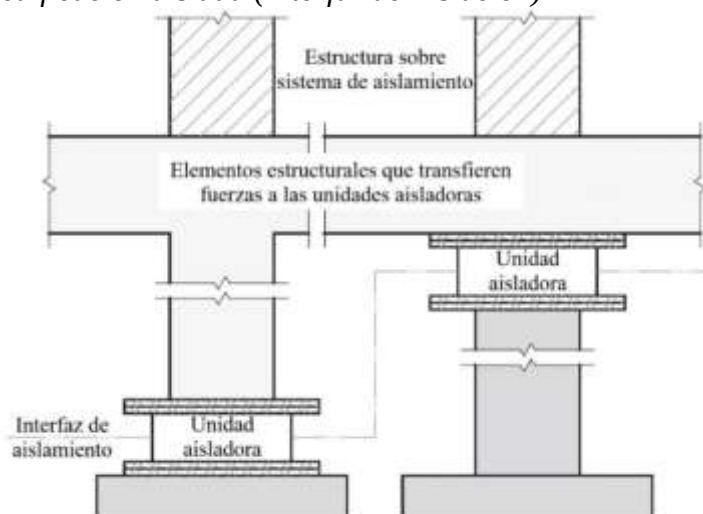


Nota. Tomado de Yenidogan, 2021

El sistema de aislamiento sísmico no solo incluye las unidades de aislación (aisladores), sino también elementos estructurales (columnas y vigas de conexión) esenciales para garantizar su correcto desempeño, ubicadas sobre las unidades de aislación cuya función es resistir momentos generados por el desplazamiento del sistema, ya que su deformación o falla podría comprometer la estabilidad de las unidades de aislación. (ASCE/SEI 7-16, 2017)

Figura 18

Elementos de una edificación aislada (Interfaz de Aislación)



Nota. Tomado del ASCE/SEI 7-16, 2017

El capítulo 17 del ASCE/SEI 7-16, titulado "Requisitos de Diseño Sísmico para Edificaciones Sísmicamente Aisladas" presenta un enfoque innovador para el análisis de edificaciones con sistemas de aislamiento sísmico, donde establece que los sistemas de aislación con aisladores de tipo péndulo friccional son capaces de minimizar o eliminar los movimientos torsionales.

2.2.4.1. Fuerza de restauración lateral

El sistema de aislamiento deberá configurarse de manera que, tanto para las propiedades de “límite inferior” (Lower Bound) como de “límite superior” (Upper Bound) del sistema, genere una fuerza de restauración lateral igual a la diferencia entre la fuerza lateral correspondiente al 100% y 50% del desplazamiento máximo y que esta sea mayor que 0,025 del peso sísmico (W).

$$F_{res} = F_{DM} - F_{0.5DM} > 0.025W \quad (46)$$

Donde:

F_{res} : Es la fuerza de restauración lateral.

F_{DM} : Es la fuerza lateral en el 100% del desplazamiento máximo.

$F_{0.5DM}$: Es la fuerza lateral en el 50% del desplazamiento máximo.

Para sistemas de aislación que tiene un comportamiento histérico bilineal, la fuerza de restauración lateral viene dada por:

$$F_{res} = \frac{K_d D_M}{2} > 0.025W \quad (47)$$

Donde:

K_d : Es la rigidez post fluencia del sistema de aislación.

D_M : Desplazamiento máximo en la fase de movimiento.

2.2.4.2. Métodos de análisis sísmicos

El capítulo 17 del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031, Se basa en el uso exclusivo del Sismo Máximo Considerado (MCE_R), con probabilidad del 2% de ser excedido en 50 años. Para realizar el análisis sísmico de una edificación con aislación sísmica se establece tres métodos:

- Para el análisis estático
 - Método de fuerza lateral equivalente (ELF)
- Para el análisis dinámico
 - Método de análisis respuesta espectral (RSA)
 - Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)

La normativa nos recomienda utilizar para este tipo de investigación el método ELF (estático) y el método NLRHA (dinámico). Además, que se realicen dos análisis, uno con las propiedades de límite inferior (Lower Bound) y otro con las propiedades de límite superior (Upper Bound).

2.2.4.2.1. Análisis estático: Método de fuerza lateral equivalente (ELF)

El análisis estático utiliza el método ELF que se basa en las características de deformación del sistema de aislamiento. Es importante resaltar que debe cumplir con algunos requisitos, como:

1. El período efectivo de la edificación aislada en el desplazamiento máximo, es menor o igual a 5,0 seg.
2. El amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo, es menor o igual al 30%.
3. El período efectivo de la edificación aislada en el desplazamiento de diseño, es tres veces mayor que el período de base fija.
4. La edificación sobre el sistema de aislamiento no debe tener irregularidad estructural, salvo si su configuración estructural tiene irregularidad horizontal de tipo 1b o irregularidad vertical tipo 1a, 1b, 5a y 5b.
5. El sistema de aislamiento cumple todos los criterios siguientes:
 - a) La rigidez efectiva del sistema de aislamiento en el desplazamiento traslacional es mayor que un tercio de la rigidez efectiva en el 20% del desplazamiento máximo.
 - b) El sistema de aislamiento es capaz de producir una fuerza de restauración mayor o igual a $0.025W$.
 - c) El desplazamiento total máximo no puede ser menor que el 1.15 del valor del desplazamiento máximo considerado.

Los parámetros necesarios para realizar un análisis estático, utilizando el método de fuerza lateral equivalente se describen a continuación:

Desplazamiento lateral mínimo

- **Desplazamiento máximo (D_M)**

Es el desplazamiento del sistema de aislamiento en la dirección más crítica de la respuesta horizontal, se calcula usando la ecuación:

$$D_M = \frac{S_{M1} T_M^2}{4\pi^2 B_M} \quad (48)$$

Dónde:

S_{M1} : Máxima aceleración espectral para diseño con un 5% de amortiguamiento crítico para periodos de 1seg. (g)

T_M : Período efectivo de la edificación sísmicamente aislada, con el desplazamiento máximo en la dirección considerada. (seg)

B_M : Coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo (β_M) del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo esperado.

- **Rigidez efectiva (K_M)**

Es la rigidez del sistema de aislamiento respecto al desplazamiento máximo considerado, se calcula utilizando fuerza-deflexión tanto para propiedades de límite inferior (Lower Bound) como de límite superior (Upper Bound), la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$K_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M} \quad (49)$$

Dónde:

$\sum |F_M^+|$: Suma, para todas unidades aislantes, del valor de fuerza absoluta en un desplazamiento positivo igual a D_M . (ton – mm)

$\sum |F_M^-|$: Suma, para todas unidades aislantes, del valor de fuerza absoluta en un desplazamiento negativo igual a D_M . (ton – mm)

- **Período efectivo (T_M)**

Es el período de la edificación aislada en el desplazamiento máximo esperado, se determinará según las características de deformación del sistema de aislamiento, así:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}} \quad (50)$$

Dónde:

W : Peso sísmico de la edificación sobre la interfaz de aislamiento. (ton)

- **Amortiguamiento efectivo (β_M)**

Es el amortiguamiento del sistema de aislamiento respecto al desplazamiento máximo considerado, está dada por la siguiente ecuación:

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M (D_M)^2} \quad (51)$$

Dónde:

E_M : Energía total disipada del sistema de aislamiento en un ciclo de histéresis. (ton – mm)

- **Coeficiente de amortiguamiento efectivo (B_M)**

El coeficiente de amortiguamiento se calcula con la interpolación lineal con los valores del amortiguamiento efectivo de tabla 17.15 del capítulo 17 “Requisitos de diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico” del ASCE/SEI 7-16.

- **Desplazamiento total máximo (D_{TM})**

Es el desplazamiento de los elementos de un sistema de aislamiento que incluirá el desplazamiento adicional producto de la torsión real y accidental calculada a partir de la distribución espacial uniforme de la rigidez lateral y la ubicación más desventajosa del sistema de aislamiento.

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (52)$$

Dónde:

y : Distancia entre los centros de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la carga sísmica considerada. (mm)

e : Excentricidad real en planta entre el centro de masa de la edificación por encima de la interfaz de aislamiento y su centro de la rigidez, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión en planta más larga de la edificación perpendicular a la dirección de la fuerza bajo consideración. (mm)

b : Dimensión en planta más larga de la edificación. (mm)

d : Dimensión en planta más corta de la edificación medida perpendicular a b . (mm)

P_T : Relación del período de traslación efectivo al período de torsión efectivo del sistema de aislamiento no inferior a 1,0.

El periodo de traslación efectivo se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_T = \frac{1}{r_I} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (53)$$

Dónde:

x_i, y_i : Distancias horizontales desde el centro de masa hasta la i -ésima unidad aisladora en los dos ejes horizontales del sistema de aislamiento. (mm)

N : Número de unidades aislantes.

El radio de giro se calcula con la siguiente ecuación:

$$r_I = \sqrt{\frac{b^2 + d^2}{12}} \quad (54)$$

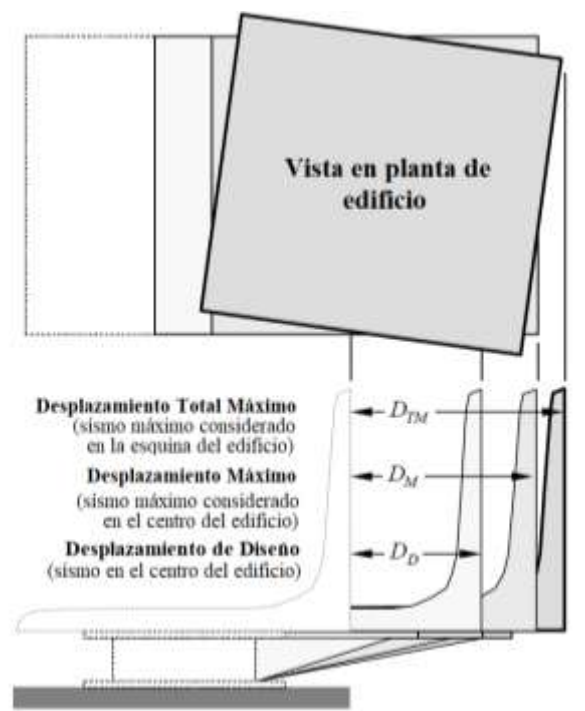
Para sistemas de aislamiento de dimensión en planta rectangular se calcula, así:

$$r_I = b \cdot d \quad (55)$$

Las ecuaciones para determinar el desplazamiento total, se basan en la configuración en planta de una edificación que incluye los efectos de la excentricidad de la masa de la edificación y la rigidez del aislamiento. El aumento del desplazamiento en las esquinas para una excentricidad de masa del 5 % es aproximadamente del 15 %. La figura 19 nos muestra los desplazamientos a la que está expuesta una edificación. (ASCE/SEI 7-16, 2017)

Figura 19

Desplazamiento de Diseño, Máximo y Total Máximo



Nota. Tomado del ASCE/SEI 7-16, 2017

Fuerza sísmica lateral mínima

- **Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base**

El sistema de aislamiento y los elementos estructurales debajo del nivel de base deberá resistir una fuerza sísmica lateral mínima V_b expresada en ton, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$V_b = K_M D_M \quad (56)$$

- **Elementos estructurales por encima del nivel de base**

Todos los elementos estructurales sobre el nivel de base deberán resistir una fuerza sísmica lateral mínima V_s expresada en ton, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad (57)$$

Dónde:

R_I : Factor de modificación de respuesta para el diseño de la superestructura, se calcula como $3/8 R$, sujeto al límite $1.0 < R_I < 2.0$.

Sí el factor de modificación de respuesta (R_I) es mayor a 2.0, bajo las condiciones que la fuerza sísmica lateral de la edificación por encima del nivel base sea al menos 1.1 veces de V_b . La fuerza sísmica lateral no reducida en los elementos por encima del nivel base se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{st} = \left(\frac{W_S}{W} \right)^{1-2.5\beta_M} \quad (58)$$

Dónde:

W : Carga reactiva de la edificación sobre la interfaz de aislación. (ton)

W_S : Carga reactiva de la edificación sobre la interfaz de aislación, excluyendo la carga reactiva del nivel de base. (ton)

Límites de fuerza sísmica lateral mínima (V_s)

la fuerza sísmica lateral mínima V_s no deber ser menor a:

1. La fuerza cortante para una edificación de base fija con peso sísmico (W_s), y un periodo igual al periodo aislador (T_M).

2. La fuerza cortante V_{st} , haciendo uso de la ecuación 58, con la fuerza cortante V_b , igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislamiento sísmico utilizando el mayor valor de los siguientes criterios:

- Las propiedades más críticas del sistema de aislamiento sísmico correspondiente al límite superior (Upper Bound).
- 1.5 veces las propiedades nominales requeridas para activar completamente el sistema de aislamiento sísmico.
- La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizando después de un ciclo dinámico completo en el desplazamiento D_M .

La fuerza sísmica lateral V_s , se distribuirá entre los distintos niveles de la edificación sobre el nivel de base, usando las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = \frac{(V_b - V_{st})}{R_1} \quad (59)$$

$$F_x = C_{Vx} V_s \quad (60)$$

$$C_{Vx} = \frac{W_x h_x^K}{\sum_{i=2}^n W_i h_i^K} \quad (61)$$

$$K = 14 \beta_M T_{fb} \quad (62)$$

Donde:

F_1 : Fuerza sísmica lateral en el nivel de base. (ton)

F_x : Fuerza sísmica lateral en el nivel x. (ton)

C_{Vx} : Factor de distribución vertical.

V_s : Fuerza lateral total o cortante sobre elementos por encima del nivel de base. (ton)

W_i, W_x : Fracción de W , que está ubicada al nivel i o x.

h_i, h_x : Altura sobre la interfaz de aislamiento al nivel i o x, expresada en mm.

T_{fb} : Período fundamental de la edificación por encima del sistema de aislamiento suponiendo condiciones de base fija. (seg)

Límites de la distorsión angular de entrepiso o deriva

Para la distorsión de entrepiso o deriva se tendrá en cuenta los siguientes criterios:

- La máxima deriva en la estructura por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0035.
- La deriva se calcula multiplicando por R_o , con los valores obtenidos de la superestructura al aplicar las fuerzas distribuidas correspondientes a la fuerza cortante de diseño (V_s).

2.2.4.2.2. Análisis dinámico: Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)

El análisis dinámico utilizando el método NLRHA, es muy complejo, conllevando a obtener resultados más exactos, debido a que incorpora las características de fuerza-deflexión de los elementos no lineales del sistema de aislamiento resistente a fuerzas sísmicas producidas. Hay ciertos requisitos que se deben tener en cuenta para poder aplicar este método de análisis, como:

- Se deberá obtener como mínimo 7 pares de registros sísmicos horizontales escalados respecto a las aceleraciones espectrales de MCE_R con probabilidad del 2% de ser excedido en 50 años.
- Para registros que coincidan espectralmente, cada par de movimientos se escalará de manera que el período oscile entre $0,20 T_M$ (calculado para propiedades de límite superior “Upper Bound”) y $1,25 T_M$ (calculado para las propiedades de límite inferior “Lower Bound”). El espectro de respuesta de un componente del par es al menos el 90% de la ordenada correspondiente del espectro de respuesta del MCE_R .

Es importante resaltar que los resultados obtenidos con el método NLRHA está estrictamente limitado a los resultados con el análisis estático utilizando el método ELF.

Desplazamiento lateral mínimo

- **Desplazamiento máximo (D'_M)**

El desplazamiento D'_M del sistema de aislamiento no se considerará inferior al 80% del desplazamiento D_{TM} . Permitiendo hacer uso de D'_M en lugar de D_M .

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (63)$$

Dónde:

T : Período elástico de base fija de la edificación sobre el sistema de aislamiento. (seg)

Fuerza sísmica lateral mínima

- **Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base**

El sistema de aislamiento y los elementos estructurales debajo del nivel de base deberá resistir una fuerza sísmica lateral mínima no menor al 90 % de la fuerza cortante lateral.

- **Elementos estructurales por encima del nivel de base**

Todos los elementos estructurales sobre el nivel de base deberán resistir una fuerza sísmica lateral mínima no menor a:

- Al 80% V_b para edificaciones regulares.
- Al 100% V_b para edificaciones irregulares.

- **Límites de la distorsión angular de entrepiso o deriva**

La máxima deriva de entrepiso de la superestructura calculado con el método NLRHA, considerando las características de fuerza- deformación no debe exceder 0.005.

2.3. Definición de términos básicos

Aislador triple péndulo fricción: Es un elemento flexible que proporciona al sistema de aislamiento propiedades requeridas de baja rigidez horizontal y de alta rigidez vertical (rigidez de compresión). Dispositivo utilizado para reducir la transferencia de vibraciones sísmicas a la edificación.

Análisis dinámico: Es un método de análisis estructural que se utiliza para estudiar el comportamiento de una edificación bajo cargas dinámicas, es decir, cargas que varían con el tiempo.

Análisis estático: Es un método de análisis estructural que se utiliza para determinar las fuerzas y deformaciones en una edificación bajo cargas estáticas, es decir, cargas que no varían con el tiempo.

Interfaz de aislación: Se refiere al límite comprendido entre la parte superior aislada de la edificación (superestructura) y la parte inferior de la edificación (subestructura) que se desplaza rígidamente con el suelo.

Nivel de base: Es el primer nivel de la edificación aislada que está sobre la interfaz de aislación.

Sistema de aislamiento sísmico: Es una técnica de ingeniería que se utiliza para proteger edificaciones de los efectos ante un sismo. Formado por un conjunto de dispositivos que se colocan entre la superestructura de la edificación y su cimentación, permitiendo que esta se mueva de manera independiente del suelo durante un sismo.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

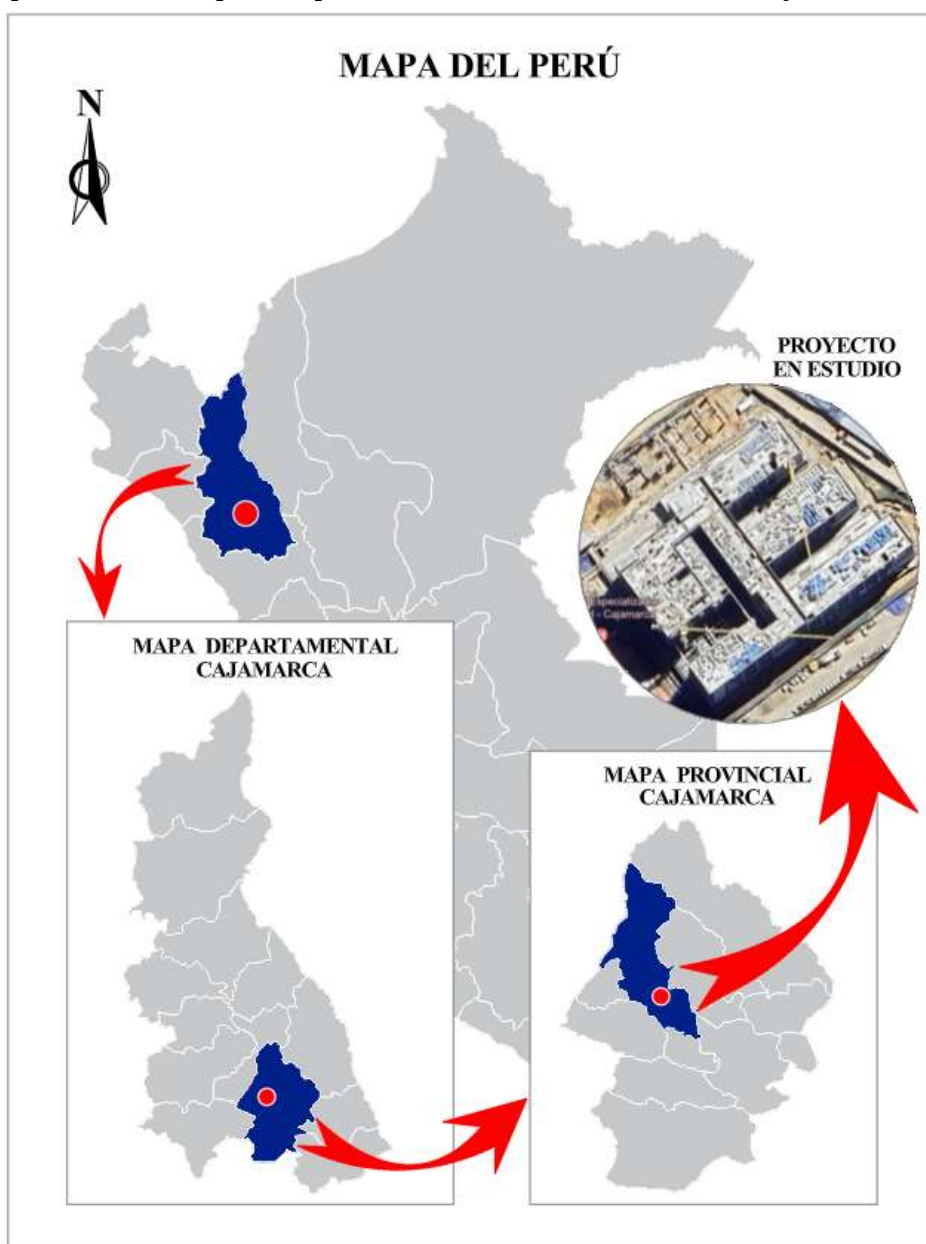
3.1. Ubicación del objeto de estudio

3.1.1. Ubicación política

La edificación del nuevo hospital especializado en la red asistencial de Cajamarca – EsSalud se ubica en la ciudad de Cajamarca, distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca y departamento de Cajamarca.

Figura 20

Ubicación política del Hospital Especializado en la Red Asistencial Cajamarca – EsSalud



Nota. Adaptado como referencia del instituto geográfico nacional IGN

3.1.2. Ubicación geográfica

Tabla 3

Ubicación geográfica del Hospital Especializado en la Red Asistencial Cajamarca – EsSalud

Coordenadas Geográficas (WGS 84 ZONA17)		
Norte	Este	Cota
9206032.383	777316.563	2681.973

3.2. Tiempo o época de investigación

La presente investigación se desarrolló durante el periodo 2024 – 2025.

3.3. Materiales y equipos

- Planos estructurales de la edificación.
- Especificaciones técnicas del aislador (FPT8833/16-12R/12-7).
- Computadora con alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos.

3.4. Metodología

3.4.1. Enfoque de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, usa modelos matemáticos y datos numéricos en el análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT.

3.4.2. Tipo de investigación

Es una investigación aplicada, se utilizó las teorías sobre aislamiento sísmico para analizar el comportamiento del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT al suscitarse un sismo, buscando encontrar las consecuencias en base al cumplimiento de lo normado en el ASCE/SEI 7-16 y en la NTP E.031.

3.4.3. Nivel de investigación

La investigación tiene un nivel descriptivo – correlacional, caracteriza y analiza las causas, problemas y fallas que pueda presentar el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT a través de los resultados de su comportamiento histerético, relacionando los desplazamientos máximos y fuerzas cortantes de los dispositivos.

3.4.4. Diseño de la investigación

La investigación es no experimental, se realizó una simulación computacional con el software de análisis ETABS, brindando resultados próximos al comportamiento real del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, pero sin realizar pruebas o ensayos físicos.

3.4.5. Método de investigación

- **Deductivo – Inductivo:** Partiendo de teorías y normas como el ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031 se analiza y evalúa el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, llegando a resultados y conclusiones particulares.
- **Analítico – Sintético:** Se realiza un análisis de las propiedades mecánicas del aislador FPT, para luego incorporándolo al sistema de aislamiento sísmico de la edificación, obteniendo resultados generales de su comportamiento.

3.5. Población

La población de la investigación es el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

3.6. Muestra de estudio

Se tomo como muestra el edificio principal del hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

3.7. Unidad de análisis

La investigación tiene por unidad de análisis al sistema de aislamiento sísmico con aisladores triple péndulo fricción en el edificio principal del hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

3.8. Técnicas e instrumentos de investigación

- **Técnica de investigación:** “*Revisión Documentaria*”
 - Libros, artículos, guías y manuales de aisladores triple péndulo fricción (FPT).
 - Normativas de aislamiento sísmico.
 - Expediente técnico del hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud.

- Registros sísmicos más representativos de Perú, Chile y Ecuador.

- **Instrumentos de investigación**

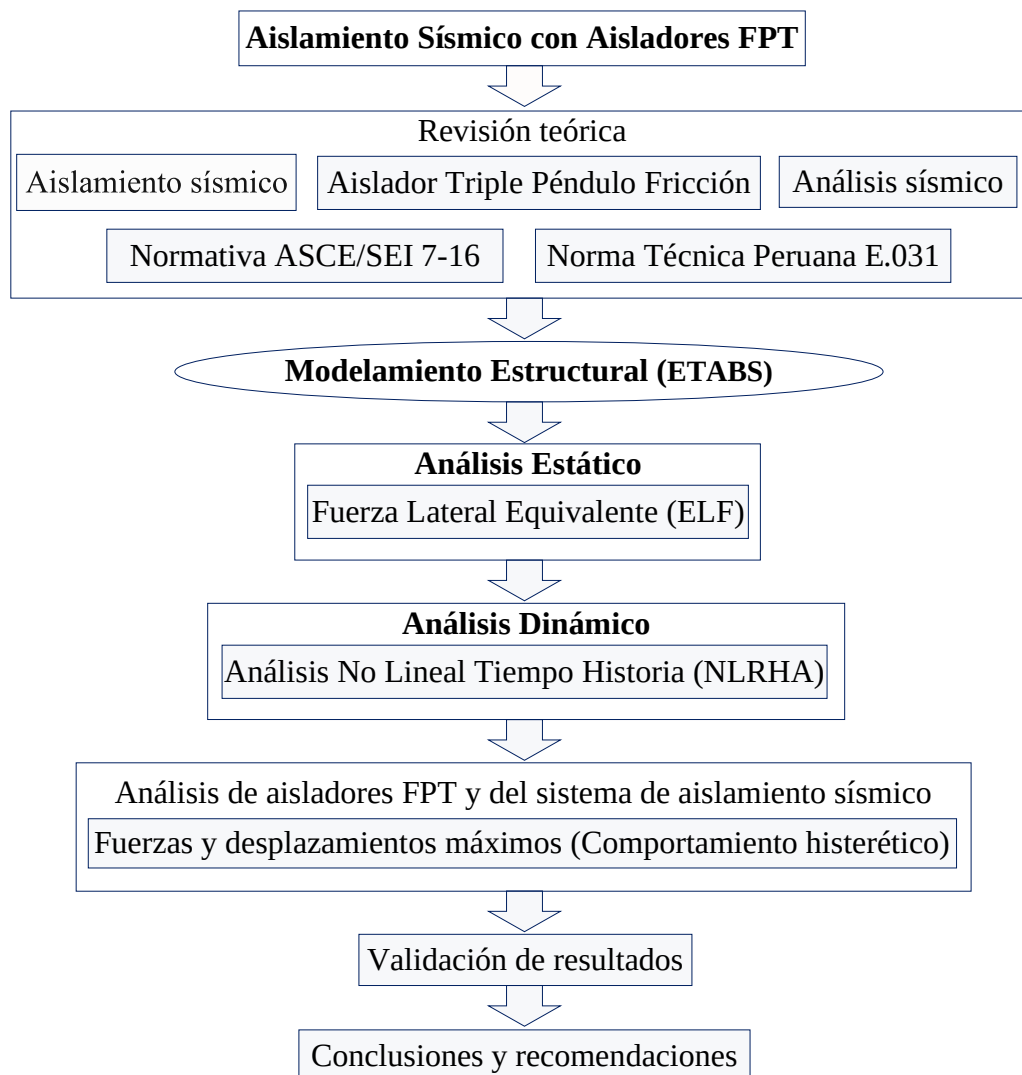
- Software de Microsoft Word y Excel.
- Software de ETABS / Vs. 20.3.0

3.9. Procedimiento

Con el siguiente diagrama de flujo de la figura 21 se muestra los procesos y pasos secuenciales realizados para el análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT del hospital especializado en la red asistencial de Cajamarca – EsSalud.

Figura 21

Diagrama de flujo del análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT

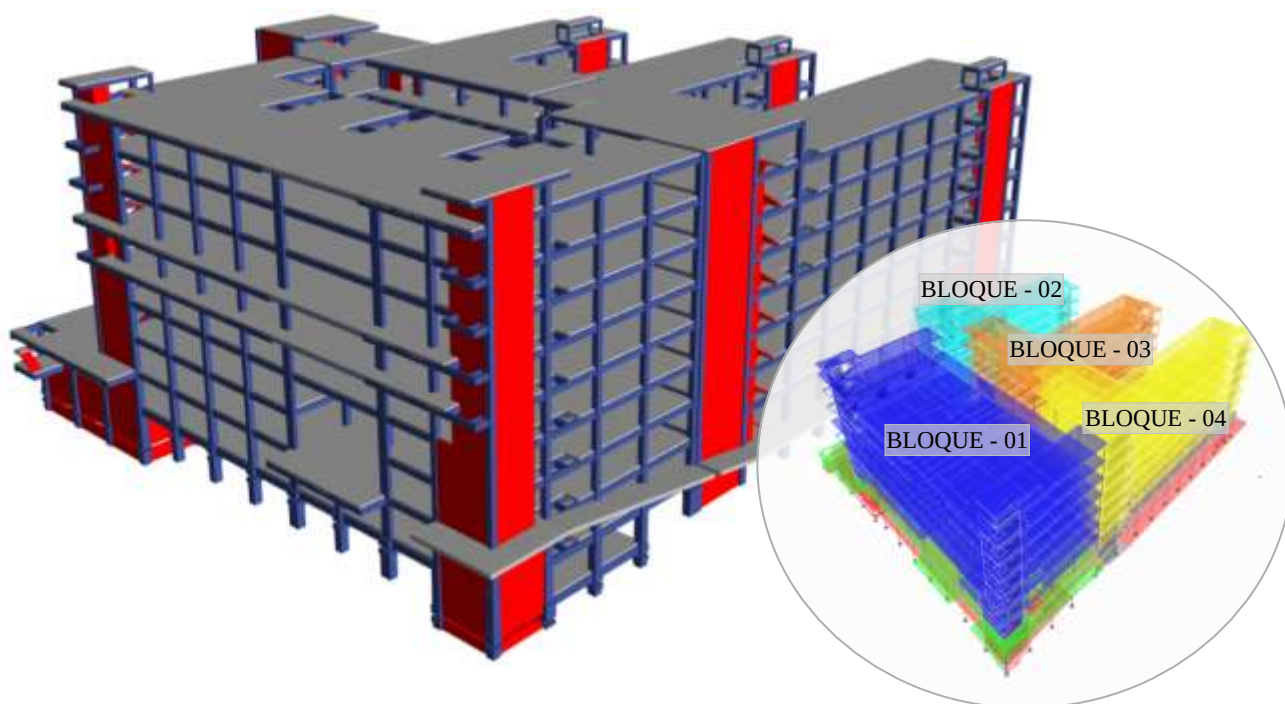


3.9.1. Descripción de la edificación

La edificación en elevación está compuesta por 9 niveles construidos, con alturas de entrepiso de 4.42 m en 8 niveles y 7.42 m en la base (42.78 m de altura total); 7 de los cuales están considerados sobre la rasante y en la subrasante se proyectan los otros 2 niveles funcionando como sótanos. Las dimensiones en planta son de 79.2 m x 101.7 m, consta de 1 bloque principal (del nivel 1 al 7) y de 3 bloques paralelos proyectados perpendicularmente al bloque 1 (del nivel 1 al 6). Al nivel del sótano 1 se unen los 3 bloques paralelos quedando la edificación dividida en 2 bloques. Finalmente, al nivel del sótano 2 se unen los 2 bloques haciendo la edificación en un solo bloque. Así mismo, a este nivel presenta un sistema de aislamiento sísmico compuesto por 184 aisladores triple péndulo fricción (FPT).

Figura 22

Vista en 3D del hospital especializado en la red asistencial de Cajamarca – EsSalud



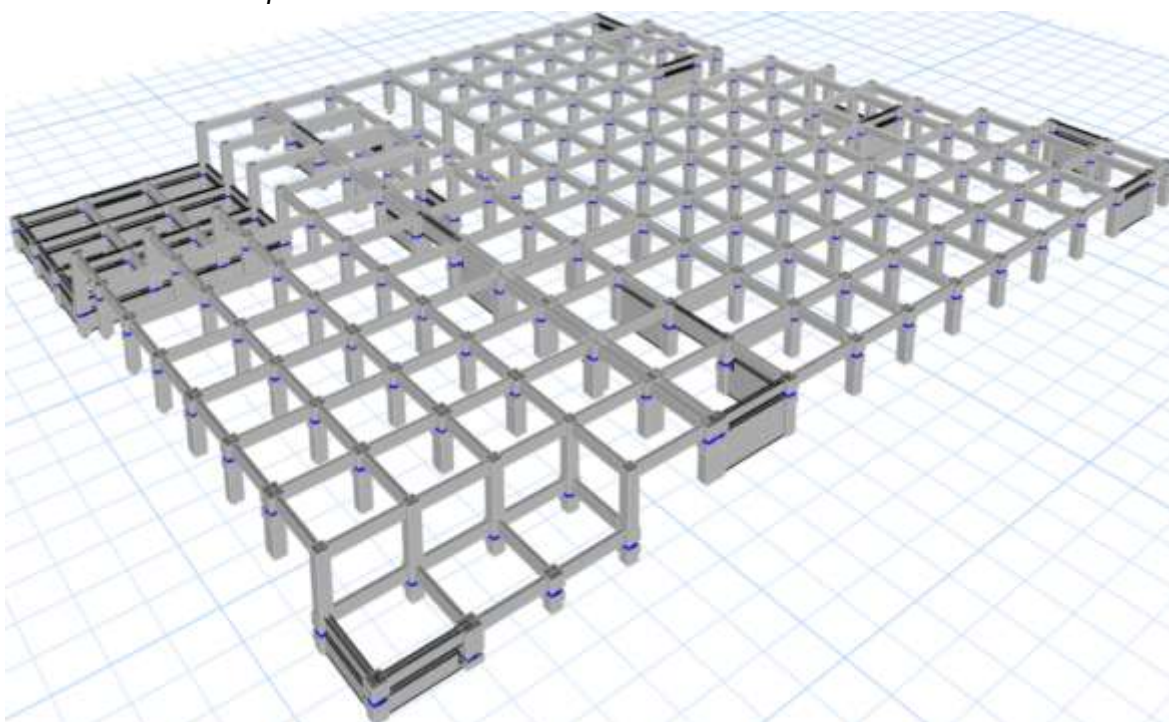
La edificación presenta un sistema estructural de tipo DUAL (con pórticos y muros estructurales), tal como se muestra en la figura 22, con columnas de dimensiones de 1.00 x 1.00 m en el segundo sótano, de 0.80 x 0.80 m en el primer sótano y de 0.70 x 0.70 m en los niveles superiores junto con placas con espesor por lo general de 0.30 m. Las vigas principales tienen sección de 0.40 x 0.90 m para el sistema de aislamiento y sección de 0.35 x 0.70 m para los niveles superiores. Presenta losas macizas de espesor de 0.35 m para la cisterna, de 0.20 m para los sótanos y niveles superiores de la edificación, además de losas colaborantes con peralte de 0.12 m soportadas por vigas metálicas tipo “I” y de columnas metálicas cuadradas.

- **Sistema de aislamiento sísmico**

Teniendo en cuenta la categoría de la edificación (A1: Establecimiento de salud) y la zona sísmica (Z3: Sismicidad alta), con sustento de la NTP E.030, la edificación presenta un sistema de aislamiento sísmico, el cual está compuesto por 184 aisladores triple péndulo fricción AISL-T1 (FPT8833/16-12R/12-7) montados en diferentes niveles sobre capiteles y pedestales de sección regular e irregular que a su vez estos están conectados mediante vigas de aislamiento, como se muestra en la figura 23.

Figura 23

Vista en 3D del interfaz del sistema de aislamiento sísmico



3.9.2. Cargas de la edificación

Para las cargas verticales se estimó toda carga que está sobre el interfaz de aislamiento sísmico, evaluadas conforme a la NTP E.020 (Cargas) del reglamento nacional de edificaciones, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Carga muerta (D)**

Se consideró todas las cargas permanentes tales como el peso propio de elementos estructurales y no estructurales, tabiques, terminaciones y equipos. Los pesos específicos empleados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4*Pesos específicos para la carga muerta*

Material	Peso Específico
Concreto	2400 kg/m ³
Piso terminado	100 kg/m ²
Tabiquería	100 kg/m ²
Metálico	A-36

Nota. Tomado del NTP E.020

Puesto que la tabiquería presenta una alta densidad en un paño de losa, se consideró 100 kg /m² como carga muerta repartida (Ver tabla 4). Además, la edificación en algunos paños presenta tabiquería fija (con vigas, columnas de confinamiento y ladrillo sílico calcáreo - 11H) en la parte interna y muros cortina (con placas de ladrillo sílico calcáreo - P14) en la parte perimetral de cada piso, tomando en cuenta su peso y ubicación real según los planos (ver tabla 5).

Tabla 5*Cargas de tabiquería fija de muros internos y muros cortina*

Tipo de tabique	Peso Específico
Muros internos	1130.225 kg/ml
Muros cortina	1210.236 kg/ml

Nota. Cargas calculadas de acuerdo a la ficha técnica del material

- **Carga viva (L)**

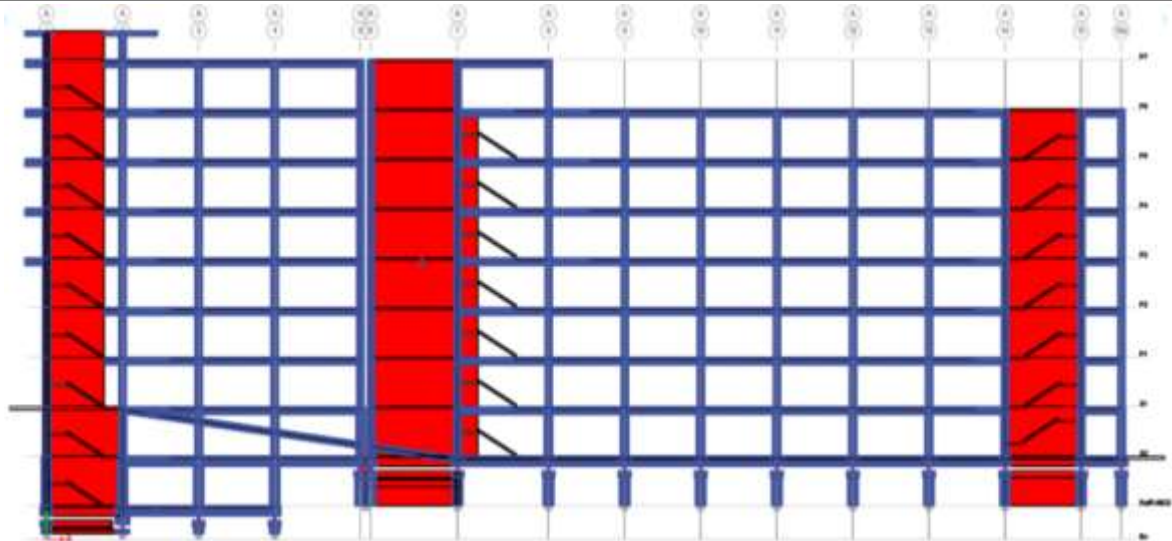
Se consideró el peso de las cargas según su ocupación, además del peso y el empuje lateral del fluido concentrado en el tanque cisterna. Las sobrecargas empleadas para los distintos ambientes de la edificación se muestran en la tabla 6.

Tabla 6*Pesos específicos para la carga viva*

Ambiente	Peso Específico
Corredores y escaleras	400 kg/m ²
Sala de operaciones, laboratorios, zonas de servicio.	300 kg/m ²
Cuartos	200 kg/m ²
Azotea	100 kg/m ²

Nota. Tomado del NTP E.020

Para losas que estén cargadas por un ambiente y corredor se consideró una carga repartida promedio de 350 kg/m².

Tabla 7*Cargas de la edificación por niveles*


Niveles	Carga Muerta - D (ton)			Carga Viva - L (ton)		
	P. P	Tabiq.	Term.	Viva	Techo	Fluido
Piso 7	2557.8118	334.1691	283.6544	45.3891	269.3552	0.0000
Piso 6	4411.0377	1114.0184	482.6688	906.0300	193.3584	0.0000
Piso 5	4394.0235	1491.0519	470.6688	1529.5388	0.0000	0.0000
Piso 4	4458.2349	1511.9485	478.6864	1500.2789	12.2150	0.0000
Piso 3	4955.5711	1608.6645	548.1056	1838.3323	0.0000	0.0000
Piso 2	4851.7510	1575.8607	528.9031	1720.7792	0.0000	0.0000
Piso 1	5063.3179	1461.0123	533.4853	1887.9305	0.0000	0.0000
Sótano 1	6717.5881	1518.7140	716.7377	2394.6368	0.0000	0.0000
Sótano 2 (Aisl.)	8344.1141	2116.7896	874.2563	2891.6232	0.0000	1746.0139
Total	45753.4500	12732.2290	4917.1665	14714.5388	474.9286	1746.0345

En base la normativa NTP E.030 (Diseño sismorresistente), del capítulo 4.3 “*Estimación de Peso*”. El peso sísmico (W) se calculó con la siguiente combinación de cargas:

$$W = 1.0 (D) + 0.50 (C.Viva) + \underbrace{0.25 (C.Techo) + 1.0 (C.Fluido)}_{SC}$$

Obteniendo un valor de: $W = 72624.8817$ ton. (Requerido para el análisis sísmico a realizar)

3.9.3. Peligro sísmico

Para poder realizar el análisis del sistema de aislamiento sísmico de la edificación, primero se estimó la aceleración espectral del sismo máximo considerado (MCE_R) en función de la aceleración espectral del sismo de diseño (DE), para ello se utilizó un espectro elástico de pseudo-aceleraciones (S_a), haciendo uso de la NTP E.031, cuya ecuación está definida por:

$$S_a = 1.5 ZUCSg$$

Además, se consideró los factores sísmicos de la edificación, teniendo en cuenta la zonificación (Z), la categoría de la edificación (U) y los parámetros de sitio (S , T_P y T_L), los cuales están establecidos por la NTP E.030 (diseño sismorresistente).

Tabla 8

Factores sísmicos para la aceleración espectral

	Factor	Valor
Z	Factor de zona (zona 3)	0.35
U	Factor de uso o importancia (Categoría “A”- con aislamiento)	1
S	Factor de amplificación del suelo (suelo intermedio - S_2)	1.15
T_P	Periodo del suelo para definir la plataforma del espectro	0.6
T_L	Periodo para definir el inicio de la zona del espectro con desplazamiento constante.	2

Nota. Considerando la NTP E.031

El factor de amplificación sísmica (C) está definido por las siguientes expresiones:

$$T < 0.2T_P; \quad C = 1 + 7.5 \left(\frac{T}{T_P} \right)$$

$$0.2 T_P < T < T_P; \quad C = 2,5$$

$$T_P < T < T_L; \quad C = 2,5 \left(\frac{T_P}{T} \right)$$

$$T > T_L; \quad C = 2,5 \left(\frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right)$$

La figura 24 muestra la aceleración espectral del sismo de diseño (DE) y del sismo máximo considerado (MCE_R), teniendo en cuenta los valores de la tabla 9.

Figura 24

Aceleración espectral para DE y MCE_R

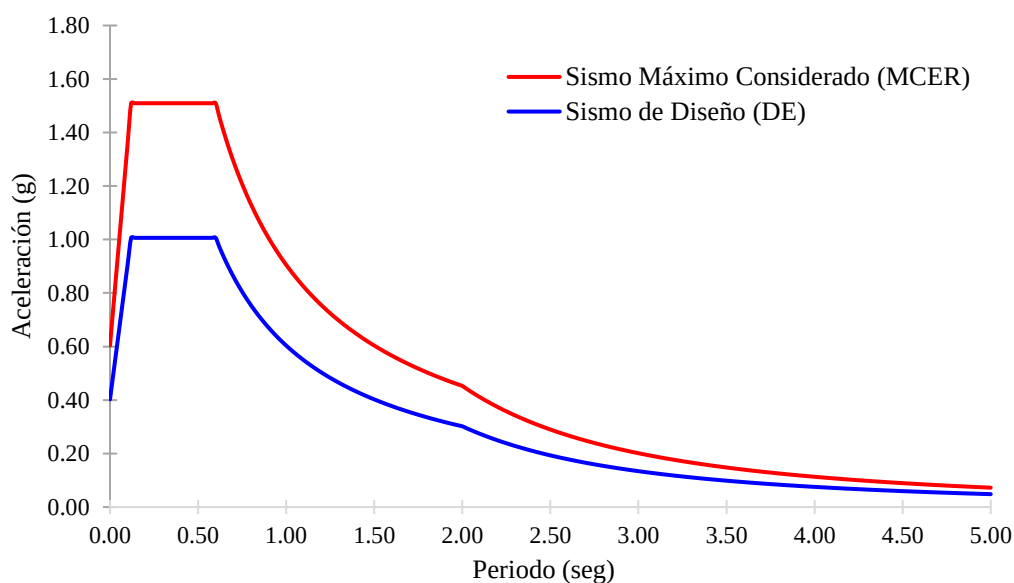


Tabla 9*Aceleración espectral para DE y MCE_R*

T Periodo [s]	C Factor amplificación [-]	Sa Sismo de diseño (DE) [cm/s²]	Sa Máximo sismo considerado (MCE_R) [cm/s²]	T Periodo [s]	C Factor amplificación [-]	Sa Sismo de diseño (DE) [cm/s²]	Sa Máximo sismo considerado (MCE_R) [cm/s²]
0.00	1.00	0.4030	0.6040	2.45	0.50	0.2012	0.3017
0.02	1.25	0.5031	0.7547	2.50	0.48	0.1932	0.2898
0.04	1.50	0.6038	0.9056	2.55	0.46	0.1857	0.2785
0.06	1.75	0.7044	1.0566	2.60	0.44	0.1786	0.2679
0.08	2.00	0.8050	1.2075	2.65	0.43	0.1719	0.2579
0.10	2.25	0.9056	1.3584	2.70	0.41	0.1656	0.2485
0.12	2.50	1.0063	1.5094	2.75	0.40	0.1597	0.2395
0.20	2.50	1.0063	1.5094	2.80	0.38	0.1540	0.2310
0.25	2.50	1.0063	1.5094	2.85	0.37	0.1487	0.2230
0.30	2.50	1.0063	1.5094	2.90	0.36	0.1436	0.2154
0.35	2.50	1.0063	1.5094	2.95	0.34	0.1388	0.2081
0.40	2.50	1.0063	1.5094	3.00	0.33	0.1342	0.2013
0.45	2.50	1.0063	1.5094	3.05	0.32	0.1298	0.1947
0.50	2.50	1.0063	1.5094	3.10	0.31	0.1257	0.1885
0.55	2.50	1.0063	1.5094	3.15	0.30	0.1217	0.1825
0.60	2.50	1.0063	1.5094	3.20	0.29	0.1179	0.1769
0.65	2.31	0.9288	1.3933	3.25	0.28	0.1143	0.1715
0.70	2.14	0.8625	1.2938	3.30	0.28	0.1109	0.1663
0.75	2.00	0.8050	1.2075	3.35	0.27	0.1076	0.1614
0.80	1.88	0.7547	1.1320	3.40	0.26	0.1045	0.1567
0.85	1.76	0.7103	1.0654	3.45	0.25	0.1014	0.1522
0.90	1.67	0.6708	1.0063	3.50	0.24	0.0986	0.1479
0.95	1.58	0.6355	0.9533	3.55	0.24	0.0958	0.1437
1.00	1.50	0.6038	0.9056	3.60	0.23	0.0932	0.1398
1.05	1.43	0.5750	0.8625	3.65	0.23	0.0906	0.1360
1.10	1.36	0.5489	0.8233	3.70	0.22	0.0882	0.1323
1.15	1.30	0.5250	0.7875	3.75	0.21	0.0859	0.1288
1.20	1.25	0.5031	0.7547	3.80	0.21	0.0836	0.1254
1.25	1.20	0.4830	0.7245	3.85	0.20	0.0815	0.1222
1.30	1.15	0.4644	0.6966	3.90	0.20	0.0794	0.1191
1.35	1.11	0.4472	0.6708	3.95	0.19	0.0774	0.1161
1.40	1.07	0.4313	0.6469	4.00	0.19	0.0755	0.1132
1.45	1.03	0.4164	0.6246	4.05	0.18	0.0736	0.1104
1.50	1.00	0.4025	0.6038	4.10	0.18	0.0718	0.1077
1.55	0.97	0.3895	0.5843	4.15	0.17	0.0701	0.1052
1.60	0.94	0.3773	0.5660	4.20	0.17	0.0685	0.1027
1.65	0.91	0.3659	0.5489	4.25	0.17	0.0669	0.1003
1.70	0.88	0.3551	0.5327	4.30	0.16	0.0653	0.0980
1.75	0.86	0.3450	0.5175	4.35	0.16	0.0638	0.0957
1.80	0.83	0.3354	0.5031	4.40	0.15	0.0624	0.0936
1.85	0.81	0.3264	0.4895	4.45	0.15	0.0610	0.0915
1.90	0.79	0.3178	0.4766	4.50	0.15	0.0596	0.0894
1.95	0.77	0.3096	0.4644	4.55	0.14	0.0583	0.0875
2.00	0.75	0.3019	0.4528	4.60	0.14	0.0571	0.0856
2.05	0.71	0.2873	0.4310	4.65	0.14	0.0558	0.0838
2.10	0.68	0.2738	0.4107	4.70	0.14	0.0547	0.0820
2.15	0.65	0.2612	0.3918	4.75	0.13	0.0535	0.0803
2.20	0.62	0.2495	0.3742	4.80	0.13	0.0524	0.0786
2.25	0.59	0.2385	0.3578	4.85	0.13	0.0513	0.0770
2.30	0.57	0.2283	0.3424	4.90	0.12	0.0503	0.0754
2.35	0.54	0.2187	0.3280	4.95	0.12	0.0493	0.0739
2.40	0.52	0.2096	0.3145	5.00	0.12	0.0483	0.0725

3.9.4. Mecanismo del aislador triple péndulo fricción (FPT)

3.9.4.1. Materiales del aislador FPT

El material del aislador tiene una capacidad de resistencia a compresión de 80 ksi. Las placas cóncavas y el deslizador son de acero ASTM A536, A576, A572, A108 o A36. Además, las superficies esféricas de las placas cóncavas son de acero inoxidable ASTM A240, grado 304.

3.9.4.2. Propiedades geométricas y mecánicas del aislador FPT

Las propiedades geométricas y mecánicas del aislador FPT están relacionadas entre sí. Los diámetros proporcionan la capacidad de desplazamiento del aislador, los coeficientes de fricción afectan los deslizamientos y los radios de curvatura afectan la rigidez lateral. En la figura 25 se muestran las propiedades geométricas y mecánicas del aislador en estudio contempladas en las de especificaciones técnicas del aislador.

Figura 25

Modelo AISL-T1 (FPT8833/16-12R/12-7)

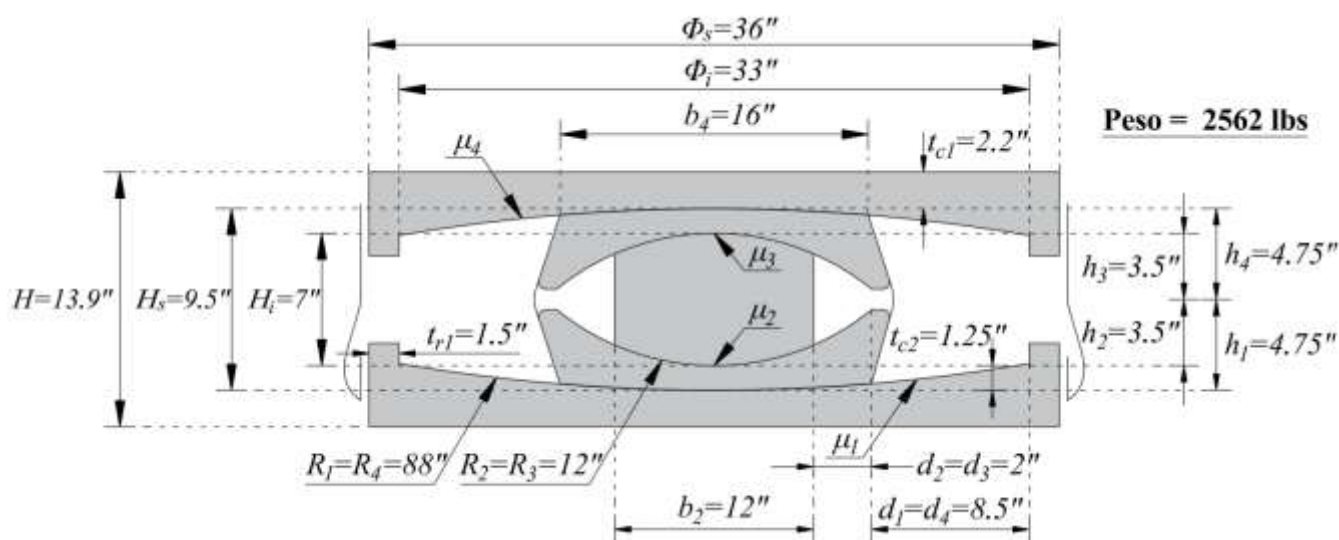


Tabla 10

Propiedades geométricas del aislador FPT

Propiedades geométricas		Pulg.	mm
Radio de curvatura de placa exterior	$R_1 = R_4$	88	2235.20
Radio de curvatura de placa interior	$R_2 = R_3$	12	304.80
Diámetro externo exterior	Φ_s	36	914.40
Diámetro externo interior	Φ_i	33	838.20
Diámetro interno exterior	b_4	16	406.40
Diámetro deslizador rígido	b_2	12	304.80
Espesor de anillo de retención de placa exterior	t_{r1}	1.5	38.10

Tabla 11*Propiedades mecánicas del aislador FPT*

Propiedades mecánicas		<i>Pulg.</i>	<i>mm</i>
Altura del mecanismo	H	13.9	353.06
Altura mecánica exterior	$h_1=h_4$	4.75	120.65
Altura mecánica interior	$h_2=h_3$	3.5	88.90
Altura mecánica exterior total	H_s	9.5	241.30
Altura mecánica interior total	H_i	7	177.80
Espesor de placa exterior	t_{c1}	2.2	55.88
Espesor de placa interior	t_{c2}	1.25	31.75
Capacidad de desplazamiento exterior	$d_1=d_4$	8.5	215.90
Capacidad de desplazamiento interior	$d_2=d_3$	2	50.80
Espesor del anillo de retención exterior	t_{r1}	1.5	38.10
Propiedades de fricción - Límite inferior (Lower Bound)			
Coeficiente de fricción de placa exterior inferior	μ_1		0.020
Coeficiente de fricción de placa exterior superior	μ_4		0.030
Coeficiente de fricción de placa interior	$\mu_2 = \mu_3$		0.005
Propiedades de fricción - Límite superior (Upper Bound)			
Coeficiente de fricción de placa exterior inferior	μ_1		0.030
Coeficiente de fricción de placa exterior superior	μ_4		0.040
Coeficiente de fricción de placa interior	$\mu_2 = \mu_3$		0.010

De la tabla 11, cabe mencionar que los valores de los coeficientes de fricción obtenidos de la ficha técnica del aislador FPT serán utilizados para calcular las propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) del sistema de aislamiento sísmico. Además, estos coeficientes de fricción fueron obtenidos a partir de un valor nominal del coeficiente de fricción de diseño para cada una de placas cóncavas externas e internas del aislador, este valor ha sido llevado a sus límites más críticos a través del uso de factores modificadores de propiedades (Factores Lambda).

