



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

REHABILITACIÓN SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL EXISTENTE MEDIANTE EL USO DE DIAGONALES DE PANDEO RESTRINGIDO

MAURICIO ALBERTO JESÚS ORMEÑO CAMPOS

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

Profesor Supervisor:
DIEGO LÓPEZ-GARCÍA

Santiago de Chile, Septiembre, 2023.

“You win a few, you lose a few, but
you keep on fighting” G. Gekko

Dedicado a todas las almas que luchan
día a día contra el colectivismo.

¡Viva la libertad!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que me ayudaron durante este proceso, tanto en el ámbito académico como profesional.

Un agradecimiento especial al estudiante de doctorado Marco Gallegos, por proporcionarme los registros y espectros necesarios para los análisis, y a mi profesor supervisor Diego López-García, por su constante apoyo durante el desarrollo de esta actividad de graduación.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Objetivos del Trabajo	2
I.2 Descripción de las Diagonales de Pandeo Restringido (BRB)	3
I.3 Organización del Trabajo	4
II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	5
II.1 Antecedentes	6
II.1.1 Documentos	7
II.1.2 Planos.....	7
II.1.3 Registros Fotográficos	8
II.2 Información de Sitio.....	8
II.3 Estado Actual de la Estructura	9
III. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS	13
III.1 Geometría del Modelo.....	13
III.2 Materiales	17
III.3 Estados de Carga No Sísmicos.....	17
III.3.1 Cargas Permanentes (D)	17
III.3.2 Sobrecargas de Uso (SC)	18
III.4 Masa Sísmica.....	19
III.5 Estados de Carga Sísmicos.....	19
III.6 Modelación de Diagonales Existentes.....	21
III.7 Modelación de Diagonales de Pandeo Restringido (BRB)	31

III.8 Modelación de Rótulas Plásticas en Vigas.....	40
III.9 Propiedades Modales de la Estructura	42
III.10 Casos de Análisis	44
IV. RESULTADOS	47
IV.1 Comportamiento de Rótulas Plásticas.....	47
IV.2 Desplazamientos de Techo.....	59
IV.3 Factores de Utilización.....	59
V. CONCLUSIONES	74
V.1 Comportamiento de Diagonales y Rótulas Plásticas.....	74
V.2 Reducción de Desplazamientos de Techo	75
V.3 Reducción de Factores de Utilización en Columnas	75
V.4 Reducción de Factores de Utilización en General	75
V.5 Comentarios Constructivos y Económicos	76
BIBLIOGRAFIA.....	77
A N E X O S.....	79
ANEXO A : PROPIEDADES PERFILES	80
ANEXO B : ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	82
ANEXO C : SELECCIÓN Y ESCALAMIENTO DE REGISTROS	93

INDICE DE TABLAS

Tabla II-1: Características generales de la estructura.....	5
Tabla II-2: Información de sitio	8
Tabla III-1: Propiedades de las diagonales existentes.....	23
Tabla III-2: Propiedades de las diagonales de pandeo restringido (BRB)	32
Tabla III-3: Periodos fundamentales de la estructura.....	42
Tabla III-4: Resumen con los casos de análisis.....	46
Tabla IV-1: Desplazamientos de techo	59
Tabla A-1: Propiedades de los perfiles en nomenclatura SAP2000.....	80
Tabla C-1: Registros seleccionados para el análisis.....	93
Tabla C-2: Factores de escala obtenidos	94

INDICE DE FIGURAS

Figura I-1: Esquemas de diagonales de pandeo restringido (AISC, 2016)	3
Figura II-1: Área de emplazamiento de la estructura.....	5
Figura II-2: Vista frontal (eje A) de la estructura.....	9
Figura II-3: Vista lateral (ejes 2 y 3) de la estructura.....	10
Figura II-4: Vista lateral (ejes 0 y 1) de la estructura.....	11
Figura II-5: Vista posterior (eje B) de la estructura	12
Figura III-1: Vista 3D del modelo computacional	13
Figura III-2: Vista en planta T.A. 4.09 m del modelo computacional	14
Figura III-3: Vista en planta T.A. 8.13 m del modelo computacional	14
Figura III-4: Vista en planta T.A. 12.17 m del modelo computacional	15
Figura III-5: Vista en planta T.A. 15.21 m del modelo computacional	15
Figura III-6: Vista en elevación ejes A y B del modelo computacional	16
Figura III-7: Vista en elevación ejes 1 y 2 del modelo computacional.....	16
Figura III-8: Espectro NCh 2745 correspondiente al sismo máximo posible (SMP)	20
Figura III-9: Espectro promedio de los espectros escalados al espectro objetivo.....	20
Figura III-10: Curva esqueleto para las diagonales existentes.....	21
Figura III-11: Curva esqueleto diagonal D1	24
Figura III-12: Curva esqueleto diagonal D2	24
Figura III-13: Curva esqueleto diagonal D3	25

Figura III-14: Curva esqueleto diagonal D4	25
Figura III-15: Curva esqueleto diagonal D5	26
Figura III-16: Curva esqueleto diagonal D6	26
Figura III-17: Curva esqueleto diagonal D7	27
Figura III-18: Curva esqueleto diagonal D8	27
Figura III-19: Curva esqueleto diagonal D9	28
Figura III-20: Curva esqueleto diagonal D10	28
Figura III-21: Curva esqueleto diagonal D11	29
Figura III-22: Curva esqueleto diagonal D12	29
Figura III-23: Curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal convencional) y el caso de análisis THNL 1.....	30
Figura III-24: Curva esqueleto para las diagonales de pandeo restringido (BRB)	31
Figura III-25: Curva esqueleto diagonal BRB1	33
Figura III-26: Curva esqueleto diagonal BRB2	33
Figura III-27: Curva esqueleto diagonal BRB3	34
Figura III-28: Curva esqueleto diagonal BRB4	34
Figura III-29: Curva esqueleto diagonal BRB5	35
Figura III-30: Curva esqueleto diagonal BRB6	35
Figura III-31: Curva esqueleto diagonal BRB7	36
Figura III-32: Curva esqueleto diagonal BRB8	36
Figura III-33: Curva esqueleto diagonal BRB9	37

Figura III-34: Curva esqueleto diagonal BRB10	37
Figura III-35: Curva esqueleto diagonal BRB11	38
Figura III-36: Curva esqueleto diagonal BRB12	38
Figura III-37: Curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal de pandeo restringido) y el caso de análisis THNL 1	39
Figura III-38: Curva $M-\theta$ (plástica) para modelación de rótulas plásticas en vigas ..	40
Figura III-39: Asignación de rótulas plásticas en vigas de ejes A y B.....	41
Figura III-40: Asignación de rótulas plásticas en vigas de ejes 1 y 2	41
Figura III-41: Modo fundamental en dirección x – Vista en elevación	42
Figura III-42: Modo fundamental en dirección x – Vista en planta.....	43
Figura III-43: Modo fundamental en dirección y – Vista en elevación	43
Figura III-44: Modo fundamental en dirección y – Vista en planta.....	44
Figura IV-1: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 1 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	48
Figura IV-2: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 2 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	49
Figura IV-3: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 3 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	50
Figura IV-4: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 4 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	51
Figura IV-5: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 5 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	52

Figura IV-6: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 6 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	53
Figura IV-7: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 7 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	54
Figura IV-8: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 8 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	55
Figura IV-9: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 9 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)	56
Figura IV-10: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 10 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	57
Figura IV-11: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 11 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	58
Figura IV-12: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 1 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	60
Figura IV-13: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 2 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	61
Figura IV-14: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 3 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	62
Figura IV-15: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 4 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	63
Figura IV-16: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 5 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	64
Figura IV-17: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 6 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	65
Figura IV-18: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 7 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	66

Figura IV-19: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 8 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	67
Figura IV-20: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 9 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	68
Figura IV-21: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 10 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	69
Figura IV-22: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 11 – Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior).....	70
Figura IV-23: Factores de utilización promedio en columnas para modelo sin BRB	71
Figura IV-24: Factores de utilización promedio en columnas para modelo con BRB	72
Figura IV-25: Reducción porcentual de factores de utilización promedio en columnas utilizando BRBs	73
Figura V-1: Cubicación de refuerzos estructurales – Proyecto de referencia	76
Figura B-1: Asignación peso propio barandas	82
Figura B-2: Asignación peso propio parrillas	83
Figura B-3: Asignación peso propio escaleras	84
Figura B-4: Asignación peso propio caseta.....	85
Figura B-5: Asignación peso propio correa G10	85
Figura B-6: Asignación peso propio correa G11	86
Figura B-7: Asignación peso propio chute.....	86
Figura B-8: Asignación peso propio poleas G10	87
Figura B-9: Asignación peso propio poleas G11	87
Figura B-10: Asignación peso propio equipos G10	88

Figura B-11: Asignación peso propio equipos G11	88
Figura B-12: Asignación sobrecarga plataformas (elementos frame).....	89
Figura B-13: Asignación sobrecarga plataformas (elementos area)	90
Figura B-14: Asignación sobrecarga escaleras	91
Figura B-15: Asignación sobrecarga correa G10.....	92
Figura B-16: Asignación sobrecarga correa G11.....	92
Figura C-1: Espectro de registro ARICA CHACALLUTA escalado al SMP	95
Figura C-2: Espectro de registro SAN PEDRO DE ATACAMA escalado al SMP ..	95
Figura C-3: Espectro de registro MATANZAS escalado al SMP	96
Figura C-4: Espectro de registro VALP06R escalado al SMP.....	96
Figura C-5: Espectro de registro VIÑA DEL MAR CENTRO escalado al SMP	97
Figura C-6: Espectro de registro R13M escalado al SMP	97
Figura C-7: Espectro de registro R13M escalado al SMP	98
Figura C-8: Espectro de registro V09A escalado al SMP.....	98
Figura C-9: Espectro de registro GO04 escalado al SMP.....	99
Figura C-10: Espectro de registro R13M escalado al SMP	99
Figura C-11: Espectro de registro L05L escalado al SMP.....	100

RESUMEN

Chile es un país sudamericano con una gran industria minera, lo cual ha impulsado el desarrollo de grandes proyectos de ingeniería estructural. Por otro lado, y debido a la alta sismicidad de gran parte del territorio nacional chileno, el desafío de diseñar estructuras resilientes ha sido difícil, induciendo así la elaboración de normas sísmicas tales como NCh 2369 (INN, 2023).

En términos generales, el desempeño sísmico de las estructuras industriales chilenas ha sido bueno. Sin embargo, existen algunas estructuras industriales diseñadas el siglo pasado que, bajo los estándares actuales, no cumplen con los objetivos de desempeño sísmico esperados. Para suplir este problema, los ingenieros chilenos han trabajado en proyectos de reparación para dotar a las estructuras existentes de un mejor desempeño sísmico, los cuales, en su mayoría, no han sido ejecutados debido a la complejidad que implican sobre el proceso industrial minero. Es por esta razón que el presente trabajo propone la rehabilitación sísmica de una estructura industrial existente mediante el reemplazo de algunas de sus diagonales por diagonales de pandeo restringido (BRB), minimizando así los trabajos de reparación y, más importante aún, evitando la detención parcial o completa del proceso minero.

Para la estructura analizada, la cual corresponde a una torre de transferencia con más de 50 años de servicio en la minería de hierro, la incorporación de diagonales de pandeo restringido (BRB) redujo la respuesta media de los desplazamientos de techo en un 50% y la respuesta media de los factores de utilización en columnas en un 57%. Además, dichas diagonales concentraron la inelasticidad inducida por las cargas sísmicas y liberaron de esfuerzos a todos los elementos secundarios que idealmente deben permanecer elásticos.

ABSTRACT

Chile is a South American country with a big mining industry, which has boosted the development of large structural engineering projects. On the other hand, and due to the highly seismic nature of the Chilean territory, the challenge of designing resilient structures has been difficult, inducing the development of seismic codes such as NCh 2369 (INN, 2023).

In general terms, the seismic performance of Chilean industrial structures has been good. However, there are some industrial structures designed in the last century that, under current standards, do not achieve the expected seismic performance goals. To overcome this issue, Chilean engineers have worked on retrofit projects to provide existing structures with better seismic performance, most of which have not been executed due to the complexity involved in the industrial mining process. For this reason, this work proposes the seismic retrofit of an existing industrial structure by replacing some of its braces with buckling restrained braces (BRB), minimizing the repairing works and, most importantly, avoiding the partial or complete stoppage of the mining process.

For the analyzed structure, which is a transfer tower with more than 50 years of service in the iron mining industry, the proposed retrofit with buckling restrained braces (BRB) reduced the mean response of roof displacement by 50% and the mean response of utilization factors in columns by 57%. In addition, these braces absorbed most of the inelasticity induced by the seismic loads, relieving all the secondary elements that should ideally remain elastic.

I. INTRODUCCIÓN

Chile es un país soberano de América del Sur con una extensión de 4270 km y un ancho que fluctúa entre 90 km y 445 km. Su actividad minera, tanto metálica como no metálica, representa aproximadamente un 20% del PIB. Dicha actividad ha impulsado de gran manera el desarrollo de importantes proyectos de infraestructura para realizar las etapas de extracción, transporte, procesamiento, almacenaje y distribución propias del funcionamiento de la industria minera. Por otro lado, debido a la alta sismicidad de gran parte del territorio nacional dichos proyectos han contribuido de manera importante al desarrollo de la ingeniería estructural chilena, razón por la cual las normas sísmicas, como por ejemplo NCh 2369 (INN, 2003), NCh 2745 (INN, 2013) y NCh 3411 (INN, 2017) entre otras, son exitosas en el sentido de que han provisto a las estructuras de una gran resiliencia sísmica.

En particular, el diseño sismorresistente tradicional de las estructuras industriales en Chile ha sido realizado de acuerdo a lo indicado en la norma NCh 2369 (cuya primera versión oficial data del año 2003), en la cual se plasmaron consideraciones y criterios utilizados muchísimo antes por grandes ingenieros como Rodrigo Flores y Elías Arze. Una de las principales diferencias entre la filosofía de diseño sísmico de la norma NCh 2369 (INN, 2003) y la de otras normas (como por ejemplo los códigos sísmicos estadounidenses) es que debido a la naturaleza emergente de la economía chilena no se desean grandes incursiones inelásticas que perjudiquen el proceso productivo minero. Es por esta razón que las compañías mineras chilenas han velado constantemente por mantener una buena integridad estructural en sus instalaciones. Sin embargo, y a pesar del buen comportamiento exhibido frente a los últimos terremotos, existen muchas estructuras industriales diseñadas hace 40, 50 o 60 años que, bajo los estándares y el estado actual del arte de la ingeniería estructural

chilena actual, muy posiblemente no tendrán el desempeño sísmico esperado debido a que fueron proyectadas sin el conocimiento de conceptos fundamentales como sobrerresistencia, ductilidad, elementos elásticos y elementos fusibles. Además, cabe destacar que una de las características principales de las estructuras industriales chilenas, tanto antiguas como recientes, es la irregularidad, tanto en geometría como en cargas, lo cual se refleja en edificios con marcadas irregularidades en elevación, en planta, en la distribución de grandes equipos, etc.

En la actualidad se han desarrollado diversos proyectos de normalización de estructuras industriales existentes para que la capacidad sísmica de tales estructuras sea equivalente a la indicada en la norma NCh 2369 vigente. Sin embargo, una gran cantidad de dichos proyectos nunca llegan a materializarse debido a que requieren la ejecución de grandes trabajos de reparación o refuerzo, los cuales implican, entre otras cosas, el desarme de elementos estructurales, movimiento de equipos y, más importante aún, la detención parcial o completa del proceso productivo minero. Es por esto que surge la necesidad de proponer refuerzos estructurales no convencionales que provean a las estructuras industriales existentes una capacidad sísmica superior sin necesidad de ejecutar grandes trabajos ni de detener los procesos productivos mineros.

I.1 Objetivos del Trabajo

El objetivo principal del presente trabajo consiste en evaluar la rehabilitación sísmica de una estructura industrial chilena existente con más de 50 años de servicio en la minería del hierro mediante la incorporación de diagonales de pandeo restringido (BRB). Se realizaron diversos análisis y modelaciones matemáticas con distintos objetivos secundarios, los cuales se describen a continuación:

1. definición de la demanda sísmica, considerando registros sísmicos escalados al sismo máximo posible (SMP) definido en la norma NCh 3411 (INN, 2017).
2. modelación y análisis tiempo historia no lineal de la estructura en su condición actual, con el objetivo de evaluar su desempeño sísmico.
3. modelación y análisis tiempo historia no lineal de la estructura considerando un sistema pasivo de disipación de energía constituido por diagonales de pandeo restringido (BRB), con el objetivo de evaluar los beneficios que dicho sistema aporta al desempeño sísmico.

