

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



TESIS

**“RESPUESTA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL CON Y SIN
AISLADORES SÍSMICOS EN EL MÓDULO N°04 DE LA I.E.
CRISTO REY N°16006. EN LA CIUDAD DE JAÉN - CAJAMARCA”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

AUTOR:

Bach. PERCY LEIVIS HERAS DELGADO

ASESOR:

M. Cs. Ing. MANUEL LINCOLN MINCHAN PAJARES

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: Bach. HERAS DELGADO, Percy Leivis.
DNI: 74295703
Escuela Profesional: Ingeniería Civil
2. Asesor: M.Cs. Ing. MINCHÁN PAJARES, Manuel Lincoln
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:
"RESPUESTA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL CON Y SIN AISLADORES SÍSMICOS EN EL MÓDULO
N°04 DE LA I.E. CRISTO REY N°16006. EN LA CIUDAD DE JAÉN - CAJAMARCA"
6. Fecha de evaluación: 25/02/2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 7%
9. Código Documento: oid: 3117: 560870809
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 25/02/2026



FIRMA DEL ASESOR

Nombre: MINCHÁN PAJARES, Manuel Lincoln
DNI: 26704942



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 25/02/2026 22:39:46-0500

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



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0128-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto en el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería da a conocer que, a los **diez días del mes de marzo de 2026**, siendo las diecisiete horas (05:00 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca; el Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez, en su condición de secretario, participó de manera virtual mediante videoconferencia de Google Meet en enlace: <https://meet.google.com/pyv-mzcu-xqd>, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Vocal : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Secretario : Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **RESPUESTA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL CON Y SIN AISLADORES SÍSMICOS EN EL MÓDULO N° 04 DE LA I.E. CRISTO REY N° 16006. EN LA CIUDAD DE JAÉN - CAJAMARCA**, presentado por la Bachiller en Ingeniería Civil **PERCY LEIVIS HERAS DELGADO**; asesorado por el M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares, para la obtención del Título Profesional

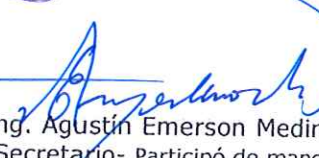
Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

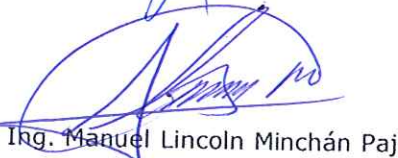
EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS. Dicerocho (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de 18 Dicerocho.
acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 6:00 pm 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


Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.
Secretario- Participó de manera Virtual


M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.
Asesor

COPYRIGHT © 2025 by
HERAS DELGADO PERCY LEIVIS
Todos los derechos reservados.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al M. Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares, asesor de la presente investigación, por la disposición de tiempo para la orientación y supervisión del contenido de ésta. Agradezco a los ingenieros miembros de mi jurado, ingenieros docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil y a todas las personas que me han acompañado en el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi padre, Benigno Heras; a mis hermanas, mi madre y hermano; y al resto de mi familia, por brindarme su amor y apoyo en cada momento de manera incondicional.

A mis docentes de la Universidad Nacional de Cajamarca, quienes nos brindan sus conocimientos durante toda nuestra formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1.1. Selección del problema.....	2
1.1.2. Formulación del problema de investigación.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3. DELIMITACIONES Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	5
1.6. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	7
2.1.1. Antecedentes internacionales	7
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes locales.....	9
2.2. BASES TEÓRICAS	10
2.2.1. Desempeño estructural	10
2.2.2. Efecto de los sismos en las edificaciones	11
2.2.3. Análisis estructural	14
2.2.4. Diseño por desempeño sísmico	14
2.2.5. Evaluación del comportamiento sísmico de las edificaciones esenciales	15
2.2.6. Nivel de amenaza sísmica.....	16
2.2.7. Sistemas Estructurales	17
2.2.8. Sistemas modernos de protección sísmica	18
2.2.9. Sistemas de aislamiento sísmico	19
2.2.10. Procedimiento de análisis dinámico.	35
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	39

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	41
3.2. TIEMPO Y ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN	42
3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
3.4. DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	43
3.5. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	43
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	46
3.7. UNIDAD DE ANÁLISIS	46
3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	46
3.9. PROCESAMIENTO DE DATOS	48
3.10. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS ..	48
3.10.1. Resumen del desempeño estructural sin aisladores sísmicos	49
3.10.2. Resumen del desempeño estructural con aisladores sísmicos	71
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	109
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	110
4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS	112
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
5.1. CONCLUSIONES	113
5.2. RECOMENDACIONES.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Factores de zona	13
Tabla 2.	Categoría de las edificaciones y factor U	13
Tabla 3.	Estados de daño y niveles de desempeño	15
Tabla 4.	Sistemas Estructurales	17
Tabla 5.	Irregularidades estructurales en altura	18
Tabla 6.	Irregularidades estructurales en planta	18
Tabla 7.	Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase I.	28
Tabla 8.	Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase II.	28
Tabla 9.	Coordenadas UTM y geográficas del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006 41	
Tabla 10.	Derivas de la edificación existente en ambas direcciones	52
Tabla 11.	Definición de elementos Link – Primer piso del Módulo N°04	57
Tabla 12.	Definición de elementos Link – Segundo piso del Módulo N°04	57
Tabla 13.	Sismos considerados para el análisis	73
Tabla 14.	Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos 100	
Tabla 15.	Derivas de la edificación en ambas direcciones con aislador	108
Tabla 16.	Comparativa de derivas de la edificación en ambas direcciones sin y con aislador 110	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de zonificación sísmica del Perú.	12
Figura 2.	Edificio sin y con aislación sísmica en la base.	34
Figura 3.	Detalles de Aislador Elastomérico con Núcleo de plomo en elevación. ..	35
Figura 4.	Detalles de Aislador Elastomérico con Núcleo de plomo en planta.....	35
Figura 5.	Plano de localización de la I.E. Cristo Rey N° 16006.....	41
Figura 6.	Plano de ubicación del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006.....	42
Figura 7.	Planta del modelado estructural del Módulo N°04.....	49
Figura 8.	Espectro de aceleraciones obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y R=1.	50
Figura 9.	Espectro de desplazamientos obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y R=1.	51
Figura 10.	Espectro de demanda obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y R=1.	51
Figura 11.	Demanda de derivas vs límites de derivas normativas	52
Figura 12.	Definición de no linealidad del acero de refuerzo	53
Figura 13.	Definición de no linealidad del concreto no confinado	53
Figura 14.	Definición de concreto confinado en vigas y columnas	54
Figura 15.	Definición de rótulas plásticas en columnas.....	54
Figura 16.	Definición de rótulas plásticas de columnas en software de análisis	55
Figura 17.	Definición de rótulas plásticas en vigas	55
Figura 18.	Definición de rótulas plásticas de vigas en software de análisis	56
Figura 19.	Curva Fuerza – Deriva: Albañilería confinada con ensayo experimental	56
Figura 20.	Muro real vs modelo tipo Link	57
Figura 21.	Modelo de albañilería con elementos tipos LINK.....	58
Figura 22.	Curva de capacidad en la dirección X, para pórticos de concreto	58
Figura 23.	Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440.	59
Figura 24.	Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13.....	60
Figura 25.	Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con FEMA 440.....	61
Figura 26.	Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con ASCE 41-13.	62

Figura 27. Las rotulas plásticas de las columnas llegan al límite de prevención al colapso, para un desplazamiento de 4.6cm correspondiente al Step 38.....	63
Figura 28. Las columnas ya llegaron al colapso, correspondiente al Step 40.	64
Figura 29. Curva de capacidad en la dirección Y, para muros de albañilería confinados.....	65
Figura 30. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440.....	66
Figura 31. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13.....	67
Figura 32. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con FEMA 440.	68
Figura 33. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con ASCE 41-13.....	69
Figura 34. El punto de desempeño encontrado es de 1.2cm con el cual, el muro de albañilería no llega a su máxima capacidad, correspondiente al Step 21.....	70
Figura 35. Espectro de aceleraciones obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y R=1.	71
Figura 36. Espectro de desplazamientos obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y R=1.	71
Figura 37. Espectro de demanda obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y R=1.	72
Figura 38. Ajuste de registro sísmico 7035: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, N82W)	75
Figura 39. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7035: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, N82W).....	75
Figura 40. Ajuste de registro sísmico 7036: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, NO8E).....	76
Figura 41. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7036: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, NO8E)	76
Figura 42. Ajuste de registro sísmico 7038: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw).....	77
Figura 43. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7038: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)	77
Figura 44. Ajuste de registro sísmico 7039: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw).....	78
Figura 45. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7039: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)	78
Figura 46. Ajuste de registro sísmico 7050: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT NO8E).....	79

Figura 47. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7050: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT NO8E)	79
Figura 48. Ajuste de registro sísmico 7051: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT N82W)	80
Figura 49. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7051: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT N82W).....	80
Figura 50. Ajuste de registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – EW – Est. San Luis Gonzaga)	81
Figura 51. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – EW – Est. San Luis Gonzaga)	81
Figura 52. Ajuste de registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – NS – Est. San Luis Gonzaga)	82
Figura 53. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – NS – Est. San Luis Gonzaga).....	82
Figura 54. Ajuste de registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – NS – Est. Juanjuí – San Martin)	83
Figura 55. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – NS – Est. Juanjuí – San Martin).....	83
Figura 56. Ajuste de registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – EW – Est. Juanjuí – San Martin).....	84
Figura 57. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – EW – Est. Juanjuí – San Martin).....	84
Figura 58. Ajuste de registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – NS – Est. UNF).....	85
Figura 59. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – NS – Est. UNF)	85
Figura 60. Ajuste de registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – EW – Est. UNF).....	86
Figura 61. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – EW – Est. UNF)	86
Figura 62. Ajuste de registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – NS – Est. Cip. Moyobamba).....	87
Figura 63. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – NS – Est. Cip. Moyobamba).....	87
Figura 64. Ajuste de registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – EW – Est. Cip. Moyobamba).....	88

Figura 65. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico DATEM del Maraón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Maraón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – EW – Est. Cip. Moyobamba)	88
Figura 66. Acelerogramas agrupados de los registros sísmicos.....	89
Figura 67. Acelerogramas ajustados agrupados de los registros sísmicos: Sismos de diseño.....	89
Figura 68. Espectros de respuesta agrupados de los registros sísmicos	90
Figura 69. Espectros de respuesta ajustados agrupados de los registros sísmicos.....	90
Figura 70. Reacciones en la base en superestructura	91
Figura 71. Reacciones en la base en superestructura incluido plataforma de aislamiento.....	91
Figura 72. Gráfica del comportamiento histórico del Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)	93
Figura 73. Vista de planta y elevación de los 14 aisladores considerados en el análisis.....	94
Figura 74. Comportamiento histerético del aislador: SISMO 7035.....	95
Figura 75. Comportamiento histerético del aislador para los 7 PARES DE REGISTROS.....	96
Figura 76. Calibración de las propiedades del aislador con el promedio de los resultados de los 7 pares de registros	97
Figura 77. Calibración del análisis modal espectral del amortiguamiento del aislador con el promedio de los resultados de los 7 pares de registros	98
Figura 78. Suma vectorial de desplazamientos, 100% en dirección X y 30% en dirección Y, para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros	98
Figura 79. Suma vectorial de desplazamientos, 100% en dirección Y y 30% en dirección X, para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros	99
Figura 80. Desplazamiento en dirección X para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros	99
Figura 81. Desplazamiento en dirección Y para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros	100
Figura 82. Comportamiento histerético del aislador, límites inferior y superior.....	104
Figura 83. Comportamiento de la plataforma de aislamiento, límite superior	104
Figura 84. Comportamiento de la plataforma de aislamiento, límite inferior.....	105
Figura 85. Curva de capacidad en la dirección X, para pórticos de concreto con 14 aisladores.....	105
Figura 86. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440, con aisladores	106
Figura 87. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13, con aisladores	107

Figura 88.	Las rotulas plásticas de las columnas se encuentra en el rango de ocupación inmediata y seguridad de vida, para sismo máximo considerado, (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con aislador.....	108
Figura 89.	Demanda de derivas vs límites de derivas normativas	108
Figura 90.	Curva de capacidad en la dirección X sin y con aisladores de base	111
Figura 91.	Análisis granulométricos de suelos por tamizado.	117
Figura 92.	Determinación limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad. ...	118
Figura 93.	Determinación del contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca.....	119
Figura 94.	Perfil estratigráfico del suelo.....	120
Figura 95.	Ensayo de esclerometría.	121
Figura 96.	Calicata 01 realizada para obtener los valores del tipo y perfil de suelo	123
Figura 97.	Vista lateral del Bloque N°04 de la Institución Educativa I.E. CRISTO REY N°16006.....	123
Figura 98.	Se verificó medidas de los elementos estructurales en comparación a los planos alcanzados del Exp.Técnico en físico	124
Figura 99.	Se verificaron medidas de las vigas, y elementos estructurales en el levantamiento realizado insitu	124
Figura 100.	Vista interna de un ambiente del Módulo donde se aprecia los elementos a analizar.....	125
Figura 101.	Elaboración del ensayo de Limites de Atterberg	125
Figura 102.	Ensayo de contenido de humedad realizado en el laboratorio externo	126
Figura 103.	Se realizó el ensayo no destructivo con esclerómetro, en columnas ..	126
Figura 104.	Se realizó el ensayo no destructivo con esclerómetro, en columnas del bloque educativo que fue analizado.....	127

RESUMEN

El presente trabajo evaluó el desempeño estructural del Módulo N° 04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006, en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca, en condiciones sin aislamiento (base fija) y con aislamiento sísmico, aplicando las Normas Técnicas Peruanas E.030 y E.031. La investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, y de diseño no experimental, descriptivo-comparativo, debido a que se analizó el comportamiento estructural en dos escenarios predefinidos (sin y con aisladores) mediante modelación y simulación numérica. El procedimiento incluyó el modelamiento de la geometría real en ETABS v20, la caracterización de materiales mediante ensayos de esclerometría y el uso del estudio de suelos complementario. Se desarrollaron análisis sísmicos estáticos y dinámicos, considerando el comportamiento diferenciado del módulo en ambas direcciones principales: en X (pórticos de concreto) y en Y (albañilería confinada). En la condición sin aisladores, la estructura presentó un desempeño no satisfactorio en la dirección X, con una deriva máxima de 0.014719, superior al límite normativo de 0.007, y con el punto de desempeño ubicado después del punto de colapso, evidenciando una alta probabilidad de colapso ante el sismo máximo considerado. En contraste, en la dirección Y se obtuvo una deriva de 0.001764, menor al límite de 0.005, y un punto de desempeño previo al colapso, indicando un comportamiento seguro frente al sismo de diseño. Para la condición con aislamiento, se incorporaron 14 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) como cantidad óptima, logrando corregir la deficiencia principal en el eje X y reduciendo más del 50% las derivas y fuerzas de corte; se obtuvo una deriva de 0.006926 y un desempeño global consistente con el nivel de seguridad de vida en ambos sentidos. El amortiguamiento efectivo promedio determinado para los 14 aisladores (a partir de 7 pares de registros) fue de 21.05%, valor que se encuentra dentro del rango 10%–30% establecido por la Norma E.031.

Palabras clave: Desempeño estructural, derivas, aisladores sísmicos, análisis estático no lineal.

ABSTRACT

This study evaluated the structural performance of Module No. 04 of the Cristo Rey No. 16006 educational institution in the city of Jaén, Cajamarca department, under conditions without isolation (fixed base) and with seismic isolation, applying Peruvian Technical Standards E.030 and E.031. The research is applied, with a quantitative approach and a non-experimental, descriptive-comparative design, as the structural behavior was analyzed in two predefined scenarios (with and without isolators) using modeling and numerical simulation. The procedure included modeling the actual geometry in ETABS v20, characterizing materials through sclerometry tests, and using a complementary soil study. Static and dynamic seismic analyses were developed, considering the different behavior of the module in both main directions: in X (concrete frames) and in Y (confined masonry). In the condition without isolators, the structure performed unsatisfactorily in the X direction, with a maximum drift of 0.014719, exceeding the regulatory limit of 0.007, and with the performance point located after the collapse point, evidencing a high probability of collapse under the maximum earthquake considered. In contrast, in the Y direction, a drift of 0.001764 was obtained, lower than the limit of 0.005, and a performance point prior to collapse, indicating safe behavior against the design earthquake. For the condition with isolation, 14 lead-rubber bearings (LRBs) were incorporated as the optimal number, correcting the main deficiency in the X-axis and reducing drifts and shear forces by more than 50%; a drift of 0.006926 was obtained and overall performance was consistent with the level of safety of life in both directions. The average effective damping determined for the 14 isolators (based on 7 pairs of records) was 21.05%, which is within the 10%–30% range established by Standard E.031.

Keywords: Structural performance, drifts, seismic isolators, nonlinear static analysis.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El Perú, por su ubicación geográfica, presenta una elevada sismicidad. Se sitúa en el borde occidental de Sudamérica, dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la interacción tectónica, especialmente el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, provoca la acumulación y liberación de grandes cantidades de energía, originando sismos de considerable magnitud y potencial destructivo.

Un ejemplo son los terremotos ocurridos en el sur y centro del Perú, que devastaron ciudades como Moquegua, Arequipa y Tacna en 2001, así como Pisco, Ica y Chíncha en 2007. Por ello, la población se encuentra en riesgo permanente de verse afectada por un sismo de gran magnitud, con consecuencias tanto materiales como para la vida y la salud.

En el caso del nororiente peruano, donde se ubica la ciudad de Jaén (perteneciente al departamento de Cajamarca), si bien la mayor actividad se concentra en el borde costero por la subducción, también se han producido eventos sísmicos importantes en regiones cercanas o con efectos percibidos en amplias zonas del país. Entre los registros empleados en esta investigación destacan sismos ocurridos relativamente próximos al ámbito de influencia de Jaén, tales como el evento de Lagunas (Loreto) del 26/05/2019 (Mw 8.0), el sismo en Datem del Marañón (Loreto) del 28/11/2021 (Mw 7.5) y el sismo de Sullana (Piura) del 30/07/2021 (Mw 6.1). Asimismo, se consideraron registros instrumentales obtenidos en estaciones cercanas al entorno nororiental, como Juanjuí (San Martín) y Moyobamba (San Martín), los cuales permiten representar adecuadamente la demanda sísmica utilizada en el análisis dinámico.

En este contexto, resulta indispensable evaluar el riesgo sísmico al que están expuestas las edificaciones existentes, anticipando su posible respuesta estructural frente a sismos severos, con el propósito de prevenir pérdidas humanas, económicas y funcionales, especialmente en edificaciones esenciales como las instituciones educativas.

La actualidad del diseño y la construcción de las edificaciones se encuentra bajo el ámbito del Reglamento Nacional de Edificaciones a través de las Normas Técnicas

vigentes, que prevén tener las condiciones necesarias para las situaciones que puedan suscitarse frente a acontecimientos sísmicos. En el año 2019, mediante el decreto supremo “N°030-2019 – Vivienda”, se aprueba la norma técnica E.031 “Aislamiento Sísmico” y su respectiva incorporación al Índice del Reglamento Nacional de Edificaciones, norma técnica que determina requisitos mínimos de diseño y construcción de edificaciones que incorporan sistemas de aislamiento sísmico, con el objeto de mejorar su comportamiento estructural en situaciones de sismos, proteger la estructura y garantizar su funcionalidad continua. Esta norma técnica es de cumplimiento obligatorio en todo el territorio nacional.

1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Selección del problema

La infraestructura educativa tiene repercusiones en los escolares peruanos. Según un estudio del PNIE, existen una cifra de 177 000 obras, donde el 55% requieren un cambio absoluto y sólo el 18% requieren un cambio de reforzamiento estructural y utilitaria. En el Perú, un gran porcentaje de estas obras requieren ser derribadas para garantizar la integridad física y emocional de los escolares, y con ello, permitir construir nuevos colegios con ambientes pedagógicos adecuados que generen un impacto en los resultados de los escolares (expresión ec20.03.2017).

El desempeño sísmico de una edificación es la respuesta de la estructura ante estas mismas fuerzas, esperando siempre que dicha respuesta tenga el menor daño posible y permita la adecuada evacuación de las personas que se encuentran dentro de las instalaciones. además de acuerdo con la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente y la incorporación de la Norma Técnica E.031 Aislamiento Sísmico, señalan que las instituciones educativas son consideradas como edificaciones esenciales las cuales su sistema estructural debe estar conformados por sistemas duales.

Los aisladores sísmicos ofrecen una gran ventaja al desacoplar la edificación con el suelo de fundación ofreciendo disminuir drásticamente los efectos de un sismo, actualmente el uso de los aisladores LRB es casi nula en esta zona y es importante la comparación de la respuesta del desempeño estructural con y sin aisladores sísmicos en

el Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 de la ciudad de Jaén, para determinar si actualmente cumple con la norma y verificar las resistencias, así como el resultado del análisis sísmico estático y dinámico en ambos casos.

El problema con la I.E. Cristo Rey, es que presenta módulos con fisuras visibles en vigas, vigas intersección con columna, columnas y muros portantes, lo que evidencia posibles deficiencias de desempeño estructural. Además, su configuración resistente es irregular en planta al combinar pórticos de concreto armado predominantes en una dirección y albañilería confinada en la dirección perpendicular, generando diferencias significativas de rigidez entre ejes. Esta condición puede incrementar las derivas, la torsión y la demanda sísmica en el eje más flexible, aumentando el riesgo de daño severo frente a un sismo.

1.1.2. Formulación del problema de investigación

¿Cuánto varía el desempeño estructural del Módulo N.º 04 de la I.E. Cristo Rey N.º 16006, en la ciudad de Jaén–Cajamarca, con y sin aisladores sísmicos tipo LRB frente a la acción sísmica, en términos de derivas de entrepiso, desplazamientos y cortante basal?

1.2.JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica teóricamente por la vulnerabilidad del Perú frente a un evento sísmico de gran magnitud, dado que el país se ubica en una zona de alto riesgo denominada “cinturón de fuego”. Las edificaciones esenciales deben mantener su operatividad tras sismos severos. La Norma Técnica E.031 propone aisladores LRB para reducir demandas sísmicas frente a la base fija. En el Módulo N° 04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006, se verificó dicha mejora conforme a NTE E.030/E.031.

La justificación práctica se fundamenta en la necesidad de efectuar la comparación de la respuesta y el comportamiento estructural del bloque del Módulo N°04 que pertenece a la I.E. Cristo Rey N°16006, que se localiza en la ciudad de Jaén; y ocurre que se trata de una edificación de la categoría A2 que es considerada importante,

ya que la función no debe cortarse inmediatamente después que se haya desarrollado un evento sísmico; es por ello que se hace necesaria la protección, como la edificación y sus ocupantes, usando y desarrollando mecanismos de alta eficacia y eficiencia.

Sin embargo, a pesar de ser un aspecto relevante, las características de la zona no han permitido que en la localidad se lleve a cabo un análisis diferente sobre el uso de los aisladores sísmicos, más aún en el Perú su uso no ha sido generalizado en edificaciones importantes que sobrepasen la ciudad de Lima. De allí que sea necesario profundizar en la comprensión de los aisladores sísmicos y sus beneficios estructurales.

1.3.DELIMITACIONES Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación evalúa comparativamente el desempeño estructural del Módulo N° 04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006 en Jaén bajo dos condiciones -base fija y con aisladores LRB, mediante modelación computacional en ETABS V20 y criterios de la NTE E.030/E.031 del RNE; se reportan derivas inter-piso, amortiguamiento, aceleraciones de piso (PFA), periodo fundamental, desplazamiento en el plano de aislamiento (DM/DTM) y nivel de desempeño (IO/LS/CP), incluyendo los casos y expresando resultados en porcentajes de reducción respecto a base fija, con verificación de cumplimiento normativo y lineamientos aplicables a edificaciones educativas similares.

Para el análisis, se emplearon las normas técnicas peruanas vigentes: E.030 – Diseño Sismorresistente, E.031 – Aislamiento Sísmico y E.020 – Cargas.

El estudio se delimitó a un caso único y a análisis computacionales (sin ensayos experimentales), no modela interacción suelo–estructura avanzada, asume diafragmas rígidos y condiciones de apoyo normativas; las propiedades de materiales provienen de levantamiento, esclerometría y de los LRB de norma y catálogos.

1.4.LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Una limitación del estudio fue la ausencia de verificación in situ del refuerzo de acero mediante escáner de barras (rebar scanner) y la imposibilidad de ejecutar ensayos destructivos o semi-destructivos en elementos estructurales, debido a restricciones de la institución educativa. En consecuencia, la cuantía y distribución del refuerzo se adoptó

con base en la documentación disponible (planos estructurales originales) y supuestos compatibles con la normativa vigente.

Adicionalmente, el modelamiento estructural y el diseño del sistema de aislamiento se efectuaron sin incorporar explícitamente la interacción suelo–estructura, es decir, sin representar la deformabilidad del terreno y la flexibilidad de la cimentación mediante resortes o modelos equivalentes. Esta simplificación puede modificar la estimación del período efectivo, desplazamientos y fuerzas internas, por lo que se recomienda complementar el estudio con investigación geotécnica y un análisis con interacción suelo–estructura, particularmente para verificar compatibilidad de desplazamientos en el plano de aislamiento y demandas en la subestructura.

1.5.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Determinar la respuesta del desempeño estructural con y sin aisladores sísmicos del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca.

1.5.2. Objetivos específicos

- Comparar la respuesta del desempeño estructural con y sin aisladores sísmicos del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca
- Realizar el análisis sísmico estático y dinámico con el uso de aisladores tipo LRB (aislador elastomérico con núcleo de plomo) y la cantidad óptima a utilizar para calcular los desplazamientos, derivas y esfuerzos del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca.
- Verificar amortiguamiento del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 con aisladores sísmicos de tipo LRB.
- Realizar el análisis sísmico estático y dinámico del Módulo N° 04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006, en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca, a fin de determinar desplazamientos, derivas y esfuerzos.

1.6.DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

El desarrollo de la investigación se realiza en cinco capítulos:

➤ **Capítulo I: Introducción**

Contiene el contexto y el problema de la investigación, la justificación o importancia de ésta, los alcances de la investigación, y los objetivos de la misma.

➤ **Capítulo II: Marco Teórico**

Este capítulo contiene los antecedentes teóricos de la investigación, donde se describió investigaciones similares a nivel internacional, nacional y local; las bases teóricas, en donde se hace mención de la normativa utilizada, así como las características físicas y mecánicas para el cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos.

➤ **Capítulo III: Materiales y Métodos**

En este capítulo se desarrolló, la realización de la investigación, el tiempo y la época. Se detalló los procedimientos que se realizaron en la investigación. Se menciona también el tratamiento que se utilizó en los datos de cada variable y la forma de presentación de las mismas.

➤ **Capítulo IV: Análisis y Discusión de Resultados**

Se realizó la presentación de los resultados obtenidos del capítulo anterior, describiéndolos, explicándolo y comparándolos.

➤ **Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones**

Se efectuó la conclusión de la investigación de acuerdo a los objetivos planteados, y se realizó las recomendaciones que el investigador considera necesarios para seguir ampliando los conocimientos sobre el problema de investigación.

➤ **Referencias Bibliográficas**

Se presenta una lista de fuentes que se ha usado a lo largo de la investigación.

➤ **Anexos**

Se presenta información complementaria, extraídas del expediente técnico y documentos solicitados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Antecedentes internacionales

Pachay (2021), en la tesis de pregrado titulada **“Diseño/implementación de un bloque de aulas mediante aislador sísmico para la Unidad Educativa Fiscal Jipijapa”**, propone la incorporación de aisladores sísmicos en un bloque de aulas de una institución educativa, orientándose a mejorar el comportamiento frente a sismos mediante el desacoplamiento del movimiento del terreno. Los aisladores (LRB) son conformantes con la norma FEMA-450 como así también con los requerimientos de la NCh2745. Los resultados del sistema de aislación muestran buen comportamiento estructural y los periodos obtenidos son cercanos al periodo de diseño que se calcula para que la estructura soporte menor carga inercial. Entre los aportes del trabajo se incluye el sustento técnico del uso de aislamiento para controlar desplazamientos y fuerzas internas, priorizando la continuidad de servicio y la protección de los ambientes educativos.

Corredor & Ariza (2019) en su investigación denominada **“Desempeño de aisladores de base en una edificación educativa sometida a acciones sísmicas”** comparan el comportamiento sísmico de una edificación educativa en condición base fija (sin aislamiento) y con aislamiento sísmico en la base. Para ello aplican análisis modal espectral y cronológico (time-history) empleando acelerogramas de la microzonificación sísmica de Bucaramanga, modelando el comportamiento lineal en SAP2000 v20. Evalúan dos alternativas de aislación: (i) aislador elastomérico laminado (capas de acero con neopreno) y (ii) aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB). Concluyen que la incorporación de aislamiento reduce de manera considerable la respuesta global, principalmente el cortante basal y las derivas, destacando un mejor desempeño para la alternativa con neopreno; asimismo, señalan que en el caso con núcleo de plomo la selección dependió de catálogos comerciales y no se ajustó completamente a los requerimientos del estudio.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Alvarado & Ccaihuari (2022) en su investigación denominada **“Evaluación y propuesta con aisladores sísmicos en la I.E. 88072 Pensacola, Chimbote, Ancash-2022”** realizan la evaluación estructural y la propuesta de incorporación de aisladores sísmicos para el Pabellón B de la I.E. N°88072 Pensacola (Chimbote, Áncash). La investigación se plantea como no experimental y de tipo descriptivo, integrando componentes de diagnóstico técnico del sitio y del estado resistente del pabellón. Como parte del levantamiento de información, ejecutan pozos exploratorios/calicatas para determinar propiedades del suelo. En paralelo, evalúan la resistencia del concreto mediante esclerometría en elementos tipo columna; obtienen valores de resistencia que se aproximan al $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$, considerado como referencia normativa (E.060), sustentando la consistencia entre el diagnóstico y los valores de diseño. Para el análisis sísmico, modelan el pabellón en ETABS v19 y definen parámetros sísmicos como $Z=0.45$ y $S_3=1.10$, además de $T_p=1.10$ y $T_l=1.60$; adoptan un factor de uso $U=1.5$ (edificaciones esenciales) y un coeficiente $C=2.5$ en su configuración. Sobre esa base, presentan resultados de cortantes (por ejemplo, valores mínimos de diseño y valores “reales” de cortante sísmico obtenidos en el modelado), los cuales utilizan para discutir la respuesta del sistema y la propuesta de aislamiento. En conjunto, el estudio integra condición del suelo, diagnóstico de materiales y modelación sísmica para sustentar técnicamente la intervención con aisladores en un edificio educativo existente.

Ticona (2019) en su investigación denominada **“Análisis comparativo del comportamiento estructural de un centro educativo con aisladores sísmicos elastoméricos frente a un diseño convencional sin aisladores, basado en la norma técnica E.030, en la ciudad de Tacna”** realiza un análisis comparativo del comportamiento estructural de un centro educativo bajo dos configuraciones: diseño convencional sin aisladores (base fija) y diseño con aislamiento sísmico en la base mediante aisladores elastoméricos tipo LRB. El propósito del estudio es cuantificar cómo varían los principales indicadores de desempeño estructural cuando se incorpora aislamiento, tomando como marco de referencia la Norma Técnica E.030, y verificando el cumplimiento de parámetros normativos

asociados a desplazamientos y derivas. En los resultados, la autora evidencia que el aislamiento incrementa el periodo y genera un “filtrado” de la demanda, produciendo reducciones importantes en la respuesta de la superestructura. Para el registro de Lima (03/10/1974) se reportan reducciones de desplazamientos en el sistema aislado de hasta 59.29% en dirección X y 62.67% en dirección Y (con reducciones mínimas reportadas de 21.59% en X y 49.57% en Y). En el caso de las derivas máximas de entrepiso, las reducciones son aún más marcadas: hasta 94.20% en X (mín. 79.91%) y hasta 87.72% en Y (mín. 74.94%), mostrando un desempeño ampliamente favorable del sistema aislado para controlar deformaciones relativas entre niveles. Del mismo modo, el cortante basal se reduce de forma significativa, alcanzando reducciones máximas de 45.08% en X y 68.21% en Y, lo que confirma que el aislamiento disminuye la fuerza sísmica transferida a la superestructura.

2.1.3. Antecedentes locales

Carranza (2021) En la investigación denominada **“Variación del comportamiento estructural del edificio de SENATI al incorporar aisladores sísmicos tipo LRB, Cajamarca 2021”**, tiene como objetivo determinar la variación del comportamiento estructural del edificio SENATI bloque -A al incorporar aisladores sísmicos tipo LRB, donde la variación del comportamiento estructural es mayor al 10%, el cual mediante el análisis de la estructura con aisladores se redujo en un 66% las derivas, cumpliendo así la normativa vigente.

Soriano (2014) En la investigación titulada **“Comparación de la respuesta estructural del Pabellón A de la Universidad Privada del Norte con aisladores sísmicos elastoméricos y sin aisladores sísmicos”**, desarrollada en Cajamarca, se efectuó un análisis comparativo entre el comportamiento de una edificación educativa en condición convencional (base fija) y con implementación de aislamiento sísmico mediante aisladores elastoméricos. El estudio evaluó variables como desplazamientos laterales, derivas entrepiso y esfuerzos/cortante basal, mediante modelamiento estructural en software especializado, evidenciando que la alternativa con aislamiento logra una

disminución apreciable de la demanda sísmica, reportándose una reducción promedio de derivas entrepiso del orden de 45% frente al caso sin aisladores, mejorando el desempeño global de la edificación.

2.2.BASES TEÓRICAS

2.2.1. Desempeño estructural

SEAO (1995) Establece que el desempeño se refiere al estado de la estructura y sus elementos interiores después de un evento sísmico, contando con diferentes niveles que están relacionados con la magnitud del sismo, las cuales se clasifican en:

- Totalmente Operacional: Estado de daño no es significativo, no se presentan daños en la edificación, su funcionamiento es adecuado y segura.
- Operacional: El daño es leve en sus elementos estructurales y moderado en los elementos no estructurales, para el funcionamiento se requieren algunas reparaciones en la edificación.
- Seguridad de vida: estado de daño moderado. Se describen daños moderados tanto en elementos estructurales como no estructurales, con una considerable reducción de rigidez y capacidad de carga; la estructura se ve obligada a rehabilitar su condición para seguir operando.
- Prevención al colapso: estado de daño severo. Se describen daños estructurales y no estructurales severos. Existe pérdida de rigidez y de resistencia, con la estructura muy cerca del colapso. Hay riesgo para la vida de las personas y la rehabilitación no es posible.
- Colapso: estado de daño completo. Se produce colapso total o parcial de la edificación.

De acuerdo con Gonzales (2019), al momento de aplicar el diseño por desempeño, comportamiento o función, lo normal es diseñar para el estado límite último; pero esto no quiere decir que se posea suficiente garantía de que el daño se reduzca y, por consiguiente, tampoco de la seguridad.

Para hallar integridad estructural considerando estados de daño, el nivel de daño se relaciona con la capacidad estructural del edificio; la cual es obtenida con un análisis estático no lineal. A partir de los espectros de demanda que

dependen de la acción sísmica presentada y de la curva de capacidad se alcanza la respuesta pico del edificio que expresa la respuesta máxima de la estructura ante la acción sísmica padecida, denominada punto de desempeño.

2.2.1.1. Curva de capacidad

Gonzales (2019) define a la curva de capacidad como la relación existente de la resistencia de la carga lateral en una estructura y el desplazamiento lateral característico.

2.2.1.2. Espectro de capacidad

Gonzales (2019) Establece que el espectro de capacidad es la representación de la curva de capacidad en un espacio de coordenadas espectrales conocidas como ADRS (Acceleration, Displacement, Response, Spectra).

2.2.1.3. Cortante Basal

La N.T.E. E.030 (2018, art. 9.1 y 9.2) establece que el cortante basal V es la fuerza sísmica total que debe considerarse actuando en la base de la estructura al aplicar el análisis sísmico estático equivalente. Esta fuerza se obtiene como el producto del coeficiente sísmico de la edificación y el peso sísmico P , corregido por los factores de zona, uso, suelo y reducción por ductilidad, según la expresión:

$$V = \frac{Z.U.C.S}{R} . P$$

2.2.2. Efecto de los sismos en las edificaciones

El efecto de un sismo en una edificación puede llegar a provocar su inhabilitación parcial o total de una edificación debido a que las fuerzas provocadas por un sismo producen daños de leves a severos, esto esta relacionado con la zona de fundación ya que esta define la aceleración del suelo.

En edificaciones que no cuenten con un diseño adecuado y deficiente proceso constructivo serían las más afectadas, comprometiendo la funcionalidad de sus elementos estructurales llegando incluso al colapso total de la estructura.

De acuerdo con el R.N.E. E.030 (2019) el Perú se divide en 4 zonas sísmicas como se muestra a continuación:

Figura 1. Mapa de zonificación sísmica del Perú.



Nota. R.N.E. E.030, 2019.

Símbolos gráficos para suelos: Tanto en los registros estratigráficos como en los perfiles se deberán usar las simbologías. (MEM, 2016, p. 19)

Los factores Z considerados se refieren a la aceleración máxima horizontal en el suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. Dicho factor Z representa una fracción de la aceleración de la gravedad.

Tabla 1. Factores de zona

FACTORES DE ZONA “Z”	
ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: R.N.E. E.030,2019.

Estos valores se utilizan en estratos rocosos, pero para ajustar a un proyecto específico se tiene que realizar el análisis del terreno de fundación.

Tabla 2. Categoría de las edificaciones y factor U

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A Edificaciones Esenciales	A1: Establecimientos del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales para el manejo de las emergencias, el funcionamiento del gobierno y en general aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. Se incluyen las siguientes edificaciones: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos estaciones ferroviarias de pasajeros, sistemas masivos de transporte, locales municipales, centrales de comunicaciones. - Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. - Instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. - Edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. - Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	1,5
B Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de buses de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1,0
D Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.	Ver nota 2

Fuente: Norma E.030 del R.N.E., 2018

2.2.3. Análisis estructural

Ottazzi (2020) dice que es la etapa anterior a la concepción de los elementos de hormigón armado, la cual se desarrolla por procedimientos aproximados o con herramientas de análisis de mayor sofisticación. Su objetivo es obtener la respuesta de los elementos estructurales deformaciones y acciones interiores frente a las solicitaciones o cargas externas.

2.2.3.1. Normativa de Diseño Sismorresistente

La normativa a emplear para el diseño sismorresistente será la Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones, publicada el día 23 de octubre de 2018.

2.2.4. Diseño por desempeño sísmico

Se trata del diseño por capacidades, cuyo objetivo es que la estructura funcione bien, teniendo en cuenta ciertos desplazamientos, a partir de los cuales se evalúa si realmente una determinada estructura ha sido bien diseñada o no. Se consideran los siguientes procedimientos: el espectro de capacidad y el procedimiento directo basado en desplazamientos, según (Carillo, J., 2007, pp. 92-96, citado en Estrella, J.J. y Ochoa, A.J., 2024).

Niveles de desempeño sísmico. Establecen umbrales de daño que describen estados límite aceptables de la edificación frente a un sismo, definidos por el grado de afectación estructural y no estructural, el nivel de seguridad para los ocupantes y la capacidad de conservar funcionalidad posterior al evento. Estos niveles se expresan comúnmente como Operacional, Ocupación Inmediata (Immediate Occupancy), Seguridad de Vida (Life Safety) y Prevención de Colapso (Collapse Prevention), entre otros, y se emplean para formular objetivos de desempeño en función del nivel de amenaza sísmica. (ASCE/SEI 41-23).

Tabla 3. Estados de daño y niveles de desempeño

Estado de daño	Nivel de desempeño (ASCE/SEI 41-23)	Descripción
Despreciable	Operacional / Totalmente Operacional (O)	Daño estructural y no estructural nulo o despreciable. La edificación mantiene su función sin interrupciones relevantes; servicios e instalaciones continúan operando.
Ligero	Ocupación inmediata (Immediate Occupancy – IO)	Daños leves. La edificación es segura para ocupar inmediatamente; puede haber afectación menor en elementos no estructurales, con interrupciones pequeñas y de rápida recuperación.
Moderado	Seguridad de vida (Life Safety – LS)	Daños moderados. La estructura mantiene estabilidad y margen contra colapso; la evacuación es segura, pero se esperan reparaciones significativas y mayor afectación no estructural.
Severo	Prevención de colapso (Collapse Prevention – CP)	Daño estructural severo, cerca del límite de estabilidad. Riesgo elevado de daños y desprendimientos no estructurales; la edificación no es apta para ocupación.
Completo	Colapso (C)	Pérdida de estabilidad global o parcial grave: colapso estructural.

Fuente: ASCE/SEI 41-23.

2.2.5. Evaluación del comportamiento sísmico de las edificaciones esenciales

La evaluación del comportamiento sísmico en edificaciones esenciales debe realizarse bajo un enfoque basado en desempeño, en el que se definan objetivos de desempeño (p. ej., Operacional, Seguridad de Vida, Prevención de Colapso) asociados a distintos niveles de amenaza sísmica, y se verifique si la estructura y sus componentes pueden alcanzar dichos objetivos. En este marco, el estándar ASCE/SEI 41-23 establece principios y procedimientos para la evaluación sísmica y rehabilitación de edificaciones existentes, proponiendo un proceso por niveles (tiers) y vinculando el desempeño estructural y no estructural con el nivel de amenaza, lo cual resulta especialmente relevante para edificaciones esenciales por su necesidad de limitar daños y asegurar funcionalidad post-sismo.

Complementariamente, cuando la evaluación busca cuantificar no solo la respuesta estructural (derivas, desplazamientos, demandas internas), sino también las consecuencias del daño, la metodología FEMA P-58 (2.^a edición) permite medir el desempeño en términos de probabilidad de pérdidas humanas, costos de reparación/reemplazo, tiempo de reparación/downtime y condiciones de inseguridad/inhabitabilidad, fortaleciendo el análisis integral del desempeño para edificaciones de importancia crítica.

2.2.6. Nivel de amenaza sísmica

Tal como indica (Llocle, A., 2021, pág. 33), la evaluación de la amenaza sísmica tiene en cuenta la posición de la estructura frente a aspectos como las limitaciones geológicas que tiene la zona donde tiene lugar el fenómeno y las características geológicas regionales y locales. Los movimientos a los que puede quedar sometido el terreno son función de estos parámetros, y, de este modo, condicionan el comportamiento de la estructura.

Para poder aplicar el diseño por rendimiento sísmico, se necesita una secuenciación de fenómenos sísmicos que permitan la manifestación del rendimiento deseado y cuya representación se sitúe en un rango de severidades sísmicas que permitan alcanzar el rendimiento deseado.

Estados de daño y niveles de desempeño

Sismo de Servicio	Sismo de Diseño	Sismo Máximo
Movimiento del suelo con una probabilidad de 50% de excedencia durante 50 años. Tiene un periodo de retorno (T) de 75 años. Sismo considerado como frecuente ya que su ocurrencia es más de una vez durante el tiempo de vida útil de la edificación.	Movimiento del suelo con una probabilidad de 10% de excedencia durante 50 años. Tiene un periodo de retorno (T) de 475 años. Movimiento sísmico considerado poco frecuente, intensidad moderada y severa por lo que su ocurrencia es menos de una vez durante la vida útil de la edificación.	Movimiento del suelo con una posibilidad de 2% y 5% de excedencia durante 50 años. Tiene un periodo de retorno (T) de entre 975 y 2475 años. Movimiento sísmico considerado como máximo que pueda someterse sobre una estructura.

Fuente: ATC-40, 1996

La norma peruana plantea un diseño para una tal acción sísmica de periodo de retorno 475 años, que constituye un sismo raro o infrecuente, según el comité VISION 2000, y un sismo de diseño de acuerdo con el criterio ATC. Para el análisis sísmico de una edificación se debe considerar el parámetro de sitio y los factores que modifican la gravedad según la localización y el tipo de la edificación, obteniendo el efecto de la norma (Norma E.030, 2018).

2.2.7. Sistemas Estructurales

De acuerdo a la Norma Técnica E.030, se establece el coeficiente básico de reducción de acuerdo al sistema estructural indicado en la misma, según la tabla:

Tabla 4. Sistemas Estructurales

Sistema Estructural	Coeficiente Básico de Reducción
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	5
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	4
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	7
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	4
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto armado:	
Pórticos	8
Dual	7
Muros Estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería armada	3
Madera	7(**)

Fuente: Norma Técnica E.030 del R.N.E., 2018

Factores de Irregularidad. Se sugiere en la (Norma Técnica E.030, 2018), los coeficientes para la irregularidad en altura y en planta, que están presentados en las siguientes tablas:

Tabla 5. Irregularidades estructurales en altura

Irregularidades Estructurales en Altura		Factor I_a
01	Regular	1.00
02	Irregularidad de Rigidez-Piso Blando	0.75
03	Irregularidad de Resistencia-Piso Débil	0.75
04	Irregularidad Extrema de Rigidez	0.50
05	Irregularidad Extrema de Resistencia	0.50
06	Irregularidad de Masa o Peso	0.90
07	Irregularidad Geométrica Vertical	0.90
08	Discontinuidad en los Sistemas Resistentes	0.80
09	Discontinuidad extrema de los Sistemas Resistentes	0.60

Fuente: Norma Técnica E.030 del R.N.E., 2018

Tabla 6. Irregularidades estructurales en planta

Irregularidades Estructurales en Altura		Factor I_a
01	Regular	1.00
02	Irregularidad Torsional	0.75
03	Irregularidad Torsional Externa	0.60
04	Esquinas Entrantes	0.90
05	Discontinuidad del Diafragma	0.85
06	Sistemas no Paralelos	0.90

Fuente: Norma Técnica E.030 del R.N.E., 2018

2.2.8. Sistemas modernos de protección sísmica

A medida que han transcurrido los años, han surgido nuevas tecnologías para la protección sísmica que sirven como sustitutos del diseño antisísmico convencional; estas tecnologías tienen un rendimiento igual o superior al diseño convencional (Villarreal & Díaz, 2016).

La norma peruana E030 -18 establece que la estructura no debe colapsar, que no debe causar daños a las personas y que debe contemplar criterios específicos para las edificaciones esenciales para garantizar su operatividad ante un sismo severo.

Sin embargo, aplicar estos criterios puede llegar a ser complicado por múltiples razones (tipo de suelo, características del edificio, el nivel de seguridad que se intenta ofrecer a la estructura, etc.). En respuesta a estas exigencias, y a pesar de su reciente incorporación al ámbito ingenieril, se han ido aceptando los sistemas modernos de protección sísmica.

Después de sus primeras incorporaciones en EE.UU y Japón, se ha ido extendiendo a otros países con alta sismicidad. En la actualidad, existen

diversos sistemas con características diferentes. Según Talavera (2019), hasta el año 2017 el Perú ya contaba con 19 edificaciones incorporadas con algunos de estos sistemas (aisladores en la base y disipadores de energía), ambos han demostrado buen desempeño y se espera seguir implementándolos en las edificaciones. A continuación, se menciona cada sistema para posteriormente decidir el que se empleará en este estudio.

- Sistema de control activos.
- Sistema de control híbridos.
- Sistema de control semi – activos.
- Sistema de control pasivos.