- **Radio de curvatura efectivo (R_{efi})**

$$R_{efi} = R_i - h_i$$

Donde:

R_i : Radio de curvatura de la placa superior o inferior.

h_i : Altura del mecanismo interno o externo.

Tabla 12*Radio de curvatura efectivo*

Radio de curvatura efectivo		<i>Pulg.</i>	<i>mm</i>
Radio efectivo exterior	$R_{ef1}=R_{ef4}$	83.25	2114.55
Radio efectivo interior	$R_{ef2}=R_{ef3}$	8.50	215.90

3.9.4.3. Relación fuerza cortante normalizada – Desplazamiento del aislador FPT

La tabla 13 nos muestra los valores obtenidos de la fuerza cortante normalizada (V/W) y el desplazamiento (u) para cada fase de movimiento del aislador FPT, basado en la tabla 2 (*Teoría de Fenz y Michael Constantinou*), haciendo uso de las propiedades geométricas y mecánicas de la figura 25 y descritas en las tablas 10 y 11, resumiéndose a continuación:

Tabla 13

Relación de fuerza cortante normalizada – Desplazamiento del aislador FPT

Punto	Desplaz. (u)	Fuerza Cortante (V)	Límite Inferior (LB)		Límite Superior (UB)	
			u (mm)	V/W	u (mm)	V/W
I		$F_{f2} = F_{f3}$	0.0000	0.0050	0.0000	0.0100
II	$u = u^*$	F_{f1}	6.4770	0.0200	8.6360	0.0300
III	u^{**}	F_{f4}	29.7815	0.0300	31.9405	0.0400
IV	u_{dr1}	F_{dr1}	419.2905	0.1221	421.4495	0.1321
V	u_{dr4}	F_{dr4}	442.5950	0.1321	444.7540	0.1421
	$u_{m\acute{a}x}$		480.4593	-	480.4593	-

Las figuras 26 y 27 muestran el régimen de histéresis del aislador FPT para propiedades del límite inferior (Lower Bound) y límite superior (Upper Bound) respectivamente, al llegar a su máximo desplazamiento $u_{m\acute{a}x} = 480.4593$ mm (Ver ecuación 45)

Figura 26

Histéresis para el desplazamiento $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite inferior (LB)

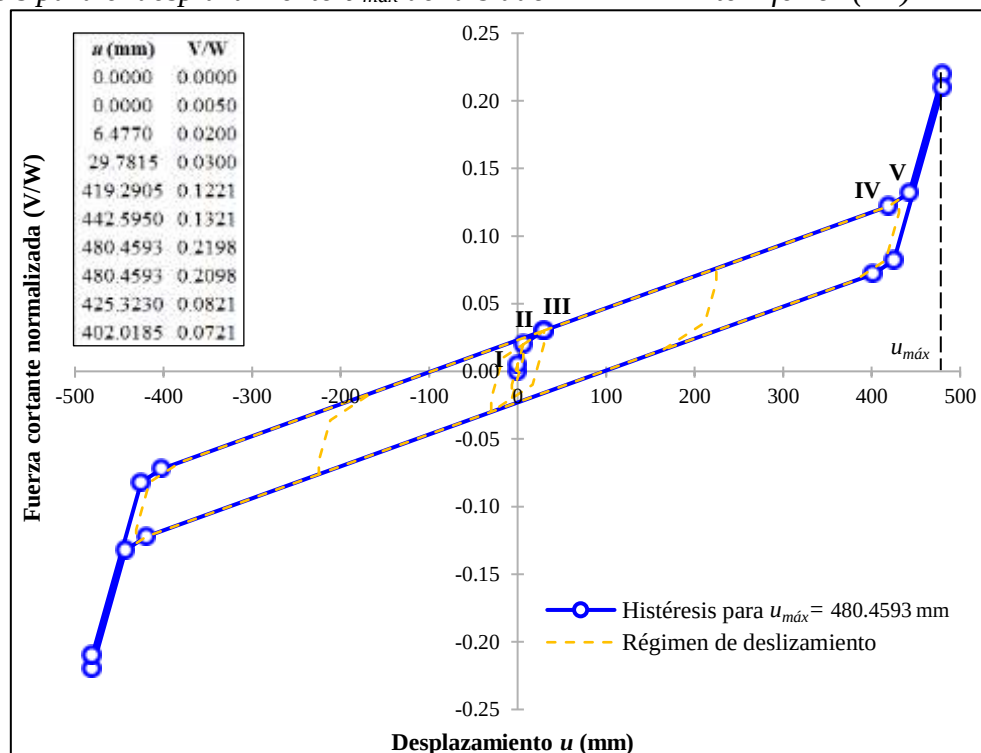
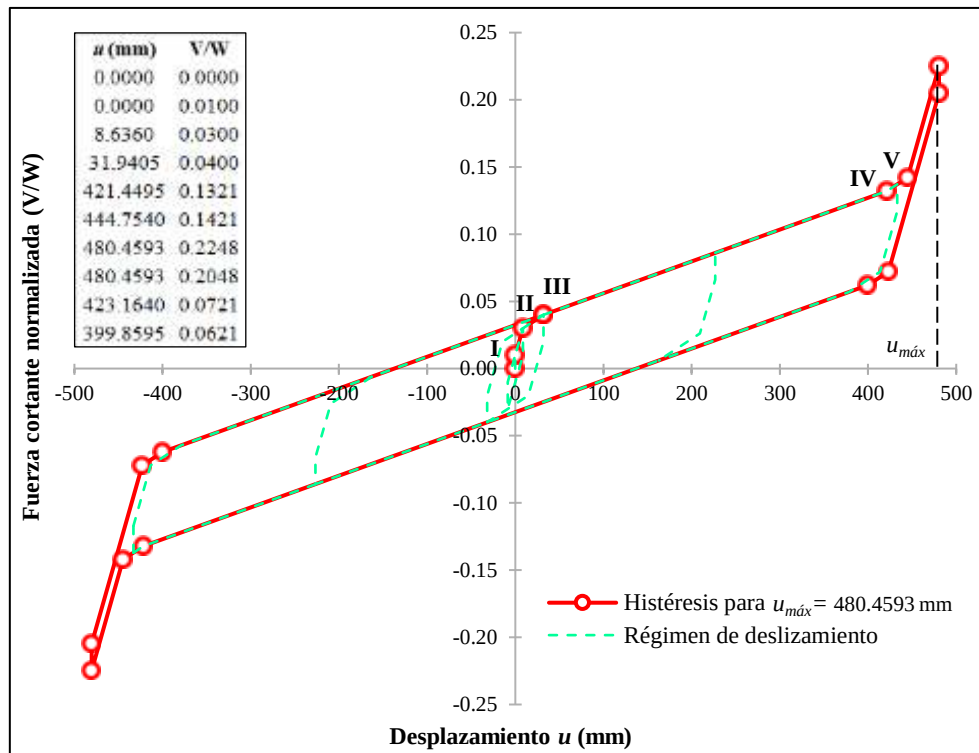


Figura 27

Histéresis para el desplazamiento $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite superior (UB)



3.9.5. Análisis sísmico

Teniendo en cuenta la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031 para realizar el análisis sísmico, se recomienda utilizar dos métodos de análisis.

- Análisis estático: *Método de análisis fuerza lateral equivalente (ELF)*
- Análisis dinámico: *Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)*

Las normativas establecen que se deben realizar dos análisis paralelos, uno para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y el otro para propiedades de límite superior (Upper Bound), además, indican que el método de análisis de fuerza lateral equivalente (ELF) se debe realizar en primera instancia ya que es imprescindible para poder controlar los resultados del método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA).

3.9.5.1. Análisis estático con el método fuerza lateral equivalente (ELF)

Para realizar el análisis estático con el método ELF y determinar las propiedades del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT se tomó en cuenta las propiedades geométricas y mecánicas mostradas en las tablas 10 y 11.

3.9.5.1.1. Propiedades para el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT

El análisis estático con el método ELF requiere de un “proceso iterativo” para calcular las propiedades del sistema de aislamiento sísmico. Inicialmente se asume aleatoriamente un desplazamiento máximo hasta llegar al valor buscado, con el que se calculan las propiedades del sistema de aislamiento sísmico (D_M , V_M , K_M , T_M , β_M y B_M). A continuación, se desarrolla el proceso iterativo para las dos propiedades de límite del aislador FPT.

a) Iteración para propiedades de límite inferior (Lower Bound)

- Desplazamiento máximo asumido (D_M)

Se asume un valor de:

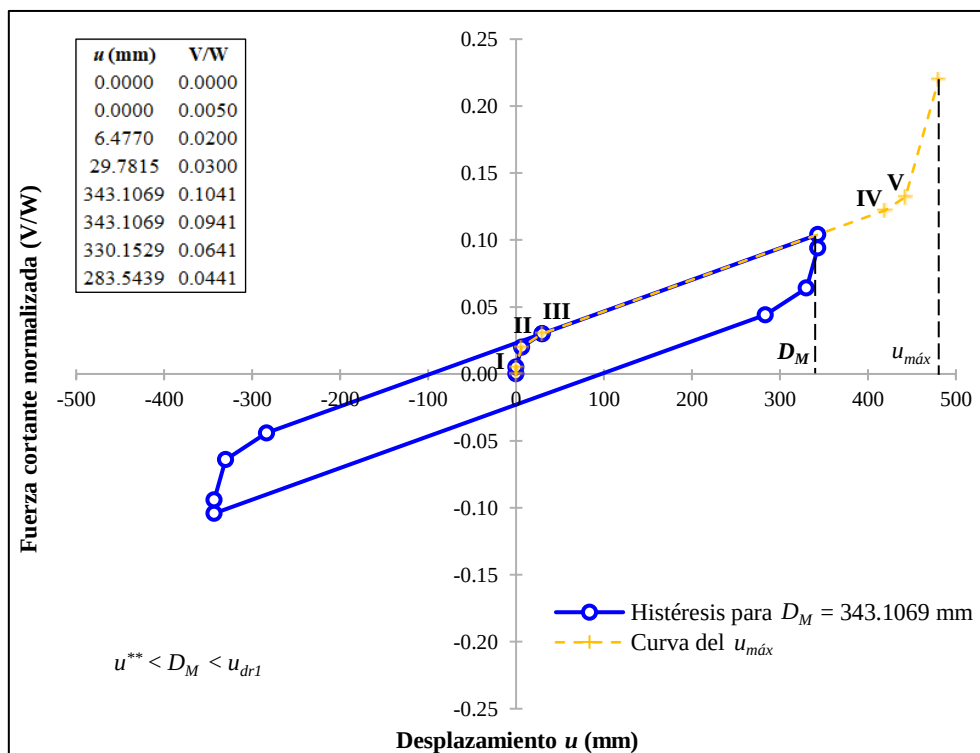
$$D_M = 343.1069 \text{ mm}$$

- Fuerza cortante (V_M)

Para determinar fuerza cortante V_M , primero se evalúa en qué fase se produce el desplazamiento D_M . Para ello se contrastará la curva de histéresis para el desplazamiento $u_{m\acute{a}x}$ y la histéresis generada para el desplazamiento D_M (considerando el MCE_R).

Figura 28

Histéresis para el desplazamiento D_M y curva $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite inferior (LB)



Como se observa la figura 28, el desplazamiento $D_M = 343.1069$ mm se encuentra entre el $u^{**} = 29.7815$ mm y $u_{dr1} = 419.2905$ mm para propiedades de límite inferior (Lower Bound) (Ver tabla 13), por lo que se comprueba que la fase de operación se produce en la fase III.

Dado que el desplazamiento D_M converge entre los puntos (III) y (IV), se obtiene el valor de la fuerza cortante V_M .

Sí: $W = 72624.8817$ ton (W : Peso sísmico)

$$V_M = 0.104087959 W$$

$$V_M = 0.104087959 (72624.8817) = 7559.3758 \text{ ton}$$

- **Rigidez efectiva (K_M)**

$$K_M = \frac{V_M}{D_M}$$

$$K_M = \frac{7559.3758}{343.1069} = 22.032130 \text{ ton/mm}$$

- **Período efectivo (T_M)**

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}}$$

Sí: $g = 9806.65 \text{ mm/s}^2$ (g : aceleración de la gravedad)

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{72624.8817}{22.032130 (9806.65)}} = 3.642788919 \text{ seg}$$

- **Amortiguamiento efectivo (β_M)**

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M (D_M)^2}$$

Si: $E_M = 2234460.2237$ ton – mm (E_M : Energía disipada en un ciclo de histéresis), la cual está dada por el área dentro de la curva de histéresis del límite inferior (Lower Bound) al alcanzar su desplazamiento $D_M = 343.1069$ mm (Ver figura 28)

$$\beta_M = \frac{2234460.2237}{2\pi (22.032130) (343.1069)^2} = 0.137112601$$

- **Coeficiente de amortiguamiento efectivo (B_M)**

Para calcular el coeficiente de amortiguamiento efectivo se usa la tabla 17.15 del capítulo 17 “Requisitos de diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico” del ASCE/SEI 7-16.

Tabla 14

Amortiguamiento efectivo y coeficiente de amortiguamiento efectivo

β_M	B_M
0.00	0.80
0.01	0.80
0.02	0.80
0.05	1.00
0.10	1.20
0.20	1.50
0.30	1.70
0.40	1.90
0.50	2.00
1.00	2.00

Nota. Tomado de la tabla 17.15 de la normativa del ASCE/SEI 7-16

Puesto que: $0.10 < \beta_M = 0.137112601 < 0.20$, al interpolar los valores de la tabla 14, se calcula el coeficiente de amortiguamiento efectivo, obteniendo un valor de:

$$B_M = 1.311337803$$

- **Aceleración espectral máxima (S_M)**

Utilizando la tabla 9 y al interpolar para el periodo efectivo $T_M = 3.642788919$ seg, le corresponde un valor de aceleración espectral máxima de:

$$S_M = 0.136494478 \text{ g}$$

$$S_M = 0.136494478 (9806.65) = 1338.5536 \text{ mm/s}^2$$

- **Desplazamiento máximo recalculado (D_M)**

$$D_M = \frac{S_M T_M^2}{4\pi^2 B_M}$$

$$D_M = \frac{1338.5536 (3.642788919)^2}{4\pi^2 (1.311337803)} = 343.1069 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se concluye que el valor del desplazamiento máximo asumido es el mismo valor que el recalculado. Considerando de esta manera un valor de desplazamiento $D_M = 343.1069$ mm para propiedades de límite inferior (Lower Bound).

- **Desplazamiento total máximo (D_{TM})**

$$D_{TM} = D_M F_S$$

Factor de ampliación estático (F_S):

$$F_S = 1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right)$$

Sí: $y = 38484.1704$ mm; $e = 7686.0400$ mm; $b = 101700$ mm y $d = 79200$ mm.

Radio de giro (r_I):

$$r_I = \sqrt{\frac{b^2 + d^2}{12}} = \sqrt{\frac{(101700)^2 + (79200)^2}{12}} = 37210.5832 \text{ mm}$$

Periodo de traslación efectivo (P_T):

$$P_T = \frac{1}{r_I} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}}$$

$$P_T = \frac{1}{37210.5832} \sqrt{\frac{347443147095.3630}{184}} = 1.167794665 \text{ seg}$$

Entonces el valor de F_S es:

$$F_S = 1 + \left(\frac{38484.1704}{1.167794665^2} \right) \left(\frac{12 (7686.0400)}{101700^2 + 79200^2} \right)$$

$$F_S = 1.156645832$$

Con los parámetros anteriores, se calculó el D_{TM} .

$$D_{TM} = 343.1069 (1.156645832) = 396.8532 \text{ mm}$$

Finalmente, verificamos que para propiedades de límite inferior (Lower Bound), se está cumpliendo que el $D_{TM} = 396.8532$ mm $>$ $1.15 D_M = 394.5729$ mm.

b) Iteración para propiedades de límite superior (Upper Bound)

• Desplazamiento máximo asumido (D_M)

Se asume un valor de:

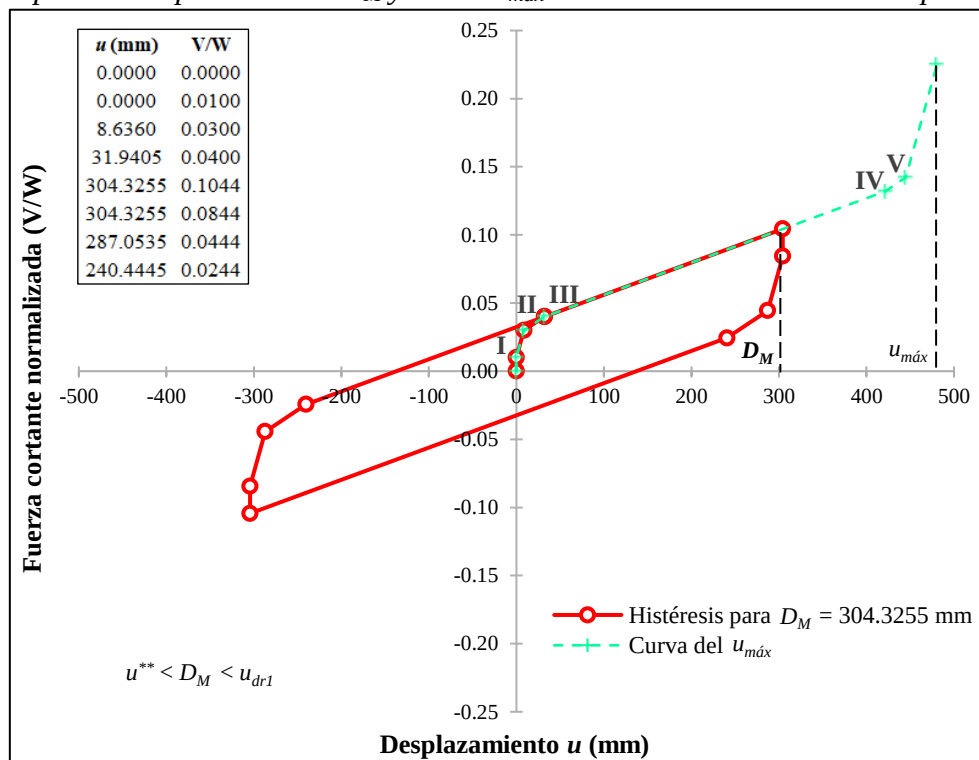
$$D_M = 304.3255 \text{ mm}$$

• Fuerza cortante (V_M)

En la figura 29 también se comprueba que la fase operación se produce en la fase III, puesto que el desplazamiento $D_M = 304.3255 \text{ mm}$ se encuentra entre la $u^{**} = 31.9405 \text{ mm}$ y $u_{dr1} = 421.4495 \text{ mm}$ para el límite superior (Ver tabla 13).

Figura 29

Histéresis para el desplazamiento D_M y curva $u_{m\acute{a}x}$ del aislador FPT – Límite superior (UB)



El desplazamiento máximo D_M para este caso también converge entre los puntos (III) y (IV), entonces el valor de la fuerza cortante V_M es:

$$V_M = 0.104407328 W$$

$$V_M = 0.104407328 (72624.8817) = 7582.5699 \text{ ton}$$

- **Rigidez efectiva (K_M)**

$$K_M = \frac{V_M}{D_M}$$

$$K_M = \frac{7582.5699}{304.3255} = 24.915986 \text{ ton/mm}$$

- **Período efectivo (T_M)**

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}}$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{72624.8817}{24.915986 (9086.65)}} = 3.425493995 \text{ seg}$$

- **Amortiguamiento efectivo (β_M)**

Para este caso la energía disipada en un ciclo de histéresis está dada por el área dentro de la curva de histéresis para el límite superior (Upper Bound) al alcanzar su desplazamiento $D_M = 304.3255$ mm, obteniendo un valor de $E_M = 2795678.5527$ ton – mm (Ver figura 29).

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M (D_M)^2}$$

$$\beta_M = \frac{2795678.5527}{2\pi (24.915986)(304.3255)^2} = 0.192820231$$

- **Coeficiente de amortiguamiento efectivo (B_M)**

En este caso también ocurre que: $0.10 < \beta_M = 0.192820231 < 0.20$, al interpolar y calcular el valor del coeficiente de amortiguamiento efectivo con la tabla 14, se obtuvo:

$$B_M = 1.478460693$$

- **Aceleración espectral máxima (S_M)**

Utilizando la tabla 9 y al interpolar para periodo efectivo $T_M = 3.425493995$ seg, le corresponde un valor de aceleración espectral máxima de:

$$S_M = 0.154362125 \text{ g}$$

$$S_M = 0.154362125 (9806.65) = 1513.7753 \text{ mm/s}^2$$

- **Desplazamiento máximo recalculado (D_M)**

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M}$$

$$D_M = \frac{1513.7753 (3.425493995)^2}{4\pi^2 (1.478460693)} = 304.3255 \text{ mm}$$

Se comprueba que el valor del desplazamiento máximo asumido es el mismo que el recalculado. Se considerará el valor de desplazamiento $D_M = 304.3255 \text{ mm}$ para propiedades de límite superior (Upper Bound).

- **Desplazamiento total máximo (D_{TM})**

$$D_{TM} = D_M F_S$$

$$D_{TM} = 304.3255316 (1.156645832) = 351.9968 \text{ mm}$$

También podemos constatar que para las propiedades de límite superior (Upper Bound) el $D_{TM} = 351.9968 \text{ mm} > 1.15 D_M = 349.9743 \text{ mm}$, por lo tanto, si cumple.

La tabla 15 muestra los valores al aplicar el método de análisis ELF para las propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT.

Tabla 15

Propiedades del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT

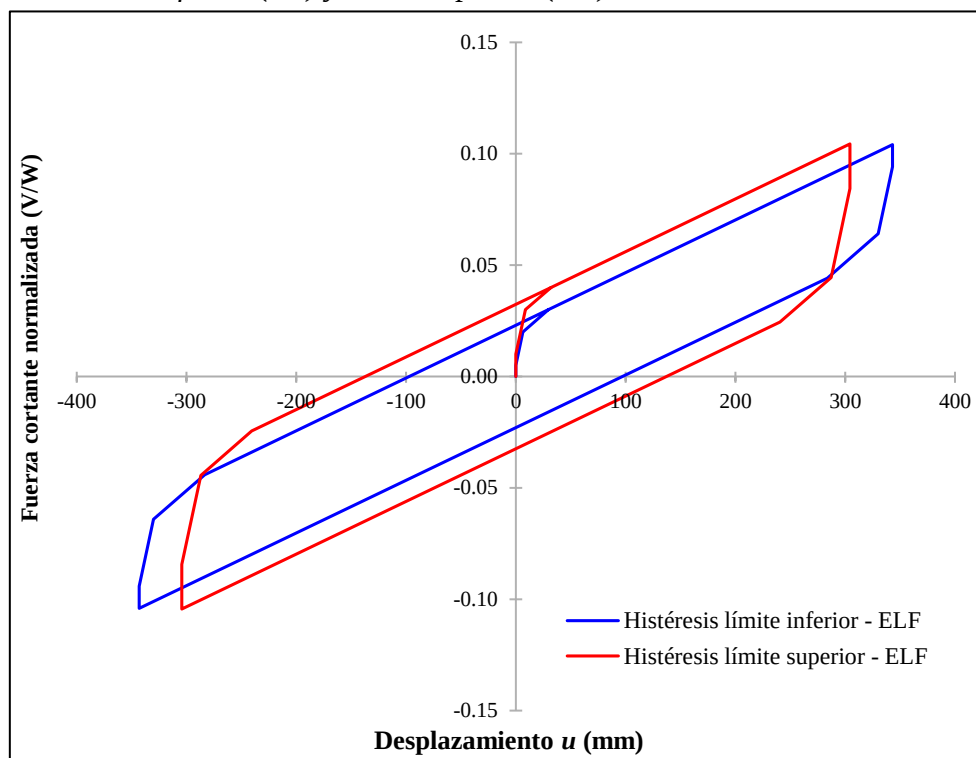
Propiedad	Símb.	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
Desplazamiento máximo	D_M	343.1069	304.3255	mm
Fuerza cortante	V_M	7559.3758	7582.5699	ton
Rigidez efectiva	k_M	22.032130	24.915986	ton/mm
Periodo efectivo	T_M	3.642789	3.425494	seg
Amortiguación efectiva	β_M	0.137113	0.192820	-
Coficiente de amortiguación	B_M	1.311338	1.478461	-
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	396.8532	351.9968	mm

3.9.5.1.2. Histéresis del aislador FPT con el método de análisis ELF

Las histéresis para las propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) se muestran en la figura 30, las cuales se han analizado teniendo en cuenta el MCE_R para el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT.

Figura 30

Histéresis de límite inferior (LB) y límite superior (UB) del aislador FPT – Método ELF



3.9.5.2. Análisis dinámico con el método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)

Para el análisis dinámico con el método de NLRHA según el capítulo 17 de la normativa ASCE/SEI 7-16 (Requisitos de diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico) y la NTP E.031 (Aislamiento sísmico), se utiliza como mínimo 7 pares de registros sísmicos en dirección horizontal (X - Y) que han sido escalados respecto al sismo máximo considerado (MCE_R).

3.9.5.2.1. Escalamiento de sismos

a) Selección de registros sísmicos

Teniendo en cuenta, que la edificación en estudio se encuentra a 16 km de distancia a la falla tectónica más cercana (Chalquibamba PE-04). Los 7 pares de registros sísmicos considerados para el análisis del sistema del aislamiento sísmico con aisladores FPT, han sido seleccionados de acuerdo a criterios de similitud de su régimen tectónico (falla por subducción, producto de la interacción de la placa Sudamericana y la placa de Nazca), magnitud y distancia de falla razonable (de campo lejano, es decir la falla se encuentra a una distancia mayor a 5 km), condiciones de sitio del suelo (el caso de estudio pertenece a zona de sismicidad alta “Zona 3”)

y frecuencia del movimiento del terreno (se analizó registros sísmos de tal manera que la frecuencia natural de la estructura con sistema de aislación coincida con la frecuencia dominante de las ondas sísmicas y produzca así una resonancia razonable).

La tabla 16 nos muestra la relación de los 7 pares de registros sísmicos considerados para el proceso de escalamiento que han sido utilizados en el análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT con el método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA).

Tabla 16

Registros sísmicos para el análisis dinámico con el método NLRHA

N°	Sismo	Año	Magnitud	Profundidad
1	Lima (Perú)	1966	8.1	24 km
2	Ancash (Perú)	1970	6.6	64 km
3	Lima (Perú)	1974	6.6	13 km
4	Moquegua (Perú)	2001	6.9	33 km
5	Pisco (Perú)	2007	7.0	40 km
6	Coquimbo (Chile)	2015	8.4	11 km
7	Manabí (Ecuador)	2016	7.8	20 km

Nota. Tomado de los registros sísmicos del CISMID (Perú), CNS (Chile) y RENAC (Ecuador)

b) Proceso de escalamiento

El método de escalamiento que más se ajusta es el de coincidencia espectral (Spectral Matching), puesto que la falla se encuentra a una distancia mayor a 5 km, es decir se considera una falla lejana. Además, este método suaviza las frecuencias altas del registro sísmico, reduciendo los efectos no representativos del movimiento del suelo esperado en la zona de estudio, de esta manera hace que su forma espectral sea similar al del espectro del MCE_R .

Para el escalamiento, se tomó en cuenta el artículo 17.3.3 de la norma del ASCE/SEI 7-16 (Requisitos de diseño sísmico para estructuras sísmicamente aisladas) y el artículo 15.6 de la NTP E031 (Registro de aceleración del suelo), los cuales establecen que para registros que coincidan espectralmente, cada par de movimientos se escalará de manera que el período oscile entre $0,20 T_M$ (calculado para propiedades de límite superior “Upper Bound”) y $1,25 T_M$ (calculado para las propiedades de límite inferior “Lower Bound”). El espectro de respuesta de un componente del par es al menos el 90% de la ordenada correspondiente del espectro de respuesta del MCE_R .

Con lo establecido anteriormente y teniendo en cuenta los resultados de los periodos obtenidos con el método de análisis ELF tanto para propiedades de límite inferior (Lower Bound) como de límite superior (Upper Bound), se calculó el rango correspondiente para el escalamiento respectivo de los 7 pares de registros sísmicos seleccionados, obteniéndose los siguientes valores:

$$T_M (\text{Upper Bound}) = 3.6428 \text{ seg.} \rightarrow 0.20 T_{M(UB)} = 0.6851 \text{ seg.}$$

$$T_M (\text{Lower Bound}) = 3.4255 \text{ seg.} \rightarrow 1.25 T_{M(LB)} = 4.5535 \text{ seg.}$$

De la figura 31 a la 37 se presentan los espectros de aceleraciones (margen izquierdo) y las aceleraciones escaladas (margen derecho) para las direcciones horizontales “X” e “Y” en función del sismo máximo considerado (MCE_R) de los 7 pares de registros sísmicos.

Figura 31

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Lima 1966

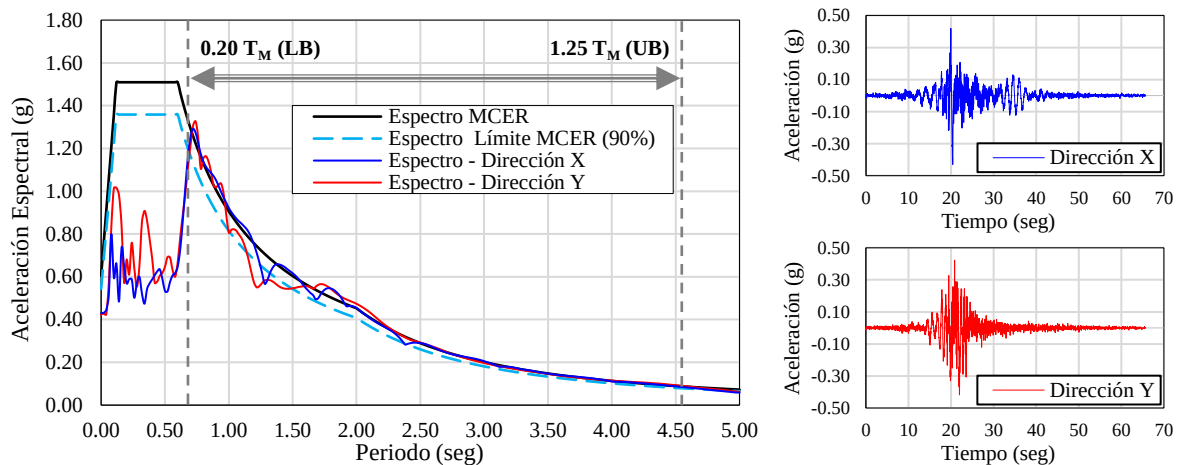


Figura 32

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Ancash 1970

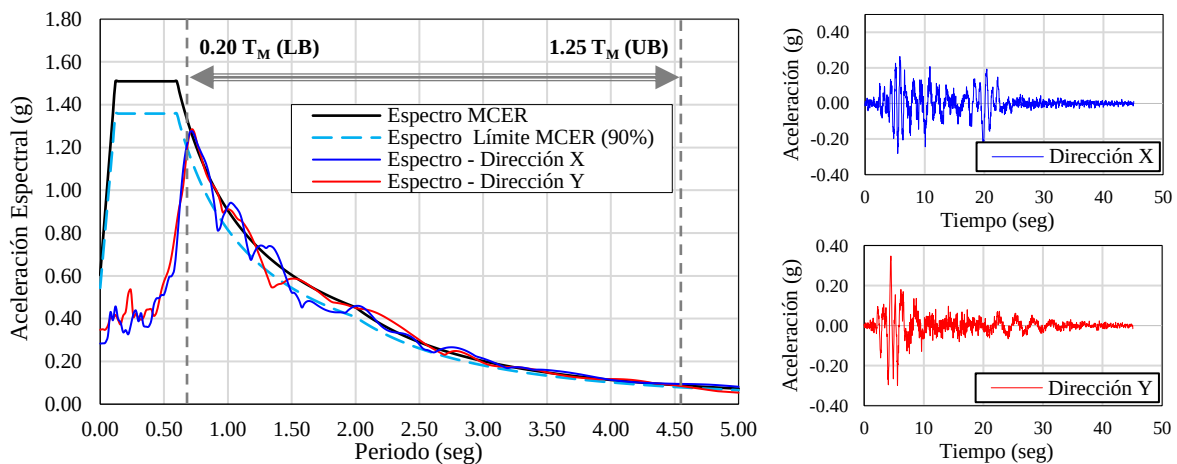
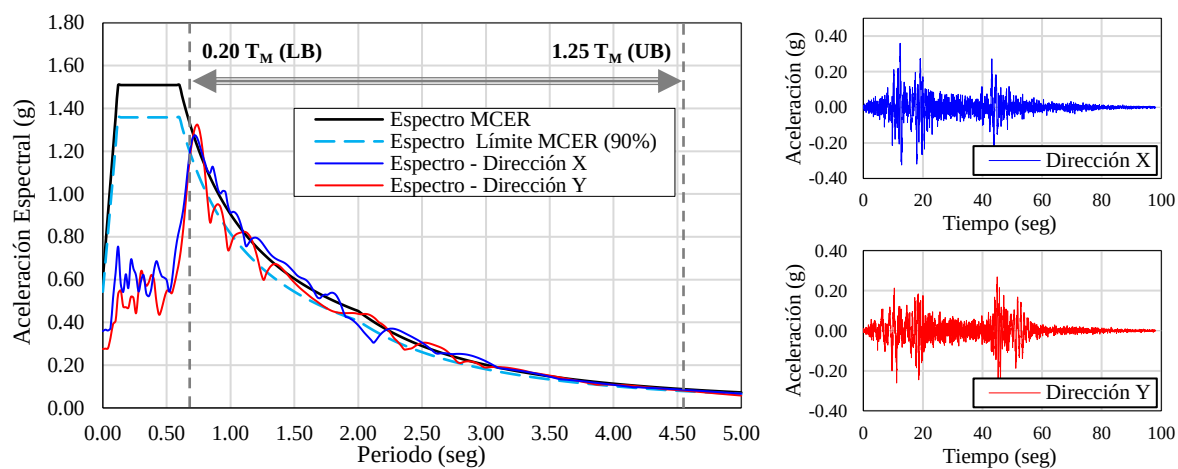
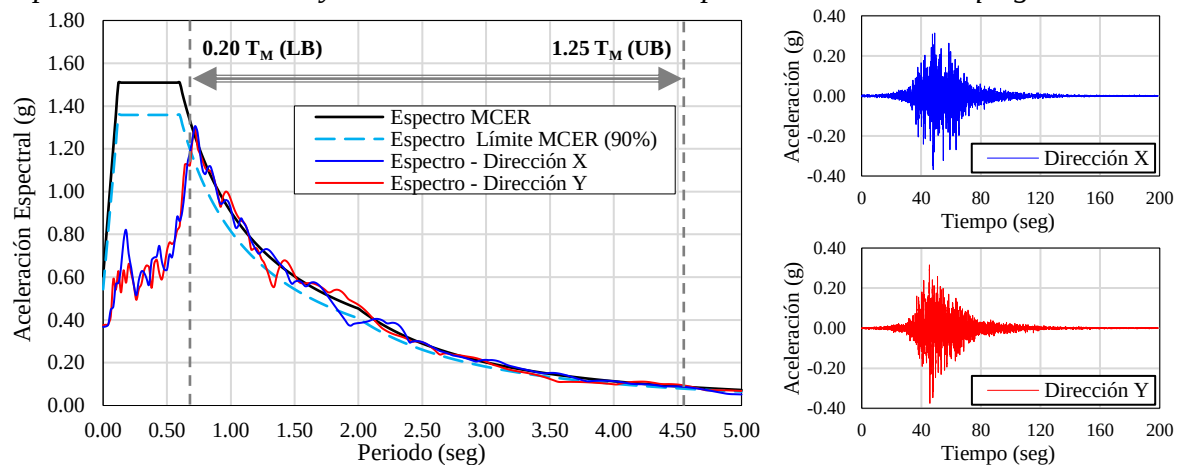


Figura 33

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Lima 1974

**Figura 34**

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Moquegua 2001

**Figura 35**

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Pisco 2007

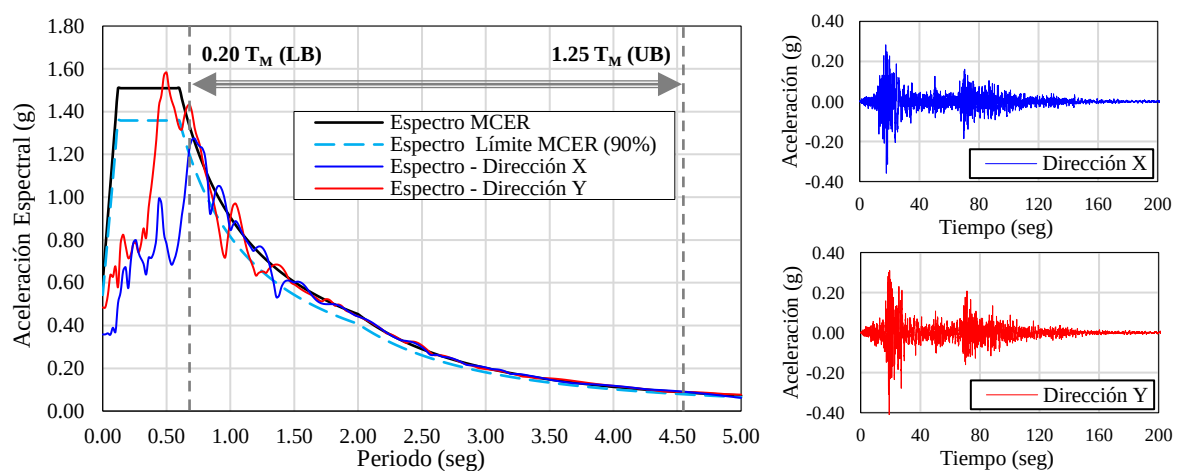
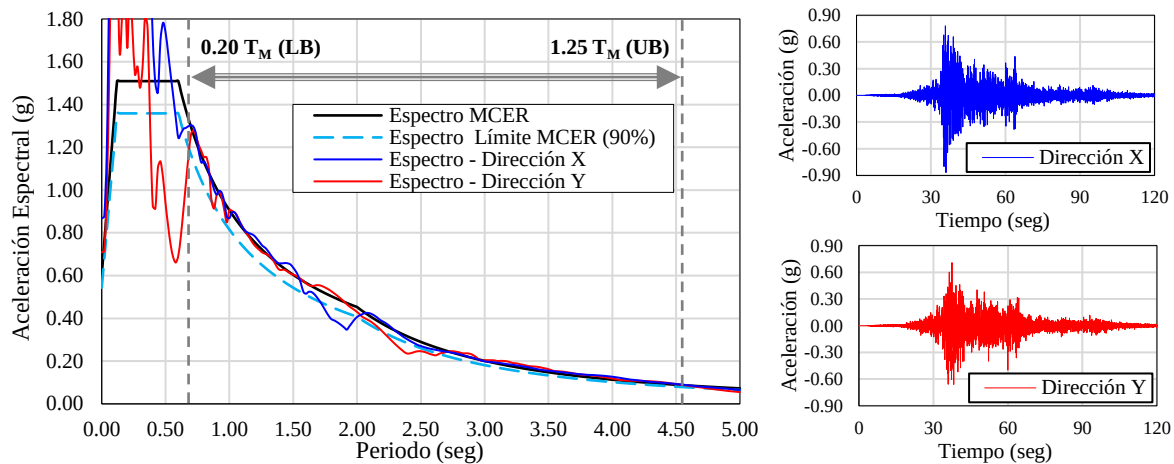
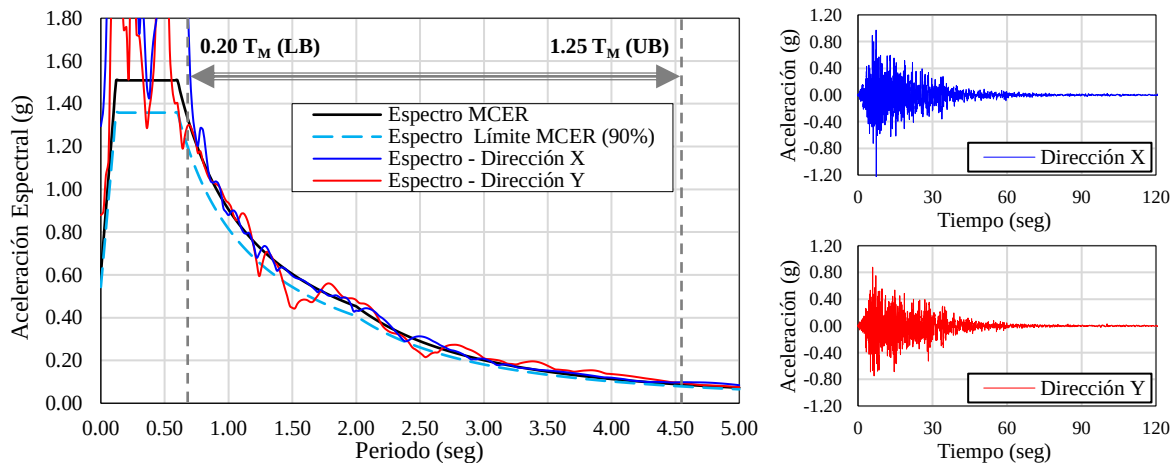


Figura 36

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Coquimbo 2015

**Figura 37**

Espectro de aceleración y aceleraciones escaladas respecto al MCE_R – Manabí 2016



3.9.5.2.2. Modelación del aislador FPT en ETABS

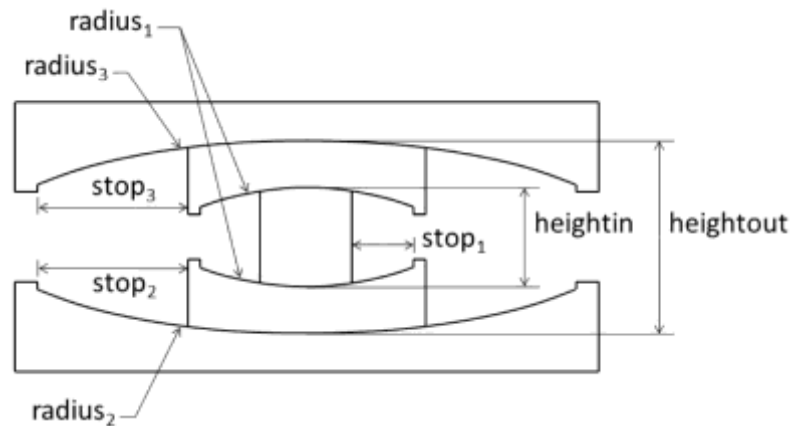
Con las propiedades del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT para el límite inferior (Lower Bound) y límite superior (Upper Bound), se procede a modelar el aislador FPT8833/16-12R/12-7. Los aisladores se modelan haciendo uso de la propiedad de elemento link “Triple Pendulum Isolator”, esta propiedad tiene incorporado un modelo matemático en serie y el modelo de fricción Coulomb, que aproxima con mayor precisión su comportamiento histerético de multi-fases, debido a que realiza un análisis no lineal rápido (FNA), para lo cual es importante seleccionar una cantidad adecuada de modos de vibración. Se realizó dos análisis de forma paralela, uno para propiedades límite inferior (Lower Bound) y otro para propiedades de límite superior (Upper Bound); primero para obtener los resultados del análisis estático con el método ELF y posteriormente realizar el análisis dinámico con el método NLRHA.

a) Nomenclatura del aislador FPT en ETABS

El elemento link “Triple Pendulum Isolator” simplifica su comportamiento mecánico en base a la interacción de 3 péndulos convencionales. Al relacionar la figura 25 de acuerdo a la figura 38, se obtiene que: el $radius_1 = R_2, R_3$, el $radius_2 = R_1$, el $radius_3 = R_4$, $stop_1 = d_2, d_3$, $stop_2 = d_1$, $stop_3 = d_4$, $height_{in} = H_i$ y $height_{out} = H_s$.

Figura 38

Nomenclatura del aislador FPT en ETABS



Nota. Tomado del manual del ETABS / Vs. 20.3.0

b) Propiedades geométricas en ETABS (para fricción del aislador FPT)

- **Peso del aislador (P_{aisl}).** Ver figura 25

$$P_{aisl} = 2562 \text{ libras} = 1.1621036519 \text{ ton}$$

- **Masa del aislador (m)**

$$m = \frac{P_{aisl}}{g} = \frac{1.1621036519}{9806.65} = 0.0001185016 \text{ ton} - s^2/mm$$

- **Inercia rotacional en dirección 1 (I_z)**

$$I_z = \frac{mr^2}{2}$$

Sí: $r = \Phi_{1,4} / 2$; además: $\Phi_1 = \Phi_4 = 838.20 \text{ mm}$ ($\Phi_{1,4}$: Diámetros exteriores del aislador)

$$I_z = \frac{(0.0001185016)(838.20/2)^2}{2} = 10.4071 \text{ ton} - mm - s^2$$

- Inercia rotacional en dirección 2 y 3 (I_x, I_y)

$$I_x = I_y = \frac{mr^2}{4}$$

$$I_x = I_y = \frac{(0.0001185016)(838.20/2)^2}{4} = 5.2035 \text{ ton} - \text{mm} - \text{s}^2$$

Tabla 17

Propiedades geométricas para la fricción del aislador FPT en ETABS

Propiedad	Símb.	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
Masa	m	0.0001185016	0.0001185016	ton-s ² /mm
Peso	P_I	1.1621036519	1.1621036519	ton
Inercia Rotacional en dirección 1	I_z	10.4071	10.4071	ton-mm- s ²
Inercia Rotacional en dirección 2	I_x	5.2035	5.2035	ton-mm- s ²
Inercia Rotacional en dirección 3	I_y	5.2035	5.2035	ton-mm- s ²

Figura 39

Propiedades geométricas para fricción del aislador FPT en ETABS

Link Property Data

General

Link Property Name: FPT8833_Lower_Bound

Link Type: Triple Pendulum Isolator

Link Property Notes: Modify/Show Notes...

P-Delta Parameters: Modify/Show...

Acceptance Criteria: Modify/Show...
U1, U2 specified

Total Mass and Weight

Mass: 0.000118502 tonf-s²/mm

Weight: 1.162103652 tonf

Rotational Inertia 1: 10.4071 tonf-mm-s²

Rotational Inertia 2: 5.2035 tonf-mm-s²

Rotational Inertia 3: 5.2035 tonf-mm-s²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: 1000 mm

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: 1000000 mm²

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
☒ U1	☐	☒	Modify/Show for U1...	☐ R1	☐	☐	Modify/Show for R1...
☒ U2	☐	☒	Modify/Show for U2...	☐ R2	☐	☐	Modify/Show for R2...
☒ U3	☐	☒	Modify/Show for U3...	☐ R3	☐	☐	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Effective Stiffness (KE)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1

OK Cancel

c) Propiedades lineales de fricción en ETABS

- **Rigidez efectiva (k)**

$$k = \frac{k_M}{N^{\circ} \text{ aisl}}$$

Sí: $N^{\circ} \text{ aisl} = 184$ aisladores

- **Rigidez efectiva – Límite inferior (Lower Bound)**

$$k = \frac{22.032130}{184} = 0.119739839 \text{ ton/mm}$$

- **Rigidez efectiva – Límite superior (Upper Bound)**

$$k = \frac{24.915986}{184} = 0.135412953 \text{ ton/mm}$$

- **Amortiguamiento efectivo (β)**

Teniendo en cuenta la teoría general de amortiguamiento para un modelo de 1 grado de libertad, el amortiguamiento efectivo se calcula así:

$$\beta = 2\beta_M \left(\frac{P_{prom}}{g} \right) \left(\frac{2\pi}{T_M} \right)$$

Sí: $P_{prom} = 394.7004$ (P_{prom} : Peso promedio de un aislador, incluido su propio peso)

- **Amortiguamiento efectivo – Límite inferior (Lower Bound)**

$$\beta = 2(0.137112601) \left(\frac{394.7004}{9806.65} \right) \left(\frac{2\pi}{3.642788919} \right)$$

$$\beta = 0.019037074 \text{ ton} - \text{s/mm}$$

- **Amortiguamiento efectivo – Límite superior (Upper Bound)**

$$\beta = 2(0.192820231) \left(\frac{394.7004}{9806.65} \right) \left(\frac{2\pi}{3.425493995} \right)$$

$$\beta = 0.028469912 \text{ ton} - \text{s/mm}$$

- **Rigidez vertical (k_v)**

La rigidez efectiva vertical se calcula haciendo uso del principio fundamental de resistencia de materiales ($\sigma = E \varepsilon$), con la siguiente ecuación:

$$K_v = \frac{AE}{H} \rightarrow K_v = \frac{(\pi D_R^2/4)E}{H}$$

Donde:

D_R : Diámetro del deslizador rígido ($D_R = 304.80$ mm)

E : Modulo de elasticidad del acero ($E = 20.3890$ ton/mm²)

H : Altura total del aislador ($H = 353.06$ mm)

$$K_v = \frac{[\pi 304.80^2/4] 20.3890}{353.06} = 4213.734963 \text{ ton/mm}$$

- **Periodo vertical (T_v)**

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{P_{prom}}{K_v g}}$$

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{394.7004}{4213.734963 (9086.65)}} = 0.019418680 \text{ seg}$$

- **Amortiguamiento vertical (β_v)**

$$\beta_v = 2 \xi_v \left(\frac{P_{prom}}{g} \right) \left(\frac{2\pi}{T_v} \right)$$

Sí: $\xi_v = 2.00$ % (ξ_v : Razón de amortiguamiento vertical).

$$\beta_v = 2(0.02) \left(\frac{394.7004}{9806.65} \right) \left(\frac{2\pi}{0.019418680} \right)$$

$$\beta_v = 0.520915246 \text{ ton} - \text{s/mm}$$

El valor de la rigidez vertical y el amortiguamiento vertical se emplea tanto para el límite inferior (Lower Bound), así como para propiedades de límite superior (Upper Bound).

En la tabla 18 se resume los valores de las propiedades lineales del aislador FPT que han sido incorporadas al ETABS.

Tabla 18*Propiedades lineales del aislador FTP en ETABS*

Propiedad	Símb.	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
Rigidez efectiva	k_{ef}	0.119739839	0.135412953	ton/mm
Amortiguamiento efectivo	β_{ef}	0.019037074	0.028469912	ton-s/mm
Rigidez vertical	k_v	4213.734963	4213.734963	ton/mm
Amortiguamiento vertical	β_v	0.520915246	0.520915246	ton-s/mm
Altura para superficie interior	H_i	241.3000	241.3000	mm
Altura para superficie exterior	H_s	177.8000	177.8000	mm
Altura de deformación	H_d	160.8667	160.8667	mm

d) Propiedades no lineales de fricción en ETABS

- Rigidez de fluencia (k)**

Para calcular la rigidez de fluencia, se asume un desplazamiento pequeño por el hecho de que se quiere simular una rigidez "grande" para que el sistema de aislamiento se active.

$$k_y = \frac{\mu_i P_{Prom}}{u_y}$$

Sí: $u_y = 0.05 \text{ pulg} = 1.27 \text{ mm}$ (u_y : desplazamiento de fluencia).