I.2 Descripción de las Diagonales de Pandeo Restringido (BRB)

Las diagonales de pandeo restringido (BRB) son elementos compuestos de acero y hormigón o grout, cuya función es resistir cargas axiales sin pandear en compresión.

La Figura I-1 muestra un esquema de configuración típica.

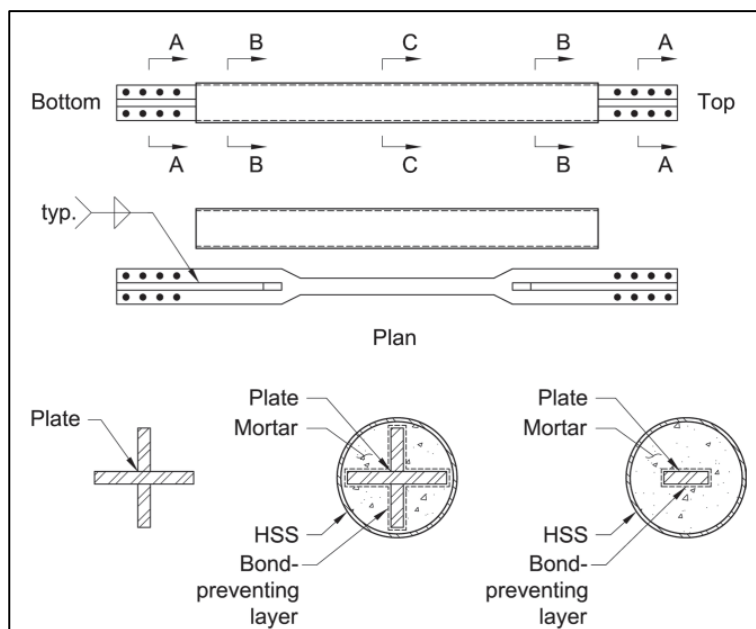


Figura I-1: Esquemas de diagonales de pandeo restringido (AISC, 2016)

Sus componentes fundamentales son:

- núcleo de acero, el cual tiene como objetivo plastificar (tanto en tracción como en compresión) y disipar energía.
- camisa de acero, la cual tiene como objetivo, en conjunto con el relleno y el elemento antiadherente, restringir los modos de pandeo del núcleo de acero.
- relleno de hormigón o grout y elemento antiadherente, para evitar la fricción entre el relleno y el núcleo de acero.

I.3 Organización del Trabajo

El presente trabajo está organizado en 5 capítulos, los cuales se describen a continuación.

- el capítulo 2 presenta una descripción de las características principales de la estructura (nombre, ubicación, materialidad, etc.) y se muestra su condición estructural actual.
- el capítulo 3 presenta una descripción detallada de los modelos: geometría, estados de carga y los elementos finitos utilizados en la modelación.
- el capítulo 4 presenta los resultados del modelo estructural en su condición actual y del modelo estructural con diagonales de pandeo restringido (BRB).
- el capítulo 5 presenta las conclusiones, con énfasis en los beneficios de utilizar diagonales de pandeo restringido (BRB) para la rehabilitación sísmica de estructuras industriales existentes.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura de estudio del presente trabajo es una torre de transferencia ubicada en el Puerto de Guayacán, diseñada por Bethlehem Steel (USA) en el año 1970. Las características generales de la estructura están indicadas en la Tabla II-1, mientras que el área de emplazamiento está indicada en la Figura II-1.

Tabla II-1: Características generales de la estructura

Nombre	Torre de transferencia G10-G11
Ubicación	Puerto de Guayacán, CMP (Coquimbo)
Año de construcción	1971
Materialidad	Acero
Niveles / altura total	4 / $\approx$ 15 m
Sistema sismorresistente	Marcos arriostrados concéntricamente (MAC)



Figura II-1: Área de emplazamiento de la estructura

El *sistema gravitacional* de la torre de transferencia G10-G11 está formado en su mayoría por vigas de acero laminadas tipo WF, parrillas de piso compuestas por pletinas y arriostramientos horizontales de acero de variada perfilería. En particular, en una zona del segundo nivel se ubica una caseta utilizada como sala eléctrica, la cual tiene losa colaborante de piso y cielo y muros de albañilería, que para efectos de modelación se consideran sólo como cargas.

Por otro lado, el *sistema sismorresistente* está compuesto por columnas de acero laminadas tipo WF, vigas de acero laminadas tipo WF y arriostramientos verticales de acero tipo STWF formados por perfiles tipo WF cortados por la mitad quedando en forma de “T”, resultando así en elementos de muy poca capacidad a compresión y gran capacidad a tracción. Dichos arriostramientos se configuran en forma de *chevron* o *V invertida*.

Adicionalmente, las bases de las columnas son de tipo rotuladas y se conectan a las fundaciones mediante pernos de anclaje tipo “T” embebidos en los pedestales de hormigón armado. El *sistema de fundaciones* está compuesto por zapatas aisladas arriostradas por vigas de fundación.

En cuanto a equipos, la estructura recibe a las correas G10 y G11, razón por la cual los últimos dos niveles poseen chutes y equipos mecánicos que cumplen funciones de traspaso y transporte de material.

II.1 Antecedentes

Los antecedentes utilizados para el desarrollo del presente trabajo se indican a continuación.

II.1.1 Documentos

Los documentos utilizados fueron:

Proyecto “Ingeniería de Detalle Normalización de Estructuras de Puerto Guayacán” por RFA Ingenieros (2021)

- EG20EC3-017-E-3200-S-MDCRFA005 – Memoria de cálculo.
- EG20EC3-017-E-3200-S-TEC-RFA004 – Especificaciones técnicas generales.
- EG20EC3-017-E-3200-S-ITC-RFA004 – Informe de catastro.

II.1.2 Planos

Los planos utilizados fueron:

Proyecto “Expansion of Ore Stocking and Reclaiming, Guayacan Port” por Bethlehem Chile Iron Mines Company (1970)

- 1176-H-601 : Arrangement of 42” transfer conv. G10 and tail end of 42” tripper.
- 1176-H-606 : 42” transfer conv. G10.
- 1176-H-607 : Transfer chute conv. G10 to conv. G11.
- 1176-H-608 : 42” tripper conv. G11.
- 1176-H-611 : 42” transfer conv. G10.
- 1176-H-612 : Transfer station foundations.
- 1176-H-613 : Transfer station 10-11, structural framing plans.
- 1176-H-614 : Transfer station 10-11, structural framing – bents 0, 1 and 3.
- 1176-H-615 : Transfer station 10-11, structural framing – bents A, B and 2.
- 1176-H-620 : Miscellaneous details and general notes.

Proyecto “Ingeniería de Detalle Normalización de Estructuras de Puerto Guayacán” por RFA Ingenieros (2021)

- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA004.
- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA016.
- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA017.
- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA018.
- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA019.
- EG20EC3-017-E-3200-S-DWG-RFA020.

II.1.3 Registros Fotográficos

Proyecto “Ingeniería de Detalle Normalización de Estructuras de Puerto Guayacán” por RFA Ingenieros (2021)

Los registros fotográficos fueron obtenidos en una campaña de terreno realizada por RFA Ingenieros en el año 2021 en las instalaciones del Puerto de Guayacán, CMP.

II.2 Información de Sitio

La información de sitio de la zona de emplazamiento de la estructura está indicada en la Tabla II-2. Por consistencia, se utiliza la clasificación indicada en la norma NCh 2745 (INN, 2013).

Tabla II-2: Información de sitio

Parámetro	Valor	Referencia
Zona sísmica	3	Memoria de cálculo indicada en II.1.1
Tipo de suelo	C	Memoria de cálculo indicada en II.1.1

II.3 Estado Actual de la Estructura

Actualmente, la estructura de estudio del presente trabajo se encuentra funcionando de manera normal y es parte fundamental del proceso de transporte de mineral en el Puerto de Guayacán, CMP. De acuerdo a lo expuesto en el informe de catastro indicado en II.1.1 la mayoría de los elementos estructurales se encuentran en buen estado. Sin embargo, existe una pérdida generalizada de espesor en todos los elementos debido a la cercanía con el mar, por lo que en la modelación se consideró una reducción de 2 mm tanto en las almas como en las alas de los perfiles. Las vistas actuales de la estructura se muestran en las Figuras II-2, II-3, II-4 y II-5.



Figura II-2: Vista frontal (eje A) de la estructura



Figura II-3: Vista lateral (ejes 2 y 3) de la estructura



Figura II-4: Vista lateral (ejes 0 y 1) de la estructura



Figura II-5: Vista posterior (eje B) de la estructura

III. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

En el presente capítulo se describen de forma detallada todos los aspectos relevantes pertinentes a la modelación, tanto de la estructura en su condición actual (modelo sin BRBs) como de la estructura con diagonales de pandeo restringido (modelo con BRBs). Cabe destacar que ambos modelos son idénticos excepto por la modelación de las diagonales, por lo que se utilizará de forma genérica la palabra *modelo* para indicar aspectos comunes de modelación y análisis. Se utilizó el software SAP2000 versión 23.

III.1 Geometría del Modelo

A continuación se muestran vistas del modelo computacional en las Figuras III-1, III-2, III-3, III-4, III-5, III-6 y III-7. Cabe destacar que en cada uno de los niveles se consideró un *constraint* tipo diafragma rígido.