2.2.9. Sistemas de aislamiento sísmico

En base a lo descrito en el *Artículo 9 de la Norma Técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”*, para su diseño se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Condiciones ambientales:** Además de los requerimientos por cargas verticales y por cargas laterales inducidas por viento y sismo, el sistema de aislamiento sísmico debe diseñarse considerando otras condiciones ambientales. Entre ellas se incluyen los efectos del envejecimiento, el flujo plástico (creep), la fatiga, la temperatura de operación y la posible exposición a humedad o a sustancias nocivas.
- **Fuerzas de viento:** Las edificaciones con aislamiento sísmico deben ser capaces de resistir cargas de viento en todos los niveles sobre la interfaz de aislamiento, de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica E.020 Cargas. Asimismo, en la interfaz de aislamiento debe incorporarse un sistema de restricción frente a cargas laterales de viento que, en condiciones habituales de operación, limite el desplazamiento del sistema de aislamiento sísmico a un valor igual al permitido en los entrepisos de la superestructura.

Resistencia contra el fuego: no se puede utilizar ningún material inflamable en la zona en donde se localiza el sistema de aislamiento sísmico.

- **Fuerza de restitución lateral:** el sistema de aislamiento sísmico debe ser diseñado tal que permita, en el máximo desplazamiento, generar una fuerza lateral de restitución, tomando como consideración el límite superior del desplazamiento y el límite inferior del desplazamiento. Esta fuerza no puede ser menor en $0,025 P$ que la fuerza lateral a la que corresponde el 50% del máximo desplazamiento.
- **Dificultad del desplazamiento sísmico:** en el caso de que exista un sistema de restricción para limitar el desplazamiento lateral, el mismo no debe ser restrictivo por debajo del desplazamiento total máximo (DTM) debido al SMC, salvo que la estructura sísmicamente aislada sea proyectada con los requerimientos a que se refiere el punto.
- **Estabilidad por carga vertical:** Cada elemento del sistema de aislamiento sísmico debe ser diseñado para ser estable bajo la máxima y mínima carga vertical indicada en:

a) Carga vertical promedio:

$$1,0 CM + 0,5 CV$$

b) Carga vertical máxima:

$$1,25 (CM + CV) + 1,0 (CSH + CSV) + 0,2 CN$$

c) Carga vertical mínima:

$$0,9 CM - 1,0 (CSH + CSV)$$

Donde:

CM : Carga muerta.

CV : Carga viva.

CSH: Carga sísmica horizontal.

CSV: Carga sísmica vertical = $0,5 (1,5 ZS) CM$.

CN : Carga de nieve.

En ambos casos, el sistema se encuentra sometido al desplazamiento total. Los factores de seguridad y la metodología de cálculo para los aisladores elastoméricos se detallan en el Anexo II de la presente Norma Técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”, los cuales se desarrollan a continuación:

VERIFICACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS AISLADORES ELASTOMERICOS

1. Capacidad axial:

- Modulo Elástico: $E_0 = f \cdot G$; el valor de f dependerá del proveedor.
Se recomienda utilizar el valor de $f = 4,0$, salvo que el proveedor demuestre mediante ensayo ASTM D945 u otro similar reconocido internacionalmente un valor diferente.

Donde:

G =Modulo de corte del caucho, en MPa.

- Factor de Forma (S): ratio entre área efectiva de una capa de caucho dividida entre su área de la superficie de borde.
- Módulo de Compresión: $E_C = E_0(1 + 2kS^2)$, en MPa.

Donde:

k =constante empírica que está en función del modulo de corte.

- Área reducida (AR):

$$AR = A_A \cdot 2 \frac{\left[D_e^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2}}{D_e} \right) - D_{TM} \cdot \sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2} \right]}{\pi \cdot D_e^2}$$

Donde:

A_A = Área de aislador, en mm².

D_e = Diámetro del aislador sin contar la cobertura de caucho exterior, en mm.

D_{TM} = Desplazamiento total de un elemento del sistema de aislamiento, en la dirección de análisis, que incluye la traslación en el centro de rigidez y la componente torsional, determinado con la ecuación 5.3, en mm.

- Capacidad de Pandeo:

$$P_{crítico} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} G \cdot S \frac{D_e}{N \cdot t_r} A_R$$

Donde:

N = número de capas de caucho

t_r = espesor de cada capa de caucho, en mm,

- Factor de seguridad (FS):

Solo para carga axial, FS = 3,0

Para la carga axial ultima a D_{TM} , FS > 1,0

2. Deformación por corte:

- Deformación debido a la deformación:

$$\gamma_D = \frac{D_{TM}}{H_r} \leq 2,5$$

- Deformación por corte:

$$\gamma_C = \frac{6 \cdot P \cdot S}{E_C A_R}$$

- Deformación por corte debido a deformación angular:

$$\gamma_\theta = \frac{0,375 \cdot D_e^2 \cdot \theta}{t_r \cdot H_r}$$

Donde:

$\theta \geq 0,003$ en radianes.

- Deformación total por corte:

Nota. Referencia: Capítulo 14 de la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Volteo: El factor de seguridad contra el volteo de la estructura en la interfaz de aislamiento no podrá ser inferior a 1,0 para ninguna de las combinaciones de carga necesarias. En el proceso de diseño de la edificación se tendrán en cuenta las distintas condiciones de carga de gravedad y sísmicas. Las fuerzas laterales para el cálculo del volteo se determinarán con el SMC y para la fuerza vertical que contrarresta la misma, se empleará el peso P sin factorar, el cual será calculado de acuerdo a la norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. No se admitirá el levantamiento local (uplift) en los aisladores, salvo que se demuestre que las deformaciones resultantes no produzcan, ni en las unidades de aislamiento ni en otros elementos de la estructura, sobreesfuerzos ni inestabilidades.

Monitoreo, inspección y reemplazo: Las edificaciones formalmente sísmicamente aisladas deben contar con un programa de monitoreo, inspección y mantenimiento del sistema de aislamiento sísmico, correspondiente al experto proyectista y considerado como una parte del proyecto.

Respecto al *Artículo 13 de la Norma Técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”*, donde hace mención a las propiedades del sistema del aislamiento sísmico, se detalla lo siguiente:

Todos los componentes del sistema de aislamiento sísmico se clasifican y agrupan según el tipo y tamaño del aislador y de acuerdo al tipo y tamaño de los dispositivos de amortiguamiento suplementario, cuando estos últimos componentes formen parte del sistema de aislamiento sísmico. Los criterios que se debe cumplir son:

1. Propiedades nominales de un aislador:

- a) Para cada uno de los distintos tipos de unidades de aislamiento, las propiedades nominales de diseño se obtienen a partir del promedio de las propiedades de tres ciclos del ensayo de prototipos, las cuales se describen en el artículo 31 de la Norma Técnica E-031.
- b) La variación de las propiedades de la unidad de aislamiento como consecuencia de la distinta carga vertical aplicada es determinada a partir de un ciclo de deformación singular, promediando aquellas propiedades que se han presentado utilizando las tres combinaciones de cargas verticales definidas en el inciso 12.2 del artículo 12 de la Norma Técnica E-031 en el nivel de desplazamiento indicado, si corresponde, como se define en el artículo 31 de la Norma Técnica E-031.
- c) Si los valores medidos de rigidez efectiva y de amortiguamiento efectivo de un aislador para la carga vertical promedio referida en el inciso 12.2 del artículo 12 de la Norma Técnica E-031 difieren en menos de 15% respecto a los promedios de los valores medidos para las tres combinaciones de cargas verticales definidas en el inciso 12.2 del artículo 12 de la Norma Técnica E-031, las propiedades nominales de diseño se deben determinar únicamente para la carga vertical promedio referida en el inciso 12.2 del artículo 12 de la Norma Técnica E-031.

2. Para cada uno de los tipos de componente, el objetivo es calcular las propiedades límites de la configuración del sistema de aislamiento sísmico, teniendo en cuenta las variaciones necesarias por causa de límites de los componentes del sistema de aislamiento sísmico:

Las propiedades límites del sistema de aislamiento sísmico son calculadas para cada tipo de componente y deben incluir las variaciones relacionadas con:

- a) Las mediciones en el ensayo del prototipo, tal como se describe en el artículo 31 (Secuencia de ensayos de los aisladores prototipo y ciclos de los ensayos de los aisladores prototipo) de la Norma Técnica E-031, que se debe tener en cuenta en la variación de las propiedades de la unidad de aislamiento prototipo. Por esta misma razón las variaciones pueden enunciarse, entre otras, por la variación que conlleve el ensayo de carga vertical, la velocidad de carga de ensayo o cargas rápidas, en función del como afecta la variación la temperatura durante el movimiento cíclico, la historia de cargas, la degradación temporal de las propiedades mecánicas por ciclos repetidos (scragging) y otras posibles fuentes de variaciones que se puedan medir en el ensayo del prototipo, etc.
 - b) Las variaciones que provienen de las tolerancias especificadas en la especificación de fabricación, utilizadas en la determinación de la aceptabilidad de la producción de los aisladores, conforma a lo que se requiere en el artículo 38 de la Norma Técnica E-031.
 - c) Las variaciones debidas al envejecimiento y a los efectos medioambientales, incluyendo flujo plástico (creep), fluencia, fatiga, contaminación, temperatura de funcionamiento, tiempo expuesto a dicha temperatura, y el desgaste a lo largo de la vida de la estructura.
3. Factores de modificación de las propiedades:
 - a) Cuando se instalen estructuras sísmicamente aisladas (cimentación, sistema de aislamiento sísmico, superestructura) deberá se tendrá en cuenta la posible influencia de la velocidad de carga y de las variaciones de propiedades del aislador en su vida útil esperada. Interviene así mismo el envejecimiento, la contaminación, ambiente, la temperatura, etc.

- b) Para tener en cuenta la variación de los parámetros nominales de diseño de cada tipo de unidad de aislamiento, correspondientes a los efectos del calentamiento por movimiento dinámico cíclico, la velocidad de carga, el scragging y la recuperación, la variabilidad en las propiedades de producción, la temperatura, el envejecimiento, la exposición ambiental y la contaminación se debutan los factores de modificación de propiedades, máximo y mínimo (λ).
- c) Cuando los datos de ensayo de cualificación de determinado fabricante en concordancia con lo que señala el artículo 29 (Ensayos de Cualificación) de la Norma Técnica E-031, hayan sido aprobados por el ingeniero responsable del diseño estructural y los valores de modificación (λ) se encuentren comprendidos en la Tabla N° 2, los factores de modificación de propiedades (λ) deben tomarse de la Tabla N° 2.
- d) Cuando la información obtenida de los ensayos de cualificación, tal como dispone el artículo 29 (Ensayos de Cualificación) de la Norma Técnica E-031, no sea aprobada por el ingeniero responsable del diseño estructural o el valor de modificación (λ) se sitúe en la Tabla N° 3, los factores de modificación de las propiedades (λ) serán extraídos de la Tabla N° 3.
- e) Los factores de modificación de las propiedades (λ) son calculados para cada tipo de unidad de aislamiento y, en el momento en que sean aplicados a los parámetros de diseño nominales, deben cubrir la respuesta histerética del rango de demandas de ± 0.5 DM, más el desplazamiento máximo $\pm$ DM. Se permite que los factores de modificación de propiedades para condiciones ambientales sean considerados a partir de datos que no dan lugar a la necesidad de satisfacer el requerimiento de similitud del artículo 35 (Ensayos de prototipos de unidades similares) de la Norma Técnica E-031.
- f) Para cada uno de los tipos de aisladores, el valor del factor máximo de modificación de las propiedades λ máximo, y el valor del factor mínimo de modificación de propiedades λ mínimo serán establecidos a partir de

la contribución de los factores de modificación de propiedades según se indica la Ecuación 1 y la Ecuación 2 respectivamente.

$$\lambda_{\max.} = (1 + (0,75 \times (\lambda_{(ae,\max)} - 1))) \times \lambda_{(tvs,\max)} \times \lambda_{(fab,\max)}$$

$$\lambda_{\min.} = (1 - (0,75 \times (1 - \lambda_{(ae,\min)}))) \times \lambda_{(tvs,\min)} \times \lambda_{(fab,\min)}$$

Donde:

$\lambda_{(ae,\max)}$ = Factor de modificación para determinar el máximo valor de una propiedad del aislador, considerando las condiciones ambientales y el envejecimiento.

$\lambda_{(ae,\min)}$ = Factor de modificación para determinar el mínimo valor de una propiedad del aislador, considerando las condiciones ambientales y el envejecimiento.

$\lambda_{(tvs,\max)}$ = Factor de modificación para determinar el máximo valor de una propiedad del aislador, considerando las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.

$\lambda_{(tvs,\min)}$ = Factor de modificación para determinar el mínimo valor de una propiedad del aislador, considerando las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.

$\lambda_{(fab,\max)}$ = Factor de modificación para determinar el máximo valor de una propiedad del aislador, considerando la variabilidad en la fabricación de aisladores de la misma dimensión.

$\lambda_{(fab,\min)}$ = Factor de modificación para determinar el mínimo valor de una propiedad del aislador, considerando la variabilidad en la fabricación de aisladores de la misma dimensión.

- g) Los valores de λ proporcionados por el fabricante deben estar contenidos entre los valores extremos de los factores de modificación de las propiedades de los dispositivos clase I y clase II desarrollados a continuación:

- 1) Los dispositivos Clase I son aquellos cuyos factores de modificación de propiedades se encuentran sustentados mediante ensayos y estudios de investigación y los valores de modificación de sus propiedades se encuentran acotados por los valores indicados en la Tabla N° 2.

Los dispositivos de aislamiento sísmico son sometidos a la evaluación del proyectista, para lo cual requerirá los resultados de las pruebas de calificación, el análisis de los datos más recientes y los estudios científicos de respaldo que cuantifican los efectos del calentamiento debido al movimiento cíclico, la velocidad de carga, el scragging, la variabilidad e incertidumbre del proceso de producción de los dispositivos, la temperatura, el envejecimiento, la exposición ambiental y la contaminación. La metodología empleada para calcular los factores de modificación de propiedades debe seguir procedimientos y consideraciones consistentes con el documento ASCE 7-16.

Las pruebas de calificación deben ser efectuadas a los tipos de componentes, modelos, materiales y tamaños de aisladores que se utilizarán en la construcción. Las pruebas de calificación deben haberse efectuado en componentes producidos por el mismo fabricante que suministra los componentes que se utilizan en el dispositivo.

Cuando se usen especímenes a escala para los ensayos de calificación, la interpretación de los resultados debe considerar los factores de escalamiento y similitud entre el espécimen y la muestra que tiene la verdadera dimensión.

Cuando se usen especímenes a escala para los ensayos de calificación, la interpretación de los resultados debe considerar los factores de escalamiento y similitud entre el espécimen y la muestra que tiene la verdadera dimensión.

Tabla 7.Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase I.

Tabla N° 2: Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase I ^(*)							
	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	Aislador de bajo amortiguamiento	Aislador de caucho con núcleo de plomo	Aislador de Caucho con núcleo de Plomo	Aislador de Alto Amortiguamiento	Aislador de Alto Amortiguamiento
Variable	u o Qd	u o Qd	K	Kd	Qd	Kd	Qd
Mínimo Factor de Modificación λ_{max}	1.6	2.25	1.3	1.3	1.5	2	1.7
Máximo Factor de Modificación λ_{min}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

- 2) Los dispositivos Clase II son aquellos que no cumplan con los requisitos establecidos para la Clase I y sus valores se encuentran acotados por los valores indicados en la Tabla N°3.

Tabla 8.Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase II.

Tabla N° 3: Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase II ^(*)							
	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	Aislador de bajo amortiguamiento	Aislador de caucho con núcleo de plomo	Aislador de Caucho con núcleo de Plomo	Aislador de Alto Amortiguamiento	Aislador de Alto Amortiguamiento
Variable	u o Qd	u o Qd	K	Kd	Qd	Kd	Qd
Mínimo Factor de Modificación λ_{max}	2.1	3.2	1.8	1.8	1.8	2.2	1.8
Máximo Factor de Modificación λ_{min}	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

- h) Los valores de modificación (λ) que se deben emplear para cada uno de los dispositivos se deben tomar de las tablas N° 2 ó N° 3 según los dispositivos se hayan clasificado como clase I ó clase II respectivamente.
4. Límite superior y límite inferior del comportamiento fuerza-desplazamiento de los componentes del sistema de aislamiento sísmico:
- a) Se debe plantear un modelo matemático correspondiente al límite superior del comportamiento histerético (fuerza-desplazamiento) de cada tipo de componente de los que contiene el sistema de aislamiento sísmico.
 - b) El límite superior del comportamiento histerético de los componentes del sistema de aislamiento sísmico que son esencialmente dispositivos histeréticos (por ejemplo, los aisladores) debe modelarse utilizando los valores máximos de las propiedades del aislador, los cuáles han sido calculados mediante los factores de modificación de las propiedades de los aisladores, tal como se explica en el numeral 13.3 del artículo 13 de la Norma Técnica E-031.
 - c) El límite superior del comportamiento histerético de los componentes del sistema de aislamiento sísmico que son esencialmente dispositivos viscosos (por ejemplo, amortiguadores viscosos suplementarios) debe plantearse de conformidad con los requisitos del Capítulo 18 del ASCE 7-16 “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, para este tipo de dispositivos.
 - d) Hay que desarrollar el modelo matemático correspondiente al límite inferior del comportamiento histerético (fuerza-desplazamiento) de cada tipo de componente del sistema de aislamiento sísmico.
 - e) Para lograr el límite inferior del comportamiento histerético de los componentes del sistema de aislamiento sísmico que son fundamentalmente histeréticos (por ej., los aisladores del sistema) se debe modelar con el límite inferior correspondiente, que se podrá calcular con los valores mínimos de las propiedades del aislador, los cuales se calculan mediante los factores de modificación de las

propiedades, según el numeral 13.3 del artículo 13 de la Norma Técnica E-031.

5. Propiedades del sistema de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo:

a) La rigidez efectiva, K_M , del sistema de aislamiento sísmico para el desplazamiento traslacional, D , se debe calcular utilizando tanto el límite superior como el límite inferior del comportamiento histerético (fuerza-desplazamiento) de una unidad de cada tipo de aislador, de acuerdo con la ecuación 3:

$$k_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M}$$

El amortiguamiento efectivo, β_M , del sistema de aislamiento sísmico para el desplazamiento traslacional, D_M , se debe calcular utilizando tanto el límite superior como el límite inferior del comportamiento histerético (fuerza-desplazamiento) de una unidad de cada tipo de aislador, de acuerdo con la ecuación 4:

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi k_M D_M^2}$$

Donde

$\sum E_M$ = Energía total disipada por el sistema de aislamiento sísmico durante un ciclo completo de respuesta al desplazamiento, D_M , expresada en kN.mm.

$\sum |F_M^+|$ = Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento sísmico para un desplazamiento positivo igual al desplazamiento D_M , expresada en kN.

$\sum |F_M^-|$ = Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento sísmico para un desplazamiento negativo igual al desplazamiento D_M , expresada en kN.

6. El límite superior y el límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico:

Para el desplazamiento máximo son las propiedades del sistema de aislamiento sísmico y de la estructura analizadas de manera independiente para las propiedades de límite superior y de límite inferior en el diseño, y el resultado corresponde al caso más desfavorable en cada parámetro de respuesta de interés. Además, el análisis ha de ser el siguiente:

- a) Para el procedimiento de fuerzas estáticas equivalentes y para los propósitos de establecer fuerzas mínimas y desplazamientos mínimos para el análisis dinámico, las siguientes variables se calcularán de forma independiente para el límite superior y el límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico: K_M y β_M de la ecuación 3 y 4, DM del numeral 20.1 (Ec. 6 RNE E-031), TM del numeral 20.2 (Ec. 7 RNE E-031), DTM del numeral 20.3 (Ec. 8 RNE E-031), V_b del numeral 21.1 (Ec. 10 RNE E-031), y VS y VST del numeral 21.2 (Ec. 11 y Ec. 12 RNE E-031).
- b) Los límites de VS establecidos en el artículo 21.3 de la Norma Técnica E-031 deben evaluarse de manera independiente para el límite superior y el límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico, prevaleciendo el requisito más desfavorable.
- c) Para el cálculo de la fuerza lateral equivalente y para fijar las fuerzas mínimas de corte de entrepiso para el análisis espectral de la respuesta, la distribución de la fuerza vertical mencionada en el artículo 22 de esta Norma Técnica se calcula separadamente para el límite superior y el límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico y esto requiere el cálculo separado de F_1 , F_i y k , utilizando las ecuaciones de la distribución de la fuerza vertical.

Selección del procedimiento de análisis para estructuras aisladas.

Respecto al *Artículo 16 de la Norma técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”*, donde hace mención a la selección de procedimientos de análisis a estructuras aisladas, se detalla lo siguiente:

1. Las estructuras sísmicamente aisladas, excepto las definidas en el artículo 17 de la Norma Técnica E-031, deben ser diseñadas usando los

procedimientos dinámicos del capítulo VI de la mencionada Norma Técnica.

2. Cuando adicionalmente se utilicen amortiguadores de fluido viscoso en el sistema de aislamiento sísmico, debe usarse el procedimiento de análisis dinámico tiempo- historia, como se indica en el numeral 18.2 del artículo 18 de la Norma Técnica E-031.

Análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes

Respecto al *Artículo 17 de la Norma técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”*, donde hace mención a análisis estático de estructuras aisladas, se detalla lo siguiente:

El El procedimiento de fuerzas estaticas equivalentes, expuesto en el capítulo V de la presente Norma Técnica correspondiente a este asunto, se podrá utilizar para la estructura sísmicamente aislada en la medida en que se satisfagan las siguientes condiciones, así el punteo a continuación describe los límites superior e inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico, prevaleciendo aquel que impone mayor exigencia:

1. Hubiera de tener, la estructura que cumple estas condiciones, que situarse en zonas sísmicas 1 o 2, o en la zona sísmica 3 sobre suelos de tipo S1 o sobre suelos de tipo S2, o bien en la zona sísmica 4 sobre suelos de tipo S1.
2. El periodo efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento traslacional, T_M , ha de ser menor o igual a 5,0 s.
3. La estructura sobre la interfaz no ha de tener más de 4,0 pisos ni más de 20 m de altura, medida desde el nivel de la base de la estructura.
4. El amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico correspondiente al desplazamiento traslacional, β_M , ha de ser menor o igual a 30% del amortiguamiento crítico.
5. El periodo efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento traslacional, T_M , será mayor que 3 T_M , el periodo que presenta la estructura que está situada por encima del sistema de aislamiento sísmico, considerada la misma con base fija.

6. La estructura situada por encima del nivel de aislamiento sísmico no puede exhibir ninguna de las irregularidades que se encuentran descritas en el numeral 8.1 del artículo 8 de la Norma Técnica E-031.
7. El sistema de aislamiento sísmico deberá ser capaz de cumplir las siguientes condiciones:
 - a) La rigidez efectiva del sistema de aislamiento sísmico correspondiente al desplazamiento traslacional será mayor que $1/3$ de la rigidez efectiva a un 20 % del desplazamiento máximo.
 - b) El sistema de aislamiento sísmico debe ser capaz de proporcionar una fuerza de restitución lateral, tal como está indicado en el numeral 9.4 del artículo 9 de la Norma Técnica E-031.
 - c) El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento sísmico debe ser como mínimo el desplazamiento total máximo, D_{TM} .

Análisis dinámico

Respecto al *Artículo 18 de la Norma técnica E.031 ‘‘Aislamiento Sísmico’’*, donde hace mención a análisis dinámico de estructuras aisladas, se detalla lo siguiente:

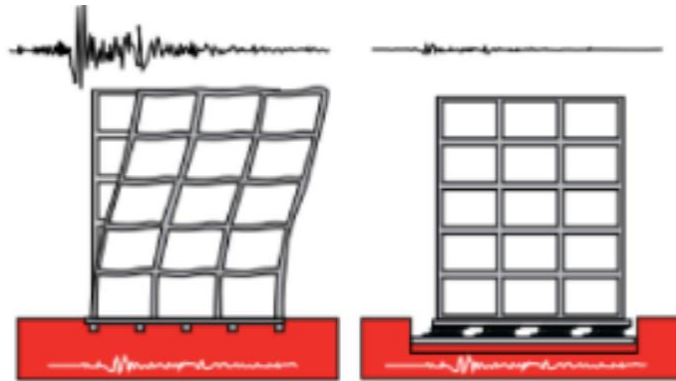
Los procedimientos de análisis dinámico mencionados previamente se llevan a cabo en conformidad a las siguientes disposiciones:

1. Análisis modal espectral: El análisis dinámico en modalidad espectral se puede dar en el diseño de estructuras sísmicamente aisladas solamente en caso de que se verifiquen los criterios necesarios para que se pueda llevar a cabo el análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes.
2. Análisis tiempo-historia: El análisis tiempo–historia está permitido para el diseño de todas aquellas estructuras sísmicamente aisladas y debe, además, necesariamente plantearse para todas aquellas que no cumplen con los criterios requeridos para poder realizar el análisis modal espectral.

Aisladores en la base

La aislación sísmica de base es un método eficiente de protección sísmica para edificios relativamente bajos o rígidos. En la Figura 02 se puede observar un esquema comparativo entre un edificio con aisladores y uno convencional.

Figura 2. Edificio sin y con aislación sísmica en la base.



Fuente: Cámara chilena de la construcción, 2011.

En la actualidad, los aisladores que predominan son aquellos de tipo elastomérico y los de tipo deslizantes o friccionantes. Los aisladores elastoméricos están formados por capas de elastómero (es decir, de caucho) intercaladas con láminas de acero y en general, tienen secciones circulares o cuadradas, lo que permite dotarlas de cierta flexibilidad y a su vez facilitar el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura y el suelo.

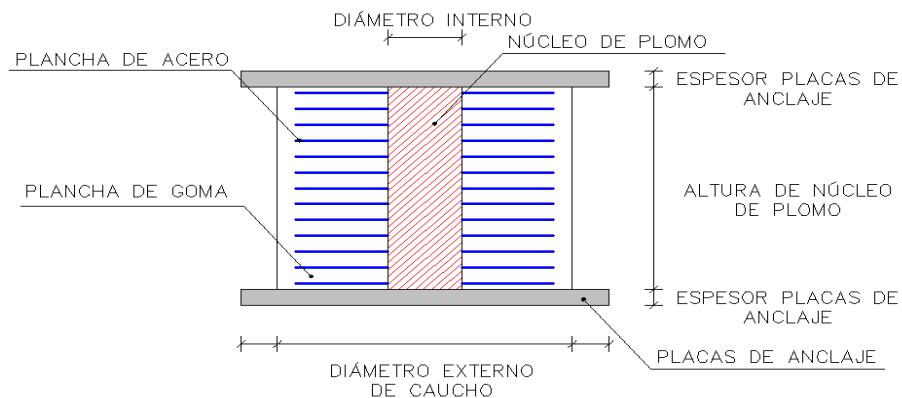
Los tipos de aisladores elastoméricos son diferentes, entre los cuales se encuentran los aisladores de bajo amortiguamiento (LDRB), de alto amortiguamiento (HDRB) y los de núcleo de plomo (LRB) (Cámara Chilena de la construcción, 2011).

Aislador elastomérico con núcleo de plomo.

El aislador con núcleo de plomo (LRB) se inventó en 1975 en Nueva Zelanda y ha sido usado ampliamente en Estados Unidos y Japón. Se construyen habitualmente de caucho de bajo amortiguamiento alternado con planchas de acero y en el centro se deja un agujero en el que se coloca el núcleo de plomo, bajo presión y se convierten en una unidad. La finalidad del núcleo de plomo es proveer medios adicionales de disipación de energía, proporcionando capacidad adicional de absorción de energía mediante numerosos ciclos histeréticos estables ya que este fluye (a una tensión de 102 Kg/cm²) y recrystaliza a temperatura ambiente; esto hace que tenga una buena resistencia a la fatiga.

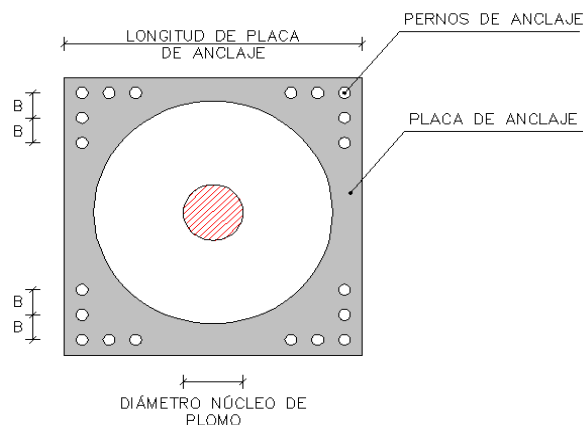
La adición del núcleo de plomo genera básicamente el incremento de amortiguamiento al sistema de aislamiento, y proporciona mayor rigidez torsional al edificio aislado, al generar mayor amortiguamiento se disminuye el desplazamiento de diseño, se aumenta la rigidez del sistema y posteriormente se disminuye el periodo objetivo. En la figura 03 y 04 se pueden apreciar detalles del aislador elastomérico con núcleo de plomo. (Soriano, 2014)

Figura 3. Detalles de Aislador Elastomérico con Núcleo de plomo en elevación.



Fuente: Brochure de Dynamic Isolation System, 2014

Figura 4. Detalles de Aislador Elastomérico con Núcleo de plomo en planta.



Fuente: Brochure de Dynamic Isolation System, 2014

2.2.10. Procedimiento de análisis dinámico.

Modelo estructural de la edificación

Respecto al Artículo 24 de la Norma técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”, donde hace mención al modelo estructural de la edificación, se detalla lo siguiente:

En el procedimiento de análisis dinámico, el modelo estructural de la edificación, que incluye el sistema de aislamiento sísmico, el sistema resistente a fuerzas sísmicas y otros elementos estructurales, debe encontrarse conforme a lo dispuesto por la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente y a los requerimientos siguientes:

1. Sistema de aislamiento sísmico:

- a) El sistema de aislamiento sísmico se modela usando las características de deformación desarrolladas de acuerdo a los requerimientos del artículo 13 de la Norma Técnica E-031.
- b) Los desplazamientos y fuerzas laterales deben ser calculados de forma separada para las propiedades límite superior e inferior del sistema de aislamiento sísmico tal como se define en el numeral 13.4 del artículo 13 de la Norma Técnica E-031.
- c) El sistema de aislamiento sísmico se debe modelar de forma detallada, de manera que permita:
 - Considerar la distribución espacial de las unidades de aislamiento.
 - Estimar la traslación en ambas direcciones horizontales y la torsión de la superestructura considerando la ubicación más desfavorable de la excentricidad de la masa.
 - Evaluar los efectos del momento de volteo y el posible levantamiento de las unidades de aislamiento.
 - Considerar los efectos de la carga vertical, las acciones bidireccionales y la velocidad de carga en caso de que las relaciones de fuerza - deformación sean dependientes de una o más de estas variables.
- d) El desplazamiento total (D_{TM}) en el sistema de aislamiento sísmico, es calculado mediante un modelo matemático que incorpora el sistema resistente a fuerzas laterales y las características fuerza - deformación de los elementos no lineales del sistema de aislamiento sísmico.

2. Estructura aislada:

- a) Se permite calcular el desplazamiento de cada nivel y las fuerzas de diseño en los elementos del sistema sismorresistente, mediante un modelo elástico lineal de la superestructura.

- b) El análisis del sistema de aislamiento sísmico y de la estructura se realizará por separado para las propiedades límite superior e inferior y se usa para el diseño el resultado más crítico para cada parámetro de respuesta de interés.

Descripción del procedimiento

Respecto al Artículo 25 de la Norma técnica E.031 “Aislamiento Sísmico”, donde hace mención del procedimiento de análisis dinámico, se detalla lo siguiente:

Los procedimientos de análisis dinámico modal espectral y análisis tiempo-historia se deben realizar de acuerdo a la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente y a los requerimientos siguientes:

1. **Solicitud sísmica:**

El sismo máximo considerado se debe usar para calcular las fuerzas laterales, los desplazamientos de la superestructura, el desplazamiento total del sistema de aislamiento sísmico, las fuerzas en las unidades de aislamiento, las fuerzas en sus conexiones y las fuerzas en el sistema de vigas que se ubican sobre y por debajo del sistema de aislamiento sísmico para resistir el efecto P-Delta.

2. **Procedimiento modal espectral:**

- a) Para los modos de vibración asociados al aislamiento sísmico, se debe emplear el menor valor entre el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico y el 30 % del amortiguamiento crítico.
- b) Los valores de amortiguamiento modal para los otros modos deben ser seleccionados consistentemente con aquellos valores correspondientes a la estructura con base fija.
- c) El análisis modal espectral de cada dirección debe efectuarse empleando el espectro al 100 % en la dirección de análisis más el 30 % en la dirección perpendicular.

En cada dirección de análisis, el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento sísmico debe calcularse como la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales.

3. **Análisis tiempo-historia:**

- a) Este procedimiento se debe desarrollar con un conjunto de pares de registros del movimiento del terreno que deben ser seleccionados y escalados según el artículo 15 de la Norma Técnica E-031 y lo señalado en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente.
 - b) Cada par de componentes del movimiento de terreno debe ser aplicado simultáneamente al modelo considerando la orientación y la ubicación de la excentricidad de la masa más desfavorable.
 - c) El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento sísmico debe ser calculado mediante la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales en cada instante de tiempo.
 - d) Los parámetros de interés deben ser calculados para cada movimiento del terreno usado para el análisis tiempo-historia y el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés debe ser empleado para el diseño.
 - e) Para zonas cercanas a una falla geológica, cada par de componentes horizontales se debe rotar para ubicarse en la dirección paralela y perpendicular a la falla, y aplicarse a la edificación en cada dirección. En otros casos, no es necesario aplicar las componentes en múltiples direcciones.
4. Excentricidad accidental de la masa:
- a. La respuesta torsional ocasionada por la falta de simetría de masa y rigidez debe ser considerada en el análisis.
 - b. Cada una de las dos direcciones ortogonales de análisis debe considerar, por separado, la excentricidad accidental consistente en el desplazamiento del centro de masa de la posición calculada en una magnitud igual a 5% de la dimensión del diafragma.

2.3.DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- ✓ **Edificación esencial:** Es aquella cuya operatividad debe mantenerse tras un sismo severo, por su función crítica en la atención de la población o la continuidad de servicios básicos. Según la Norma E.030 (Art. 6), los centros educativos forman parte de esta categoría, debiendo diseñarse para garantizar seguridad estructural, estabilidad y funcionamiento inmediato después de un evento sísmico.
- ✓ **Análisis no lineal:** Es una metodología que permite evaluar la respuesta real de una estructura considerando la no proporcionalidad entre cargas y deformaciones debida al comportamiento inelástico de los materiales. Este tipo de análisis permite identificar la formación de rótulas plásticas, los niveles de desempeño estructural y la capacidad de disipación de energía de la edificación ante acciones sísmicas, siendo fundamental para estudios de desempeño según los criterios de ASCE/SEI 41-17, FEMA 356 y la Norma E.030.
- ✓ **Análisis pushover:** Según (Fajfar. P, Marušić, D. y Peruš I., 2005), es un método sencillo y efectivo para analizar la capacidad y la relación entre resistencia y deformación de una estructura frente a una aplicación de fuerzas inerciales. Se lleva a cabo este análisis al exponer la estructura a un conjunto de cargas laterales F_i , aumentando de manera gradual hasta que la estructura llega a su máxima capacidad.
- ✓ **Sistema de aislamiento sísmico:** Conjunto de elementos estructurales que incluye los aisladores, así como todos los elementos que transfieren fuerzas entre elementos del sistema de aislamiento sísmico, como vigas, losas, capiteles y sus conexiones. Asimismo, incluye los sistemas de restricción contra viento, los dispositivos de disipación de energía y los sistemas de restricción de desplazamiento, siempre que estos elementos sean usados para satisfacer los requisitos mínimos de diseño de esta Norma Técnica. (Norma Técnica E.031, 2019, p.3).
- ✓ **Amortiguamiento efectivo:** Valor del amortiguamiento viscoso equivalente correspondiente a la energía disipada en la respuesta cíclica del sistema de

aislamiento sísmico, expresado como fracción del amortiguamiento crítico. (Norma Técnica E.031, 2019, p.3).

- ✓ **Sistema de restricción de desplazamiento:** Conjunto de elementos estructurales que controlan progresivamente el desplazamiento lateral de las estructuras sísmicamente aisladas. (Norma Técnica E.031, 2019, p.4).
- ✓ **Elementos tipo link:** Se define el uso de “nonlinear spring elements” y “link elements” para representar muros de mampostería, aisladores, disipadores o resortes equivalentes en modelos de análisis no lineal (ASCE/SEI 41-22, cap. 7 y Apéndice A).
- ✓ **Rótula plástica:** Es una zona localizada de una viga o columna donde el material alcanza su fluencia, permitiendo rotaciones inelásticas y disipación de energía sin incremento significativo de momento. Su representación permite evaluar la ductilidad y el nivel de desempeño estructural en análisis no lineales, conforme a los criterios de ASCE/SEI 41-22, FEMA 356 y la filosofía de diseño por capacidad de la Norma Técnica E.030.
- ✓ **Acelerogramas:** Es el registro del movimiento del terreno durante un sismo, expresado como aceleración en función del tiempo, que representa la acción sísmica aplicada a una estructura. De acuerdo con la Norma E.030 (2019), pueden ser reales o sintéticos, y deben ser espectro-compatibles, de modo que su espectro de respuesta no sea inferior al 90 % del espectro de diseño en el rango de periodos significativo de la estructura.
- ✓ **Espectros compatibles:** Son aquellos que resultan del ajuste o escalamiento de registros sísmicos (acelerogramas) de manera que su espectro de respuesta reproduzca, dentro de un rango de periodos específico, el espectro de diseño definido por la norma. Según la Norma E.031 (Art. 15.7), este rango comprende $0,2 T_m \leq T \leq 1,25 T_m$, y el espectro del registro en la dirección analizada no debe ser inferior al 90 % del espectro objetivo, asegurando así la representatividad del movimiento sísmico para el análisis estructural.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Módulo N°04 que se analizó en esta investigación, se ubica en el departamento de Cajamarca, provincia de Jaén, distrito de Jaén, perteneciente a la I.E. Cristo Rey N° 16006.

Tabla 9.Coordenadas UTM y geográficas del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006

N°	COORDENADAS UTM WGS-84		COORDENADAS GEOGRÁFICAS – Zona 17		
	NORTE	ESTE	LONGITUD	LATITUD	COTA
A	9365609.307	744680.879	78° 47' 26.4'' OESTE	05° 44' 6.26'' SUR	809.50 MSNM
B	9365598.197	744680.879	78° 47' 26.4'' OESTE	05° 44' 6.62'' SUR	809.50 MSNM
C	9365598.197	744701.809	78° 47' 25.7'' OESTE	05° 44' 6.62'' SUR	809.50 MSNM
D	9365609.307	744701.809	78° 47' 25.7'' OESTE	05° 44' 6.26'' SUR	809.50 MSNM

Figura 5. Plano de localización de la I.E. Cristo Rey N° 16006.

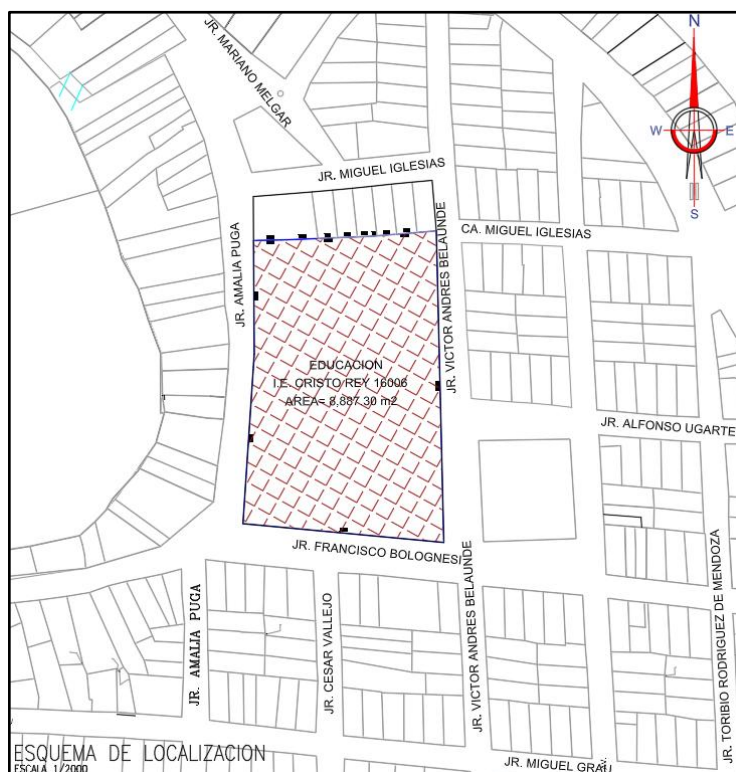
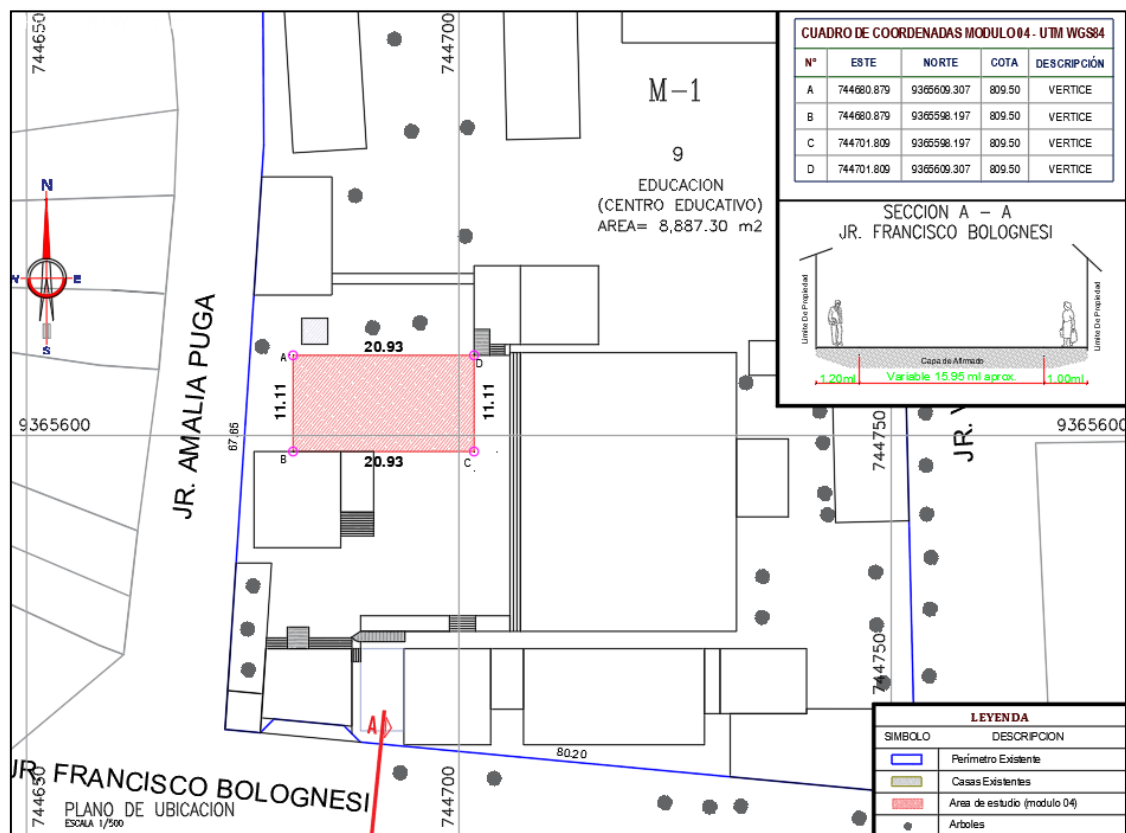


Figura 6. Plano de ubicación del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006.



3.2. TIEMPO Y ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se realizó entre 2024 y 2025, con el objetivo de establecer un procedimiento de diseño detallado y comprensible sobre el análisis del sistema de aislamiento sísmico, utilizando la norma E-031.

3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Hipótesis General

La incorporación de aisladores sísmicos tipo LRB en el Módulo N.º 04 de la I.E. Cristo Rey N.º 16006 reduce la deriva entrepiso máxima, los desplazamientos laterales y el cortante basal frente a la acción sísmica, en comparación con la condición de base fija, logrando el cumplimiento de los límites de desempeño exigidos por la NTE E.030 y la NTE E.031.

3.4.DEFINICIÓN DE VARIABLES

3.4.1. Variable Dependiente

Respuesta del desempeño estructural del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006 (evaluado con y sin aisladores sísmicos).

3.4.2. Variable Independiente

Condición del sistema estructural (aislamiento sísmico).

3.5.METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.5.1. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, ya que se utilizaron los procedimientos establecidos en la norma N.T.E. E-031 para el análisis y diseño del sistema de aislamiento.

3.5.2. Nivel de investigación

El nivel fue analítico-explicativo, porque se llevó a cabo el análisis y diseño del sistema de aislamiento sísmico, obteniendo valores cuantitativos y verificando si cumplían con los requisitos de la norma N.T.E. E-031.

3.5.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental – descriptivo comparativo, dado que no se manipuló directamente ninguna variable física, sino que se analizaron dos condiciones estructurales predefinidas (sin y con aisladores sísmicos).

3.5.4. Método de investigación

El método de la investigación fue cuantitativo-analítico, basado en la obtención y procesamiento de datos numéricos provenientes de los modelos estructurales simulados en el software especializado (ETABS).

3.5.5. Procedimiento de análisis estático no lineal pushover

- **Modelación y propiedades del sistema estructural:** Se elaboró el modelo estructural del Módulo N.º04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006, considerando la condición de base fija. En esta etapa se definieron los elementos resistentes (vigas, columnas, muros y losas), sus dimensiones geométricas y las propiedades mecánicas de los materiales, además de las condiciones de apoyo correspondientes.
- **Definición de la no linealidad mediante rótulas plásticas:** Se asignaron rótulas plásticas en las zonas críticas de vigas, columnas y muros, de acuerdo

con los modelos de capacidad adoptados, con el propósito de representar el comportamiento inelástico progresivo, incluyendo la pérdida de rigidez y la evolución del daño bajo incrementos de demanda lateral.

- **Aplicación de cargas gravitacionales y establecimiento del estado inicial:** Se aplicaron las cargas gravitacionales (carga muerta y el porcentaje normativo de carga viva) y se ejecutó un análisis estático lineal. Los resultados obtenidos se asumieron como condición inicial del modelo antes de aplicar la acción lateral incremental del pushover.
- **Configuración del pushover y patrones de carga lateral:** Se definieron los patrones de carga lateral que representan la distribución de fuerzas sísmicas en altura. Asimismo, se seleccionó un nodo de control ubicado en la azotea y se configuró el tipo de control del análisis (por desplazamiento del nodo o por incremento de fuerza), los incrementos de aplicación y la dirección del análisis en los ejes globales X o Y.
- **Ejecución del análisis y determinación del desempeño:** Se ejecutó el pushover incrementando gradualmente la acción lateral y resolviendo el equilibrio no lineal en cada paso, registrando el cortante basal, el desplazamiento del nodo de control y el estado de las rótulas plásticas. Con esta información se construyó la curva de capacidad global (cortante basal vs. desplazamiento), se identificaron puntos característicos (fluencia, formación de mecanismos plásticos y proximidad de colapso) y se superpuso la curva con el espectro de demanda para determinar el punto de desempeño. Finalmente, a partir de dicho punto se evaluaron las derivas de entrepiso, los desplazamientos máximos y el nivel de daño en función del estado de las rótulas.