- Rigidez de fluencia – Límite inferior (Lower Bound)**

$$k_{y(4)} = \frac{0.030 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 9.323632533 \text{ ton} - \text{mm}$$

$$k_{y(1)} = \frac{0.020 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 6.215755022 \text{ ton} - \text{mm}$$

$$k_{y(2,3)} = \frac{0.005 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 1.553938756 \text{ ton} - \text{mm}$$

- Rigidez de fluencia – Límite superior (Upper Bound)**

$$k_{y(4)} = \frac{0.040 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 12.431510045 \text{ ton} - \text{mm}$$

$$k_{y(1)} = \frac{0.030 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 9.323632533 \text{ ton} - \text{mm}$$

$$k_{y(2,3)} = \frac{0.010 (394.7004)}{1.27 \text{ mm}} = 3.107877511 \text{ ton} - \text{mm}$$

- **Coeficiente de fricción rápido (μ_{fast})**

El coeficiente de fricción rápido viene a ser su coeficiente de máxima velocidad para cada superficie.

- **Coeficiente de fricción lento (μ_{Slow})**

El coeficiente de fricción lento es el coeficiente cuando la velocidad llega a ser nula. El valor de este coeficiente es calculado como 2/3 del coeficiente de fricción rápido.

- **Parámetro de tasa (r)**

Determina la velocidad de transición que ocurre entre la fricción baja y la fricción alta. La literatura nos recomienda que para aisladores FPT se use un valor de 0.05 s/mm.

En las tablas 19 y 20 se resume los valores de las propiedades no lineales del aislador FPT que han sido incorporadas al ETABS.

Tabla 19

Propiedades no lineales del aislador FPT para ETABS – Límite inferior (Lower Bound)

Propiedad	Símb.	Superior Exterior (Outer Top)	Inferior Exterior (Outer Botton)	Superior Interior (Inner top)	Inferior Interior (Inner Botton)	Unid.
Rigidez de fluencia	k_y	9.323633	6.215755	1.553939	1.553939	ton/mm
Coeficiente de fricción rápido	μ_{fast}	0.0300	0.0200	0.0050	0.0050	-
Coeficiente de fricción lento	μ_{Slow}	0.0200	0.0133	0.0033	0.0033	-
Parámetro de radio	r	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	s/mm
Radio de superficie deslizante	$R_1=R_4$	2235.2000	2235.2000	304.8000	304.8000	mm
Capacidad de desplazamiento	$d_1=d_4$	215.9000	215.9000	50.8000	50.8000	mm

Tabla 20

Propiedades no lineales del aislador FPT para ETABS – Límite superior (Upper Bound)

Propiedad	Símb.	Superior Exterior (Outer Top)	Inferior Exterior (Outer Botton)	Superior Interior (Inner top)	Inferior Interior (Inner Botton)	Unid.
Rigidez de fluencia	k_y	12.431510	9.323633	3.107878	3.107878	ton/mm
Coeficiente de fricción rápido	μ_{fast}	0.0400	0.0300	0.0100	0.0100	-
Coeficiente de fricción lento	μ_{Slow}	0.0267	0.0200	0.0067	0.0006	-
Parámetro de radio	r	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	s/mm
Radio de superficie deslizante	$R_1=R_4$	2235.2000	2235.2000	304.8000	304.8000	mm
Capacidad de desplazamiento	$d_1=d_4$	215.9000	215.9000	50.8000	50.8000	mm

Ingreso de Propiedades para la dirección U1 en ETABS

Para la dirección vertical U_1 (dirección en Z) se tomó las propiedades lineales (la rigidez vertical y el amortiguamiento vertical) de la tabla 18.

La figura 40 muestra las propiedades en la dirección U_1 incorporadas al ETABS, para propiedades de límite inferior (Lower Bound).

Figura 40

Propiedades para la dirección U_1 en ETABS – Límite inferior (Lower Bound)

Link/Support Directional Properties		
Identification		
Property Name	FPT8833_Lower_Bound	
Direction	U1	
Type	Triple Pendulum Isolator	
NonLinear	Yes	
Linear Properties		
Effective Stiffness	4213.734963	tonf/mm
Effective Damping	0	tonf-s/mm
Nonlinear Properties		
Stiffness	4213.734963	tonf/mm
Damping Coefficient	1.019716192	tonf-s/mm

Ingreso de Propiedades para la dirección U2 y U3 en ETABS

Para las direcciones horizontales U_2 y U_3 (direcciones en X – Y) se consideró las propiedades lineales de la tabla 18 (rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo) y las propiedades no lineales de la tabla 19 y 20 (rigidez de fluencia, coeficiente de fricción rápido, coeficiente de fricción lento, parámetro de tasa, radio de la superficie deslizante y capacidad de desplazamiento). Además, se debe resaltar que la ubicación de la deformación por corte del dispositivo se tomó un valor de los 2/3 de la altura total del mecanismo del aislador FPT.

La figura 41 muestra las propiedades en las direcciones U_2 y U_3 incorporadas al ETABS, para propiedades del límite inferior (Lower Bound).

Figura 41

Propiedades para la dirección U_2 y U_3 en ETABS – Límite inferior (Lower Bound)

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: FPT8833_Lower_Bound Type: Triple Pendulum Isolator

Direction: U2; U3 NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness - U2	0.119739839	tonf/mm	Effective Stiffness - U3	0.119739839	tonf/mm
Effective Damping - U2	0.019037074	tonf-s/mm	Effective Damping - U3	0.019037074	tonf-s/mm

Shear Deformation Location

Distance from End-J - U2	160.8667	mm	Distance from End-J - U3	160.8667	mm
--------------------------	----------	----	--------------------------	----------	----

Height and Symmetry of Sliding Surfaces

Height for Outer Surfaces: 241.3 mm ☐ Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface

Height for Inner Surfaces: 177.8 mm ☒ Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface

Nonlinear Properties for Directions U2 and U3

	Outer Top	Outer Bottom	Inner Top	Inner Bottom	
Stiffness	9.323632533	6.215755022	1.553938756	1.553938756	tonf/mm
Friction Coefficient, Slow	0.02	0.013333	0.003333	0.003333	
Friction Coefficient, Fast	0.03	0.02	0.005	0.005	
Rate Parameter	0.05	0.05	0.05	0.05	sec/mm
Radius of Sliding Surface	2235.2	2235.2	304.8	304.8	mm
Stop Distance	215.9	215.9	50.8	50.8	mm

OK Cancel

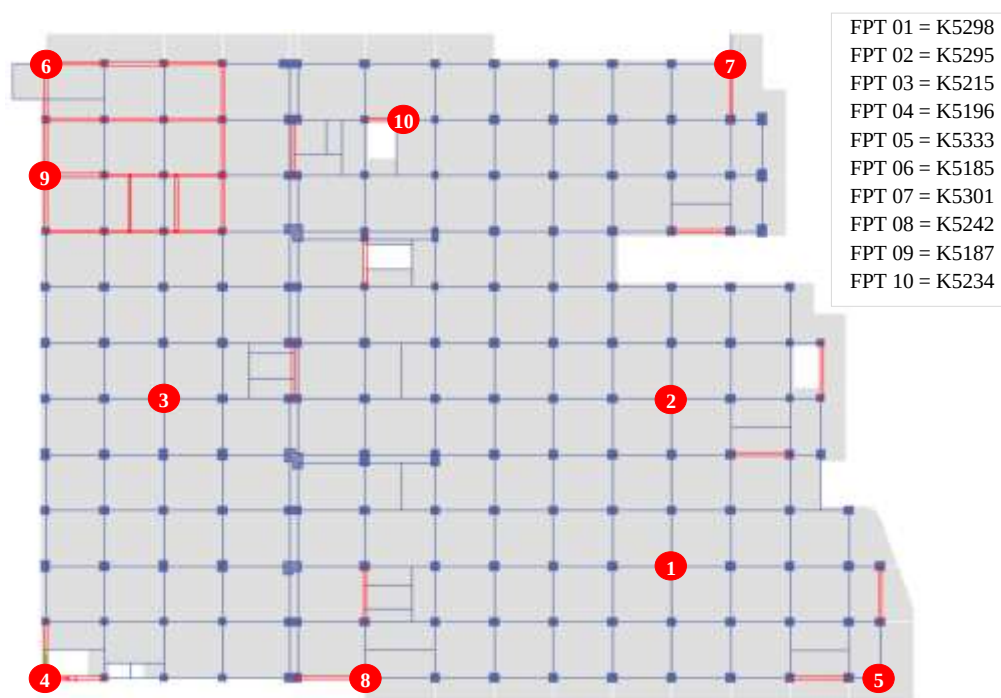
3.9.5.2.3. Resultados del análisis dinámico con el método NLRHA

Para poder tener un resultado significativo con el análisis dinámico empleando el método NLRHA, se seleccionó 10 aisladores FPT de los 184 que presenta el sistema de aislamiento sísmico de la edificación en estudio. La selección se realizó en base al desempeño de su comportamiento histerético, la distribución espacial en planta y altura e incidencia de su peso sísmico en cada dispositivo.

La figura 42 nos ilustra la ubicación de los 10 aisladores FPT seleccionados del sistema de aislamiento sísmico para el método de análisis NLRHA.

Figura 42

Ubicación de aisladores FPT seleccionados para el análisis dinámico (NLRHA)



a) Comportamiento histerético con el método de análisis NLRHA

La energía que disipa cada aislador FPT ante una demanda sísmica es diferente debido a los criterios de selección de análisis ya mencionados anteriormente, es por ello que para un mejor entendimiento de su comportamiento histerético se analizó los dos casos más representativos que presenta este sistema de aislamiento, uno con un comportamiento adecuado (aislador K5295) y otro con comportamiento inadecuado (aislador K5196).

En las figuras 43 y 44 se muestra los resultados obtenidos del comportamiento histerético para sus propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) del aislador K5295, mientras que en las figuras 45 y 46 se muestran los resultados del comportamiento histerético del aislador K5196 para sus propiedades de límite respectivas. El comportamiento histerético del restante de los 10 aisladores seleccionados para ambas propiedades de límite se muestran en el apéndice A.

Figura 43

Comportamiento histerético del aislador K5295 – Límite inferior (Lower Bound)

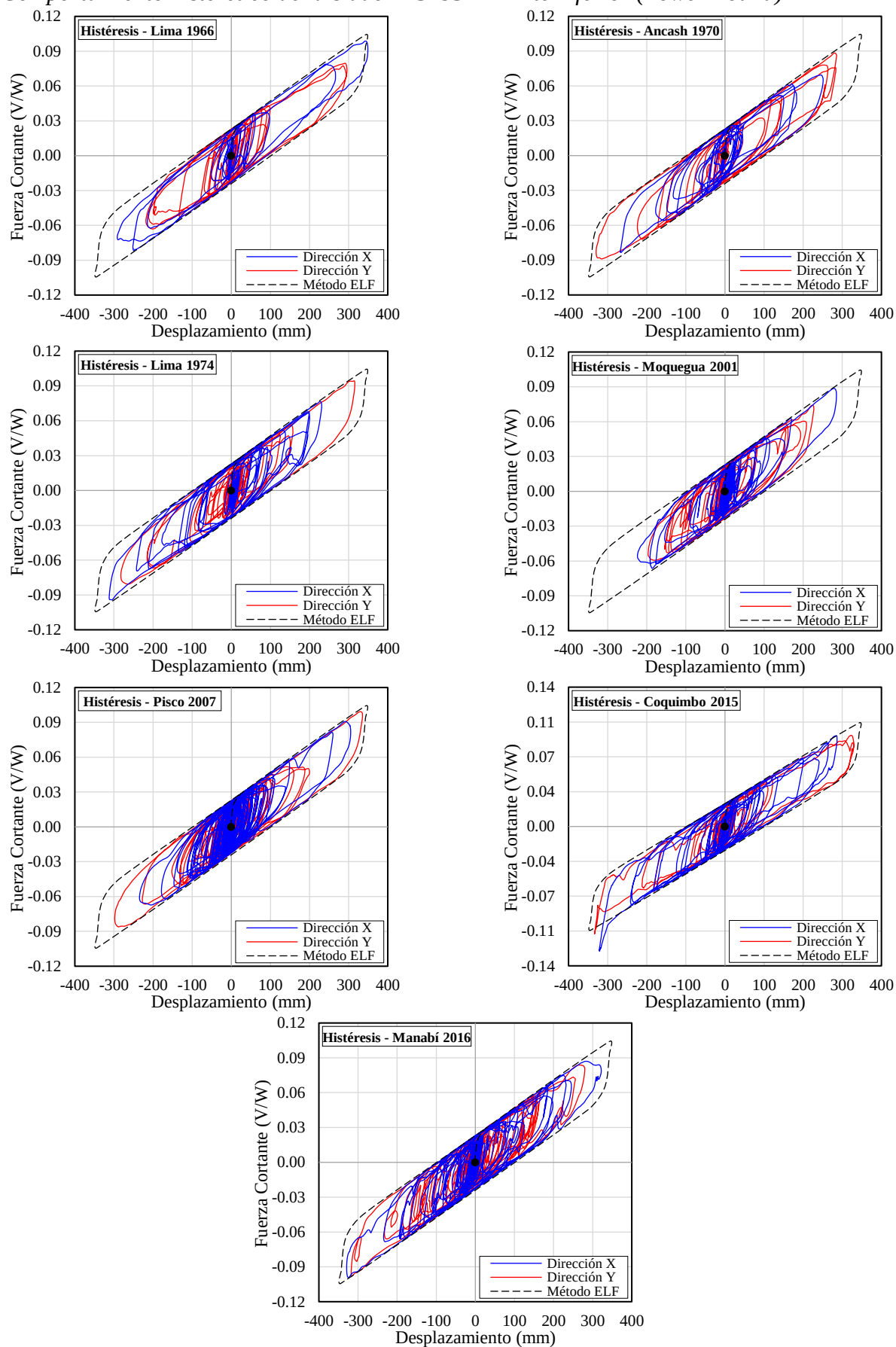


Figura 44

Comportamiento histerético del aislador K5295 – Límite superior (Upper Bound)

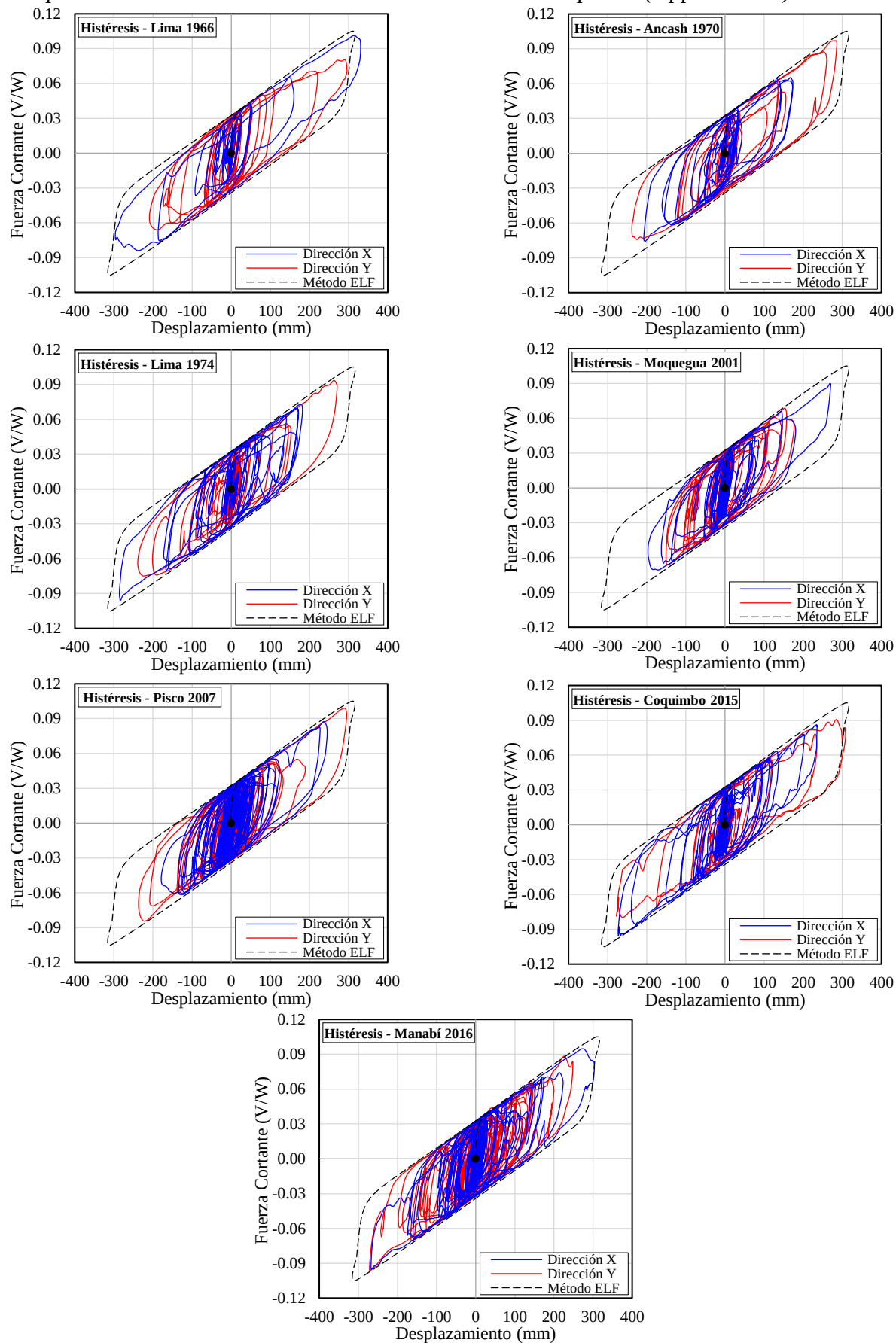


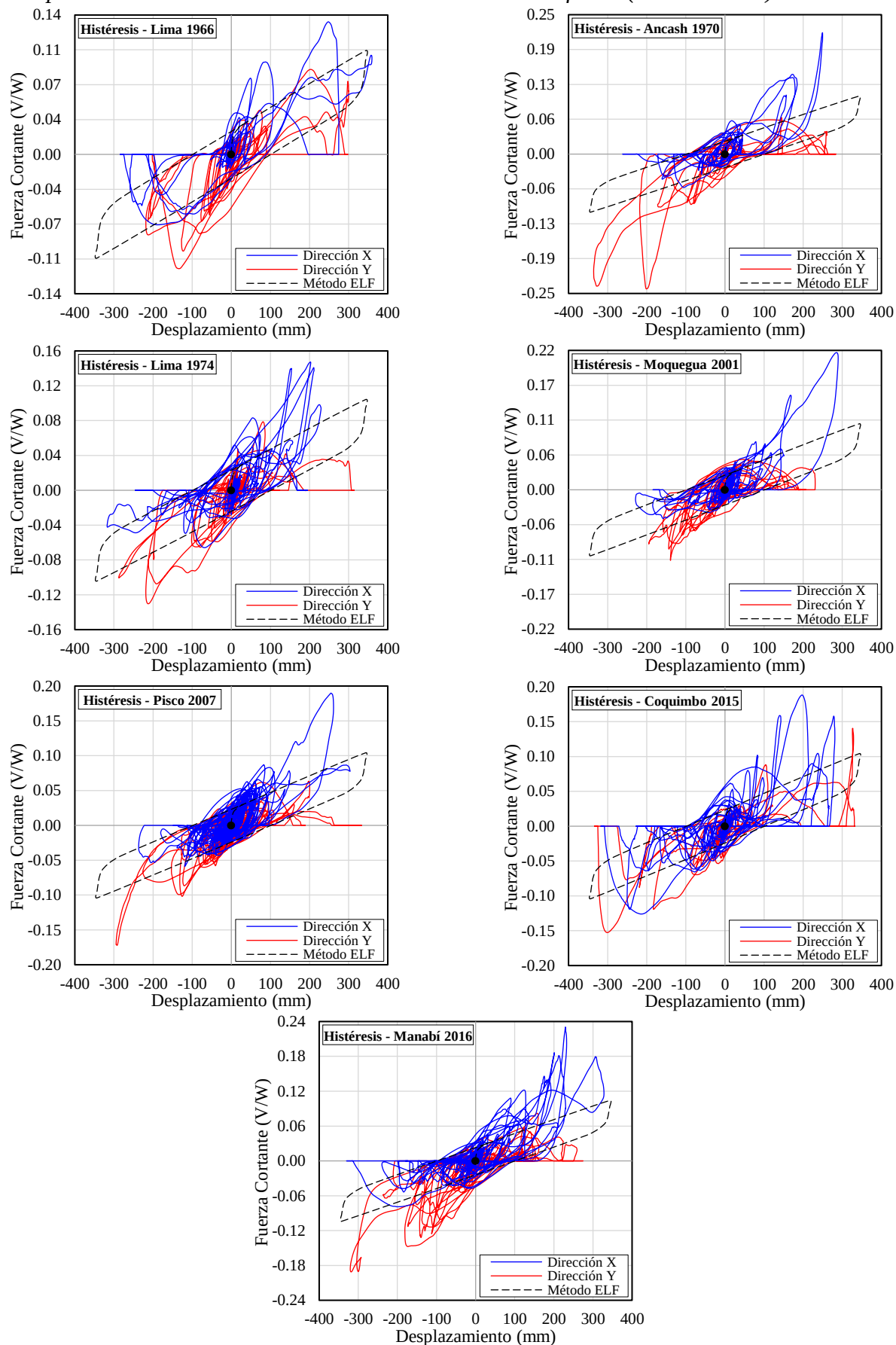
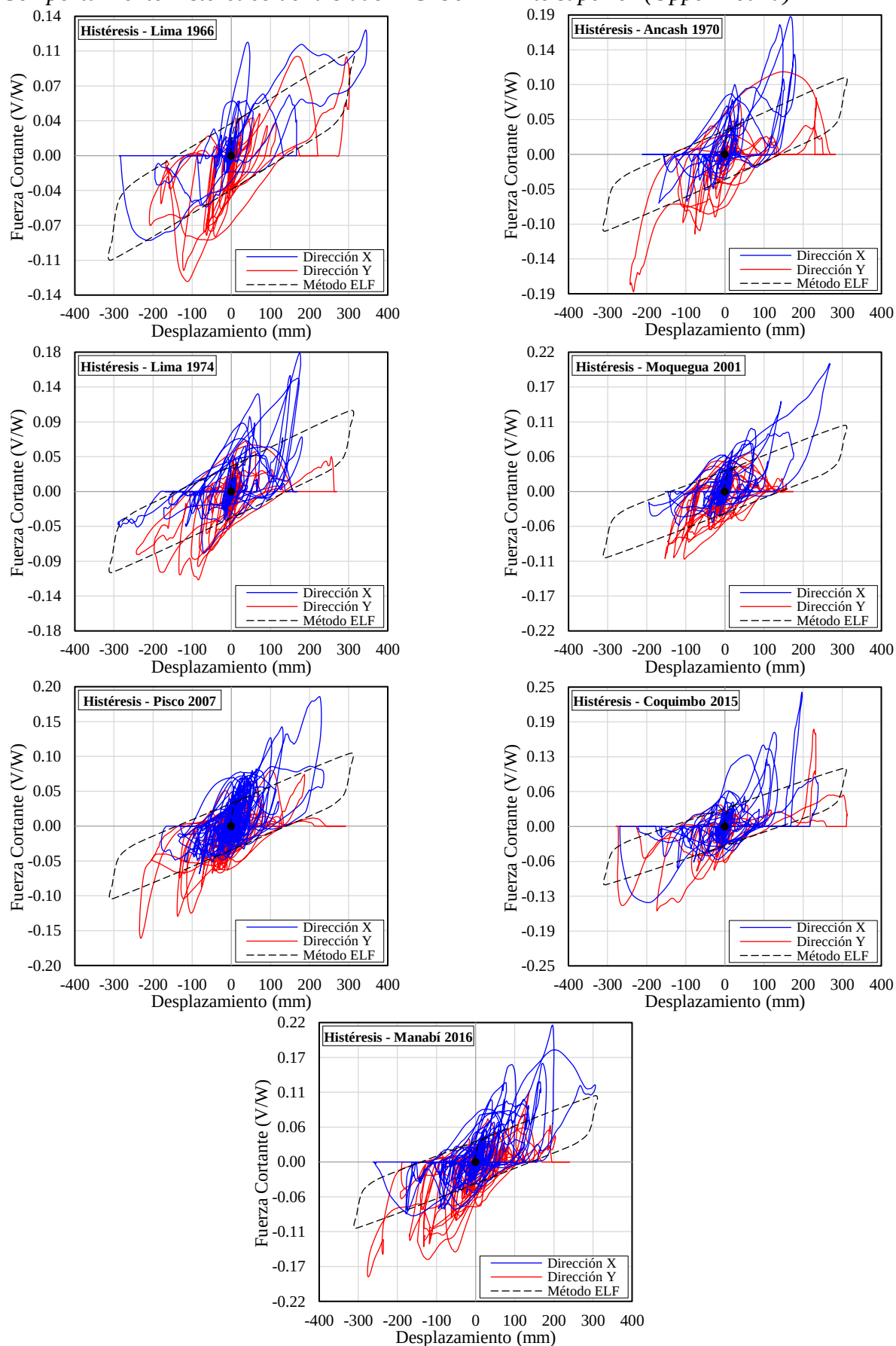
Figura 45*Comportamiento histerético del aislado K5196 – Límite inferior (Lower Bound)*

Figura 46*Comportamiento histerético del aislador K5196 – Límite superior (Upper Bound)*

De las figuras 43 y 44 se puede verificar que, el aislador K5295 por lo general para ambas propiedades de límite presenta un comportamiento histerético adecuado, disipando la mayor parte de la energía bajo el área de la curva de histéresis obtenida con el método de análisis ELF, a excepción del sismo de Coquimbo 2015, produciendo la máxima respuesta para propiedades de límite inferior (Lower Bound), con una fuerza cortante de 0.125186 (en dirección X) y de igual modo ocurre con el sismo de Lima 1966 para propiedades de límite superior (Upper Bound), con un fuerza cortante de 0.1013 (en dirección X). En cuanto a los desplazamientos del aislador en todos los sismos son inferiores al desplazamiento D_M calculado con el método de análisis ELF para ambas propiedades de análisis.

Por otro lado, de las figuras 45 y 46 muestran que el aislador K5196 tiene un comportamiento histerético inadecuado, sobrepasando el área por debajo de la curva obtenida con el método de análisis ELF, no llegando a disipar por completo la energía demanda en este aislador, teniendo respuestas superiores a la establecida con el método de análisis ELF en todos los sismos analizados, alcanzando una fuerza cortante máxima con el sismo de Ancash 1970 de 0.241884 (en dirección Y) respecto a las propiedades del límite inferior (Lower Bound) y de 0.240823 (en dirección X) con el sismo de Coquimbo 2015 para propiedades de límite superior (Upper Bound), pese a que presenta desplazamientos inferiores al desplazamiento D_M calculado con el método de análisis ELF.

b) Orbitales de desplazamientos máximos con el método de análisis NLRHA

En las figuras 47 y 48 se muestra los desplazamientos máximos obtenidos para los 7 sismos considerados tanto para propiedades de límite inferior (Lower Bound) como de límite superior (Upper Bound). De los resultados mostrados en las gráficas, se puede ver que el sismo de Coquimbo 2015 presenta un mayor desplazamiento máximo con respecto a todos los sismos en análisis para ambas propiedades, con un valor de 467.6545 mm para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y 391.9412 mm para propiedades de límite superior (Upper Bound).

Además, se puede observar en los resultados que hay 6 sismos que superan la capacidad de desplazamiento D_M del aislador obtenido con el método de análisis ELF para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y 4 sismos que logran superarlo para propiedades de límite superior (Upper Bound), llegando a deducir que las respuestas máximas se producen para propiedades de límite inferior (Lower Bound).

Figura 47

Desplazamiento máximo D_M del aislador K5185 – Límite inferior (Lower Bound)

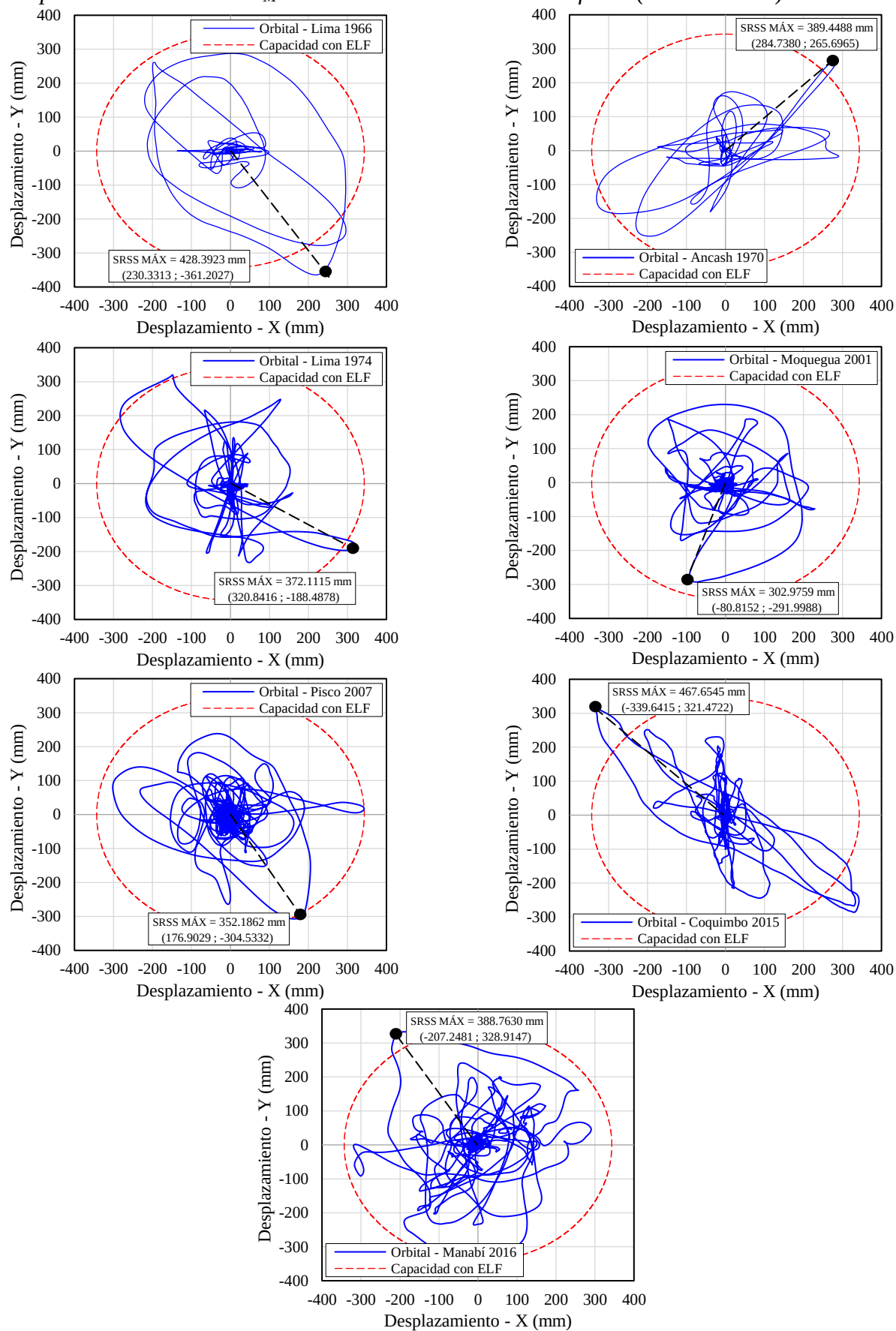
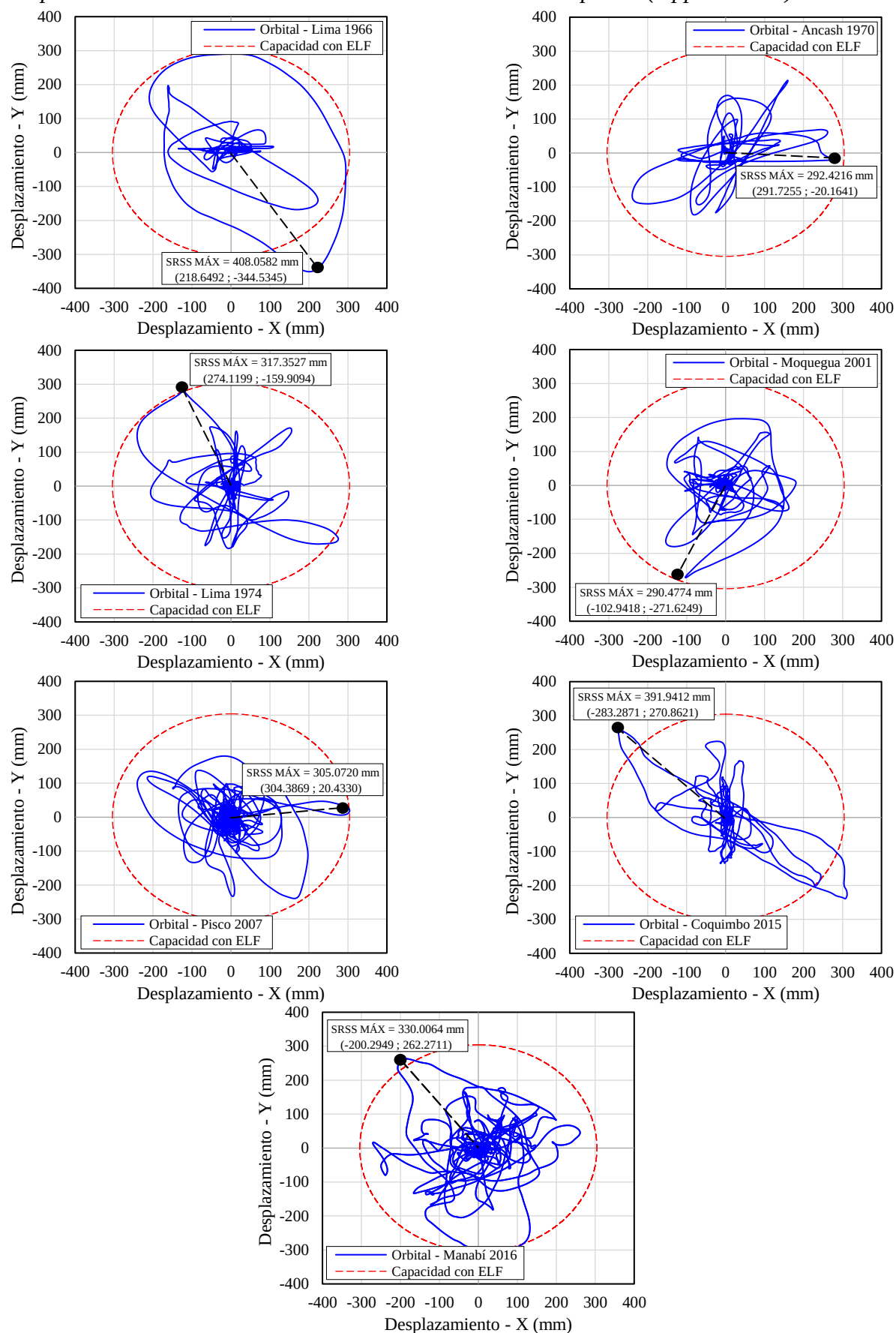


Figura 48

Desplazamiento máximo D_M del aislador K5185 – Límite superior (Upper Bound)



Las figuras 49 y 50 contrastan los 7 desplazamientos del aislador FPT para las dos propiedades de límite, se puede ver que cada evento sísmico provoca un desplazamiento diferente. El desplazamiento máximo se produce con el sismo de Lima 1966 y Coquimbo 2015, los cuales superan la fase III del aislador, pudiendo afectar la fuerza de restauración (F_{res}), ya que desplazamientos grandes generan que esta fuerza disminuya considerablemente. Sin embargo, los desplazamientos no logran superar la capacidad total del aislador (Fase V).

Figura 49

Desplazamientos máximos D_M con el método de análisis NLRHA – Límite inferior (LB)

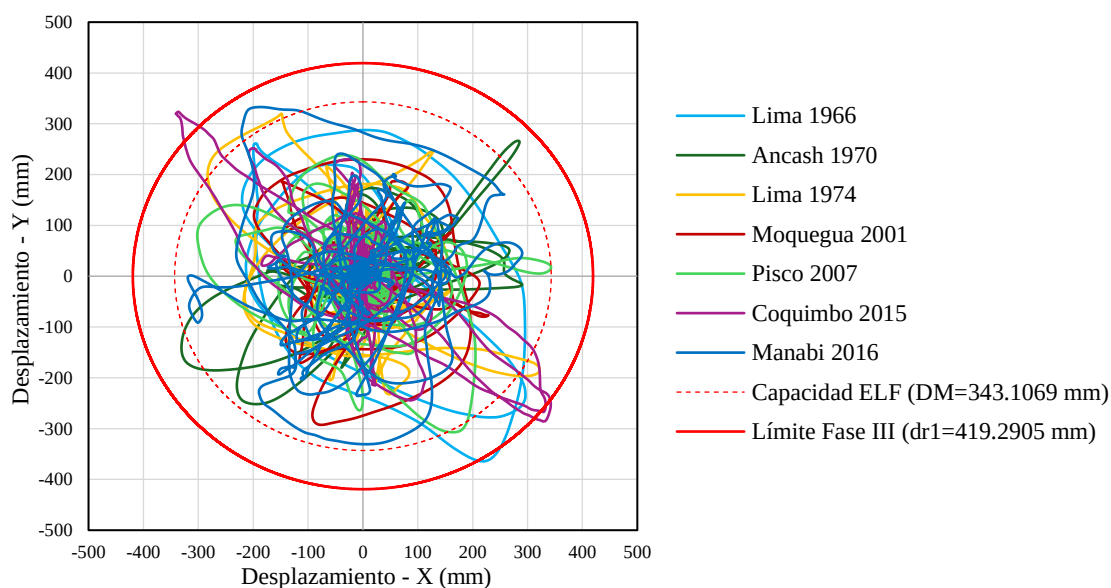
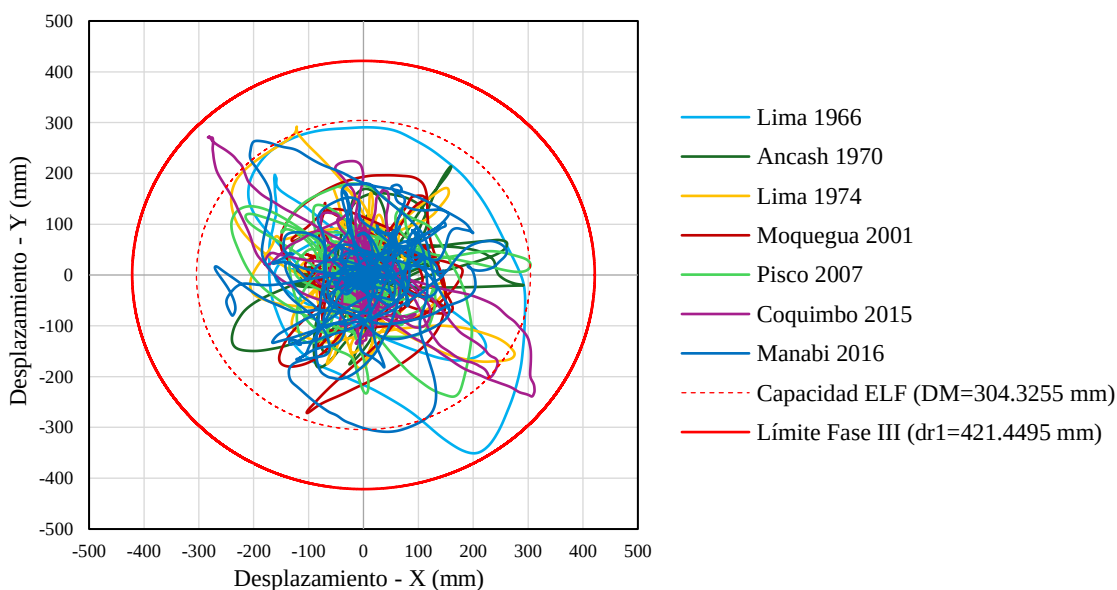


Figura 50

Desplazamientos máximos D_M con el método de análisis NLRHA – Límite superior (UB)



c) Resultados de desplazamientos y fuerzas cortantes

- Para el sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base

Para hallar el desplazamiento y la fuerza cortante, primero se calculó el máximo valor de SRSS de las 2 componentes horizontales para cada sismo, luego se sacó el promedio de los 7 sismos.

Desplazamiento máximo (D_M)

En las tablas 21 y 22 se detalla los desplazamientos D_M promedios aplicando el método de análisis NLRHA para los 10 aisladores seleccionados, de los cuales, para ambas propiedades de límite, el aislador K5185 tiene el mayor desplazamiento.

Tabla 21

Resultados de desplazamientos máximos D_M – Límite inferior (Lower Bound)

Aislador	Lima (mm)	Ancash (mm)	Lima (mm)	Moquegua (mm)	Pisco (mm)	Coquimbo (mm)	Manabí (mm)	Promedio (mm)
K5298	424.1472	395.6267	371.3311	299.0865	352.1890	467.4951	389.3900639	385.6094
K5295	422.2498	394.5087	371.7440	299.2428	352.1026	468.0977	389.6930774	385.3770
K5215	429.6272	391.4905	370.6087	301.7163	351.7925	465.9677	387.7806983	385.5691
K5196	430.5708	386.0831	364.5893	299.5202	349.4994	459.5706	384.1715797	382.0007
K5333	422.1976	397.4281	371.4098	298.0309	352.1999	468.3080	390.4079453	385.7117
K5185	428.3923	389.4488	372.1115	302.9759	352.1862	467.6545	388.7630195	385.9331
K5301	417.9991	392.7322	373.0892	299.4889	352.4338	469.2368	390.8093489	385.1128
K5242	428.9358	394.2811	370.3540	299.9463	351.5185	465.6340	387.5229515	385.4561
K5187	429.2734	389.6156	371.4289	302.6935	351.9702	466.7862	388.2712606	385.7199
K5234	419.4943	389.2364	370.1747	299.2236	349.8931	463.0645	385.7563129	382.4061

Tabla 22

Resultados de desplazamientos máximos D_M – Límite superior (Upper Bound)

Aislador	Lima (mm)	Ancash (mm)	Lima (mm)	Moquegua (mm)	Pisco (mm)	Coquimbo (mm)	Manabí (mm)	Promedio (mm)
K5298	402.5664	290.8731	316.9067	294.3295	297.4916	391.8799	332.4231326	332.3529
K5295	400.0759	291.1119	317.0277	293.9344	299.5916	392.5401	333.8613161	332.5918
K5215	409.9020	290.8601	316.3745	291.4528	299.9225	390.4224	327.6780246	332.3732
K5196	412.7725	283.5741	312.7429	289.2562	292.7450	389.4218	320.9725074	328.7836
K5333	400.0516	290.7025	316.9828	295.7474	295.9704	392.8795	334.4189002	332.3933
K5185	408.0582	292.4216	317.3527	290.4774	305.0720	391.9412	330.0063678	333.6185
K5301	394.3309	292.0128	317.6800	293.6637	303.7895	394.4927	337.7991327	333.3955
K5242	409.0940	290.4786	316.5188	292.7678	295.9881	390.0270	327.3107014	331.7407
K5187	409.2991	291.6948	316.8810	290.5858	303.1727	391.1862	328.7460917	333.0808
K5234	397.3711	290.3605	315.4736	290.0302	301.2397	389.6059	329.7444057	330.5465

Fuerza cortante (V_b)

En las tablas 23 y 24 se muestran los resultados de las fuerzas cortantes V_b empleando el método de análisis NLRHA para los 10 aisladores seleccionados, donde se observa que el comportamiento más adecuado se produce en el aislador K5295, cuyo valor tiende al promedio.

Tabla 23

Resultados de fuerzas cortantes V_b – Límite inferior (Lower Bound)

Aislador	Lima 1966	Ancash 1970	Lima 1974	Moquegua 2001	Pisco 2007	Coquimbo 2015	Manabí 2016	Promedio
	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)
K5298	41.0364	46.6342	43.1755	35.0378	40.4929	69.0573	44.92768824	45.7660
K5295	51.9490	53.7176	49.9927	43.4124	47.6548	78.2089	51.6255569	53.7944
K5215	61.0390	62.7835	59.7774	49.5785	54.9947	91.5516	61.43779232	63.0232
K5196	115.1118	277.4025	130.6603	189.1401	163.3474	180.6724	197.8311842	179.1665
K5333	55.1642	38.9028	48.9935	30.2401	43.9286	72.3590	42.04613125	47.3763
K5185	39.4965	25.1652	40.0409	23.5519	29.8350	91.6796	42.56045327	41.7614
K5301	67.0816	66.8920	84.2520	52.2280	52.4846	151.1675	81.8309218	79.4195
K5242	167.9309	138.1507	162.8438	112.0964	137.8631	199.7805	118.9181204	148.2262
K5187	171.0960	110.9951	171.0776	96.4425	129.3234	302.5320	184.0265391	166.4990
K5234	131.9160	149.6725	158.2419	114.6501	139.1613	308.1087	153.9332583	165.0977

Tabla 24

Resultados de fuerzas cortantes V_b – Límite superior (Upper Bound)

Aislador	Lima 1966	Ancash 1970	Lima 1974	Moquegua 2001	Pisco 2007	Coquimbo 2015	Manabí 2016	Promedio
	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)
K5298	40.7266	39.1966	43.6523	38.8400	40.1271	49.9957	42.89481404	42.2047
K5295	52.0605	46.5357	50.3416	48.0741	47.5499	57.6178	49.58842984	50.2526
K5215	61.2432	55.3746	60.4182	54.0191	54.5929	68.1801	58.96052033	58.9698
K5196	126.0801	193.6608	154.1547	195.0609	161.4379	254.9113	219.4774185	186.3976
K5333	62.2818	41.4240	54.9733	30.6767	46.1152	71.0443	48.9410097	50.7795
K5185	32.8647	27.8443	40.4995	21.5109	33.1038	51.3896	39.89418571	35.3010
K5301	75.7507	58.5140	88.1885	50.4716	58.6506	124.2296	75.09114673	75.8423
K5242	183.6379	152.0582	162.5552	92.7785	132.1534	198.0267	142.8158011	152.0037
K5187	143.2292	131.2827	172.5232	98.4997	145.5855	189.1647	177.2898846	151.0821
K5234	162.6899	136.7094	152.3706	106.7434	139.4533	248.3808	149.2264266	156.5106

- **Para elementos estructurales por encima del nivel de base**

Fuerza cortante (V_s)

La tabla 25 muestra los valores obtenidos de las fuerzas cortantes V_s sobre el nivel de base para cada componente horizontal con el análisis dinámico (NLRHA). Siendo el sismo de Coquimbo 2015 y Manabí 2016 donde se produce las mayores fuerzas cortantes V_s .

Tabla 25

Resultados de fuerzas cortantes V_{st} – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB)

Sismo	Límite inferior (LB)		Límite superior (UB)		Unid.
	V_x	V_y	V_x	V_y	
Lima (Perú)	4390.7495	6911.5426	4653.4357	7109.7443	ton
Ancash (Perú)	6153.4701	4695.7099	5275.2347	4544.7009	ton
Lima (Perú)	5546.1428	5177.2070	5207.4937	4816.7292	ton
Moquegua (Perú)	3961.6943	5978.9802	4586.7165	5962.8441	ton
Pisco (Perú)	5813.9422	6050.1491	5621.2306	5738.9741	ton
Coquimbo (Chile)	7071.9765	6369.5087	5483.8934	5847.9907	ton
Manabí (Ecuador)	6535.7094	5901.5282	6472.7884	6343.9978	ton
Promedio	5639.0978	5869.2323	5328.6847	5766.4259	ton

d) Combinaciones con efectos de cargas sísmicas

Tomando en cuenta la normativa del ASCE/SEI 7-16, los aisladores FPT deberán cumplir con lo dispuesto bajo las siguientes combinaciones de carga:

1. Carga gravitacional:

$$C_1 = 1.2D + 1.6L + \%SC$$

2. Carga promedio:

$$C_2 = 1.0D + 0.5L + \%SC = W$$

3. Carga máxima:

$$C_3 = 1.2D + E_h + E_v + 0.5L + \%SC$$

4. Carga mínima:

$$C_4 = 0.9D + E_h - E_v$$

Donde:

- **Efecto del sismo en dirección vertical (E_v)**

$$E_v = 0.2 S_{DS} D$$

Sí: $S_{DS} = 1.509375$ g (S_{DS} : Aceleración espectral en periodos cortos)

- **Efecto del sismo en dirección horizontal (E_h)**

$$E_h = \rho Q_E$$

Sí:

ρ : Factor de redundancia.

Q_E : Efecto producido por la fuerza sísmica horizontal con el MCE_R .

La tabla 26 muestra los resultados obtenidos de las combinaciones de carga para verificar la estabilidad de los 10 aisladores FPT seleccionados. Se puede constatar que con la carga W_{NLRHA} , se produce fuerzas a tracción con valores menor o igual a cero, siendo este resultado un indicador de levantamiento (Uplift) de los dispositivos. Además, se muestra la presencia de aisladores con la carga W_{NLRHA} por debajo del valor de carga mínima requerida (C_4). En el apéndice B se muestra las combinaciones de carga y la carga W_{NLRHA} de los 184 aisladores, de los cuales 35 presentan levantamientos y 80 no cumplen con la carga mínima requerida.

Tabla 26

Combinaciones con efectos de cargas sísmicas de los 10 aisladores seleccionados

Aislador	D	L	SC	Ev	E_h	C1	C2	C3	C4	W_{NLRHA}
K5185	131.11	75.40	54.97	39.58	36.37	332.93	223.78	325.95	114.79	32.74
K5187	750.49	202.09	105.43	226.56	36.36	1329.37	956.97	1369.98	485.24	182.00
K5196	811.01	98.69	-0.78	244.82	36.21	1130.33	859.57	1302.81	521.30	-0.06
K5215	490.04	138.57	1.14	147.93	35.29	810.90	560.46	841.69	328.40	534.66
K5234	758.84	138.89	0.92	229.08	34.81	1133.75	829.21	1244.86	488.69	21.65
K5242	712.74	117.35	0.73	215.16	35.52	1043.79	772.15	1165.37	461.83	0.00
K5295	419.91	121.67	1.23	126.76	34.73	699.78	481.97	727.43	285.88	463.36
K5298	348.76	98.51	0.65	105.28	35.00	576.78	398.66	608.70	243.60	368.36
K5301	179.34	35.15	0.12	54.14	34.72	271.56	197.03	321.75	141.99	-0.03
K5333	196.43	38.09	0.18	59.30	35.29	296.85	215.66	349.54	152.78	0.00

e) Levantamiento en aisladores FPT (Uplift)

Los aisladores FPT están diseñados para absorber y disipar la energía de las fuerzas horizontales de un sismo, sin embargo, pese a que este sismo genera fuerzas verticales a compresión, también puede generar fuerzas a tracción, conllevando a producir levantamientos (Uplift) de algunos aisladores en el sistema de aislamiento.

Como se puede observar en la figura 51, el levantamiento en el aislador K5295 (comportamiento histerético adecuado) es máximo de 0.0584 mm con el sismo de Manabí 2016 correspondiente al límite superior (Upper Bound), siendo un levantamiento prácticamente insignificante. Por lo tanto, no altera el desempeño del mecanismo del aislador.