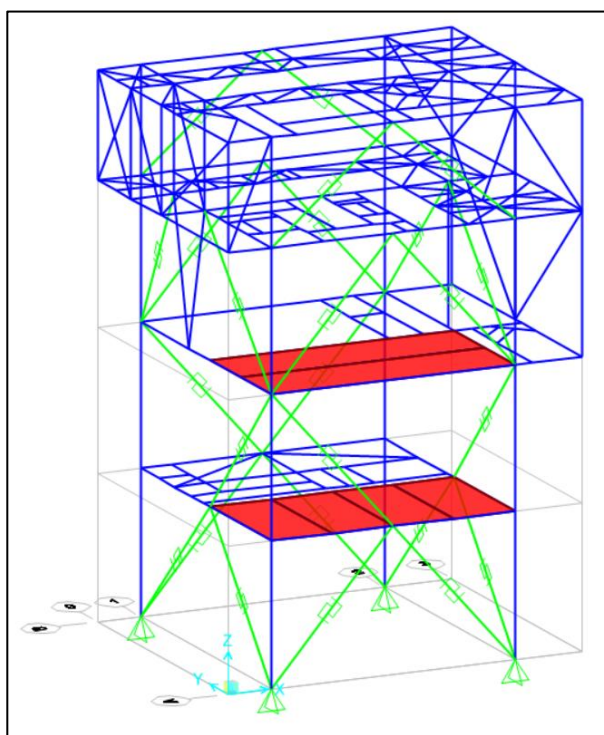


Figura III-1: Vista 3D del modelo computacional

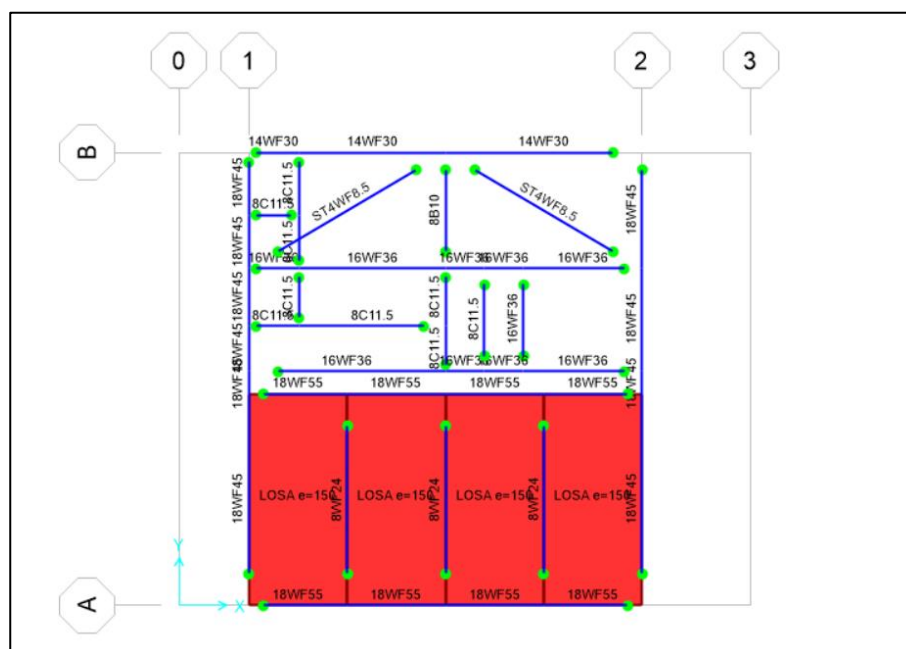


Figura III-2: Vista en planta T.A. 4.09 m del modelo computacional

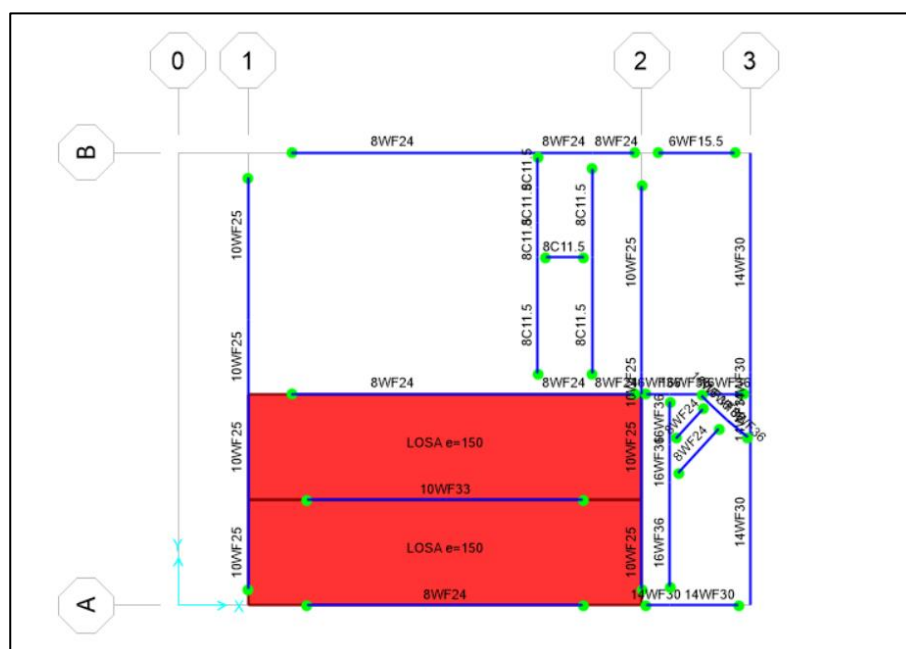


Figura III-3: Vista en planta T.A. 8.13 m del modelo computacional

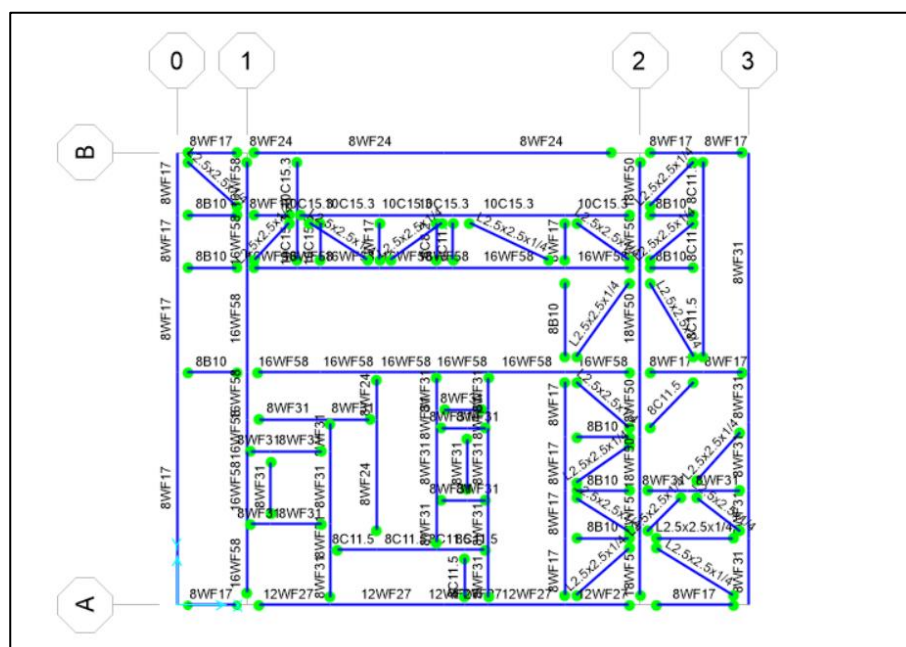


Figura III-4: Vista en planta T.A. 12.17 m del modelo computacional

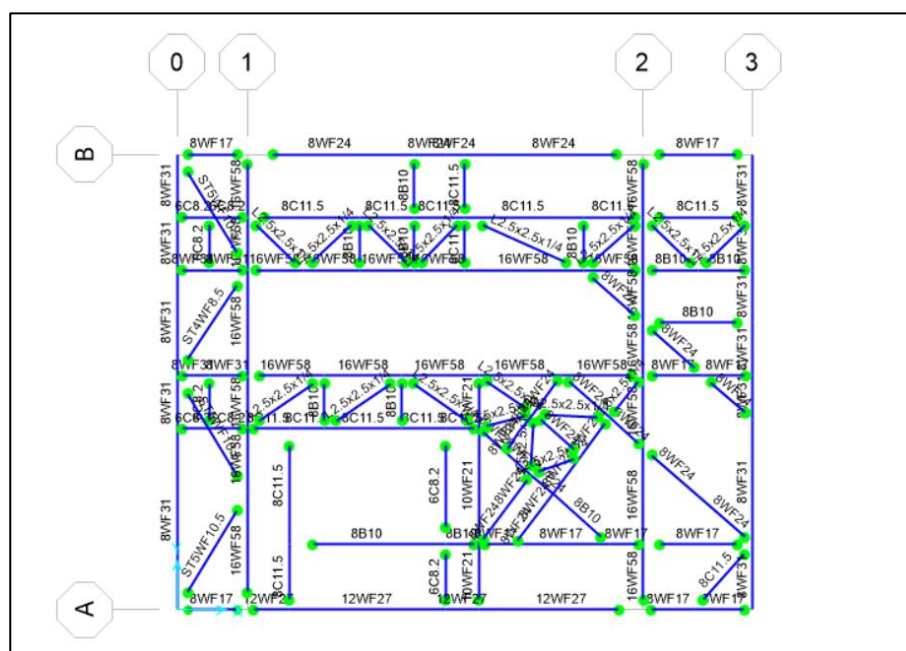


Figura III-5: Vista en planta T.A. 15.21 m del modelo computacional

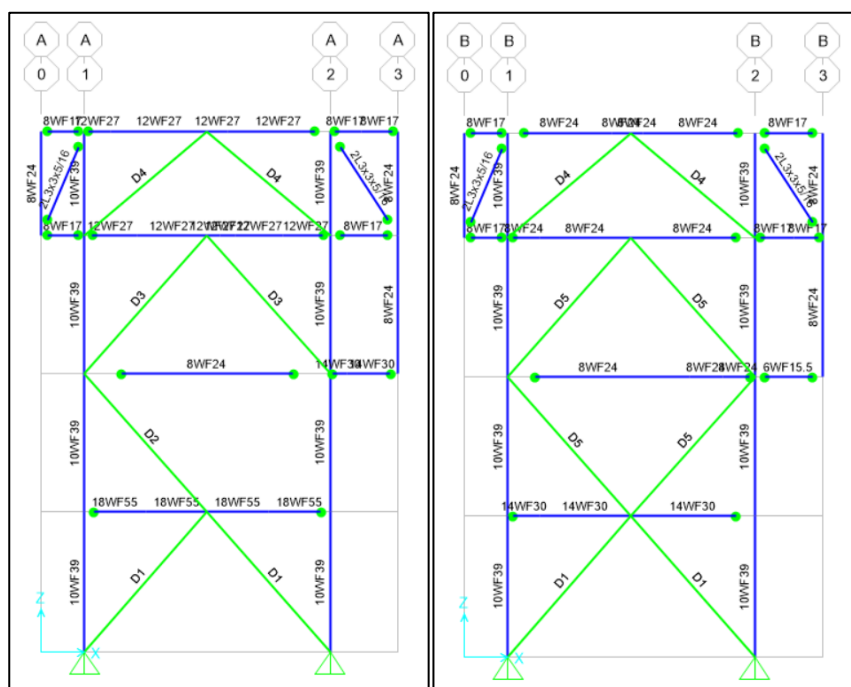


Figura III-6: Vista en elevación ejes A y B del modelo computacional

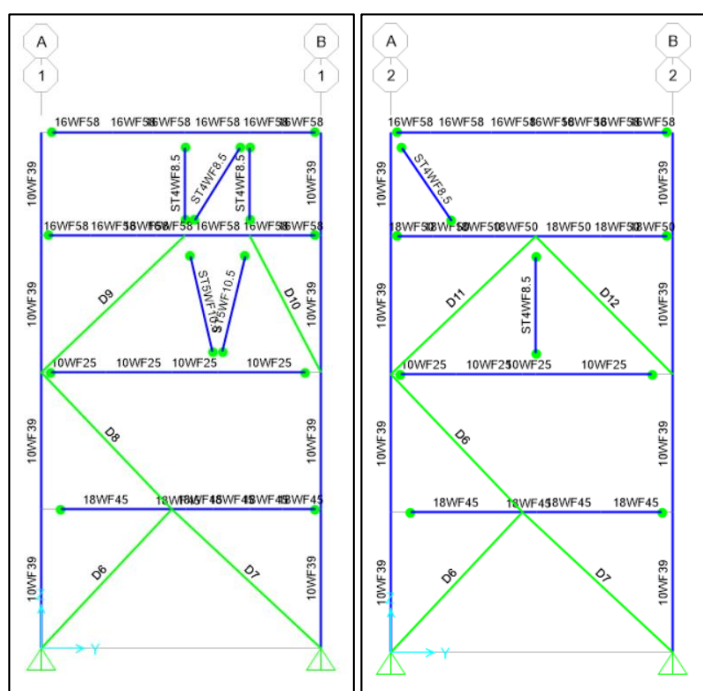


Figura III-7: Vista en elevación ejes 1 y 2 del modelo computacional

III.2 Materiales

De acuerdo a lo indicado en los antecedentes mostrados en II.1.1, los materiales considerados en la modelación fueron los siguientes. Cabe destacar que el hormigón armado sólo se utilizó para modelar las losas de piso y cielo de la zona de la caseta.

Acero Estructural ASTM A36 (equivalente a A250ESP s/NCh 203 (INN, 2006))

Límite de fluencia (f_y)	:	2.53 tonf/cm ² (36 ksi)
Límite de ruptura (f_u)	:	4.08 tonf/cm ² (58 ksi)
Módulo de elasticidad (E_s)	:	200,000 MPa
Ratio fluencia esperada y fluencia especificada (R_y)	:	1.50 (AISC, 2016)
Ratio ruptura esperada y ruptura especificada (R_t)	:	1.20 (AISC, 2016)

Hormigón Armado G20 s/NCh 170 (INN, 2016)

Resistencia especificada a la compresión (f'_c)	:	0.20 tonf/cm ²
Módulo de elasticidad (E_c)	:	21,020 MPa

III.3 Estados de Carga No Sísmicos

De acuerdo con lo indicado en los antecedentes mostrados en II.1.1, los estados de carga considerados en la modelación fueron los siguientes.

III.3.1 Cargas Permanentes (D)

Las cargas permanentes corresponden al peso de los elementos estructurales y a cualquier otra carga que tenga una magnitud permanente (o con muy poca variación) en el tiempo. Para los elementos incluidos en la modelación se consideraron los siguientes pesos específicos:

• Acero estructural	:	7850 kg/m ³
---------------------	---	------------------------

- Hormigón armado : 2500 kg/m³

De acuerdo con lo indicado en los antecedentes mostrados en II.1.1, se consideraron las siguientes cargas:

- Peso propio barandas : 25 kgf/m
- Peso propio parrillas : 49 kgf/m²
- Peso propio escaleras : 200 kgf
- Peso propio caseta : 1500 kgf/m
- Peso propio correa G10 : 11800 kgf
- Peso propio correa G11 : 14400 kgf
- Peso propio chute : 1600 kgf
- Peso propio poleas G10 : 2200 kgf
- Peso propio poleas G11 : 7800 kgf
- Peso propio equipos G10 : 1300 kgf
- Peso propio equipos G11 : 3100 kgf

Adicionalmente, se consideró un 15% del peso de los perfiles modelados asociado al peso de las conexiones.

La asignación de este estado de carga se muestra en el ANEXO B.

III.3.2 Sobrecargas de Uso (SC)

Las sobrecargas de uso corresponden a las cargas producto de la ocupación de la estructura. De acuerdo con lo indicado en los antecedentes mostrados en II.1.1, se consideraron las siguientes cargas:

- Sobrecarga de uso en plataformas : 400 kgf/m²

- Sobrecarga de uso en escaleras : 500 kgf/m²

La asignación de este estado de carga se muestra en el ANEXO B.

III.4 Masa Sísmica

De acuerdo a lo indicado en los antecedentes mostrados en II.1.1, la masa sísmica es la correspondiente al estado de carga $D + 0.25 SC_{\text{Plataformas}} + 0.50 SC_{\text{Escaleras}}$, resultando en 150 ton.

III.5 Estados de Carga Sísmicos

De acuerdo a lo indicado en la norma NCh 3411 (INN, 2017), el análisis y diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía (los cuales incluyen a las diagonales de pandeo restringido) debe realizarse para uno de los siguientes niveles de demanda sísmica.

- a) Sismo de servicio (SDS).
- b) Sismo de diseño (SDI).
- c) Sismo máximo posible (SMP).

Para este trabajo se consideraron 11 registros sísmicos escalados al espectro objetivo correspondiente al nivel de demanda dado por el sismo máximo posible (SMP). Dicho espectro se determinó multiplicando el espectro asociado al sismo de diseño (SDI) por un factor igual a 1.20.

El espectro correspondiente al sismo máximo posible (SMP), considerando los parámetros mostrados en la Tabla II-2 (Zona 3, Suelo C), se muestra en la Figura III-8, mientras que espectro promedio de los espectros escalados a la ordenada espectral

del SMP para un periodo de $T = 0.45$ s se muestra en la Figura III-9. La selección y el escalamiento de registros se muestra en el ANEXO C.

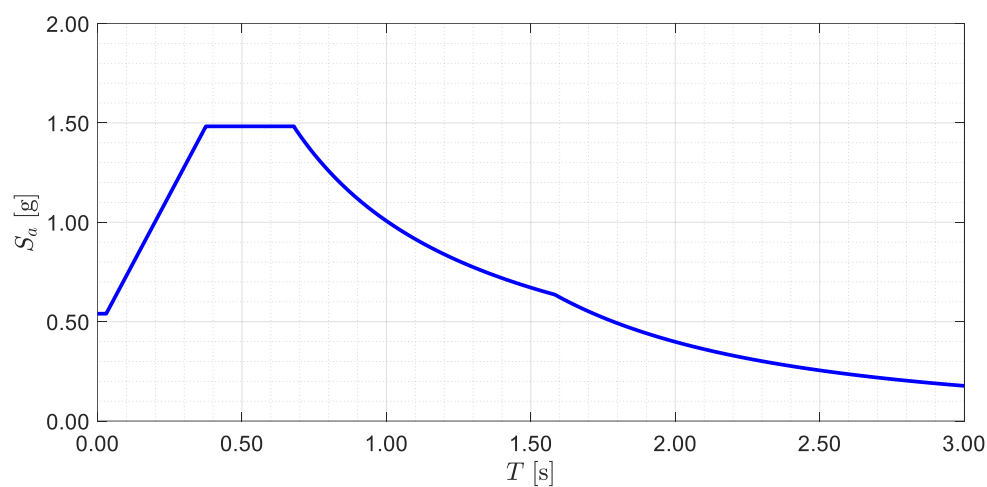


Figura III-8: Espectro NCh 2745 correspondiente al sismo máximo posible (SMP)

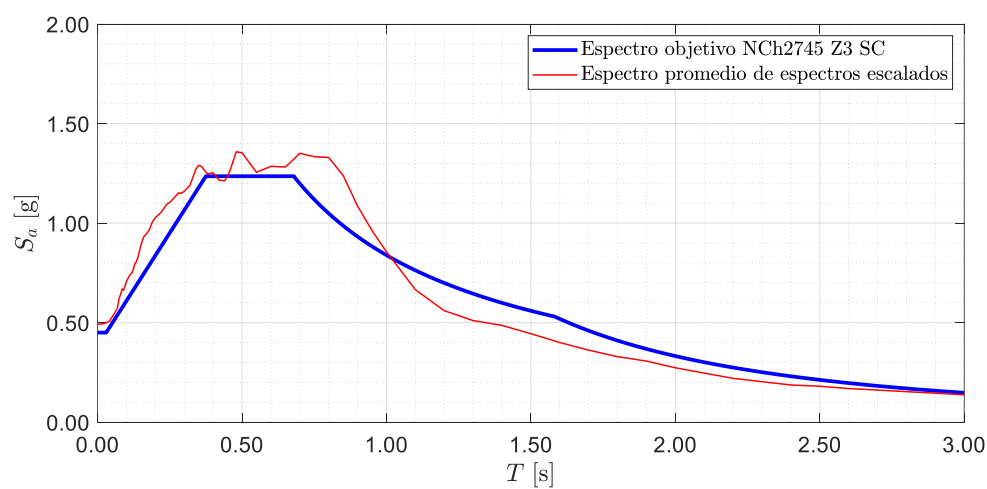


Figura III-9: Espectro promedio de los espectros escalados al espectro objetivo

III.6 Modelación de Diagonales Existentes

Las diagonales existentes se modelaron como elementos *link* no lineales con las siguientes propiedades:

- Tipo de link : *Multilinear Plastic*
- Tipo de histéresis : *Pivot* (Urzúa, 2015)

La curva esqueleto para las diagonales existentes se consideró de acuerdo con lo indicado en el capítulo 5 de FEMA 356 (FEMA, 2000) y se muestra en la Figura III-10.

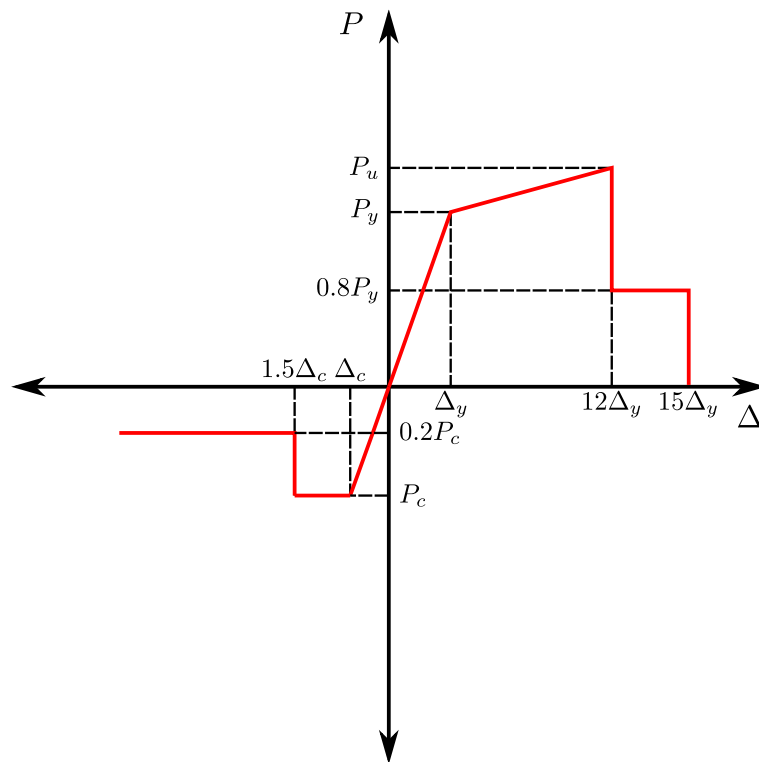


Figura III-10: Curva esqueleto para las diagonales existentes

La deformación de fluencia Δ_y y la deformación de pandeo Δ_c fueron calculadas mediante las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$\Delta_y = \frac{P_y \cdot L}{A \cdot E} \quad (3.1)$$

$$\Delta_c = \frac{P_c \cdot L}{A \cdot E} \quad (3.2)$$

Donde:

P_y : Carga de fluencia.

P_u : Carga de rotura.

P_c : Carga de pandeo.

L : Largo de la diagonal.

A : Área transversal de la diagonal.

E : Módulo de elasticidad del acero.

Para efectos de análisis se consideraron las propiedades esperadas utilizando el factor R_y indicado en III.2.

La Tabla III-1 resume las propiedades de todas las diagonales.