3.5.6. Procedimiento del análisis no lineal tiempo-historia para el sistema de aislamiento sísmico tipo LRB

- **Marco de diseño y niveles de amenaza:** Se estableció el marco de diseño del análisis, definiendo los niveles de amenaza sísmica a evaluar: DBE y MCE, como base para el planteamiento de las verificaciones de desempeño del sistema aislado.
- **Criterios de aceptación (desempeño):** Se definieron los criterios de aceptación asociados al sistema de aislamiento y a la superestructura, considerando: desplazamiento de diseño de los aisladores, derivas máximas de entrepiso,

cortante basal, aceleraciones de piso, verificación de estabilidad $P-\Delta$ y holguras de junta sísmica.

- **Modelación de la superestructura en ETABS:** Se construyó el modelo estructural de la superestructura en ETABS, definiendo la geometría, secciones, conectividad de los elementos resistentes, la condición de diafragmas rígidos o semirrígidos por nivel y las propiedades de los materiales.
- **Definición de masas sísmicas por piso:** Se asignaron las masas sísmicas por nivel, incluyendo la contribución de la fracción normativa de carga viva, de modo consistente con el enfoque normativo adoptado para la demanda dinámica.
- **Modelación del sistema de aislamiento LRB:** Se modeló el sistema de aislamiento tipo LRB en el plano de aislamiento, especificando la ubicación y configuración de los aisladores, e incorporando para cada uno un comportamiento histerético bilineal no lineal, caracterizado por rigidez horizontal inicial y post-fluencia, fuerza de cedencia, rigidez vertical y límites de desplazamiento.
- **Análisis gravitacional inicial y cargas axiales en aisladores:** Se aplicaron las cargas gravitacionales y se ejecutó un análisis estático lineal para obtener el estado inicial previo a los análisis dinámicos. En esta etapa también se determinaron las cargas axiales de trabajo en cada aislador, necesarias para la evaluación de estabilidad y del efecto $P-\Delta$.
- **Configuración dinámica, registros, ejecución y verificación normativa:** se definieron los parámetros de amortiguamiento de la superestructura y los parámetros numéricos del integrador (tamaño de paso, tolerancias, número máximo de iteraciones y criterios de convergencia) para asegurar estabilidad y precisión. Luego se seleccionaron siete pares de registros acelerográficos, escalándolos para lograr compatibilidad del espectro medio con el espectro objetivo en el rango de periodos relevantes, incluyendo el periodo efectivo del sistema aislado. Para cada par se ejecutó el análisis tiempo–historia no lineal aplicando simultáneamente dos componentes horizontales, obteniendo historias de desplazamiento y fuerza en aisladores y envolventes de derivas, aceleraciones de piso, fuerzas internas y cortante basal. Con los bucles histeréticos se calcularon rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente, y finalmente se compararon las demandas con los límites de la NTE E.030 y la NTE E.031; si

hubo incumplimientos, se ajustaron propiedades o disposición de los LRB y se repitió el procedimiento hasta alcanzar el desempeño requerido y consolidar los resultados promedio de los siete pares de registros.

3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.6.1. Población

La población de estudio considerado fueron los módulos estructurales de la institución educativa Cristo Rey N° 16006 ubicada en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca.

3.6.2. Muestra

Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando como muestra el Módulo N° 04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006.

3.7. UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis es el desempeño estructural del Módulo N° 04 bajo dos condiciones: base fija y con aisladores LRB.

3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

a) Observación directa (campo)

Técnica: Observación directa.

Instrumentos:

Ficha de inspección/levantamiento estructural, que sirvió para el registro sistemático de condiciones actuales (tipo de sistema estructural, configuración, discontinuidades, daños visibles como fisuras en vigas, vigas intersección con columnas, columnas y muros, y condiciones generales de conservación).

Registro fotográfico y audiovisual, de cual se documentó evidencias relevantes y sustentar el diagnóstico preliminar.

b) Revisión documental (fuentes secundarias)

Técnica: Revisión documentaria.

Fuentes: Tesis aprobadas, artículos científicos, memorias de congresos, normas técnicas y publicaciones de instituciones académicas y organismos especializados (por ejemplo, NTE E.030 y NTE E.031, repositorios universitarios, IGP y CISMID).

Instrumentos:

Fichas bibliográficas y hemerográficas, para registrar la fuente, año, autores y aportes relevantes.

Fichas de resumen y matriz de sistematización, para sintetizar métodos, variables, resultados y conclusiones empleadas como antecedente y marco teórico.

Fichas digitales (web), para organizar información proveniente de repositorios y bases de datos oficiales.

c) Ensayos y mediciones de campo

Técnica: Ensayos/mediciones in situ.

Instrumentos:

Levantamiento topográfico realizado (cintas, distanciómetro y/o estación total) donde se verificaron las dimensiones de alturas de entrepiso, luces, ejes, respecto a los planos alcanzados.

Recolección del Expediente Técnico y planos disponibles de la institución (estructuras, arquitectura y especificaciones), sirvió para identificar secciones, materiales y distribución de elementos resistentes.

d) Procesamiento y modelación numérica

Técnica: Procesamiento y análisis computacional.

Instrumentos (software):

Excel y Mathcad Prime 11.0, para depuración de datos, cálculos auxiliares, verificación de parámetros, programación y preparación de insumos (tablas de propiedades, combinaciones, espectros y/o registros).

ETABS y SAP2000, para la modelación estructural y ejecución de análisis sísmico estático equivalente y dinámico, tanto en condición convencional (base fija) como con aislamiento sísmico LRB, obteniéndose desplazamientos, derivas y fuerzas internas para la evaluación del desempeño.

3.9.PROCESAMIENTO DE DATOS

- Para el modelamiento de la edificación con su sistema de aislamiento sísmico, se utilizaron los programas ETABS y SAP 2000, para el análisis estructural, además para realizar el análisis dinámico mediante el método de tiempo-historia, se empleó los softwares SeismoSignal y SeismoMatch, que permitió realizar el ajuste o escalamiento espectral de los acelerogramas utilizados.
- Para el diseño del sistema de aislamiento sísmico, se llevaron a cabo los cálculos utilizando hojas de cálculo en Excel y Mathcad prime 11.0, mientras que los resultados fueron presentados mediante Microsoft Word.
- Los planos de la edificación se elaboraron en AutoCAD 2025.
- En el análisis que se presenta a continuación, se siguió el procedimiento establecido por la norma NTE E-031, y apoyo en las normas internacionales como ASCE 7-22 para diseño de sistemas de aislamiento, ilustrado mediante gráficos y tablas.
- Se detalló el proceso de diseño para el sistema de aislamiento, obteniendo los valores de diseño correspondientes.

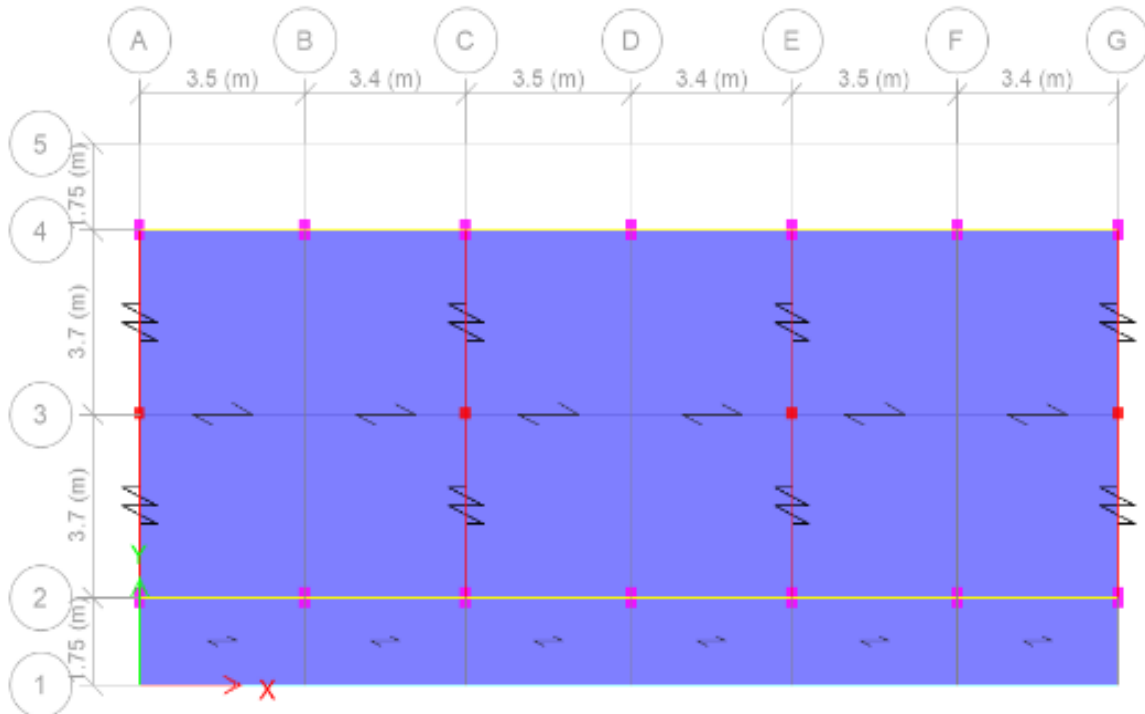
3.10. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se consideró para la respuesta del desempeño estructural del bloque N°04, los valores obtenidos mediante el ensayo no destructivo de esclerometría y la calicata realizada insitu, con las muestras analizadas en el Laboratorio externo: Centro de Investigación de Mecánica de Suelos y Pavimentos (CEIMSUP), para obtener un valor promedio para el uso en nuestro modelo.

El promedio de las medidas con el esclerómetro fue de 288 kgf/cm². Dado que no se contó con curva de correlación específica, y siguiendo criterios conservadores de la literatura, se adoptó el **70 % del promedio** como estimación de la resistencia a compresión in situ, resultando un f'_c estimado de **≈201.60 kgf/cm²**. Este valor se consideró únicamente como indicativo y requiere confirmación mediante testigos o pruebas complementarias. (Ver en anexos los resultados de los ensayos en laboratorio).

3.10.1. Resumen del desempeño estructural sin aisladores sísmicos

Figura 7. Planta del modelado estructural del Módulo N°04.



Definición del espectro elástico de aceleraciones y desplazamientos según la Norma Técnica E-030

- ✓ **Zonificación (Artículo 10):** Norma Técnica E-030

Factor de zona: Zona 2 (ciudad de Jaén)

- ✓ **Microzonificación (Artículo 11):** Norma Técnica E-030

Tipo de perfil: S3

- ✓ **Parámetros de sitio (Artículo 13):** Norma Técnica E-030

	S0	S1	S2	S3
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00

Factor de suelo S=1.4

Tabla N° 4 PERÍODOS "T_P" Y "T_L"				
	Perfil de suelo			
	S_0	S_1	S_2	S_3
T_P (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T_L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Periodos: $T_p = 1 \text{ s}$ y $T_L = 1.6 \text{ s}$

- ✓ **Factor de amplificación de fuerzas sísmicas (Artículo 14):** Norma Técnica E-030

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

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

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

- ✓ **Categoría de las edificaciones (Artículo 15):** Norma Técnica E-030

Factor de uso U = Edificación Esencial

- ✓ **Aceleración Espectral (Artículo 29.2):** Norma Técnica E-030

$$S_a := Z \cdot U \cdot C \cdot S$$

Figura 8. Espectro de aceleraciones obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y $R=1$.

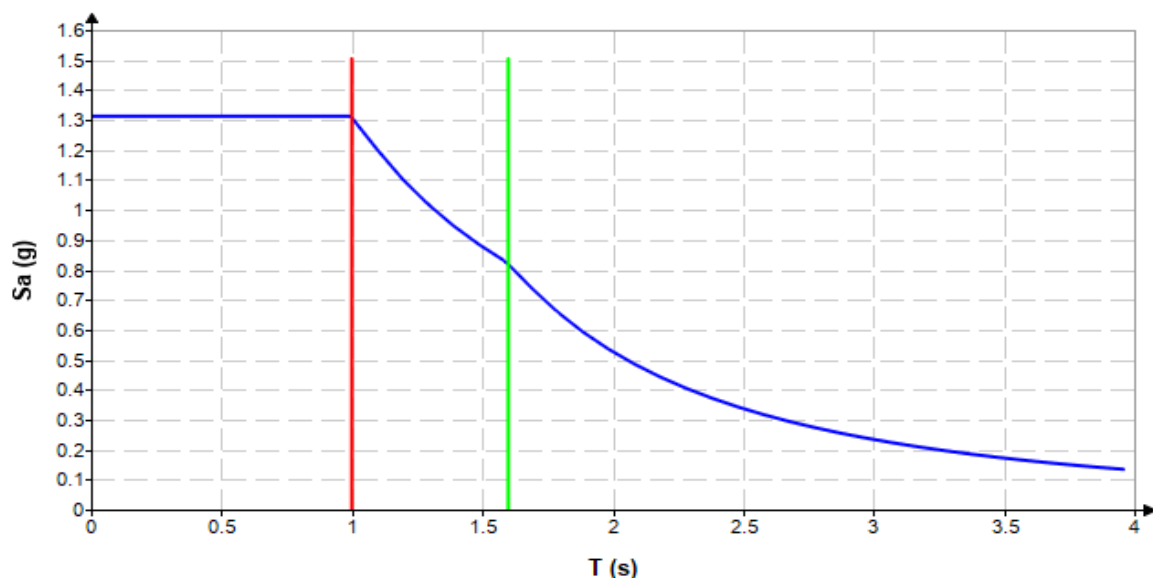


Figura 9. Espectro de desplazamientos obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y R=1.

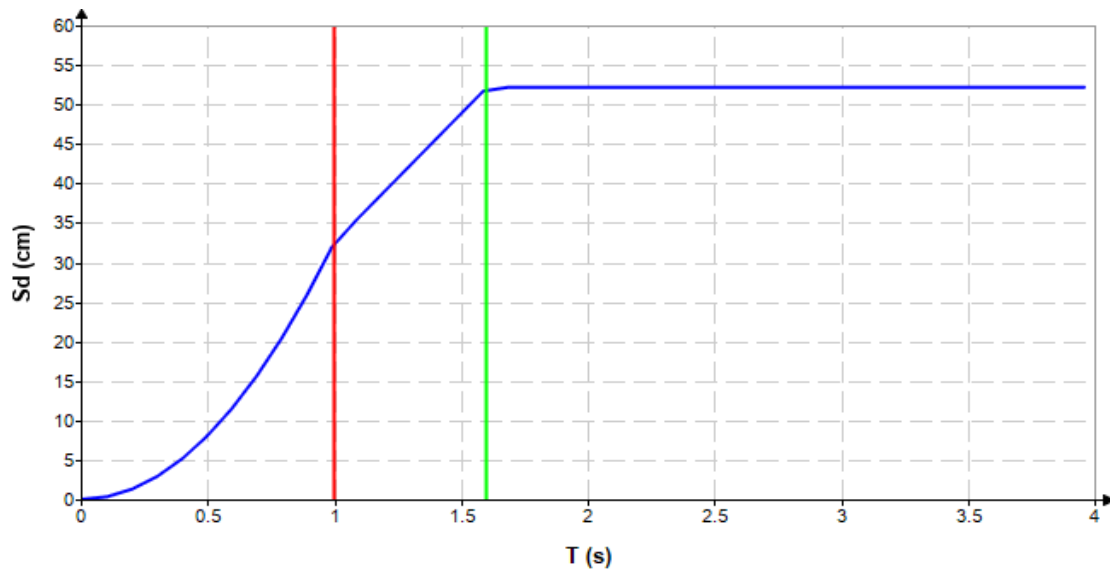
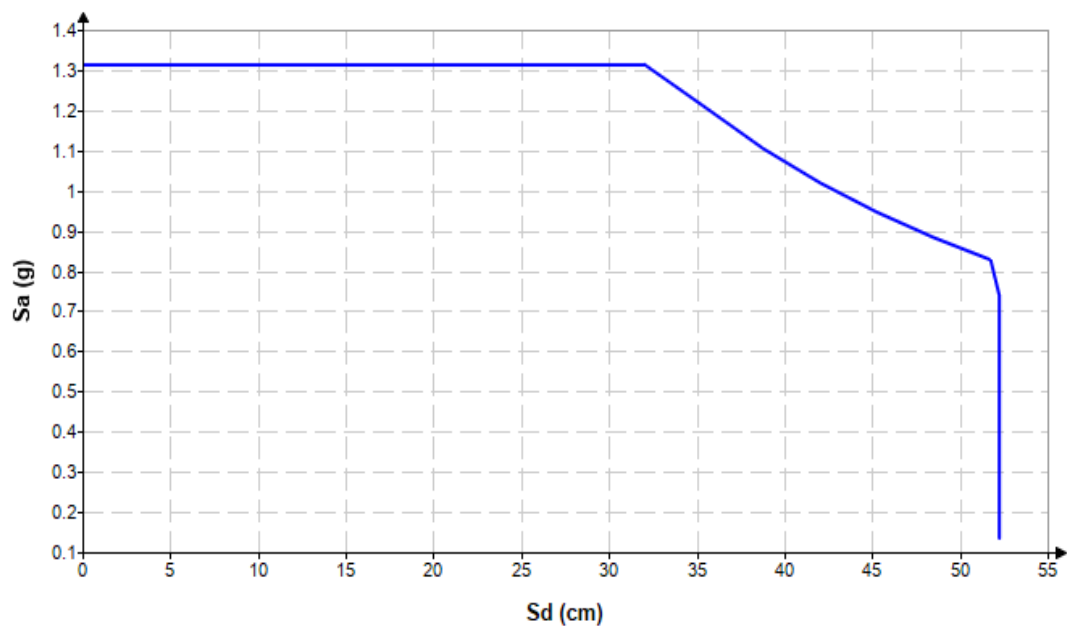


Figura 10. Espectro de demanda obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Técnica E-030, para categoría A2 y R=1.



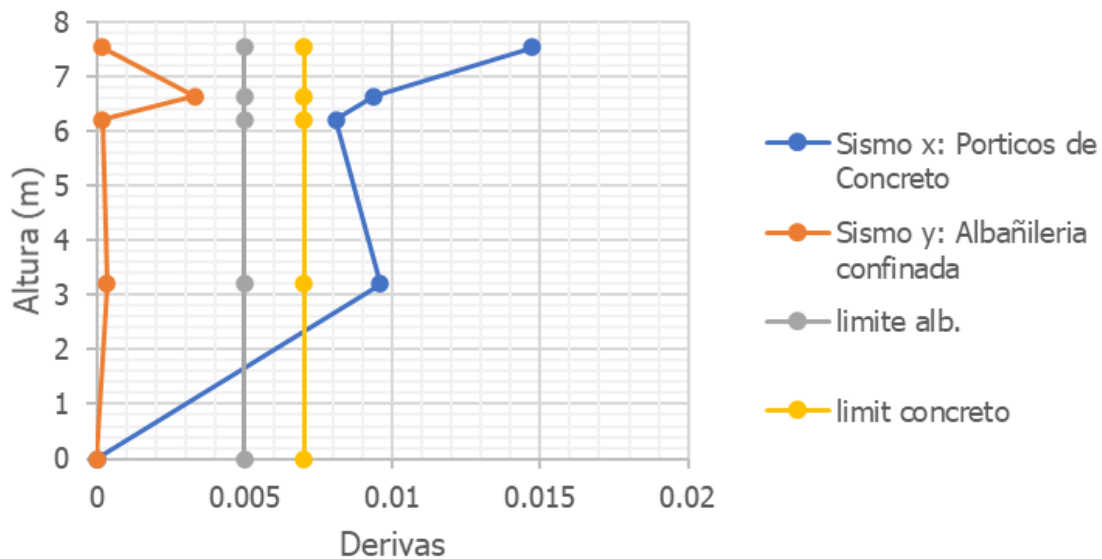
Cálculo de derivas para la dirección X e Y

Luego de realizar el análisis dinámico modal espectral, se obtuvo la tabla resumen del cálculo de derivas para ambas direcciones, de la cual, se concluye que para la dirección X no cumple con el límite normativo de 0.007 correspondiente para pórticos de concreto, mientras que para la dirección Y si cumple con el límite normativo de 0.005 correspondiente a un sistema de albañilería confinada, ver tabla 11 y figura 11.

Tabla 10. Derivas de la edificación existente en ambas direcciones

TABLE: Story Response						
Story	Elevation m	Location	X-Dir	Y-Dir	Limite normativo (Albañilería)	Limite normativo (Concreto)
Story4	7.532	Top	0.014719	0.000183	0.005	0.007
Story3	6.632	Top	0.009378	0.003319	0.005	0.007
Story2	6.206	Top	0.008074	0.000183	0.005	0.007
Story1	3.2	Top	0.009595	0.000331	0.005	0.007
Base	0	Top	0	0	0.005	0.007

Figura 11. Demanda de derivas vs límites de derivas normativas



A continuación, se procedió con el análisis del desempeño del Módulo N°04 usando un análisis estático no lineal (Pushover), donde se definieron rótulas plásticas para columnas y vigas. Los muros de albañilería fueron modelados con elementos Tipo Link, los cuales fueron calibrados con un ensayo experimental extraído de la tesis de pregrado: “Ensayos cíclicos en muros de albañilería confinada contruidos con ladrillos king kong de fabricación industrial”, PUCP-2017.

Figura 12. Definición de no linealidad del acero de refuerzo

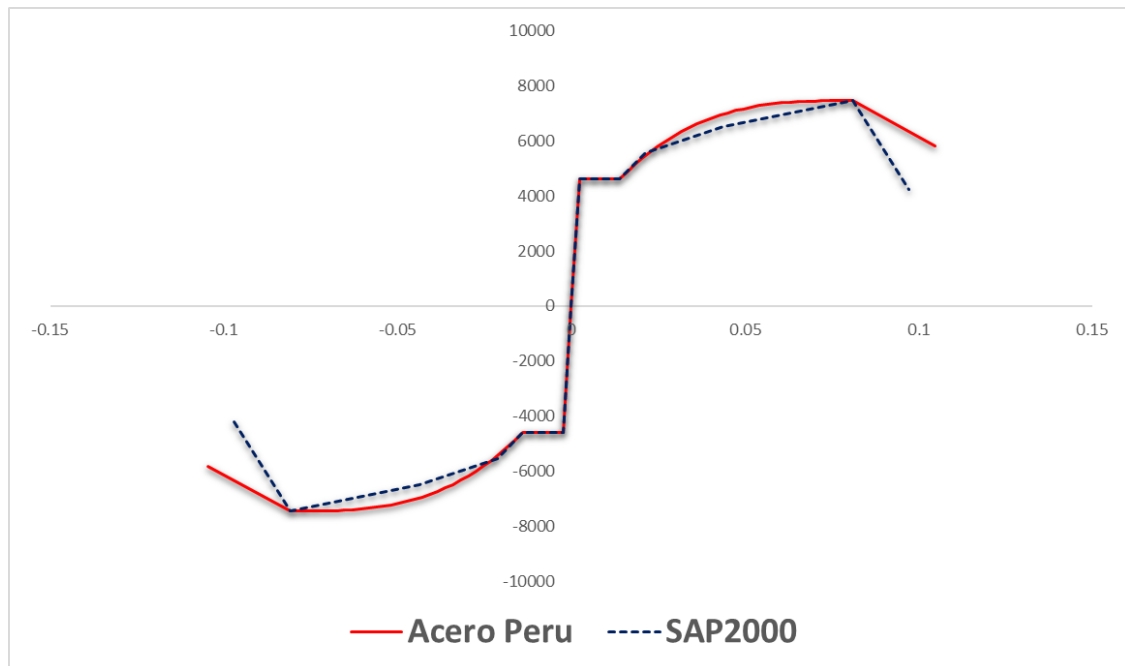


Figura 13. Definición de no linealidad del concreto no confinado

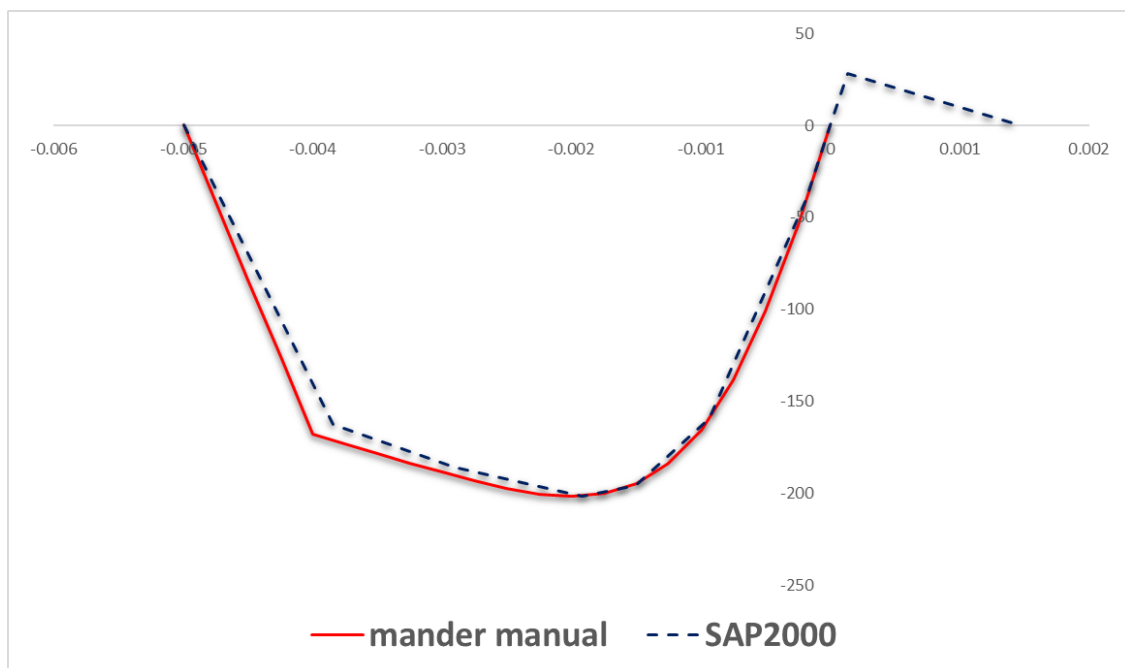
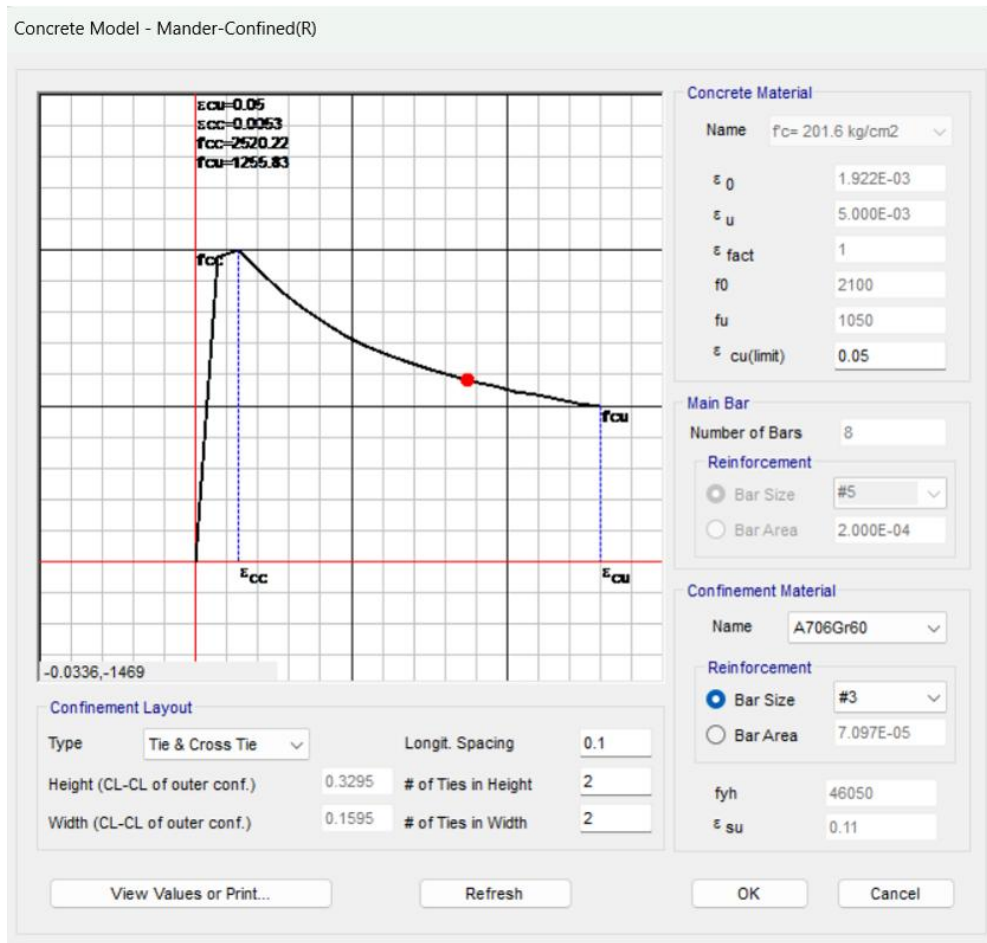


Figura 14. Definición de concreto confinado en vigas y columnas



Definición de rótulas plásticas en columnas y vigas

Figura 15. Definición de rótulas plásticas en columnas

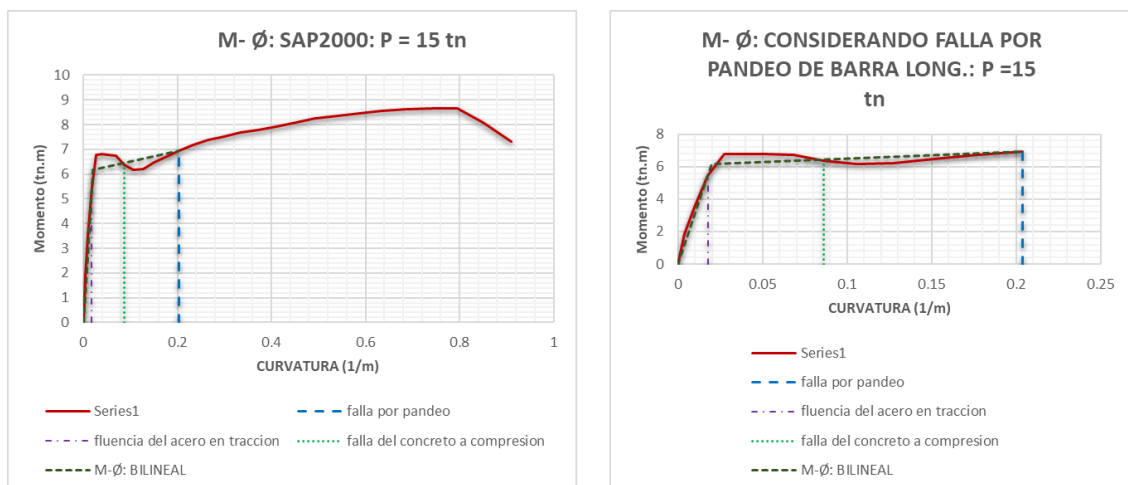


Figura 16. Definición de rótulas plásticas de columnas en software de análisis

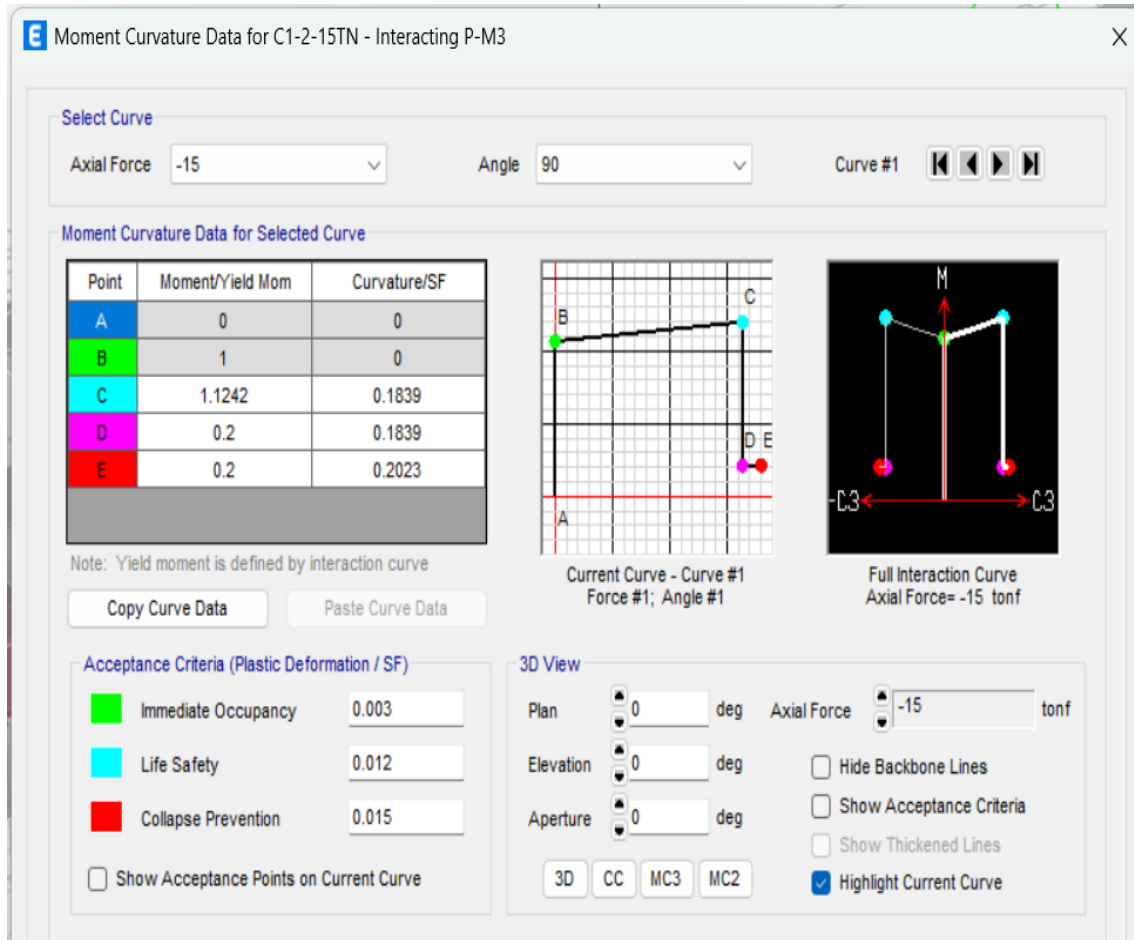


Figura 17. Definición de rótulas plásticas en vigas

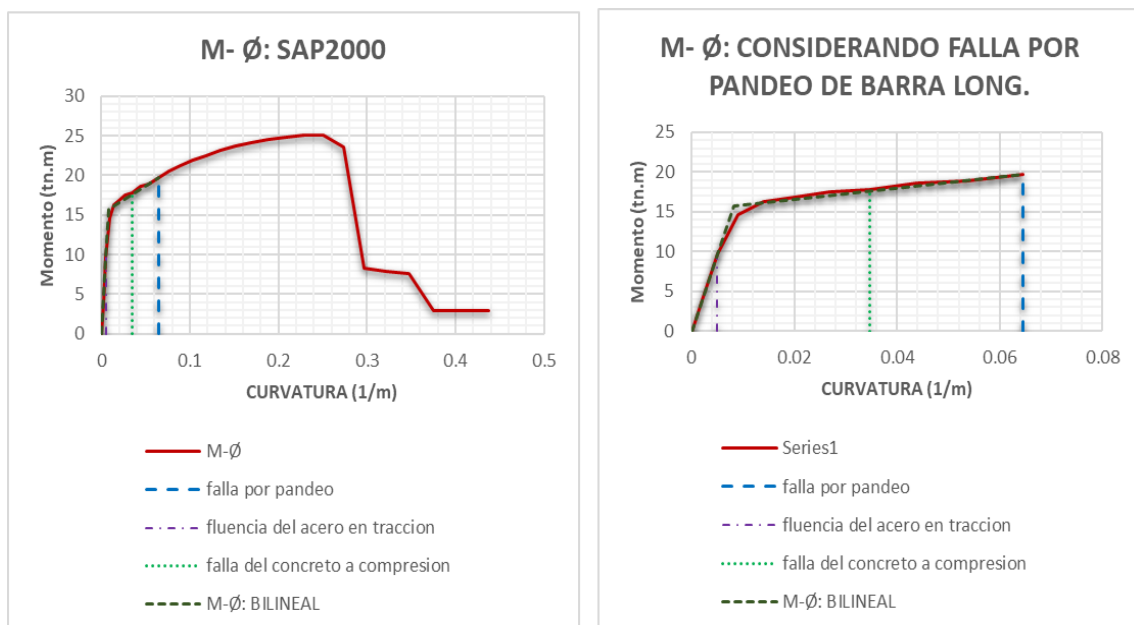


Figura 18. Definición de rótulas plásticas de vigas en software de análisis

Hinge Property Data for V102-1 - Moment M3

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-0.2	-0.0432
D-	-0.2	-0.0393
C-	-1.2142	-0.0393
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.2142	0.0393
D	0.2	0.0393
E	0.2	0.0432

☒ Symmetric

Additional Backbone Curve Points

☐ BC - Between Points B and C

☐ CD - Between Points C and D

Scaling for Moment and Curvature

☐ Use Yield Moment

☐ Use Yield Curvature (Steel Objects Only)

Positive

Moment SF 6.9854

Curvature SF 1

Negative

tonf-m

1/m

Acceptance Criteria (Plastic Curvature/SF)

☒ Immediate Occupancy

☒ Life Safety

☒ Collapse Prevention

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

Positive

0.003

0.012

0.015

Negative

Type

☐ Moment - Rotation

☒ Moment - Curvature

Hinge Length 0.1

☒ Relative Length

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

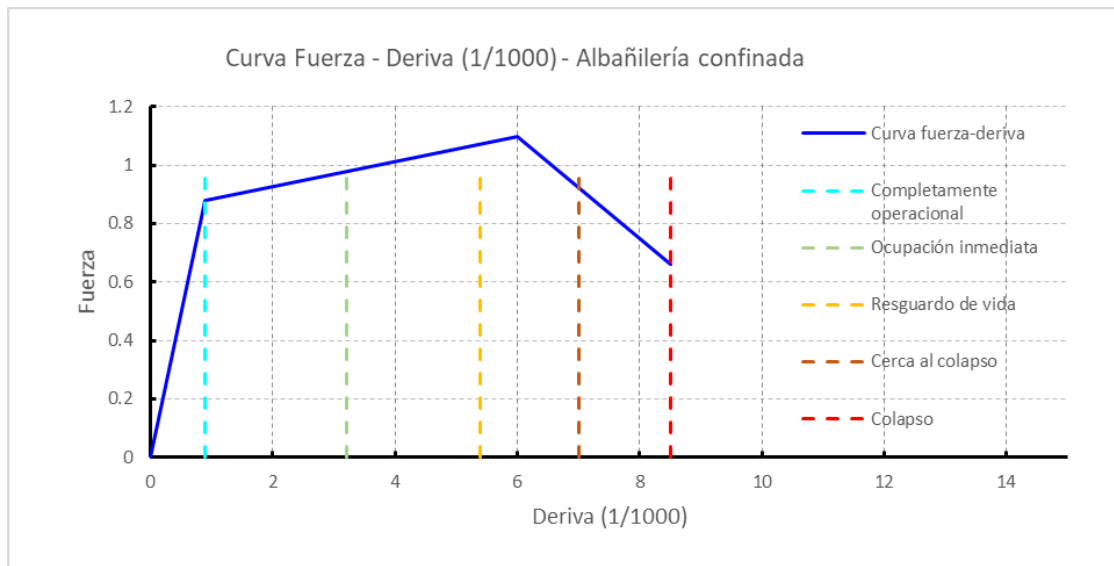
Hysteresis Type and Parameters

Hysteresis Isotropic

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Figura 19. Curva Fuerza – Deriva: Albañilería confinada con ensayo experimental



Calibración con tesis: “Ensayos cíclicos en muros de albañilería confinada contruidos con ladrillos king kong de fabricación industrial”, PUCP-2017.

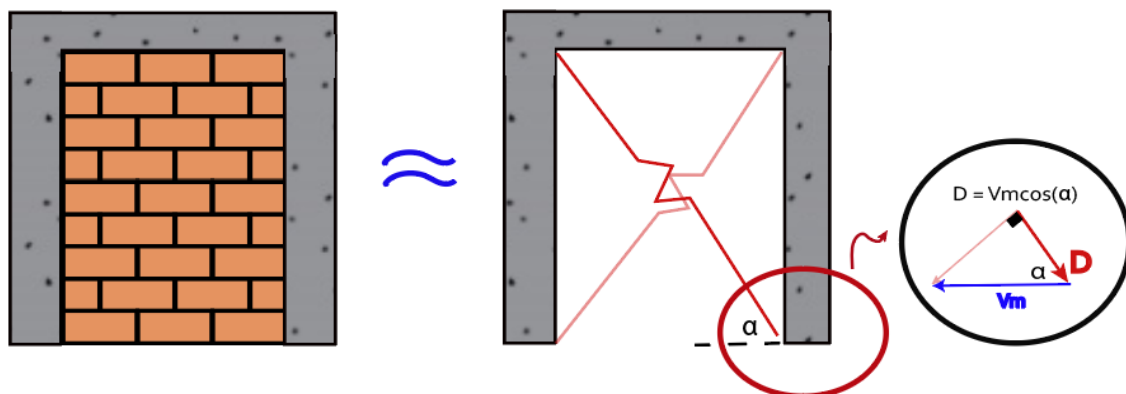
Tabla 11. Definición de elementos Link – Primer piso del Módulo N°04

<i>Muro de albañilería confinada- Primer piso</i>			
L(cm)	370.00	H(cm)	320.00
D(cm)	489.18	$\alpha(^{\circ})$	40.86
f'm	65	t(cm)	24
α	1	vm	8.06
Vm(tonf)	45.00	Pg(tonf)	40
Link	Zona elástica	Zona máxima	Zona residual
Axial (tonf)	22.46	37.44	29.95
Deformación(cm)	0.218	1.452	2.057

Tabla 12. Definición de elementos Link – Segundo piso del Módulo N°04

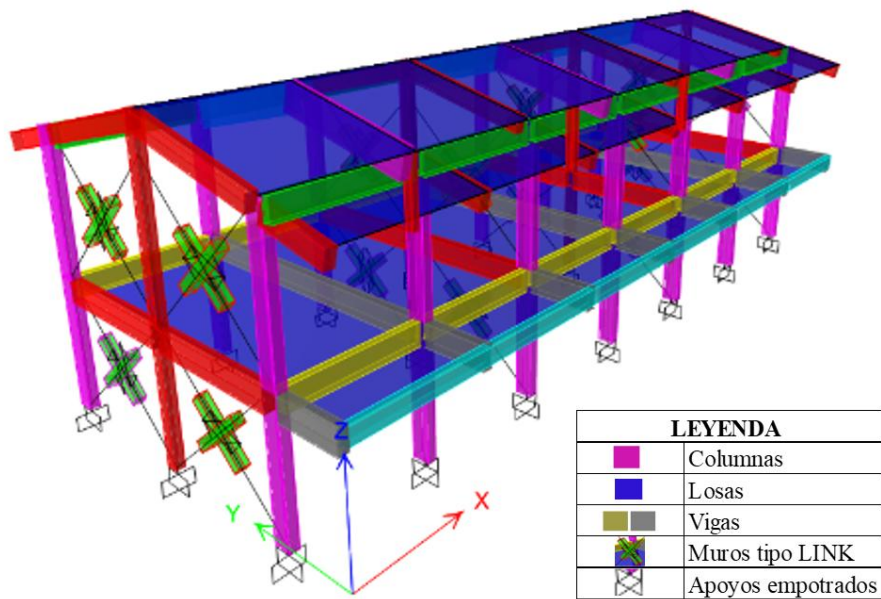
<i>Muro de albañilería confinada- Segundo piso</i>			
L(cm)	370.00	H(cm)	342.00
D(cm)	503.85	$\alpha(^{\circ})$	42.75
f'm	65	t(cm)	24
α	1	vm	8.06
Vm(tonf)	40.40	Pg(tonf)	20
Link	Zona elástica	Zona máxima	Zona residual
Axial (tonf)	19.58	32.63	26.11
Deformación(cm)	0.226	1.507	2.135

Figura 20. Muro real vs modelo tipo Link



La imagen fue extraída de la tesis: “Ensayos cíclicos en muros de albañilería confinada contruidos con ladrillos king kong de fabricación industrial”, PUCP-2017.

Figura 21. Modelo de albañilería con elementos tipos LINK.