Figura 51

Levantamiento (Uplift) del aislador K5295 – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB)

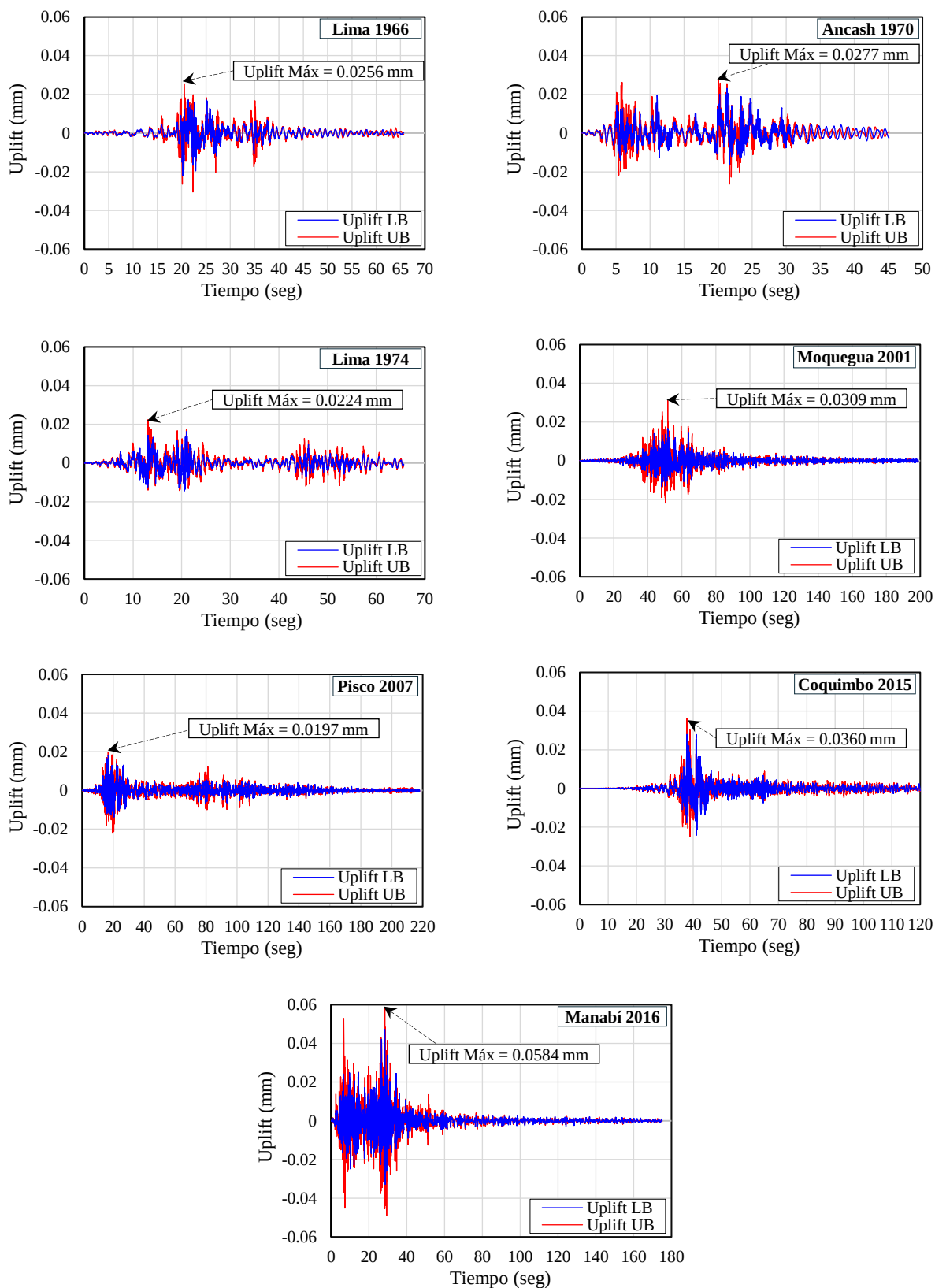
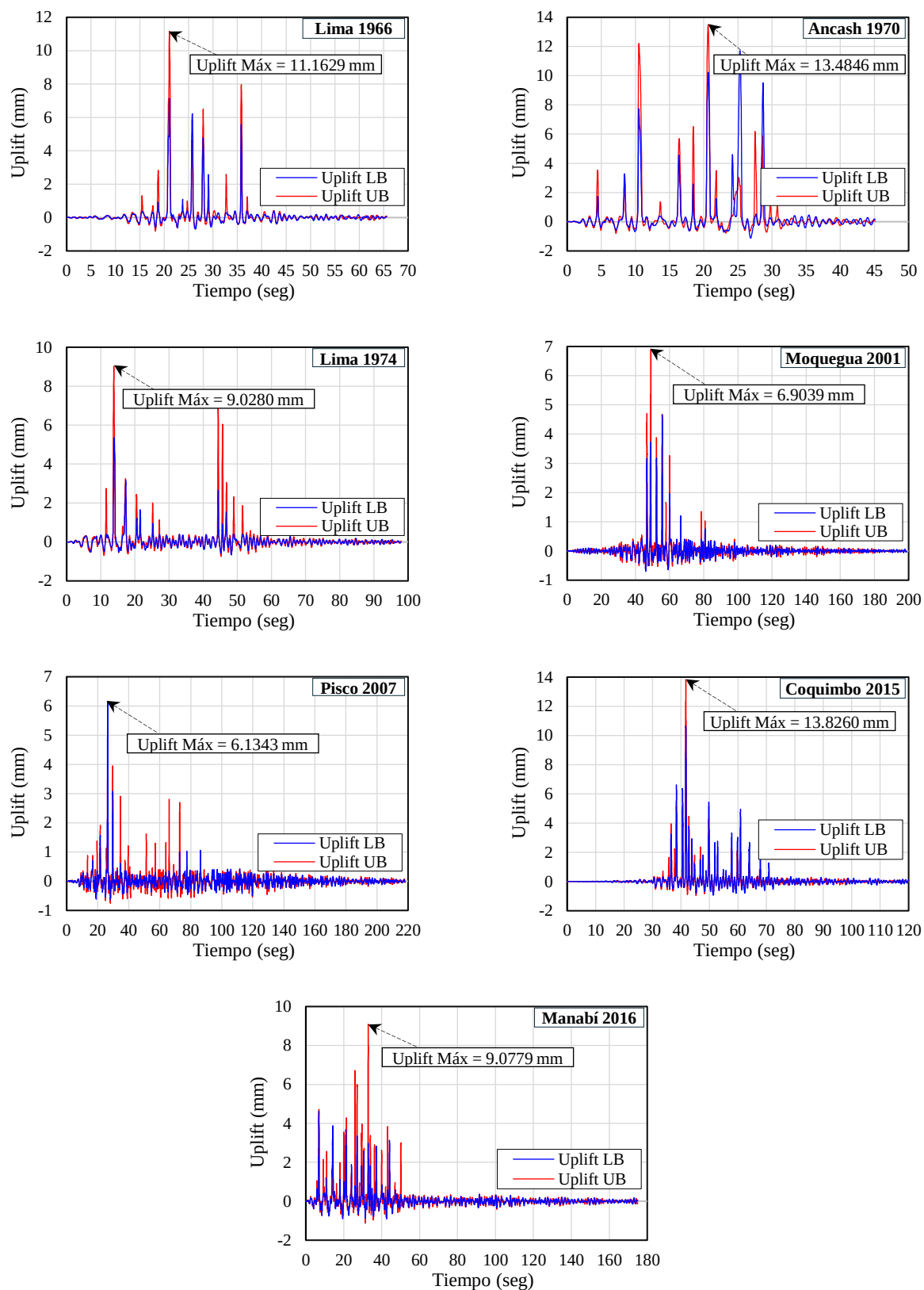


Figura 52

Levantamiento (Uplift) del aislador K5196 – Límite inferior (LB) y Límite superior (UB)

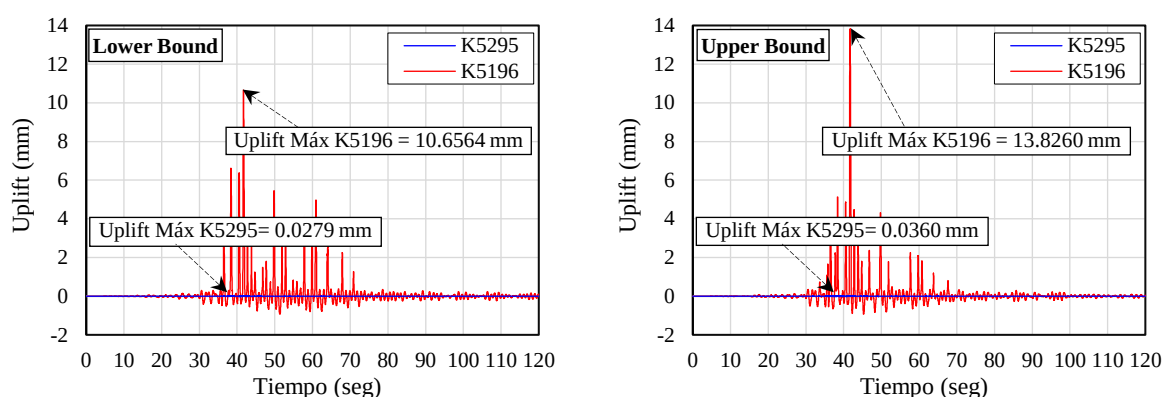


La figura 52 muestra el levantamiento en el aislador K5196 (comportamiento histerético inadecuado) siendo superior al del K5295, llegando a tener un levantamiento máximo de 13.8260 mm para propiedades de límite superior (Upper Bound) con el sismo de Coquimbo 2015.

En la figura 53 para una mayor apreciación de las diferencias en los levantamientos (uplift) de los aisladores K5295 y K5196, se realiza la comparación gráfica a una misma escala con el sismo de Coquimbo 2015 para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound).

Figura 53

Comparación de levantamientos (Uplift) de los aisladores K5295 y K5196



De la figura 53 (levantamientos o uplift) y de las figuras de la 43 a la 46 (comportamientos histeréticos), para el aislador K5196, se puede verificar que los levantamientos influyen directamente en el comportamiento histerético de los dispositivos para ambas propiedades de límite, haciendo que sea inadecuado ante la demanda sísmica, lo cual podría conllevar a que el mecanismo de los aisladores FPT no tengan un desempeño eficaz.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Requisitos mínimos para el análisis estático con el método ELF

Tomando en cuenta los resultados obtenidos al realizar el análisis estático con el método ELF del sistema de aislamiento con aisladores FPT para el límite inferior (Lower Bound) y límite superior (Upper Bound) en el software ETABS, se procedió a evaluarlos conforme a lo establecido en la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E031.

4.1.1. Fuerzas cortantes

a) Para el sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base (V_b)

$$V_b = K_M D_M$$

- Fuerzas cortantes para propiedades de límite inferior (Lower Bound)

$$V_b = 22.032130 (343.1069) = 7559.3758 \text{ ton}$$

- Fuerzas cortantes para propiedades de límite superior (Upper Bound)

$$V_b = 24.915986 (304.3255) = 7582.5699 \text{ ton}$$

b) Para elementos estructurales por encima del nivel de base (V_s)

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$$

Sí: el coeficiente de reducción sísmica en el sistema de aislamiento $R_0 = 7$ (para un sistema estructural dual), el valor del coeficiente de reducción sísmica sobre el sistema de aislamiento $R_I = 3/8R_0 = 2.6250$, además se debe cumplir que: $1 < R_I < 2$, como $R_I > 2$, entonces se asume el valor de $R_I = 2$.

Fuerza cortante no reducida (V_{st}):

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M}$$

Sí: $W_s = 60935.3194 \text{ ton}$ (W_s : Peso sísmico, excluyendo la carga reactiva del nivel de base).

- Fuerza cortante V_{st} para propiedades de límite inferior (Lower Bound)

$$V_{st} = 7559.3758 \left(\frac{60935.3194}{72624.8817} \right)^{1-2.5(0.137112601)}$$

$$V_{st} = 6735.8924 \text{ ton}$$

Por lo tanto, el valor de la fuerza cortante V_s es:

$$V_s = \frac{6735.8924}{2} = 3367.9462 \text{ ton}$$

- Fuerza cortante V_{st} para propiedades de límite superior (Upper Bound)

$$V_{st} = 7582.5699 \left(\frac{60935.3194}{72624.8817} \right)^{1-2.5(0.192820231)}$$

$$V_{st} = 6923.7314 \text{ ton}$$

Por lo tanto, el valor de V_s es:

$$V_s = \frac{6923.7314}{2} = 3461.8657 \text{ ton}$$

En la tabla 27 se resume los valores de las fuerzas cortantes para el análisis estático, empleando el método de análisis de fuerza lateral equivalente (ELF):

Tabla 27

Fuerza cortante con el método de análisis ELF

Fuerza Cortante	Símb.	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
Para el sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base (V_b)	V_b	7559.3758	7582.5699	ton
Para elementos estructurales por encima del nivel de base (V_s)	V_{st}	6735.8924	6923.7314	ton
	V_s	3367.9462	3461.8657	ton

4.1.1.1. Límites de fuerza cortantes

La fuerza cortante V_s de la tabla 27 no debe ser menor al valor obtenido de acuerdo a cada uno de los criterios calculados con la normativa según la tabla 28.

Tabla 28*Límites de fuerza Cortante V_s con el método de análisis ELF*

Criterios para evaluar el límite de fuerza cortante	Símb.	Valor	Unid.
1. La fuerza cortante para una edificación de base fija con peso sísmico (W_s), y un periodo igual al periodo aislado (T_M).	V_s	1344.0201	ton
2. La fuerza cortante V_{st} , haciendo uso de la ecuación 58, con la fuerza cortante V_b , igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislamiento sísmico utilizando el mayor valor de los siguientes criterios:			
2a. Las propiedades más críticas del sistema de aislamiento sísmico correspondiente al límite superior (Upper Bound).	V_s	4380.1498	ton
2b. 1.5 veces las propiedades nominales requeridas para activar completamente el sistema de aislamiento sísmico.	V_s	5144.5256	ton
2c. La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizante después de un ciclo dinámico completo en el D_M .	V_s	1075.8699	ton

De la tabla 28 la fuerza cortante V_s máxima es 5144.5256 ton, según el criterio 2(b). Por lo tanto, este resultado es mayor al valor de 3461.8657 ton obtenido según la tabla 27 (Límite inferior - LB), de esta manera no cumpliría con la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031.

4.1.1.2. Distribución de fuerza vertical

Los valores de la fuerza cortante V_s sobre el sistema de aislamiento para cada nivel de la edificación se muestra en la tabla 29 para las propiedades de límite superior (Upper Bound).

Tabla 29*Distribución de fuerza cortante – Límite superior (Upper Bound)*

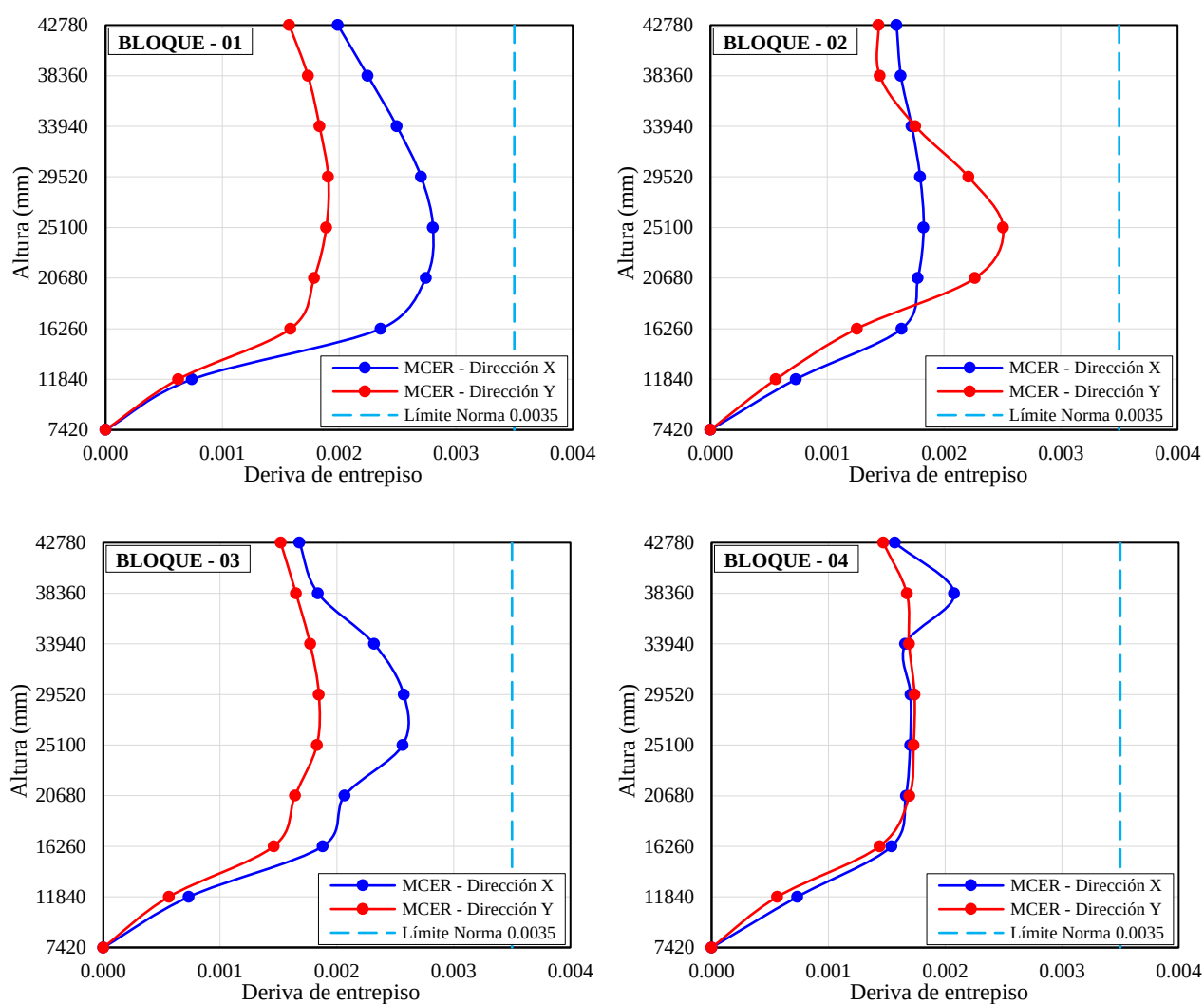
Nivel	W_i (ton)	h_i (mm)	$W_i h_i^2$ (ton-mm²)	C_{vi}	F_i (ton)	V_{bi} (ton)
Piso 7	3265.6686	42780	1144218830439460000	0.198633726	687.6433	687.6433
Piso 6	6509.0795	38360	1619251605688010000	0.281098311	973.1246	1660.7679
Piso 5	7120.5136	33940	1205964249793170000	0.209352588	724.7505	2385.5184
Piso 4	7202.0630	29520	787006408318378000	0.136622481	472.9687	2858.4871
Piso 3	8031.5073	25100	527340856434000000	0.091545146	316.9170	3175.4041
Piso 2	7816.9044	20680	279343143256888000	0.048493320	167.8774	3343.2815
Piso 1	8001.7808	16260	134376908244386000	0.023327519	80.7567	3424.0382
Sótano 1	10150.3789	11840	62943876116716500	0.010926910	37.8275	3461.8657
Sótano 2 (Aisl.)	14526.9855	7420	-	-	329.4193	3791.2850

4.1.2. Límites de la distorsión angular de entrepiso o deriva (Método de análisis ELF)

En la tabla 30 y en la figura 54 se muestran los resultados obtenidos de las derivas máximas por cada nivel de piso que está sobre el sistema de aislamiento sísmico respecto al MCE_R para propiedades de límite superior (Upper Bound). Se tomó como muestra este límite, por los resultados más desfavorables que presentan.

Tabla 30*Derivas máximas de la edificación con el MCE_R – Límite superior (Upper Bound)*

Nivel	Altura (mm)	BLOQUE 1		BLOQUE 2		BLOQUE 3		BLOQUE 4	
		Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y
P7	42780	0.001989	0.001573	0.001594	0.001439	0.001679	0.001519	0.001569	0.001470
P6	38360	0.002245	0.001733	0.001631	0.001450	0.001838	0.001650	0.002077	0.001672
P5	33940	0.002494	0.001832	0.001724	0.001756	0.002318	0.001771	0.001658	0.001691
P4	29520	0.002702	0.001907	0.001796	0.002210	0.002573	0.001846	0.001704	0.001738
P3	25100	0.002804	0.001890	0.001826	0.002507	0.002564	0.001829	0.001700	0.001730
P2	20680	0.002743	0.001786	0.001777	0.002266	0.002066	0.001641	0.001664	0.001694
P1	16260	0.002357	0.001583	0.001638	0.001254	0.001879	0.001459	0.001540	0.001438
S1	11840	0.000741	0.000622	0.000732	0.000561	0.000732	0.000561	0.000732	0.000561
S2	7420	Sistema de Aislamiento Sísmico							

Figura 54*Derivas máximas de la edificación con el MCE_R – Límite superior (Upper Bound)*

De la figura 54 y de los resultados obtenidos en la tabla 30, se puede ver que la deriva máxima de la edificación para propiedades de límite superior (Upper Bound) en la dirección X es 0.002804, que corresponde al bloque 1 (Nivel de Piso 3) y respecto a la dirección Y es 0.002507, correspondiente al bloque 2 (Nivel de Piso 3). Ambas derivas son menores a 0.0035, valor estipulado por la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031.

4.1.3. Requisitos restrictivos para el análisis estático con el método ELF

Puesto que el análisis estático empleando el método ELF se basa en las características de deformación del sistema de aislamiento es de importancia cumplir con algunos requisitos fundamentales para asegurar un comportamiento adecuado del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, pues este depende directamente de configuración estructural de la edificación. A continuación, la tabla 31 muestra la comparación de los resultados obtenidos con lo requerido por la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031.

Tabla 31

Requerimiento de acuerdo a la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031 – Método ELF

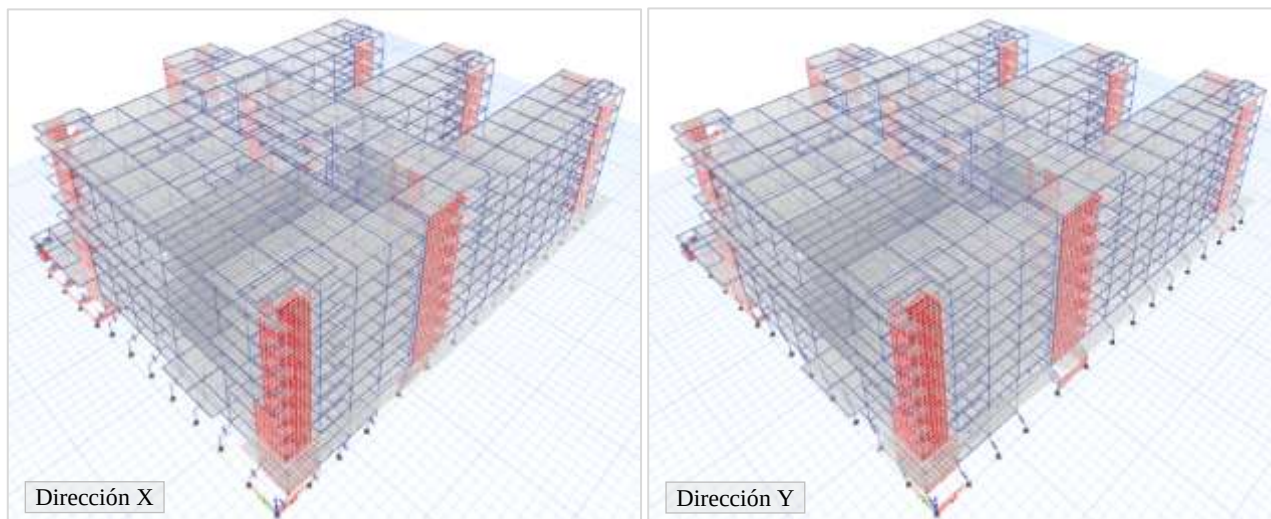
Requerimiento de acuerdo a la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031	Símb.	Valor Requerido	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
1. El período efectivo de la edificación aislada en el desplazamiento máximo, es menor o igual a 5,0 seg.	T _M	5	3.642789	3.425494	seg.
2. El amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo, es menor o igual al 30%.	β _M	30%	13.7113 %	19.2820 %	-
3. El período efectivo de la edificación aislada en el desplazamiento de diseño, es mayor que tres veces que el período de base fija.	3T	3.490143	3.642789	3.425494	seg.
4. La edificación sobre el sistema de aislamiento no debe tener irregularidad estructural.	I	-	Presenta Irregularidad		-
5. El sistema de aislamiento cumple todos los siguientes criterios:					
5a. La rigidez efectiva del sistema de aislamiento en el desplazamiento traslacional es mayor que un tercio de la rigidez efectiva en el 20% del desplazamiento máximo.	K _{ef - LB}	13.823342	22.032130	24.915986	ton/mm
	K _{ef - UB}	21.633692			
5b. El sistema de aislamiento es capaz de producir una fuerza de restauración mayor o igual a 0.025 W.	F _{Rest}	0.025	0.081130	0.071960	W
5c. El desplazamiento total máximo no puede ser menor que el 1.15 del valor del desplazamiento máximo considerado.	1.15 D _{M - LB}	394.5729	396.8532	351.9968	mm
	1.15 D _{M - UB}	349.9743			

4.1.4. Deformadas de la edificación

Con las propiedades obtenidas del aislador FPT e incorporándolas a la edificación modelada en ETABS, se obtiene los desplazamientos en las direcciones X – Y de la edificación con respecto al sismo máximo considerado (MCE_R).

Figura 55

Deformadas de la edificación para el sismo en “X” e “Y”



4.2. Requisitos mínimos para el análisis dinámico con el método NLRHA

En base a los resultados obtenidos con el método de análisis NLRHA, se procede a verificar algunos requisitos de acuerdo a la normativa del ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031.

4.2.1. Desplazamientos y fuerzas cortantes

a) Para el sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel de base

- **Desplazamiento total máximo (D_{TM})**

Para calcular el desplazamiento D_{TM} con el método de análisis NLRHA, se multiplicó por un factor de amplificación general (SF), considerado como el mayor valor obtenido de los factores de amplificación individuales de los 10 aisladores FPT seleccionados del sistema de aislamiento sísmico.

La tabla 32 nos muestra los resultados obtenidos para los factores de amplificación SF y los desplazamientos D_M y D_{TM} de los aisladores analizados, considerando los parámetros: $CR = 38484.1704$ mm, $PT = 1.1678$ seg, $e = 7686.04$ mm, $b = 101700$ mm y $d = 79200$ mm.

Tabla 32*Desplazamientos totales máximos con el método de análisis NLRHA*

Aislador	Coord - X	Coord - Y	Distancia - y	SF	Límite inferior (LB)		Límite superior (UB)	
	(mm)	(mm)	(mm)		D_M (mm)	D_{TM} (mm)	D_M (mm)	D_{TM} (mm)
K5298	76300	14400	37815.8296	1.1539	385.6094	471.2996	332.3529	406.2085
K5295	76300	36000	29194.2934	1.1188	385.3770	471.0156	332.5918	406.5005
K5215	14400	36000	32705.7066	1.1331	385.5691	471.2504	332.3732	406.2333
K5196	0	0	47105.7066	1.1917	382.0007	466.8891	328.7836	401.8460
K5333	101700	0	54594.2934	1.2222	385.7117	471.4248	332.3933	406.2579
K5185	0	79200	47105.7066	1.1917	385.9331	471.6954	333.6185	407.7553
K5301	83500	79200	36394.2934	1.1481	385.1128	470.6927	333.3955	407.4828
K5242	38900	0	8205.7066	1.0334	385.4561	471.1123	331.7407	405.4603
K5187	0	64800	47105.7066	1.1917	385.7199	471.4347	333.0808	407.0982
K5234	38900	72000	8205.7066	1.0334	382.4061	467.3846	330.5465	404.0007

El máximo valor para el factor SF fue de 1.2222, que corresponde al aislador K5333, este valor es utilizado como un factor de amplificación general. El desplazamiento D_{TM} para el sistema de aislamiento sísmico, se calculó como el valor promedio de sus desplazamientos respectivos de los 10 aisladores seleccionados. Para propiedades de límite inferior (Lower Bound) se obtuvo un desplazamiento D_{TM} de 470.4199 mm y para propiedades de límite Superior (Upper Bound) un valor de 405.8843 mm.

En la tabla 33 se compara el desplazamiento D_{TM} reducido al 80% con el método de análisis ELF y el desplazamiento D_{TM} con el método de análisis NLRHA. Para este caso no se requirió utilizar D'_M en lugar de D_M .

Tabla 33*Desplazamientos totales máximos (D_{TM}) – Métodos de análisis ELF y NLRHA*

Método de Análisis	Propiedad	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
ELF	D_{TM}	396.8532	351.9968	mm
	80% D_{TM}	317.4825	304.1216	mm
NLRHA	D_{TM}	470.4199	405.8843	mm

En la tabla 33 se puede verificar que el desplazamiento D_{TM} obtenido mediante el método de análisis NLRHA no llega a ser inferior al 80% del obtenido con el método de análisis ELF para ambas propiedades de límites. Cumpliendo con lo requerido por la normativa.

- **Fuerzas cortantes (V_b)**

Para considerar el valor de la fuerza cortante V_b , se tomó en cuenta las figuras de la 43 a la 46 y las figuras del apéndice A. Se optó por seleccionar como valor promedio la del aislador K5295, que tiene el mejor desempeño en cuanto a comportamiento histerético, con la finalidad de suponer que el sistema de aislamiento trata de disipar la mayor energía posible.

La fuerza cortante V_b del sistema de aislamiento para propiedades de límite inferior (Lower Bound) es igual a 9898.1707 ton y para propiedades de límite superior (Upper Bound) es igual a 9246.4769 ton.

El valor tomado, solo es para evaluar lo mínimo requerido por la normativa, esto no indica que sea el valor real de la fuerza cortante V_b del sistema de aislamiento sísmico, ya que es impredecible calcular el valor exacto, pues la edificación presenta levantamientos en casi un 20% de los aisladores y por ende se elevan las fuerzas cortantes con valores extremos como se muestran en tablas 23 y 24.

En la tabla 34 se compara la fuerza cortante V_b reducida al 90% obtenida con el método del análisis ELF y la fuerza cortante V_b calculada con el método de análisis NLRHA.

Tabla 34

Fuerzas cortantes (V_b) – Métodos de análisis ELF y NLRHA

Método de Análisis	Propiedad	Límite inferior (LB)	Límite superior (UB)	Unid.
ELF	V_b	7559.3758	7582.5699	ton
	90% V_b	6803.4382	6824.3129	ton
NLRHA	V_b	9898.1707	9246.4769	ton

De los resultados de la tabla 34 se puede comprobar que, para ambas propiedades de límite la fuerza cortante V_b con el método de análisis NLRHA resulta no ser menor que el 90% del obtenido con el método de análisis ELF, de esta manera si cumple con lo dispuesto por la normativa.

b) Para elementos estructurales por encima del nivel de base

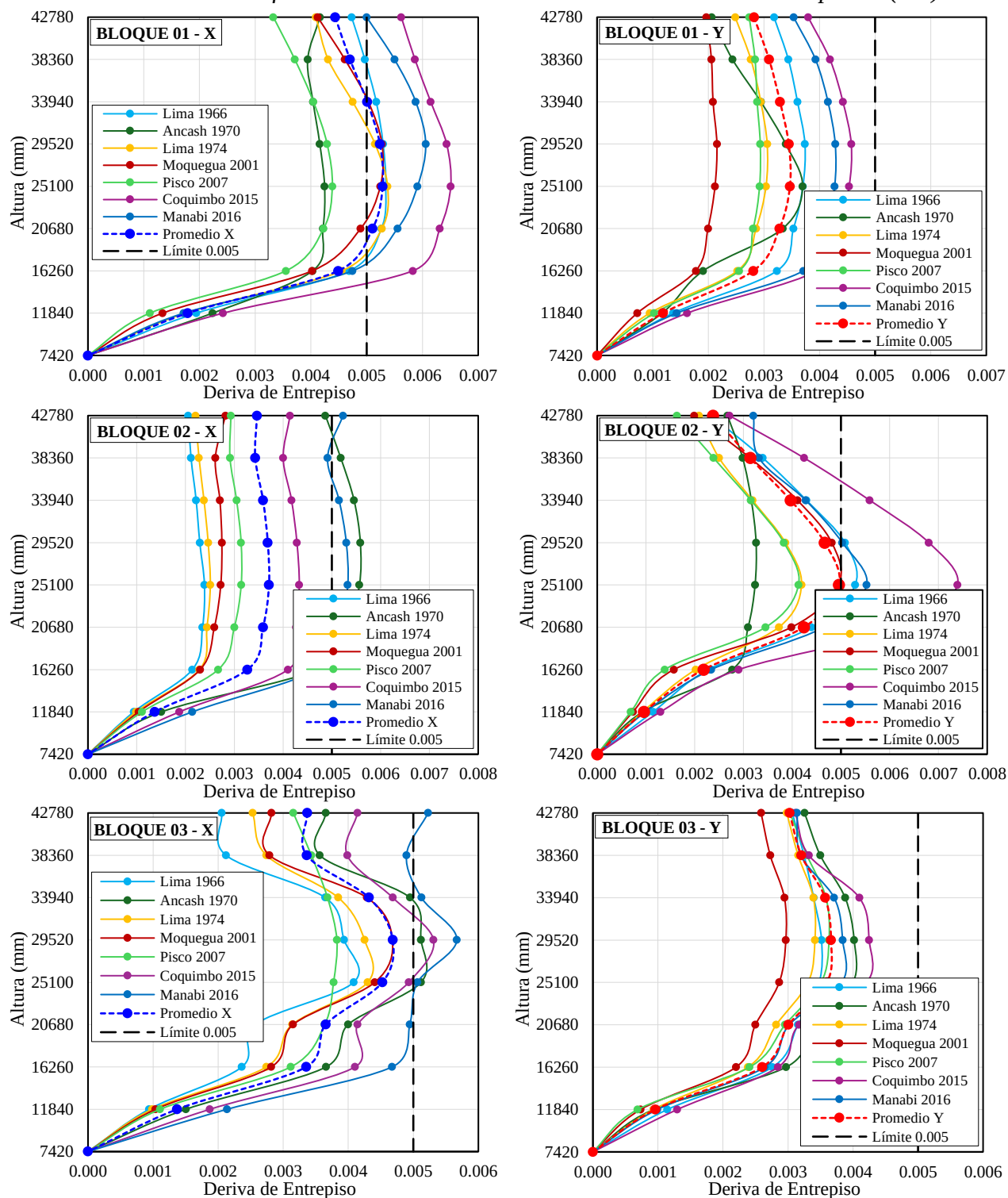
- **Fuerza cortante (V_s)**

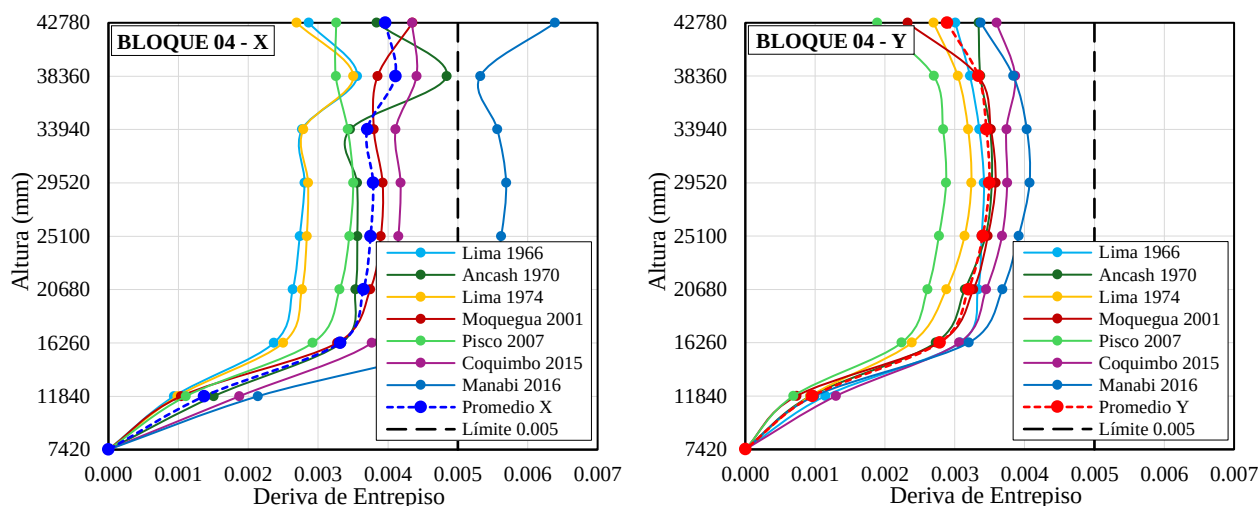
Considerando que la edificación presenta irregularidades, entonces la fuerza cortante V_s no será inferior al 100 % calculado con el método de análisis ELF.

La tabla 36 y figura 56 muestran las derivas máximas sobre el sistema de aislamiento sísmico de cada nivel por bloque de edificación con los 7 sismos para propiedades de límite superior (Upper Bound). Se consideró como muestra este límite, por ser el más significativo.

Figura 56

Derivas máximas de la edificación con el método de análisis NLRHA – Límite superior (UB)





De la figura 56 y de los resultados obtenidos en la tabla 36, se verifica que para propiedades de límite superior (Upper Bound), el promedio de la deriva máxima de la edificación en dirección X es de 0.005287, correspondiente al bloque 1 (Nivel de Piso 3) y respecto a la dirección Y es 0.004959, correspondiente al bloque 2 (Nivel de Piso 3). Por lo tanto, se puede verificar que una de las derivas sobrepasa el valor límite de 0.005, no cumpliendo de esta manera con lo dispuesto por la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031.

4.2.3. Verificación de criterios de aceptación de aislación sísmica

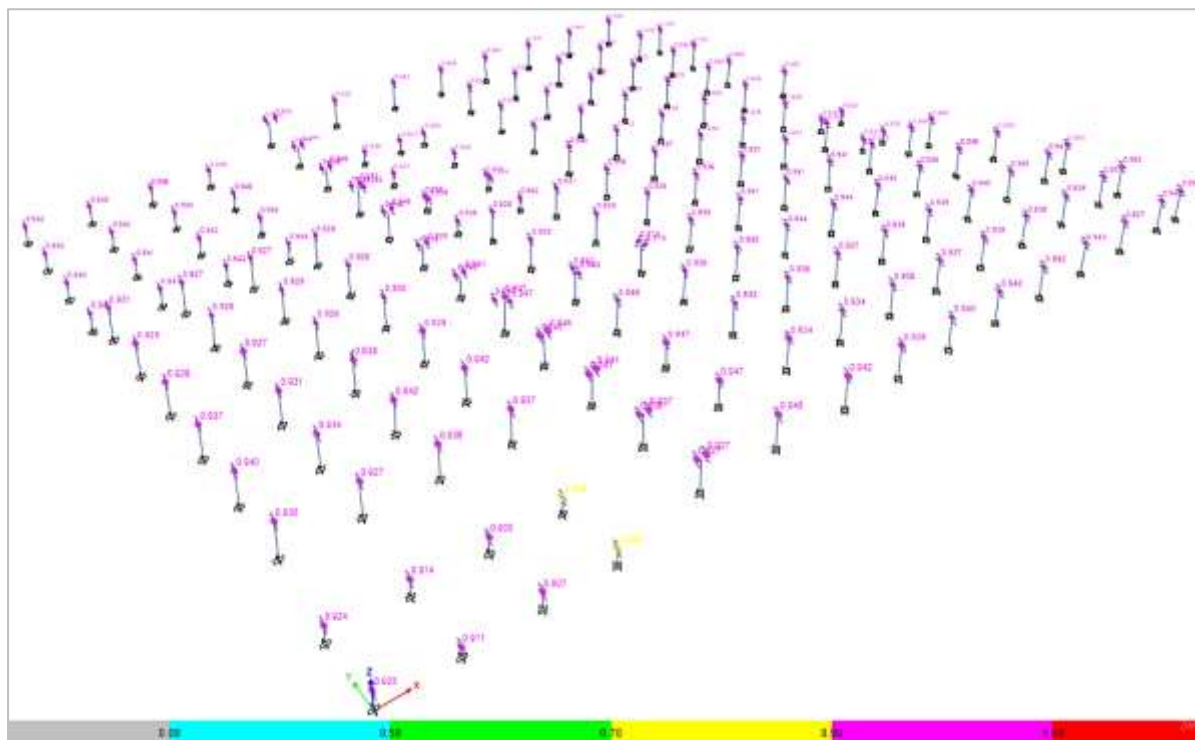
Para poder saber si el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT es funcional, se debe verificar que la capacidad de desplazamiento de cada dispositivo está dentro de los límites de aceptación, los cuales están dados bajo los criterios de ocupación inmediata (al 10%) ante sismos frecuentes y pequeños, seguridad de vida (al 50%) ante un sismo de 475 años de retorno y prevención de colapso (al 100%) ante los sismos que han sido escalados respecto al sismo máximo considerado (MCE_R).

La figura 57 muestra la capacidad de desplazamiento de los aisladores FPT del sistema de aislamiento sísmico de acuerdo al criterio de prevención de colapso (criterio más desfavorable para el análisis sísmico) respecto a la demanda del sismo de Coquimbo 2015 para propiedades de límite inferior (Lower Bound).

Además, se verifica que la capacidad de desplazamiento de 182 aisladores está dentro del rango del 90% al 100% y solo 2 aisladores están dentro del rango de 70% al 90%. De esta manera, pese a que la mayor parte de los dispositivos están al límite, si se está cumpliendo con el criterio de aceptación respecto a prevención de colapso.

Figura 57

Capacidad de aisladores FPT con criterio de prevención de colapso – Límite inferior (LB)



4.2.4. Componentes de energía acumulada

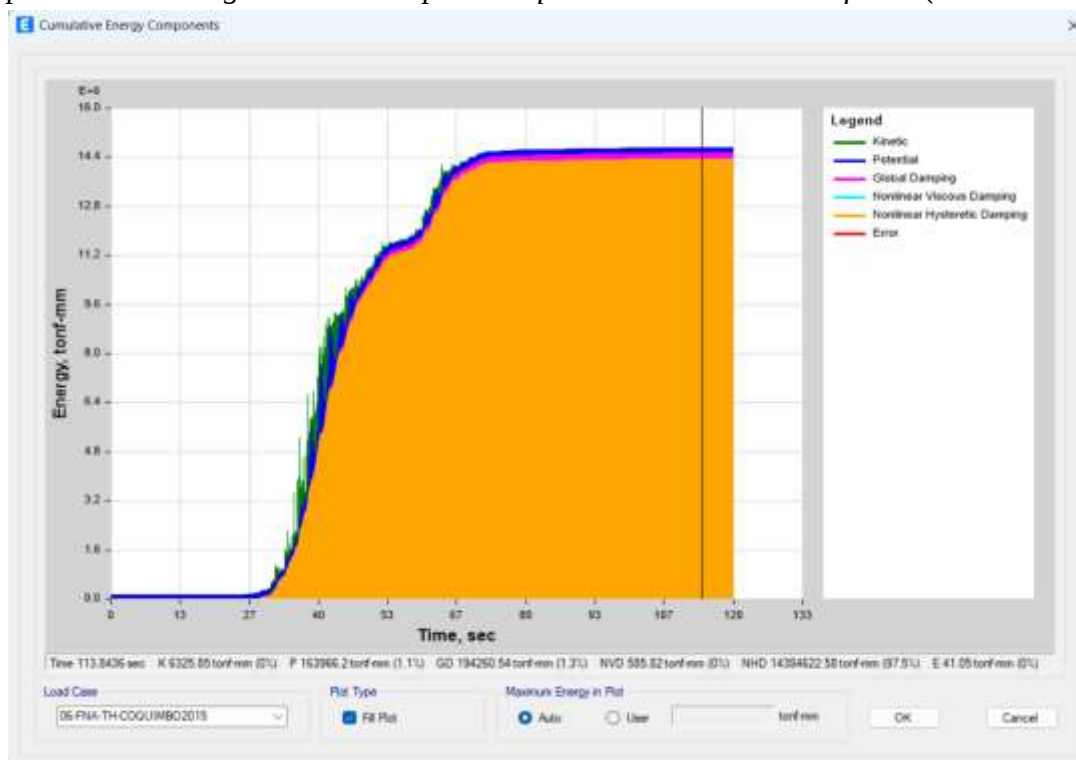
Para poder tener un panorama del comportamiento estructural de la edificación y del sistema de aislamiento sísmico después de la simulación computacional en el software ETABS, se observa los componentes de energía acumulada (energía cinética, energía potencial, amortiguamiento global, amortiguamiento viscoso no lineal y amortiguamiento histerético no lineal), ante cada uno de los 7 sismos como se muestra en el apéndice C y la figura 58 que detalla los componentes de energía acumulada más desfavorables de la edificación con sistema de aislamiento sísmico, considerado para propiedades de límite inferior (Lower Bound).

Se observa en la figura 58 que la mayor parte de la energía sísmica fue disipada por el mecanismo de amortiguamiento histerético no lineal alcanzando un 97.5%, el amortiguamiento global de la energía total representa un 1.3% y la participación de la energía cinética y potencial llega a 1%, mostrando que la superestructura está alcanzando un estado casi estático ante la demanda sísmica. Para este modelamiento, el amortiguamiento viscoso no lineal, no tendría presencia dentro de los componentes de energía, puesto que no se están utilizando dispositivos con fluido viscoso. Aun cuando la figura 58 muestra un comportamiento esperado de la edificación con sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT se puede ver un porcentaje

de error casi nulo pudiendo ser ocasionado por el levantamiento o inactividad de algunos dispositivos aislantes, producto de la interacción de fuerzas a tracción o compresión entre los elementos estructurales.

Figura 58

Componentes de energía acumulada para Coquimbo 2015 – Límite inferior (Lower Bound)



4.3. Contrastación de hipótesis

Con los resultados de las tablas 27, 28, 30 y 31 correspondiente del método de análisis ELF y las tablas 33, 34, 35 y 36 del método de análisis NLRHA, se está cumpliendo con los requisitos mínimos de las normativas de aislamiento sísmico, pese a que la fuerza cortante V_s y las máximas derivas de entrepiso con algunos sismos no cumple con lo dispuesto y sumado a ello la presencia de levantamientos en 35 de los 184 aisladores como se muestra en la tabla 26 y en el apéndice B, el sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud tiene un comportamiento adecuado, puesto que el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento no llega a sobrepasar la capacidad máxima del dispositivo (Fase de movimiento V) llegando solamente al límite de la fase de movimiento III, como se aprecia en la figura 49 y 50 corroborado por la figura 57 (aproximadamente al 95% de su capacidad, bajo el criterio de prevención de colapso) disipando casi en su totalidad la energía sísmica demandada como se puede observar en la figura 58 y en el apéndice C.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El sistema de aislamiento sísmico con aisladores triple péndulo fricción (FPT) en el hospital especializado en la red asistencial Cajamarca – EsSalud tiene un comportamiento adecuado ante una demanda sísmica severa, cumpliendo con lo dispuesto en la normativa ASCE/SEI 7-16 y la NTP E.031 respecto a aislamiento sísmico, logrando disipar la energía en más de un 90% tanto para propiedades de límite inferior (Lower Bound) como para propiedades de límite superior (Upper Bound).
- Realizando el análisis estático con el método de fuerza lateral equivalente (ELF) del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) respectivamente, se obtuvo un desplazamiento máximo D_M de 343.1069 mm y 304.3255 mm, una fuerza cortante $V_b = V_M$ a nivel de sistema de aislamiento de 7559.3758 ton y 7582.5699 ton, una fuerza cortante V_s sobre el sistema de aislamiento de 3367.9462 ton y 3461.8657 ton, un periodo efectivo T_M de 3.6428 seg y de 3.4255 seg (3 veces superior al periodo con base fija $T = 1.1634$ seg y menor a 5 seg), un amortiguamiento efectivo β_M que llega a 13.7113% y 19.2820 % (siendo menor al 30 %), una rigidez efectiva K_M de 22.0321 ton/mm y de 24.9160 ton/mm (superior a un tercio en el 20% de su desplazamiento D_M , $K_{ef-LB} = 13.823342$ ton/mm y $K_{ef-UB} = 21.633692$ ton/mm), una fuerza de restauración de 0.0811W y de 0.0720W (superior al 0.025W), con un desplazamiento total máximo D_{TM} de 396.8532 mm y 351.9968 mm (superando 1.15 D_M con un valor de 394.5729 mm y 349.9743 mm) y sus máximas derivas de entrepiso alcanzó un valor de 0.002804 en la dirección X y un valor de 0.002507 en la dirección Y, no superando al límite dispuesto por la normativa de 0.035. Concluyendo que el sistema de aislamiento sísmico está cumpliendo con los requisitos mínimos establecidos por lo normado para el método de análisis ELF.
- Al realizar el análisis dinámico con el método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA) del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de límite superior (Upper Bound) respectivamente, se verificó que los desplazamientos máximos D_M si llegan a superar el 80% D_{TM} igual a 317.4825 mm y 304.1216 mm calculado con el método de análisis ELF con un valor de 470.4199 mm y 405.8843 mm, con respecto a la fuerza cortante a nivel de aislamiento V_b también es mayor

al 90% V_b igual a 6803.4382 ton y 6824.3129 ton calculada con el método de análisis ELF con un valor de 9898.1707 ton y 9246.4769 ton. Sin embargo, la fuerza cortante por encima de nivel de aislamiento V_s resultó inferior al 100% V_b igual a 3367.9462 ton y 3461.8657 ton calculada con el método de análisis ELF con un valor en dirección X de 2819.5489 ton y 2664.3424 ton y en dirección Y con un valor de 2934.6161 ton y 2883.2129 ton, además la máxima deriva de entrepiso para la dirección X alcanzó un valor de 0.005287 (Bloque 1 – Nivel de Piso 3) y 0.004959 en dirección Y (Bloque 2 – Nivel de Piso 3) llegando a superar el límite de 0.005 establecido en la normativa para el método de análisis NLRHA en la dirección X. Cumpliendo con la mayoría de requisitos dispuestos en la normativa para el método de análisis NLRHA.

- Con el análisis del sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, se pudo verificar mediante el análisis dinámico con el método NLRHA la existencia de levantamientos (Uplift) en 35 de los 184 aisladores, alcanzando un valor máximo de 10.6564 mm para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y de 13.8260 mm para propiedades de límite superior (Upper Bound), esto a futuro ante sismos severos podría afectar el comportamiento del sistema de aislamiento sísmico.

5.2. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones en edificaciones con sistemas de aislamiento sísmico con aisladores FPT, se recomienda considerar efectos de interacción suelo-estructura y asentamientos diferenciales del suelo, ya que estos efectos podrían generar un impacto negativo en el desempeño de los dispositivos que componen el sistema de aislación.
- Se recomienda que para posteriores investigaciones en edificaciones con sistema de aislamiento sísmico con aisladores FPT, se incorpore amortiguadores viscosos lineales verticales, de tal manera que se puede controlar los levantamientos o uplift presentes en el sistema de aislamiento sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A. (2022). Mayoría de muertes durante sismos ocurren por colapso de estructuras, *Sistema de noticias de la Universidad Veracruzana*.
<https://www.uv.mx/prensa/ciencia/mayoria-de-muertes-durante-sismos-ocurren-por-colapso-de-estructuras/>
- Asociación de ingenieros estructurales de california. (1996). *VISON 2000 (SEAOC), Guía NEHRP, ATC-40*. Estados Unidos.
- Cango, A. (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*, [Proyecto de titulación para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad de cuenca]. Repositorio UCUENCA.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30283>
- Chimbo, N. (2021). *Análisis sísmico comparativo de un edificio de mediana altura, con base fija empotrada y con aisladores de triple péndulo de fricción*, [Proyecto de titulación para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio UNESUM. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2951>
- Fenz, D & Constantinou, M. (2008). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*.
<https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/08/08-0007.pdf>
- Lee, D. & Constantinou, M. (2015). *Quintuple Friction Pendulum Isolator Behavior, Modeling and Validation*.
<https://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/MCEER-15-0007.detail.html>
- Marcelo, R. (2019). *Análisis sísmico de hospitales considerando el criterio de funcionalidad continua empleando aisladores de base friccional de triple péndulo en zonas sísmicas 3 y 4 del Perú*, [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio UNASH.
<http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3570>
- Mayes, R. & Naeim, F. (2001). *Design of Structures with Seismic Isolation*.
<http://civilwares.free.fr/The%20Seismic%20Design%20Handbook/Chapter%2014-Design%20of%20structures%20with%20seismic%20isolation.pdf>
- Morán. (2022). *Diseño de edificios de cuatro niveles empleando aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT para la zona sísmica #4 de Guatemala*, [Tesis para optar el grado de maestro en estructuras, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio USAC. <https://postgrado.ingenieria.usac.edu.gt/>

- Olivares, C. De la Llera, J. & Poulos A. (2020). *Revista Engineering Structures: Torsion control in structures isolated with the triple friction pendulum system*.
<https://www.ing.uc.cl/publicaciones/torsion-control-in-structures-isolated-with-the-triple-friction-pendulum-system/>
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2021).
<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Roussis, P. & Constantinou, M. (2006). *Uplift-restraining friction pendulum seismic isolation system''*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 35, No. 5, pp. 577-593. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/eqe.545>
- Ruiz, P. (2017). *Análisis y diseño de edificios con aisladores sísmicos de péndulo friccional doble y triple*, [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/9330>
- Sarlis, A. & Constantinou, M. (2013). *Model f triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions*.
<https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/13/13-0010.pdf>
- Sociedad americana de ingenieros civiles. (2016). *ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.
<https://aulaseproinca.blogspot.com/2017/12/descarga-el-codigo-ascesei-7-16-pdf.html>
- Trevor, K. Holmes Consulting Group Ltd. (2001). *Base Isolation Design Of Structures: Design Guidelines*.
<https://pdfcoffee.com/base-isolation-design-of-structures-design-guidelines-trevor-e-kelly-se-holmes-consulting-group-ltd-2-pdf-free.html>
- Yenidogan, C. (2021). *Earthquake-Resilient Design of Seismically Isolated Buildings: A Review of Technology*. <https://www.mdpi.com/2571-631X/4/3/35>
- Yucra, M. & Quispe, N. (2020). *Análisis y diseño sísmico de una edificación de cinco niveles con el uso de aisladores de base tipo péndulo friccional triple*, [Tesis para obtener el título profesional de ingenieros civiles, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11730M>
- Zayas, V. (1989). *Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system*.
<https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB92143064.pdf>

APÉNDICES

APÉNDICE A.