Tabla III-1: Propiedades de las diagonales existentes

ID	Perfil	Eje Nivel	A [cm ²]	L [cm]	K [tonf/cm]	W [tonf]	P _{ye} [tonf]	P _{ue} [tonf]	P _{ce} [tonf]
D1	ST6WF 13.5	A, B / 1	19.37	545.00	72.50	0.08	73.51	94.84	-17.19
D2	ST5WF 24.5	A / 2	38.54	540.00	145.60	0.16	146.26	188.69	-20.25
D3	ST5WF 10.5	A / 3	14.58	540.00	55.08	0.06	55.33	71.38	-9.94
D4	ST4WF 8.5	A, B / 4	11.44	470.00	49.65	0.04	43.41	56.01	-7.42
D5	ST6WF 13.5	B / 2, 3	19.37	540.00	73.18	0.08	73.51	94.84	-17.39
D6	ST4WF 8.5	1, 2 / 1, 2	11.44	560.00	41.67	0.05	43.41	56.01	-5.20
D7	ST4WF 8.5	1, 2 / 1	11.44	600.00	38.90	0.05	43.41	56.01	-4.55
D8	ST5WF 10.5	1 / 2	14.58	560.00	53.11	0.06	55.33	71.38	-9.36
D9	ST5WF 10.5	1 / 3	14.58	585.00	50.84	0.07	55.33	71.38	-8.54
D10	ST5WF 10.5	1 / 3	14.58	450.00	66.10	0.05	55.33	71.38	-13.63
D11	ST4WF 8.5	2 / 3	11.44	585.00	39.89	0.05	43.41	56.01	-4.79
D12	ST4WF 8.5	2 / 3	11.44	570.00	40.94	0.05	43.41	56.01	-5.07

Las curvas esqueleto de las diagonales se muestran en las Figuras III-11 a III-22.