Desempeño estructural para la dirección en X

Figura 22. Curva de capacidad en la dirección X, para pórticos de concreto

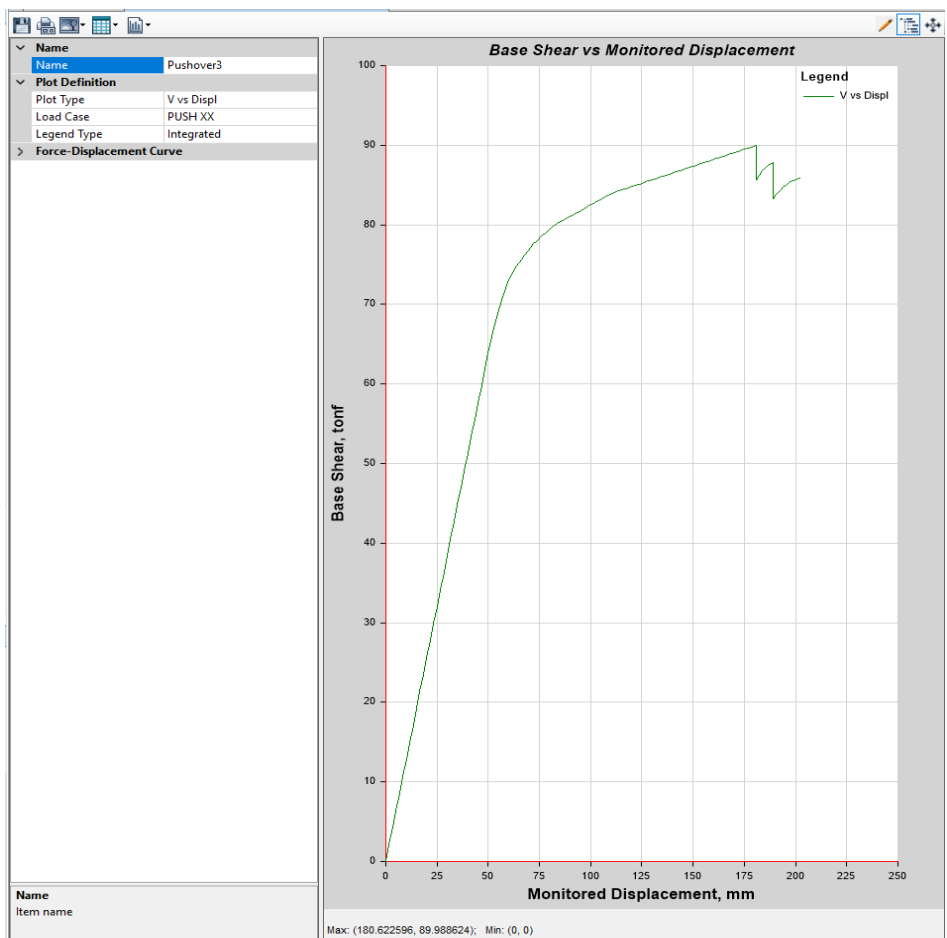
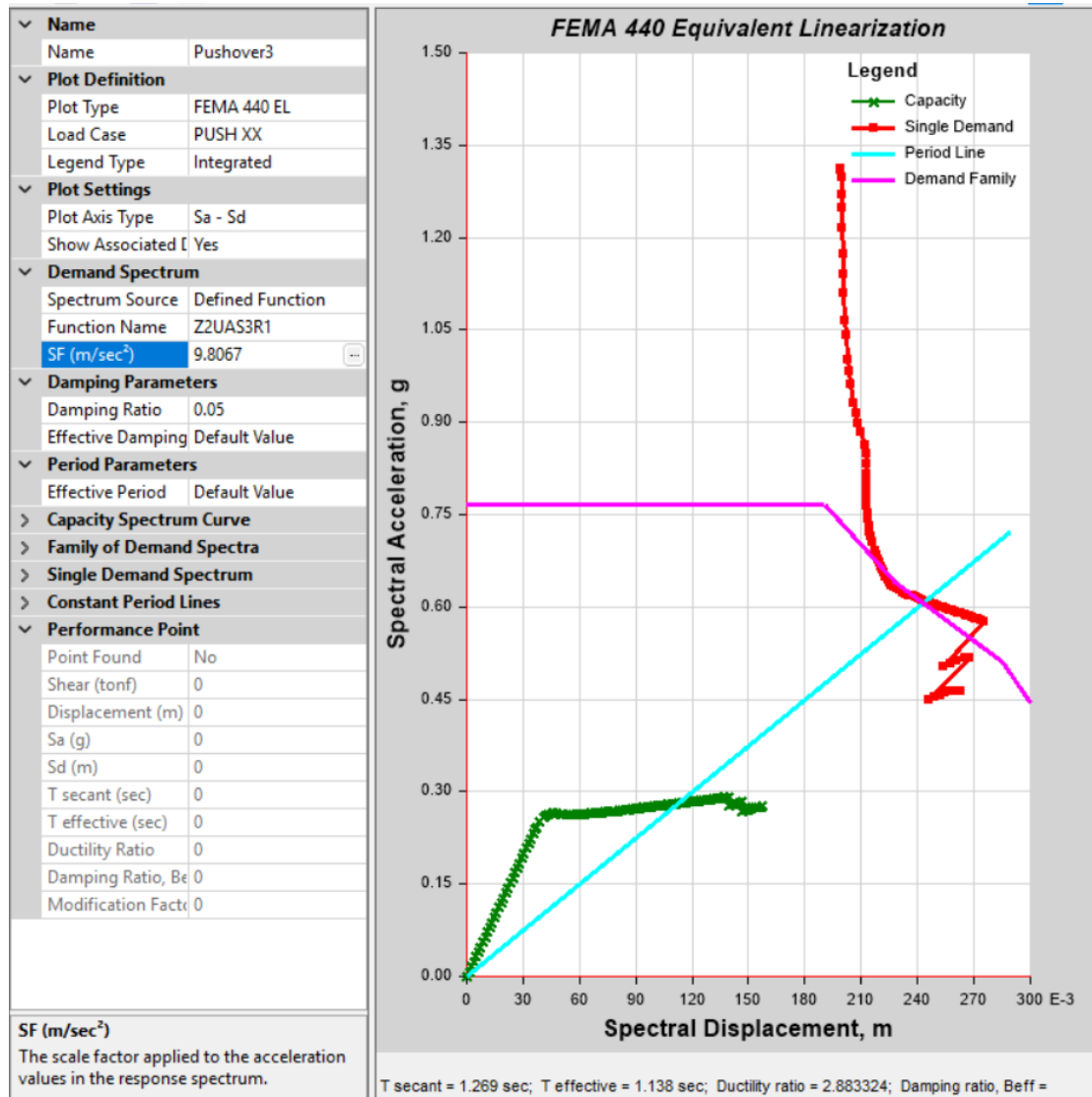
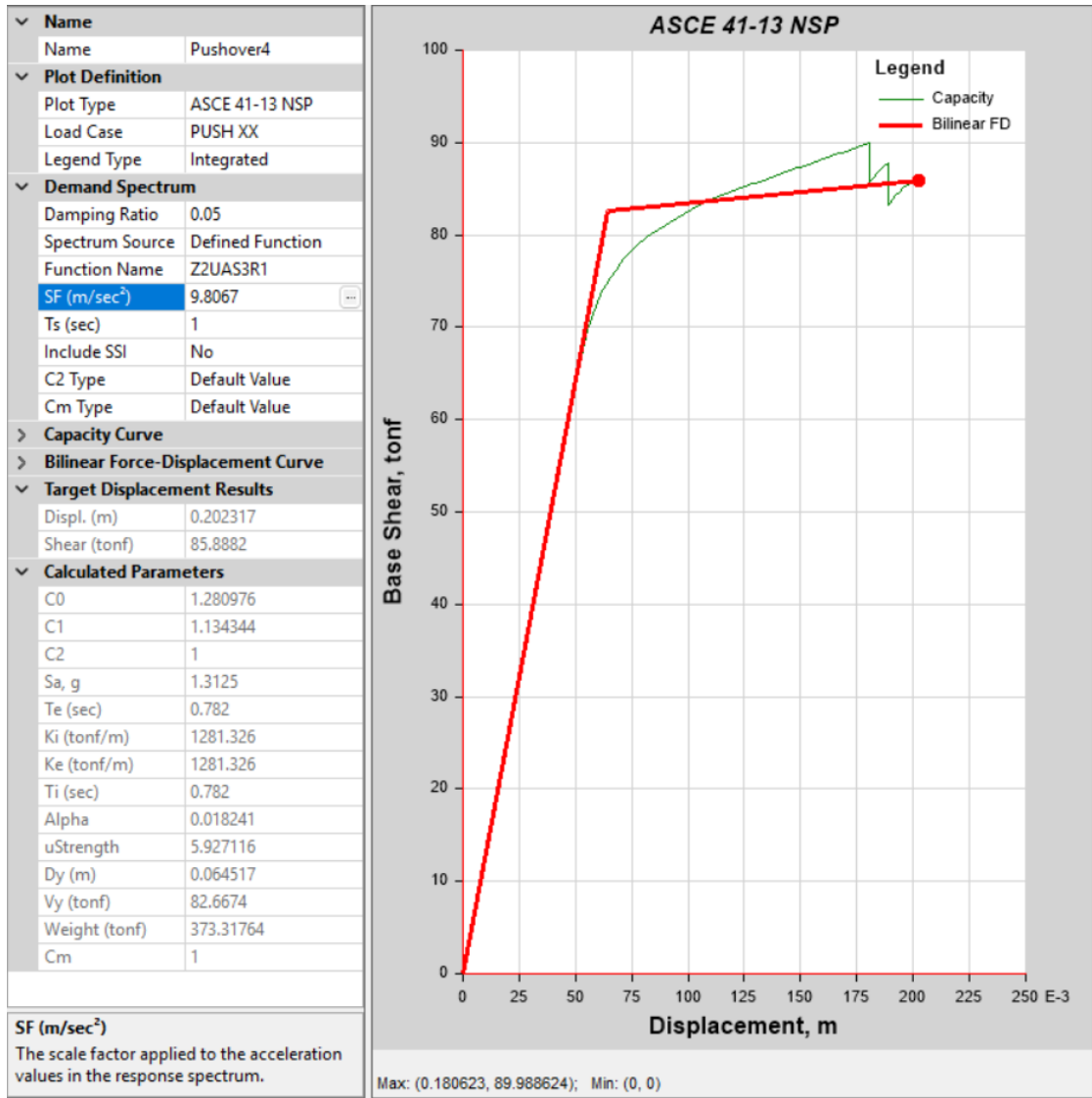


Figura 23. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440.



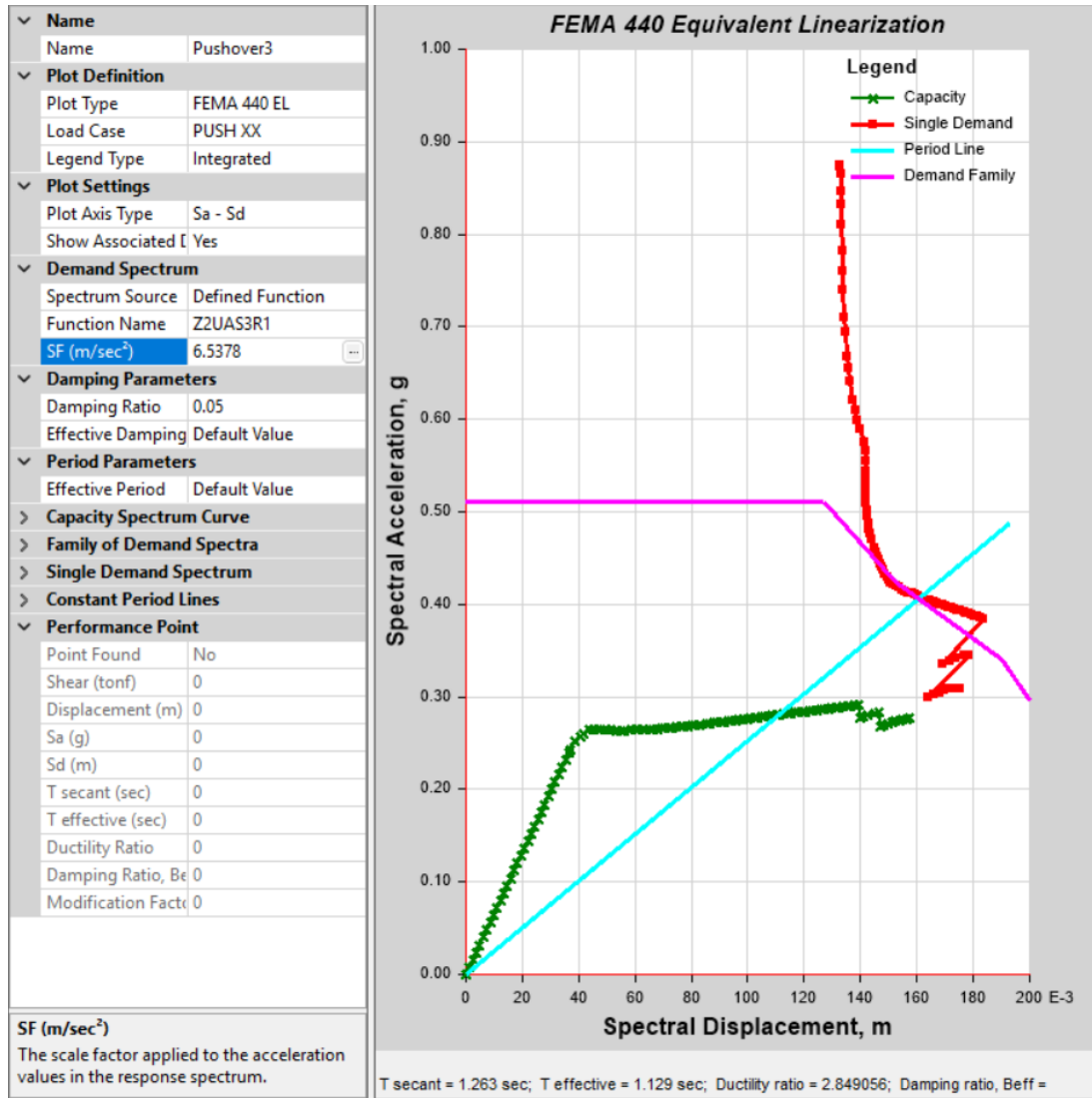
- ✓ Se concluye del resultado que la demanda supera la capacidad de la estructura, por lo cual, hay mucha probabilidad de colapso.

Figura 24. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13.



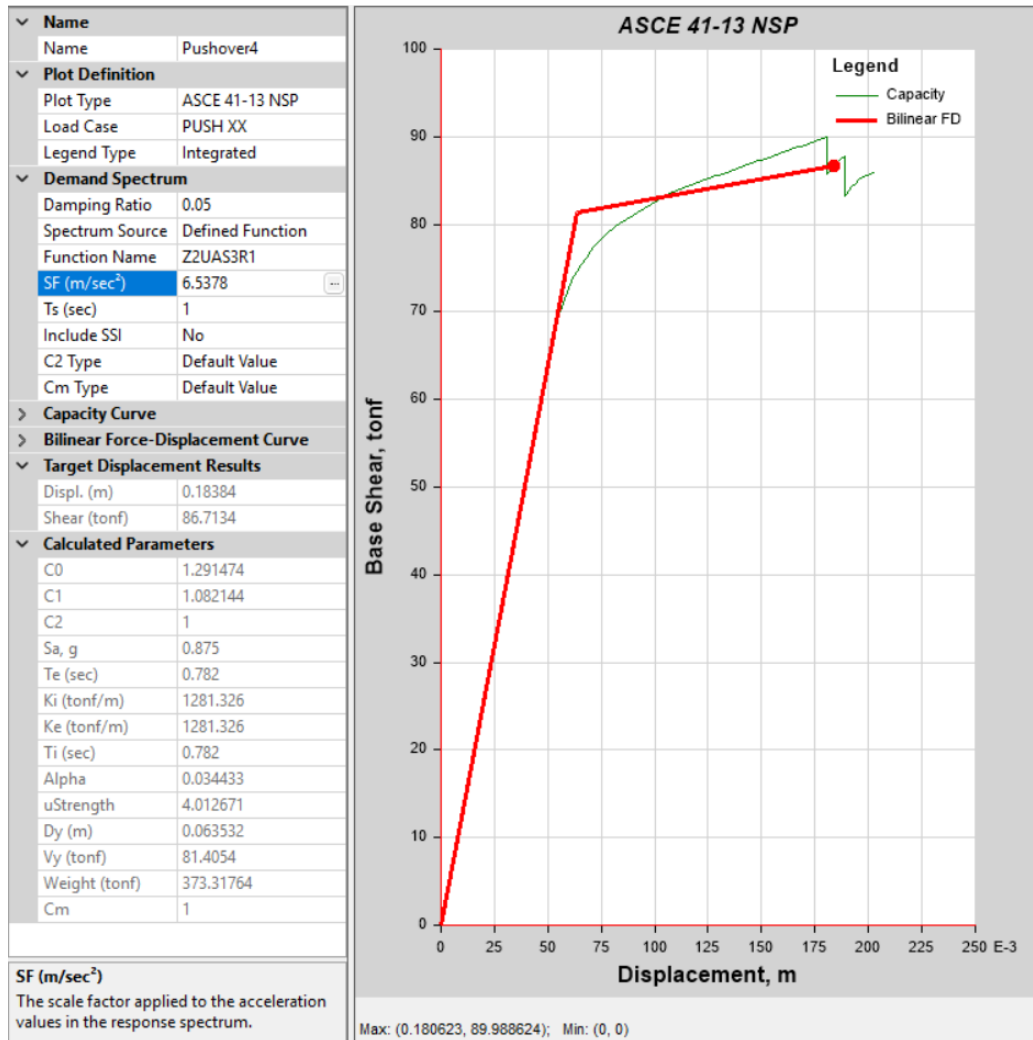
- ✓ El punto de desempeño encontrado está después del punto de colapso, por lo cual, la edificación tiene alta probabilidad de colapso para un sismo máximo considerado.

Figura 25. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con FEMA 440.



- ✓ Se concluye del resultado que la demanda supera la capacidad de la estructura, por lo cual, hay mucha probabilidad de colapso.

Figura 26. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con ASCE 41-13.



- ✓ El punto de desempeño encontrado está después del punto de colapso, por lo cual, la edificación tiene alta probabilidad de colapso para un sismo máximo considerado.

Figura 27. Las rotulas plásticas de las columnas llegan al límite de prevención al colapso, para un desplazamiento de 4.6cm correspondiente al Step 38.

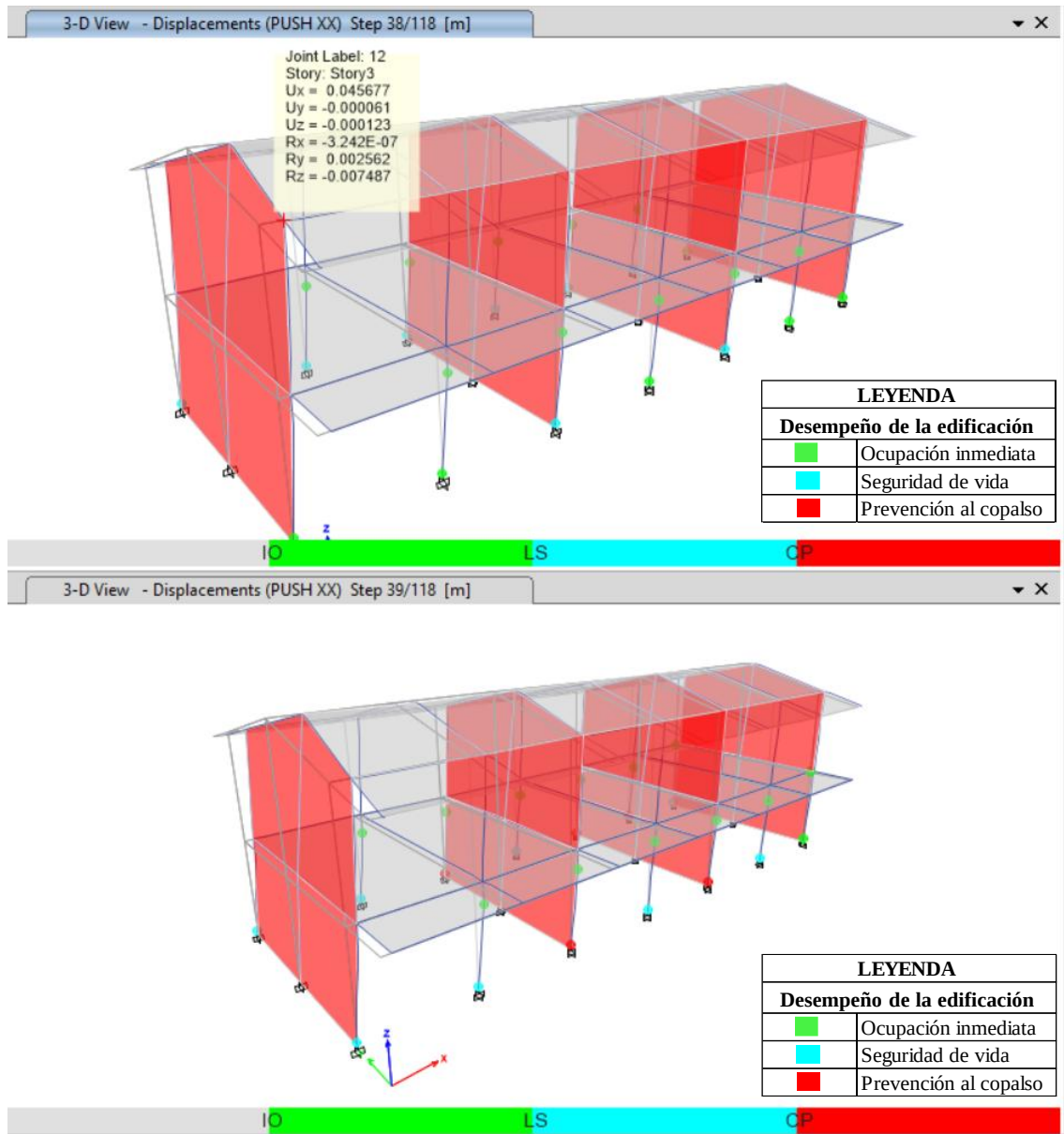
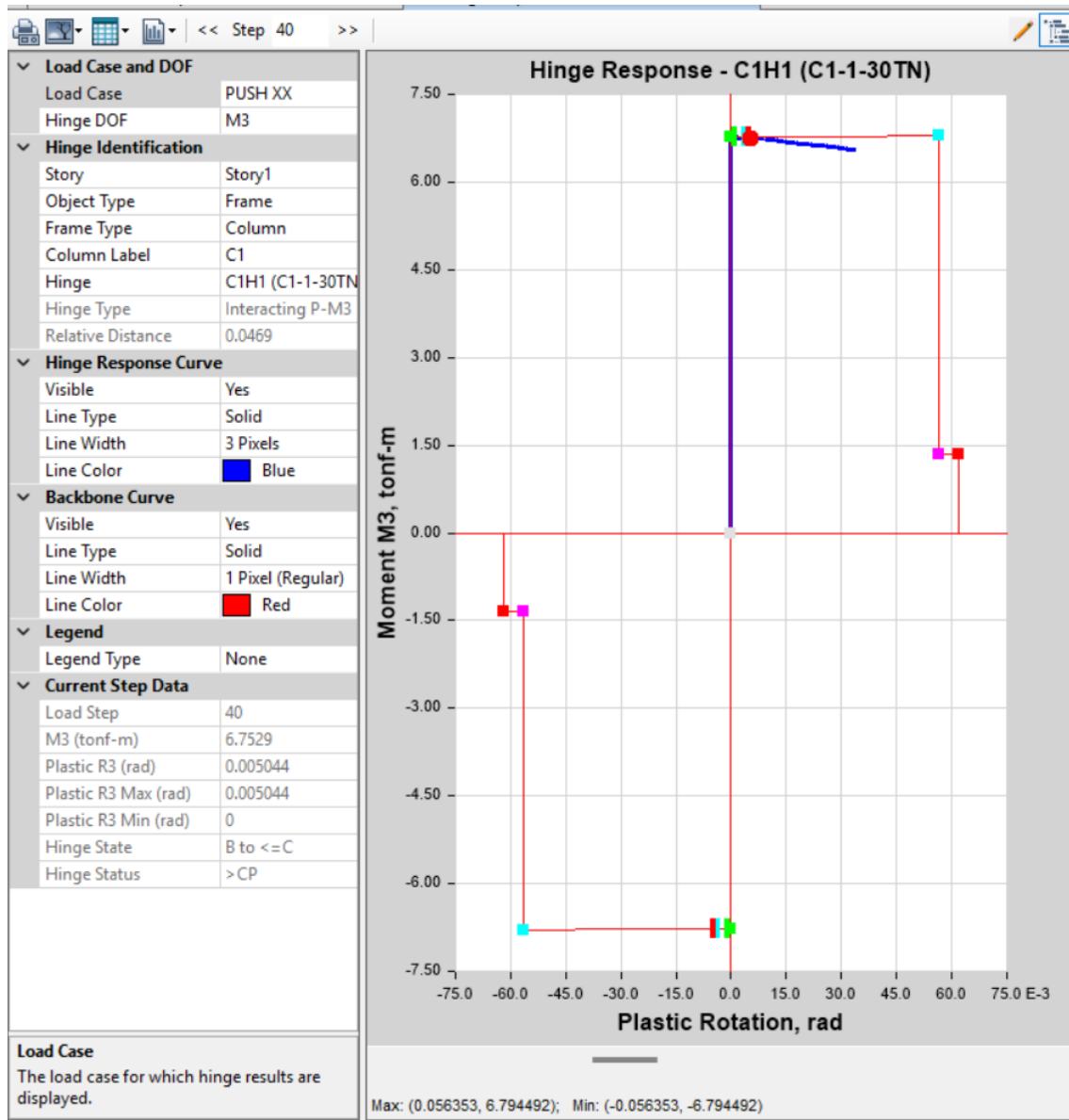


Figura 28. Las columnas ya llegaron al colapso, correspondiente al Step 40.



✓ Respecto a este resultado, se concluye que el fallo de la estructura sería total.

El desempeño estructural para esta dirección en X, está después del punto de colapso, por lo cual en esta dirección corresponde considerar aislamiento en la base.

Desempeño estructural para la dirección en Y

Figura 29. Curva de capacidad en la dirección Y, para muros de albañilería confinados

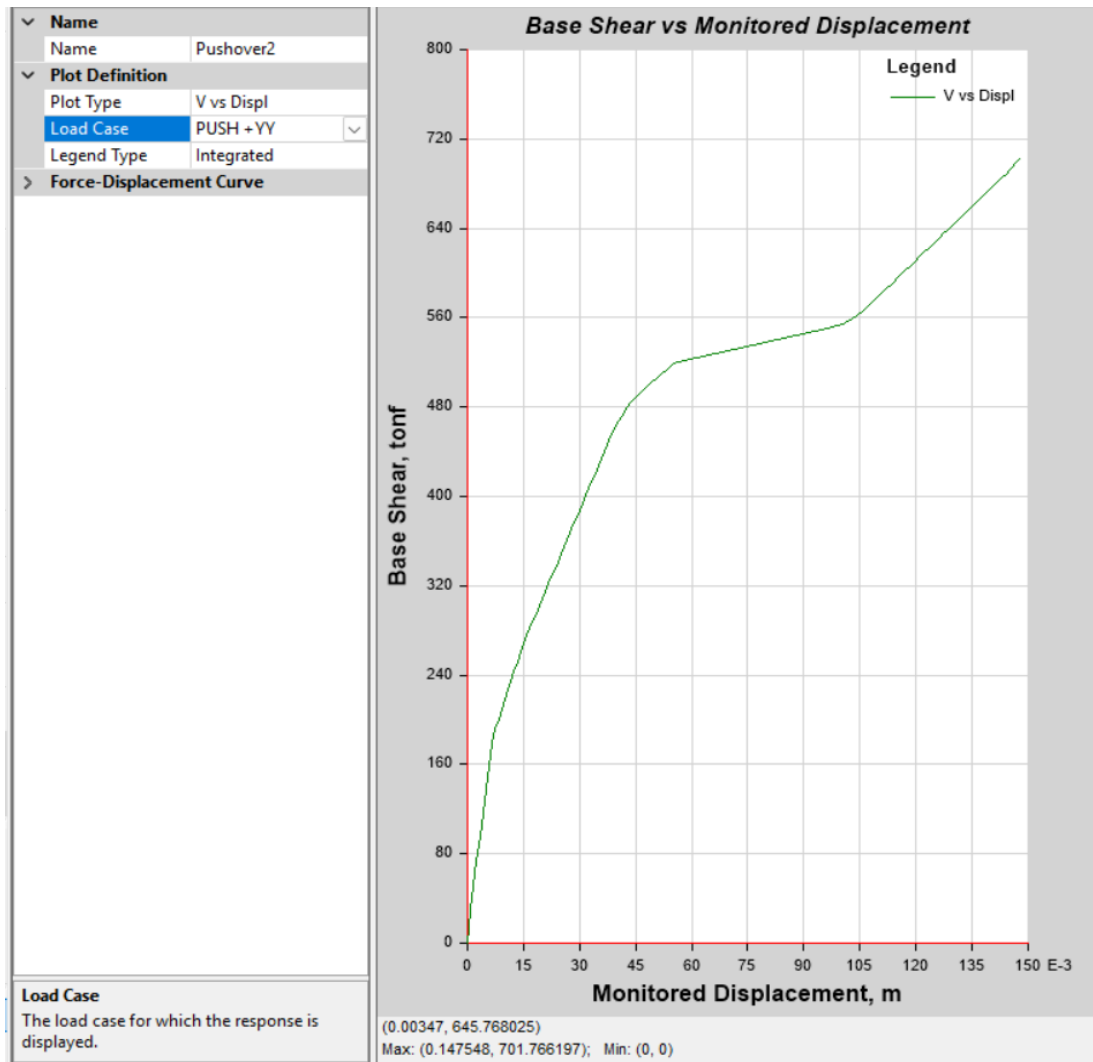
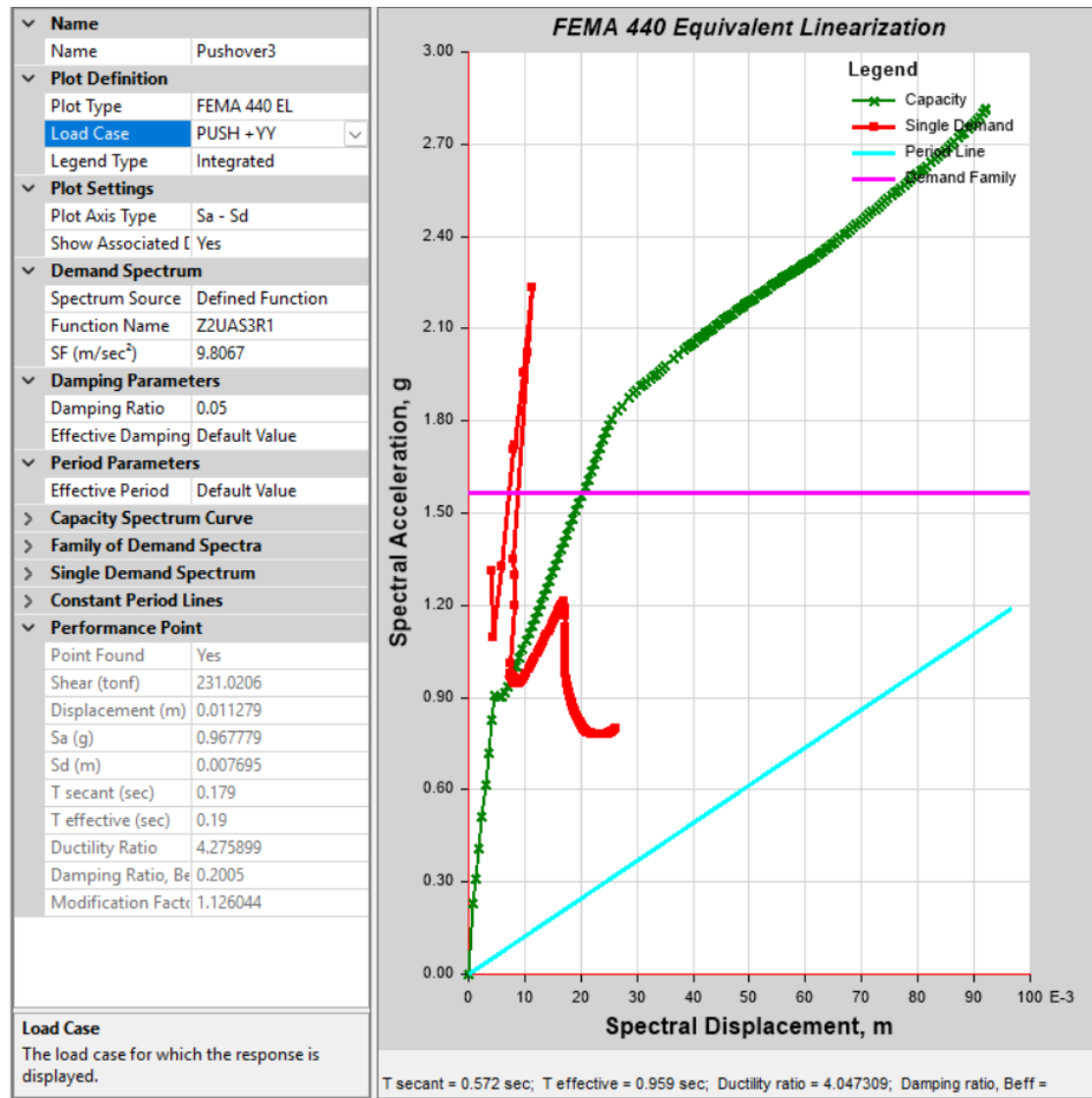
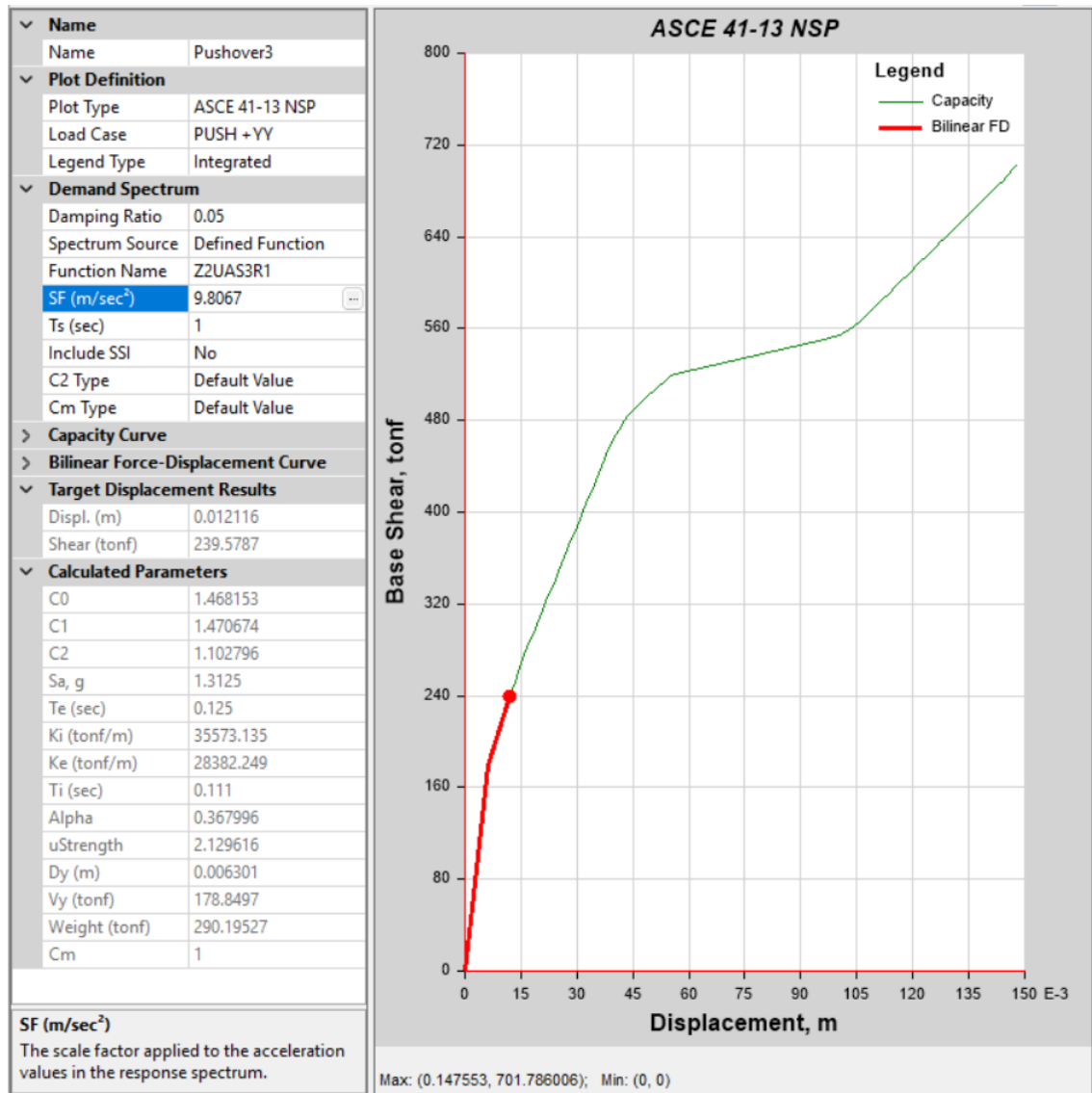


Figura 30. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440.



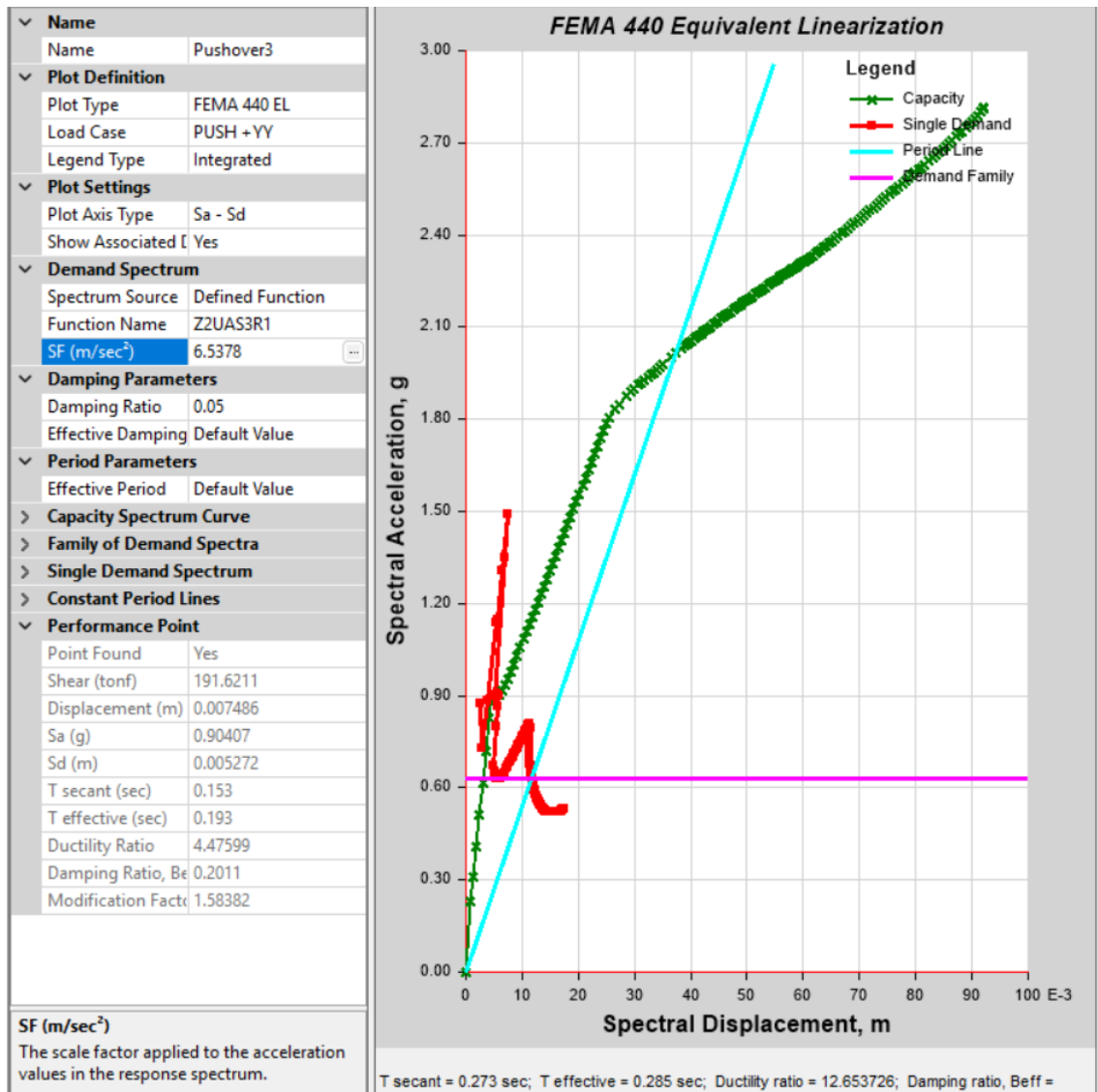
- ✓ Se concluye del resultado que la capacidad de la estructura supera ampliamente a la demanda, por lo cual, en la dirección Y la edificación tiene seguridad estructural.

Figura 31. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13.



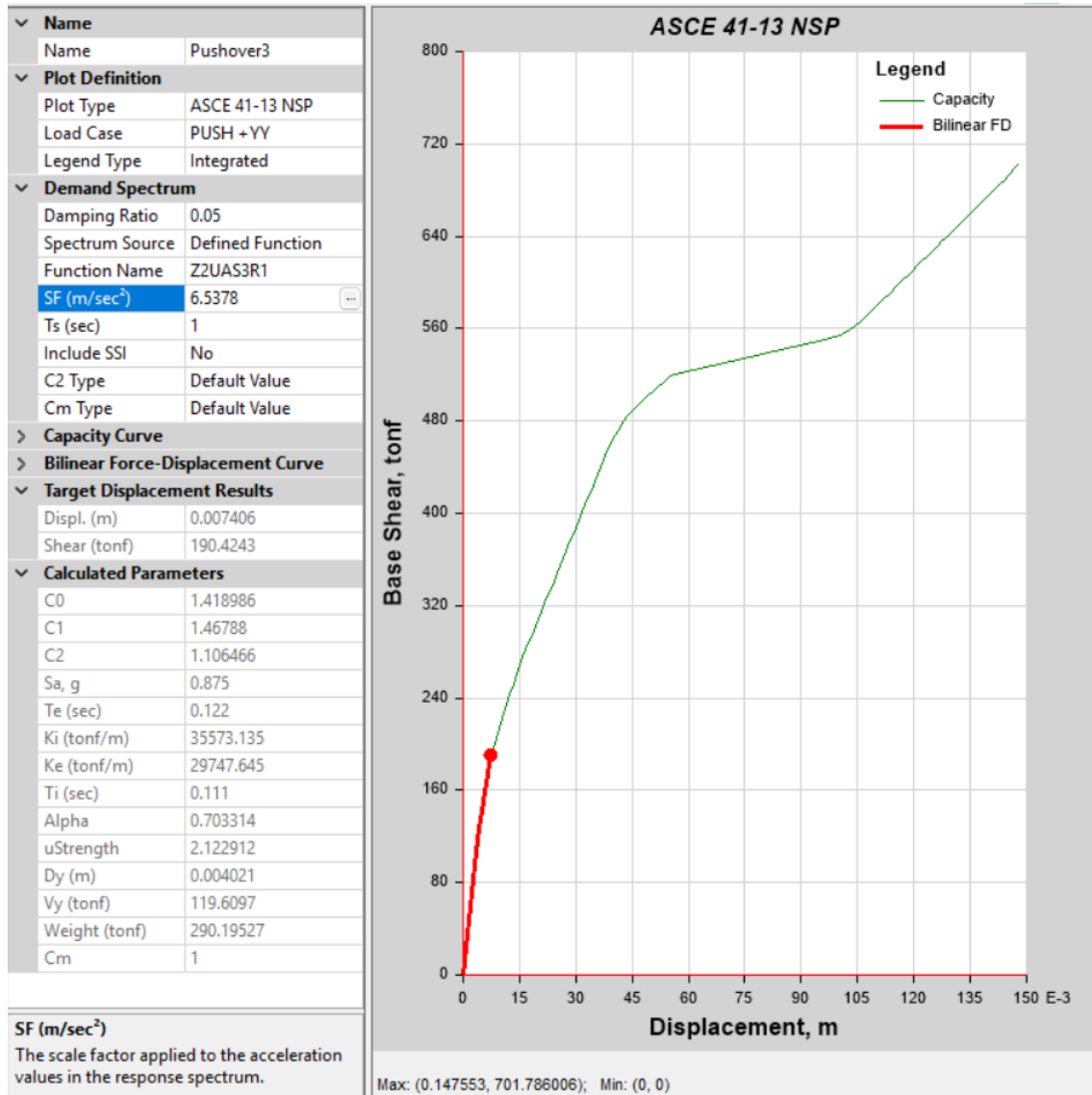
- ✓ El punto de desempeño encontrado está antes del punto de colapso, por lo cual, la edificación es segura para un sismo máximo considerado.

Figura 32. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con FEMA 440.



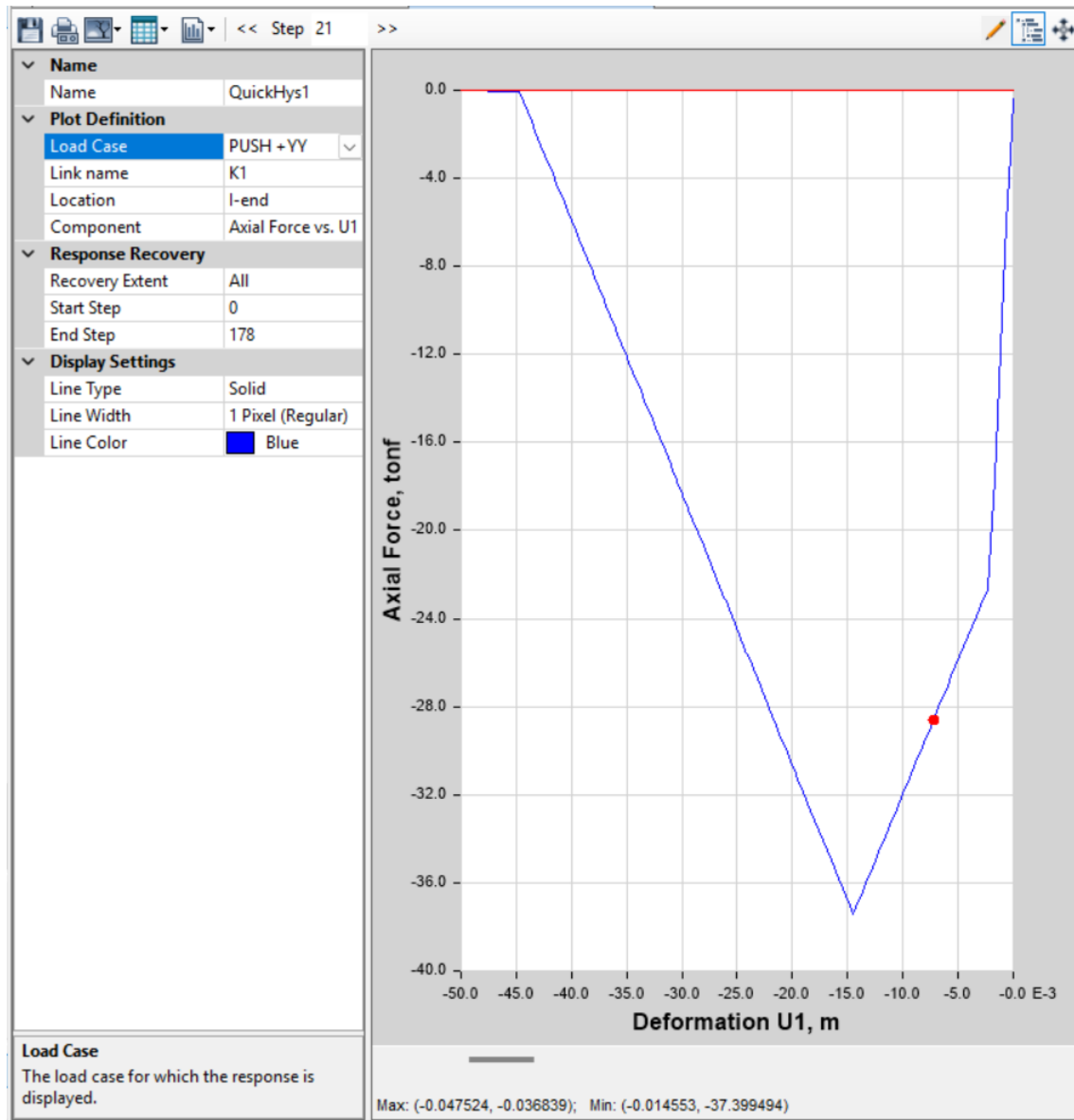
- ✓ Se concluye del resultado que la capacidad de la estructura supera ampliamente a la demanda, por lo cual, en la dirección Y la edificación tiene seguridad estructural.

Figura 33. Desempeño estructural en la dirección Y, para muros de albañilería confinados, para sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, periodo de retorno de 475 años), con ASCE 41-13.



- ✓ El punto de desempeño encontrado está antes del punto de colapso, por lo cual, la edificación es segura para un sismo de diseño.

Figura 34. El punto de desempeño encontrado es de 1.2cm con el cual, el muro de albañilería no llega a su máxima capacidad, correspondiente al Step 21.



Fuente: Vista del software de modelado

- ✓ Respecto a este resultado, se concluye que la estructura es segura en la dirección Y.

El desempeño estructural para esta dirección en Y, está antes del punto de colapso, por lo cual en esta dirección no sería necesario considerar aislamiento en la base, debido a que la albañilería confinada otorga seguridad estructural.

3.10.2. Resumen del desempeño estructural con aisladores sísmicos

Para cumplir con la capacidad de la edificación en la dirección X, se plantea como alternativa analizar el desempeño estructural, utilizando protección sísmica con Aisladores de Base LRB.