Comportamiento histerético de aisladores FPT para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y límite superior (Upper Bound)

Figura 59

Comportamiento histerético del aislador K5298 – Límite inferior (Lower Bound)

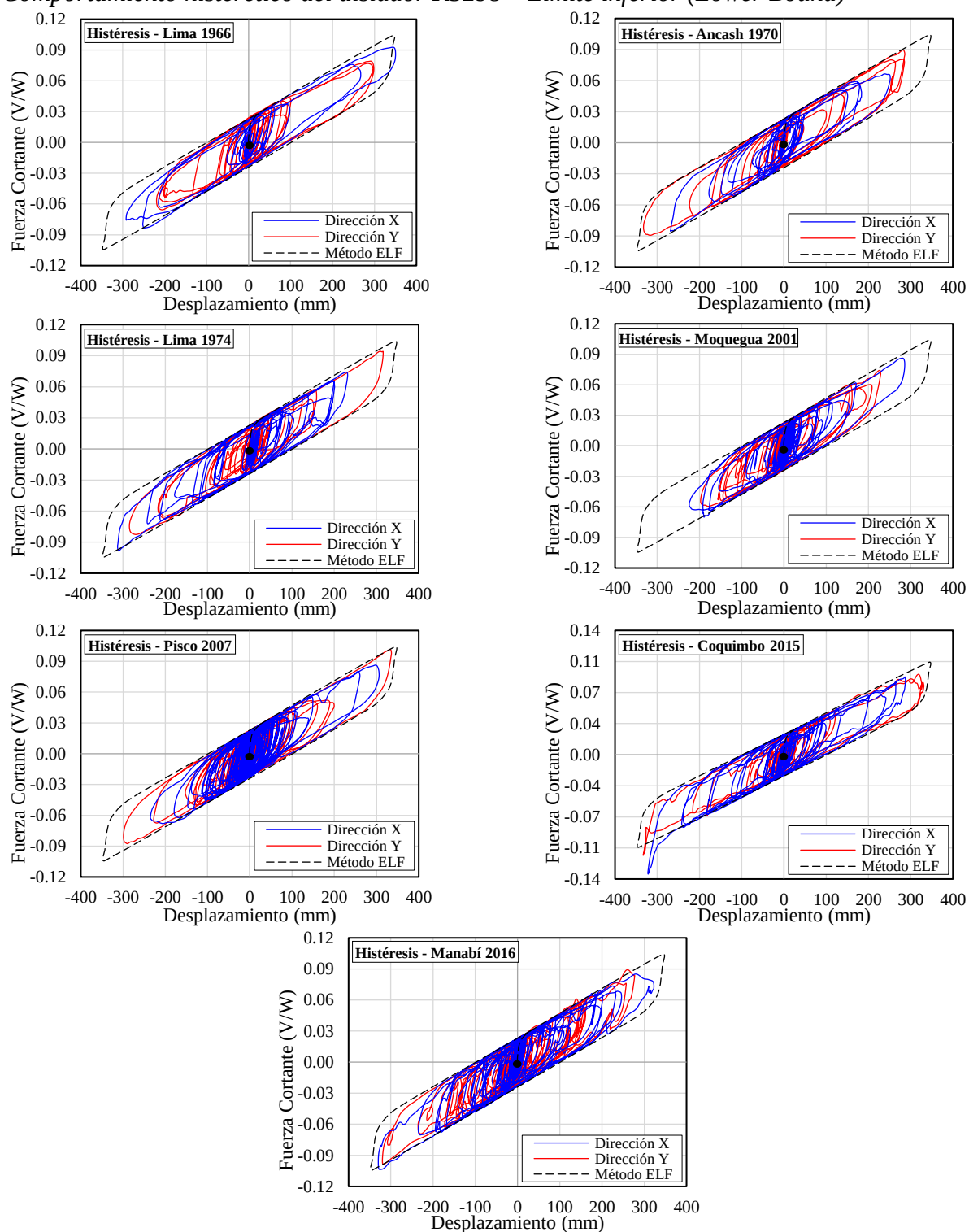


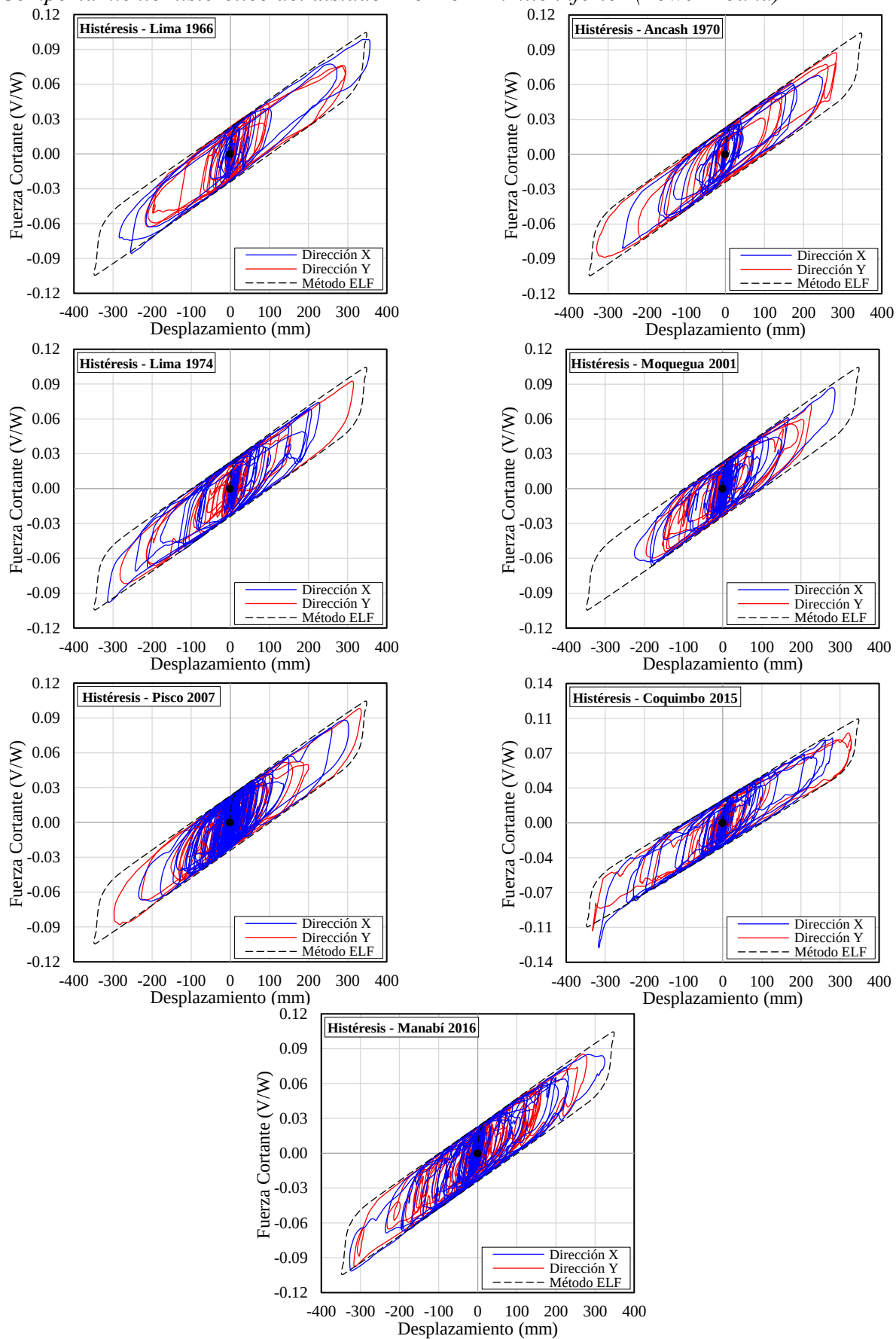
Figura 60*Comportamiento histerético del aislador K5215 – Límite inferior (Lower Bound)*

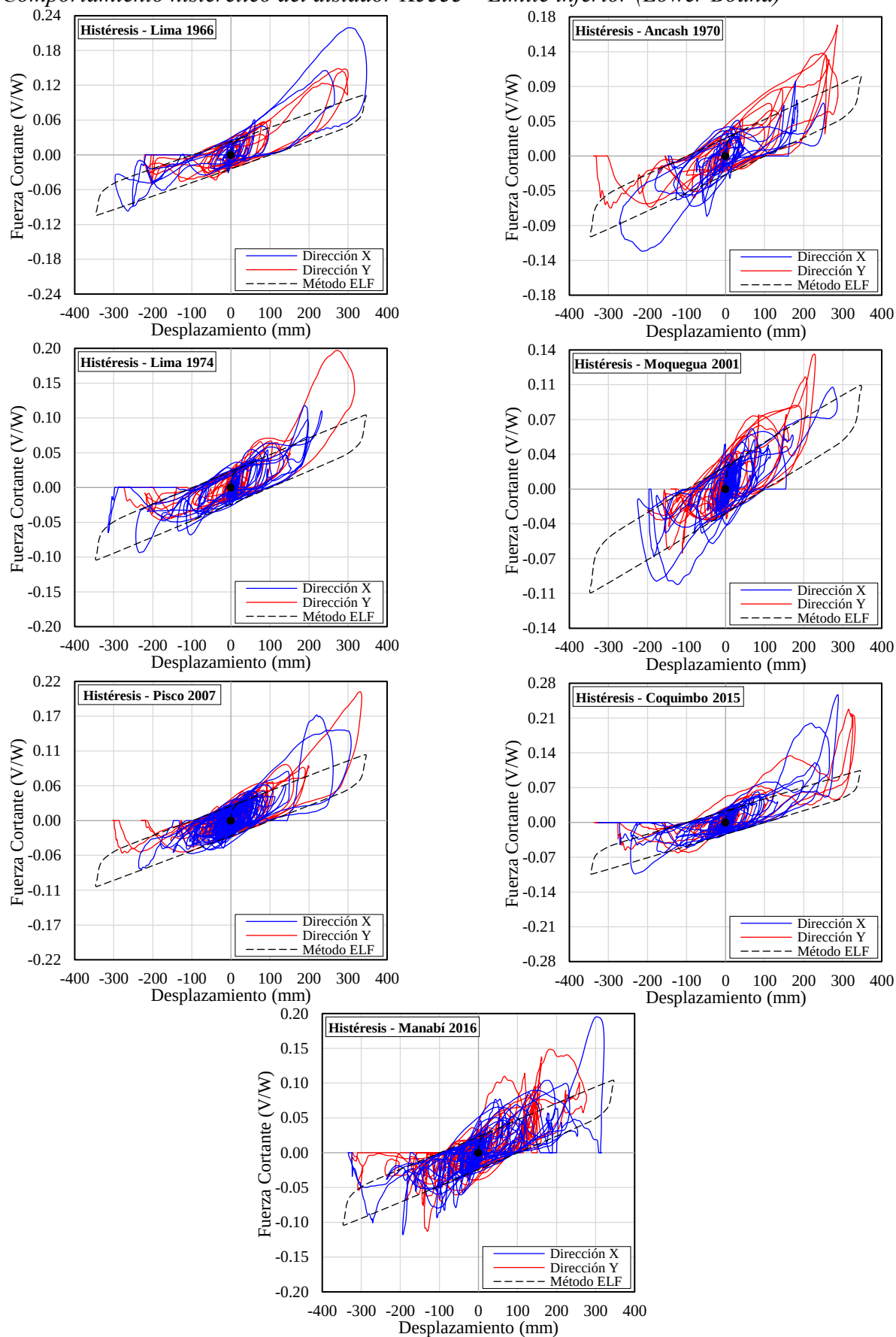
Figura 61*Comportamiento histerético del aislador K5333 – Límite inferior (Lower Bound)*

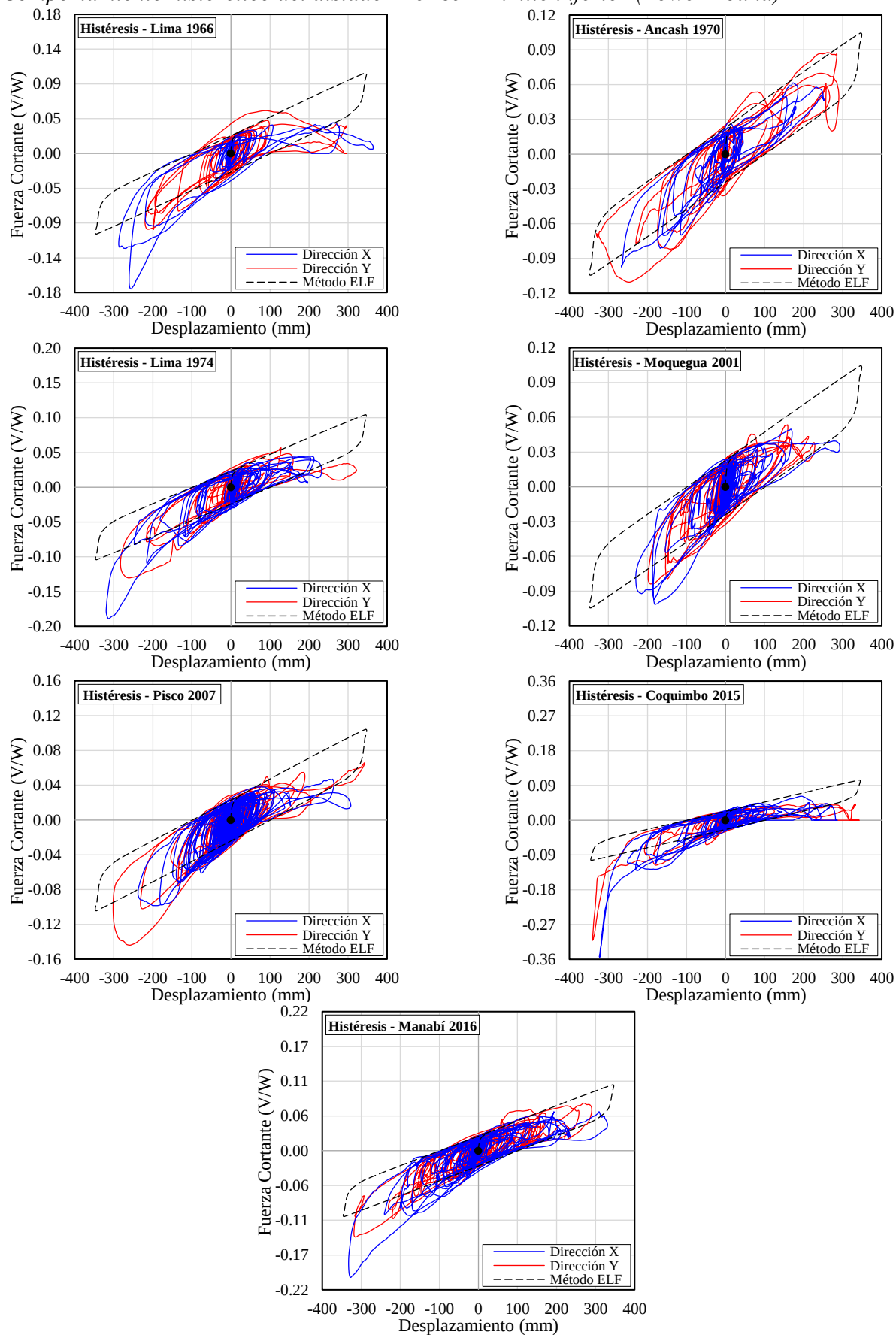
Figura 62*Comportamiento histerético del aislador K5185 – Límite inferior (Lower Bound)*

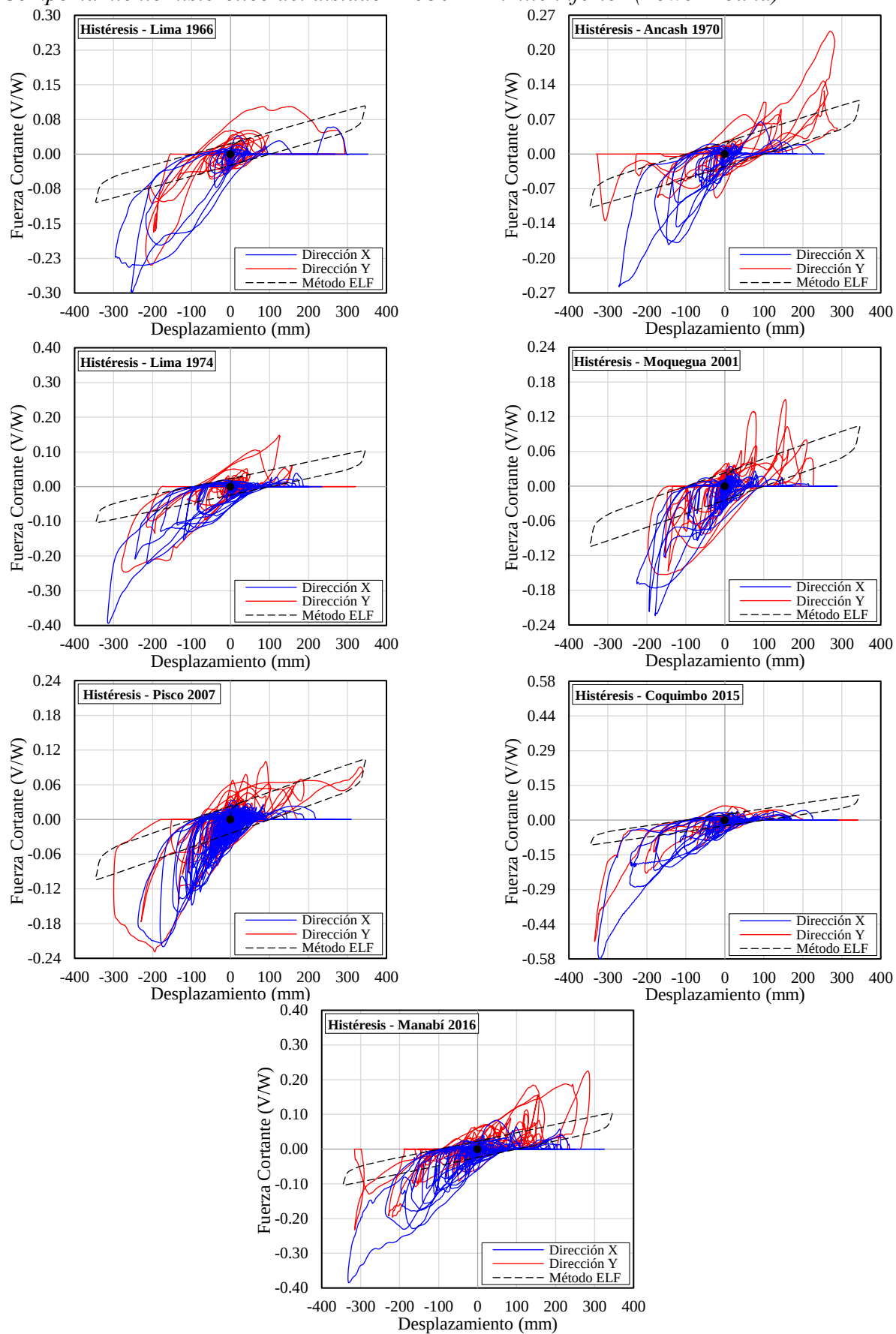
Figura 63*Comportamiento histerético del aislador K5301 – Límite inferior (Lower Bound)*

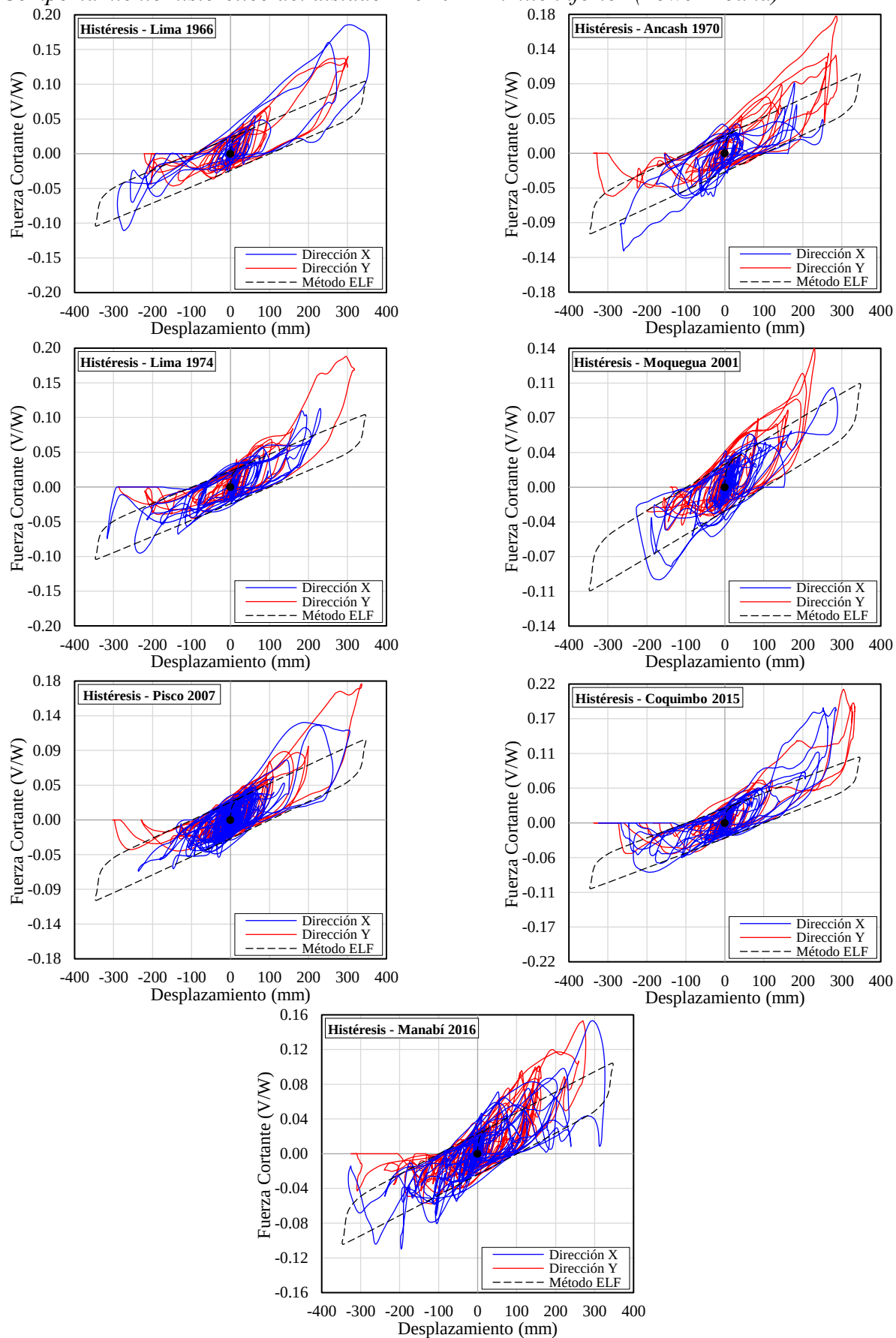
Figura 64*Comportamiento histerético del aislador K5242 – Límite inferior (Lower Bound)*

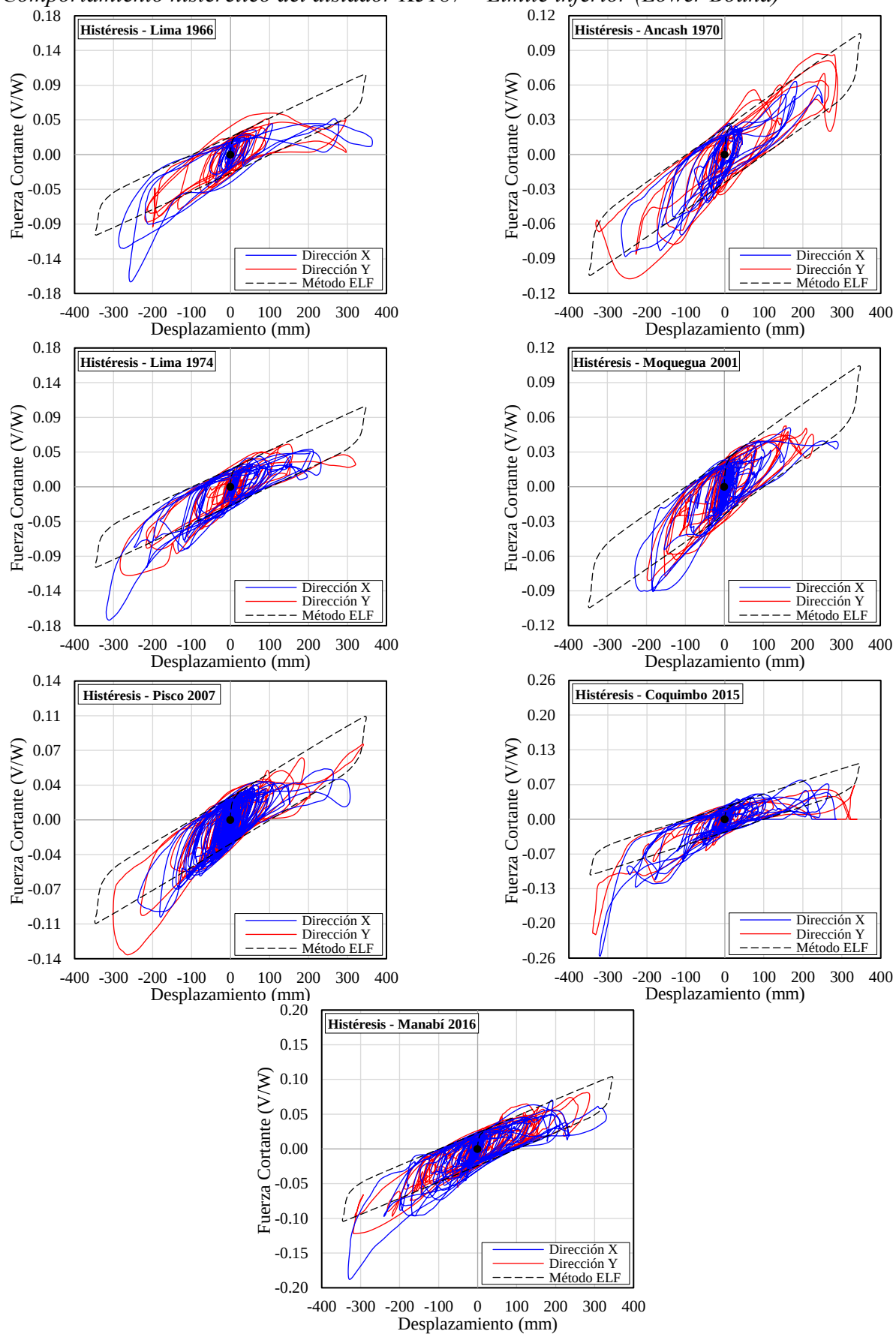
Figura 65*Comportamiento histerético del aislador K5187 – Límite inferior (Lower Bound)*

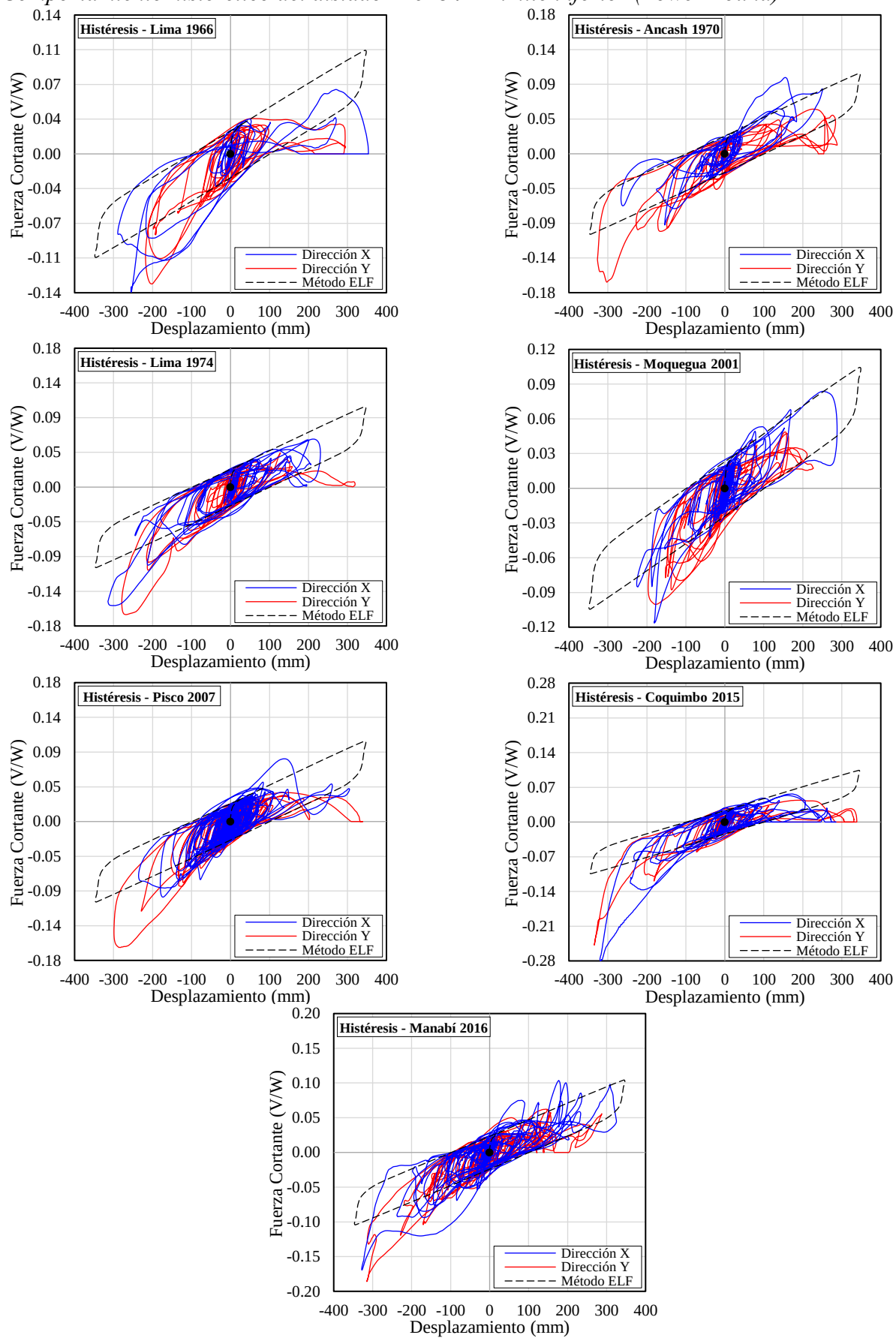
Figura 66*Comportamiento histerético del aislador K5234 – Límite inferior (Lower Bound)*

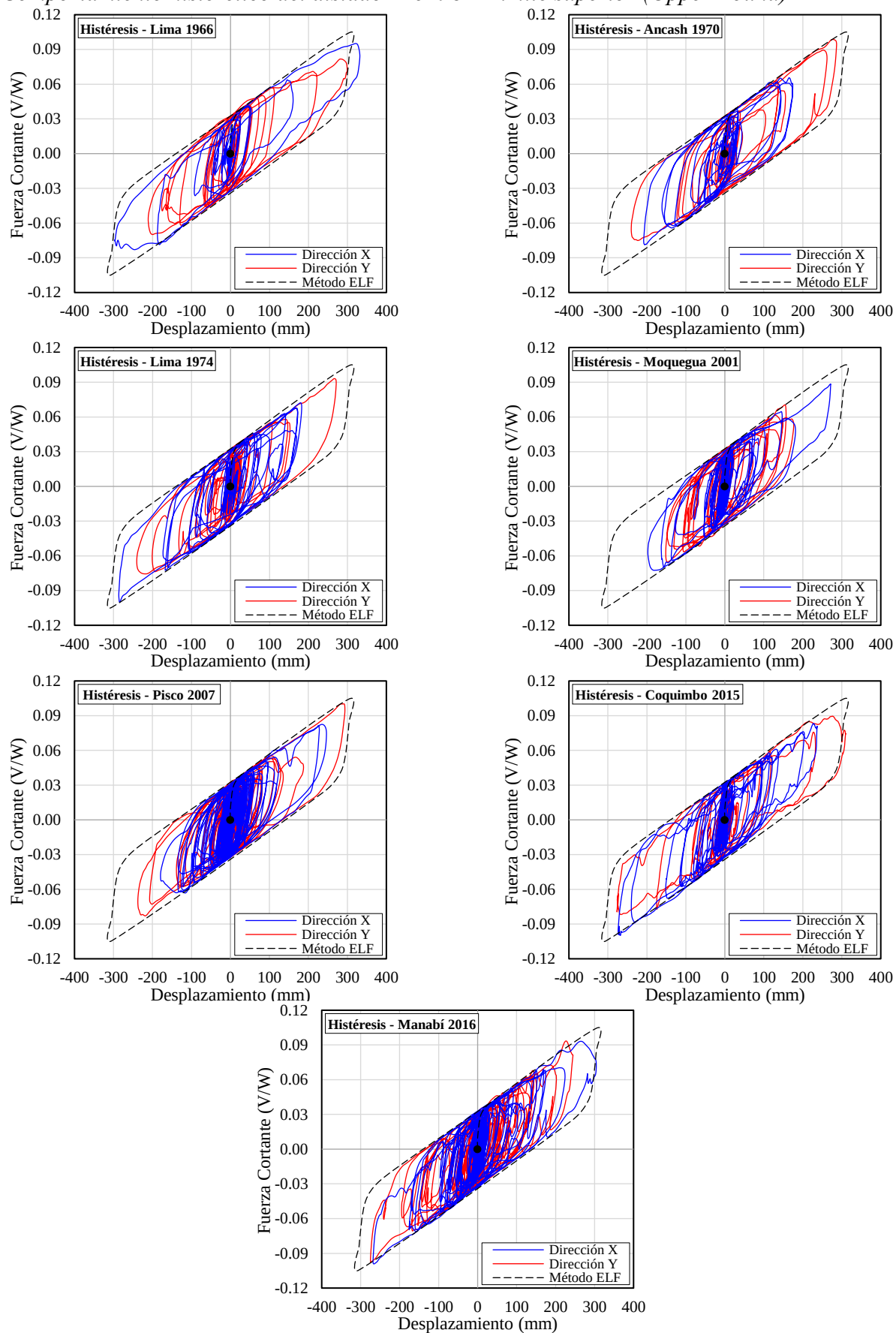
Figura 67*Comportamiento histerético del aislador K5298 – Límite superior (Upper Bound)*

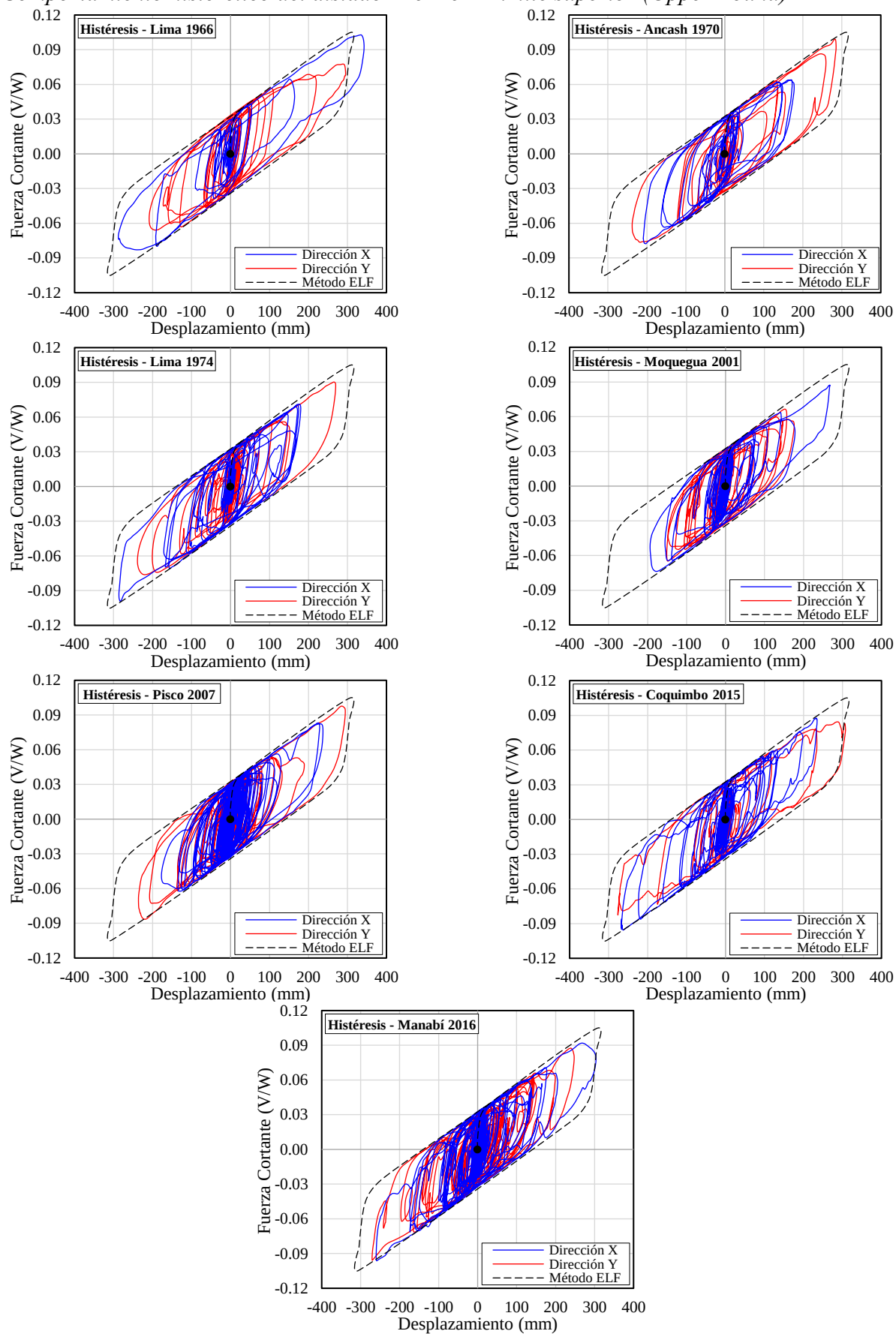
Figura 68*Comportamiento histerético del aislador K5215 – Límite superior (Upper Bound)*

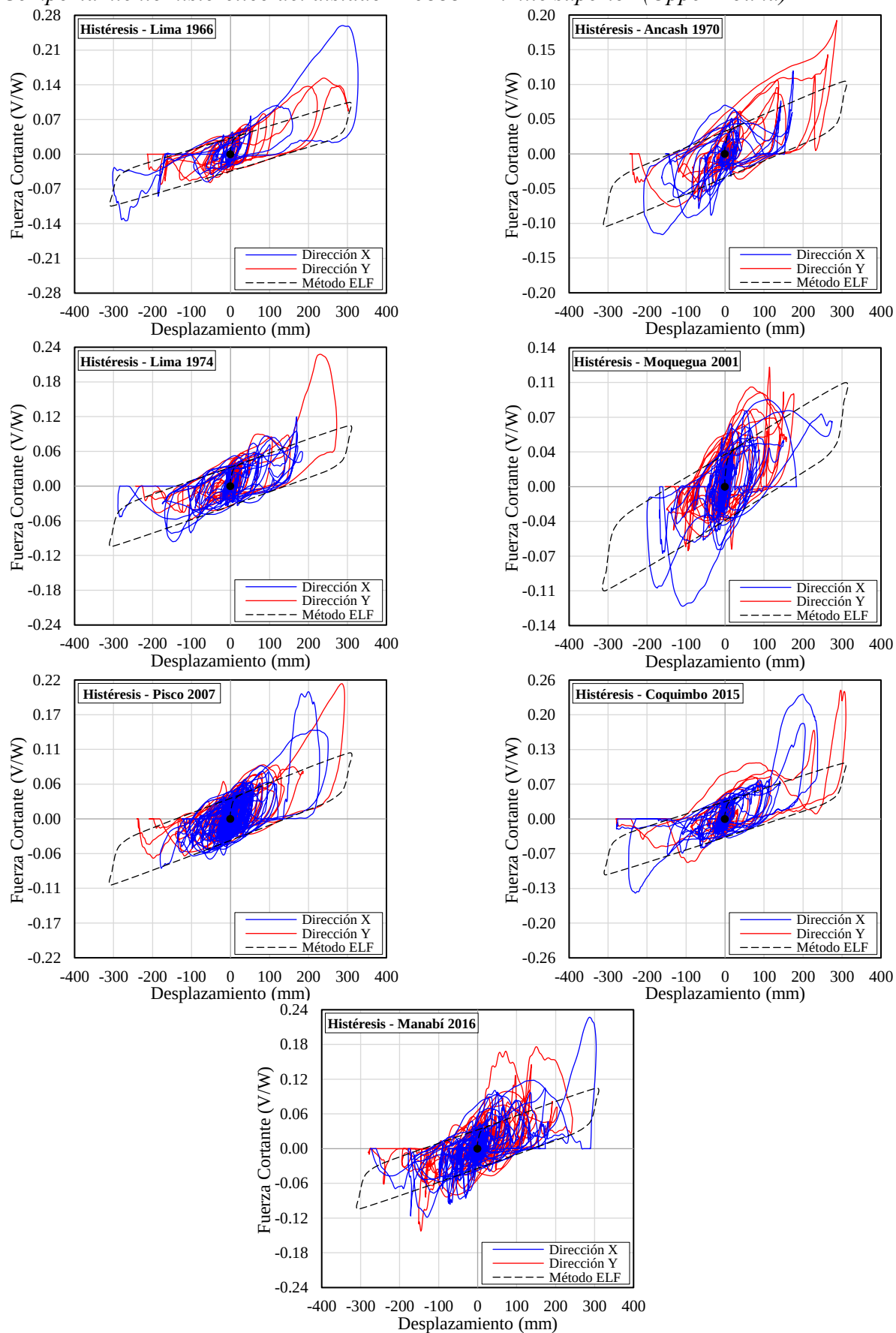
Figura 69*Comportamiento histerético del aislador K5333 – Límite superior (Upper Bound)*

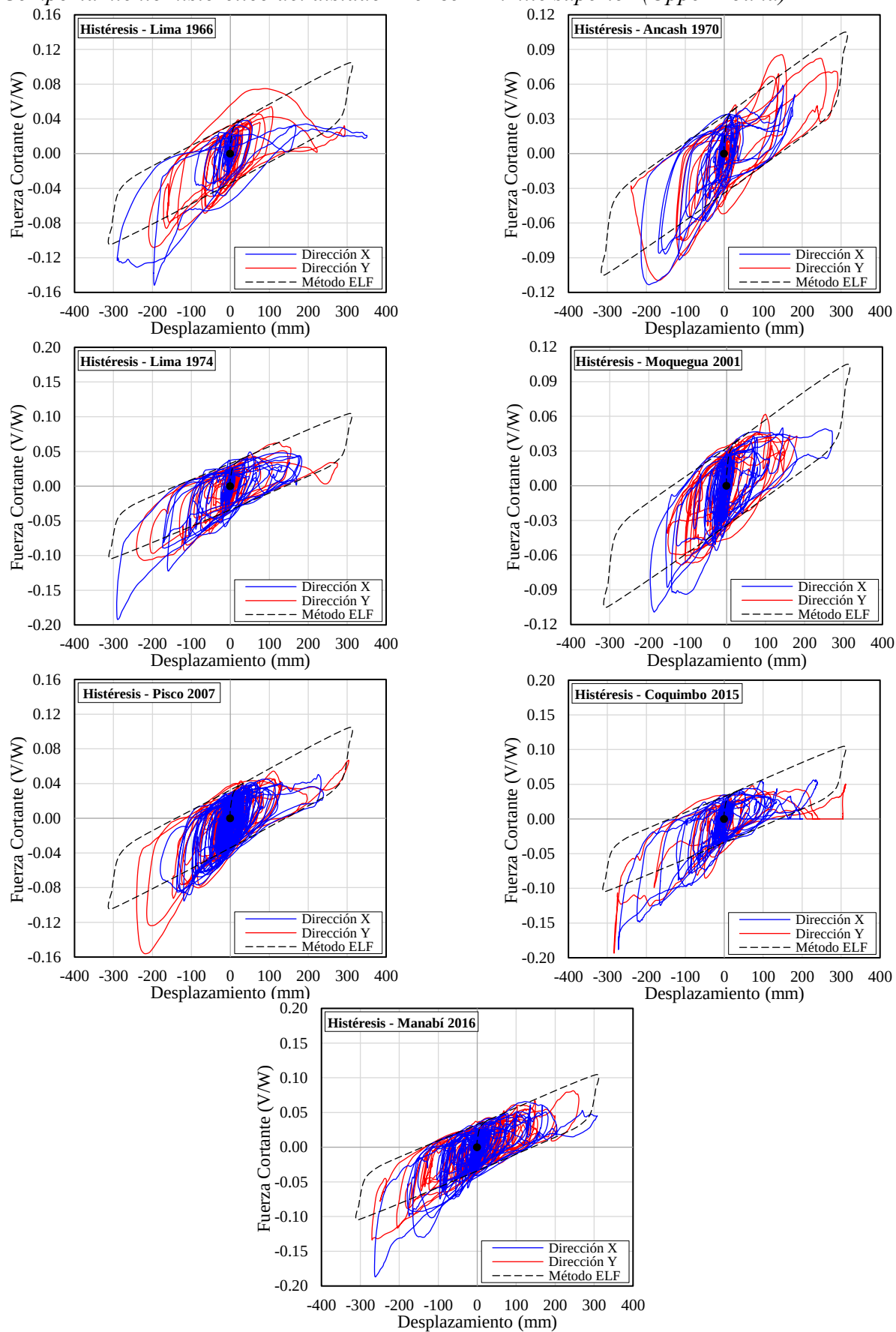
Figura 70*Comportamiento histerético del aislador K5185 – Límite superior (Upper Bound)*

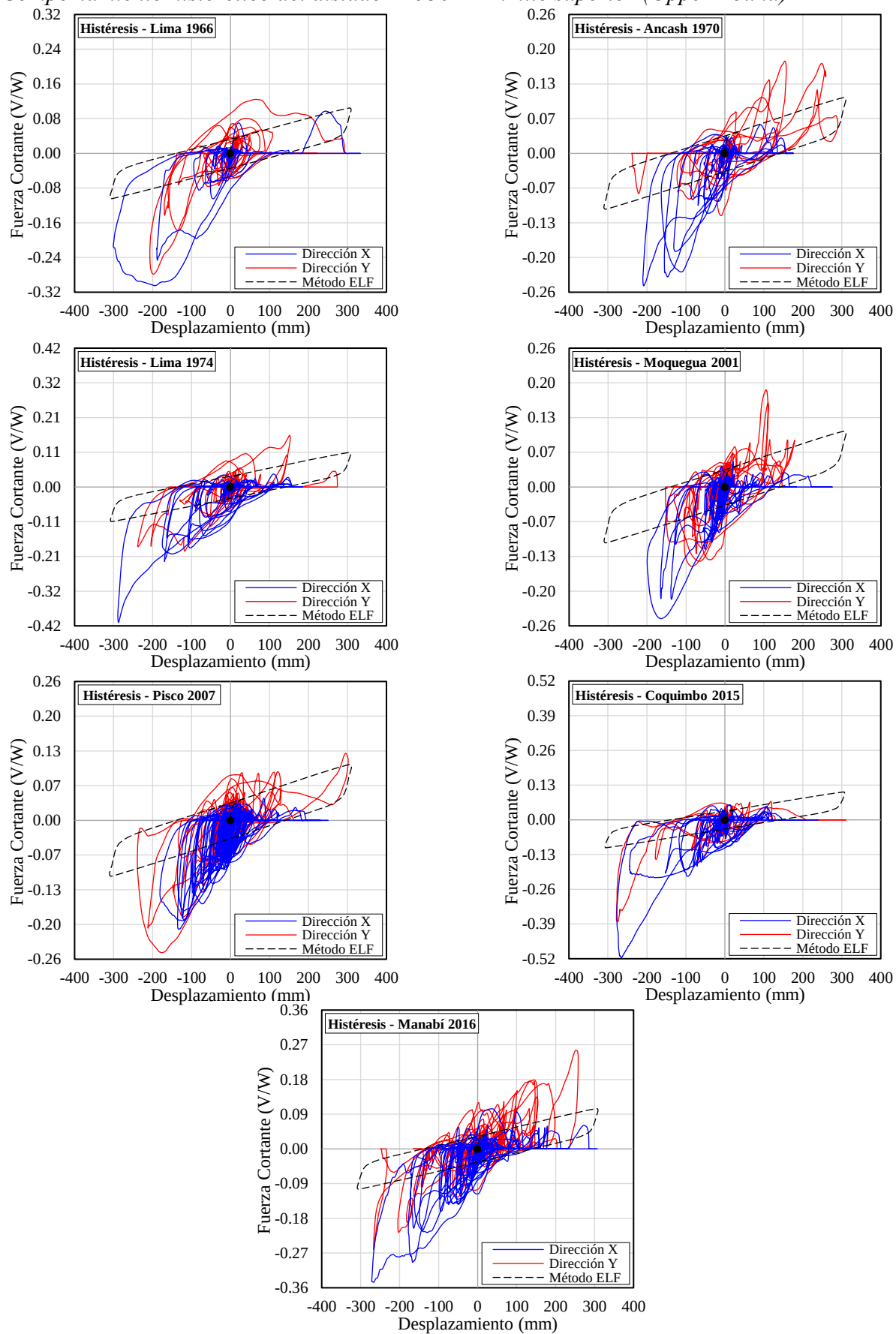
Figura 71*Comportamiento histerético del aislador K5301 – Límite superior (Upper Bound)*

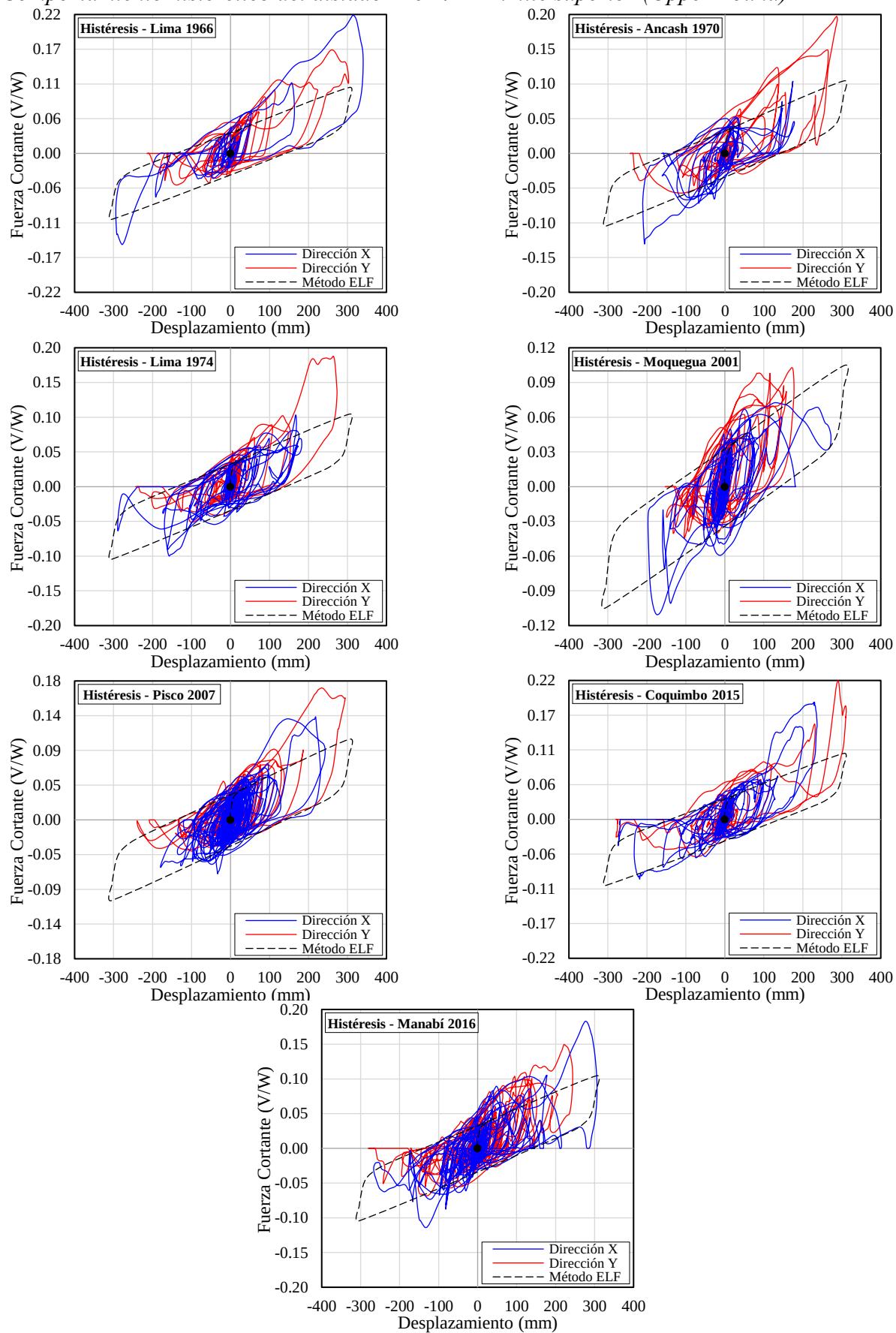
Figura 72*Comportamiento histerético del aislador K5242 – Límite superior (Upper Bound)*

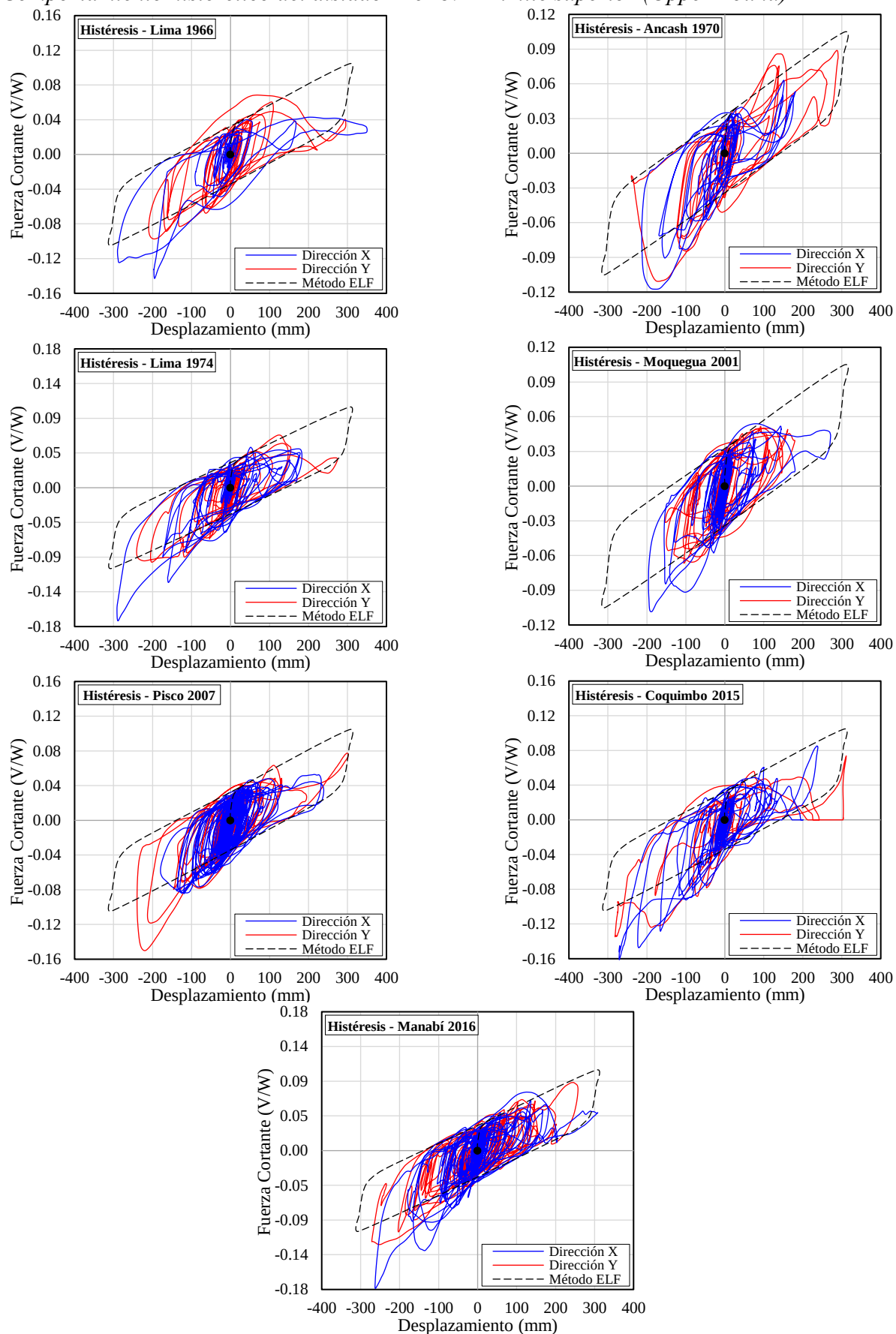
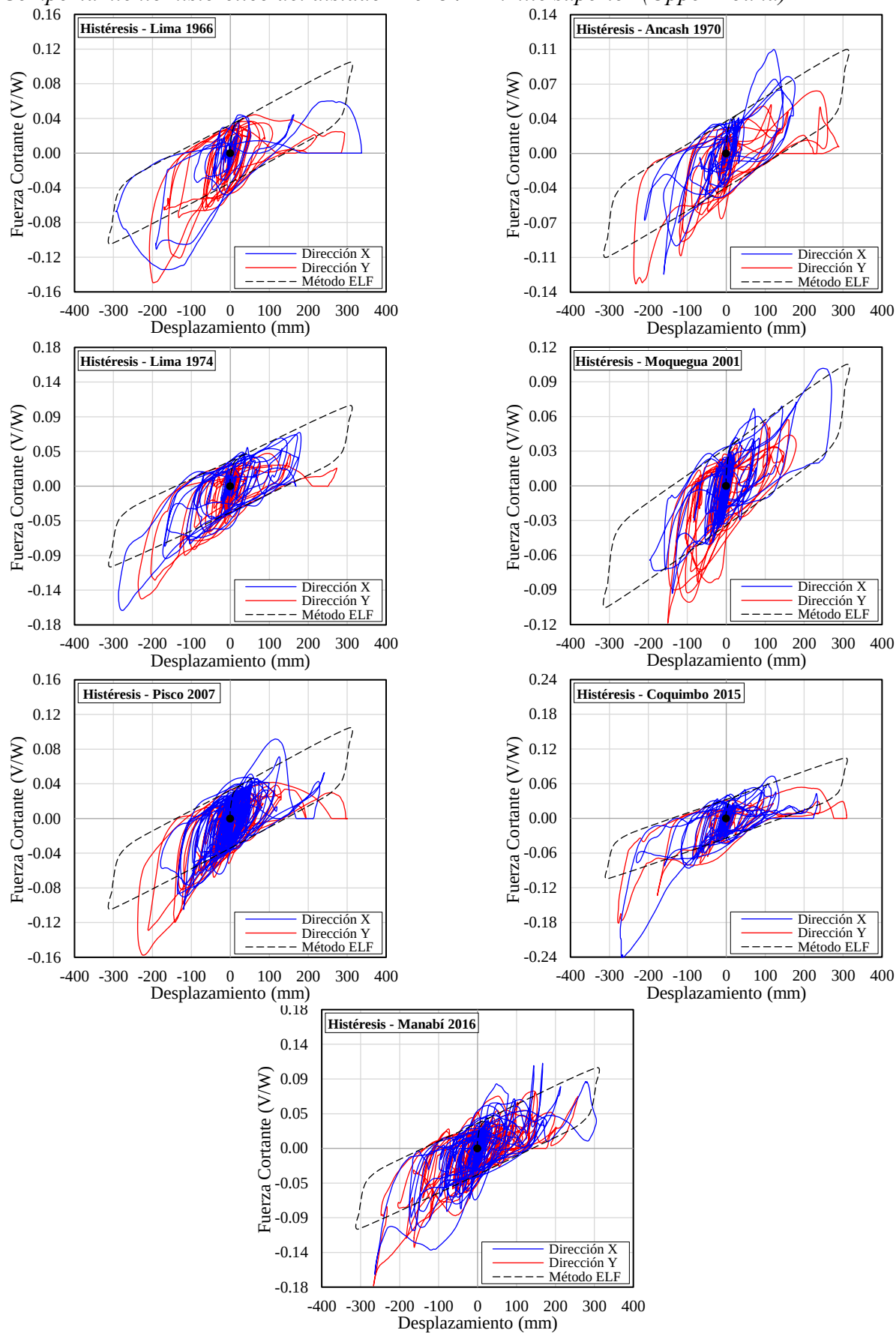
Figura 73*Comportamiento histerético del aislador K5187 – Límite superior (Upper Bound)*

Figura 74*Comportamiento histerético del aislador K5234 – Límite superior (Upper Bound)*

APÉNDICE B.