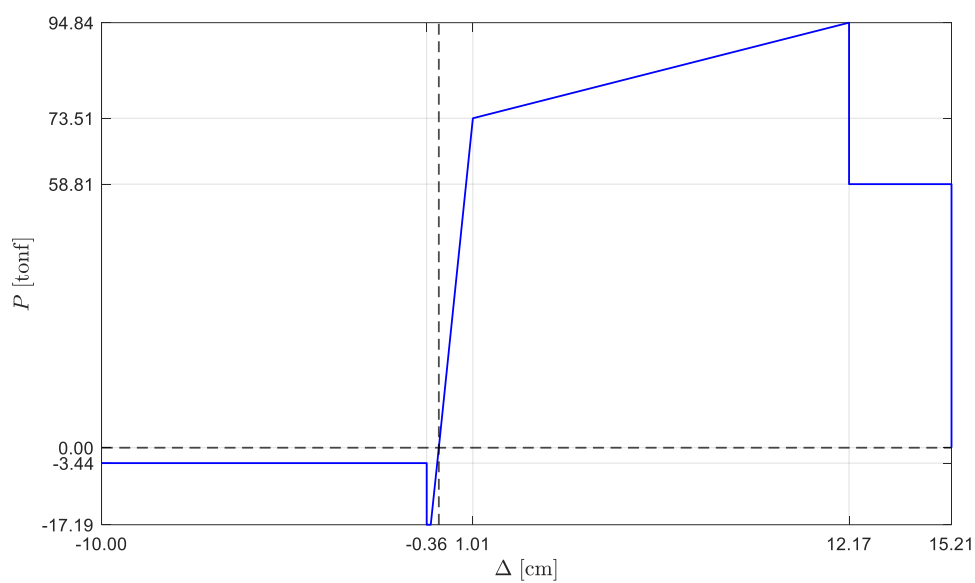


Figura III-11: Curva esqueleto diagonal D1

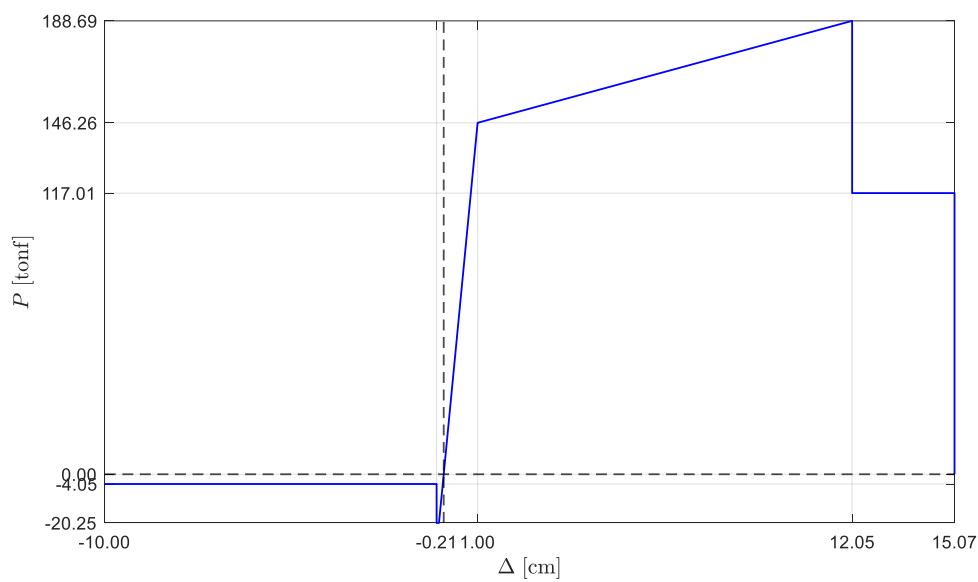


Figura III-12: Curva esqueleto diagonal D2

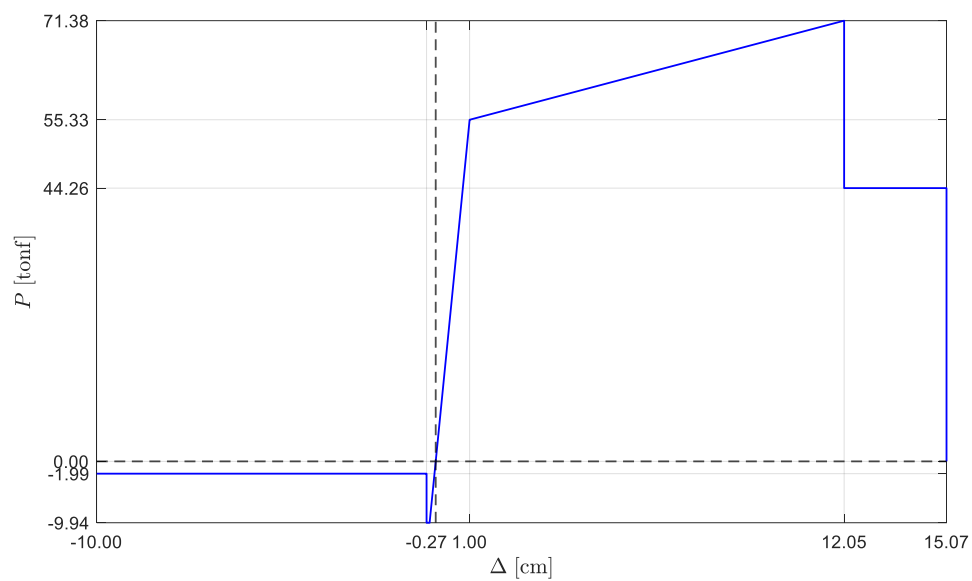


Figura III-13: Curva esqueleto diagonal D3

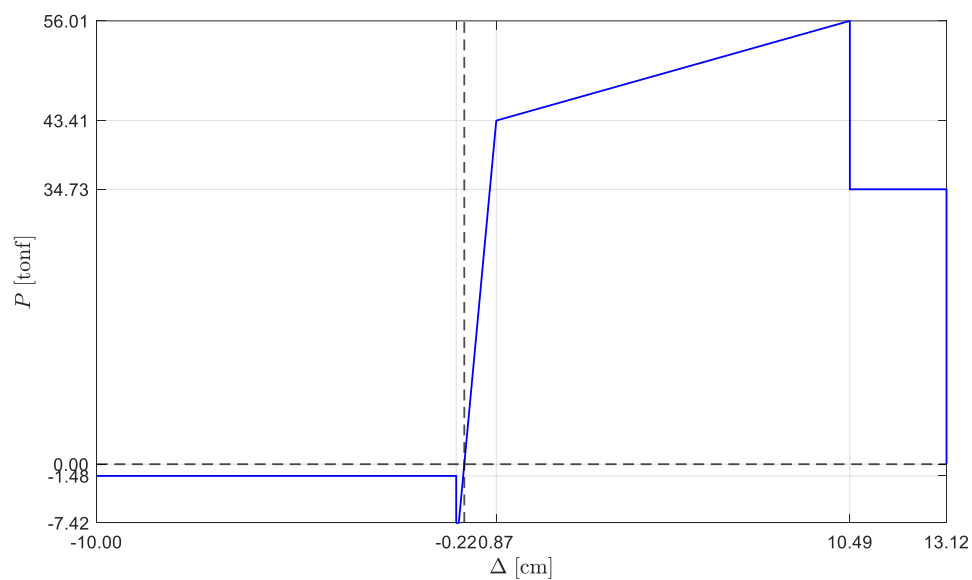


Figura III-14: Curva esqueleto diagonal D4

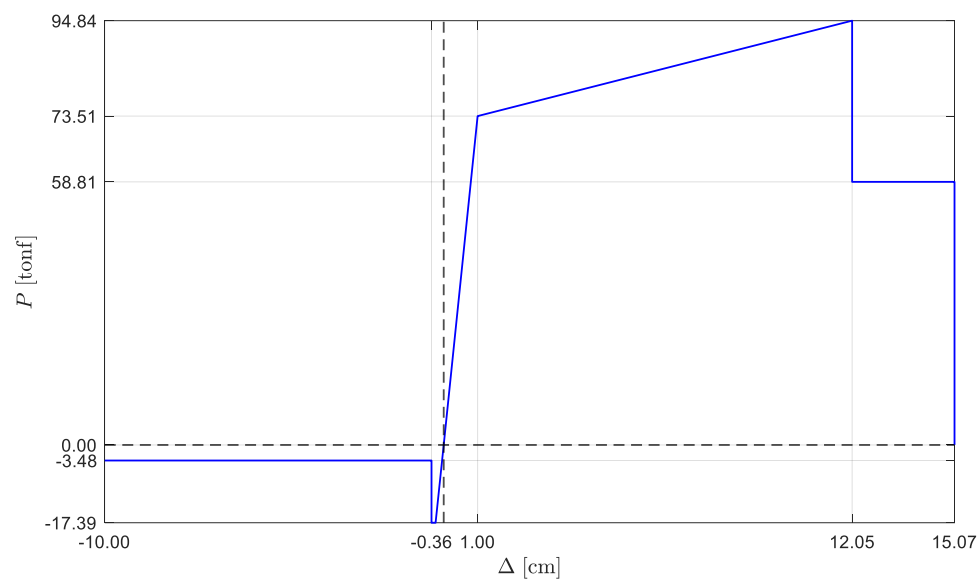


Figura III-15: Curva esqueleto diagonal D5

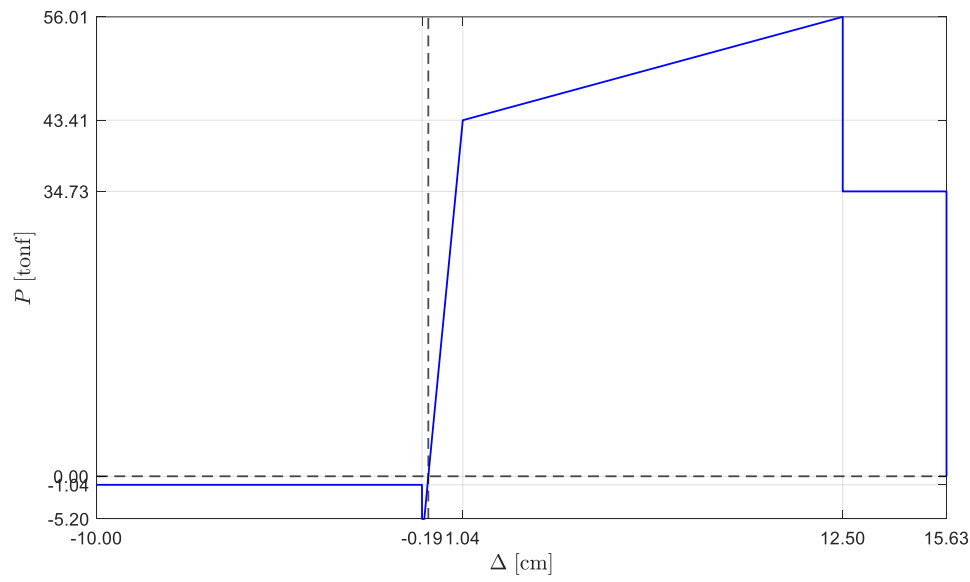


Figura III-16: Curva esqueleto diagonal D6

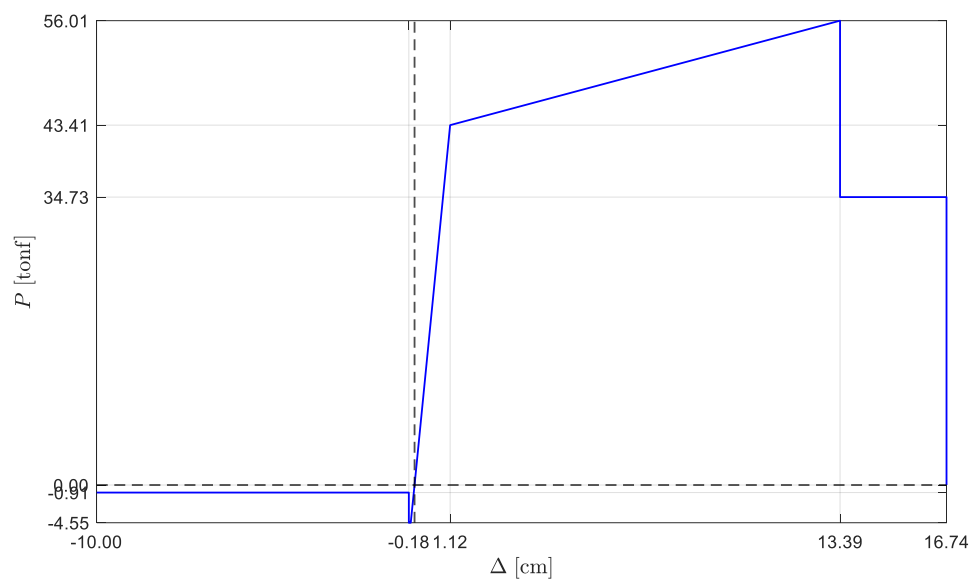


Figura III-17: Curva esqueleto diagonal D7

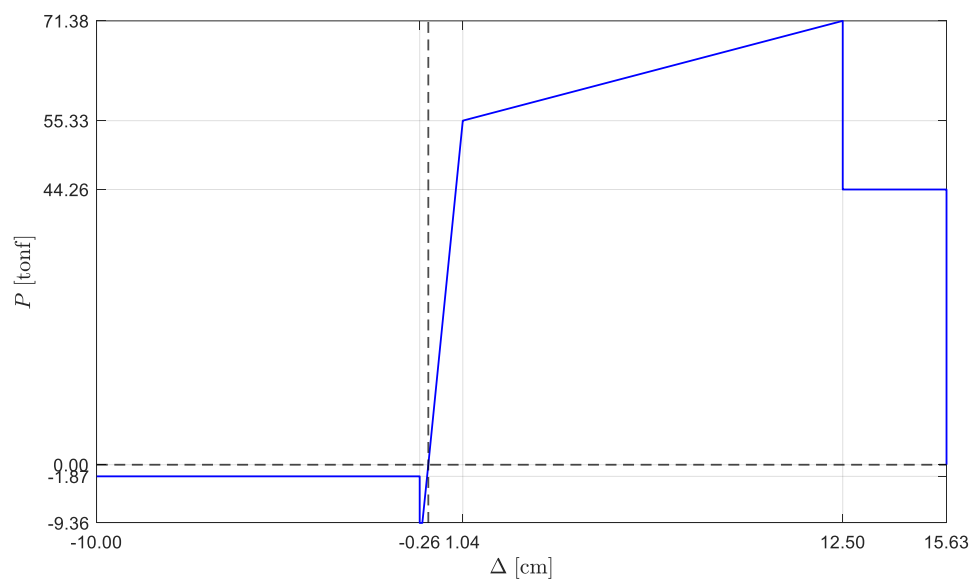


Figura III-18: Curva esqueleto diagonal D8

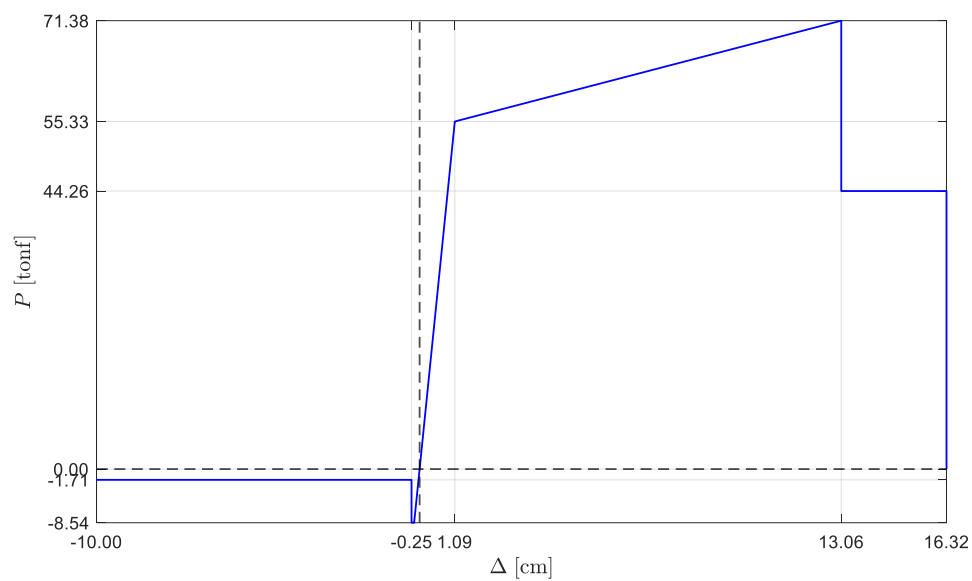


Figura III-19: Curva esqueleto diagonal D9

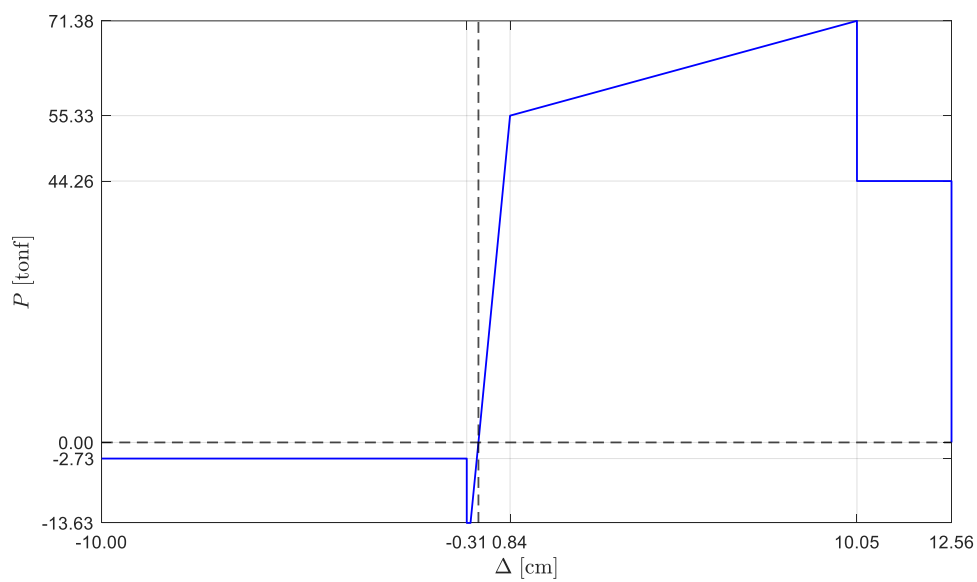


Figura III-20: Curva esqueleto diagonal D10

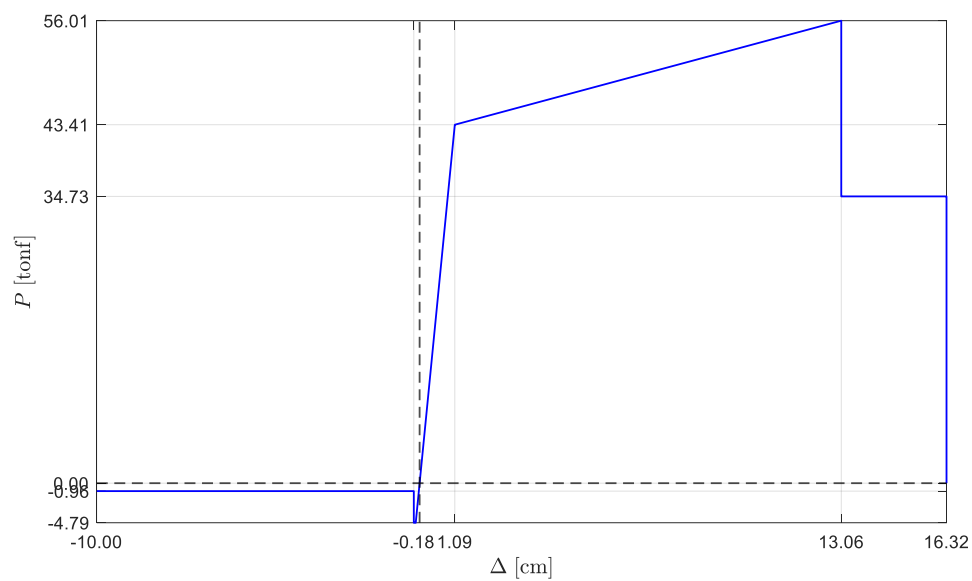


Figura III-21: Curva esqueleto diagonal D11

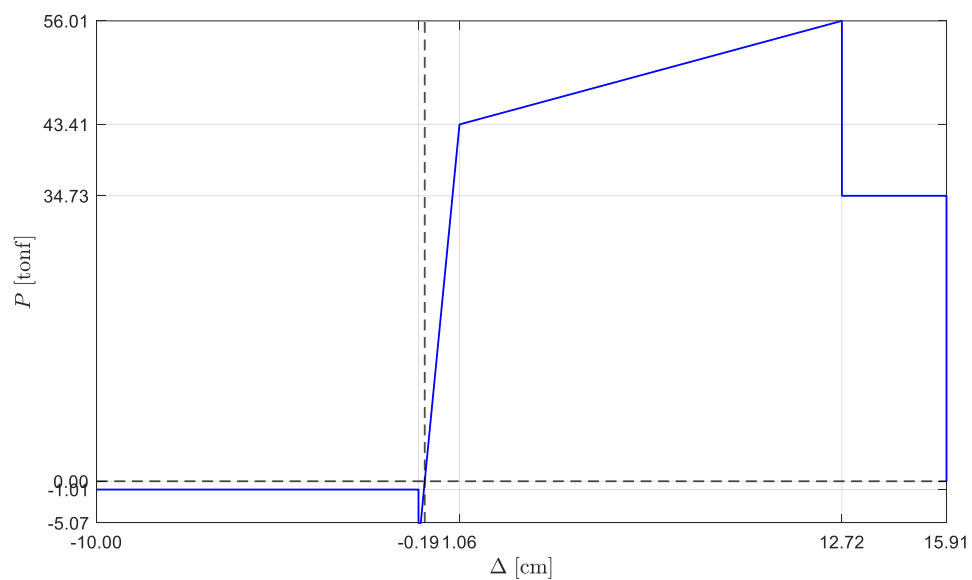


Figura III-22: Curva esqueleto diagonal D12

A modo de ejemplo, la curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal convencional) y el caso de análisis THNL 1 se muestra en la Figura III-23.

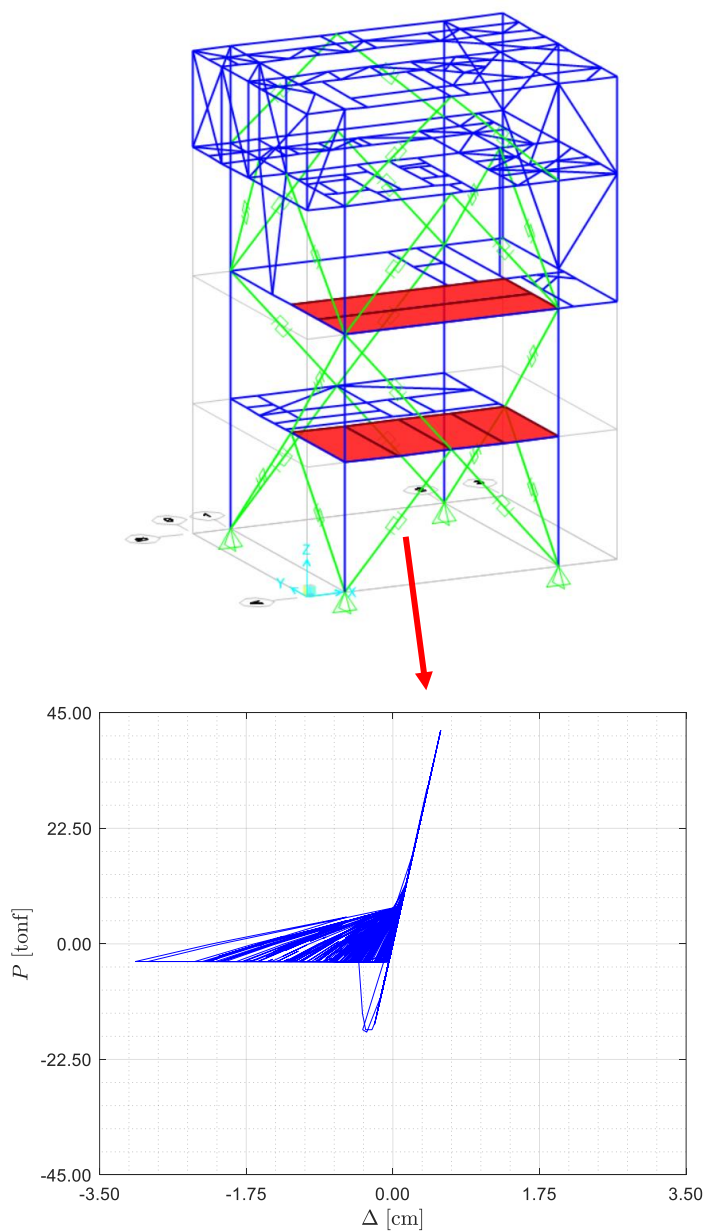


Figura III-23: Curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal convencional) y el caso de análisis THNL 1

III.7 Modelación de Diagonales de Pandeo Restringido (BRB)

Las diagonales de pandeo restringido (BRB) se modelaron como elementos *link* no lineales con las siguientes propiedades:

- Tipo de link : *Multilinear Plastic*
- Tipo de histéresis : *Kinematic*

La curva esqueleto para las diagonales de pandeo restringido se consideró de acuerdo con lo indicado en el capítulo F4 del código de diseño AISC 341 (AISC, 2016) y se muestra en la Figura III-24. Cabe destacar que para efectos de modelación se reemplazaron las diagonales convencionales por diagonales de pandeo restringido, considerando en cada caso la misma rigidez inicial, mismo peso, y sólo un 10% de la capacidad en tracción esperada.

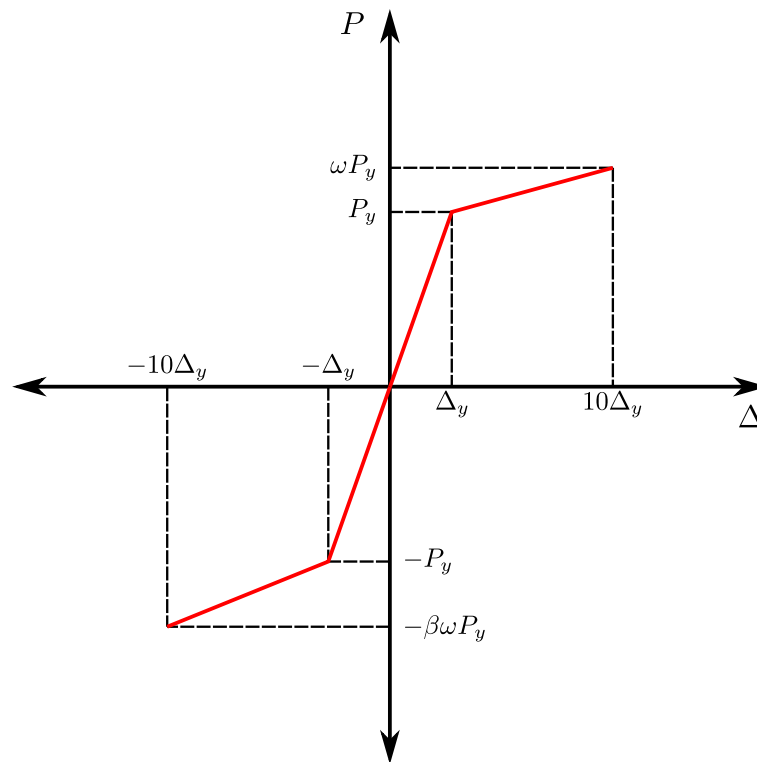


Figura III-24: Curva esqueleto para las diagonales de pandeo restringido (BRB)

La deformación de fluencia Δ_y fue calculada mediante la ecuación (3.1) considerando las propiedades esperadas utilizando el factor R_y indicado en III.2. El resumen con las propiedades se muestra en la Tabla III-2.

Tabla III-2: Propiedades de las diagonales de pandeo restringido (BRB)

ID	Perfil	Eje Nivel	A [cm ²]	L [cm]	K [tonf/cm]	W [tonf]	P _{ye} [tonf]	β	ω
BRB1	BRB	A, B / 1	19.37	545.00	72.50	0.08	7.35	1.10	1.40
BRB2	BRB	A / 2	38.54	540.00	145.60	0.16	14.63	1.10	1.40
BRB3	BRB	A / 3	14.58	540.00	55.08	0.06	5.53	1.10	1.40
BRB4	BRB	A, B / 4	11.44	470.00	49.65	0.04	4.34	1.10	1.40
BRB5	BRB	B / 2, 3	19.37	540.00	73.18	0.08	7.35	1.10	1.40
BRB6	BRB	1, 2 / 1, 2	11.44	560.00	41.67	0.05	4.34	1.10	1.40
BRB7	BRB	1, 2 / 1	11.44	600.00	38.90	0.05	4.34	1.10	1.40
BRB8	BRB	1 / 2	14.58	560.00	53.11	0.06	5.53	1.10	1.40
BRB9	BRB	1 / 3	14.58	585.00	50.84	0.07	5.53	1.10	1.40
BRB10	BRB	1 / 3	14.58	450.00	66.10	0.05	5.53	1.10	1.40
BRB11	BRB	2 / 3	11.44	585.00	39.89	0.05	4.34	1.10	1.40
BRB12	BRB	2 / 3	11.44	570.00	40.94	0.05	4.34	1.10	1.40

Los factores β y ω fueron determinados de acuerdo con lo indicado en la guía de diseño Seismic Design of Steel Buckling Restrained Braced Frames (Kersting, Fahnestock y López, 2015). Las curvas esqueleto de las diagonales de pandeo restringido se muestran en las Figuras III-25 a III-36.