En la dirección Y, cumple sin aisladores sísmicos, lo cual no sería necesario analizarlo para esta dirección.

Figura 35. Espectro de aceleraciones obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y $R=1$.

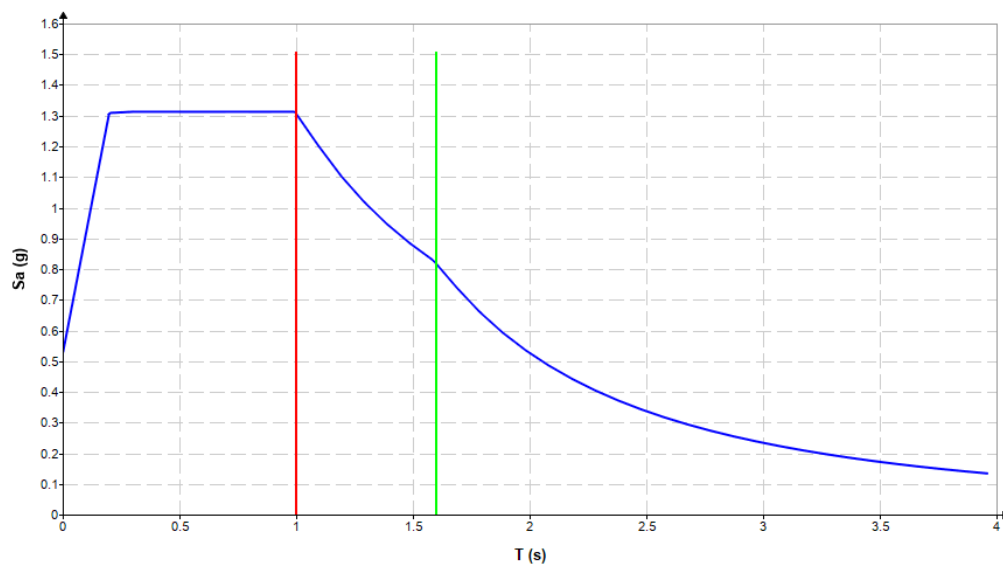


Figura 36. Espectro de desplazamientos obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y $R=1$.

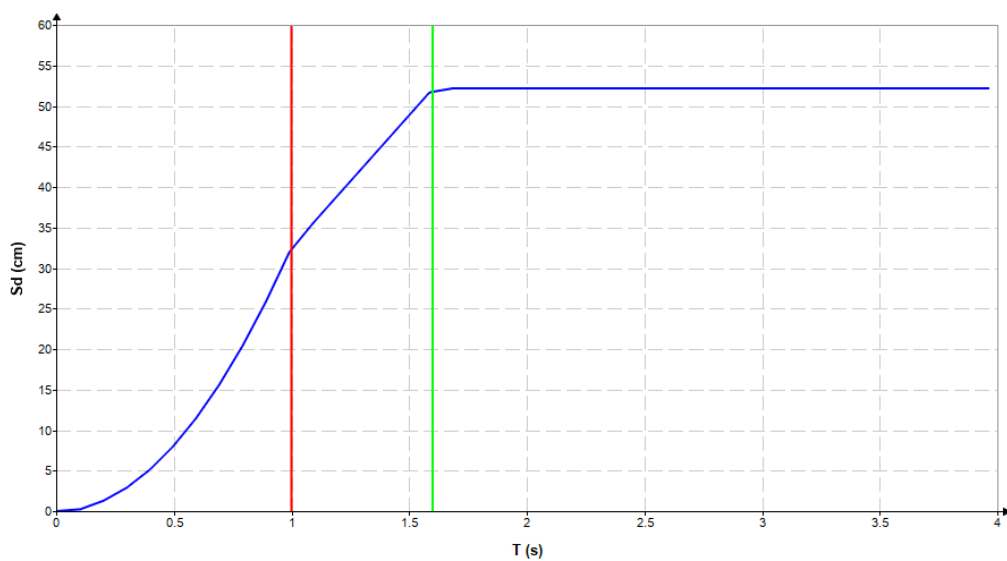
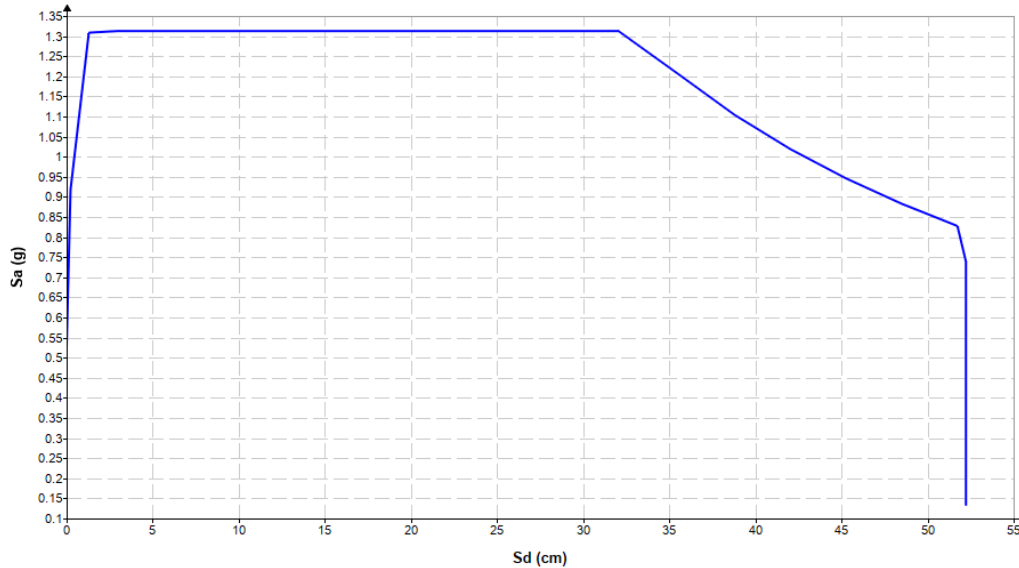


Figura 37. Espectro de demanda obtenido mediante las ecuaciones de la E-030, para edificación con aislamiento para categoría C y $R=1$.



Tratamiento de señales

Para el análisis se seleccionaron sismos históricos que dieron origen a la Norma E.030. Estos registros fueron obtenidos de la página oficial del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y de la base de datos del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). En particular, se consideraron los eventos sísmicos históricos identificados con los códigos 7035: 17/10/1966 (7.5Mw, N82W), 7036: 17/10/1966 (7.5Mw, NO8E), 7038: 31/05/1970 (7.7Mw), 7039: 31/05/1970 (7.7Mw), 7050: 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT NO8E) y 7051: 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT N82W), así como registros de sismos con sus dos componentes correspondientes a las estaciones de Ica: 15/08/2007 (7.0Mw – EW-Est. San Luis Gonzaga) y Ica: 15/08/2007 (7.0Mw – NS-Est. San Luis Gonzaga), Lagunas: 26/05/2019 (8.0Mw – NS-Est. Juanjuí – San Martín) y Lagunas: 26/05/2019 (8.0Mw – EW-Est. Juanjuí – San Martín), Sullana: 30/07/2021 (6.1Mw – NS-Est. UNF) y Sullana: 30/07/2021 (6.1Mw – EW-Est. UNF), DATEM del Marañón: 28/11/2021 (7.5Mw – NS-Est. CIP. Moyobamba) y DATEM del Marañón: 28/11/2021 (7.5Mw – EW-Est. CIP. Moyobamba).

Tabla 13. Sismos considerados para el análisis

Código / Registro	Fecha	Evento (referencia)	Distrito	Provincia	Departamento
7035	17/10/1966	Sismo 17/10/1966 (epicentro frente a Huacho/Huaura)	Huacho	Huaura	Lima
7036	17/10/1966	Sismo 17/10/1966 (misma fuente; otra componente)	Huacho	Huaura	Lima
7038	31/05/1970	Terremoto de Áncash 31/05/1970 (epicentro frente a Chimbote)	Chimbote	Santa	Áncash
7039	31/05/1970	Terremoto de Áncash 31/05/1970 (misma fuente; otra componente)	Chimbote	Santa	Áncash
7050	03/10/1974	Sismo de Lima 03/10/1974 (epicentro ~80 km al O de Lima, mar adentro)	Lima (Cercado)	Lima	Lima
7051	03/10/1974	Sismo de Lima 03/10/1974 (misma fuente; otra componente)	Lima (Cercado)	Lima	Lima
Ica – 15/08/2007 (EW)	15/08/2007	“Sismo de Pisco”: epicentro ~60 km al O de Pisco (mar adentro)	Pisco	Pisco	Ica
Ica – 15/08/2007 (NS)	15/08/2007	“Sismo de Pisco”: (misma fuente; otra componente)	Pisco	Pisco	Ica
Lagunas – 26/05/2019 (NS)	26/05/2019	Epicentro ~60 km SE de Lagunas (Alto Amazonas)	Lagunas	Alto Amazonas	Loreto
Lagunas – 26/05/2019 (EW)	26/05/2019	Epicentro ~60 km SE de Lagunas (Alto Amazonas)	Lagunas	Alto Amazonas	Loreto
Sullana – 30/07/2021 (NS)	30/07/2021	Epicentro ~12 km al O de Sullana	Sullana	Sullana	Piura
Sullana – 30/07/2021 (EW)	30/07/2021	Epicentro ~12 km al O de Sullana	Sullana	Sullana	Piura
DATEM del Maraón – 28/11/2021 (NS)	28/11/2021	Reportado en distrito Barranca (DateM del Maraón, Loreto)	Barranca	DateM del Maraón	Loreto
DATEM del Maraón – 28/11/2021 (EW)	28/11/2021	Reportado en distrito Barranca (DateM del Maraón, Loreto)	Barranca	DateM del Maraón	Loreto

Fuente: IGP (Instituto Geofísico del Perú)

Se presentaron los registros de aceleración y los espectros de respuesta de cada evento considerado. Para cada sismo se incluye:

- **Historia temporal de aceleraciones (acelerograma):** En su versión original y en la forma escalada, lo que permite visualizar el proceso de ajuste aplicado para que el registro cumpla con las exigencias establecidas en la Norma E.031.
- **Espectro de respuesta:** Comparativo entre el registro original, el registro escalado y el espectro objetivo de la norma, a fin de evaluar la compatibilidad del movimiento con las demandas sísmicas de diseño.

El procedimiento aplicado utiliza ajuste espectral que modifican el contenido de frecuencias del acelerograma, que corresponde de registros espectro-compatibles, según lo establecido en el artículo 15.7 de la Norma Técnica E.031 – Aislamiento Sísmico.

Este método consiste en ajustar cada par de componentes horizontales de modo que, dentro del rango de periodos comprendido entre $0,2 T_m$ y $1,25 T_m$ (siendo T_m el periodo fundamental del sistema de aislamiento), el espectro de respuesta del componente en la dirección de análisis no sea menor que el 90 % de la ordenada definida por la norma.

La aplicación de este método garantiza que los movimientos escalados reproduzcan adecuadamente las demandas dinámicas requeridas por el diseño y sean consistentes con las exigencias de desempeño sísmico establecidas para sistemas con aislamiento.

A continuación, se muestran el tratamiento de señales para evento Sísmico y sus componentes:

Figura 38. Ajuste de registro sísmico 7035: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, N82W)

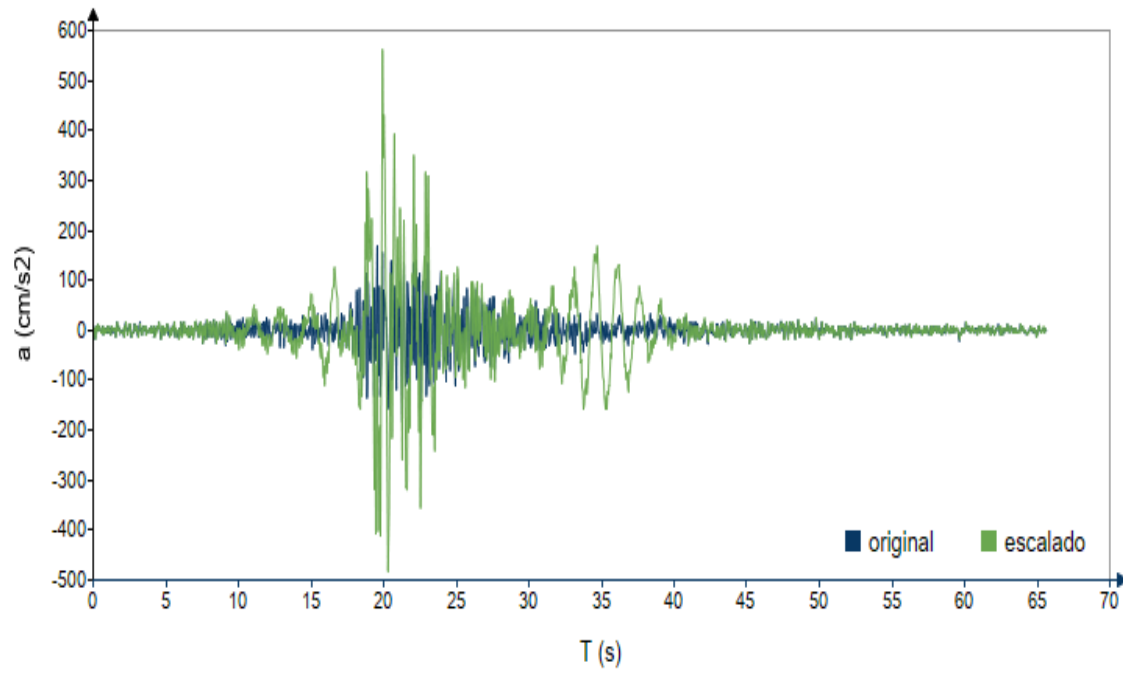


Figura 39. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7035: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, N82W)

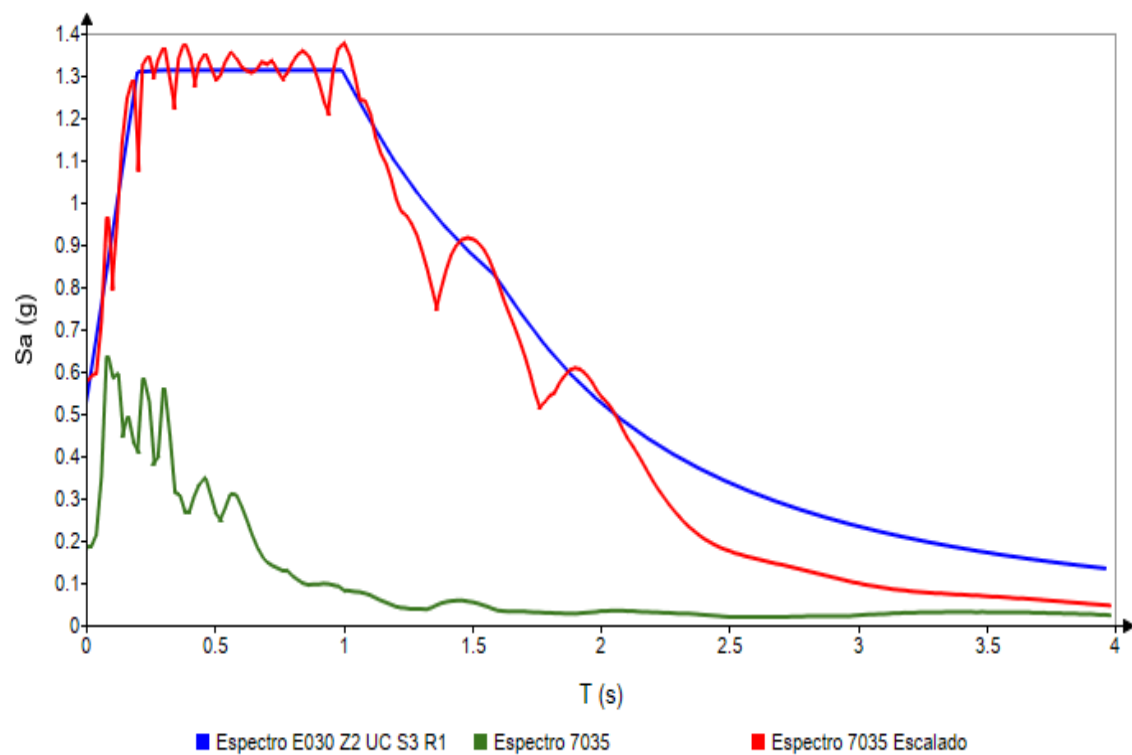


Figura 40. Ajuste de registro sísmico 7036: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, NO8E)

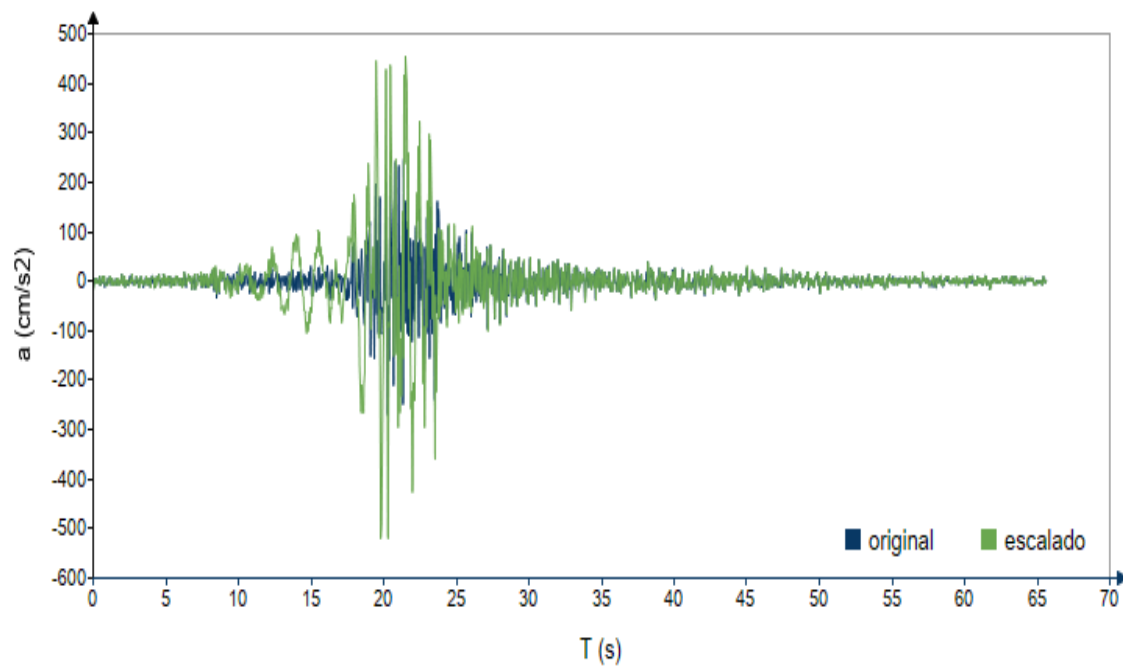


Figura 41. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7036: Epicentro frente a Huacho 17/10/1966 (7.5Mw, NO8E)

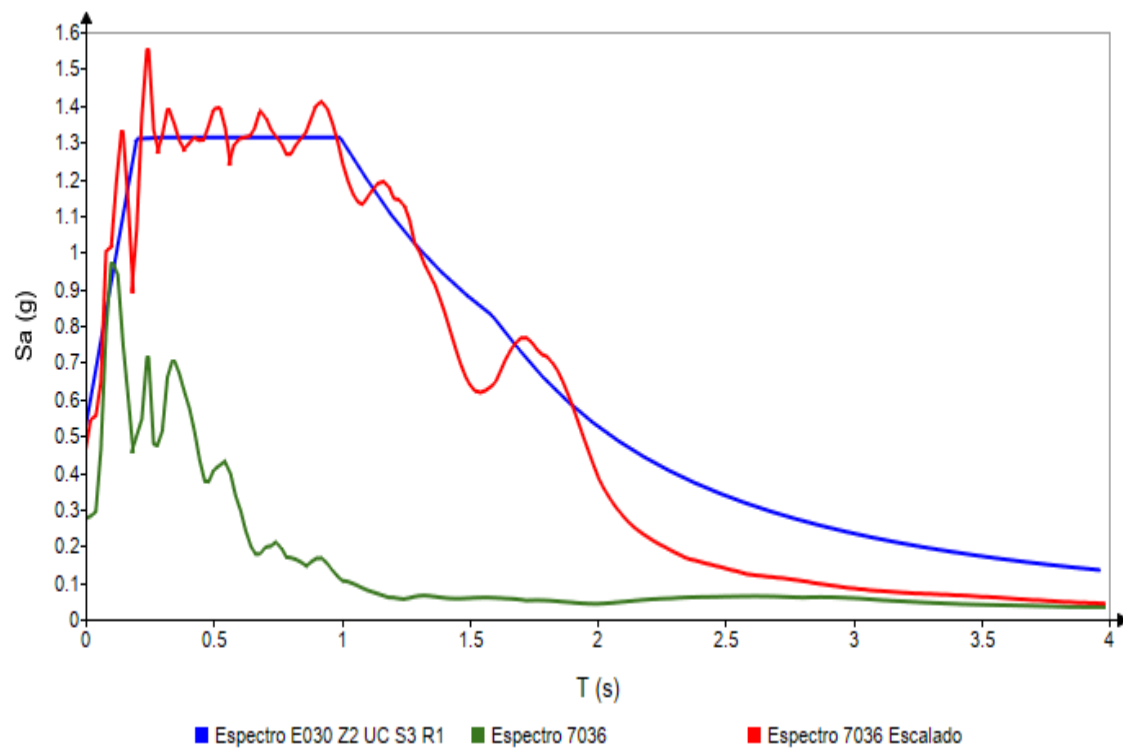


Figura 42. Ajuste de registro sísmico 7038: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)

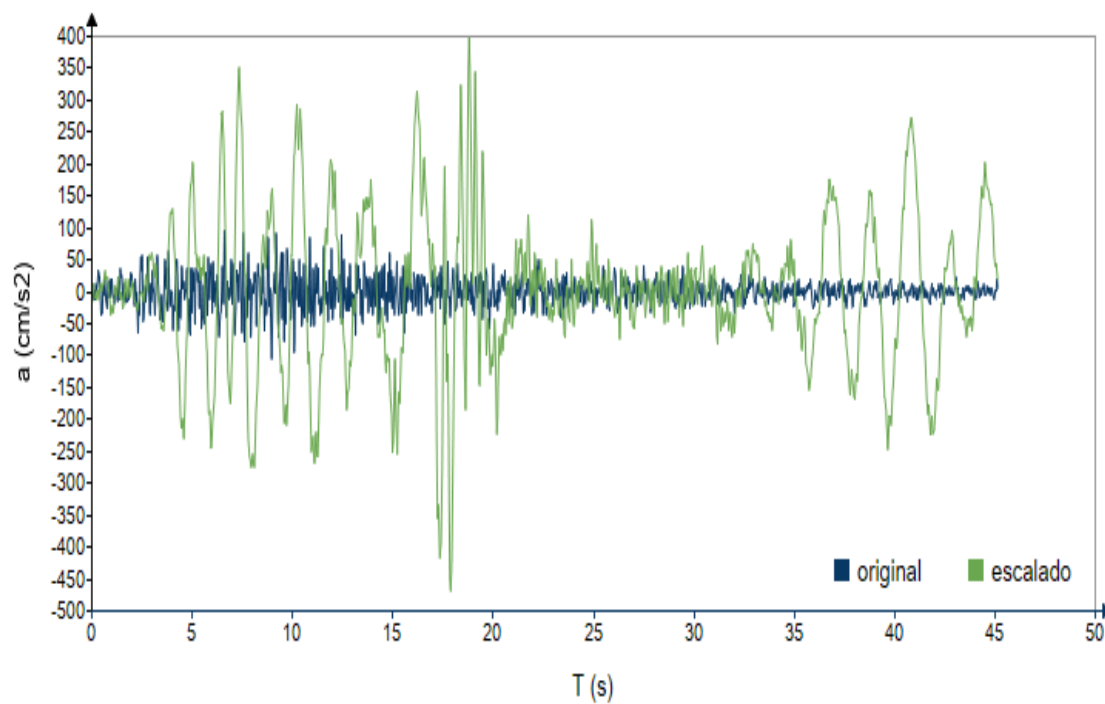


Figura 43. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7038: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)

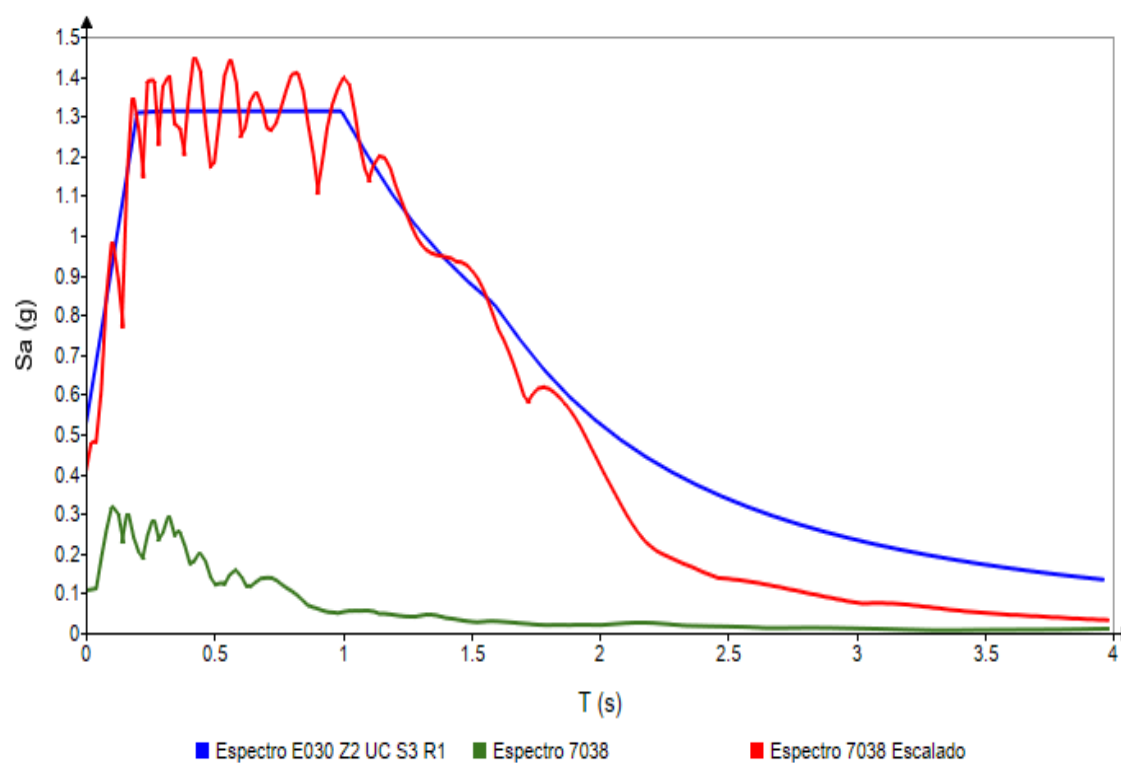


Figura 44. Ajuste de registro sísmico 7039: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)

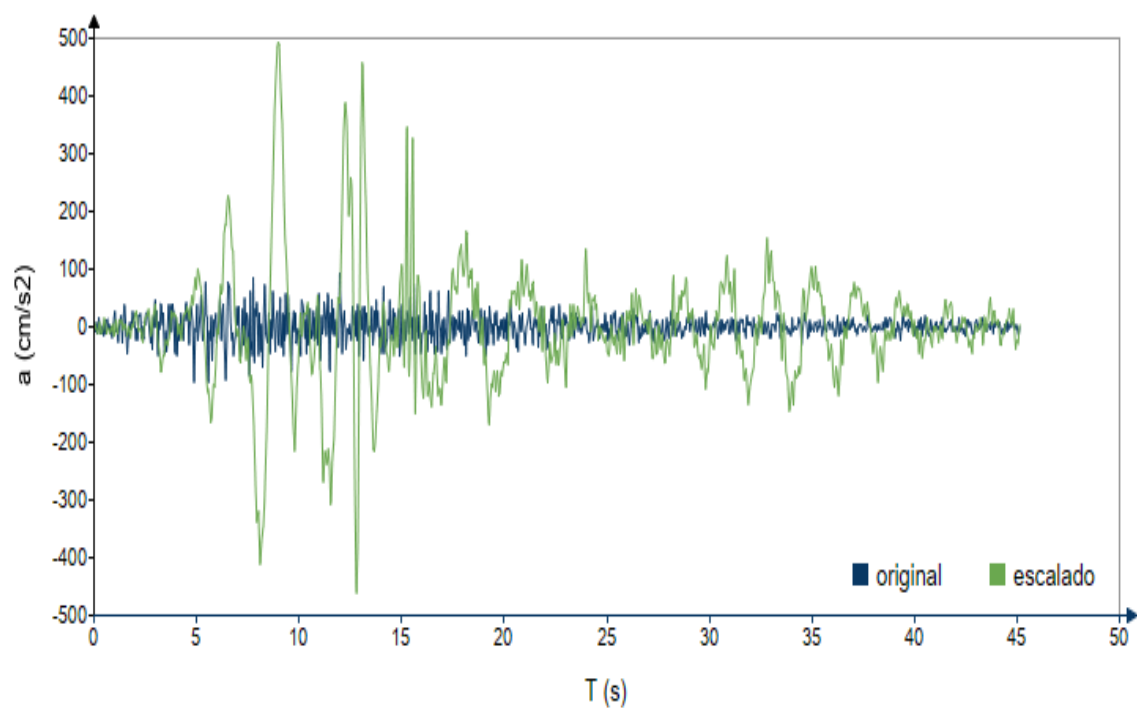


Figura 45. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7039: Terremoto de Áncash 31/05/1970 (7.7Mw)

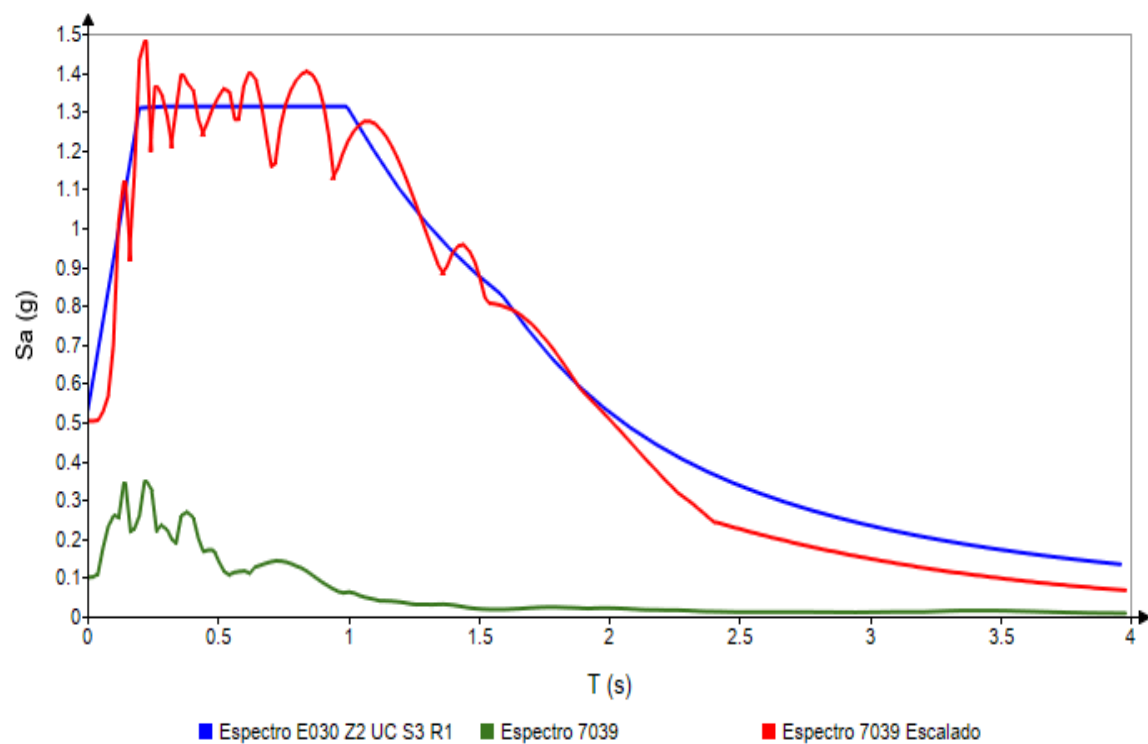


Figura 46. Ajuste de registro sísmico 7050: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT NO8E)

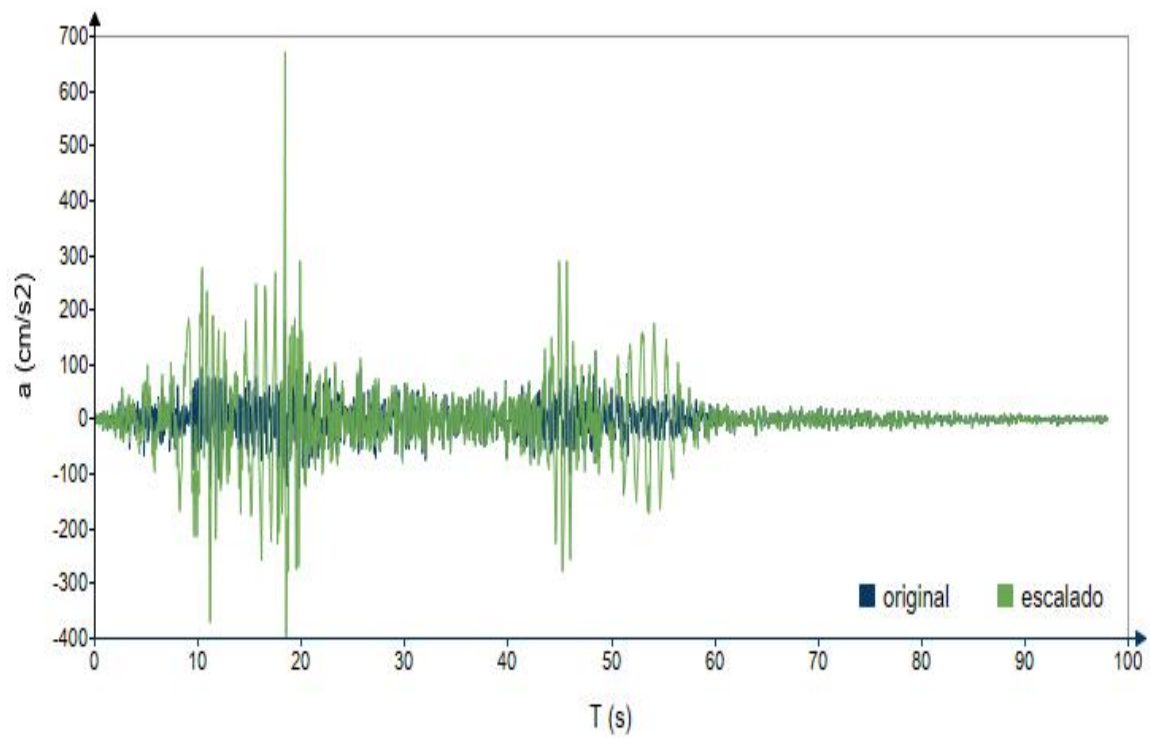


Figura 47. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7050: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5Mw – 1421 GCT NO8E)

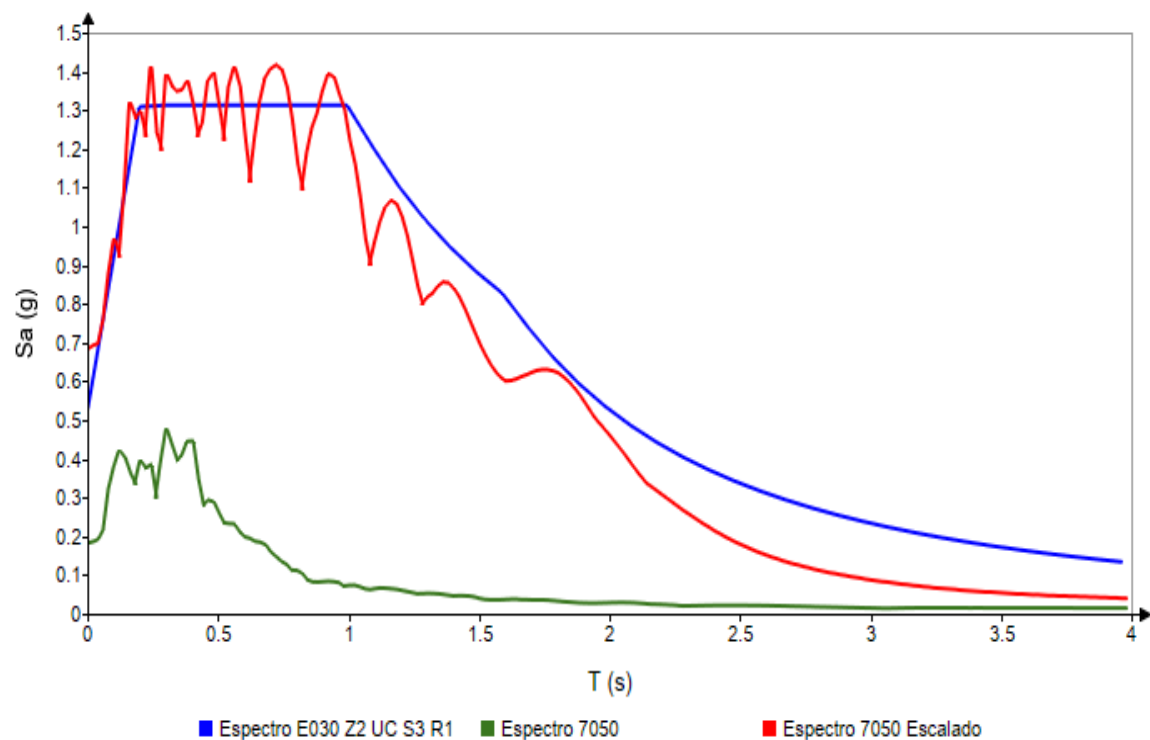


Figura 48. Ajuste de registro sísmico 7051: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5M_w – 1421 GCT N82W)

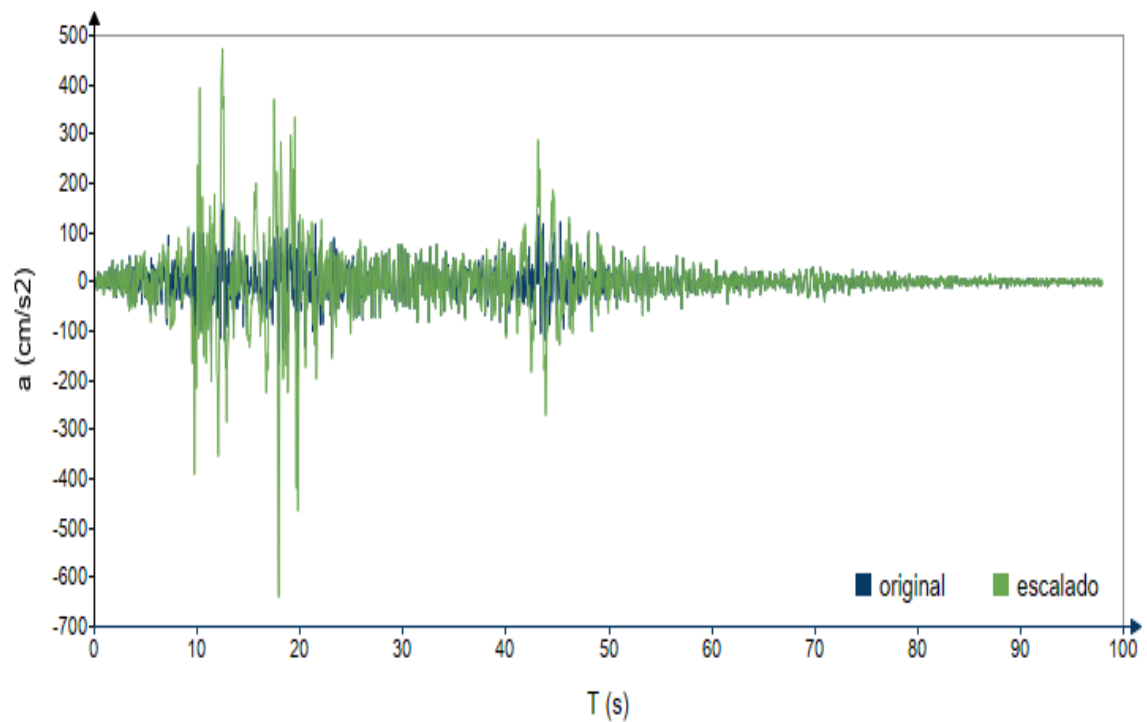


Figura 49. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico 7051: Sismo de Lima 03/10/1974 (7.5M_w – 1421 GCT N82W)

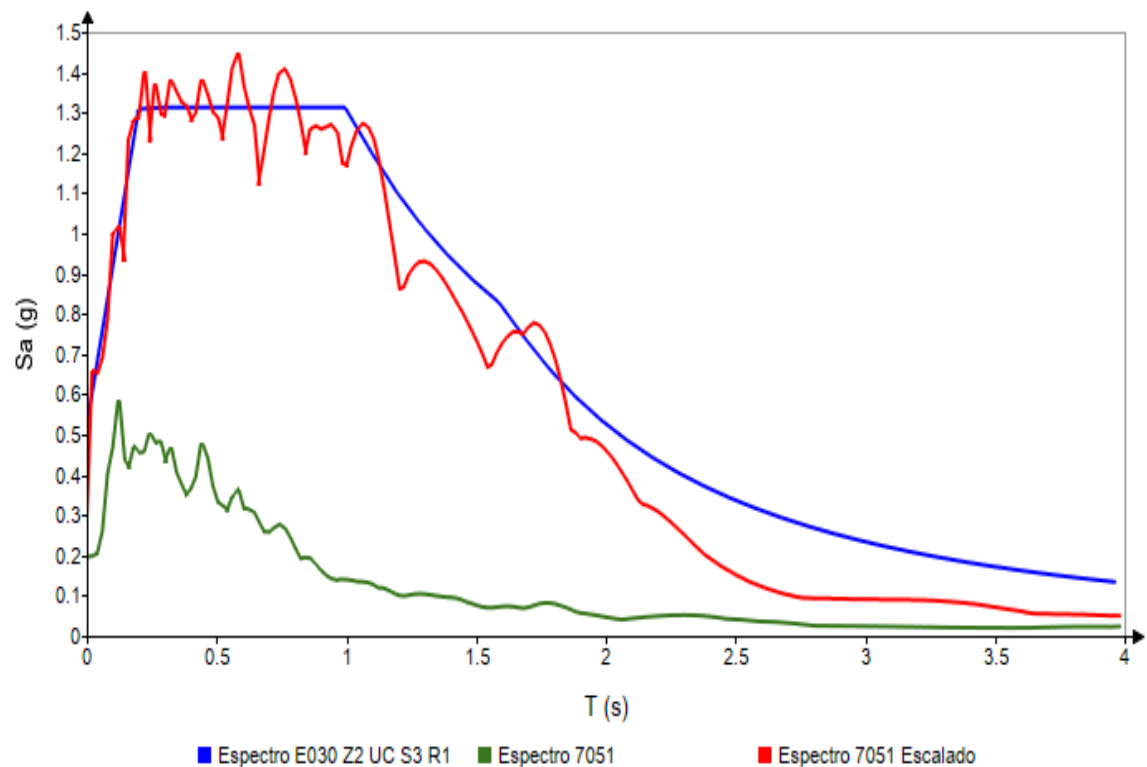


Figura 50. Ajuste de registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – EW – Est. San Luis Gonzaga)

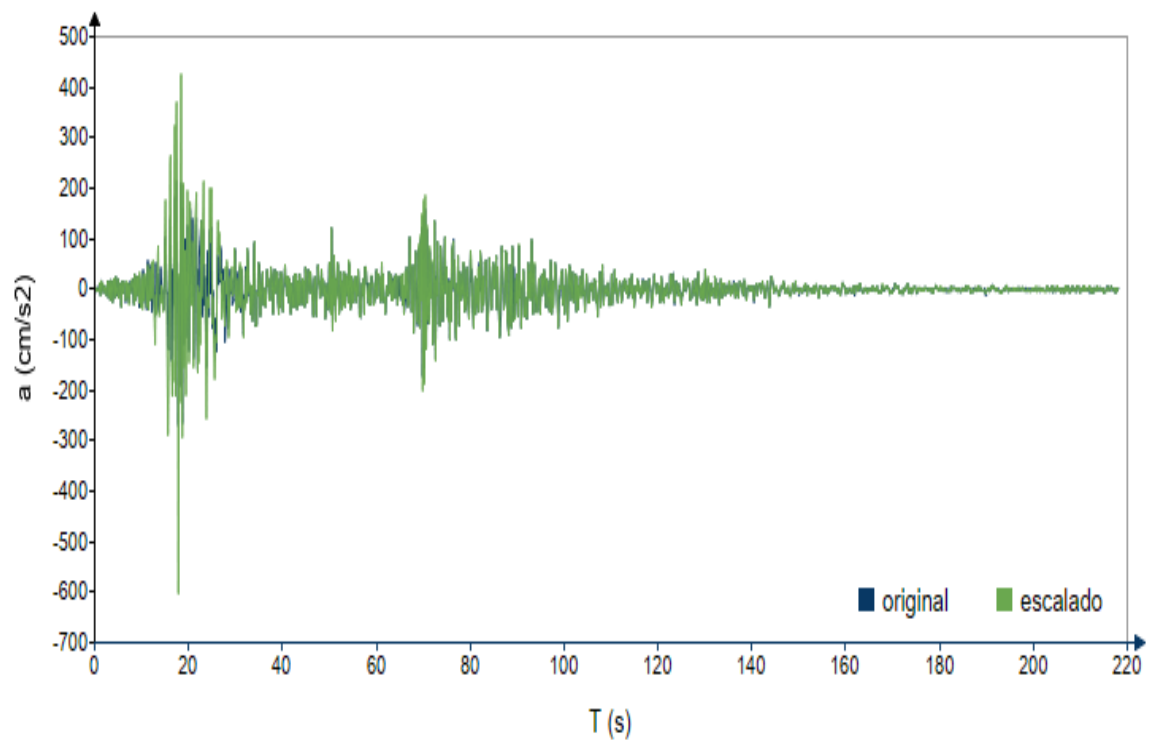


Figura 51. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – EW – Est. San Luis Gonzaga)