Combinaciones con efectos de cargas sísmicas

Tabla 37

Combinaciones con efectos de cargas sísmicas de los 184 aisladores

Aislador	D	L	SC	Ev	Eh	C1	C2	C3	C4	W_{NLRHA}
K5185	131.11	75.40	54.97	39.58	36.37	332.93	223.78	325.95	114.79	32.74
K5186	252.61	142.09	100.22	76.26	36.38	630.69	423.87	587.03	187.47	156.27
K5187	750.49	202.09	105.43	226.56	36.36	1329.37	956.97	1369.98	485.24	182.00
K5188	611.21	146.79	59.94	184.51	36.34	1028.26	744.55	1087.64	401.92	0.00
K5189	351.58	74.99	2.46	106.13	35.97	544.34	391.54	603.95	246.26	227.09
K5190	364.53	76.74	1.20	110.04	35.97	561.41	404.10	623.01	254.00	264.22
K5191	354.83	77.57	1.40	107.11	35.97	551.31	395.02	609.06	248.20	261.45
K5192	393.28	97.20	1.81	118.72	36.22	629.26	443.69	677.28	271.45	306.90
K5193	89.53	30.15	0.04	27.03	36.12	155.71	104.64	185.69	89.67	78.65
K5194	394.12	92.37	2.13	118.97	36.22	622.87	442.44	676.45	271.95	210.24
K5195	585.97	77.94	4.81	176.89	36.23	832.68	629.75	960.07	386.72	0.00
K5196	811.01	98.69	-0.78	244.82	36.21	1130.33	859.57	1302.81	521.30	-0.06
K5197	156.59	119.92	91.63	47.27	36.04	471.42	308.19	422.82	129.70	2.78
K5198	203.61	233.13	191.27	61.46	36.05	808.61	511.44	649.68	157.83	358.94
K5199	580.26	266.66	176.27	175.17	36.02	1299.24	889.86	1217.10	383.09	199.82
K5200	522.57	211.62	96.78	157.75	35.98	1062.45	725.16	1023.41	348.55	283.69
K5201	437.20	139.83	3.84	131.98	35.59	752.21	510.95	765.96	297.09	493.83
K5202	440.95	138.64	0.96	133.11	35.60	751.93	511.23	768.14	299.34	499.99
K5203	443.63	141.76	1.36	133.92	35.60	760.53	515.87	774.11	300.94	504.91
K5204	383.28	133.43	1.18	115.70	35.63	674.59	451.17	679.15	264.87	384.27
K5205	244.83	122.72	1.26	73.91	35.70	491.41	307.45	466.03	182.14	292.02
K5206	392.40	127.91	1.42	118.45	35.62	676.96	457.77	690.32	270.32	372.90
K5207	474.27	120.60	1.37	143.17	35.57	763.46	535.94	809.54	319.24	328.03
K5208	637.95	89.78	-0.61	192.58	35.49	908.57	682.22	1037.88	417.06	-0.24
K5209	158.40	126.59	92.97	47.82	35.76	485.59	314.66	429.92	130.50	39.66
K5210	194.09	235.94	192.59	58.59	35.76	803.00	504.64	637.81	151.85	387.20
K5211	461.98	265.40	171.20	139.46	35.74	1150.21	765.87	1033.47	312.06	494.33
K5212	524.49	229.47	96.67	158.33	35.71	1093.20	735.89	1034.83	349.42	543.40
K5213	446.59	130.98	2.75	134.81	35.30	748.22	514.82	774.26	302.42	502.56
K5214	439.25	116.49	0.74	132.60	35.33	714.22	498.24	754.01	298.05	488.14
K5215	490.04	138.57	1.14	147.93	35.29	810.90	560.46	841.69	328.40	534.66
K5216	460.86	164.30	1.26	139.12	35.59	817.19	544.28	811.17	311.25	450.71
K5217	101.24	39.54	0.04	30.56	35.51	184.78	121.04	207.37	96.07	117.37
K5218	465.26	148.99	1.52	140.45	35.59	798.22	541.28	810.37	313.88	448.82
K5219	504.36	141.59	1.23	152.25	35.13	833.00	576.38	864.64	336.80	524.05
K5220	439.85	87.50	0.50	132.78	35.34	668.31	484.10	740.18	298.42	265.68
K5221	397.54	94.90	0.56	120.01	35.32	629.44	445.55	680.39	273.10	290.95
K5222	477.88	149.39	0.94	144.26	35.10	813.41	553.51	828.44	320.93	495.30

Aislador	<i>D</i>	<i>L</i>	<i>SC</i>	<i>Ev</i>	<i>Eh</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>W_{NLRHA}</i>
K5223	483.98	171.21	0.84	146.10	35.34	855.56	570.43	848.67	324.82	475.81
K5224	107.32	42.46	0.01	32.40	35.26	196.73	128.56	217.68	99.45	120.39
K5225	490.08	184.97	0.63	147.94	35.33	884.69	583.20	864.49	328.46	449.61
K5226	460.60	144.46	0.54	139.04	35.05	784.39	533.37	799.59	310.55	475.77
K5227	463.63	118.04	0.37	139.96	35.06	745.59	523.02	790.76	312.37	445.35
K5228	454.21	139.37	1.66	137.12	35.05	769.72	525.56	788.57	306.72	489.22
K5229	472.35	190.96	57.37	142.59	35.49	929.73	625.20	897.75	318.01	435.06
K5230	420.54	201.53	99.31	126.95	35.52	926.41	620.62	867.20	287.06	456.86
K5231	199.09	154.36	101.72	60.10	35.53	587.61	377.99	513.44	154.61	229.41
K5232	86.70	79.92	56.41	26.17	35.53	288.31	183.06	262.10	87.38	17.34
K5233	157.28	47.12	-0.01	47.48	34.72	264.12	180.83	294.48	128.79	147.19
K5234	758.84	138.89	0.92	229.08	34.81	1133.75	829.21	1244.86	488.69	21.65
K5235	611.06	139.63	1.07	184.46	34.81	957.75	681.95	1023.44	400.30	377.69
K5236	571.09	122.77	1.23	172.40	34.88	882.98	633.71	955.20	376.46	-0.01
K5237	581.32	147.55	1.28	175.49	34.55	934.96	656.38	982.69	382.26	415.06
K5238	687.93	180.14	1.49	207.67	34.55	1115.24	779.49	1159.30	446.02	482.82
K5239	417.07	131.22	1.13	125.90	35.01	711.56	483.81	728.14	284.47	338.41
K5240	567.41	142.34	1.60	171.29	35.15	910.23	640.17	960.09	374.53	-0.04
K5241	646.08	155.74	1.68	195.04	35.21	1026.17	725.63	1085.10	421.65	23.58
K5242	712.74	117.35	0.73	215.16	35.52	1043.79	772.15	1165.37	461.83	0.00
K5243	142.69	43.82	0.01	43.07	34.61	241.35	164.60	270.82	119.95	135.74
K5244	318.43	69.92	0.44	96.13	34.71	494.42	353.82	548.34	225.17	47.13
K5245	541.65	136.22	1.05	163.51	34.55	868.99	610.81	917.20	358.52	536.74
K5246	424.83	96.21	0.60	128.25	34.54	664.34	473.54	721.29	288.64	401.73
K5247	487.01	136.00	0.98	147.02	34.62	802.99	555.99	835.03	325.92	488.61
K5248	509.57	149.86	1.28	153.83	34.68	852.54	585.78	876.20	339.47	502.06
K5249	375.24	104.94	0.69	113.28	34.89	618.87	428.40	651.61	259.33	369.43
K5250	460.41	131.20	1.00	138.99	34.99	763.42	527.02	793.08	310.38	476.81
K5251	465.66	128.92	1.16	140.57	35.08	766.23	531.28	800.07	313.61	437.56
K5252	368.70	71.33	0.51	111.30	35.22	557.07	404.87	625.13	255.75	93.79
K5253	120.67	31.65	0.00	36.43	34.62	195.45	136.50	231.68	106.79	108.79
K5254	333.56	84.08	0.65	100.69	34.52	535.45	376.25	578.18	234.04	316.98
K5255	420.82	119.40	1.25	127.03	34.51	697.27	481.77	727.48	286.21	461.49
K5256	324.64	65.41	0.61	98.00	34.63	494.84	357.96	555.52	228.81	235.85
K5257	218.02	52.70	0.05	65.81	34.73	346.00	244.42	388.57	165.13	215.20
K5258	364.21	110.08	0.69	109.95	34.69	613.87	419.94	637.42	252.54	391.88
K5259	417.41	129.81	1.26	126.00	34.73	709.85	483.58	727.79	284.39	471.78
K5260	346.79	71.26	0.66	104.69	34.85	530.82	383.08	591.97	242.27	327.24
K5261	209.85	49.87	0.06	63.35	35.00	331.67	234.84	375.16	160.51	209.01
K5262	356.39	104.28	0.70	107.58	34.99	595.23	409.24	623.08	248.15	384.02
K5263	438.41	119.65	1.27	132.35	35.04	718.80	499.50	754.57	297.26	482.34
K5264	347.23	73.99	0.65	104.82	35.20	535.71	384.88	594.34	242.89	315.35
K5265	103.18	25.57	0.01	31.15	34.63	164.73	115.97	202.38	96.34	87.42
K5266	326.41	79.91	0.65	98.53	34.54	520.20	367.02	565.37	229.77	306.63
K5267	410.50	114.16	1.25	123.92	34.52	676.50	468.83	709.37	280.05	453.59

Aislador	<i>D</i>	<i>L</i>	<i>SC</i>	<i>Ev</i>	<i>Eh</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>W_{NLRHA}</i>
K5268	324.25	72.74	0.68	97.88	34.61	506.17	361.30	558.64	228.55	293.46
K5269	208.32	51.21	0.02	62.89	34.72	331.94	233.94	373.22	159.32	207.69
K5270	361.46	105.94	0.64	109.12	34.69	603.91	415.08	631.18	250.89	388.59
K5271	406.29	127.62	1.25	122.65	34.73	692.98	471.34	709.98	277.74	459.43
K5272	310.09	70.04	0.68	93.61	34.86	484.85	345.79	536.28	220.33	287.54
K5273	192.23	42.69	0.02	58.03	35.00	299.00	213.60	345.08	149.98	179.68
K5274	352.90	99.35	0.65	106.53	35.00	583.09	403.22	615.33	246.08	375.70
K5275	412.78	116.51	1.25	124.61	35.06	683.01	472.29	714.51	281.95	458.25
K5276	315.02	76.50	0.67	95.10	35.22	501.10	353.94	547.26	223.64	286.28
K5277	115.27	26.21	0.01	34.80	34.62	180.27	128.38	220.85	103.56	102.28
K5278	353.22	81.22	0.66	106.63	34.52	554.48	394.49	606.29	245.79	326.82
K5279	433.74	113.94	1.23	130.93	34.51	704.02	491.94	744.13	293.94	469.98
K5280	323.50	65.81	0.62	97.66	34.62	494.11	357.03	554.00	228.11	252.40
K5281	202.01	48.41	0.03	60.98	34.73	319.89	226.24	362.35	155.55	199.76
K5282	357.76	106.50	0.64	108.00	34.70	600.35	411.65	625.90	248.68	384.43
K5283	395.61	127.45	1.25	119.42	34.74	679.89	460.58	693.86	271.36	449.45
K5284	316.09	75.43	0.68	95.42	34.86	500.67	354.48	547.98	223.92	304.91
K5285	202.27	48.45	0.03	61.06	35.00	320.27	226.52	363.03	155.98	197.06
K5286	350.18	98.84	0.65	105.71	35.00	579.01	400.25	611.00	244.45	371.65
K5287	397.06	116.48	1.25	119.86	35.06	664.08	456.55	690.88	272.56	441.94
K5288	306.86	76.59	0.67	92.63	35.22	491.45	345.83	535.06	218.76	276.90
K5289	115.75	24.56	0.01	34.94	34.63	178.20	128.03	220.75	103.86	67.32
K5290	349.25	80.51	0.65	105.43	34.52	548.58	390.16	599.96	243.42	322.33
K5291	424.28	107.66	1.06	128.08	34.51	682.46	479.17	726.62	288.29	343.23
K5292	476.30	71.87	0.62	143.78	34.93	687.17	512.86	786.83	319.82	0.00
K5293	182.51	44.88	0.02	55.09	34.74	290.84	204.97	331.30	143.90	158.35
K5294	367.56	104.53	0.65	110.96	34.69	608.98	420.48	639.64	254.54	394.35
K5295	419.91	121.67	1.23	126.76	34.73	699.78	481.97	727.43	285.88	463.36
K5296	339.98	75.20	0.63	102.63	34.85	528.92	378.21	583.68	238.20	308.09
K5297	205.68	53.86	0.03	62.09	34.99	333.02	232.64	370.85	158.01	201.83
K5298	348.76	98.51	0.65	105.28	35.00	576.78	398.66	608.70	243.60	368.36
K5299	396.18	116.53	1.25	119.60	35.07	663.11	455.69	689.59	272.03	440.56
K5300	315.13	76.52	0.67	95.13	35.22	501.26	354.06	547.44	223.71	282.01
K5301	179.34	35.15	0.12	54.14	34.72	271.56	197.03	321.75	141.99	-0.03
K5302	253.28	44.37	0.37	76.46	34.72	375.29	275.83	437.66	186.21	-0.07
K5303	312.93	72.86	0.70	94.47	34.60	492.79	350.06	541.71	221.77	218.26
K5304	411.86	61.99	0.56	124.33	34.94	593.97	443.41	685.06	281.29	0.00
K5305	183.75	44.73	0.02	55.47	34.74	292.10	206.14	333.10	144.65	157.90
K5306	372.75	102.96	0.64	112.52	34.69	612.69	424.88	646.64	257.64	390.07
K5307	401.88	110.28	1.07	121.32	34.74	659.77	458.09	694.52	275.11	334.44
K5308	503.91	84.55	0.73	152.12	35.17	740.69	546.91	834.98	336.57	-0.54
K5309	206.27	52.18	0.03	62.27	34.99	331.04	232.39	370.90	158.37	187.41
K5310	349.57	98.48	0.65	105.53	35.00	577.70	399.46	609.91	244.09	364.12
K5311	399.32	116.94	1.23	120.54	35.06	667.51	459.02	694.49	273.91	438.90
K5312	310.50	72.32	0.62	93.73	35.22	488.93	347.28	538.33	220.94	267.63

Aislador	<i>D</i>	<i>L</i>	<i>SC</i>	<i>Ev</i>	<i>Eh</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>W_{NLRHA}</i>
K5313	206.49	28.09	0.24	62.33	34.70	292.97	220.78	359.11	158.21	15.92
K5314	282.32	47.31	0.53	85.22	34.70	415.00	306.50	482.89	203.56	31.46
K5315	200.83	27.04	0.24	60.63	34.79	284.50	214.59	350.17	154.91	-2.70
K5316	135.73	26.96	0.01	40.97	34.73	206.02	149.22	252.07	115.92	89.46
K5317	300.54	64.15	0.41	90.73	34.57	463.69	333.02	518.43	214.33	36.89
K5318	300.91	69.81	0.62	90.84	34.65	473.40	336.43	522.10	214.63	145.32
K5319	438.38	68.84	0.55	132.34	35.18	636.75	473.35	728.55	297.39	-0.08
K5320	211.02	51.23	0.03	63.70	34.99	335.22	236.66	377.57	161.21	203.33
K5321	358.46	99.70	0.64	108.21	34.99	590.32	408.95	623.85	249.40	358.53
K5322	399.35	110.78	1.06	120.55	35.06	657.52	455.80	691.28	273.92	326.53
K5323	449.15	71.37	0.64	135.59	35.55	653.80	485.47	746.44	304.19	-0.13
K5324	313.81	46.89	0.40	94.73	34.78	452.00	337.65	529.92	222.47	-0.10
K5325	312.44	41.17	0.46	94.32	34.78	441.26	333.48	525.06	221.65	-0.02
K5326	163.01	21.21	0.13	49.21	34.95	229.68	173.75	290.51	132.45	-0.63
K5327	141.93	28.94	0.01	42.84	35.00	216.62	156.41	262.64	119.89	97.89
K5328	267.28	59.84	0.39	80.69	35.08	416.86	297.59	466.81	194.94	16.83
K5329	291.46	69.51	0.66	87.98	35.15	461.63	326.87	508.29	209.48	155.13
K5330	460.57	75.26	0.59	139.03	35.55	673.69	498.79	765.49	311.03	0.00
K5331	301.91	47.95	0.42	91.14	35.06	439.44	326.31	512.89	215.64	0.00
K5332	296.77	43.00	0.49	89.59	35.15	425.41	318.76	502.85	212.65	-0.14
K5333	196.43	38.09	0.18	59.30	35.29	296.85	215.66	349.54	152.78	0.00
K5334	303.83	64.61	0.49	91.72	1.53	468.47	336.63	490.64	183.26	163.94
K5335	298.84	63.62	0.53	90.21	1.67	460.95	331.19	482.84	180.41	205.26
K5351	376.12	64.54	0.54	113.54	34.62	555.14	408.93	632.31	259.59	52.10
K5352	387.18	67.62	0.53	116.88	34.62	573.33	421.52	650.46	266.20	100.00
K5360	327.15	67.75	0.66	98.76	34.90	501.64	361.68	560.78	230.58	0.00
K5361	502.58	106.44	1.06	151.72	34.90	774.46	556.86	843.99	335.51	0.00
K5370	330.02	79.27	0.74	99.62	34.92	523.60	370.40	570.94	232.31	144.72
K5371	328.47	82.39	0.76	99.16	34.92	526.74	370.42	570.19	231.38	285.05
K5372	558.79	103.85	0.75	168.69	34.75	837.46	611.46	926.66	368.98	3.22
K5373	82.20	23.30	1.10	24.82	35.07	137.03	94.95	171.28	84.24	-0.01
K5374	108.88	25.36	-0.44	32.87	35.03	170.80	121.12	210.79	100.15	-0.01
K5381	120.45	23.07	2.19	36.36	35.23	183.64	134.17	229.85	107.27	0.00
K5382	333.15	36.55	-0.55	100.57	35.20	457.71	350.88	553.28	234.47	-0.15
K5395	311.34	59.89	3.03	93.99	35.20	472.46	344.32	535.77	221.42	76.33
K5396	478.96	79.11	0.01	144.59	35.18	701.33	518.52	794.08	321.65	2.59
K5397	372.44	73.99	1.87	112.43	35.26	567.18	411.30	633.48	258.03	-0.03
K5398	131.00	29.72	0.53	39.55	35.23	205.28	146.39	247.37	113.59	-0.02
K5411	359.49	76.93	-1.82	108.52	35.23	552.66	396.14	611.79	250.25	-0.18
K5412	139.98	27.64	-0.40	42.26	35.21	211.80	153.40	258.86	118.93	-0.16
K5413	267.31	75.28	0.11	80.69	35.23	441.33	305.06	474.45	195.12	210.06
K5414	103.68	26.31	0.08	31.30	35.20	166.60	116.92	204.15	97.21	28.22
K5427	70.09	24.83	0.01	21.16	35.24	123.85	82.51	152.93	77.17	16.41
K5428	60.50	20.63	0.03	18.26	35.24	105.64	70.85	136.46	71.43	8.10
K5429	301.99	84.09	0.44	91.16	35.38	497.37	344.47	531.42	216.01	229.03

Aislador	<i>D</i>	<i>L</i>	<i>SC</i>	<i>Ev</i>	<i>Eh</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>W_{NLRHA}</i>
K5430	265.13	64.41	0.56	80.04	35.38	421.77	297.90	466.34	193.96	207.60
K5431	241.52	45.92	0.28	72.91	35.62	363.57	264.75	421.58	180.08	0.00
K5432	537.41	80.62	0.68	162.23	35.62	774.56	578.40	883.73	357.06	-0.03
K5462	147.75	36.09	-0.31	44.60	35.13	234.72	165.48	274.76	123.50	33.17
K5463	255.58	72.54	1.87	77.15	35.16	424.64	293.72	457.15	188.03	180.67
K5464	163.27	39.75	0.17	49.29	35.13	259.69	183.31	300.39	132.79	39.13
K5480	7.94	-2.17	0.14	2.40	35.23	6.20	7.00	46.21	39.98	-0.02
K5481	257.93	87.33	0.06	77.86	35.26	449.30	301.66	466.37	189.54	179.55
K5482	162.45	48.99	-0.10	49.04	35.23	273.22	186.84	303.60	132.39	3.83
K5494	137.12	43.45	0.20	41.39	35.31	234.26	159.04	263.17	117.33	47.43
K5495	328.75	115.64	0.64	99.24	35.31	580.15	387.21	587.51	231.95	302.95

APÉNDICE C.

Componentes de energía acumulada para propiedades de límite inferior (Lower Bound) y límite superior (Upper Bound)

Apéndice C.1. Componentes de energía acumulada para propiedades de límite inferior (Lower Bound)

Figura 75

Componentes de energía acumulada para Lima 1966 – Límite inferior (Lower Bound)

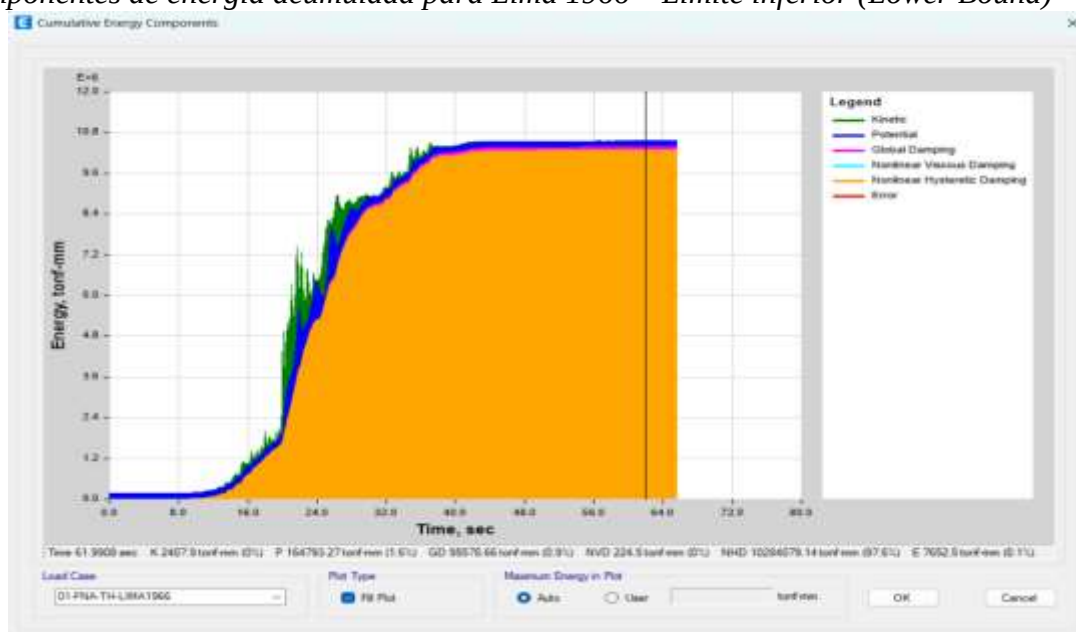


Figura 76

Componentes de energía acumulada para Ancash 1970 – Límite inferior (Lower Bound)

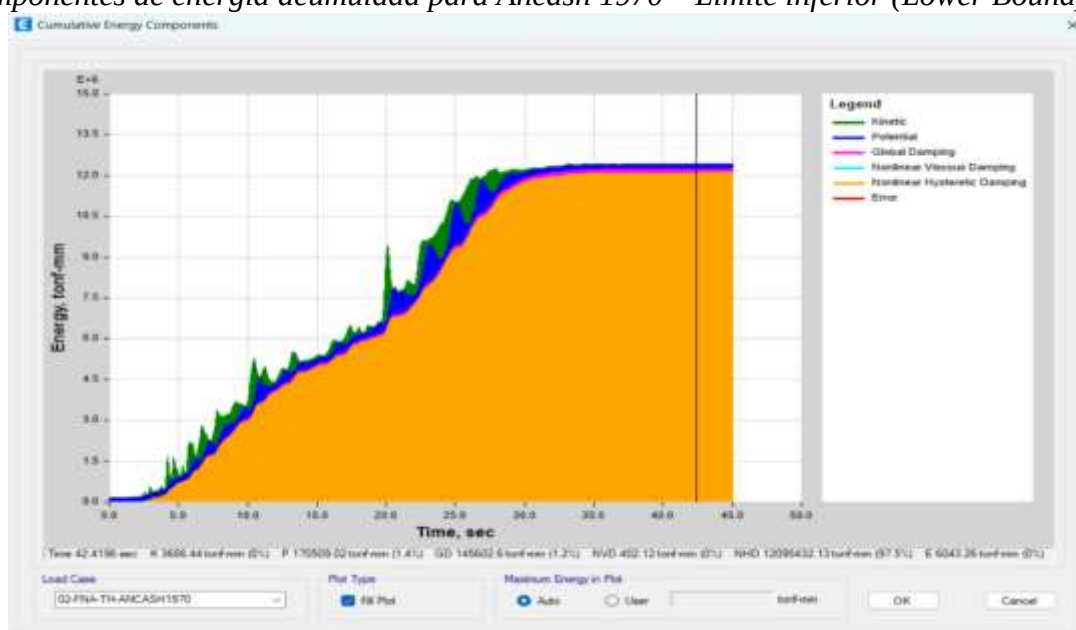


Figura 77

Componentes de energía acumulada para Lima 1974 – Límite inferior (Lower Bound)

**Figura 78**

Componentes de energía acumulada para Moquegua 2001 – Límite inferior (Lower Bound)

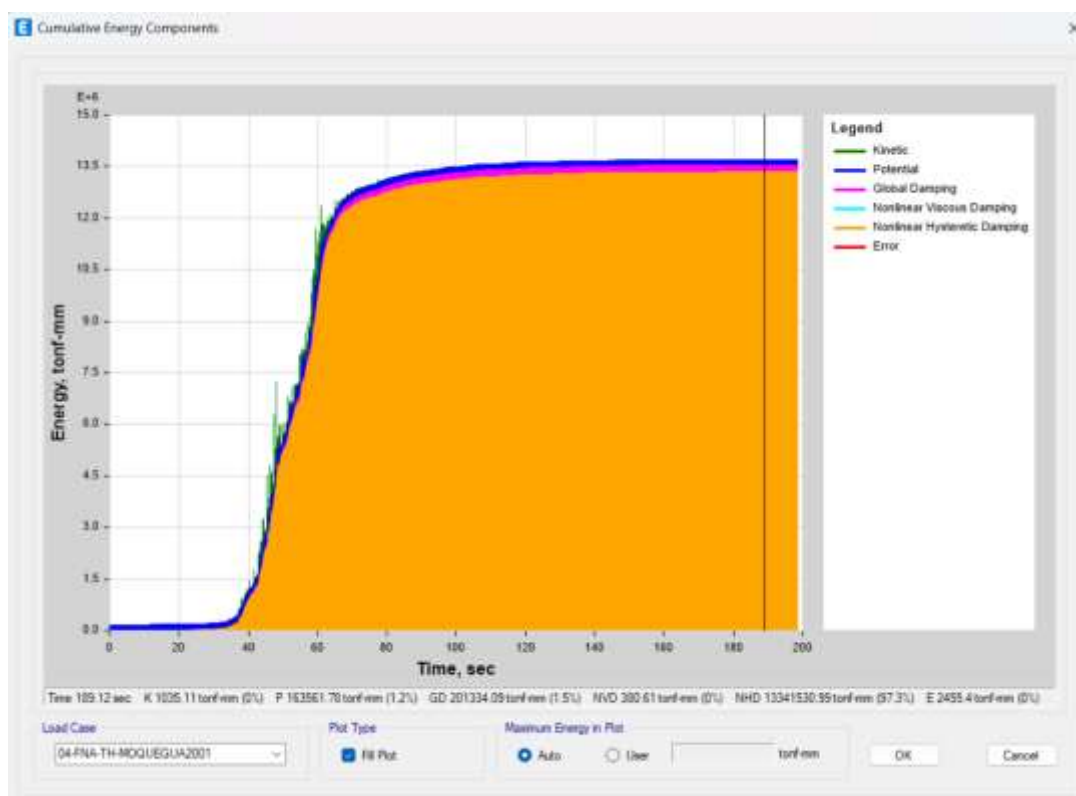
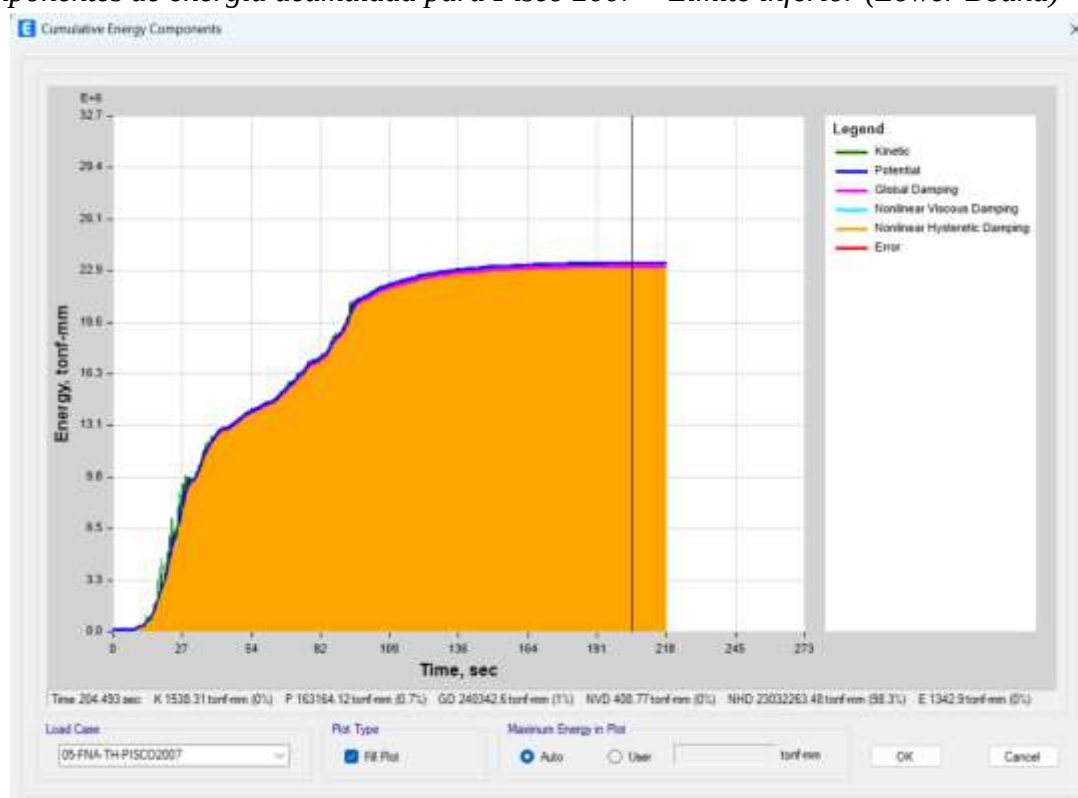
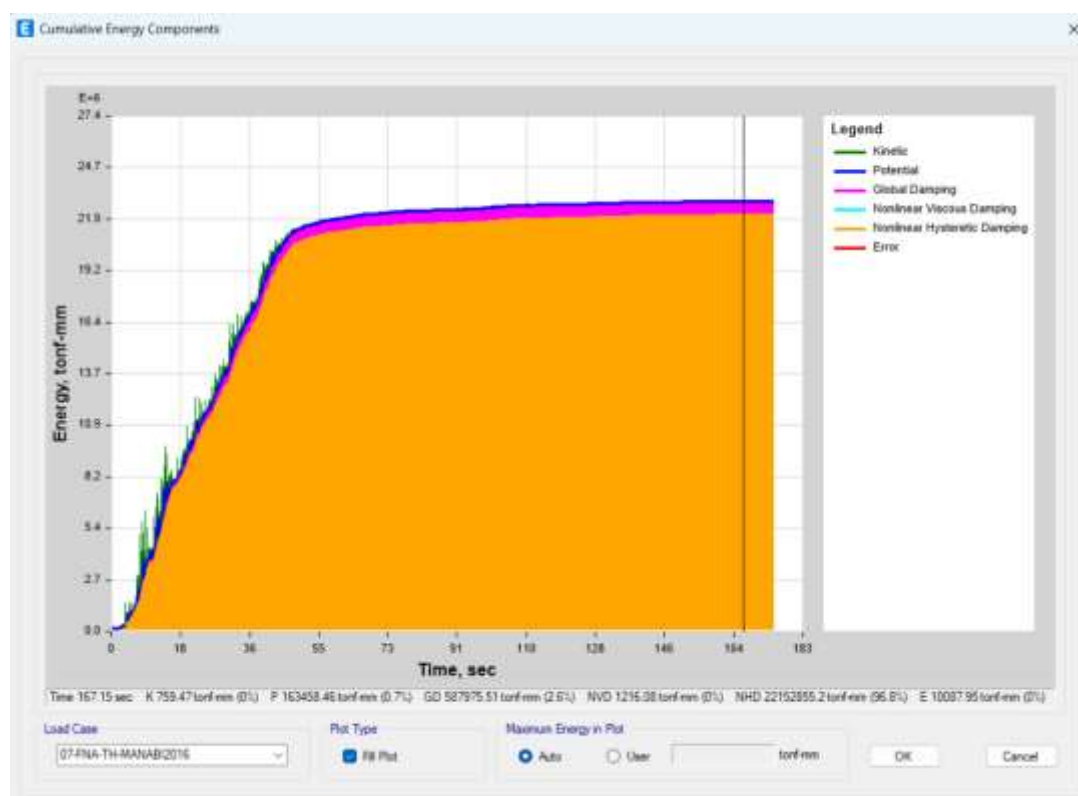


Figura 79

Componentes de energía acumulada para Pisco 2007 – Límite inferior (Lower Bound)

**Figura 80**

Componentes de energía acumulada para Manabí 2016 – Límite inferior (Lower Bound)



Apéndice C.2. Componentes de energía acumulada para propiedades de límite superior (Upper Bound)

Figura 81

Componentes de energía acumulada para Lima 1966 – Límite superior (Upper Bound)

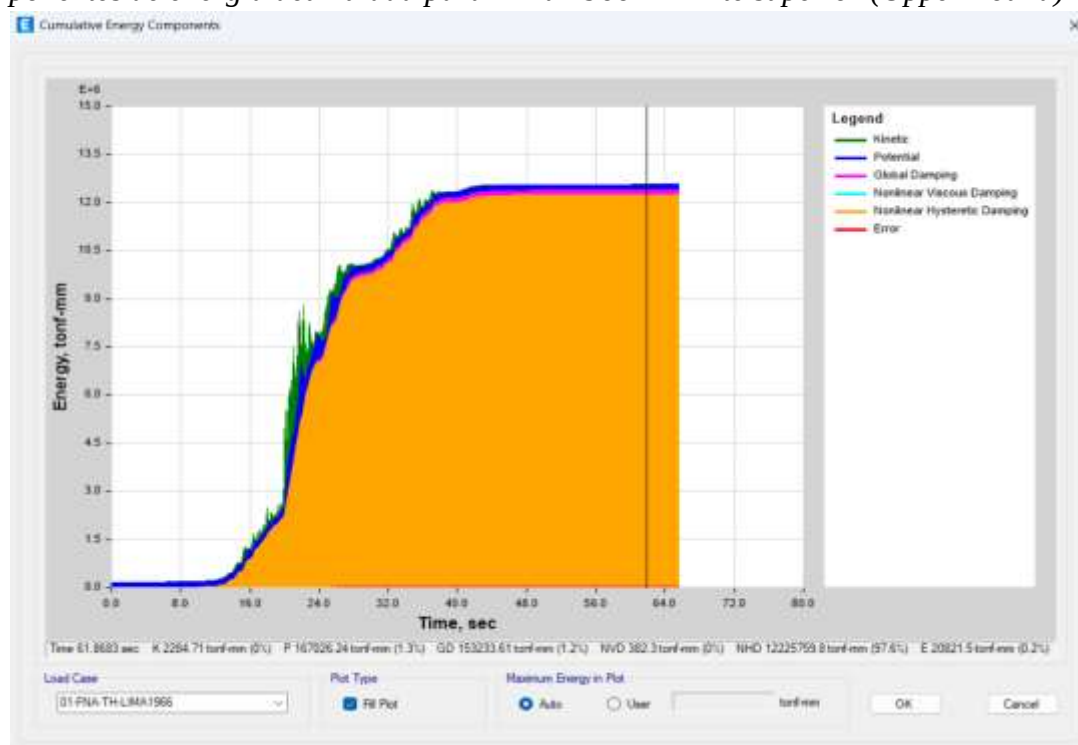


Figura 82

Componentes de energía acumulada para Ancash 1970 – Límite superior (Upper Bound)

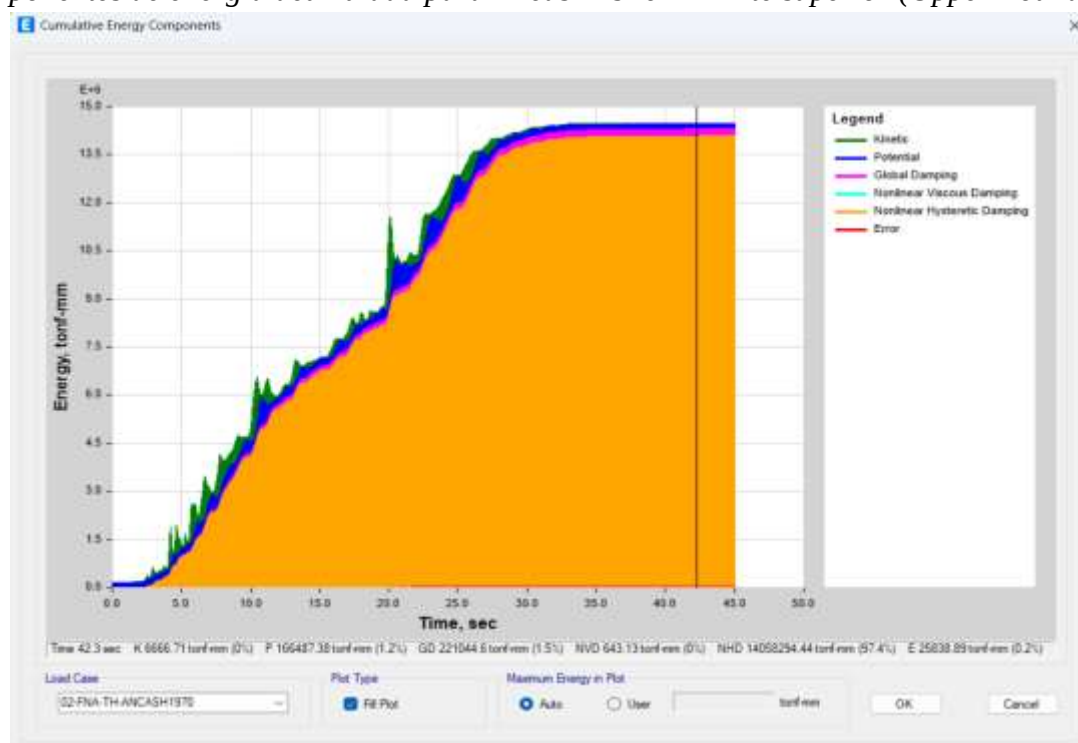


Figura 83

Componentes de energía acumulada para Lima 1974 – Límite superior (Upper Bound)

**Figura 84**

Componentes de energía acumulada para Moquegua 2001 – Límite superior (Upper Bound)

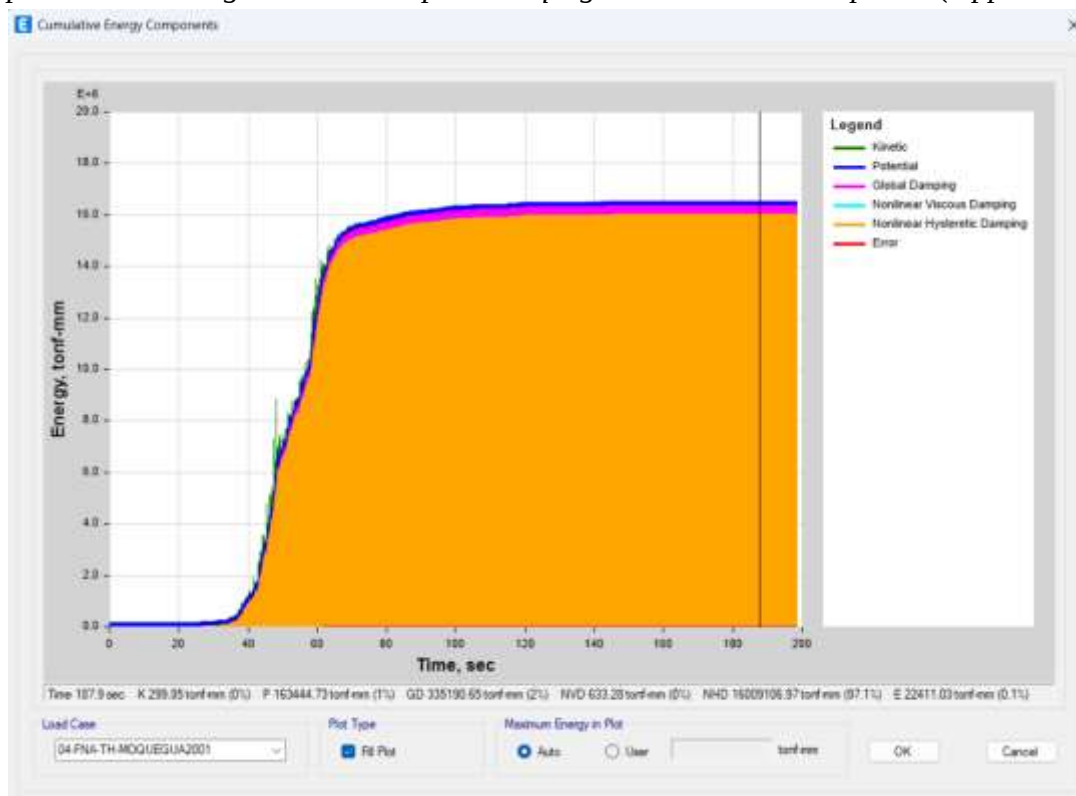


Figura 85

Componentes de energía acumulada para Pisco 2007 – Límite superior (Upper Bound)

**Figura 86**

Componentes de energía acumulada para Coquimbo 2015 – Límite superior (Upper Bound)

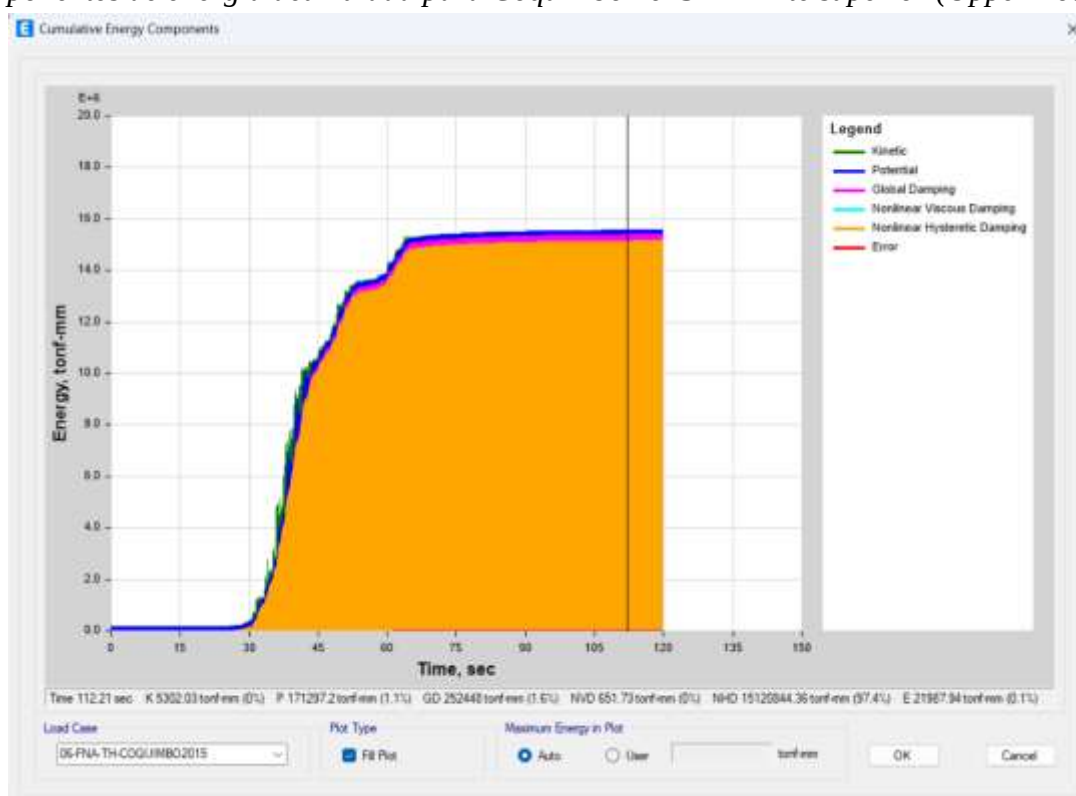
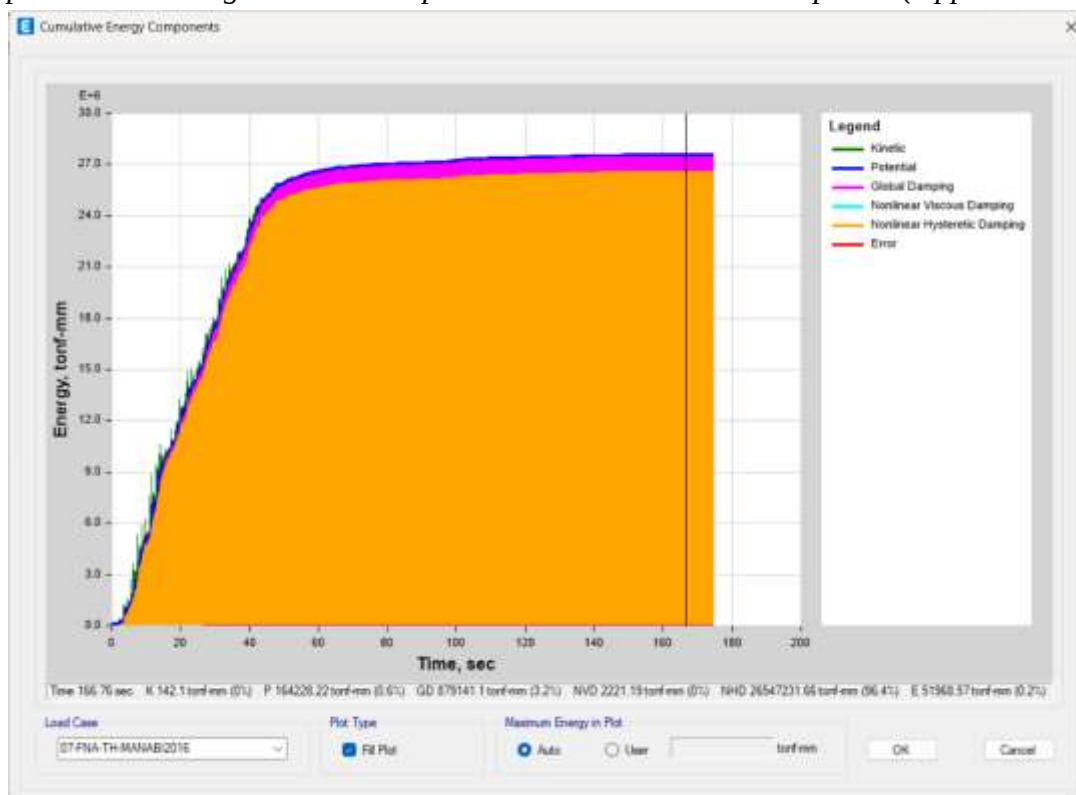


Figura 87

Componentes de energía acumulada para Manabí 2016 – Límite superior (Upper Bound)



ANEXOS

ANEXO A.