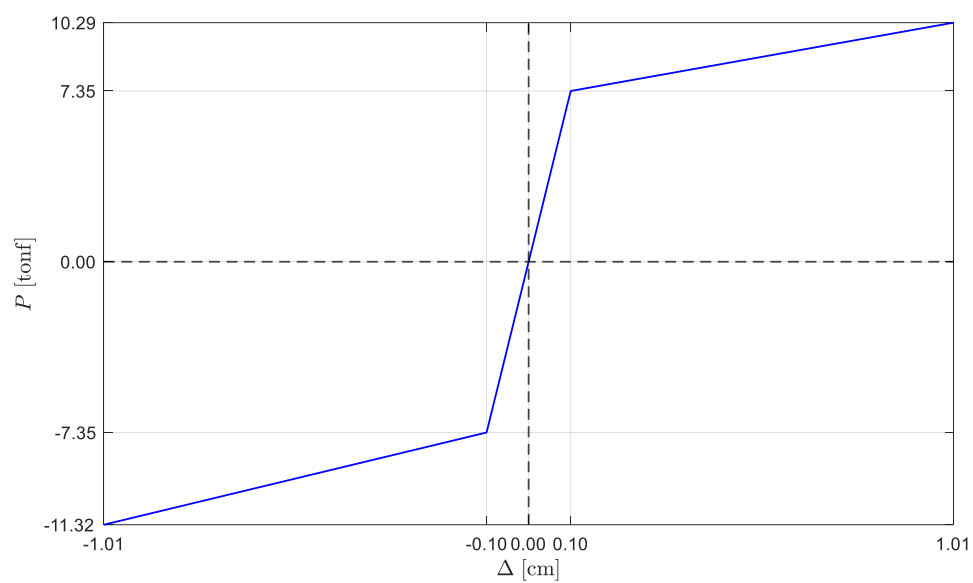


Figura III-25: Curva esqueleto diagonal BRB1

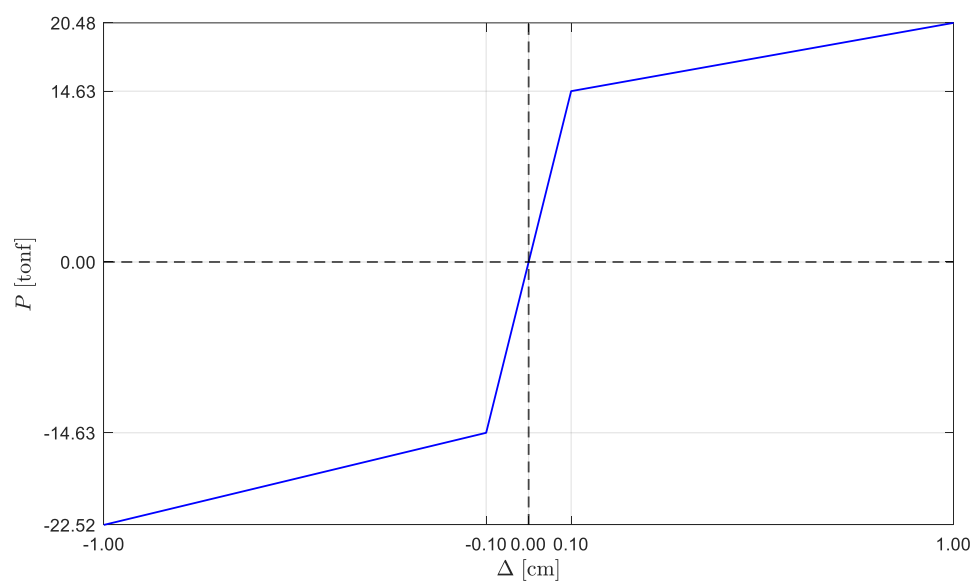


Figura III-26: Curva esqueleto diagonal BRB2

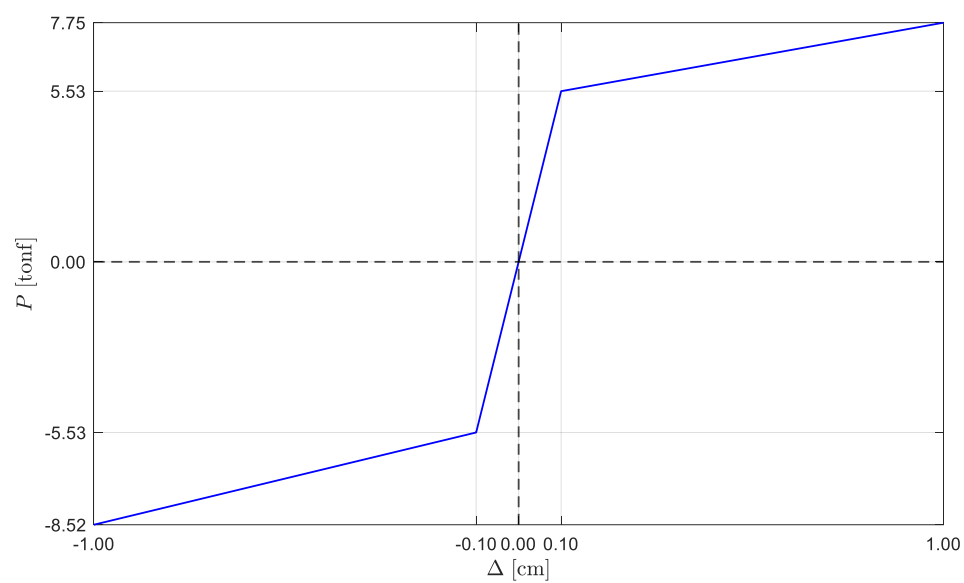


Figura III-27: Curva esqueleto diagonal BRB3

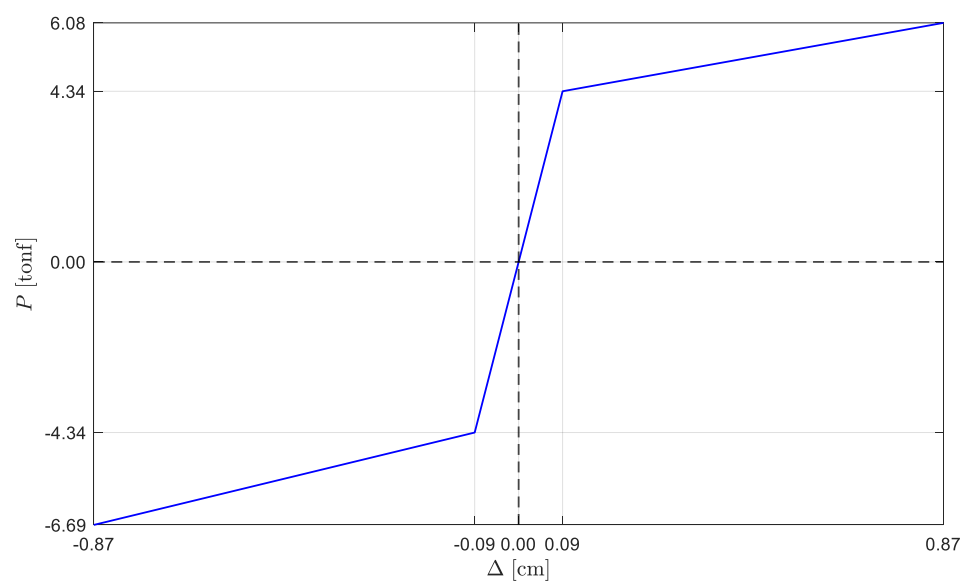


Figura III-28: Curva esqueleto diagonal BRB4

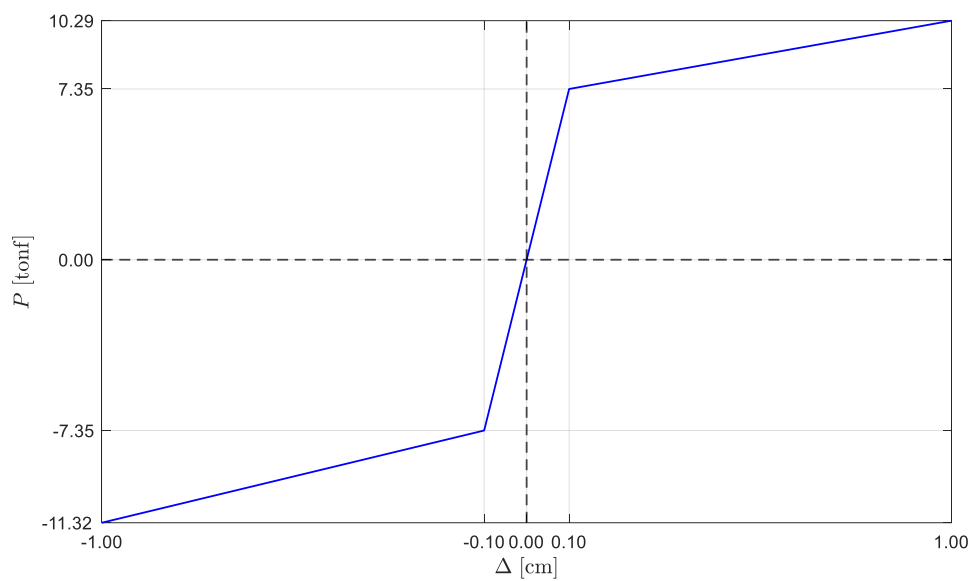


Figura III-29: Curva esqueleto diagonal BRB5

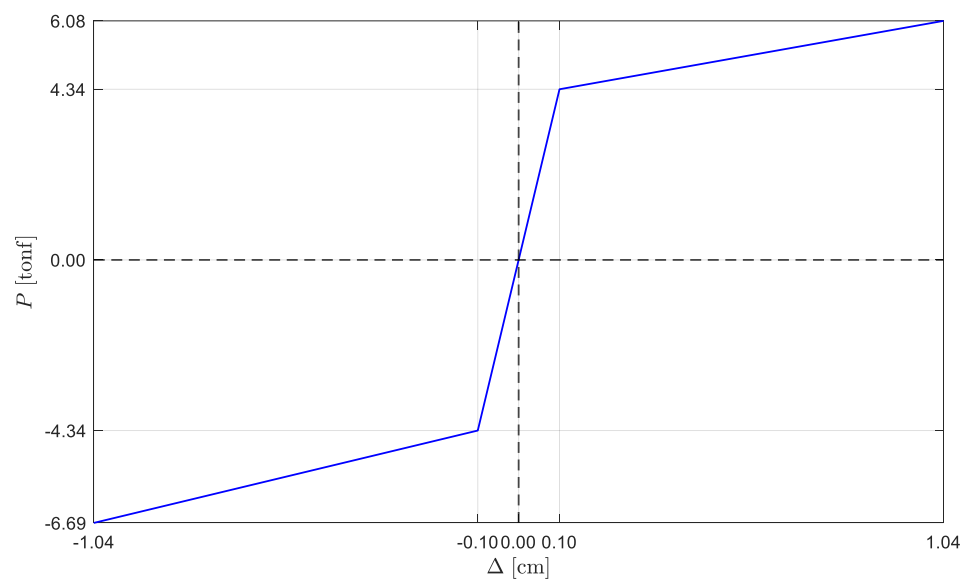


Figura III-30: Curva esqueleto diagonal BRB6

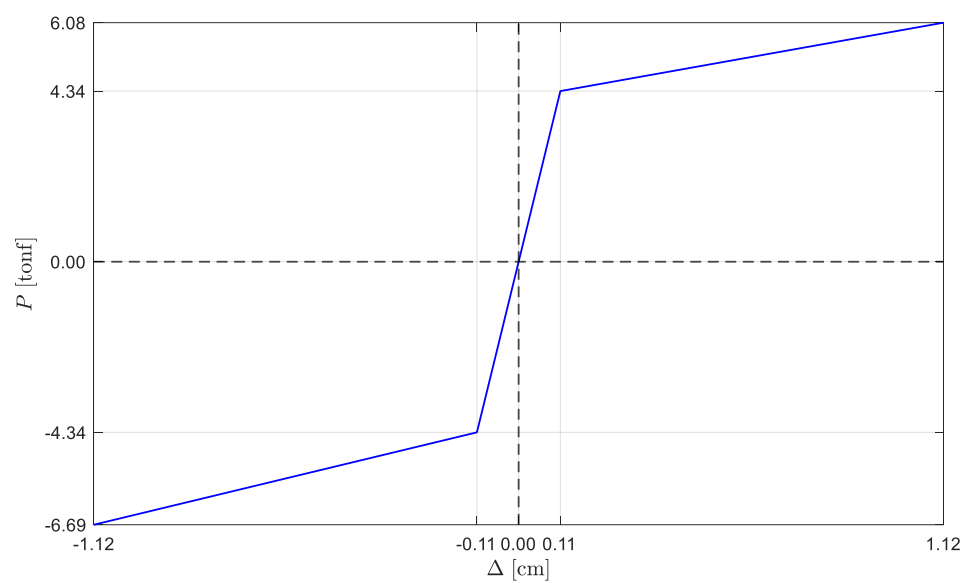


Figura III-31: Curva esqueleto diagonal BRB7

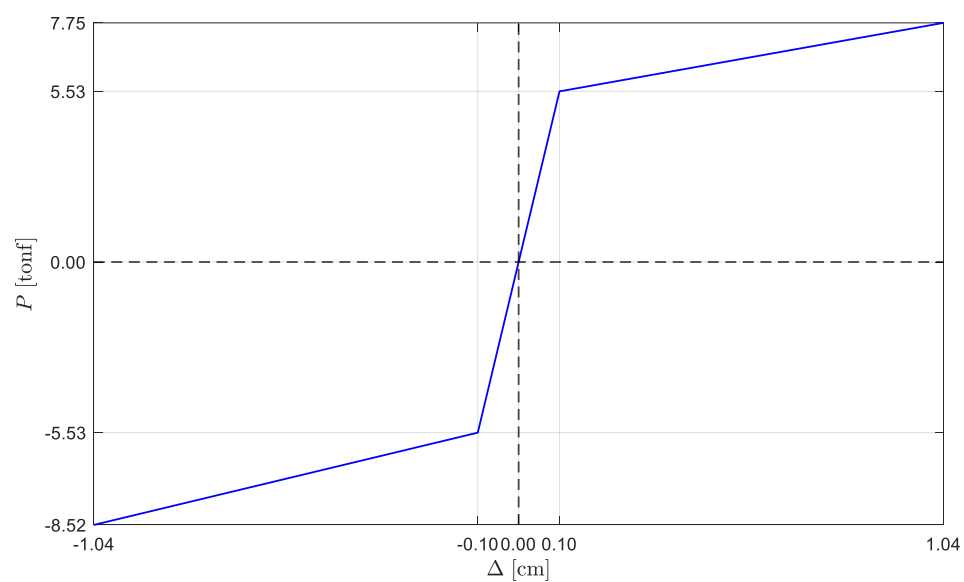


Figura III-32: Curva esqueleto diagonal BRB8

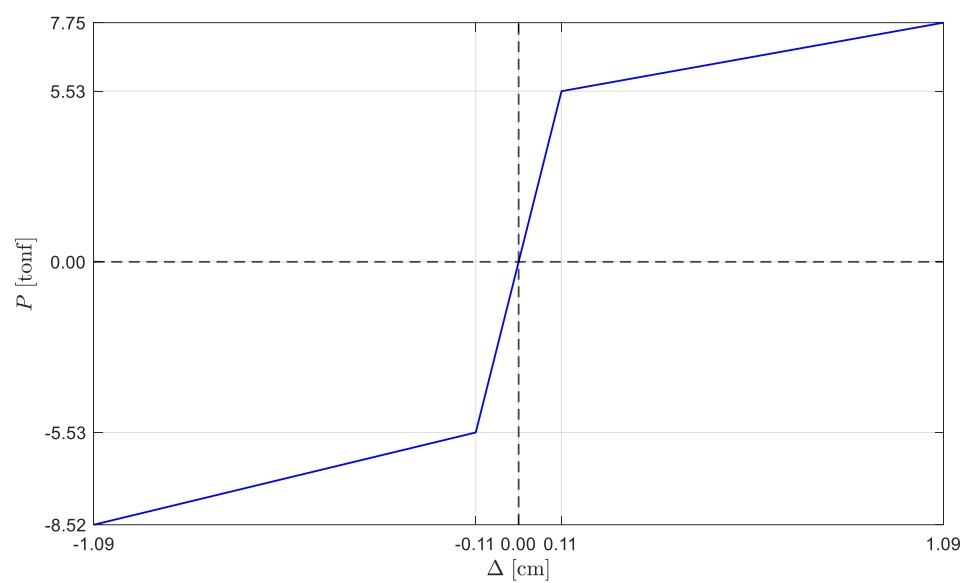


Figura III-33: Curva esqueleto diagonal BRB9

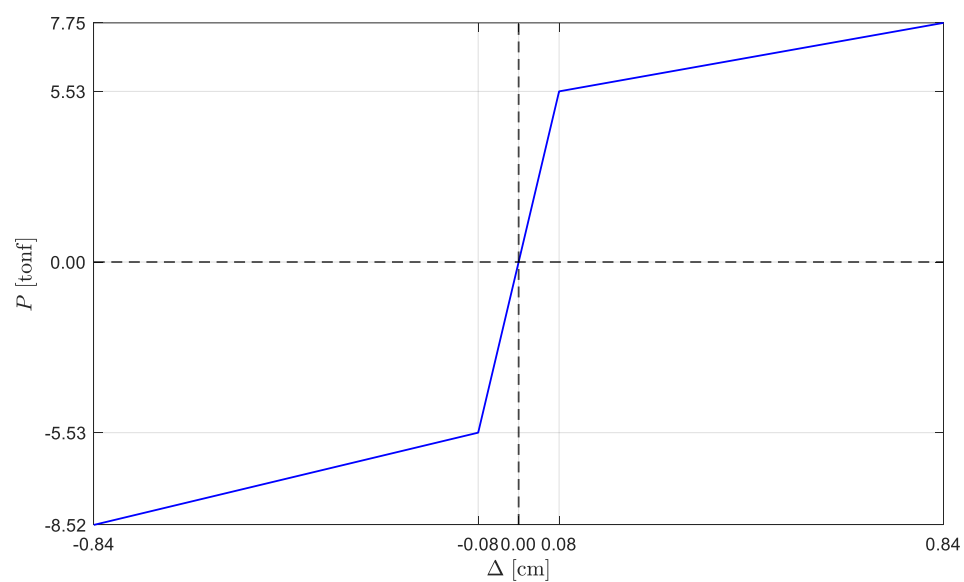


Figura III-34: Curva esqueleto diagonal BRB10

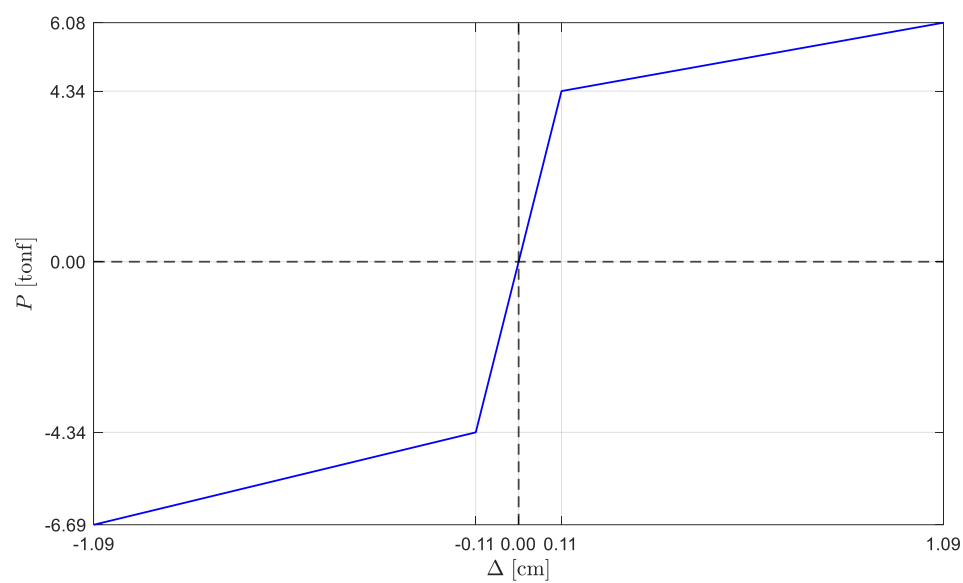


Figura III-35: Curva esqueleto diagonal BRB11

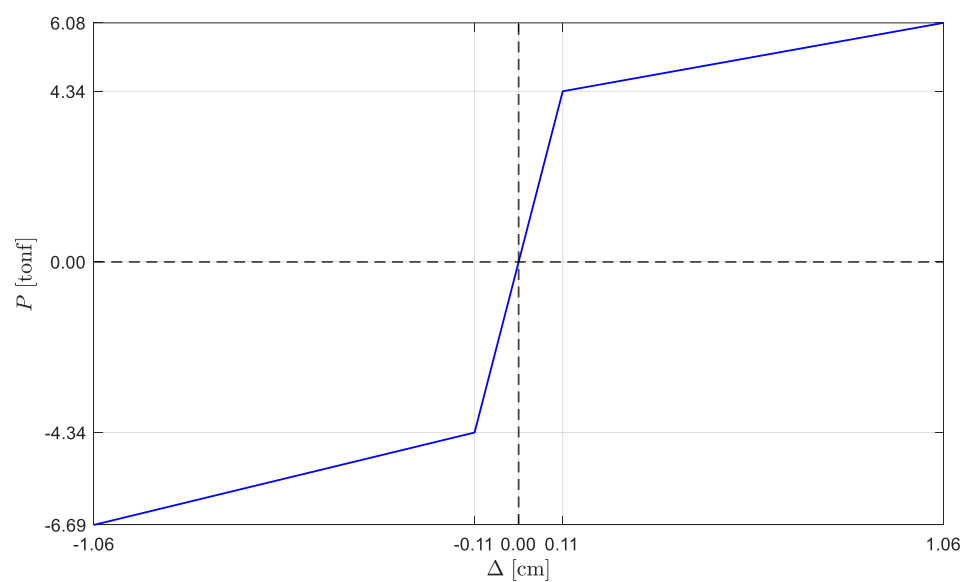


Figura III-36: Curva esqueleto diagonal BRB12

A modo de ejemplo, la curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal de pandeo restringido) y el caso de análisis THNL 1 se muestra en la Figura III-37.

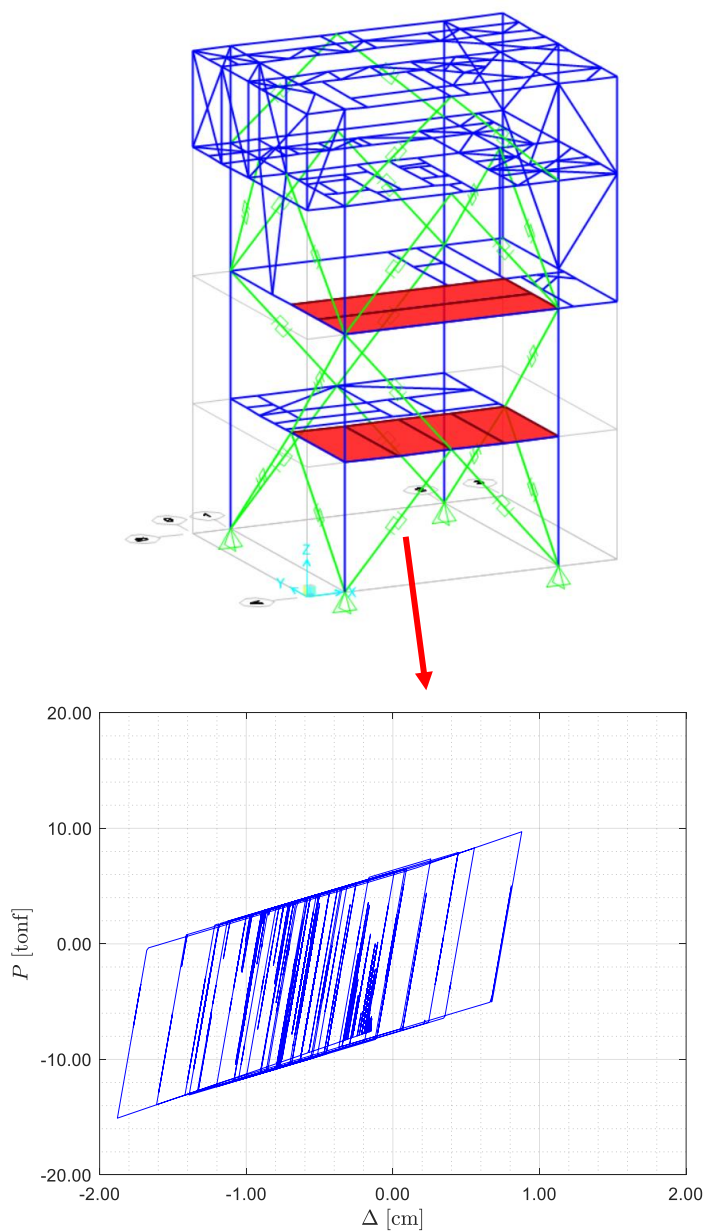


Figura III-37: Curva fuerza-desplazamiento obtenida para el Link 1 (diagonal de pandeo restringido) y el caso de análisis THNL 1

III.8 Modelación de Rótulas Plásticas en Vigas

Las rótulas plásticas en vigas fueron modeladas de acuerdo con lo indicado en la Figura III-38.

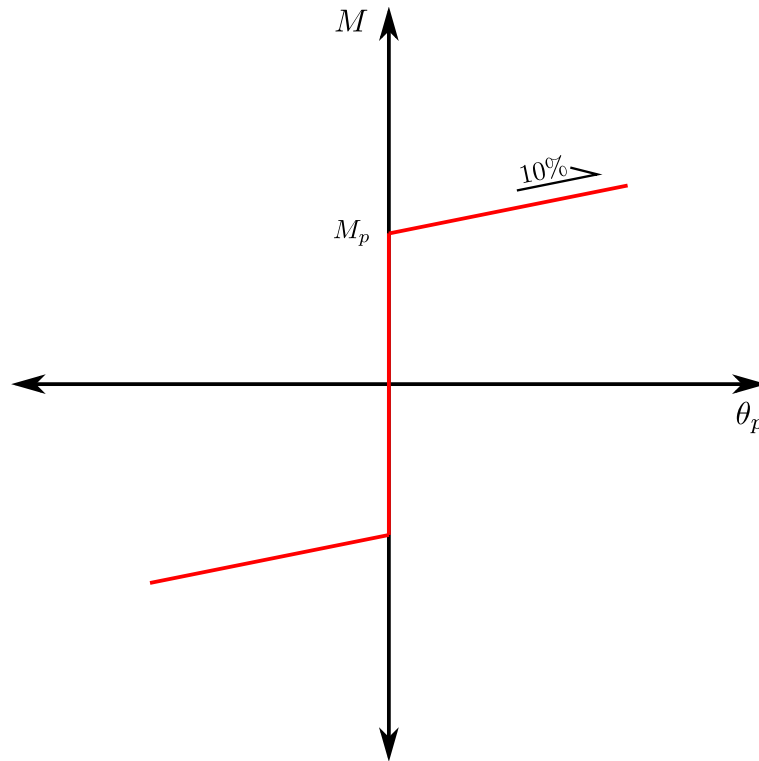