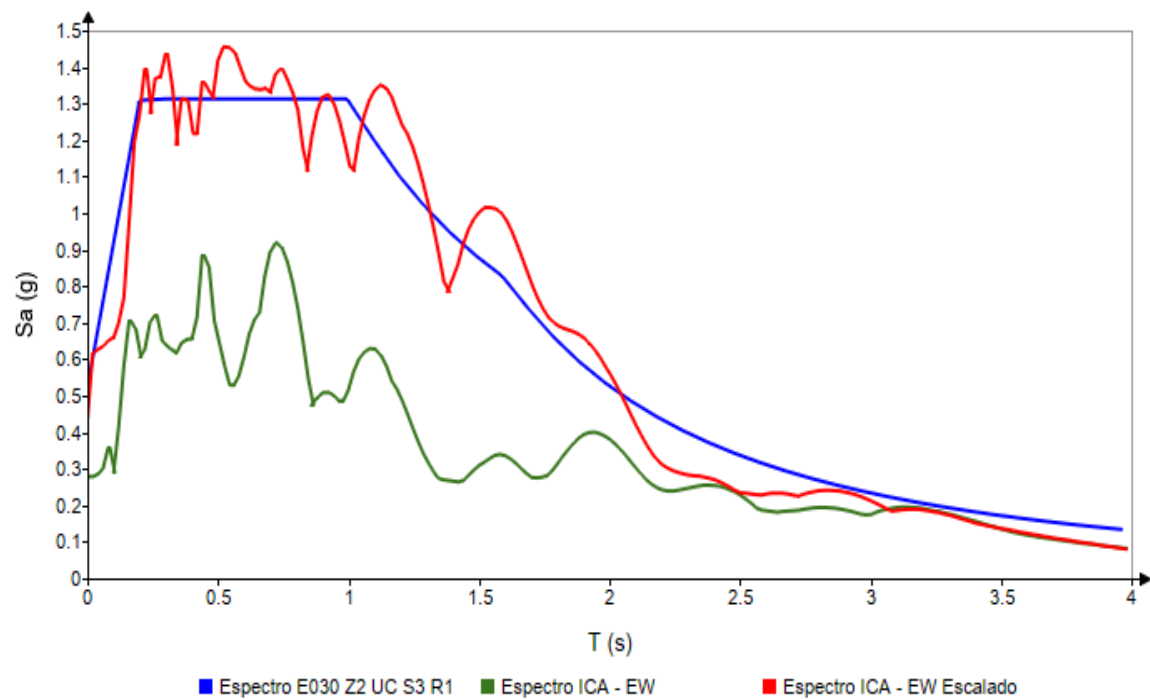


Figura 52. Ajuste de registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – NS – Est. San Luis Gonzaga)

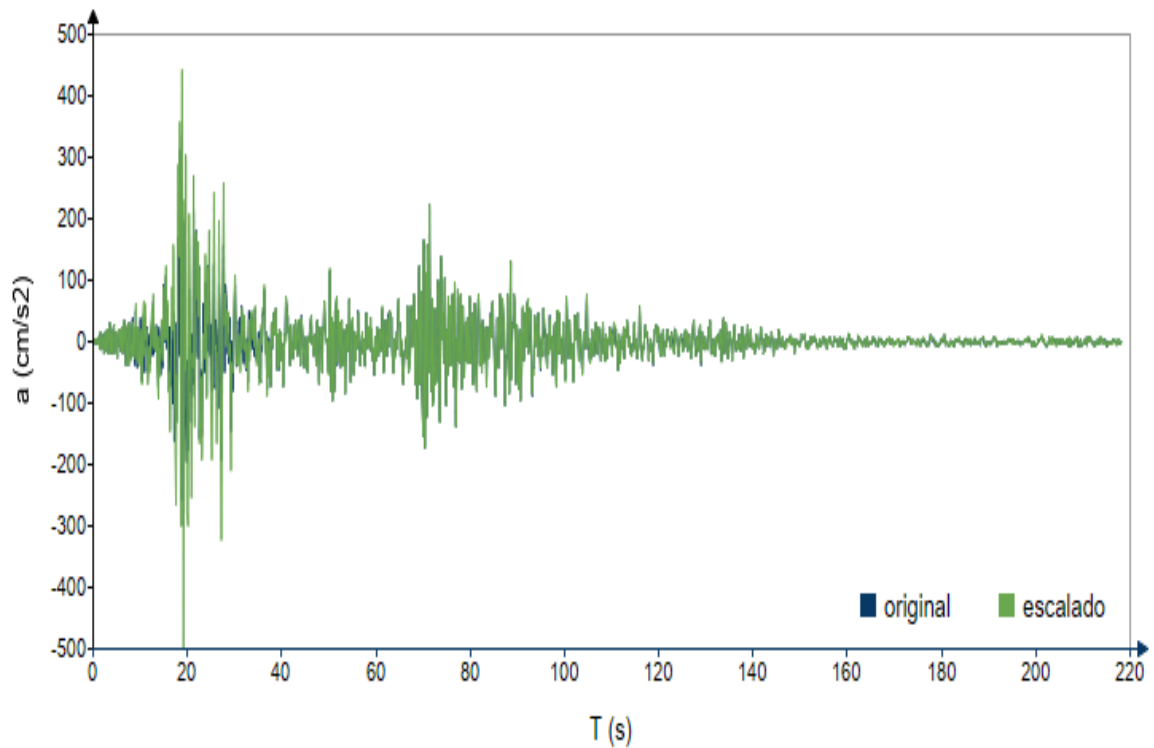


Figura 53. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico ICA: Sismo de Pisco 15/08/2007 (7.0Mw – NS – Est. San Luis Gonzaga)

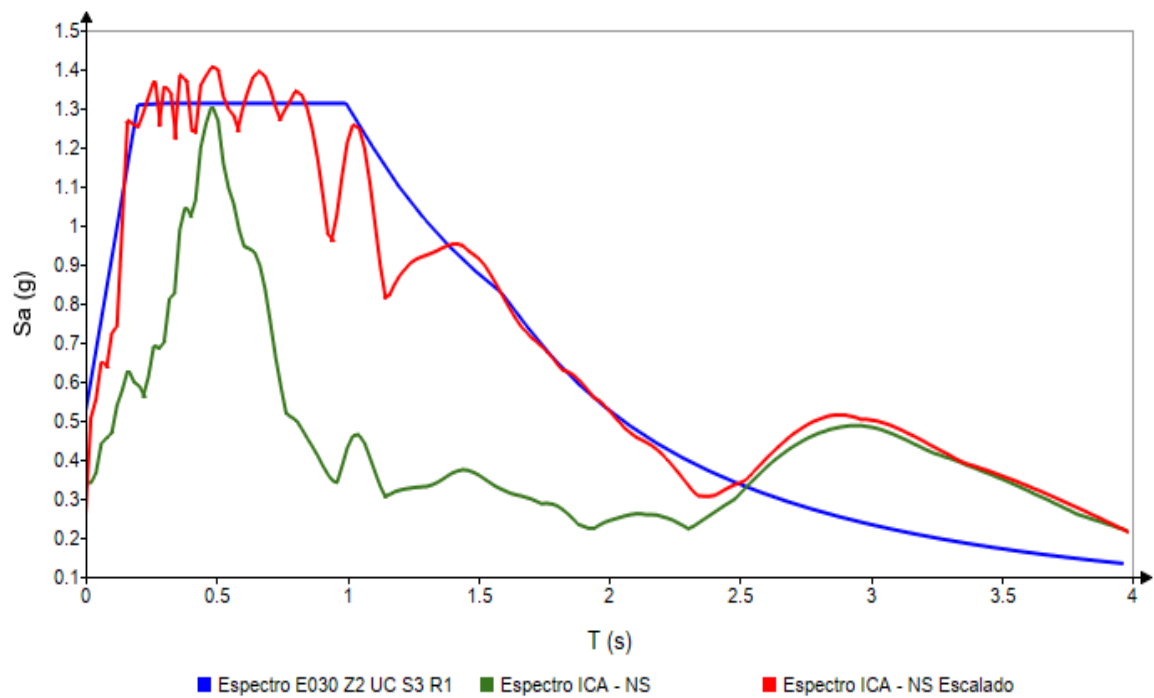


Figura 54. Ajuste de registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – NS – Est. Juanjuí – San Martín)

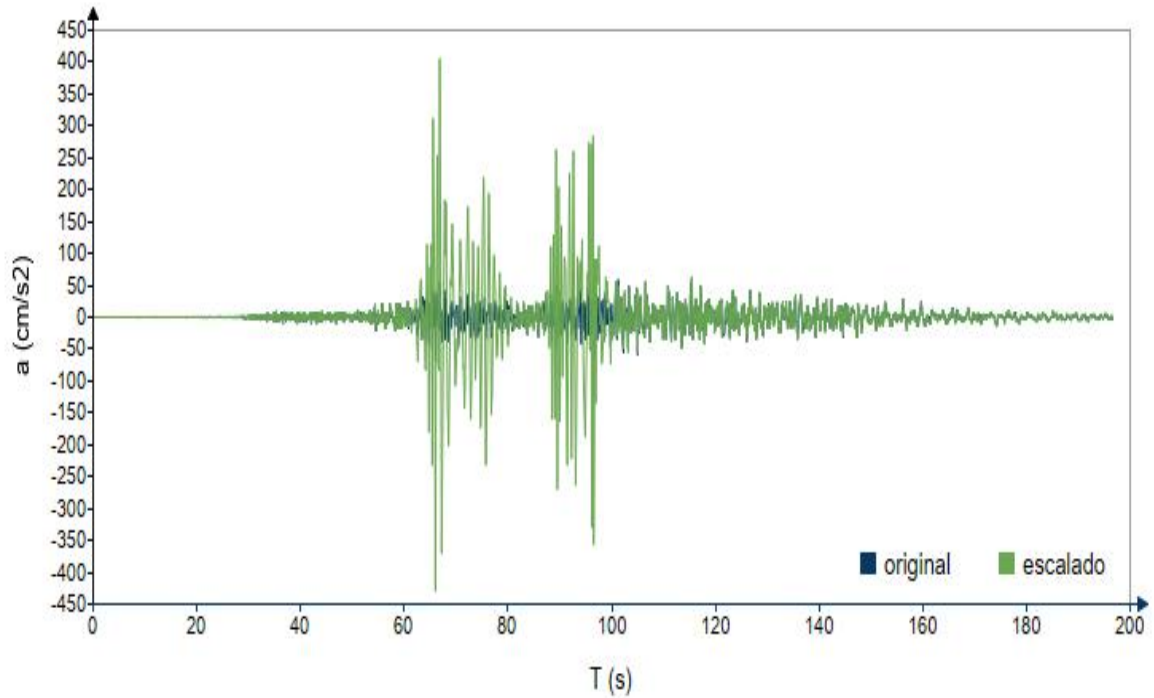


Figura 55. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – NS – Est. Juanjuí – San Martín)

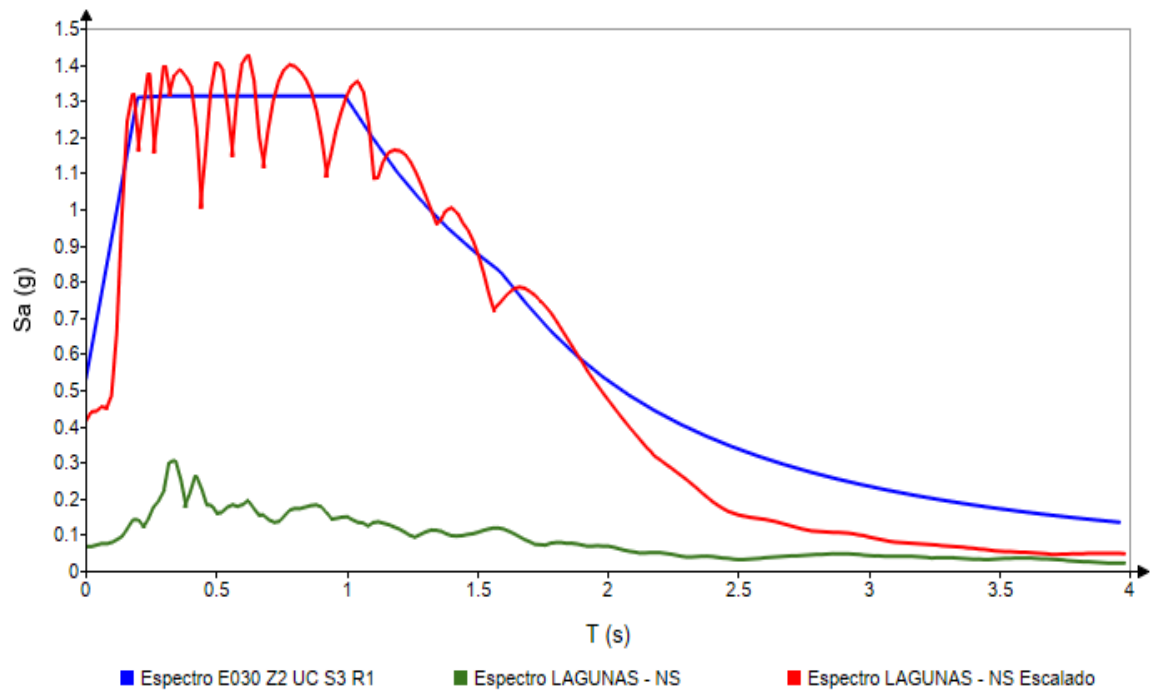


Figura 56. Ajuste de registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – EW – Est. Juanjuí – San Martín)

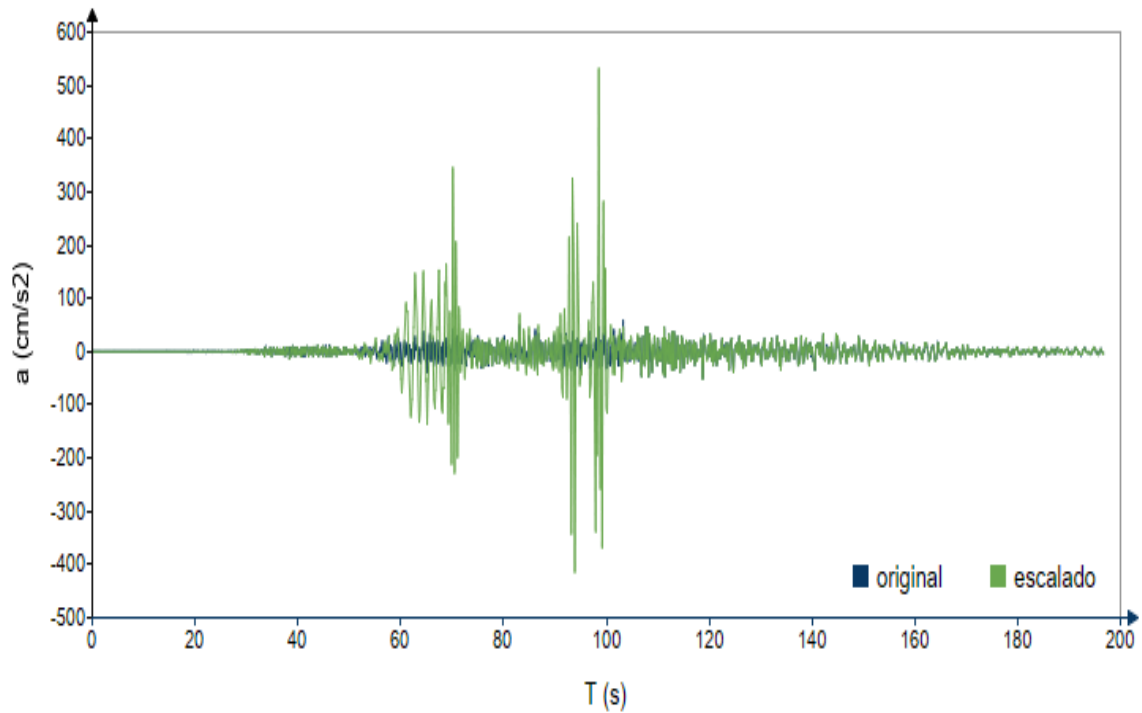


Figura 57. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico LAGUNAS: Epicentro de Lagunas (Alto Amazonas) 26/05/2019 (8.0Mw – EW – Est. Juanjuí – San Martín)

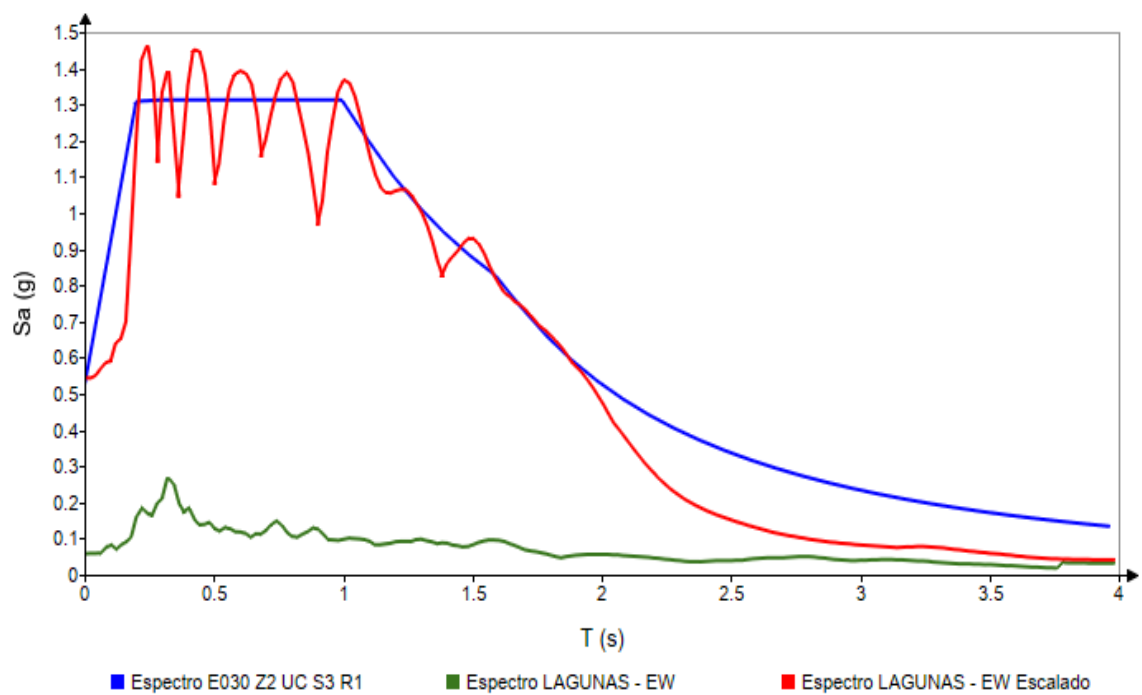


Figura 58. Ajuste de registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – NS – Est. UNF)

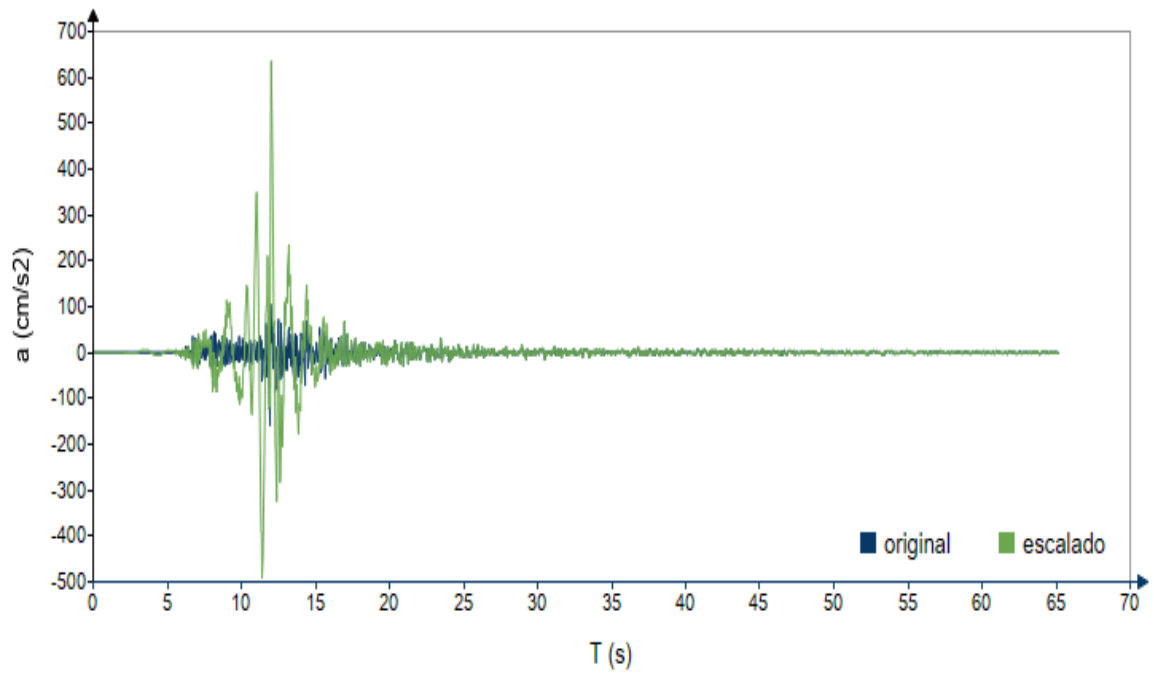


Figura 59. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – NS – Est. UNF)

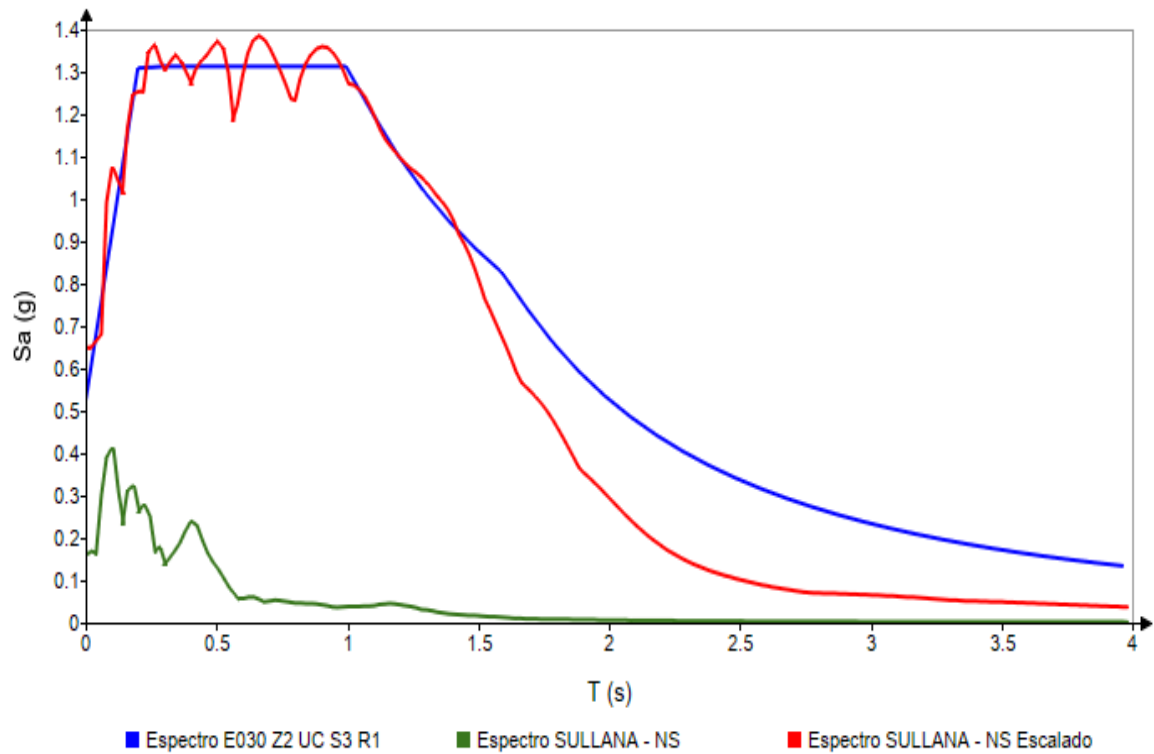


Figura 60. Ajuste de registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – EW – Est. UNF)

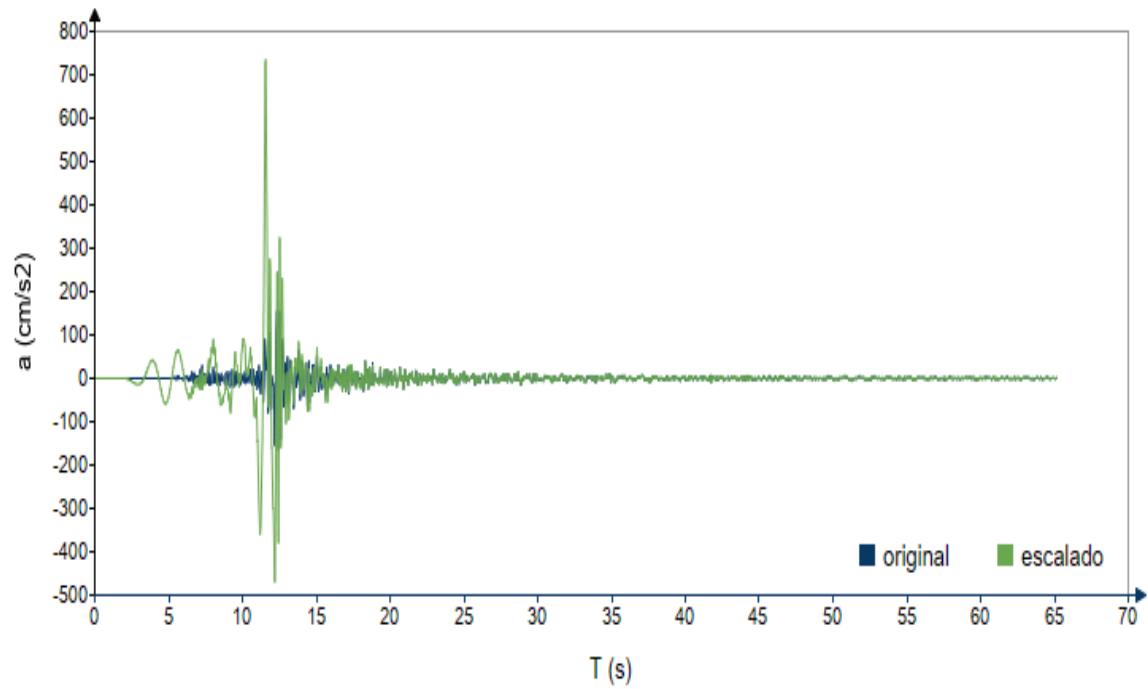


Figura 61. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico SULLANA: Epicentro de Sullana 30/07/2021 (6.1Mw – EW – Est. UNF)

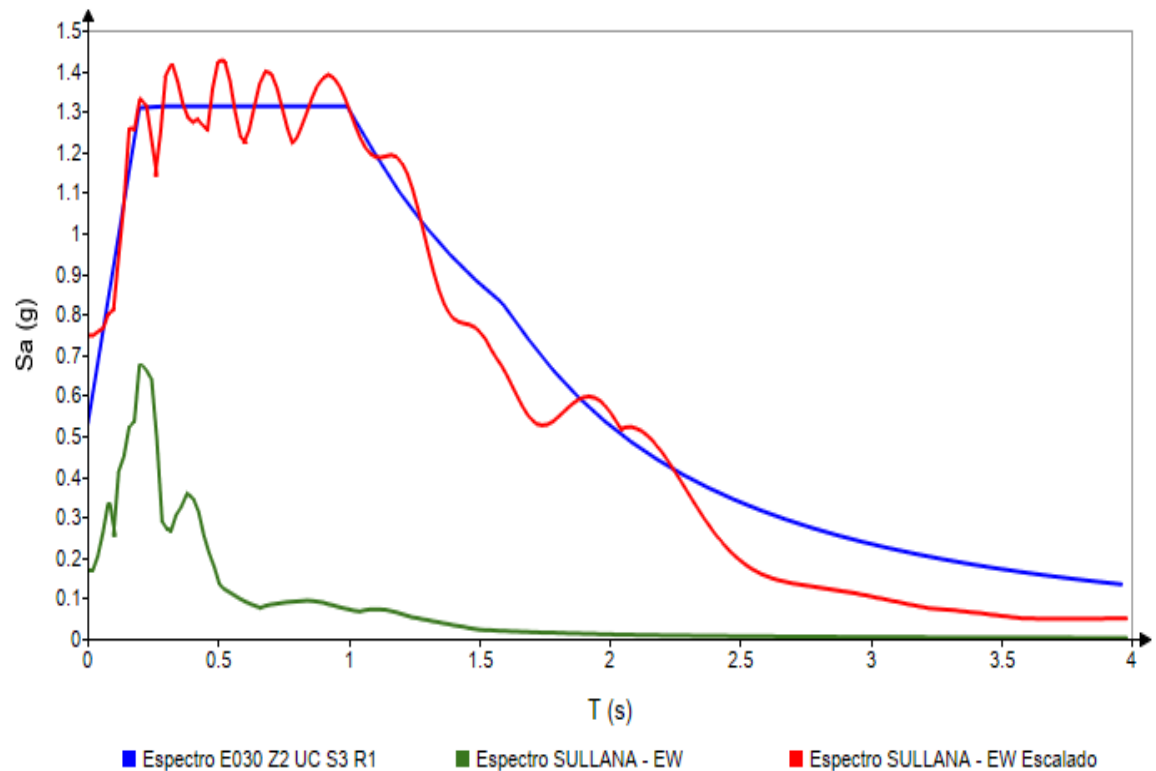


Figura 62. Ajuste de registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – NS – Est. Cip. Moyobamba)

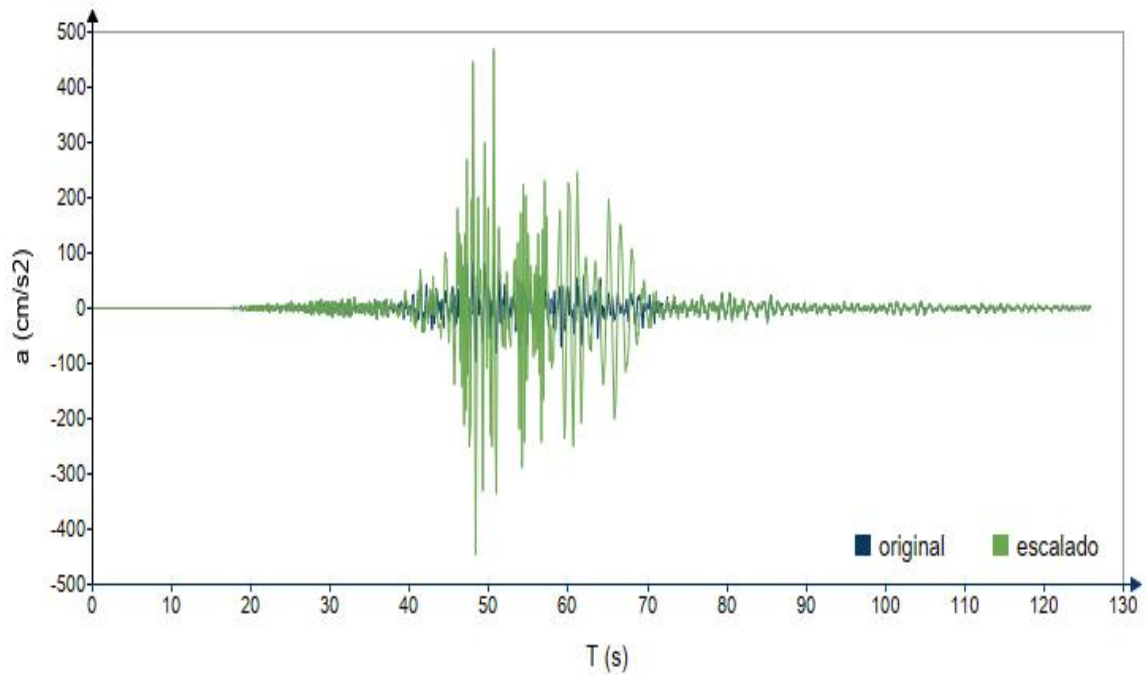


Figura 63. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – NS – Est. Cip. Moyobamba)

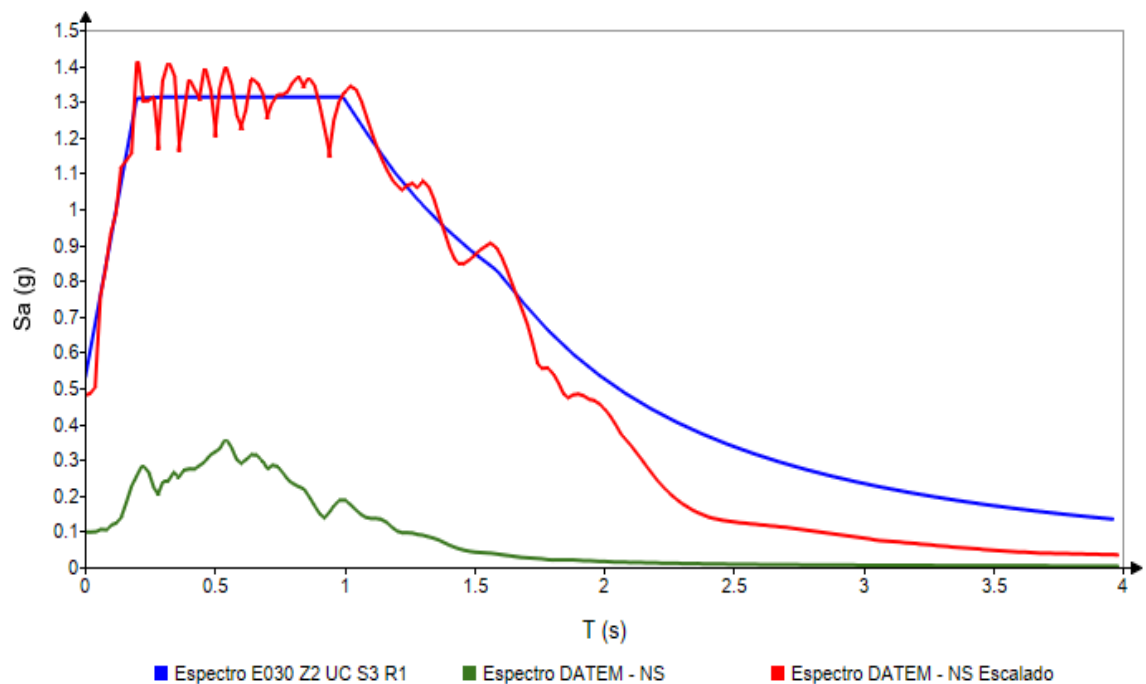


Figura 64. Ajuste de registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – EW – Est. Cip. Moyobamba)

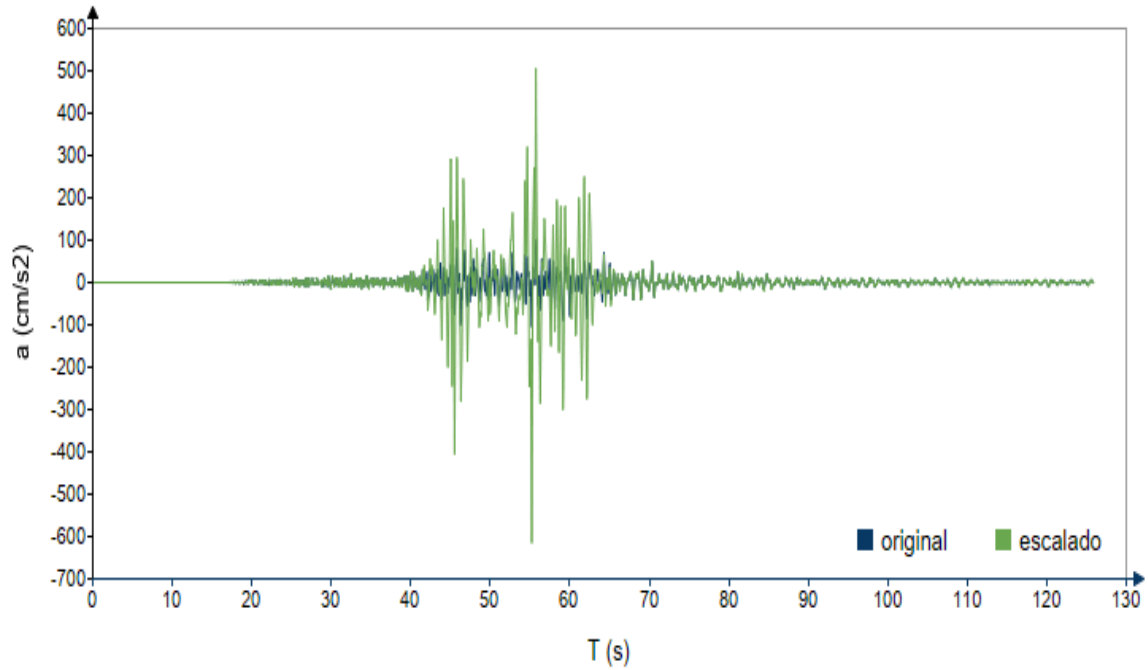
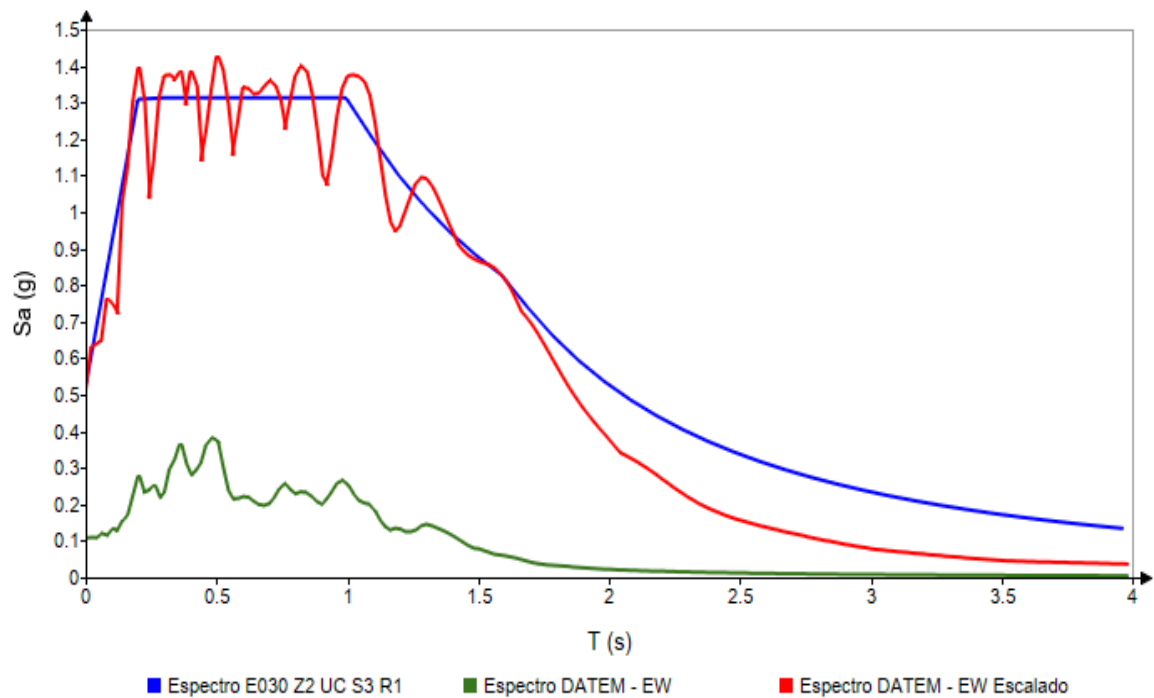


Figura 65. Espectros compatibles de respuesta del registro sísmico DATEM del Marañón: Reportado en el distrito de Barranca (DateM del Marañón, Loreto) 28/11/2021 (7.5Mw – EW – Est. Cip. Moyobamba)



A continuación, se agrupan los acelerogramas y espectros de los registros sísmos y sus componentes:

Figura 66. Acelerogramas agrupados de los registros sísmicos

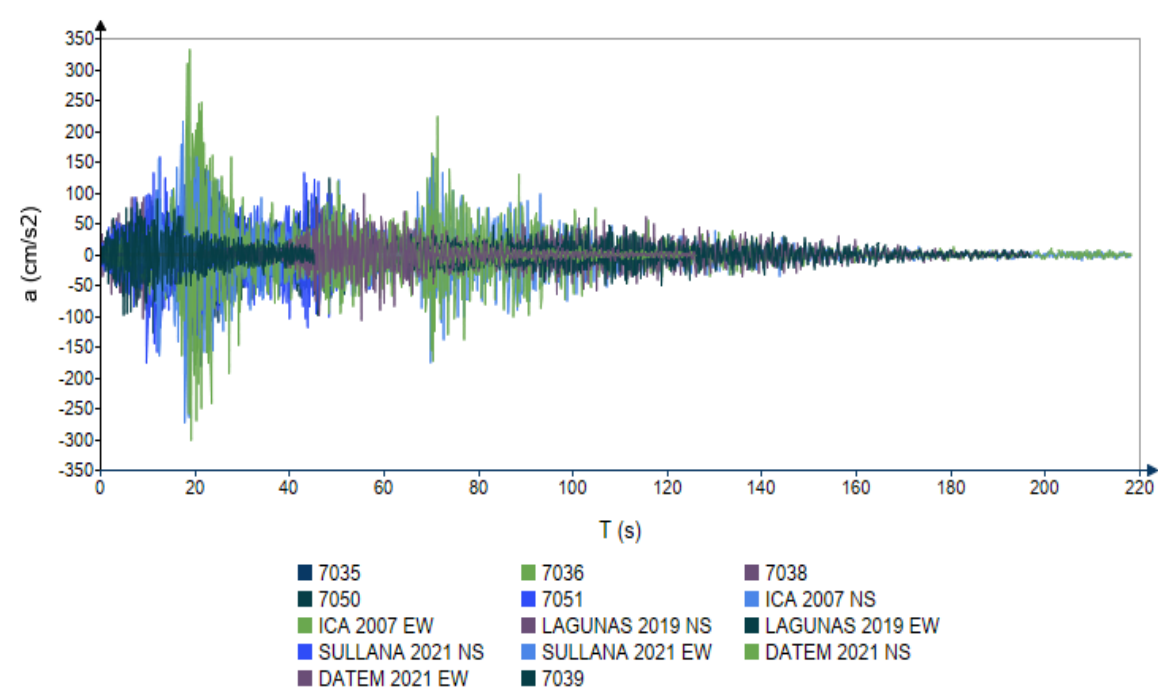


Figura 67. Acelerogramas ajustados agrupados de los registros sísmicos:
Sismos de diseño

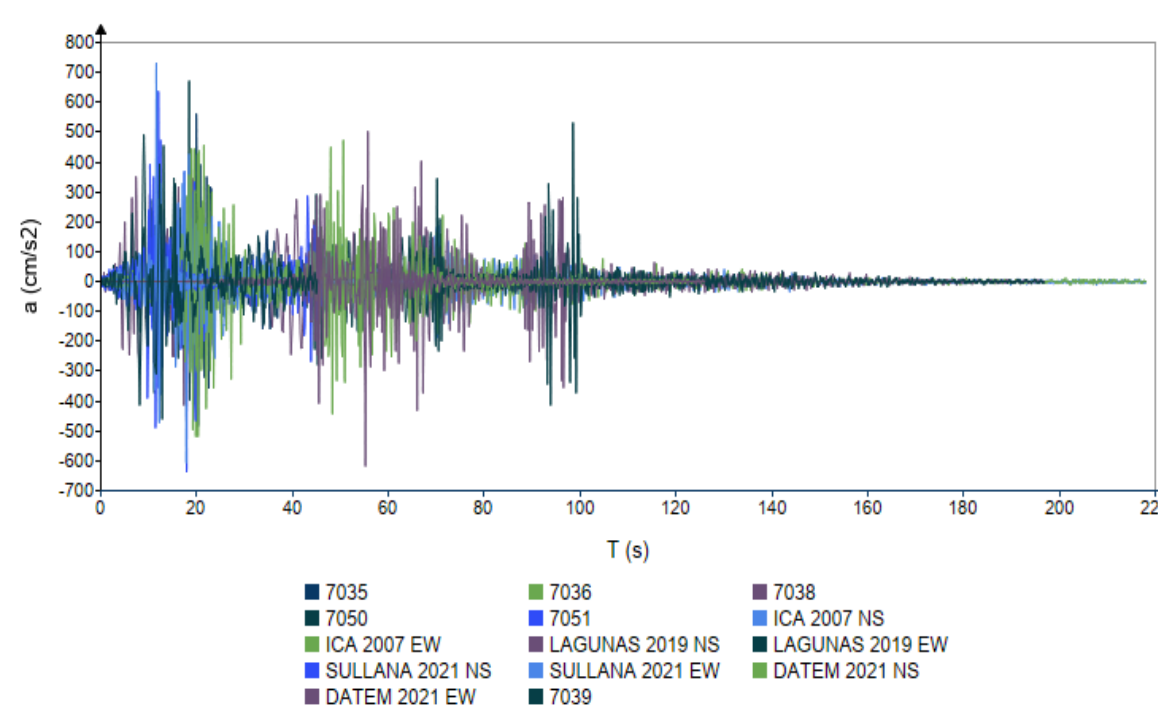


Figura 68. Espectros de respuesta agrupados de los registros sísmicos

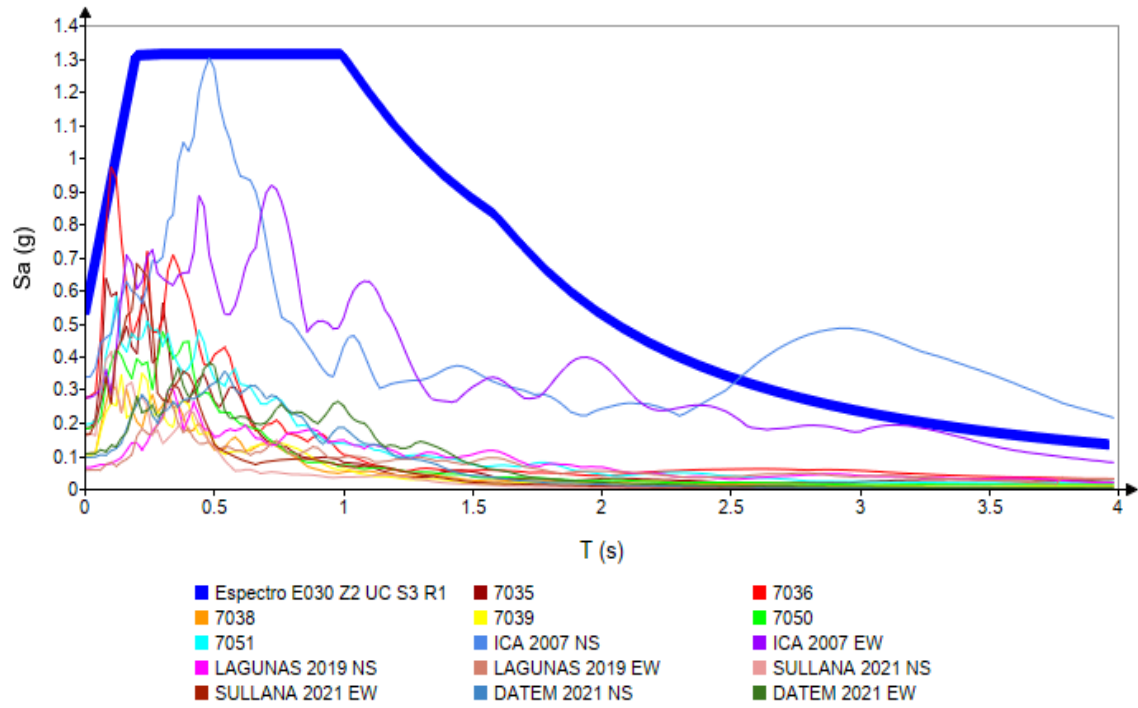
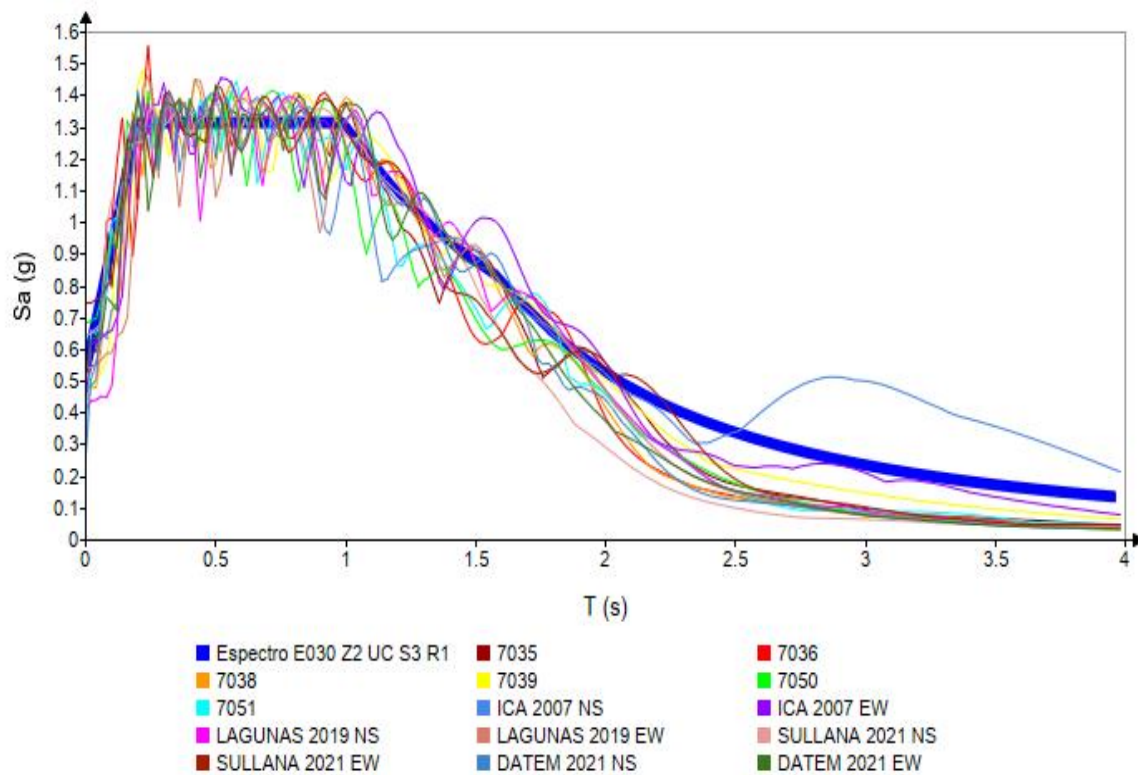