Demostración de fuerza sísmica del aislador FPT para la fase – I (Fenz & Constantinou, 2008)

Del (DCL – III) de la figura 7 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sen \theta_2 - F_{f1} = 0 \dots \dots \dots (I)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 + F_{f2} \sen \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \dots \dots \dots (II)$$

Del (DCL – IV) de la figura 7 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F = F_{f1} \dots \dots \dots (III)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 = W \dots \dots \dots (VI)$$

Reemplazar (III) en (I)

$$S_2 = \frac{F - F_{f2} \cos \theta_2}{\sen \theta_2} \dots \dots \dots (V)$$

Reemplazar (V) en (II)

$$\text{Despejar: } u_2 = R_{ef2} \sen \theta_2 \rightarrow \sen \theta_2 = \frac{u_2}{R_{ef2}}$$

Para: $\theta \cong 0 \rightarrow \cos \theta_2 = 1$

$$F_{f2} \sen \theta_2 = \left(\frac{F - F_{f2} \cos \theta_2}{\sen \theta_2} \right) \cos \theta_2 + S_1$$

$$W \sen \theta_2 + F_{f2} \sen^2 \theta_2 = F \cos \theta_2 - F_{f2} \cos^2 \theta_2$$

$$F \cos \theta_2 = F_{f2} (\sen^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2) + W \sen \theta_2$$

$$F = \frac{W \sen \theta_2}{\cos \theta_2} + \frac{F_{f2}}{\cos \theta_2}$$

$$F = \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} \dots \dots \dots (VI)$$

$$F = \frac{W u_3}{R_{ef3}} + F_{f3} \dots \dots \dots (VII)$$

Despejar $(u_2), (u_3)$ de (VI) y (VII)

$$\left[u_2 = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right] ; \left[u_3 = (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right]$$

Desplazamiento total (u) :

$$u = u_2 + u_3$$

$$u = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} + (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W}$$

$$u = \frac{F}{W} (R_{ef2} + R_{ef3}) - \frac{1}{W} (F_{f2} R_{ef2} + F_{f3} R_{ef3})$$

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f2} R_{ef2} + F_{f3} R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \dots \dots \dots (\text{L. q. q. d.})$$

ANEXO B.

Demostración de fuerza sísmica y desplazamiento del aislador FPT para la fase – II (Fenz & Constantinou, 2008)

Anexo B.1. Demostración del desplazamiento de transición entre la fase I y la fase II

Cuando la fuerza sísmica supera a la fuerza de fricción: $F = F_{f1}$

Límite de desplazamiento: $u = u^*$

$$F_{f1} = \frac{Wu^*}{R_{ef2} + R_{ef3}} + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}}$$

$$F_{f1}(R_{ef2} + R_{ef3}) = Wu^* + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}$$

$$u^* = \frac{F_{f1}}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) - \frac{F_{f2}}{W}(R_{ef2}) - \frac{F_{f3}}{W}(R_{ef3})$$

$$u^* = \mu_1(R_{ef2} + R_{ef3}) - \mu_2R_{ef2} - \mu_3R_{ef3}$$

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3} \dots \dots \dots \text{(L. q. q. d.)}$$

Anexo B.2. Demostración de la fuerza sísmica para la fase II

Del (DCL – III) de la figura 2. 9 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 = S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots \text{(I)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 = S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \sin \theta_1 \dots \dots \dots \text{(II)}$$

Del (DCL – IV) de la figura 2. 9 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow S_1 \sin \theta_1 + F_{f1} \cos \theta_1 = F \dots \dots \dots \text{(III)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f1} \sin \theta_1 + W = S_1 \cos \theta_1 \dots \dots \dots \text{(IV)}$$

De (III)

$$S_1 = \frac{F - F_{f1} \cos \theta_1}{\sin \theta_1} \dots \dots \dots \text{(V)}$$

Reemplazar (V) en (IV)

$$\text{Despejar: } u_1 = R_{ef1} \sin \theta_1 \rightarrow \sin \theta_1 = \frac{u_1}{R_{ef1}}$$

$$\text{Para: } \theta \cong 0 \rightarrow \cos \theta_1 = 1$$

$$F_{f1} \sin \theta_1 + W = \left(\frac{F - F_{f1} \cos \theta_1}{\sin \theta_1} \right) \cos \theta_1$$

$$F_{f1} \sin^2 \theta_1 + W \sin \theta_1 = F \cos \theta_1 - F_{f1} \cos^2 \theta_1$$

$$F_{f1} (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) + W \sin \theta_1 = F \cos \theta_1$$

$$F = \frac{W \sin \theta_1 + F_{f1}}{\cos \theta_1} \rightarrow F = W \sin \theta_1 + F_{f1}$$

$$F = \frac{Wu_1}{R_{ef1}} + F_{f1} \dots \dots \dots \text{(VI)}$$

De (I)

$$S_2 = \frac{F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 - F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \dots \dots \dots \text{(VII)}$$

Remplazar (VII) en (II)

$$\begin{aligned}
& F_{f2} \operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 \\
&= \left[\frac{F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \operatorname{sen} \theta_1 - F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2)} \right] \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \operatorname{sen} \theta_1 \\
& F_{f2} [\operatorname{sen}^2(\theta_1 + \theta_2) + \cos^2(\theta_1 + \theta_2)] + S_1 [\cos \theta_1 \operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2) - \operatorname{sen} \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \\
&= F_{f1} [\cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2)] \\
& F_{f1} = \frac{F_{f2} + S_1 \operatorname{sen} \theta_2}{\cos \theta_2} \dots \dots \dots \text{(VIII)}
\end{aligned}$$

De (IV)

$$S_1 = \frac{W + F_{f1} \operatorname{sen} \theta_1}{\cos \theta_1} \dots \dots \dots \text{(IX)}$$

Remplazar (IX) en (VIII)

$$\text{Despejar: } u_2 = R_{ef2} \operatorname{sen} \theta_2 \rightarrow \operatorname{sen} \theta_2 = \frac{u_2}{R_{ef2}}$$

$$\text{Para: } \theta \cong 0 \rightarrow \cos \theta_1 = 1 ; \cos \theta_2 = 1 ; \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 = 0$$

$$\begin{aligned}
& F_{f1} = \frac{\left[F_{f2} + \left(\frac{W + F_{f1} \operatorname{sen} \theta_1}{\cos \theta_1} \right) \operatorname{sen} \theta_2 \right]}{\cos \theta_2} \\
& F_{f1} (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2) = F_{f2} \cos \theta_1 + W \operatorname{sen} \theta_2 \\
& F_{f1} = \frac{F_{f2} \cos \theta_1 + W \operatorname{sen} \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2} \\
& F_{f1} = \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} \dots \dots \dots \text{(X)}
\end{aligned}$$

Remplazar (X) en (VI)

$$\begin{aligned}
& F = \frac{W u_1}{R_{ef1}} + \left[\frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} \right] \\
& F = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \dots \dots \dots \text{(XI)}
\end{aligned}$$

Igualar (X) y (VI)

$$\begin{aligned}
& \frac{W u_1}{R_{ef1}} + F_{f1} = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad \rightarrow \quad \frac{W u_1}{R_{ef1}} + F_{f1} = \frac{W u_1}{R_{ef1}} + \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} \\
& F_{f1} = \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} \quad \rightarrow \quad u_2 = \left(\frac{F_{f1}}{W} - \frac{F_{f2}}{W} \right) R_{ef2} \\
& u_2 = (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} \dots \dots \dots \text{(XII)}
\end{aligned}$$

Despejar (u_1) de (VI), (u_2) de (XII) y (u_3) de (VII - Fase I)

$$\left[u_1 = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} \right] ; \left[u_2 = (F_{f1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right] ; \left[u_3 = (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right]$$

Desplazamiento total (u):

$$\begin{aligned}
& u = u_1 + u_2 + u_3 \quad \rightarrow \quad u = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} + (F_{f1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} + (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \\
& u = \frac{1}{W} [F(R_{ef1} + R_{ef3}) + F_{f1} R_{ef2} - F_{f2} R_{ef2} - F_{f1} R_{ef1} - F_{f3} R_{ef3}] \\
& F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2} R_{ef2} + F_{f3} R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}} \dots \dots \dots \text{(L. q. q. d.)}
\end{aligned}$$

ANEXO C.

Demostración de fuerza sísmica y desplazamiento del aislador FPT para la fase – III (Fenz & Constantinou, 2008)

Anexo C.1. Demostración del desplazamiento de transición entre la fase II y la fase III

Cuando la fuerza sísmica supera a la fuerza de fricción: $F = F_{f4}$

Límite de desplazamiento: $u = u^{**}$

$$F_{f4} = \frac{W u^{**}}{R_{ef1} + R_{ef3}} + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}}$$

$$u^{**} = \frac{F_{f4}}{W}(R_{ef1} + R_{ef3}) - \frac{F_{f1}}{W}R_{ef1} + \frac{F_{f1}}{W}R_{ef2} - \frac{F_{f2}}{W}R_{ef2} - \frac{F_{f3}}{W}R_{ef3}$$

$$u^{**} = \mu_4 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef2} - \mu_2 R_{ef2} - \mu_3 R_{ef3}$$

$$u^{**} = (\mu_4 - \mu_1)R_{ef1} + (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_3 R_{ef3} + (\mu_1 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef3})$$

$$u^{**} = (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3} + (\mu_4 - \mu_1)R_{ef1} + (\mu_4 - \mu_1)R_{ef3}$$

$$(u^* = \mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3}$$

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3}) \dots \dots \dots \text{(L. q. q. d.)}$$

Anexo C. 2. Demostración de la fuerza sísmica para la fase III

Teniendo en cuenta el desarrollo para encontrar u_1 y u_2 (de la fase II); se obtiene:

$$F = \frac{W}{R_{ef4}}u_4 + F_{f4} \dots \dots \dots \text{(I)}$$

$$F = W \left(\frac{u_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \dots \dots \dots \text{(II)}$$

Igualar (I) y (II):

$$\frac{W}{R_{ef4}}u_4 + F_{f4} = W \left(\frac{u_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \rightarrow F_{f4} = W \frac{u_3}{R_{ef3}} + F_{f3}u_3$$

$$u_3 = (F_{f4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \dots \dots \dots \text{(III)}$$

Despejar (u_1) de (VI – Fase II), (u_2) de (XII – Fase II), (u_3) de (III) y (u_4) de (VI – Fase II)

$$\left[u_1 = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} \right] ; \left[u_2 = (F_{f1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right] ; \left[u_3 = (F_{f4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right] ;$$

$$\left[u_4 = (F - F_{f4}) \frac{R_{ef4}}{W} \right]$$

Desplazamiento total (u): $u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$

$$u = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} + (F_{f1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} + (F_{f4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} + (F - F_{f4}) \frac{R_{ef4}}{W}$$

$$u = \frac{1}{W} (FR_{ef1} - F_{f1}R_{ef1} + F_{f1}R_{ef2} - F_{f2}R_{ef2} + F_{f4}R_{ef3} - F_{f3}R_{ef3} + FR_{ef4} - F_{f4}R_{ef4})$$

$$Wu = F(R_{ef1} + R_{ef4}) - F_{f1}R_{ef1} + F_{f1}R_{ef2} - F_{f2}R_{ef2} + F_{f4}R_{ef3} - F_{f3}R_{ef3} - F_{f4}R_{ef4}$$

$$F = \frac{Wu}{R_{ef1} + R_{ef4}} + \frac{F_{f1}R_{ef1} - F_{f1}R_{ef2} + F_{f2}R_{ef2} - F_{f4}R_{ef3} + F_{f3}R_{ef3} + F_{f4}R_{ef4}}{R_{ef1} + R_{ef4}}$$

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}}u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f4}(R_{ef4} - R_{ef3}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef4}} \dots \text{(L. q. q. d.)}$$

ANEXO D.

Demostración de fuerza sísmica y desplazamiento del aislador FPT para la fase – IV (Fenz & Constantinou, 2008)

Anexo D.1. Demostración del desplazamiento de transición entre la fase III y la fase IV

Cuando la fuerza sísmica supera a la fuerza de fricción: $F = F_{dr1}$

$$u_1 = d_1 \rightarrow F_{dr1} = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1}$$

Límite de desplazamiento: $u = u_{dr1}$

$$\begin{aligned} F_{dr1} &= \frac{W u_{dr1}}{R_{ef1} + R_{ef4}} + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f4}(R_{ef4} - R_{ef3}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef4}} \\ F_{dr1}(R_{ef1} + R_{ef4}) &= W u_{dr1} + F_{f1}R_{ef1} - F_{f1}R_{ef2} + F_{f4}R_{ef4} - F_{f4}R_{ef3} + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3} \\ u_{dr1} &= \frac{1}{W} \left(\frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} \right) (R_{ef1} + R_{ef4}) - \frac{F_{f1}}{W} R_{ef1} + \frac{F_{f1}}{W} R_{ef2} - \frac{F_{f4}}{W} R_{ef4} + \frac{F_{f4}}{W} R_{ef3} - \frac{F_{f2}}{W} R_{ef2} \\ &\quad - \frac{F_{f3}}{W} R_{ef3} \\ u_{dr1} &= \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} \right) (R_{ef1} + R_{ef4}) + \frac{F_{f1}}{W} R_{ef1} + \frac{F_{f1}}{W} R_{ef4} - \frac{F_{f1}}{W} R_{ef1} + \frac{F_{f1}}{W} R_{ef2} - \frac{F_{f4}}{W} R_{ef4} + \frac{F_{f4}}{W} R_{ef3} \\ &\quad - \frac{F_{f2}}{W} R_{ef2} - \frac{F_{f3}}{W} R_{ef3} \\ u_{dr1} &= d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) + \mu_1 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef4} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef2} - \mu_4 R_{ef4} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_2 R_{ef2} - \\ &\quad \mu_3 R_{ef3} + (\mu_1 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef3}) \\ u_{dr1} &= d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) + [(\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{ef3}] - \mu_1 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef4} + \mu_4 R_{ef3} - \\ &\quad \mu_1 R_{ef3} + (\mu_4 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef1}) + \mu_1 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef4} \\ u_{dr1} &= d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) + [u^* + (\mu_4 - \mu_1) R_{ef1} + (\mu_4 - \mu_1) R_{ef3}] - \mu_4 R_{ef4} - \mu_4 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef1} \\ &\quad + \mu_1 R_{ef4} \\ u_{dr1} &= u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) R_{ef1} - (\mu_4 - \mu_1) R_{ef4} \\ \mathbf{u_{dr1}} &= \mathbf{u^{**}} + \mathbf{d_1} \left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{R_{ef4}}}{\mathbf{R_{ef1}}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(\mathbf{R_{ef1}} + \mathbf{R_{ef4}}) \dots \dots \dots \textbf{(L. q. q. d.)} \end{aligned}$$

Anexo D.2. Demostración de la fuerza sísmica para la fase IV

Del (DCL – III) de la figura 13 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) = F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 + F_{r1} \dots \dots \textbf{(I)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 = S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \sin \theta_1 \dots \dots \dots \textbf{(II)}$$

Del (DCL – IV) de la figura 2. 13 (b)

$$\sum F_x = 0 \rightarrow S_1 \sin \theta_1 + F_{f1} \cos \theta_1 + F_{r1} = F \dots \dots \dots \textbf{(III)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 \cos \theta_1 = F_{f1} \sin \theta_1 + W \dots \dots \dots \textbf{(IV)}$$

De (III)

$$S_1 = \frac{F - F_{f1} \cos \theta_1 - F_{r1}}{\sin \theta_1} \dots \dots \dots (V)$$

Remplazar (V) en (IV)

$$\text{Despejar: } d_1 = R_{ef1} \sin \theta_1 \quad ; \quad \sin \theta_1 = \frac{d_1}{R_{ef1}} \quad \text{Para: } \theta \cong 0 \rightarrow \cos \theta_1 = 1$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{F - F_{f1} \cos \theta_1 - F_{r1}}{\sin \theta_1} \right) \cos \theta_1 &= F_{f1} \sin \theta_1 + W \\ F \cos \theta_1 - F_{f1} \cos^2 \theta_1 - F_{r1} \cos \theta_1 &= F_{f1} \sin^2 \theta_1 + W \sin \theta_1 \\ F \cos \theta_1 &= F_{f1} (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) + W \sin \theta_1 + F_{r1} \cos \theta_1 \\ F &= \frac{F_{f1} + W \sin \theta_1 + F_{r1} \cos \theta_1}{\cos \theta_1} \\ F &= F_{f1} + W \sin \theta_1 + F_{r1} \\ F &= \frac{W d_1}{R_{ef1}} + F_{f1} + F_{r1} \dots \dots \dots (VI) \end{aligned}$$

De (I)

$$S_2 = \frac{F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 + F_{r1} - F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \dots \dots \dots (VII)$$

Remplazar (VII) en (II)

$$\begin{aligned} F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 &= \left[\frac{F_{f1} \cos \theta_1 + S_1 \sin \theta_1 + F_{r1} - F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right] \cos(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \sin \theta_1 \\ F_{f2} \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \cos \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) &= F_{f1} \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \sin \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f2} \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + F_{f1} \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ F_{f2} [\sin^2(\theta_1 + \theta_2) + \cos^2(\theta_1 + \theta_2)] + S_1 [\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] &= F_{f1} [\cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ F_{f2} + S_1 \sin \theta_2 &= F_{f1} \cos \theta_2 + F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ F_{f1} &= \frac{F_{f2} + S_1 \sin \theta_2 - F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_2} \dots \dots \dots (VIII) \end{aligned}$$

De (IV)

$$S_1 = \frac{F_{f1} \sin \theta_1 + W}{\cos \theta_1} \dots \dots \dots (IX)$$

Remplazar (IX) en (VIII)

$$\text{Despejando: } u_2 = R_{ef2} \sin \theta_2 \quad ; \quad \sin \theta_2 = \frac{u_2}{R_{ef2}}$$

$$\text{Para: } \theta \cong 0 \rightarrow \cos \theta_1 = 1 \quad ; \quad \cos \theta_2 = 1 \quad ; \quad \sin \theta_1 \sin \theta_2 = 0$$

$$\begin{aligned} F_{f1} &= \frac{F_{f2} + \left(\frac{F_{f1} \sin \theta_1 + W}{\cos \theta_1} \right) \sin \theta_2 - F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_2} \\ F_{f1} &= \frac{F_{f2} \cos \theta_1 + F_{f1} \sin \theta_1 \sin \theta_2 + W \sin \theta_2 - F_{r1} \cos(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2} \\ F_{f1} &= F_{f2} + W \sin \theta_2 - F_{r1} [\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2] \end{aligned}$$

$$F_{f1} = F_{f2} + W \operatorname{sen} \theta_2 - F_{r1} \quad \rightarrow \quad F_{f1} = \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} - F_{r1} \dots \dots \dots \text{ (X)}$$

Remplazar (X) en (VI)

$$F = \frac{W d_1}{R_{ef1}} + \left(\frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2} - F_{r1} \right) + F_{r1} \quad \rightarrow \quad F = W \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \dots \dots \dots \text{ (XI)}$$

Igualar (XI) y (VI)

$$W \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} = \frac{W d_1}{R_{ef1}} + F_{f1} + F_{r1} \quad \rightarrow \quad F_{f1} + F_{r1} = \frac{W u_2}{R_{ef2}} + F_{f2}$$

$$u_2 = (F_{f1} + F_{r1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \dots \dots \dots \text{ (XII)}$$

Despejar (u_2) de (XII), (u_3) de (III - Fase III) y (u_4) de (VI - Fase II); con $u_1 = d_1$

$$[u_1 = d_1]; \left[u_2 = (F_{f1} + F_{r1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right]; \left[u_3 = (F_{f4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right]; \left[u_4 = (F - F_{f4}) \frac{R_{ef4}}{W} \right]$$

Desplazamiento total (u): $u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$

$$\begin{aligned} u &= d_1 + \left[(F_{f1} + F_{r1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right] + \left[(F_{f4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right] + \left[(F - F_{f4}) \frac{R_{ef4}}{W} \right] \\ u &= d_1 + \frac{F_{f1}}{W} R_{ef2} + \frac{F_{r1}}{W} R_{ef2} - \frac{F_{f2}}{W} R_{ef2} + \frac{F_{f4}}{W} R_{ef3} - \frac{F_{f3}}{W} R_{ef3} + \frac{F}{W} R_{ef4} - \frac{F_{f4}}{W} R_{ef4} \\ u &= d_1 + \mu_1 R_{ef2} + \frac{F_{r1}}{W} R_{ef2} - \mu_2 R_{ef2} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_3 R_{ef3} + \frac{F}{W} R_{ef4} - \mu_4 R_{ef4} + (\mu_1 R_{ef3} \\ &\quad - \mu_1 R_{ef3}) \\ u &= \left(\frac{F_{r1}}{W} \right) R_{ef2} + \left(\frac{F}{W} \right) R_{ef4} + d_1 + [(\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{ef3}] + \mu_4 R_{ef3} - \mu_4 R_{ef4} \\ &\quad + (\mu_1 R_{ef1} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef1}) - \mu_1 R_{ef3} \\ u &= \left(\frac{F_{r1}}{W} \right) R_{ef2} + \left(\frac{F}{W} \right) R_{ef4} + d_1 + [u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3})] - \mu_4 R_{ef4} + \mu_1 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef1} \\ u &= \left(\frac{F}{W} \right) R_{ef4} + \left(\frac{F_{r1}}{W} \right) R_{ef2} + u^{**} + d_1 - \mu_4 R_{ef4} + \mu_1 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef1} + \left(d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) \\ &\quad + (\mu_1 R_{ef4} - \mu_1 R_{ef4}) \\ u &= \left(\frac{F}{W} \right) R_{ef4} + \left(\frac{F_{r1}}{W} \right) R_{ef2} + \left[u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef4}) \right] \\ &\quad - d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - \mu_1 R_{ef4} \\ u &= \left(\frac{F}{W} \right) R_{ef4} + \left(\frac{F_{r1}}{W} \right) R_{ef2} + u_{dr1} - d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - \mu_1 R_{ef4} \\ (u - u_{dr1})W &= F R_{ef4} + F_{r1} R_{ef2} - d_1 W \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - F_{f1} R_{ef4} \\ (u - u_{dr1})W &= F R_{ef4} + \left(F - \frac{W d_1}{R_{ef1}} - F_{f1} \right) R_{ef2} - d_1 W \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - F_{f1} R_{ef4} \\ (u - u_{dr1})W &= F(R_{ef4} + R_{ef2}) - \frac{W d_1}{R_{ef1}} (R_{ef2} + R_{ef4}) - F_{f1}(R_{ef4} + R_{ef2}) \\ \frac{(u - u_{dr1})W}{(R_{ef2} + R_{ef4})} &= F - \frac{W d_1}{R_{ef1}} - F_{f1} \\ F &= \frac{W}{(R_{ef2} + R_{ef4})} (u - u_{dr1}) + \frac{W d_1}{R_{ef1}} + F_{f1} \dots \dots \dots \text{ (L. q. q. d.)} \end{aligned}$$

ANEXO E.

Demostración de fuerza sísmica del aislador FPT para la fase – V (Fenz & Constantinou, 2008)

Anexo E.1. Demostración del desplazamiento de transición entre la fase IV y la fase V

Cuando la fuerza sísmica supera a la fuerza de fricción: $F = F_{dr4}$

$$u_4 = d_4 \rightarrow F_{dr4} = \frac{d_4 W}{R_{ef4}} + F_{f4}$$

Límite de desplazamiento: $u = u_{dr4}$

$$\begin{aligned} F_{dr4} &= \frac{(u_{dr4} - u_{dr1})W}{R_{ef2} + R_{ef4}} + \frac{Wd_1}{R_{ef1}} + F_{f1} \\ \frac{d_4 W}{R_{ef4}} + F_{f4} &= \frac{u_{dr4} W}{R_{ef2} + R_{ef4}} - \frac{u_{dr1} W}{R_{ef2} + R_{ef4}} + \frac{Wd_1}{R_{ef1}} + F_{f1} \\ \frac{d_4}{R_{ef4}} + \frac{F_{f4}}{W} &= \frac{u_{dr4}}{R_{ef2} + R_{ef4}} - \frac{u_{dr1}}{R_{ef2} + R_{ef4}} + \frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{F_{f1}}{W} \\ \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) &= \frac{u_{dr4}}{R_{ef2} + R_{ef4}} - \frac{u_{dr1}}{R_{ef2} + R_{ef4}} + \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \\ u_{dr4} &= \frac{u_{dr1} (R_{ef2} + R_{ef4})}{(R_{ef2} + R_{ef4})} - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) (R_{ef2} + R_{ef4}) + \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) (R_{ef2} + R_{ef4}) \\ u_{dr4} &= u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{ef2} + R_{ef4}) \dots \dots \dots (\mathbf{L. q. q. d.}) \end{aligned}$$

Anexo E.2. Demostración de la fuerza sísmica para la fase V

Del (DCL – IV) de la figura 15 (b) $u_1 = d_1 \rightarrow F_{r1} = F - F_{f1} - \frac{Wd_1}{R_{ef1}}$

Del (DCL – I) de la figura 15 (b) $u_4 = d_4 \rightarrow F_{r4} = F - F_{f4} - \frac{Wd_4}{R_{ef4}}$

Despejar (u_2) de (XII - Fase IV) y (u_3) de (III - Fase III); con $u_1 = d_1$ y $u_4 = d_4$

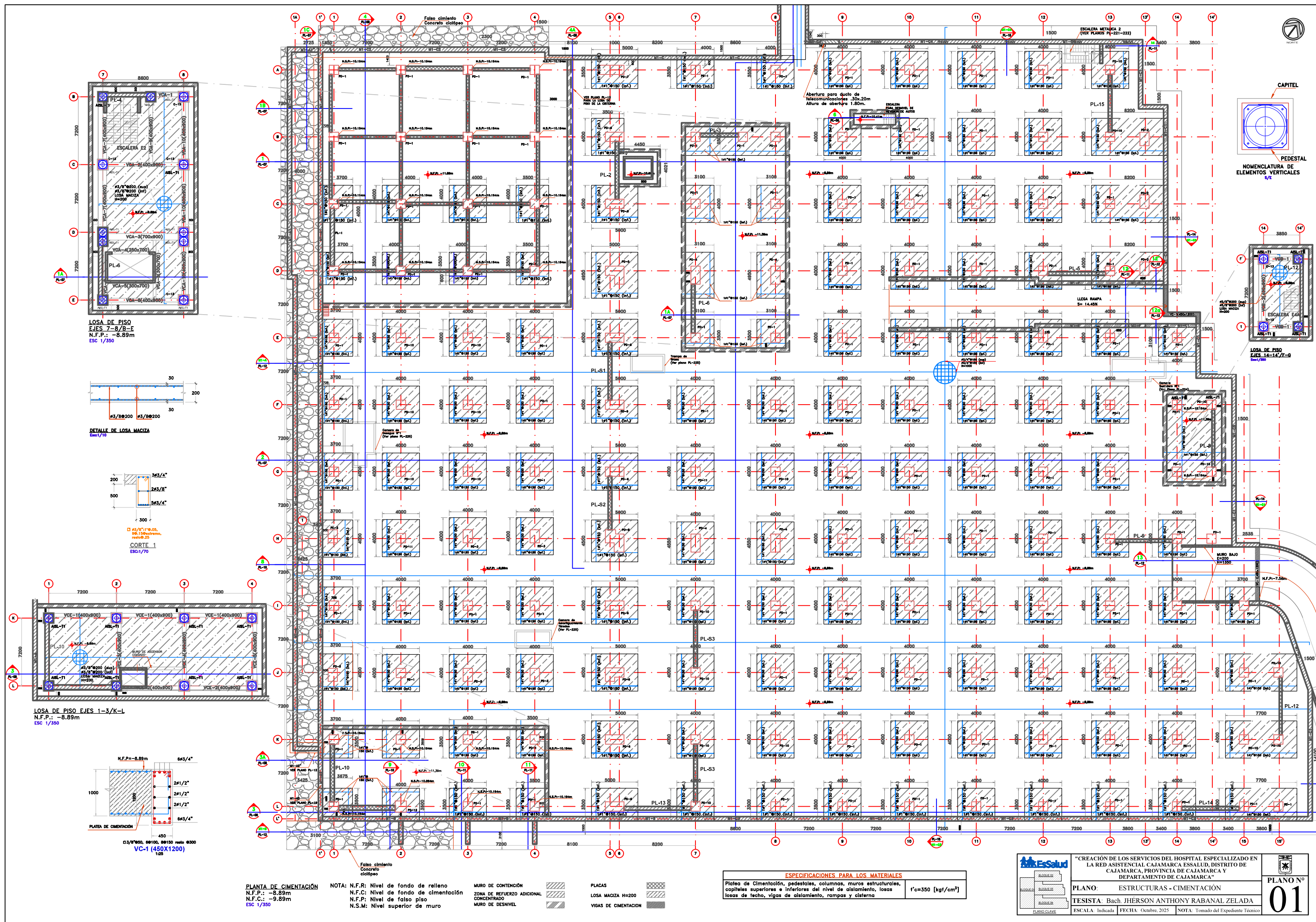
$$[u_1 = d_1]; \left[u_2 = (F_{f1} + F_{r1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \right]; \left[u_3 = (F_{f4} + F_{r4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \right]; [u_4 = d_4]$$

Desplazamiento total (u): $u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$

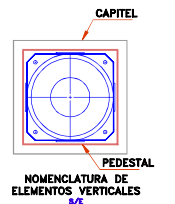
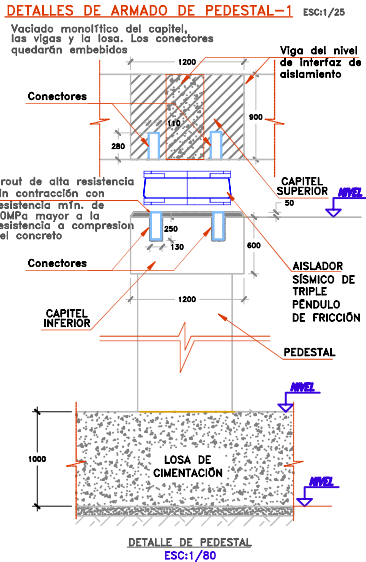
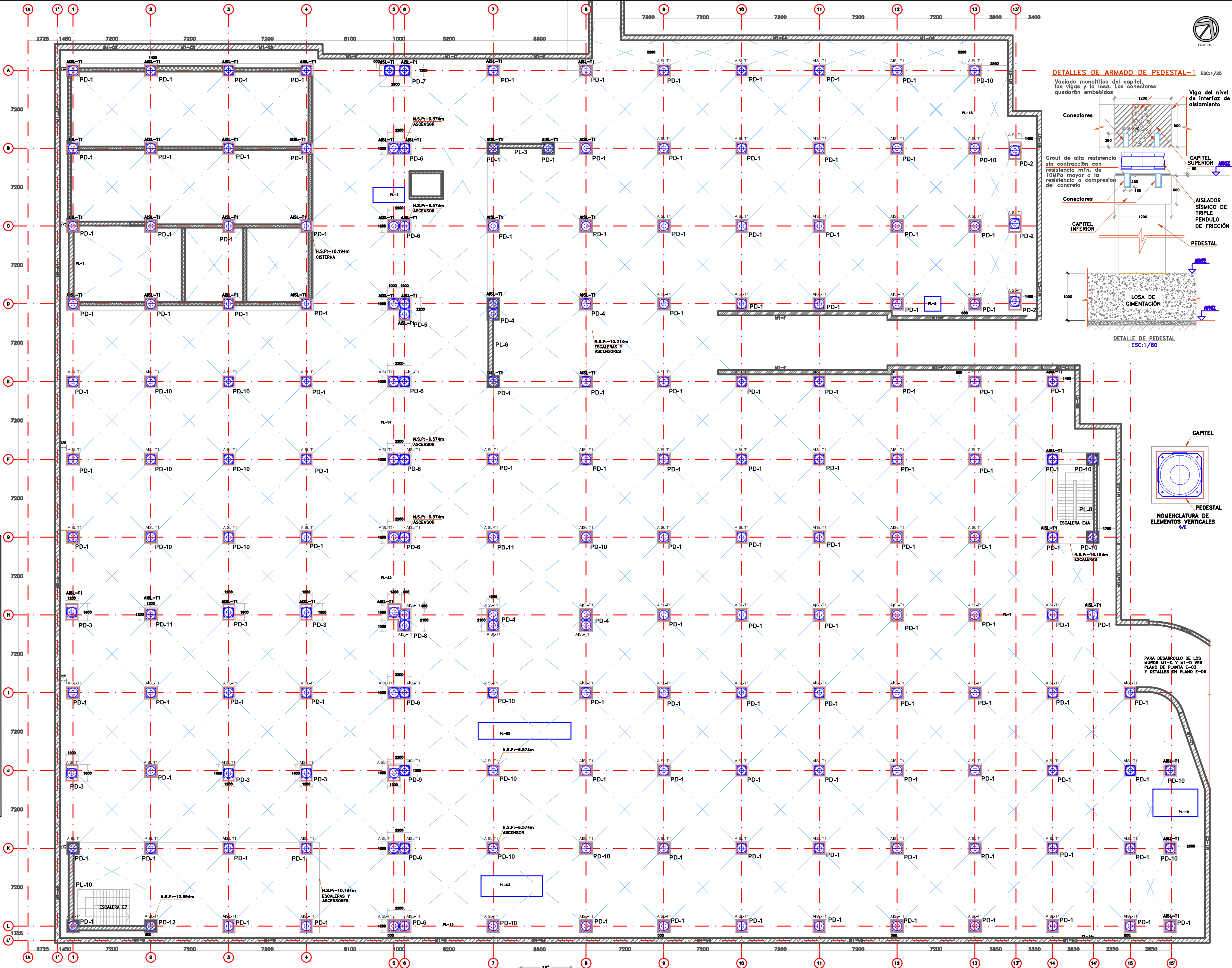
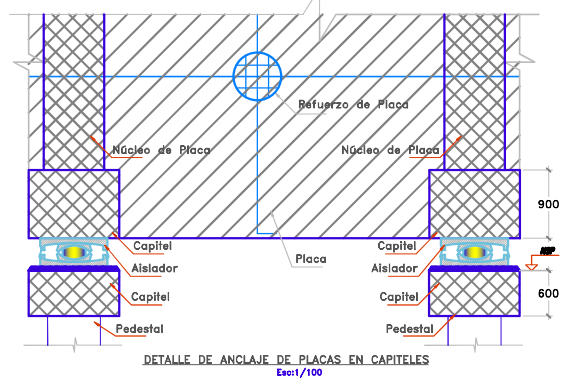
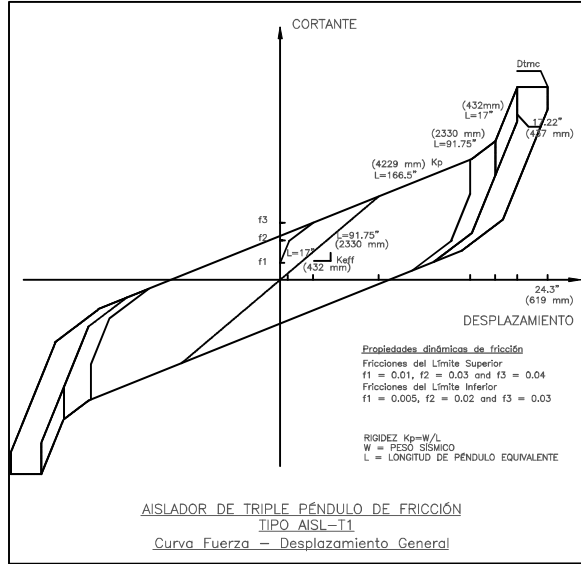
$$\begin{aligned} u &= d_1 + (F_{f1} + F_{r1} - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} + (F_{f4} + F_{r4} - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} + d_4 \\ u &= d_1 + \left(F_{f1} + F - F_{f1} - \frac{Wd_1}{R_{ef1}} - F_{f2} \right) \frac{R_{ef2}}{W} + \left(F_{f4} + F - F_{f4} - \frac{Wd_4}{R_{ef4}} - F_{f3} \right) \frac{R_{ef3}}{W} + d_4 \\ u &= d_1 + \frac{F}{W} R_{ef2} - d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - \frac{F_{f2}}{W} R_{ef2} + \frac{F}{W} R_{ef3} - d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} - \frac{F_{f3}}{W} R_{ef3} + d_4 \\ &\frac{F}{W} (R_{ef2} + R_{ef3}) \\ &= u + \mu_2 R_{ef2} - \mu_1 R_{ef2} + \mu_1 R_{ef2} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} + \mu_3 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef3} \\ &+ \mu_1 R_{ef3} - d_1 - d_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - [(\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3}] + \mu_1 R_{ef2} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} + \mu_1 R_{ef3} \\
&\quad - d_1 - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - u^* + \mu_1 R_{ef3} - \mu_4 R_{ef3} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef1} - \mu_4 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef1} \\
&\quad + \mu_1 R_{ef2} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - d_1 - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - [u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3})] + \mu_4 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef2} \\
&\quad + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - d_1 - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) = u - u^{**} + \mu_4 R_{ef3} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef2} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - d_1 - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - u^{**} - d_1 - d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} + d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - \mu_1 R_{ef1} + \mu_4 R_{ef1} + \mu_1 R_{ef4} - \mu_1 R_{ef4} + \mu_4 R_{ef4} \\
&\quad - \mu_4 R_{ef4} + \mu_1 R_{ef2} + \mu_4 R_{ef3} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - \left[u^{**} + d_1 + \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef4}) \right] + d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} + \mu_1 R_{ef4} - \mu_4 R_{ef4} \\
&\quad + \mu_1 R_{ef2} + \mu_4 R_{ef3} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} - d_4 \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - u_{dr1} + \mu_1 R_{ef2} + d_1 \frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} + d_1 \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} - \mu_4 R_{ef4} - d_4 \frac{R_{ef4}}{R_{ef4}} + \mu_1 R_{ef4} + \mu_4 R_{ef3} + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} \\
&\quad + (\mu_4 R_{ef2} - \mu_4 R_{ef2}) + \left(d_4 \frac{R_{ef2}}{R_{ef4}} - d_4 \frac{R_{ef2}}{R_{ef4}} \right) \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) \\
&= u - \left\{ u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{ef2} + R_{ef4}) \right\} + d_4 \frac{R_{ef2}}{R_{ef4}} + \mu_4 R_{ef2} + \mu_4 R_{ef3} \\
&\quad + d_4 \frac{R_{ef3}}{R_{ef4}} \\
& \frac{F}{W}(R_{ef2} + R_{ef3}) = u - u_{dr4} + R_{ef2} \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) + R_{ef3} \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) \\
& F = \frac{W(u - u_{dr4})}{R_{ef2} + R_{ef3}} + \frac{R_{ef2} + R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \left(\frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} \right) \\
& \mathbf{F} = \frac{\mathbf{W}}{R_{ef2} + R_{ef3}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{dr4}) + \frac{\mathbf{W}}{R_{ef4}} \mathbf{d}_4 + \mathbf{F}_{f4} \dots \dots \dots (\mathbf{L. q. q. d.})
\end{aligned}$$

PLANOS



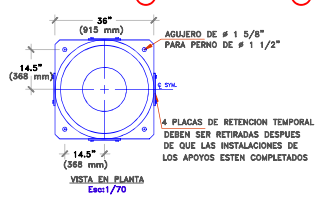
PROPIEDADES DE LOS AISLADORES DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN TIPO: AISL-T1			
N° Aisladores		184	und.
Fricciones Límite Inferior	0.5% (Deslizador interno)	Fricciones Límite Superior	1.0% (Deslizador interno)
	2.0% (Concavidad superior)		3.0% (Concavidad superior)
	3.0% (Concavidad inferior)		4.0% (Concavidad inferior)
PROPIEDADES DINÁMICAS DEL AISLADOR			
Sismo de Diseño DE – Upper Bound (Límite Superior)			
Rigidez Efectiva k_{eff}		0.41	tonf/m/tonf
Periodo Efectivo		3.13	s
Amortiguamiento Efectivo		25.6%	–
Desplazamiento (D_b)		18.5	cm
Sismo de Diseño DE – Lower Bound (Límite Inferior)			
Rigidez Efectiva k_{eff}		0.35	tonf/m/tonf
Periodo Efectivo		3.38	s
Amortiguamiento Efectivo		19.8%	–
Desplazamiento (D_b)		19.9	cm
Sismo Máximo Considerado MCE _g – Upper Bound (Límite Superior)			
Rigidez Efectiva k_{eff}		0.36	tonf/m/tonf
Periodo Efectivo		3.33	s
Amortiguamiento Efectivo		20.6%	–
Desplazamiento Total (D_b)		29.5	cm
Sismo Máximo Considerado MCE _g – Lower Bound (Límite Inferior)			
Rigidez Efectiva k_{eff}		0.31	tonf/m/tonf
Periodo Efectivo		3.63	s
Amortiguamiento Efectivo		14.0%	–
Desplazamiento Total (D_b)		33.3	cm
Vst (General)		5485	tonf
Vs (General)		4109	tonf
Vb (General)		6502	tonf
Capacidad de Desplazamiento		50.0	cm
Fuerza Máxima del Aislador		40	%

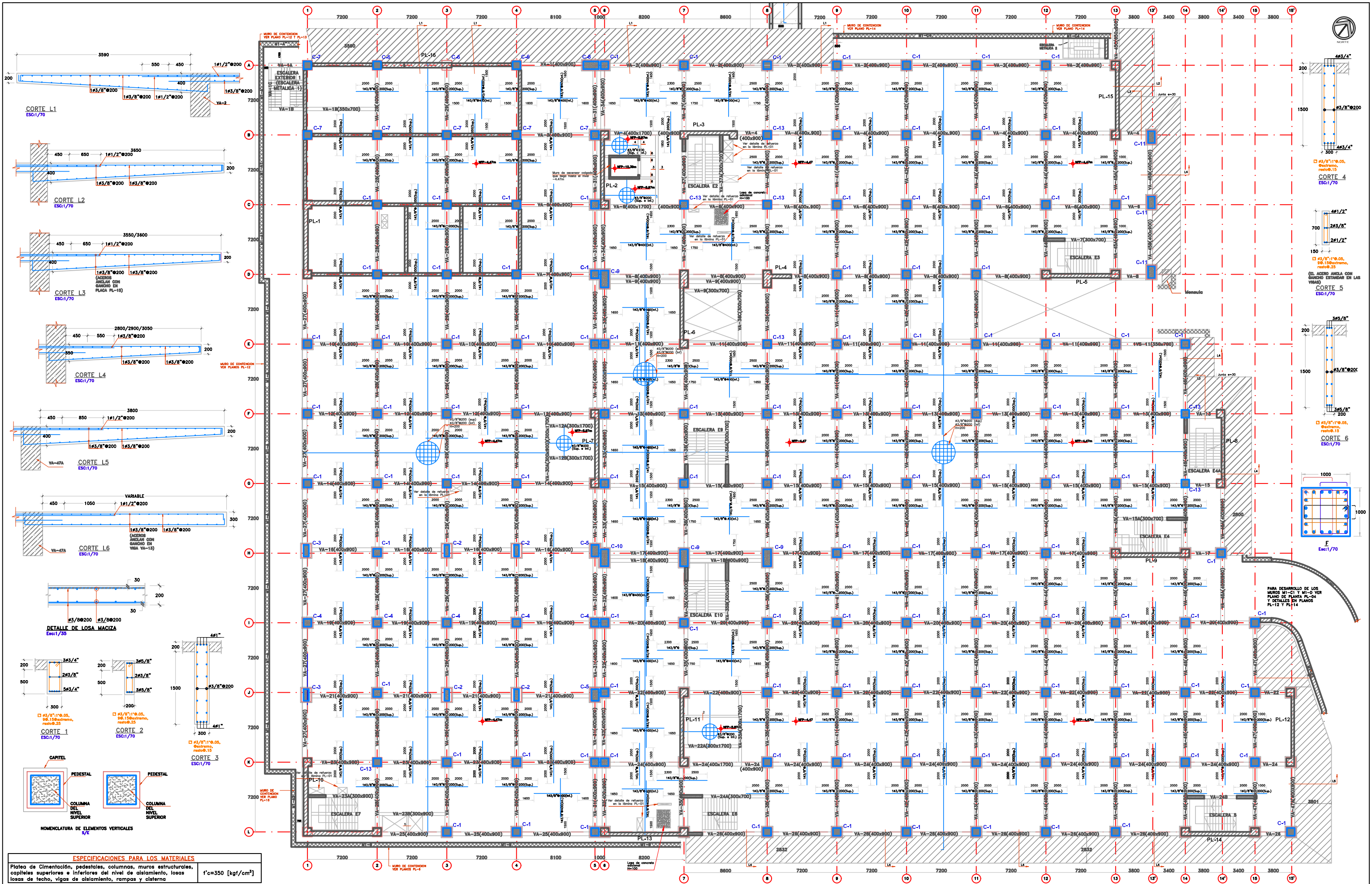


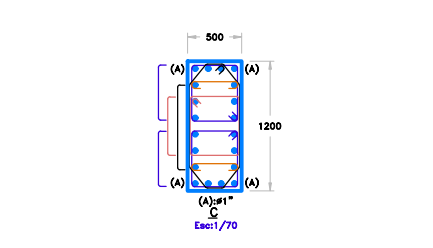
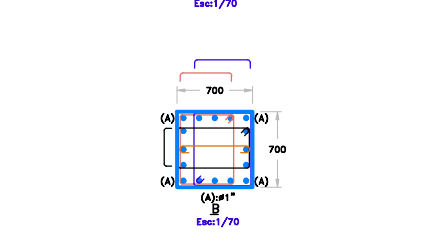
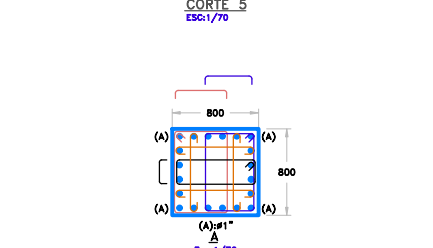
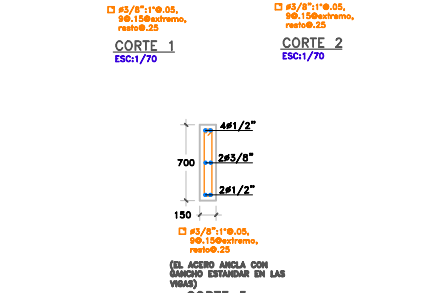
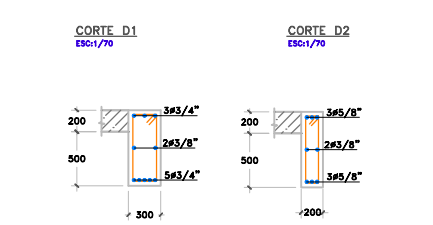
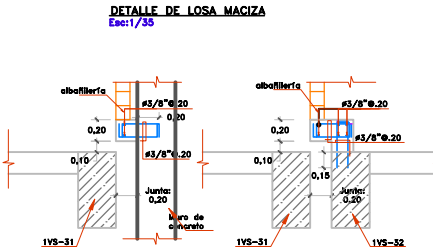
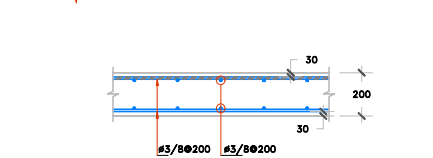
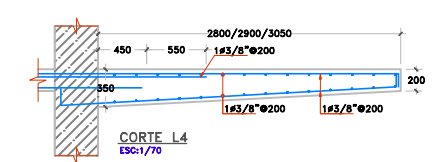
PLANTA DE AISLAMIENTO SÍSMICO

NIVEL SUPERIOR DE LOS PEDESTALES
N.S.P. : -5.774m (GENERAL)
N.S.P. : -10.194m (CISTERNA)
N.S.P. : -10.194m (ESCALERAS Y ASCENSORES)
N.S.P. : -6.574m (ASCENSORES)

Nota 1: Los niveles mostrados en planta son casos
específicos
Nota 2: El refuerzo de los capiteles se encuentra en
el plano PL-02



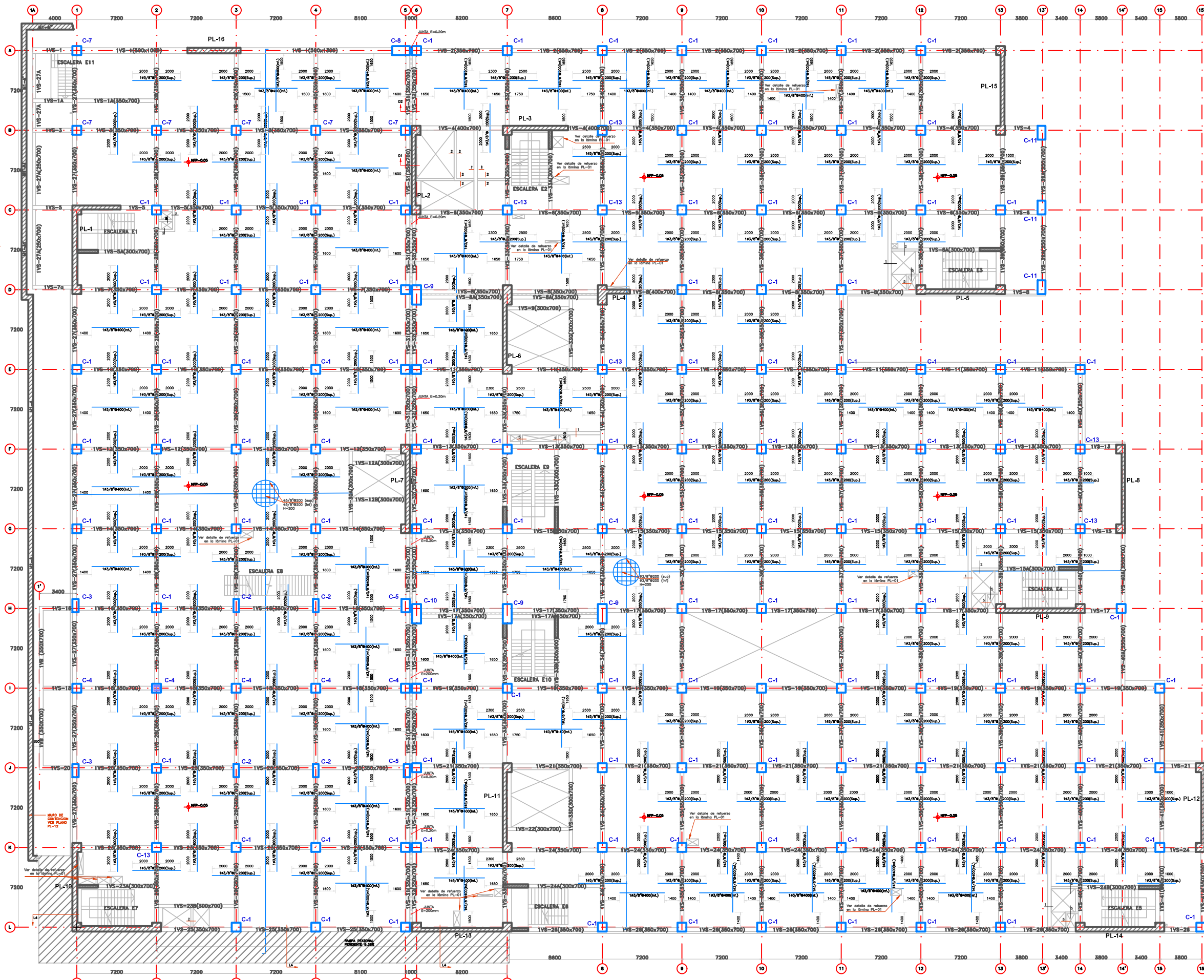




ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES	
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales	f'c=280 [kgf/cm²]

PLANTA DE TECHO DEL PRIMER SOTANO (H=0.20m) LOSA MACIZA
 N.F.P.: -0.05m
 ESC 1:350

S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kgf/m²
 S/C CUARTOS: 200kgf/m²
 S/C OFICINAS: 250kgf/m²
 S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kgf/m²



COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13
amb	800X800 - (A)	500X1200 - (C)	550X1200 - (D)	800X800 - (A)	750X1200 - (E)	---	800X800 - (A)	800X1750 - (G)	800X1750 - (H)	800X1750 - (H)	700X1250 - (I)	---	800X800 - (A)
As	4#11+1#6/8"	4#11+1#6/8"	4#11+1#6/8"	4#11+1#6/8"	12#11+1#6/8"	---	4#11+1#6/8"	20#11+1#6/8"	10#11+1#6/8"	10#11+1#6/8"	10#11+1#6/8"	---	4#11+1#6/8"
Al	3#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, Ø100, Ø250mm	4#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	4#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	3#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, Ø100, Ø250mm	12#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	---	3#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, Ø100, Ø250mm	7#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	7#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	7#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	4#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, 12#100, Ø250mm	---	3#3/8"Ø200 + 4#11 + 3/8"Ø180, Ø100, Ø250mm

"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

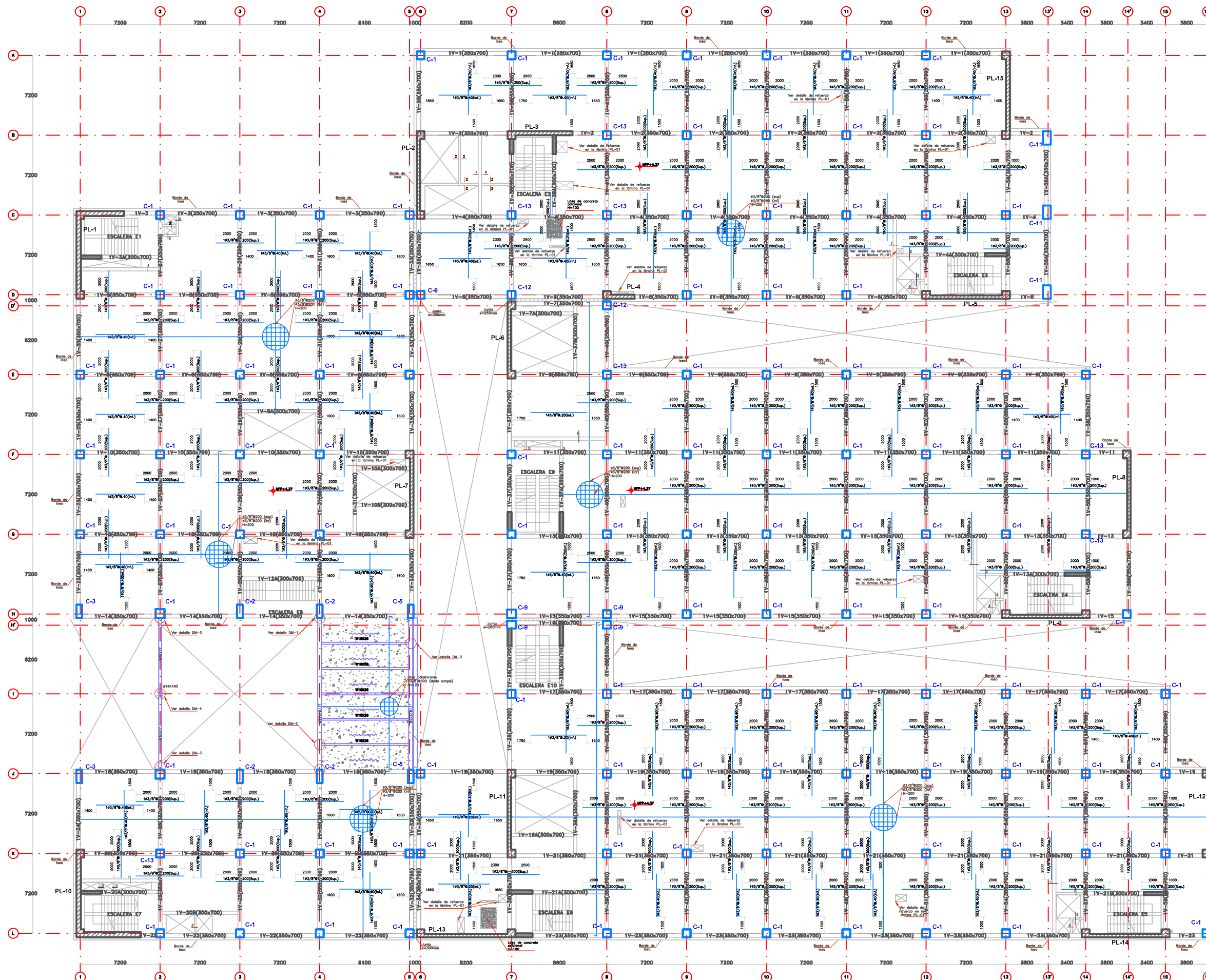
PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA PRIMER SOTANO

TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indicada | FECHA: Octubre, 2025 | NOTA: Tomado del Expediente Técnico

PLANO Nº

04

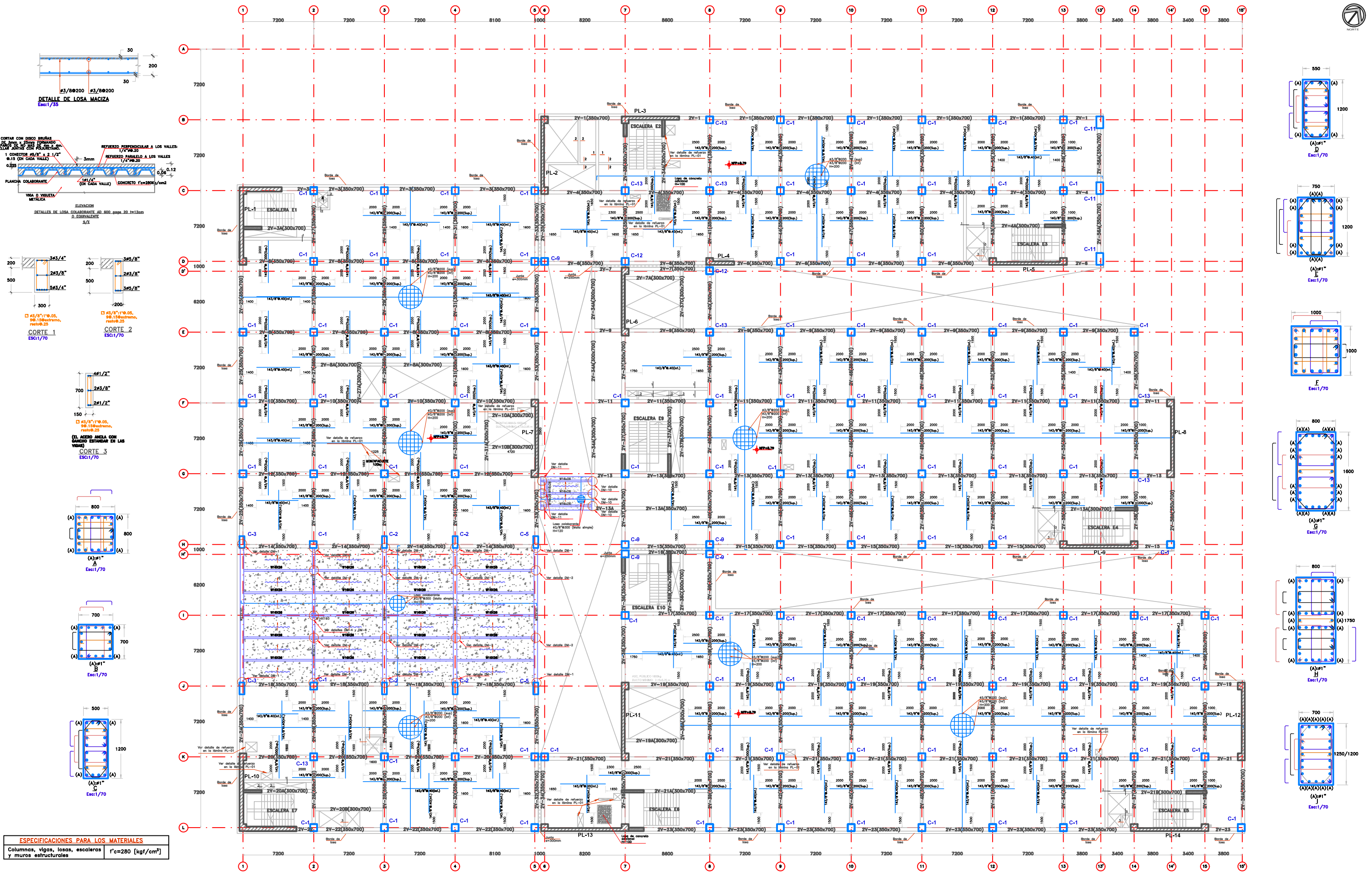


  	"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSLUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"			 PLANO N° 05
	PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA A PRIMER PISO TESTISTA: Bach. JHÉRON ANTHONY RABANAL ZELADA ESCALA: Indicada FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico			

LOSA COLABORANTE

S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300Kg/m²
S/C CUARTOS: 200Kg/m²
S/C OFICINAS: 250Kg/m²
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400Kg/m²

CUADRO DE COLUMNAS													
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13
est	700X700 - (8)	500X1200 - (C)	500X1200 - (C)	----	500X1200 - (C)	----	----	----	700X700 - (8)	----	700X1200 - (I)	700X700 - (8)	700X700 - (8)
As	441"±1263/4"	441"±1663/4"	441"±1663/4"	----	441"±1663/4"	----	----	----	1041"±1463/4"	----	441"±1263/4"	441"±1263/4"	441"±1263/4"
Al	3E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 7010, Rto250mm	4E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 12010, Rto250mm	4E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 12010, Rto250mm	----	4E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 12010, Rto250mm	----	----	----	3E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 7010, Rto250mm	----	4E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 12010, Rto250mm	3E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 7010, Rto250mm	3E 43/8"±1E 1/8/8"; 1050, 7010, Rto250mm



PLANTA DE TECHO DEL SEGUNDO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.P.P.: +8.79m
ESC 1:300

LOSA COLABORANTE
S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kg/m²
S/C CUARTOS: 200kg/m²
S/C OFICINAS: 250kg/m²
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kg/m²

CUADRO DE COLUMNAS												
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12
axb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x1200 - (I)	700x700 - (B)
As	441"±1243/4"	441"±1643/4"	441"±1643/4"	---	441"±1643/4"	---	---	---	441"±1243/4"	---	1041"±1443/4"	441"±1243/4"
At	3C 40 #3/8"±1E1 #3/8", 1850, 78100, Rte250mm	4C 40 #3/8"±2E1 #3/8", 1850, 129100, Rte250mm	4C 40 #3/8"±2E1 #3/8", 1850, 129100, Rte250mm	---	4C 40 #3/8"±2E1 #3/8", 1850, 129100, Rte250mm	---	---	---	3C 40 #3/8"±1E1 #3/8", 1850, 78100, Rte250mm	---	4C 40 #3/8"±1E1 #3/8", 1850, 129100, Rte250mm	3C 40 #3/8"±1E1 #3/8", 1850, 78100, Rte250mm



"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA SEGUNDO PISO

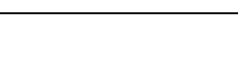
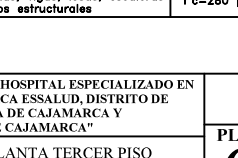
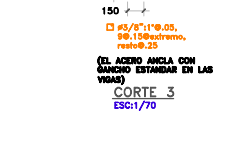
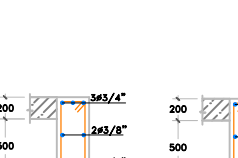
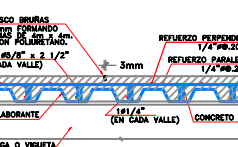
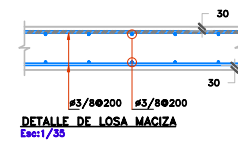
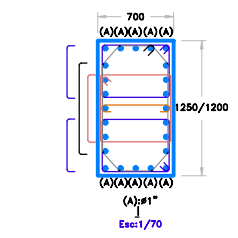
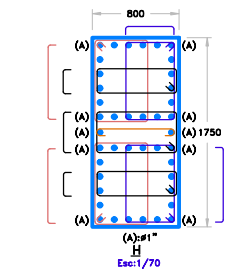
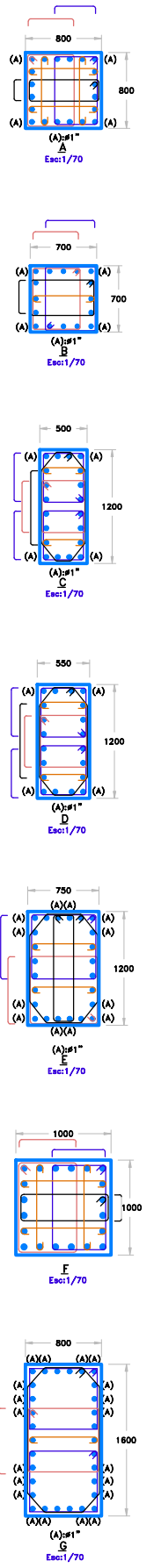
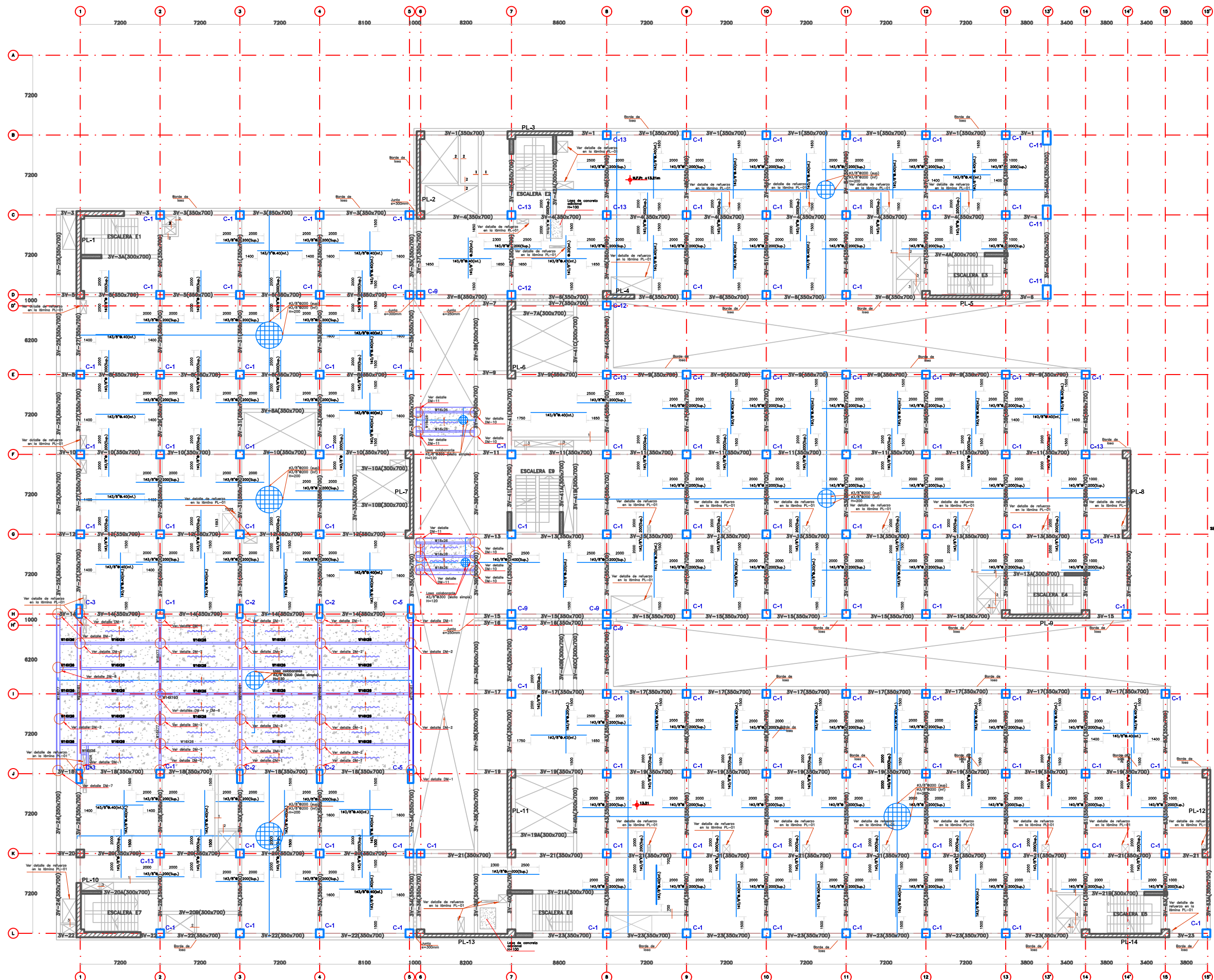
TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indicada FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico



PLANO N°

06



PLANTA DE TECHO DEL TERCER PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.P.: +13.21m
ESC 1:350

LOSA COLABORANTE
S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kgf/m²
S/C CUARTOS: 200kgf/m²
S/C OFICINAS: 250kgf/m²
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kgf/m²

CUADRO DE COLUMNAS													
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13
axb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x1200 - (I)	700x700 - (B)	700x700 - (B)
As	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	---	4#1" + 12#3/4"	---	---	---	4#1" + 12#3/4"	---	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"
Al	3C#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8"	4C#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8"	4C#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8"	---	4C#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8" + 2E#3/8"	---	---	---	---	3C#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8"	3C#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8"	3C#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8" + 1E#3/8"	

ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales
f'c=280 [kgf/cm²]



"CREACION DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

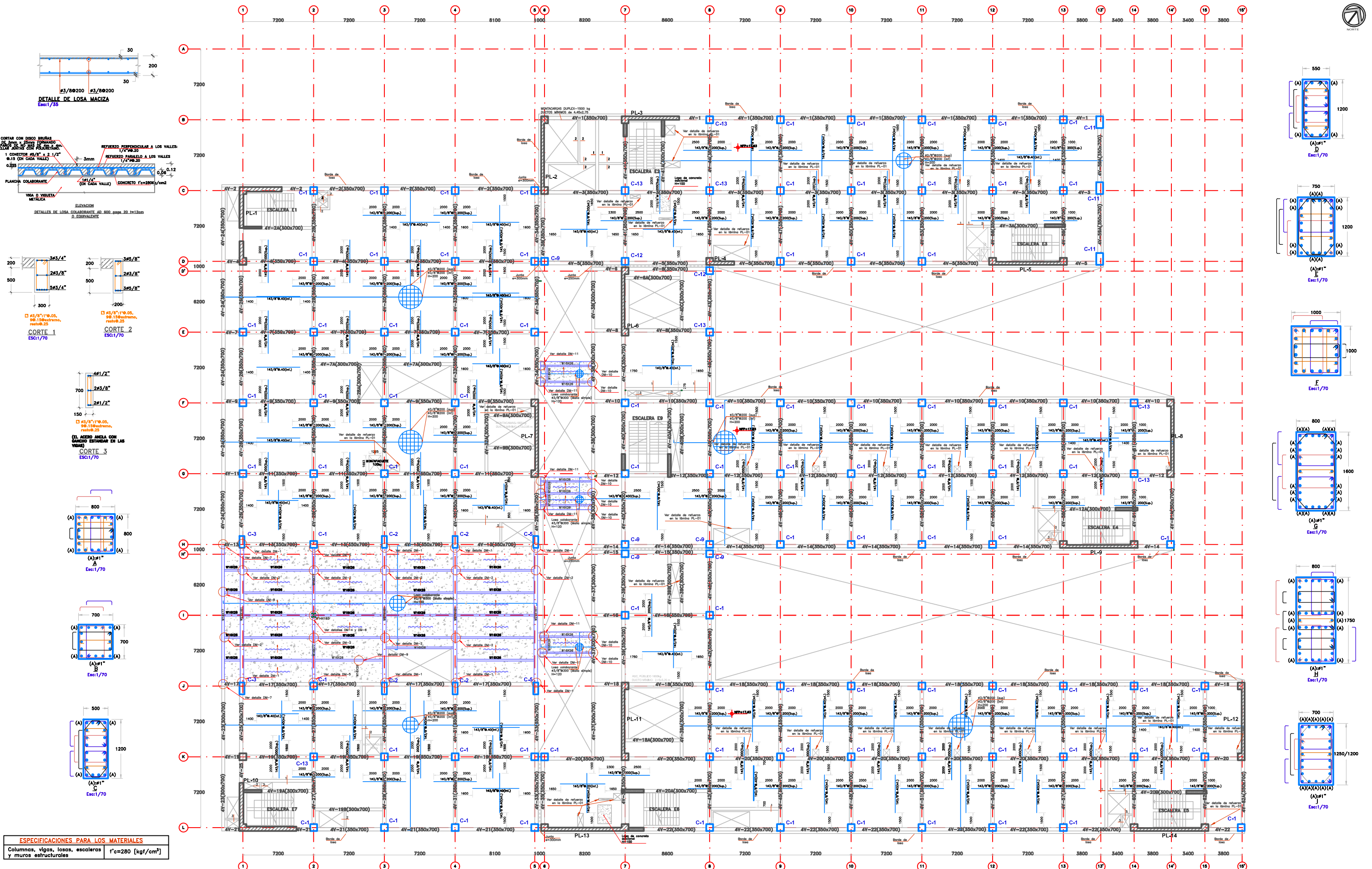
PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA TERCER PISO

TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indica FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico

PLANO N°

07



ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales $f'c=280$ [kgf/cm²]

PLANTA DE TECHO DEL CUARTO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.P.P.: +17.63m
ESC 1:350

LOSA COLABORANTE
S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kgf/m²
S/C CUARTOS: 200kgf/m²
S/C OFICINAS: 250kgf/m²
S/C ESCALERAS Y CORRIDORES: 400kgf/m²

CUADRO DE COLUMNAS											
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-13
axb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x700 - (B)
As	4#1"x12#3/4"	4#1"x1#3/4"	4#1"x1#3/4"	---	4#1"x1#3/4"	---	---	---	4#1"x12#3/4"	---	4#1"x12#3/4"
Al	3C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 7#100, R#250mm	4C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 12#100, R#250mm	4C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 12#100, R#250mm	---	4C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 12#100, R#250mm	---	---	---	3C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 7#100, R#250mm	---	3C#3/8"x1#1#1/2" 4#3/8"; 1#50, 7#100, R#250mm



"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA CUARTO PISO

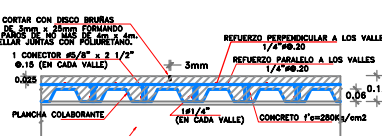
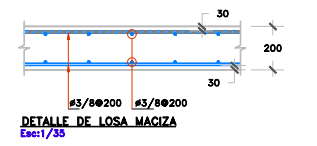
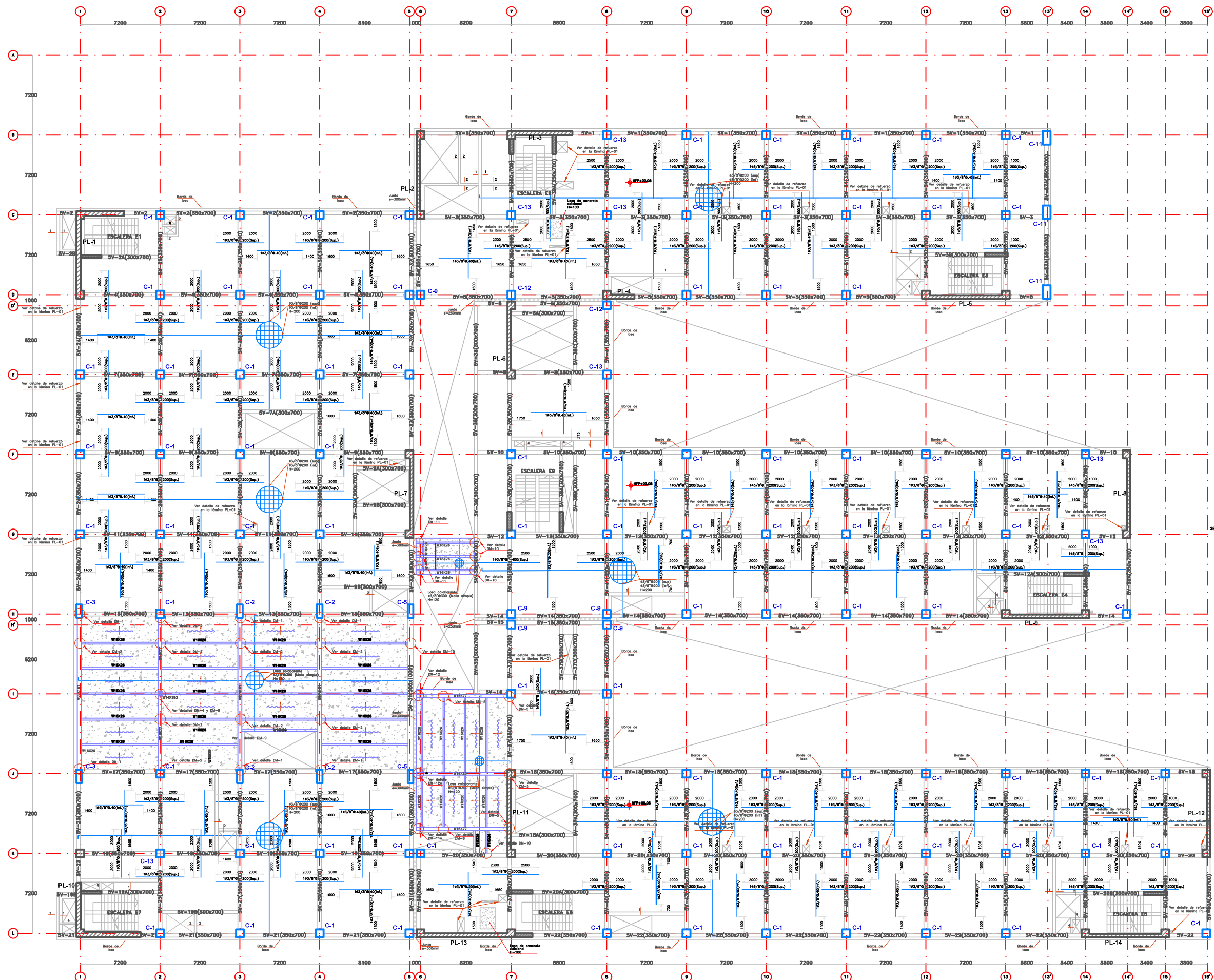
TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indicada FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico

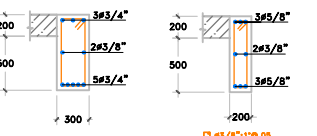


PLANO N°

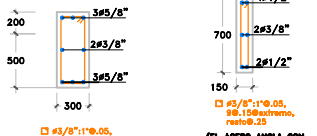
08



DETALLE DE LOSA MACIZA
Esc: 1/35



CORTE 1
Esc: 1/70



CORTE 2
Esc: 1/70

CORTE 3
Esc: 1/70

CORTE 4
Esc: 1/70

ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES	
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales	f'c=280 [kgf/cm²]

PLANTA DE TECHO DEL QUINTO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.P.P.: +22.05m
ESC 1:350

LOSA COLABORANTE

S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kgf/m²
S/C CUARTOS: 200kgf/m²
S/C OFICINAS: 250kgf/m²
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kgf/m²

CUADRO DE COLUMNAS												
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-13
anb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x1200 - (I)	700x700 - (B)
As	4#1" + 1#3/8"	4#1" + 1#3/8"	4#1" + 1#3/8"	---	4#1" + 1#3/8"	---	---	---	4#1" + 1#3/8"	---	10#1" + 1#3/8"	4#1" + 1#3/8"
Al	3#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 70100, Rte250mm	4#4" x 8" + 2#1" x 8" / 1050, 120100, Rte250mm	4#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 120100, Rte250mm	---	4#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 120100, Rte250mm	---	---	---	3#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 70100, Rte250mm	---	4#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 120100, Rte250mm	3#4" x 8" + 1#1" x 8" / 1050, 70100, Rte250mm



"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA QUINTO PISO

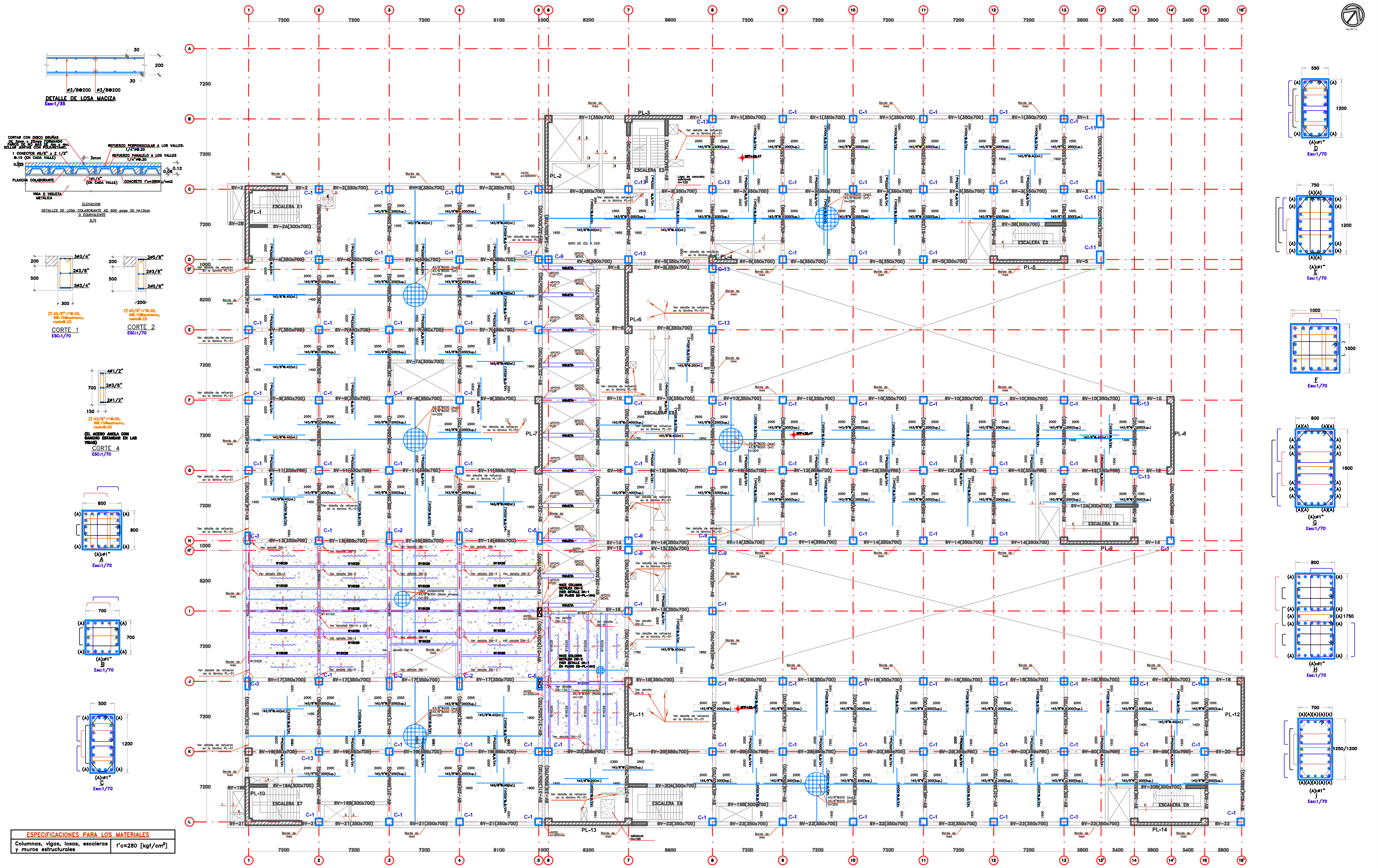
TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indicada FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico



PLANO N°

09



PLANTA DE TECHO DEL SEXTO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.P.P.: +26.47m
ESC 1:350

ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES	
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales	f'c=280 [kgf/cm²]
S/C SALA DE OPERACIONES Y LABORATORIOS: 300kgf/m²	
S/C CUARTOS: 200kgf/m²	
S/C OFICINAS: 250kgf/m²	
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kgf/m²	

CUADRO DE COLUMNAS											
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11
avb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x1200 - (I)
As	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 16#3/4"	4#1" + 16#3/4"	---	4#1" + 16#3/4"	---	---	---	4#1" + 12#3/4"	---	4#1" + 12#3/4"
Al	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm	4C #3/8" + 2E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	4C #3/8" + 2E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	---	4C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	---	---	---	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm	---	4C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm



"CREACIÓN DE LOS SERVICIOS DEL HOSPITAL ESPECIALIZADO EN LA RED ASISTENCIAL CAJAMARCA ESSALUD, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA Y DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA"

PLANO: ESTRUCTURAS - PLANTA SEXTO PISO

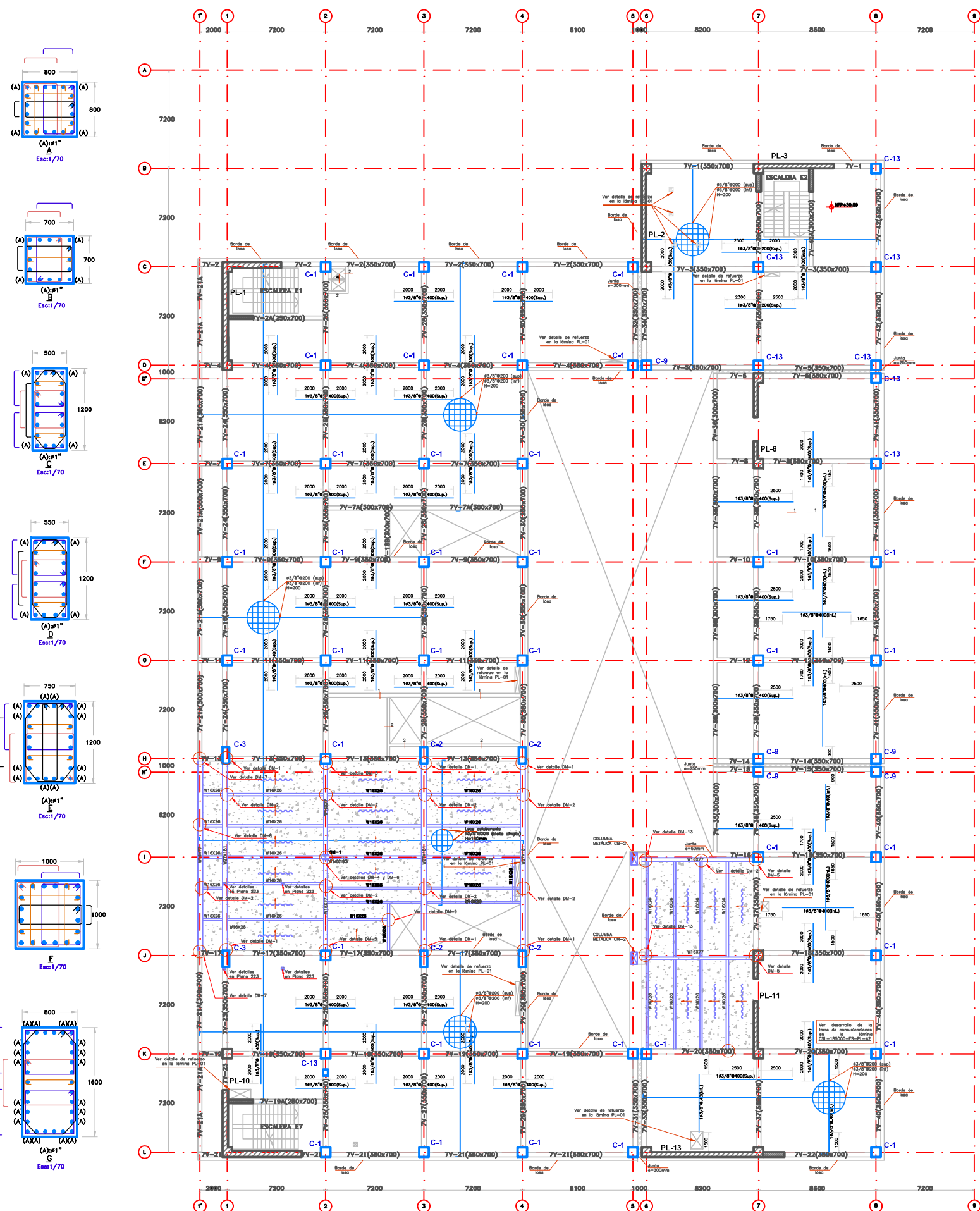
TESISTA: Bach. JHERSON ANTHONY RABANAL ZELADA

ESCALA: Indicada FECHA: Octubre, 2025 NOTA: Tomado del Expediente Técnico



PLANO N°

10



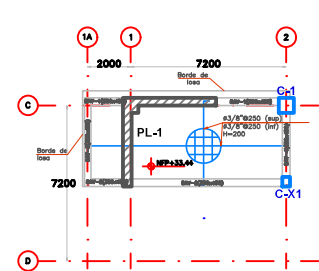
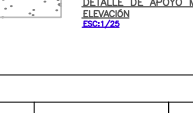
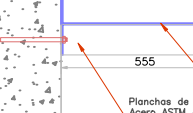
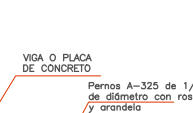
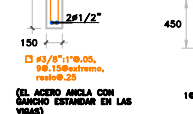
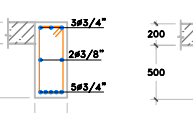
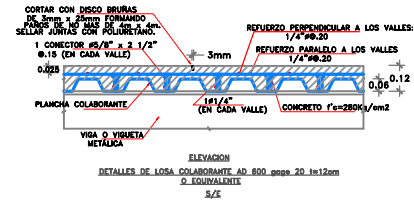
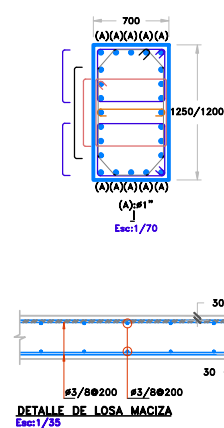
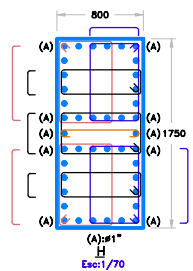
PLANTA DE TECHO DEL SÉPTIMO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
N.F.P.: +30.89m
ESC 1:350

LOSA COLABORANTE

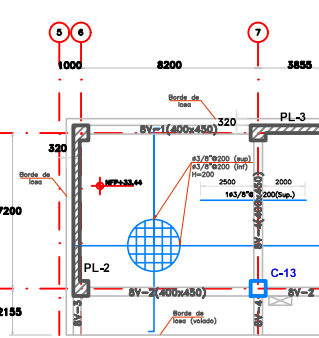
S/C ESCALERAS Y CORREDORES: 400kg/m²
S/C AZOTEA: 100kg/m²

CUADRO DE COLUMNAS

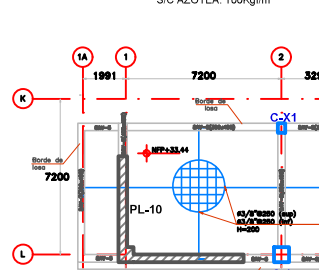
COLUMNA	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13
avb	700x700 - (B)	500x1200 - (C)	500x1200 - (C)	---	500x1200 - (C)	---	---	---	700x700 - (B)	---	700x1200 - (I)	700x700 - (B)	700x700 - (B)
As	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	---	4#1" + 12#3/4"	---	---	---	4#1" + 12#3/4"	---	10#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"	4#1" + 12#3/4"
Al	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm	4C #3/8" + 2E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	4C #3/8" + 2E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	---	4C #3/8" + 2E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	---	---	---	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm	---	4C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 120100, R#250mm	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm	3C #3/8" + 1E #3/8"; 1050, 70100, R#250mm



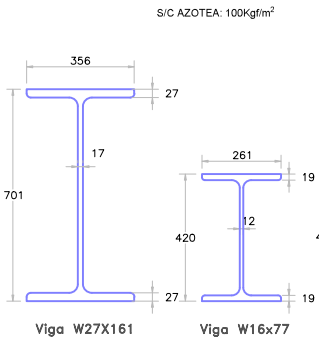
PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E1)
N.F.P.: +33.44m
ESC 1:350



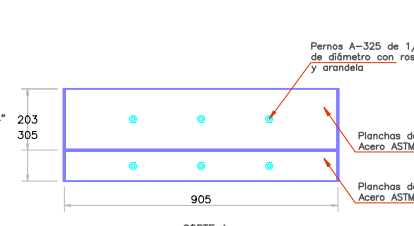
PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E2)
N.F.P.: +33.44m
ESC 1:350



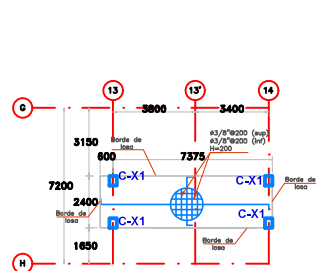
PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E7)
N.F.P.: +33.44m
ESC 1:350



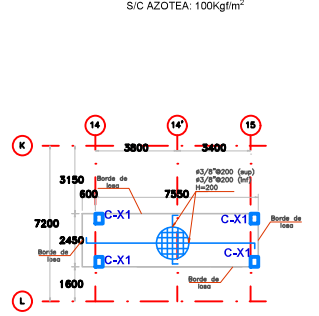
SECCIONES DE VIGAS Y COLUMNAS METÁLICAS
ESC 1:25



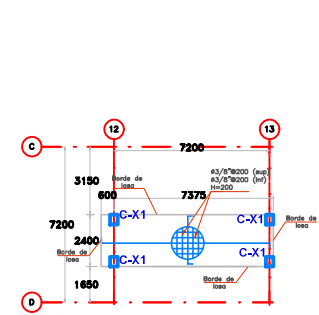
SECCIONES DE VIGAS Y COLUMNAS METÁLICAS
ESC 1:25



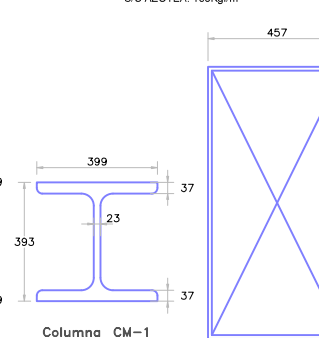
PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20m) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E4)
N.F.P.: +28.92m
ESC 1:350



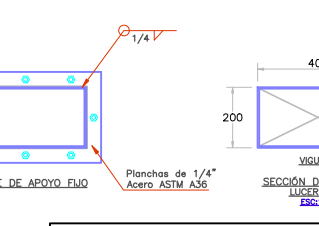
PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20m) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E5)
N.F.P.: +28.92m
ESC 1:350



PLANTA DE TECHO DEL OCTAVO PISO (H=0.20m) LOSA MACIZA
(TECHO DE ESCALERA E3)
N.F.P.: +28.92m
ESC 1:350

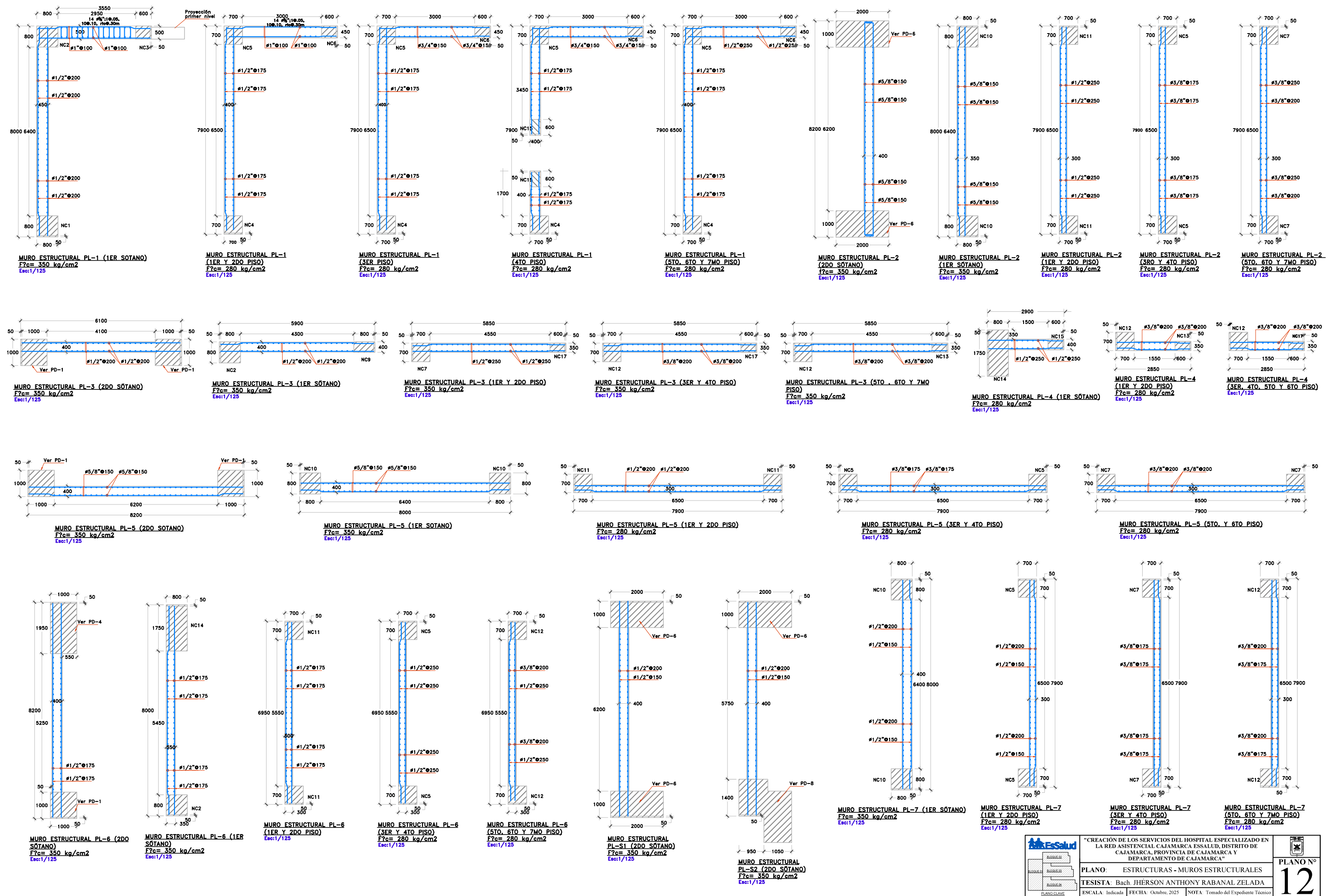


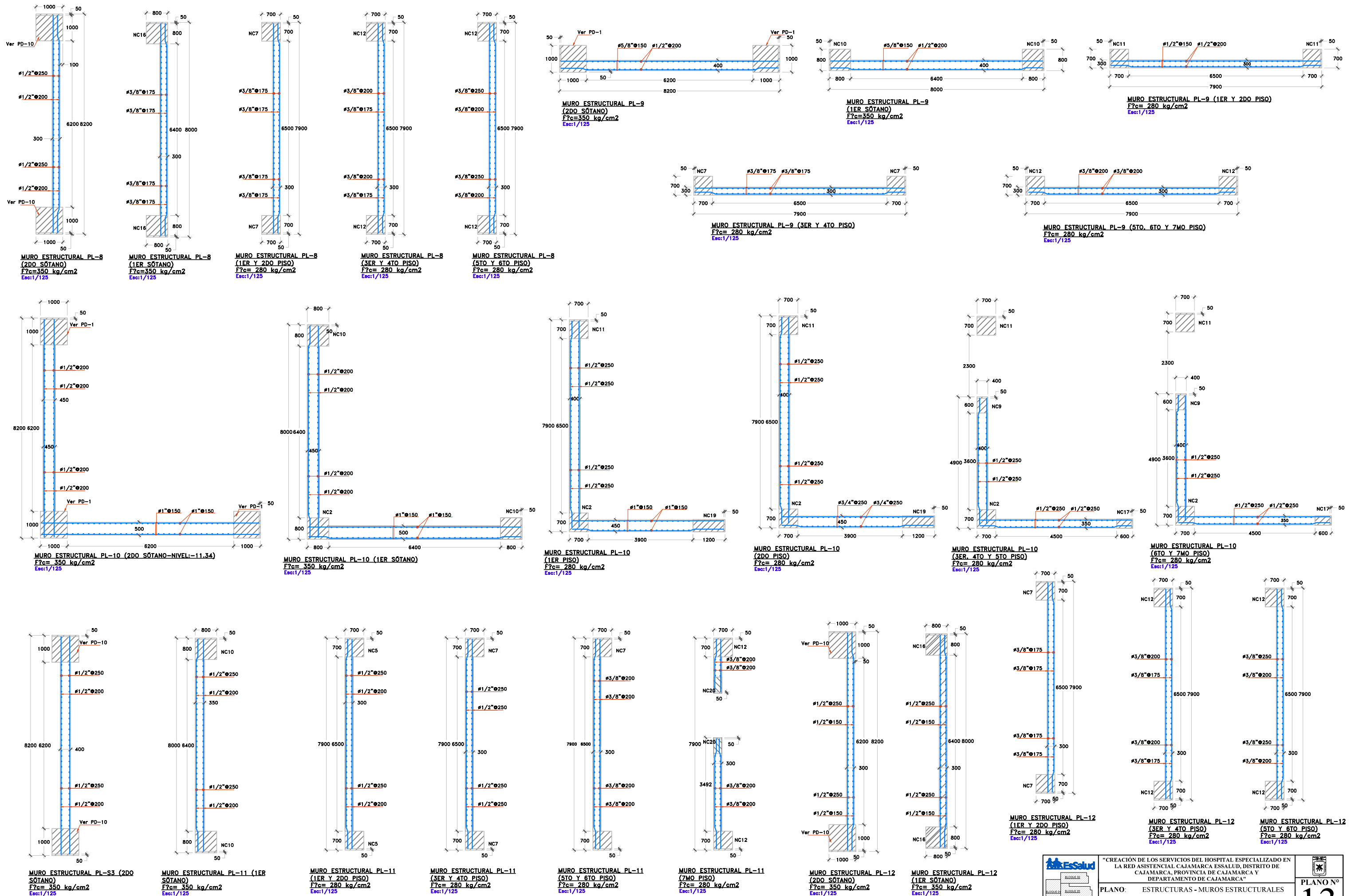
SECCIONES DE VIGAS Y COLUMNAS METÁLICAS
ESC 1:25

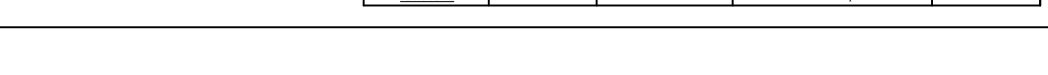


SECCIONES DE VIGAS Y COLUMNAS METÁLICAS
ESC 1:25

ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES
Columnas, vigas, losas, escaleras y muros estructurales
f'c=280 [kgf/cm²]







NÚCLEOS CONFINADOS EN MUROS ESTRUCTURALES										
	NC-1	NC-2	NC-3	NC-4	NC-5	NC-6	NC-7	NC-8	NC-9	NC-10
orb	800X800	800X800	700X700	700X700	540X800	700X700	350X900	350X900	800X800	
As	3291"	2091"	1891"	2391"	2091"	1491"	1691"	1691"	3591"	
At	63°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300	43°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300	53°45'±15°/1, 10,50, 80/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 80/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 80/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 90/100, rto#300	23°45'±15°/1, 10,50, 70/100, rto#300	63°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300
	NC-11	NC-12	NC-13	NC-14	NC-15	NC-16	NC-17	NC-18	NC-19	NC-20
orb	700X700	700X700	350X600	800X750	400X600	800X800	350X600	500X600	450X1200	300X450
As	2491"	4411"±1263/4"	4411"±693/4"	2091"±1443/4"	1091"	2491"	1095/4"	491"±693/4"	2291"	1093/4"
At	33°45'±15°/1, 10,50, 80/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 80/100, rto#300	70/100, rto#300	70/100, rto#300	70/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 70/100, rto#300	33°45'±15°/1, 10,50, 70/100, rto#300	43°45'±15°/1, 10,50, 70/100, rto#300	23°45'±15°/1, 10,50, 100/100, rto#300



CUADRO DE PEDESTALES (SOLO EN EL NIVEL DE PISO TÉCNICO)													
NIVEL	PEDESTAL	PD-1	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5	PD-6	PD-7	PD-8	PD-9	PD-10	PD-11	PD-12 (NIVEL DE FOSO)
SOTANO CIMENTACION	cxh	1000X1000 (r"=350kg/cm²)	1000X1450 (r"=350kg/cm²)	1400X1000 (r"=350kg/cm²)	1850X1000 (r"=350kg/cm²)	Según figura (r"=350kg/cm²)	2000X1000 (r"=350kg/cm²)	2800X1000 (r"=350kg/cm²)	Según figura (r"=350kg/cm²)	Según figura (r"=350kg/cm²)	1000X1000 (r"=350kg/cm²)	1000X1000 (r"=350kg/cm²)	1200X1200 (r"=350kg/cm²)
	As	2091"	3091"	2591"	4291"	5091"	4291"	5091"	5091"	3291"	2591"	3291"	2591"
	Al	5EQ #1/2" + 4E #1/2": 1050, Rto#100mm	5EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	5EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	7EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	8EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	7EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	9EQ #1/2" + 7E #1/2": 1050, Rto#100mm	10EQ #1/2" + 4E #1/2": 1050, Rto#100mm	8EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	5EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	5EQ #1/2": 1050, Rto#100mm	5EQ #1/2": 1050, Rto#100mm