Figura III-38: Curva M - θ (plástica) para modelación de rótulas plásticas en vigas

La asignación de las rótulas plásticas se muestra en las Figuras III-39 y III-40.

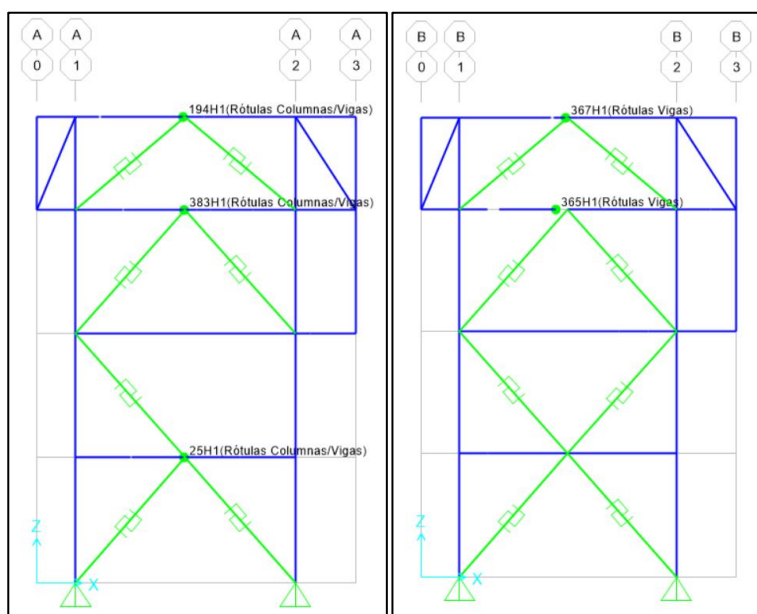


Figura III-39: Asignación de rótulas plásticas en vigas de ejes A y B

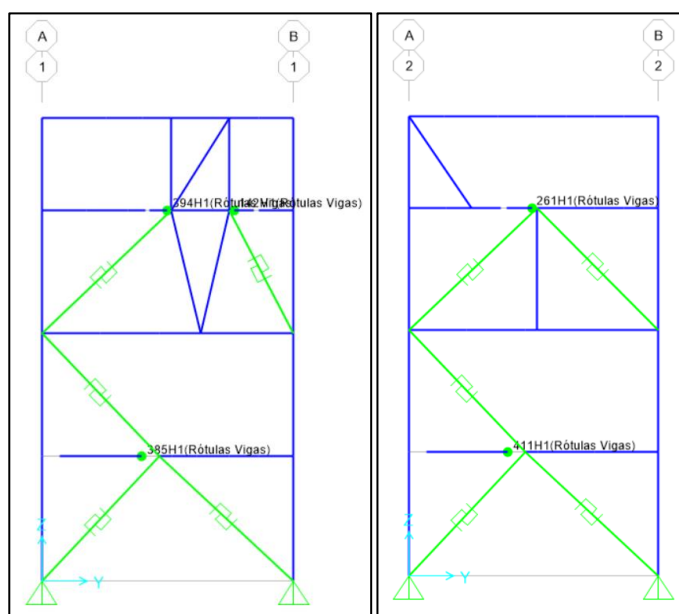


Figura III-40: Asignación de rótulas plásticas en vigas de ejes 1 y 2

III.9 Propiedades Modales de la Estructura

Las propiedades modales de la estructura se muestran en la Tabla III-3 y en las Figuras III-41, III-42, III-43 y III-44.

Tabla III-3: Periodos fundamentales de la estructura

Dirección	Modo	Periodo [s]	Masa [%]
x	3	0.40	73
y	1	0.50	76

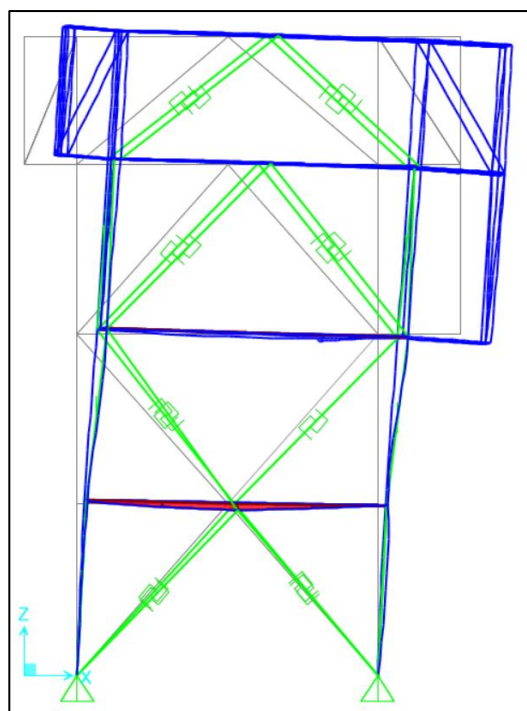


Figura III-41: Modo fundamental en dirección x – Vista en elevación

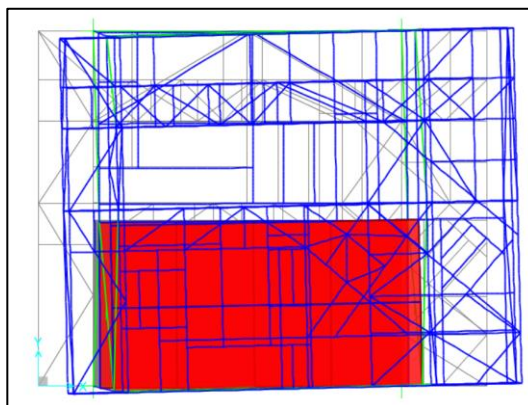


Figura III-42: Modo fundamental en dirección x – Vista en planta

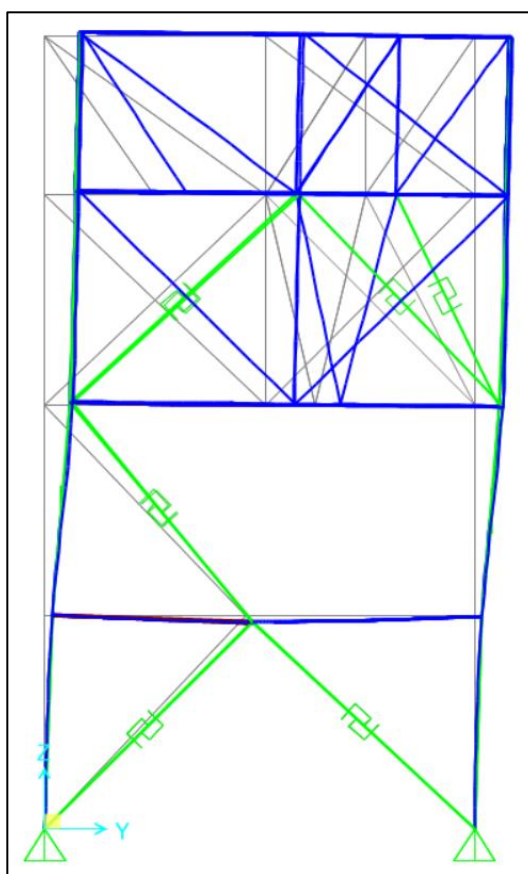


Figura III-43: Modo fundamental en dirección y – Vista en elevación

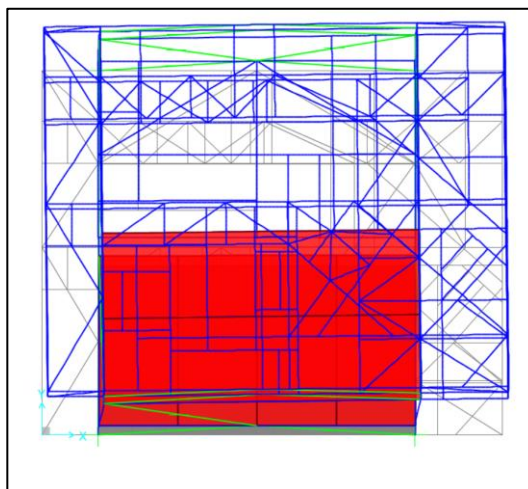


Figura III-44: Modo fundamental en dirección y – Vista en planta

III.10 Casos de Análisis

Para el análisis de los modelos se utilizaron 11 casos de carga (1 por cada registro) con las siguientes consideraciones:

- Cond. iniciales : *Continuar desde caso de carga “GRAVEDAD”*
- Cargas aplicadas : *Aceleraciones U1 y U2 simultáneas de cada registro*
- Tipo de análisis : *Tiempo historia no lineal con integración directa*

Donde “GRAVEDAD” corresponde a un caso de carga estático no lineal constituido por las cargas $D + 0.25 SC_{\text{Plataformas}} + 0.50 SC_{\text{Escaleras}}$.