Figura 69. Espectros de respuesta ajustados agrupados de los registros sísmicos



Predimensionamiento del Sistema de Aislamiento (Sistema de 1 grado de libertad)

Periodo con base fija: $T_x := 0.486692 \text{ s}$

Periodo objetivo: $T_{obj} := 3.5 \cdot T_x = 1.703 \text{ s}$

Masas de entrepiso:

Figura 70. Reacciones en la base en superestructura

E Base Reactions											
File Edit Format-Filter-Sort Select Options											
Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None											
Filter: None											
	Output Case	Case Type	FX tonf	FY tonf	FZ tonf	MX tonf-m	MY tonf-m	MZ tonf-m	X m	Y m	Z m
►	servicio	Combination	0	0	413.4805	2054.0992	-4302.222	0	0	0	0

Peso de superestructura:

$$P_{super} := 413.4805 \text{ tonnef}$$

$$M_{super} := \frac{P_{super}}{g} = 42.16328 \frac{s^2}{m} \cdot \text{tonnef}$$

Figura 71. Reacciones en la base en superestructura incluido plataforma de aislamiento

E Base Reactions											
File Edit Format-Filter-Sort Select Options											
Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None											
Filter: None											
	Output Case	Case Type	FX tonf	FY tonf	FZ tonf	MX tonf-m	MY tonf-m	MZ tonf-m	X m	Y m	Z m
►	servicio	Combination	0	0	616.9103	3162.7916	-6408.3742	0	0	0	0

$$P_{sup} := 616.9103 \text{ tonnef}$$

$$P_{plat} := P_{sup} - P_{super} = 203.4298 \text{ tonnef}$$

$$M_{plat} := \frac{P_{plat}}{g} = 20.74407 \frac{s^2}{m} \cdot \text{tonnef}$$

· Peso de la superestructura:	$P_s := M_{super} \cdot g = 413.481 \text{ tonnef}$
· Peso de la plataforma:	$P_b := M_{plat} \cdot g = 203.43 \text{ tonnef}$ $\frac{P_b}{P_s} = 0.49199$
· Peso total:	$W := P_s + P_b = 616.91 \text{ tonnef}$
· Rigidez efectiva del sistema de aislamiento:	$K_M := \frac{4 \cdot \pi^2}{T_{obj}^2} \cdot \frac{W}{g} = 855.887 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$
· Numero de dispositivos:	$n := 14$
· Rigidez efectiva de cada aislador:	$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}} > 60 \text{ ton/m}$

· **Aceleración para el periodo objetivo en el espectro elástico:**

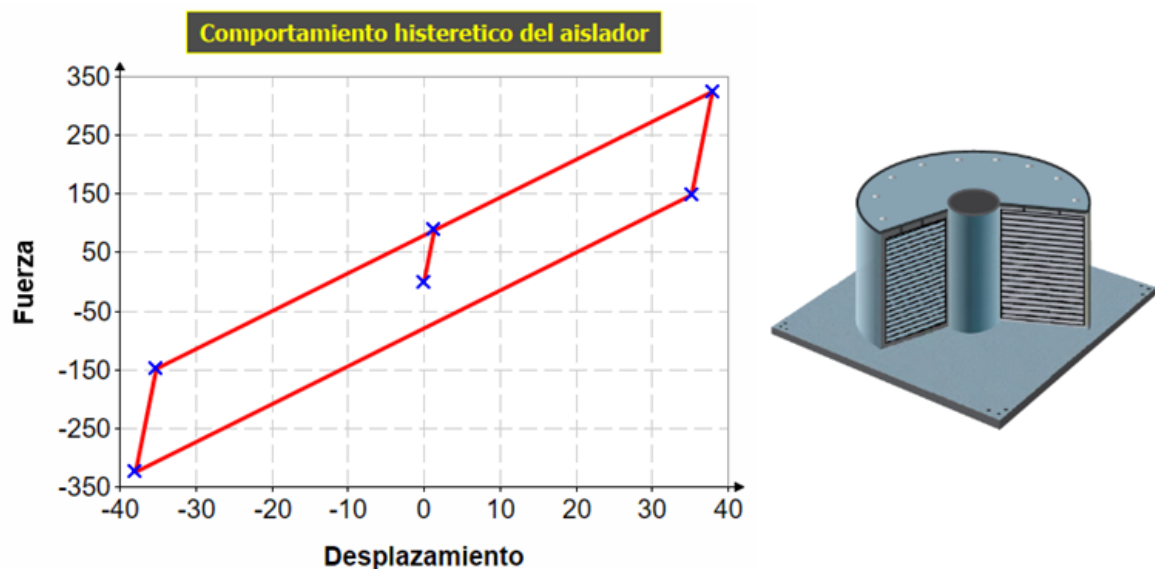
$$Z = 0.25 \quad T_L = 1.6 \text{ s} \quad T_P = 1 \text{ s} \quad U = 1 \quad S = 1.4 \quad T_{obj} = 1.70342 \text{ s}$$

$$S_{aM} := \left\{ \begin{array}{l} T_{obj} \leftarrow T_{obj} \\ \text{if } T_{obj} < 0.2 \cdot T_P \\ \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(1 + 7.5 \frac{T_{obj}}{T_P} \right) \end{array} \right\| \\ \text{else if } 0.2 \cdot T_P < T_{obj} \leq T_P \\ \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot (2.5) \end{array} \right\| \\ \text{else if } T_P < T_{obj} \leq T_L \\ \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P}{T_{obj}} \right) \end{array} \right\| \\ \text{else if } T_{obj} > T_L \\ \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P \cdot T_L}{T_{obj}^2} \right) \end{array} \right\| \\ S_a \cdot g \end{array} \right\} = 0.7237 \text{ g}$$

· Frecuencia:	$\omega := 2 \cdot \frac{\pi}{T_{obj}} = 3.68857 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
· Pseudo Desplazamiento elástico:	$S_d := \frac{S_{aM}}{\omega^2} = 52.16512 \text{ cm}$ espectro 5%
· Amortiguamiento objetivo:	$\beta_{obj} := 15\%$ recomendacion entre 10% y 15%
· Reducción de la demanda sísmica:	$B := \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(100 \cdot \beta_{obj})} = 1.37545$

Desplazamiento espectral reducido:	$D_M := \frac{S_d}{B} = 37.92577 \text{ cm}$ espectro 15%
Relación de rigideces:	$\alpha := 10 \quad \alpha_{post} := \alpha$
Desplazamiento de fluencia:	
$D_y := -(\beta_{obj} \cdot \pi - 2) \cdot \frac{D_M}{4} - \frac{D_M}{4} \cdot \sqrt{(\beta_{obj} \cdot \pi - 2)^2 - \frac{8}{\alpha - 1} \cdot \beta_{obj} \cdot \pi} = 1.36304 \text{ cm}$	
Rigidez secundaria:	$K_2 := \frac{K_M \cdot D_M}{D_M + (\alpha - 1) \cdot D_y} = 646.70568 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$
Rigidez inicial:	$K_1 := \alpha \cdot K_2 = 6467.057 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$
Fuerza de fluencia:	$F_y := K_1 \cdot D_y = 88.1486 \text{ tonnef}$
Cortante basal:	$V_b := K_M \cdot D_M = 324.602 \text{ tonnef}$
Coefficiente de amortiguamiento:	$c := 2 \cdot \beta_{obj} \cdot \sqrt{\frac{W}{g} \cdot K_M} = 69.61138 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot \text{tonnef}$

Figura 72. Gráfica del comportamiento histórico del Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)



Propiedades para un aislador:

$$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$\frac{c}{n} = 4.97224 \text{ s} \cdot \frac{\text{tonnef}}{m} \quad \text{Opcional.}$$

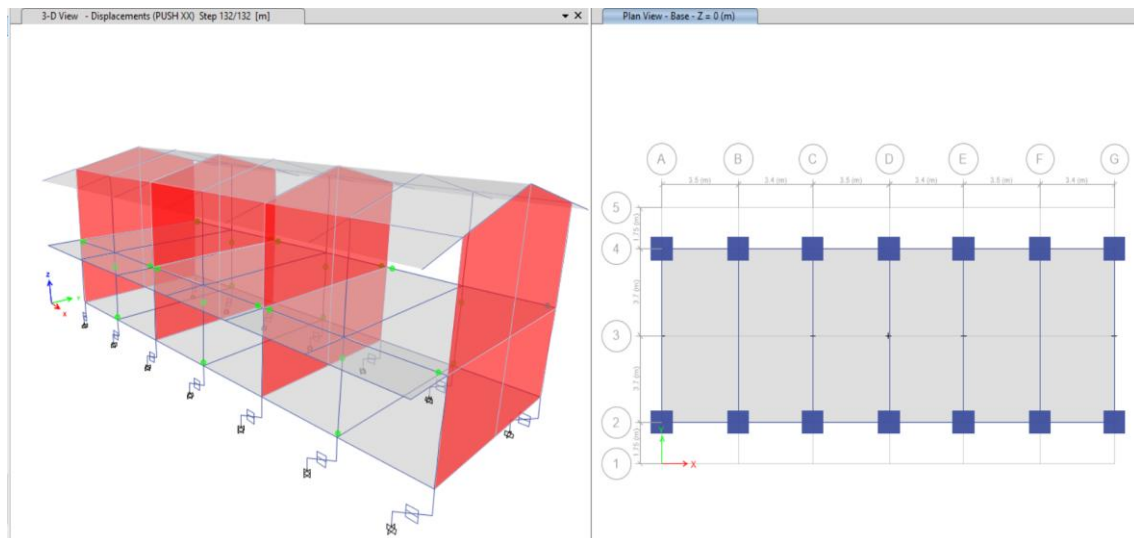
$$\frac{K_1}{n} = 461.93263 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$\frac{F_y}{n} = 6.29633 \text{ tonnef}$$

$$\frac{1}{\alpha} = 0.1$$

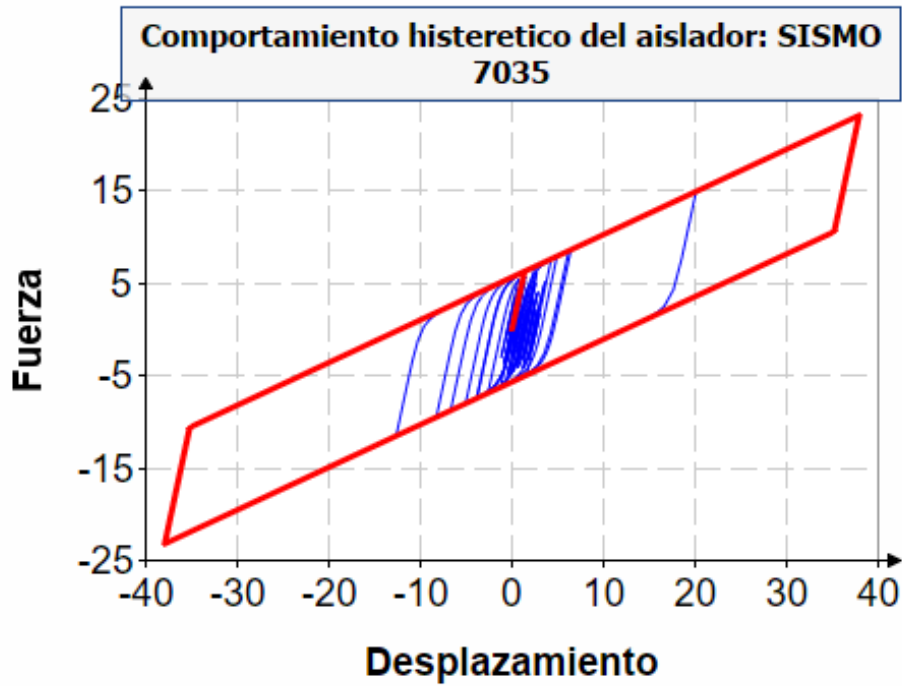
- ✓ Para el análisis fueron considerados 14 aisladores, ubicados en los ejes que se muestran en la siguiente figura:

Figura 73. Vista de planta y elevación de los 14 aisladores considerados en el análisis



Se realizó el comportamiento histeréticos del aislador respecto a cada registro de sismo y sus componentes, del cual mostramos para el primero a continuación:

Figura 74. Comportamiento histerético del aislador: SISMO 7035



Se realiza el cálculo:

$$D_M = 0.37926 \text{ m}$$

$$D_{1_7035} := \max(Des1) = 0.20102 \text{ m}$$

$$D_{2_7035} := -\min(Des1) = 0.1264 \text{ m}$$

$$D_1 := 0.5 (D_{1_7035} + D_{2_7035}) = 16.371 \text{ cm}$$

$$D_{M_TH_7035} := \frac{D_{1_7035} + D_{2_7035}}{2} = 0.16371 \text{ m}$$

$$V_{1_7035} := \max(V1) = 14.9524 \text{ tonnef}$$

$$V_{2_7035} := -\min(V1) = 11.5056 \text{ tonnef}$$

$$V_{TH_7035} := V_{1_7035} + V_{2_7035} = 26.458 \text{ tonnef}$$

$$K_{eff_7035} := \frac{V_{TH_7035}}{2 \cdot D_{M_TH_7035}} = 80.80753 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$Q := \frac{F_y}{n} - D_y \cdot \frac{K_2}{n} = 5.6667 \text{ tonnef}$$

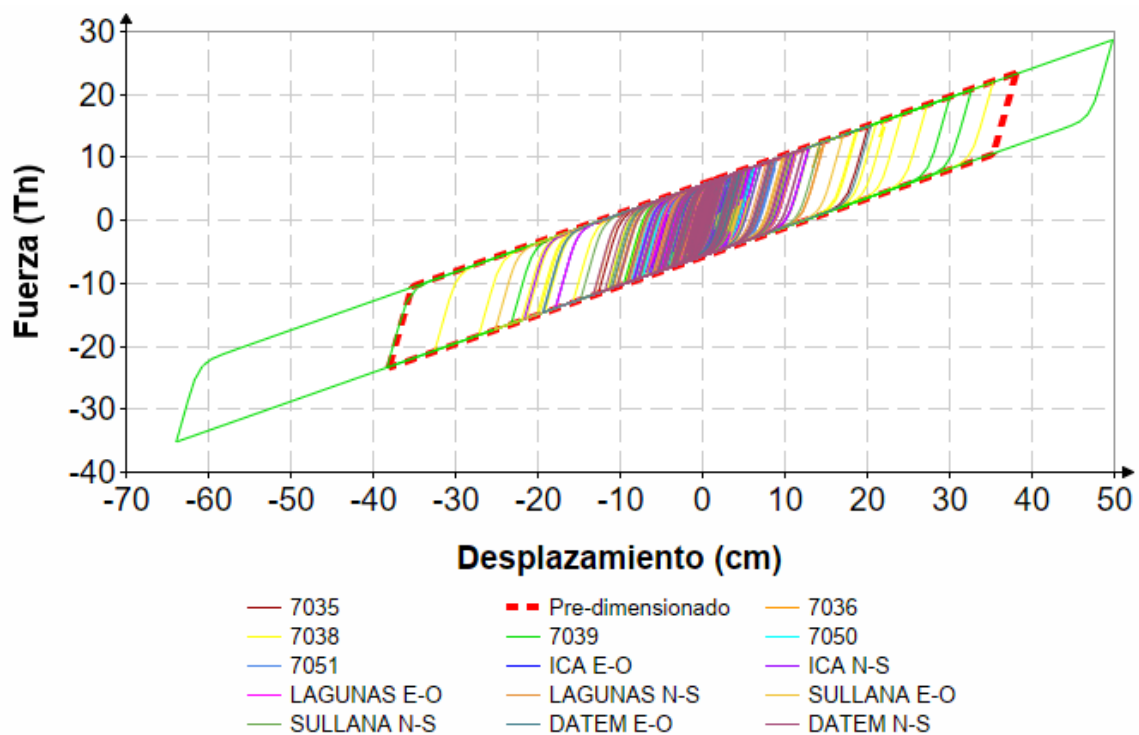
amortiguamiento

$$\beta_{th_7035} := \frac{4 \cdot Q \cdot (D_{M_TH_7035} - D_y)}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff_7035} \cdot D_{M_TH_7035}^2} = 0.24999$$

$$c := \frac{2}{n} \cdot \beta_{th_7035} \cdot \sqrt{\frac{W}{g} \cdot K_{eff_7035}} = 2.54629 \frac{s}{m} \cdot \text{tonnef}$$

De la misma manera se realizó el cálculo para los demás registros de sismos, donde finalmente obtenemos el comportamiento histeréticos del aislador en los 7 pares registrados, que se muestran a continuación en la Figura 75:

Figura 75. Comportamiento histerético del aislador para los 7 PARES DE REGISTROS



Desplazamiento y cortante máximo promedio

$$D_{maxp} := \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7 + D_8 + D_9 + D_{10} + D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{14}}{14} = 19.57642 \text{ cm}$$

$$V_{maxp} := \frac{V_{TH_7035} + V_{TH_7036} + V_{TH_7038} + V_{TH_7039} + V_{TH_7050} + V_{TH_7051} + V_{TH_ICAE} + V_{TH_ICAN} +}{14} \\ + \frac{V_{TH_LAGE} + V_{TH_LAGN} + V_{TH_SULLE} + V_{TH_SULLN} + V_{TH_DATE} + V_{TH_DATN}}{14} \cdot 0.5$$

$$V_{maxp} = 14.70057 \text{ tonnef}$$

$$K_{eff_p} := \frac{K_{eff_7035} + K_{eff_7036} + K_{eff_7038} + K_{eff_7039} + K_{eff_7050} + K_{eff_7051} + K_{eff_ICAE} + K_{eff_ICAN} +}{14} \\ + \frac{K_{eff_LAGE} + K_{eff_LAGN} + K_{eff_SULLE} + K_{eff_SULLN} + K_{eff_DATE} + K_{eff_DATN}}{14}$$

$$K_{eff_p} = 81.44739 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_M = 855.88729 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$Q := \frac{F_y}{n} - D_y \cdot \frac{K_2}{n} = 5.6667 \text{ tonnef}$$

amortiguamiento

$$\beta_{th_p} := \frac{4 \cdot Q \cdot (D_{maxp} - D_y)}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff_p} \cdot D_{maxp}^2} = 21.05023\%$$

$$c := \frac{2}{n} \cdot \beta_{th_p} \cdot \sqrt{\frac{W}{g} \cdot K_{eff_p}} = 2.15252 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot \text{tonnef}$$

Figura 76. Calibración de las propiedades del aislador con el promedio de los resultados de los 7 pares de registros

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: AISLADOR DE GOMA

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness: 81.447 tonf/m

Effective Damping: 0 tonf-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0 m

Nonlinear Properties

Stiffness: 461.933 tonf/m

Yield Strength: 6.2963 tonf

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

Figura 77. Calibración del análisis modal espectral del amortiguamiento del aislador con el promedio de los resultados de los 7 pares de registros

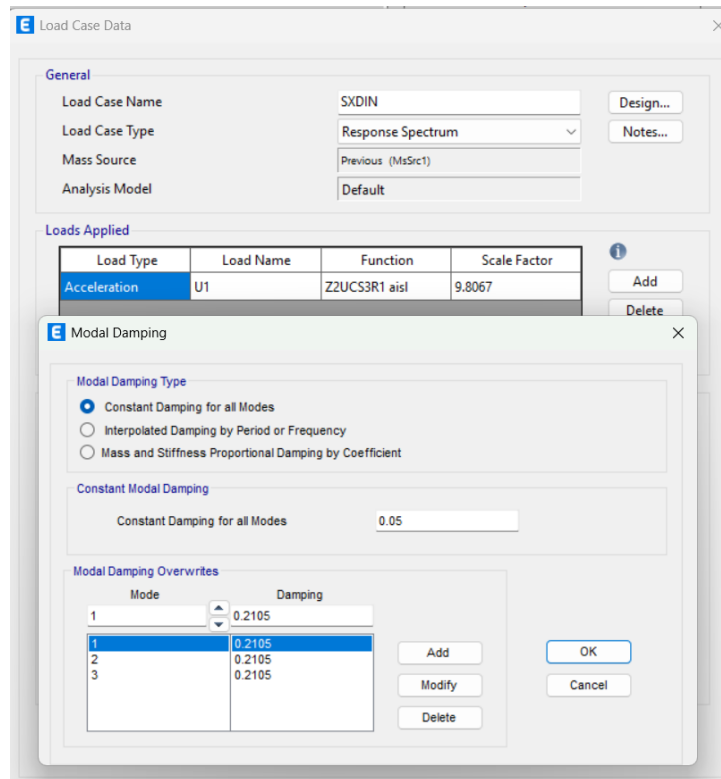


Figura 78. Suma vectorial de desplazamientos, 100% en dirección X y 30% en dirección Y, para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros

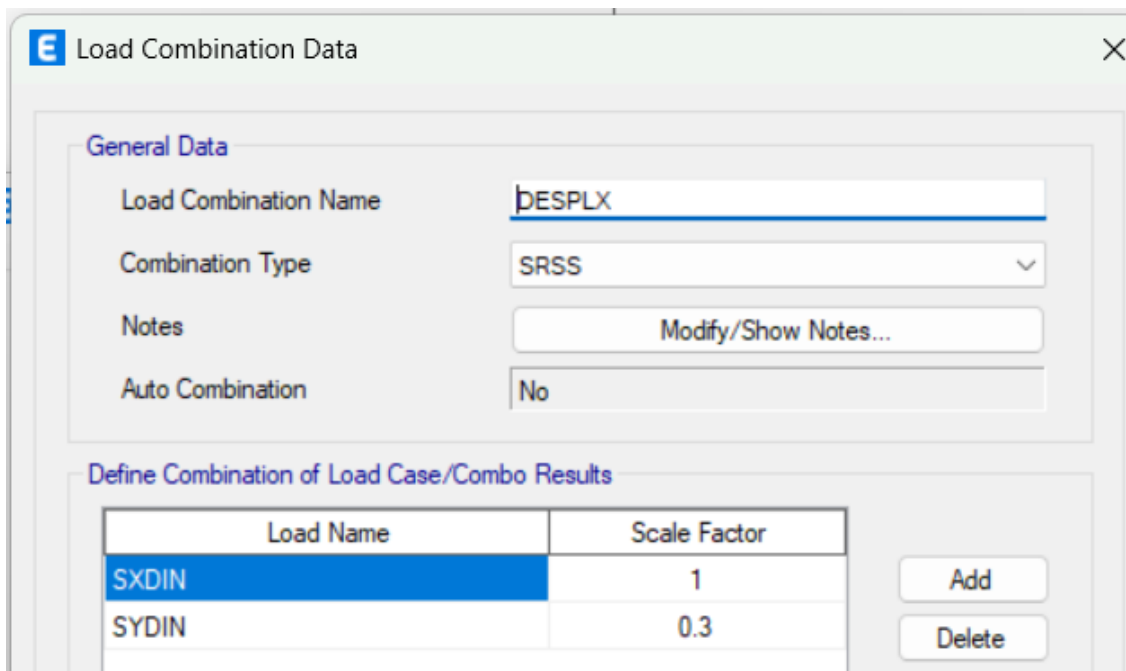
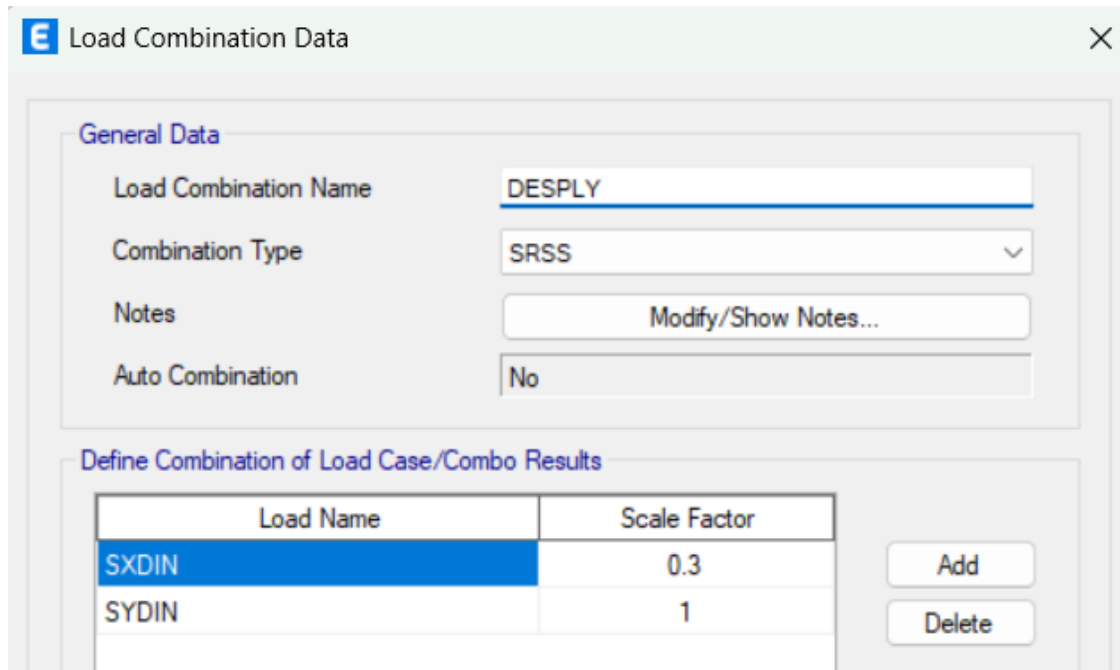


Figura 79. Suma vectorial de desplazamientos, 100% en dirección Y y 30% en dirección X, para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros



Load Combination Data

General Data

Load Combination Name: DESPLY

Combination Type: SRSS

Notes: Modify/Show Notes...

Auto Combination: No

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
SXDIN	0.3
SYDIN	1

Add

Delete

Figura 80. Desplazamiento en dirección X para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros

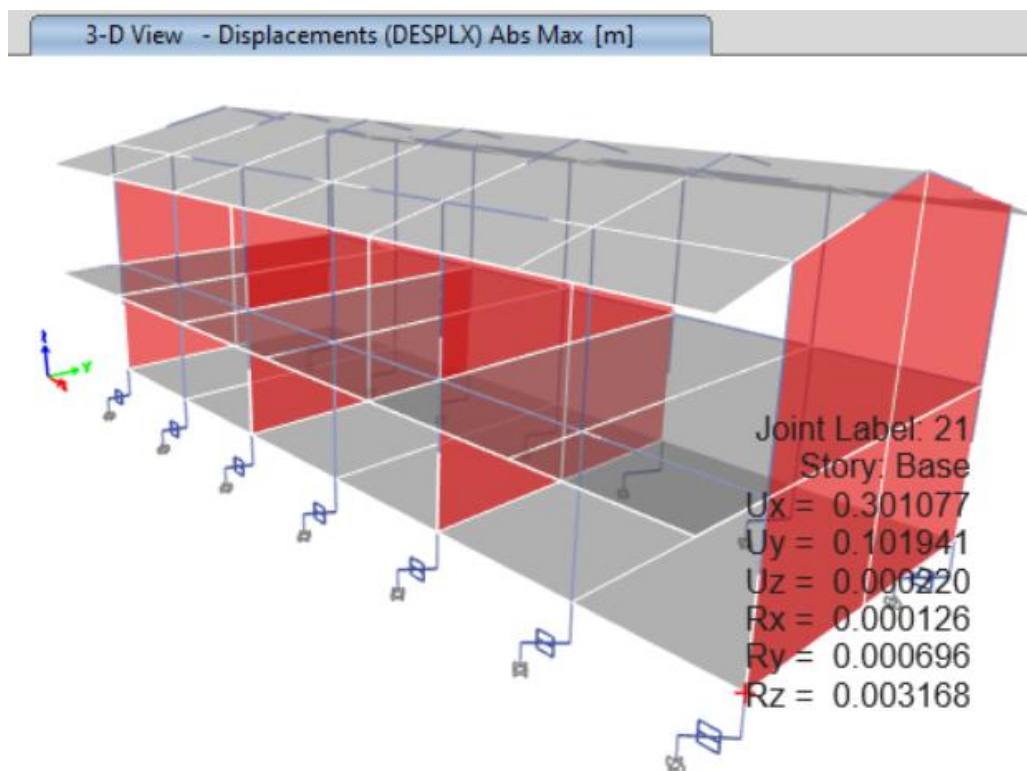
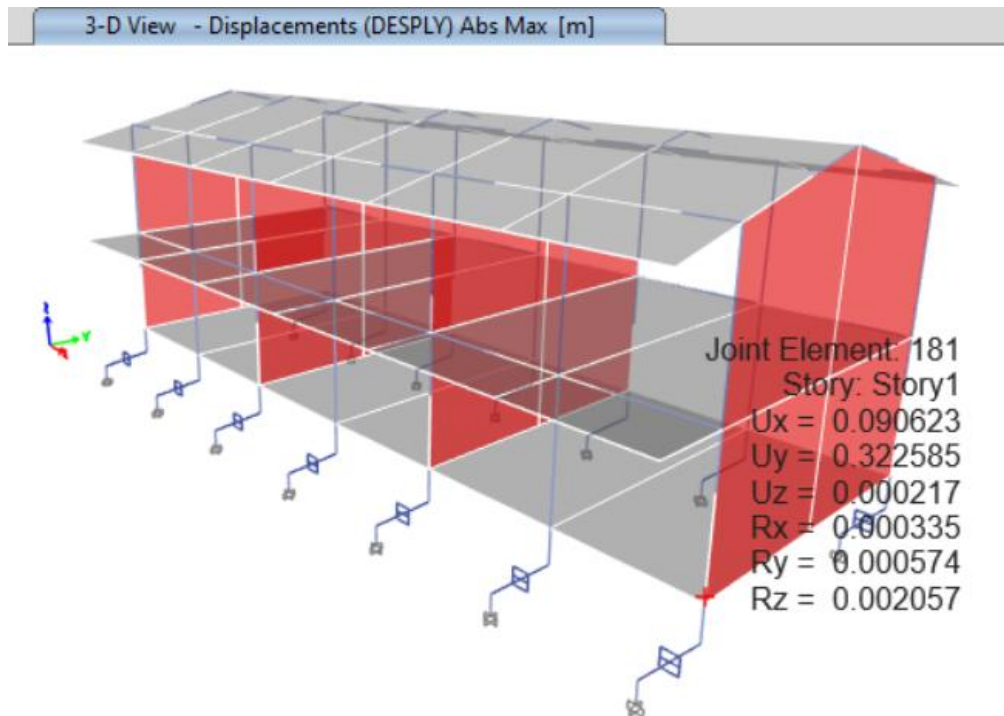


Figura 81. Desplazamiento en dirección Y para el sistema de aislación, calibrado con los 7 pares de registros



Propiedades no lineales superior e inferior

Tabla 14. Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos

Tabla N° 2: Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase I (*)							
	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	Aislador de bajo amortiguamiento	Aislador de caucho con núcleo de plomo	Aislador de Caucho con núcleo de Plomo	Aislador de Alto Amortiguamiento	Aislador de Alto Amortiguamiento
Variable	u o Qd	u o Qd	K	Kd	Qd	Kd	Qd
Mínimo Factor de Modificación λ_{max}	1.6	2.25	1.3	1.3	1.5	2	1.7
Máximo Factor de Modificación λ_{min}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Fuente: Valores indicados en los comentarios del Capítulo 17 de la ASCE 7-16

- Para un proveedor de clase 01:

$$\lambda_{max} := 1.3 \quad \lambda_{max_Q} := 1.5$$

$$\lambda_{min} := 0.8$$

- Propiedades no lineales para el limite superior:

$$\frac{K_2}{n} = 46.19326 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{2_max} := \lambda_{max} \cdot \frac{K_2}{n} = 60.05124 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$\frac{K_1}{n} = 461.93263 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{1_max} := K_{2_max} \cdot \alpha = 600.51242 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$Q := F_y - D_y \cdot K_2 = 79.33374 \text{ tonnef}$$

$$Q_{max} := \lambda_{max_Q} \cdot Q = 119.00061 \text{ tonnef}$$

$$D_y = 1.36304 \text{ cm}$$

$$D_{y_max} := \frac{Q_{max}}{n \cdot (K_{1_max} - K_{2_max})} = 1.57274 \text{ cm}$$

$$\frac{F_y}{n} = 6.29633 \text{ tonnef}$$

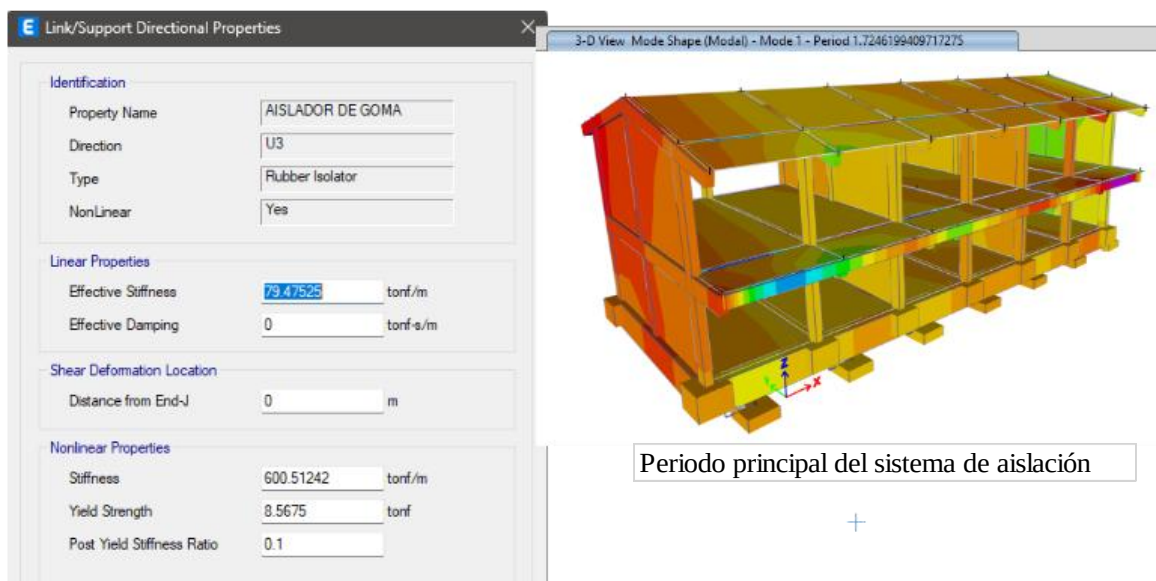
$$F_{y_max} := \frac{(Q_{max} + D_{y_max} \cdot K_{2_max})}{n} = 8.5675 \text{ tonnef}$$

$$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{M_max} := \lambda_{max} \cdot \frac{K_M}{n} = 79.47525 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

- Periodo para el limite superior:

$$T_{min} := 1.725$$



- Propiedades no lineales para el limite inferior:

$$\frac{K_2}{n} = 46.19326 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{2_min} := \lambda_{min} \cdot \frac{K_2}{n} = 36.95461 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$\frac{K_1}{n} = 461.93263 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{1_min} := K_{2_min} \cdot \alpha = 369.5461 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$Q := F_y - D_y \cdot K_2 = 79.33374 \text{ tonnef}$$

$$Q_{min} := \lambda_{min} \cdot Q = 63.46699 \text{ tonnef}$$

$$D_y = 1.36304 \text{ cm}$$

$$D_{y_min} := \frac{Q_{min}}{n \cdot (K_{1_min} - K_{2_min})} = 1.36304 \text{ cm}$$

$$\frac{F_y}{n} = 6.29633 \text{ tonnef}$$

$$F_{y_min} := \frac{(Q_{min} + D_{y_min} \cdot K_{2_min})}{n} = 4.56934 \text{ tonnef}$$

$$\frac{K_M}{n} = 61.13481 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_{M_min} := \lambda_{min} \cdot \frac{K_M}{n} = 48.90785 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

- Periodo para el limite inferior:

$$T_{max} := 1.725$$

- Rango de periodos para el escalamiento:

$$0.2 \cdot T_{min} = 0.345$$

$$1.25 \cdot T_{max} = 2.15625$$

Comportamiento Bilineal Límite inferior

- Periodo:

$$T'_{obj} := T_{max} \cdot s = 1.725 \text{ s}$$

- Frecuencia:

$$\omega' := 2 \cdot \frac{\pi}{T'_{obj}} = 3.64243 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- Aceleración para el periodo objetivo en el espectro elástico:

$$S'_{aM} := \left\| \begin{array}{l} T_{obj} \leftarrow T'_{obj} \\ \text{if } T_{obj} < 0.2 \cdot T_P \\ \quad \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(1 + 7.5 \frac{T_{obj}}{T_P} \right) \end{array} \right\| \\ \text{else if } 0.2 \cdot T_P < T_{obj} \leq T_P \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot (2.5) \right\| \\ \text{else if } T_P < T_{obj} \leq T_L \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P}{T_{obj}} \right) \right\| \\ \text{else if } T_{obj} > T_L \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P \cdot T_L}{T_{obj}^2} \right) \right\| \\ S_a \cdot g \end{array} \right\| = 0.7057 \text{ g}$$

- Pseudo Desplazamiento elástico:

$$S'_d := \frac{S'_{aM}}{\omega'^2} = 52.16512 \text{ cm}$$

- Desplazamiento espectral reducido:

$$D'_M := \frac{S'_d}{B} = 37.92577 \text{ cm}$$

- Cortante:

$$V_{min} := K_{M_min} \cdot D'_M = 18.54868 \text{ tonnef}$$

Comportamiento Bilineal Límite superior

- Periodo:

$$T''_{obj} := T_{min} \cdot s = 1.725 \text{ s}$$

- Frecuencia:

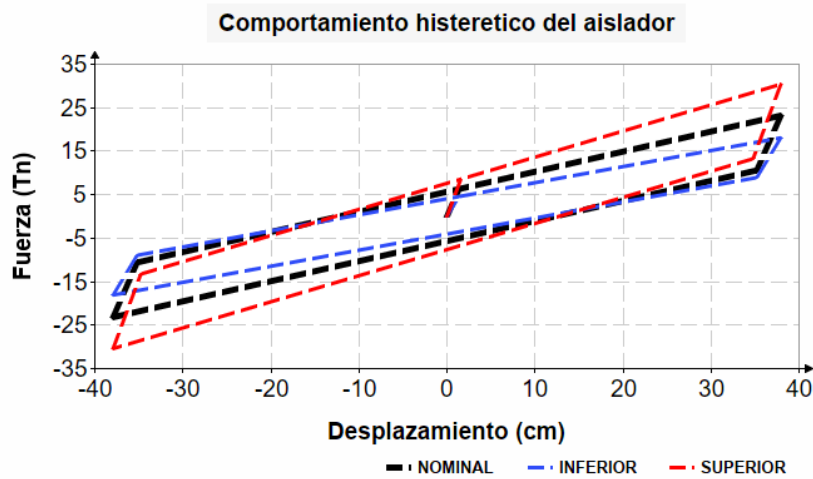
$$\omega'' := 2 \cdot \frac{\pi}{T''_{obj}} = 3.64243 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- Aceleración para el periodo objetivo en el espectro elástico:

$$S''_{aM} := \left\| \begin{array}{l} T_{obj} \leftarrow T''_{obj} \\ \text{if } T_{obj} < 0.2 \cdot T_P \\ \quad \left\| \begin{array}{l} S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(1 + 7.5 \frac{T_{obj}}{T_P} \right) \end{array} \right\| \\ \text{else if } 0.2 \cdot T_P < T_{obj} \leq T_P \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot (2.5) \right\| \\ \text{else if } T_P < T_{obj} \leq T_L \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P}{T_{obj}} \right) \right\| \\ \text{else if } T_{obj} > T_L \\ \quad \left\| S_a \leftarrow 1.5 \cdot Z \cdot U \cdot S \cdot \left(2.5 \frac{T_P \cdot T_L}{T_{obj}^2} \right) \right\| \\ S_a \cdot g \end{array} \right\| = 0.7057 \text{ g}$$

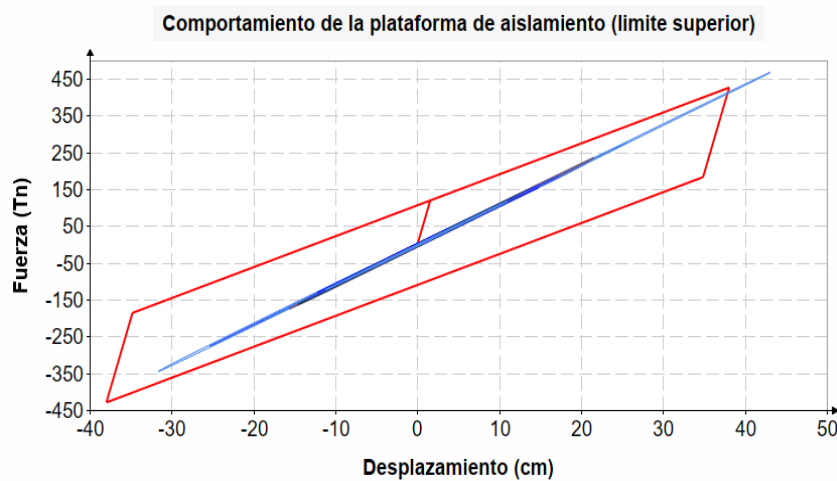
- Pseudo Desplazamiento elástico: $S''_d := \frac{S''_{aM}}{\omega''^2} = 52.16512 \text{ cm}$
- Desplazamiento espectral reducido: $D''_M := \frac{S''_d}{B} = 37.92577 \text{ cm}$
- Cortante: $V_{max} := K_{M_max} \cdot D''_M = 30.1416 \text{ tonnef}$

Figura 82. Comportamiento histerético del aislador, límites inferior y superior



Desplazamiento del sistema o plataforma de aislamiento (límite superior)

Figura 83. Comportamiento de la plataforma de aislamiento, límite superior



$D_1 = 0.12 \text{ m}$	$D_2 = 0.12 \text{ m}$	$D_3 = 0.23 \text{ m}$	$D_4 = 0.37 \text{ m}$	$D_5 = 0.07 \text{ m}$
$D_6 = 0.14 \text{ m}$	$D_7 = 0.13 \text{ m}$	$D_8 = 0.11 \text{ m}$	$D_9 = 0.13 \text{ m}$	$D_{10} = 0.09 \text{ m}$
$D_{11} = 0.19 \text{ m}$	$D_{12} = 0.14 \text{ m}$	$D_{13} = 0.15 \text{ m}$	$D_{14} = 0.11 \text{ m}$	

$$D_{M_TH} := \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7 + D_8 + D_9 + D_{10} + D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{14}}{14} = 15.1 \text{ cm}$$

Desplazamiento del sistema o plataforma de aislamiento (límite inferior)

Figura 84. Comportamiento de la plataforma de aislamiento, límite inferior

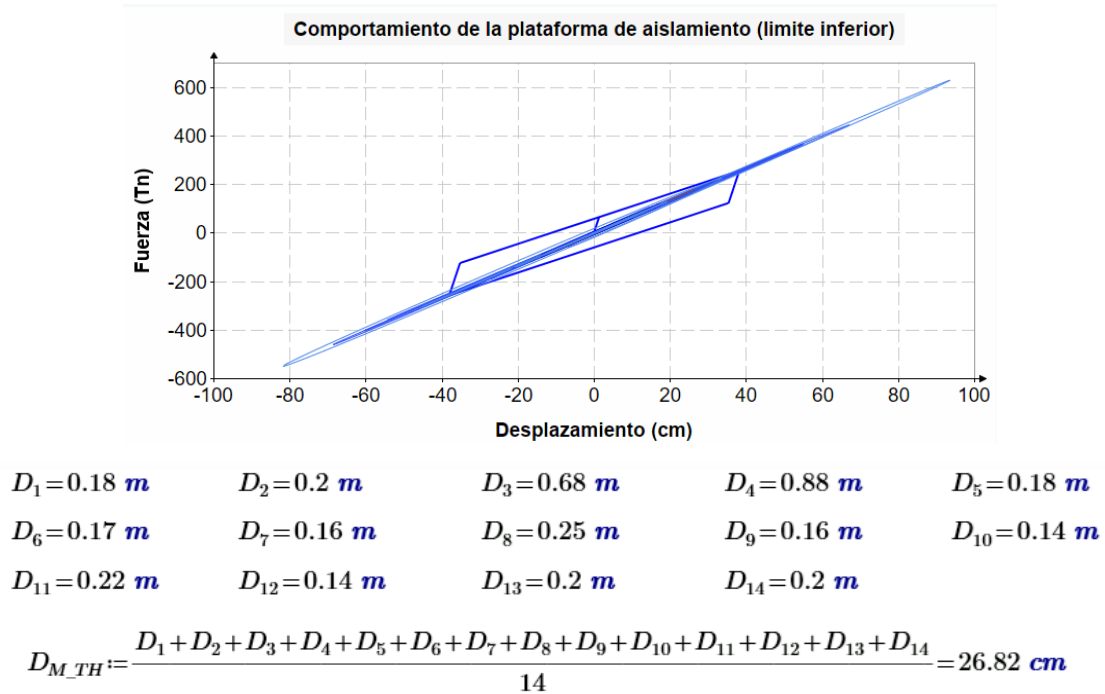


Figura 85. Curva de capacidad en la dirección X, para pórticos de concreto con 14 aisladores

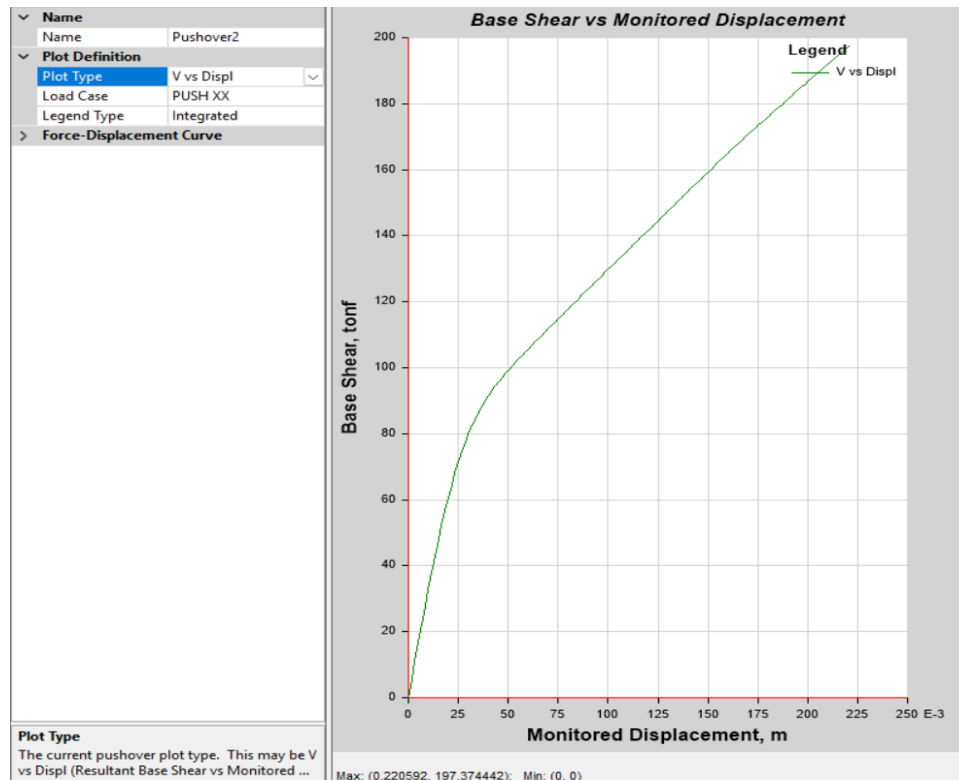


Figura 86. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con FEMA 440, con aisladores

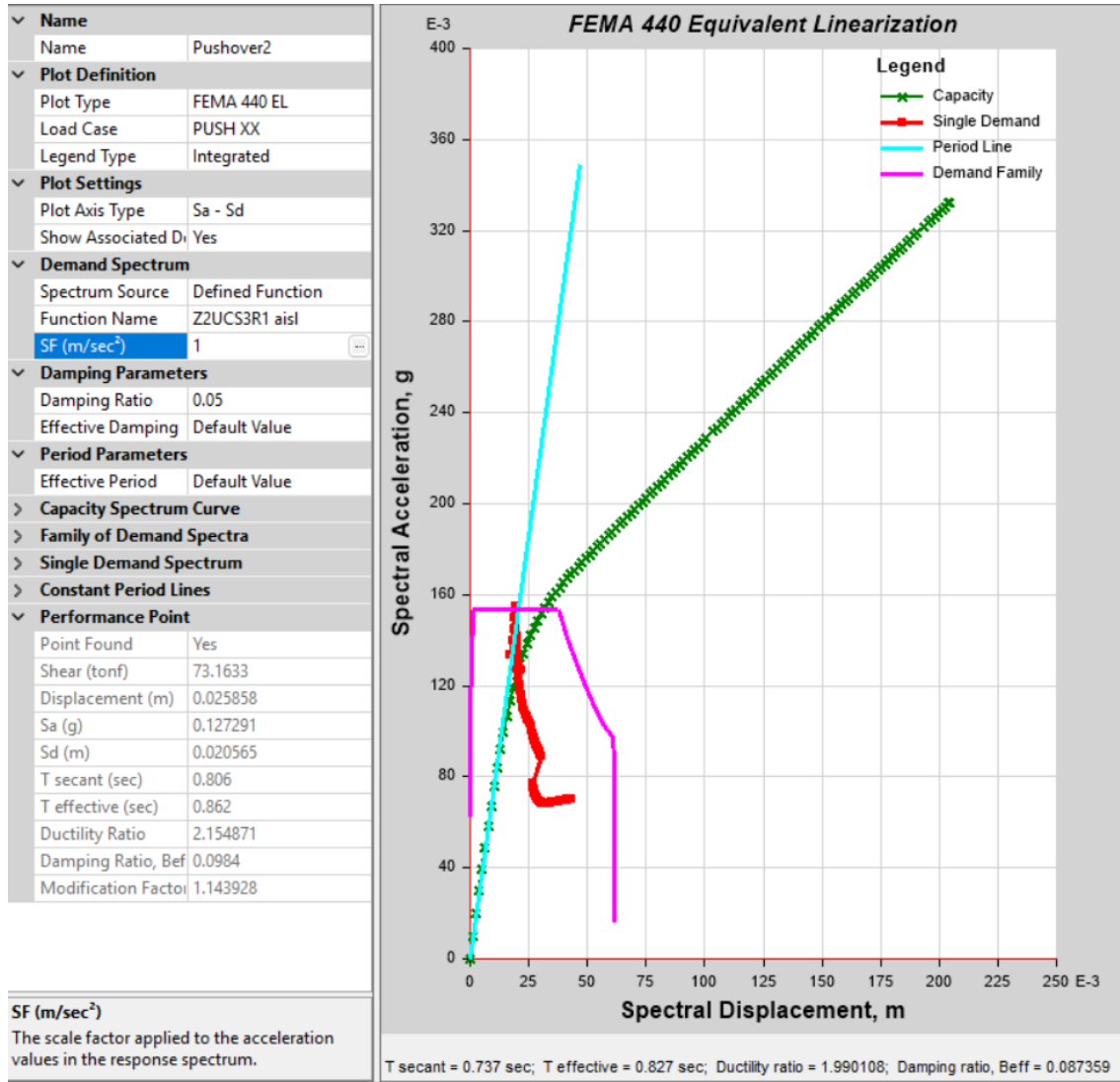


Figura 87. Desempeño estructural en la dirección X, para pórticos de concreto, para sismo máximo considerado (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con ASCE 41-13, con aisladores

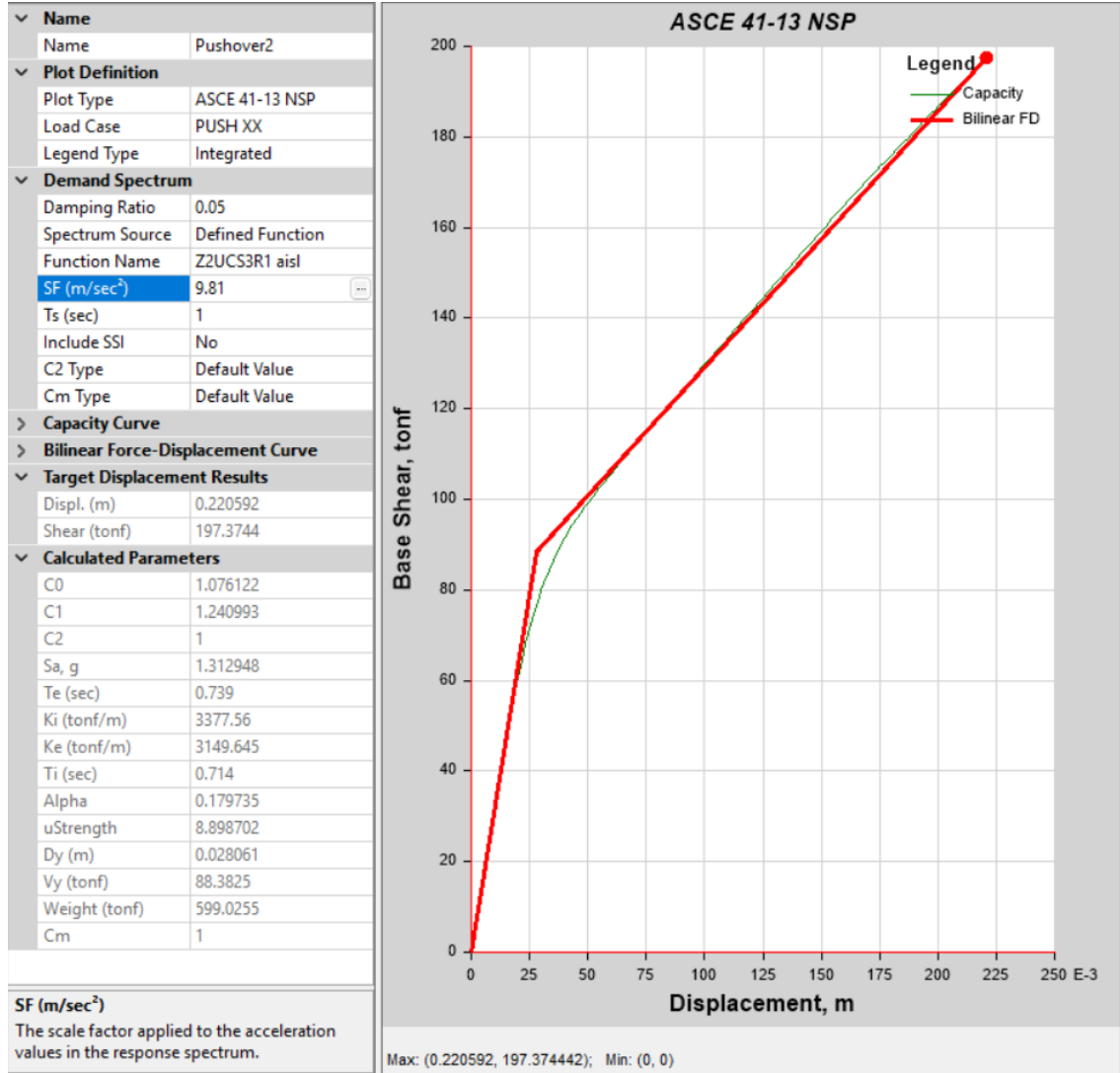


Figura 88. Las rotulas plásticas de las columnas se encuentra en el rango de ocupación inmediata y seguridad de vida, para sismo máximo considerado, (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con aislador

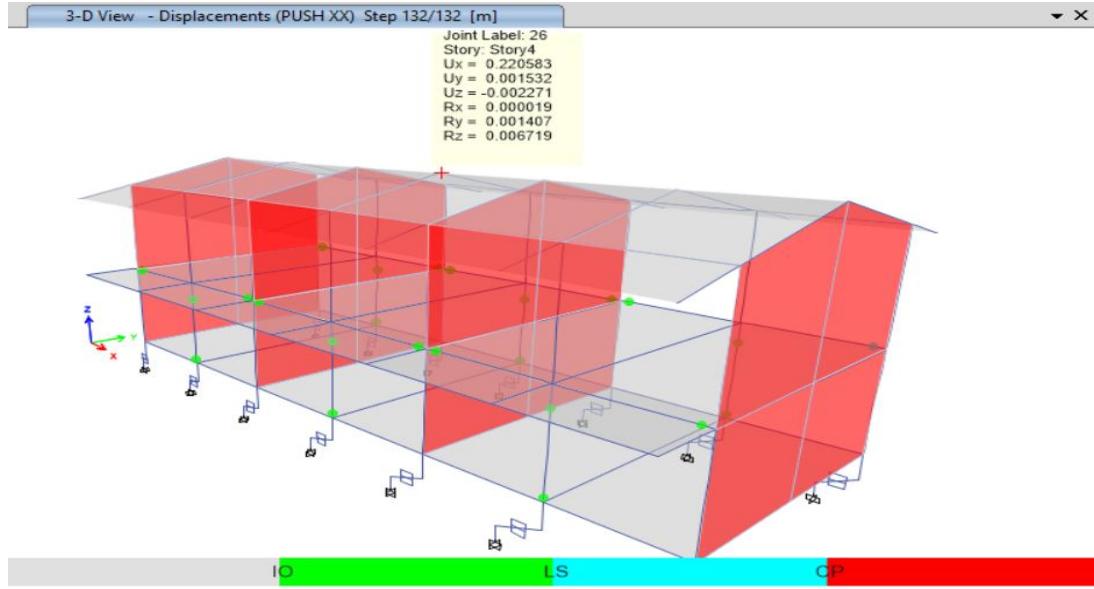
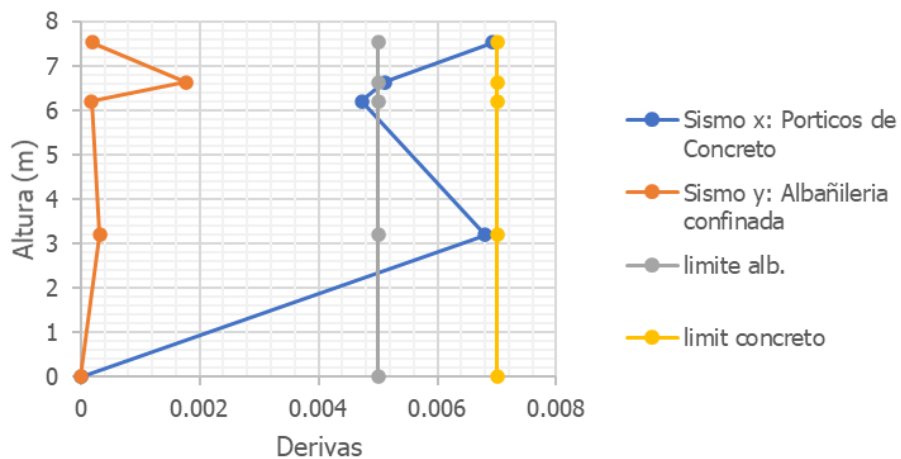


Tabla 15. Derivas de la edificación en ambas direcciones con aislador

TABLE: Story Response						
Story	Elevation m	Location	X-Dir	Y-Dir	Limite normativo (Albañilería)	Limite normativo (Concreto)
Story4	7.532	Top	0.006926	0.00019	0.005	0.007
Story3	6.632	Top	0.005106	0.001764	0.005	0.007
Story2	6.206	Top	0.004726	0.000182	0.005	0.007
Story1	3.2	Top	0.006798	0.000318	0.005	0.007
Base	0	Top	0	0	0.005	0.007

Figura 89. Demanda de derivas vs límites de derivas normativas



CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Verificación de las irregularidades

Se realizó la verificación de las irregularidades en altura y en planta respecto al Bloque N°04, de acuerdo a la Norma Técnica E.030 vigente, y se tiene que no existe irregularidades en altura ni en planta, por lo que se considera un factor de reducción 1.

4.1.2. Demanda de derivas sin y con aisladores

Se puede observar en la Tabla 11 y Tabla 15, las derivas en la dirección X e Y, analizado sin y con aisladores, respecto a las derivas normativas, donde se obtuvo que el análisis sin aisladores en la dirección X no cumple, teniendo como resultado 0.014719, siendo como máximo 0.007. En la dirección Y, si está por debajo de límite normativo.

4.1.3. Niveles de desempeño alcanzados

Desempeño estructural sin aislamiento:

Dirección X:

Las rotulas plásticas de las columnas llegan al límite de prevención al colapso, para un desplazamiento de 4.6cm correspondiente al Step 38 (ver Figura 27), luego las columnas llegan al colapso, correspondiente al Step 40 (ver Figura 28), respecto a este resultado se concluye que el fallo de la estructura sería total. Por lo tanto, el desempeño estructural para esta dirección en X, está después del punto de colapso, por lo cual en esta dirección corresponde considerar aislamiento en la base.

Dirección Y:

El punto de desempeño encontrado es de 1.2cm con el cual, el muro de albañilería no llega a su máxima capacidad, correspondiente al Step 21 (ver Figura 34), de acuerdo a esto se concluye que la estructura es segura en la dirección Y. Por lo tanto, el desempeño estructural para esta dirección en Y, está antes del punto de colapso, por lo cual en esta dirección no sería necesario considerar aislamiento en la base, debido a que la albañilería confinada otorga seguridad estructural.

Desempeño estructural con aislamiento:

Para cumplir con la capacidad de la edificación en la dirección X, se plantea como alternativa analizar el desempeño estructural, utilizando protección sísmica con Aisladores de base LRB.

En la dirección Y, cumple sin aisladores sísmicos, lo cual no sería necesario analizarlo para esta dirección.

El amortiguamiento promedio respecto a los 7 pares de registros utilizados para los 14 aisladores, fue de 21.05%, que se encuentra dentro del rango establecido por la Norma Técnica E.031, de 10% - 30%.

Dirección X:

Las rotulas plásticas de las columnas se encuentra en el rango de ocupación inmediata y seguridad de vida, para sismo máximo considerado, (probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, periodo de retorno de 2475 años), con aisladores.

4.2.DISCUSIÓN DE RESULTADOS

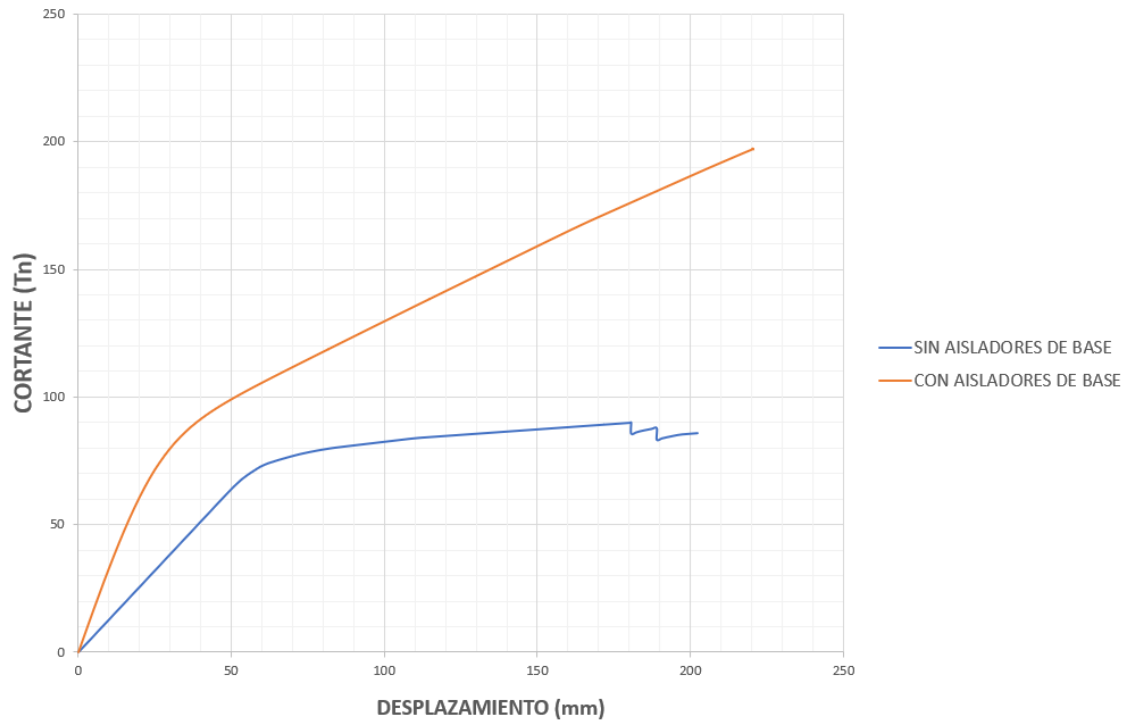
La respuesta del desempeño estructural del Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N°16006 evaluó el comportamiento de la edificación, con base fija y con la incorporación de aisladores sísmicos tipo LRB.

Tabla 16. Comparativa de derivas de la edificación en ambas direcciones sin y con aislador

Story	Elevation m	X-Dir	X-Dir con aisl	Y-Dir	Y-Dir con aisl	Limite normativo (Albañilería)	Limite normativo (Concreto)
Story4	7.532	0.014719	0.006926	0.000183	0.00019	0.005	0.007
Story3	6.632	0.009378	0.005106	0.003319	0.001764	0.005	0.007
Story2	6.206	0.008074	0.004726	0.000183	0.000182	0.005	0.007
Story1	3.2	0.009595	0.006798	0.000331	0.000318	0.005	0.007
Base	0	0	0	0	0	0.005	0.007

De esta tabla, se concluye que en la dirección X, si necesita la implementación de aisladores en la base, para poder cumplir con los límites normativos respecto a pórticos de concreto. En la dirección Y, la albañilería cumple con los límites, no fue necesario el análisis en esa dirección.

Figura 90. Curva de capacidad en la dirección X sin y con aisladores de base



En el modelo sin aislamiento, el desempeño fue diferente en cada dirección. En el eje X, conformado por pórticos de concreto armado, se evidenciaron fallas críticas, alcanzando estados de prevención de colapso e incluso colapso bajo el sismo máximo considerado, lo que revela una capacidad insuficiente para garantizar la estabilidad estructural. En contraste, el eje Y de muros de albañilería confinada, mantuvo seguridad estructural, permaneciendo dentro del nivel de seguridad de vida y cumpliendo con las demandas de diseño.

Para el análisis de desempeño estructural con aislamiento, se consideraron 14 aisladores LRB en la base, concentrando el análisis en el eje X, que representó la condición más crítica. Estos aisladores, diseñados con las propiedades de rigidez y amortiguamiento exigidas por la Norma E.031, permitieron aumentar el periodo fundamental, reducir en más del 50 % las derivas de entrepiso y disminuir de forma significativa las fuerzas de corte en la base. Debido a ello, el pórtico en X alcanzó niveles de desempeño compatibles con seguridad de vida y operacional, garantizando la estabilidad global de la estructura y su operatividad inmediata después de un evento sísmico severo.

4.3.CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS

La hipótesis planteada indica que la implementación de aisladores tipo LRB, permite reducir en más del 50% e las derivas y significativamente el amortiguamiento efectivo en el Módulo N°04 de la I.E. Cristo Rey N° 16006

Los resultados confirman esta afirmación: en el escenario sin aislamiento, el eje X (pórticos de concreto) alcanzó estados de prevención de colapso y colapso, mientras que con aisladores se logró mayor periodo fundamental, reducción superior al 50 % en derivas y fuerzas de corte y un desempeño de seguridad de vida y operacional.

Este comportamiento es coherente con los hallazgos reportados en investigaciones previas. En Cajamarca, Soriano (2014) evaluó el Pabellón “A” de la Universidad Privada del Norte con y sin aislamiento, encontrando que, para sismo de diseño, la configuración con aisladores (combinación HDR-2 + LRB-1) reduce las derivas máximas a aproximadamente 50.26% (eje x) y 45.55% (eje y) respecto del caso sin aislamiento. Asimismo, en Trujillo, Alvarado (2020) reportó que el sistema con aisladores LRB logra una reducción de 79.14% de la cortante basal, confirmando la disminución significativa de la demanda sísmica global en comparación con la base fija.

Por tanto, se acepta la hipótesis, demostrando que el aislamiento sísmico proporciona un incremento real en la seguridad y operatividad de la edificación.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.CONCLUSIONES

- La implementación de 14 aisladores sísmicos tipo LRB mejoró significativamente la respuesta del Módulo N°04, corrigiendo la deficiencia de rigidez en la dirección X. Se obtuvo una deriva máxima de 0.006926, lo que representa una reducción superior al 50% respecto a la condición de base fija, además de una disminución de las fuerzas de corte transmitidas a la superestructura, alcanzándose un nivel de desempeño compatible con Seguridad de Vida en ambas direcciones.
- En la condición sin aisladores (base fija), la estructura presentó un desempeño no satisfactorio en la dirección X (pórticos de concreto), con una deriva máxima de 0.014719, superior al límite normativo de 0.007, y con un punto de desempeño asociado a un estado cercano al colapso para el sismo máximo considerado. En la dirección Y (albañilería confinada), la respuesta fue favorable, registrándose una deriva de 0.001764, inferior al límite normativo de 0.005, y un punto de desempeño ubicado antes del colapso, evidenciando un comportamiento aceptable frente al sismo de diseño.
- Se realizaron análisis sísmicos estático y dinámico para el sistema aislado, estableciéndose como configuración óptima la utilización de 14 aisladores LRB. Con base en la rigidez efectiva promedio, el desplazamiento espectral con rigidez ajustada y la verificación mediante límites superior e inferior, se obtuvieron parámetros de diseño que permiten especificar al proveedor la fabricación y el ensayo del dispositivo, de manera consistente con los requerimientos de desempeño del proyecto.
- El amortiguamiento efectivo promedio del sistema aislado del Módulo N°04 respecto a los 7 pares de registros utilizados y la configuración de 14 aisladores, fue de 21.05%, valor que se encuentra dentro del rango establecido por la Norma Técnica E.031 (10% - 30%), validando la coherencia del diseño respecto a los criterios normativos.

- El análisis de la estructura existente evidenció una insuficiencia de rigidez y control de daño en la dirección X, reflejada en derivas y desplazamientos excesivos que comprometen el desempeño según la NTE E.030. En contraste, la dirección Y mostró un comportamiento más favorable debido a la presencia de muros de albañilería confinada. En conjunto, los resultados confirman que el aislamiento sísmico constituye una solución eficaz para mejorar el desempeño global del módulo, especialmente en la dirección más flexible.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda priorizar medidas de mejora sísmica costo-efectivas en edificaciones educativas, enfocadas en el control de derivas y la reducción del riesgo de colapso. En caso de contar con financiamiento o requerirse alta operatividad post-sismo, evaluar la factibilidad técnico-económica de implementar aislamiento sísmico tipo LRB.
- Se recomienda realizar ensayos destructivos y/o semi-destructivos para mejorar la confiabilidad del modelo: esclerometría y, de ser posible, extracción de testigos (diamantina) para correlacionar y calibrar la resistencia y módulo del concreto en los elementos principales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto Castillo, F. (2017). *Análisis y Diseño de Edificaciones de Albañilería*. Lima: Editorial San Marcos.
- Carranza Alvarez, J. M. (2021). *VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO DE SENATI AL INCORPORAR AISLADORES SISMICOS TIPO LRB, CAJAMARCA 2021*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/28358>.
- American Society of Civil Engineers (2022). *Minimum design loads for buildings and other structures - ASCE Standard ASCE/SEI 7-22*. Estados Unidos.
- American Society of Civil Engineers. (2023). *ASCE/SEI 41-23: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. ASCE.
- Cámara chilena de la construcción 2011. *Protección sísmica y disipación de energía*”, Chile.
- Coral Alva, M. O. (2017). *Ensayos cíclicos en muros de albañilería confinada contruidos con ladrillos King Kong de fabricación industrial*. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f131585e-011b-41b1-a4b0-0034643027b7/content>
- Corredor Pérez, M. C., & Ariza Beltrán, A. F. (2019). *Desempeño de aisladores de base en una edificación educativa sometida a acciones sísmicas* [Trabajo de especialización, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Federal Emergency Management Agency. (2018). *FEMA P-58-1: Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 – Methodology (Second Edition)*. FEMA/ATC.
- Gonzales, R. M. (2006). *Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93559>
- Matta Alvarado, I. J., & Consuelo Ccaihuari, N. (2022). *Evaluación y propuesta con aisladores sísmicos en la I.E. 88072 Pensacola, Chimbote, Ancash-2022* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/93980>
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2020). *Norma E 030 Diseño Sismo Resistente*. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1W14N6JldWPN8wUZSqWZnUphg6C559bi-/view>
- Norabuena Ramirez, E. C. (2019). *Diseño estructural con y sin aisladores sísmicos de un pabellón de tres pisos: Colegio Juan Bautista de la Salle, Yungay 2018*. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/41333/Norabuena_REC-Rosario_BTR.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional Edificaciones, 2018.
- Norma Técnica de Edificación E.031 Aislamiento Sísmico. Reglamento Nacional Edificaciones, 2019.
- Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones, 2018.
- Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado. Reglamento Nacional de Edificaciones, 2009.
- Norma Técnica de Edificación E.070 Albañilería. Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006.
- Ottazzi Pasino, G. (2014). *APUNTES DEL CURSO ANÁLISIS ESTRUCTURAL I*.
Obtenido de https://www.academia.edu/43429476/2014_Gianfranco_Ottazzi_Pasino_APUNTES_DEL_CURSO_AN%C3%81LISIS_ESTRUCTURAL_I_PONTIFICIA_UNIVERSIDAD_CATOLICA_DEL_PERU
- Pachay Choez, F. F. (2021). *[Diseño/implementación] de un bloque de aulas mediante aislador sísmico para la Unidad Educativa Fiscal Jipijapa* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio Institucional UNESUM.
- Ruiz Hurtado, K. L. (2019). *Reducción de la cortante basal cuando se aplican losas con viguetas prefabricadas y bovedillas de poliestireno, Lima 2019*. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/47813>
- SEAOC. (1995). *Vision 2000 : performance based seismic engineering of buildings*. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California.
- Soriano Cacho, J. L. (2014). *Comparación de la respuesta estructural del Pabellón A de la Universidad Privada del Norte con aisladores sísmicos elastoméricos y sin aisladores sísmicos* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]
- Ticona Cutipa, M. E. (2019). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de un centro educativo con aisladores sísmicos de tipo elastomérico frente a un diseño convencional sin aisladores basado en la norma técnica E.030 en la ciudad de Tacna, 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional UPT.

ANEXOS

Anexo 1: Estudios de EMS.

Figura 91. Análisis granulométricos de suelos por tamizado.

I. Datos Generales

PROCEDENCIA : Terreno Natural	TAMANO MÁXIMO : 1 1/2"
CALICATA : C-1 / M-1	DESCRIPCION : MODULO N° 04
PROFUND. : 0.30 - 3.00 m.	NIVEL FREATICO : NP

TAMIZ	AASHTO T-27 (mm)	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
10"	254.000						
6"	152.400						Peso inicial seco : 2000.0 gr.
5"	127.000						Peso fracción : 1080.2 gr.
4"	101.600						
3"	76.200						Contenido de Humedad (%) : 13.3
2 1/2"	60.350						Límite Líquido (LL): 36.0
2"	50.800						Límite Plástico (LP): 28.0
1 1/2"	38.100				100.0		Índice Plástico (IP): 9.0
1"	25.400	87.4	4.4	4.4	95.6		Clasificación (SUCS) : ML
3/4"	19.000	160.2	8.0	12.4	87.6		Clasificación (AASHTO) : A-4 (4)
1/2"	12.500	128.9	6.4	18.8	81.2		Descripción (AASHTO): REG-MALO
3/8"	9.500	115.4	5.8	24.6	75.4		Descripción (SUCS): Limo gravoso de baja plasticidad con arena
1/4"	6.350	72.1	3.6	28.2	71.8		
N° 4	4.750	62.3	3.1	31.3	68.7		Índice de Consistencia : 2.84
N° 10	2.000	32.6	1.6	32.9	67.1		CU : 0.000 CC : 0.000
N° 20	0.840	78.9	3.9	36.9	63.1		OBSERVACIONES :
N° 40	0.425	61.1	3.1	39.9	60.1		Grava > 2" : 0.0
N° 60	0.250	80.2	4.0	44.0	56.0		Grava 2" - N° 4 : 31.3
N° 100	0.150	32.3	1.6	45.6	54.4		Arena N°4 - N° 200 : 14.7
N° 200	0.075	8.4	0.4	46.0	54.0		Finos < N° 200 : 54.0
< N° 200	FONDO	1080.2	54.0	100.0			%>3" : 0.0%

CURVA GRANULOMETRICA

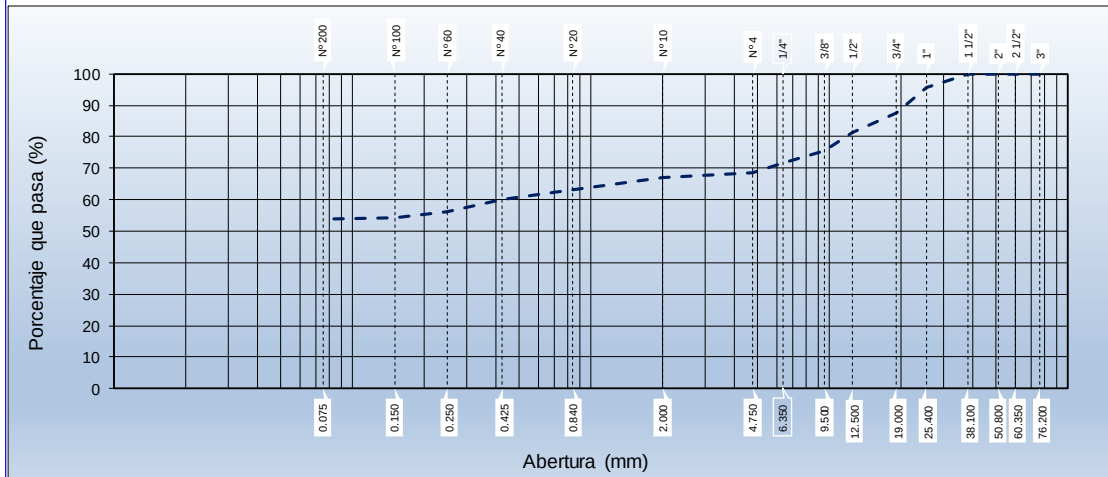


Figura 92. Determinación límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

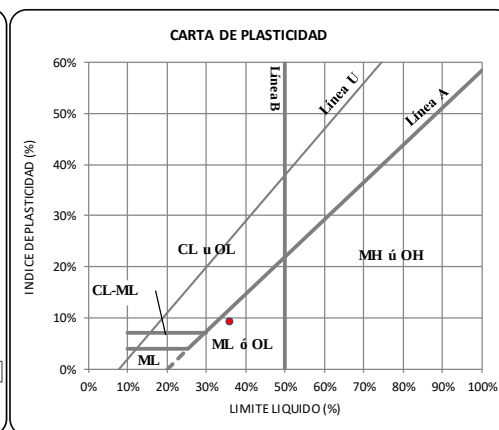
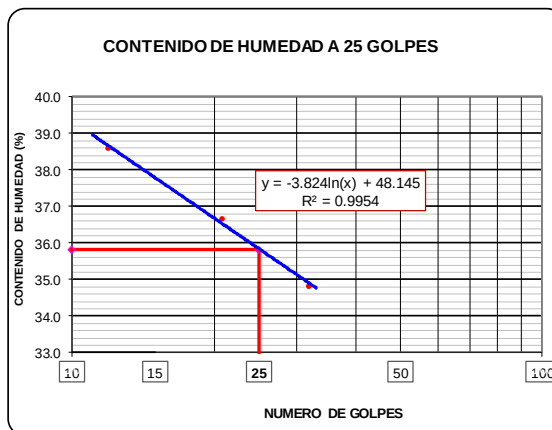
MTC E 110 Y E 111 - A.S.T.M. D 4318 - AASHTO T-89 Y T-90

I. Datos Generales

PROCEDENCIA : Terreno Natural	TAMAÑO MAXIMO : 1 1/2"
CALICATA : C-1 / M-1	DESCRIPCION : MODULO N° 04
PROFUND. : 0.30 - 3.00 m.	

LIMITE LIQUIDO (MTC E 110)				
N° TARRO	4	22	17	
PESO TARRO + SUELO HUMEDO (g)	35.60	31.60	37.40	
PESO TARRO + SUELO SECO (g)	30.50	27.40	32.20	
PESO DE AGUA (g)	5.10	4.20	5.20	
PESO DEL TARRO (g)	17.28	15.94	17.26	
PESO DEL SUELO SECO (g)	13.22	11.46	14.94	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	38.58	36.65	34.81	
NUMERO DE GOLPES	12	21	32	

LIMITE PLASTICO (MTC E 111)				
N° TARRO	8			
PESO TARRO + SUELO HUMEDO (g)	10.84			
PESO TARRO + SUELO SECO (g)	9.85			
PESO DE AGUA (g)	0.99			
PESO DEL TARRO (g)	6.25			
PESO DEL SUELO SECO (g)	3.60			
CONTENIDO DE DE HUMEDAD (%)	27.50			



CONSTANTES FISICAS DE LA MUESTRA	
LIMITE LIQUIDO	36%
LIMITE PLASTICO	28%
INDICE DE PLASTICIDAD	9%

Figura 93. Determinación del contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca.

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
MTC E 108 - A.S.T.M. D 2216

I. Datos Generales

PROCEDENCIA : Terreno Natural	TAMAÑO MAXIMO : 1 1/2"
CALICATA : C-1 / M-1	DESCRIPCION : MODULO N° 04
PROFUND. : 0.30 - 3.00	

N° DE ENSAYOS	1	2	3
N° Tara			
Peso Tara + Suelo Humedo (gr.)	5000.0	5000.5	5001.0
Peso Tara + Suelo Seco (gr.)	4415.0	4410.0	4432.0
Peso Tara (gr.)			
Peso Agua (gr.)	585.0	590.5	569.0
Peso Suelo Seco (gr.)	4415.0	4410.0	4432.0
Contenido de Humedad (gr.)	13.3	13.4	12.8
Promedio (%)	13.2		

DENSIDAD NATURAL HUMEDA
A.S.T.M. D 2937

PROCEDENCIA : Terreno Natural	TAMAÑO MAXIMO : 1 1/2"
CALICATA : C-1 / M-1	DESCRIPCION : MODULO N° 04
PROFUND. : 0.30 - 3.00	

ENSAYO :	1	2	3		
W Muestreador + M.Humeda Inicial (gr)	428.00	437.90	416.10		
W Muestreador (gr)	244.00	245.00	243.00		
W M. Humeda (gr)	184.00	192.90	173.10		
Volumen Muestreador (cm ³)	103.80	103.80	103.80		
Densidad Humeda (gr/cm ³)	1.77	1.86	1.67		
Densidad Humeda Promedio (gr/cm³)	1.77				

DENSIDAD SECA
A.S.T.M. D 2937

ENSAYO :	1	2	3		
Densidad Humeda (gr/cm ³)	1.77	1.86	1.67		
Densidad Agua (gr/cm ³)	1.00	1.00	1.00		
Humedad Natural (%)	13.25	13.39	12.84		
Densidad Seca (%)	1.57	1.64	1.48		
Densidad Seca Promedio (gr/cm³)	1.56				

Figura 94. Perfil estratigráfico del suelo.

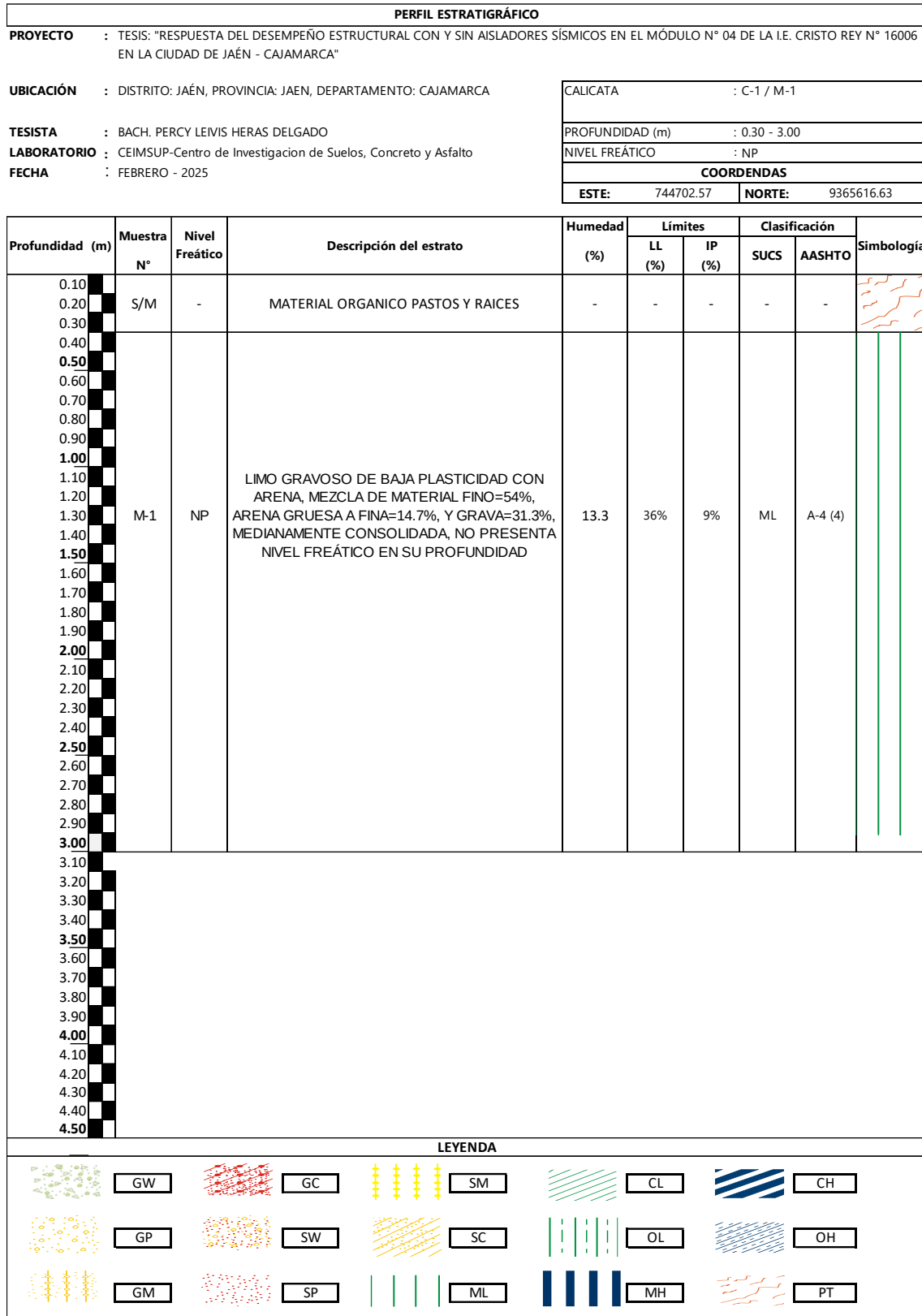
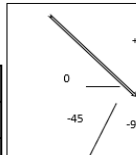


Figura 95. Ensayo de esclerometría.

ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA (MARTILLO SCHMIDT) – NTP 339.181																	
Evaluador:	Bach. Percy Leivis Heras Delgado										Fecha:		15.02.2025		Eje x :	Concreto Armado	
Asesor:	M. Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchan Pajares														Eje y :	Concreto Armado	
Ubicación:	Jaén, Jaén, Cajamarca.														Categoría de Edif. :	A2	
Ubicación	Estructura	Punto	Numero de disparo (valor de rebote R)								μ	U - μ	Fc Ábaco	Fc prom.	Fc Diseño	Porcentaje	
			1	2	3	4	5	6	7	8	Prom. (U)						
Eje B-B/2-2	Columna	E1	45	42	43	47	45	43	44	48	44.38	2.70	42	380	288	137%	
			48	44	45	48	38	41	45	44							
Eje B-B/1-1	Columna	E2	41	32	33	44	41	40	38	50	40.19	5.95	34	260			
			41	35	41	45	36	36	36	54							
Eje A-A/3-3	Columna	E3	34	41	44	40	40	39	32	41	38.81	3.76	35	280			
			34	35	41	41	40	34	41	44							
Eje A-A/6-6	Viga	E4	43	42	37	34	34	39	31	40	36.69	4.92	32	238			
			40	24	36	36	32	41	37	41							
Eje A-A/6-6	Columna	E5	45	33	30	48	37	51	37	45	41.50	5.66	36	290			
			46	41	39	47	45	40	41	39							
Eje G-G/2-2	Viga	E5	38	35	40	35	38	35	37	37	38.13	3.24	35	280			
			37	42	40	37	35	41	36	47							
Observaciones:																	
Angulo de impacto : 0° Marca del equipo : P y S EQUIPOS (N/S 114) Numero de calibración : 301-2023 Fecha de calibración : 15 febrero 2025																	
Nota :	DE ACUERDO A LAS ULTIMAS INVESTIGACIONES DEL CALCULO DE LA RESISTENCIA UTILIZANDO EL ESCLEROEMTRO ES DE 0.70*f'c (esclerómetro) =										201.6	≈	96%	Cumple con las Especificaciones			
CUADRO DEL ÁNGULO DE IMPACTO VS EL NUMERO																	
DE REBOTES Y LA RESISTENCIA EN Kg/cm2																	
R	α -90°	α -45°	0°	α +45°	α +90°												
20	125	115		100	105												
21	135	125															
22	145	135				110											
23	160	145				120											
24	170	160				130											
25	180	170	140	115													
26	198	185	158														
27	210	200	165	130	105												
28	220	210	180	140	120												
29	238	220	190	150	138												
30	250	238	210	170	145												
31	260	250	220	180	160												
32	280	265	238	190	170												
33	290	280	250	210	190												
34	310	290	260	220	200												
35	320	310	280	238	218												
36	340	320	290	250	230												
37	350	340	310	265	245												
CUADRO DEL ÁNGULO DE IMPACTO VS EL NUMERO																	
DE REBOTES Y LA RESISTENCIA EN Kg/cm2																	
R	α -90°	α -45°	0°	α +45°	α +90°												
38	370	350	320	280	260												
39	380	370	340	300	280												
40	400	380	350	310	295												
41	410	400	370	330	310												
42	425	415	380	345	325												
43	440	430	400	360	340												
44	460	450	420	380	360												
45	470	460	430	395	375												
46	490	480	450	410	390												
47	500	495	465	430	410												
48	520	510	480	445	430												
49	540	525	500	460	445												
50	550	540	515	480	460												
51	570	560	530	500	480												
52	580	570	550	515	500												
53	600	590	565	530	520												
54	Over 600	Over 600	580	550	530												
55	Over 600	Over 600	600	570	555a												

Anexo 2: Autorización de permiso de uso de laboratorio externo: CEIMSUP – Centro de Investigación de Suelos, Concreto y Asfalto, ubicado en la ciudad de Jaén, distrito de Jaén, departamento de Cajamarca.



Universidad Nacional de Cajamarca
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
Teléfono Nº 341518, Anexo 1217-Edificio 1C-106
Cajamarca - Perú



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Cajamarca, 24 de enero de 2025.

OFICIO Nº 103-2025-EPIC-FI-UNC

Señor:
Percy Levis Heras Delgado
Egresado de la Facultad de Ingeniería - UNC

PRESENTE:

De mi mayor consideración:

Es grato dirigirme a Usted, para saludarlo cordialmente y, al mismo tiempo, autorizar el uso del Laboratorio Externo CEIMSUP – Centro de Investigación de Suelos, Concreto y Asfalto; para que Usted realice sus respectivos ensayos de su tesis titulado: ***"RESPUESTA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL CON Y SIN AISLADORES SÍSMICOS EN EL MÓDULO N° 04 DE LA I.E. CRISTO REY N° 16006. EN LA CIUDAD DE JAÉN-CAJAMARCA"***.

Sin otro particular, hago propicia la ocasión para testimoniarle las muestras de mi especial deferencia.

Atentamente,


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil
M. en I. Ing. José Benjamín Torres Tafur
DIRECTOR

Cc.
- Archivo
JBTT/yvette

Anexo 3: Panel Fotográfico

Figura 96. Calicata 01 realizada para obtener los valores del tipo y perfil de suelo



Figura 97. Vista lateral del Bloque N°04 de la Institución Educativa I.E. CRISTO REY N°16006



Figura 98. Se verificó medidas de los elementos estructurales en comparación a los planos alcanzados del Exp.Técnico en físico



Figura 99. Se verificaron medidas de las vigas, y elementos estructurales en el levantamiento realizado insitu



Figura 100. Vista interna de un ambiente del Módulo donde se aprecia los elementos a analizar



Figura 101. Elaboración del ensayo de Limites de Atterberg



Figura 102. Ensayo de contenido de humedad realizado en el laboratorio externo



Figura 103. Se realizó el ensayo no destructivo con esclerómetro, en columnas



Figura 104. Se realizó el ensayo no destructivo con esclerómetro, en columnas del bloque educativo que fue analizado