Por otro lado, para el cálculo de la matriz de amortiguamiento $[C]$ se utilizó un amortiguamiento de tipo *Rayleigh*, cuyos coeficientes α y β fueron calculados mediante las ecuaciones (3.3) y (3.4).

$$\alpha = \xi \frac{2 \omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.3)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.4)$$

Las frecuencias ω_1 y ω_2 se calcularon mediante las ecuaciones (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8).

$$T_1 = \frac{T_x + T_y}{2} \quad (3.5)$$

$$T_2 = 2 T_1 \quad (3.6)$$

$$\omega_1 = \frac{2 \pi}{T_1} \quad (3.7)$$

$$\omega_2 = \frac{2 \pi}{T_2} \quad (3.8)$$

Donde:

T_x : Periodo fundamental de la estructura en dirección x de Tabla III-3.

T_y : Periodo fundamental de la estructura en dirección y de Tabla III-3.

ξ : Amortiguamiento de 3% por conexiones empernadas.

Se obtuvo $\alpha = 0.2793 \frac{1}{s}$ y $\beta = 0.0029 s$.

La Tabla III-4 muestra el resumen de los casos de análisis.

Tabla III-4: Resumen con los casos de análisis

Caso	Out Steps	Step Size	α [1/s]	β [s]
THNL 1 - ARICA CHACALLUTA	22400	0.005	0.2793	0.0029
THNL 2 - SAN PEDRO DE ATACAMA	43400	0.005	0.2793	0.0029
THNL 3 - MATANZAS	24079	0.005	0.2793	0.0029
THNL 4 - VALP06R	20559	0.005	0.2793	0.0029
THNL 5 - VINA DEL MAR CENTRO	13500	0.010	0.2793	0.0029
THNL 6 - R13M 6	42400	0.005	0.2793	0.0029
THNL 7 - R13M 7	43400	0.005	0.2793	0.0029
THNL 8 - V09A	58600	0.005	0.2793	0.0029
THNL 9 - GO04	30001	0.010	0.2793	0.0029
THNL 10 - R13M 10	62800	0.005	0.2793	0.0029
THNL 11 - L05L	48400	0.005	0.2793	0.0029

IV. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los modelos descritos en el capítulo anterior. La respuesta media de cada parámetro R (desplazamientos de techo, factores de utilización, etc.) fue calculado mediante la ecuación (4.1).

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N}{N} \quad (4.1)$$

Donde:

$\bar{R}$: Respuesta media del parámetro R .

R_i : Respuesta del parámetro R para el caso de análisis i .

N : Número de casos de análisis (= 11).

Los factores de utilización mostrados en IV.3 fueron obtenidos en SAP2000 considerando el método de estabilidad de *largo efectivo* con $\Phi = 1$ y F_{ye} , de acuerdo a lo indicado en la norma NCh 427/1 (INN, 2016). Los esfuerzos fueron obtenidos de combinaciones derivadas de los casos de análisis mostrados en la Tabla III-4.

IV.1 Comportamiento de Rótulas Plásticas

Las Figuras IV-1 a IV-11 muestran la ubicación de las rótulas plásticas.

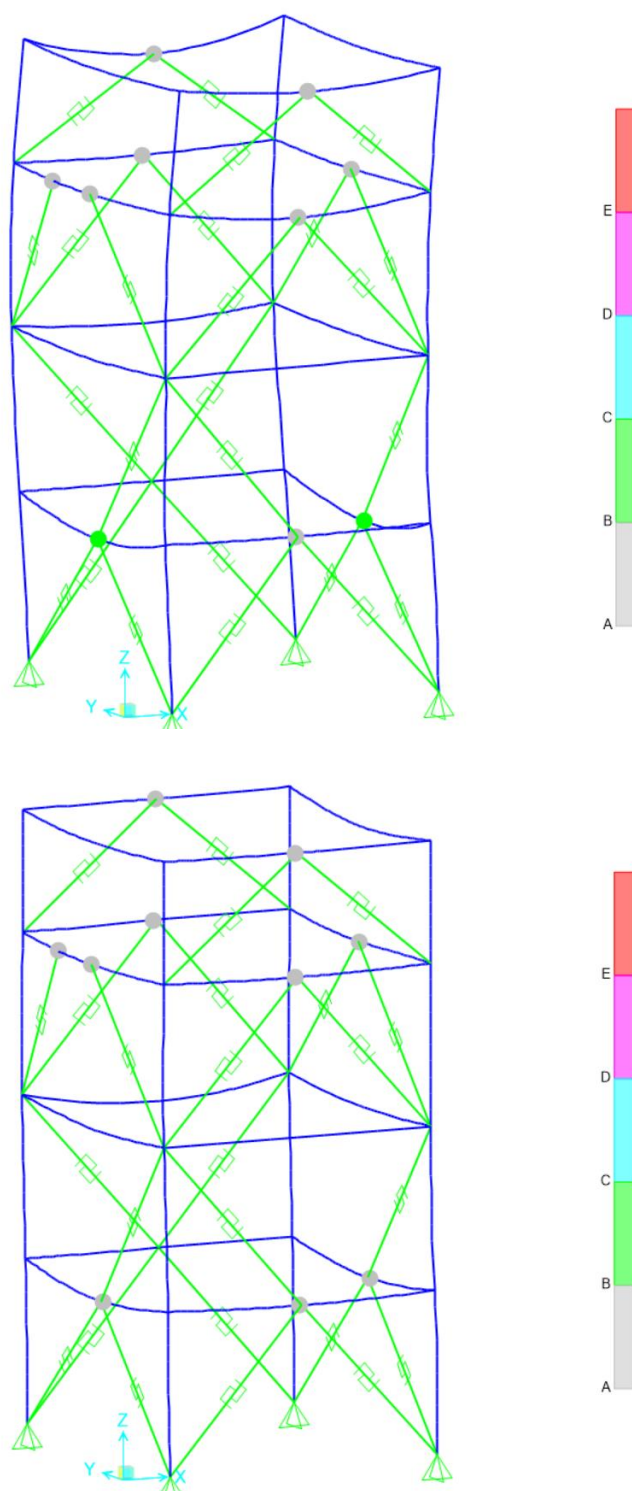


Figura IV-1: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 1 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

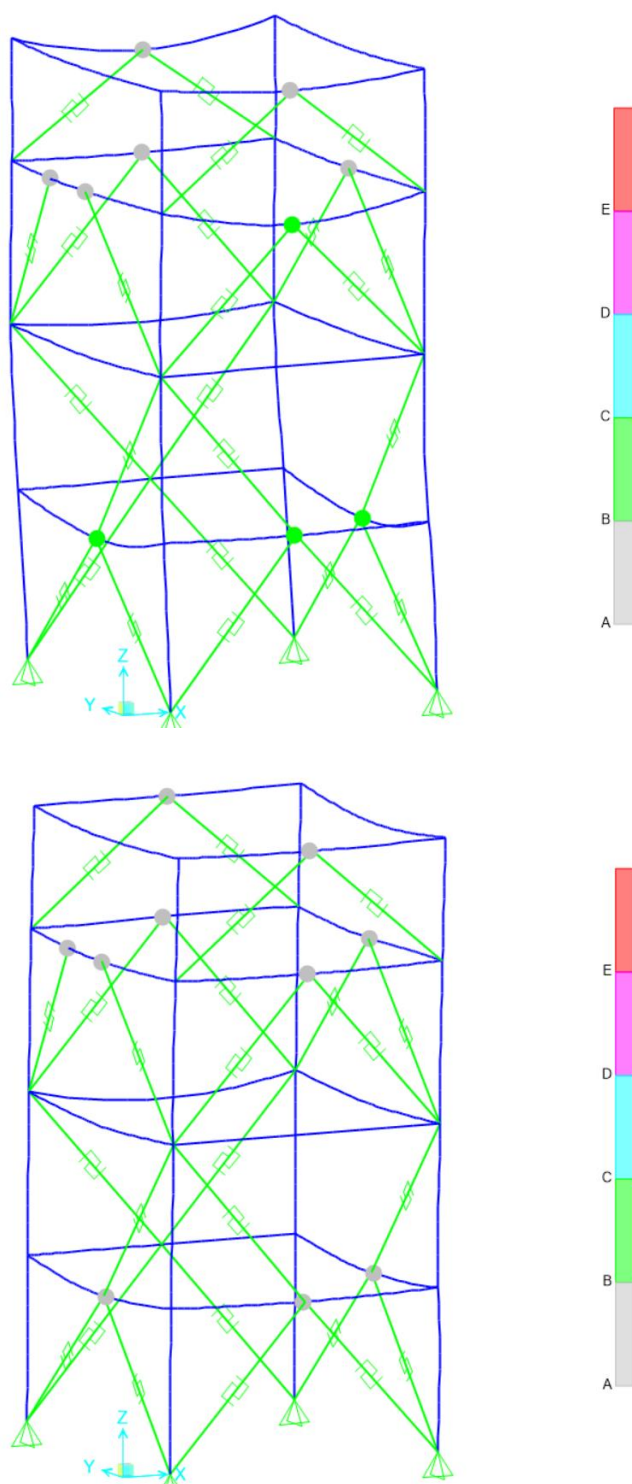


Figura IV-2: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 2 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

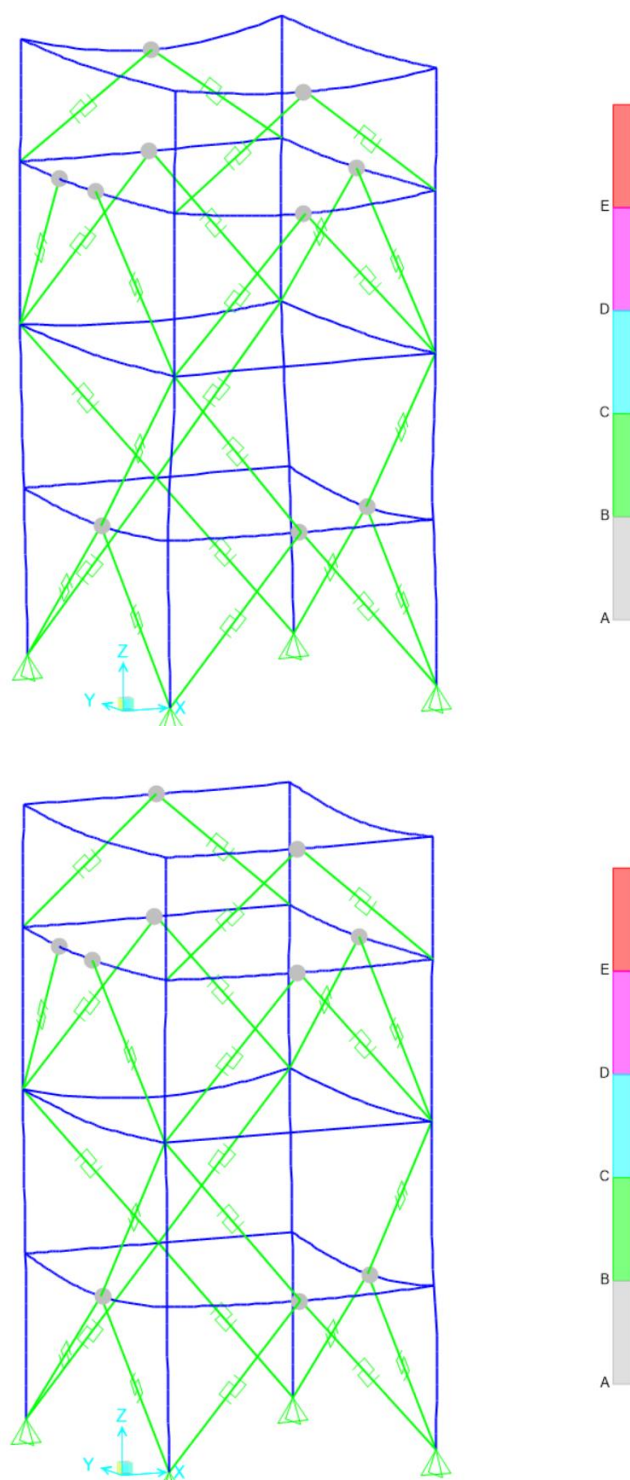


Figura IV-3: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 3 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

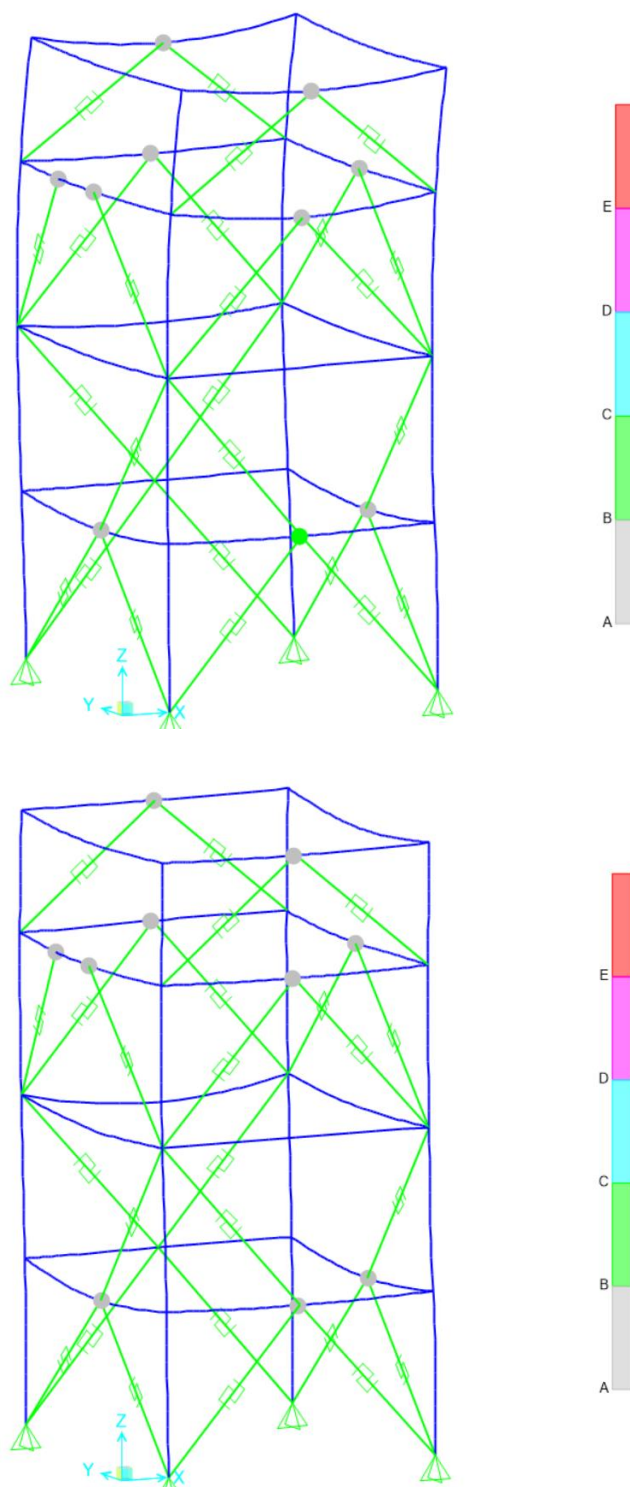


Figura IV-4: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 4 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

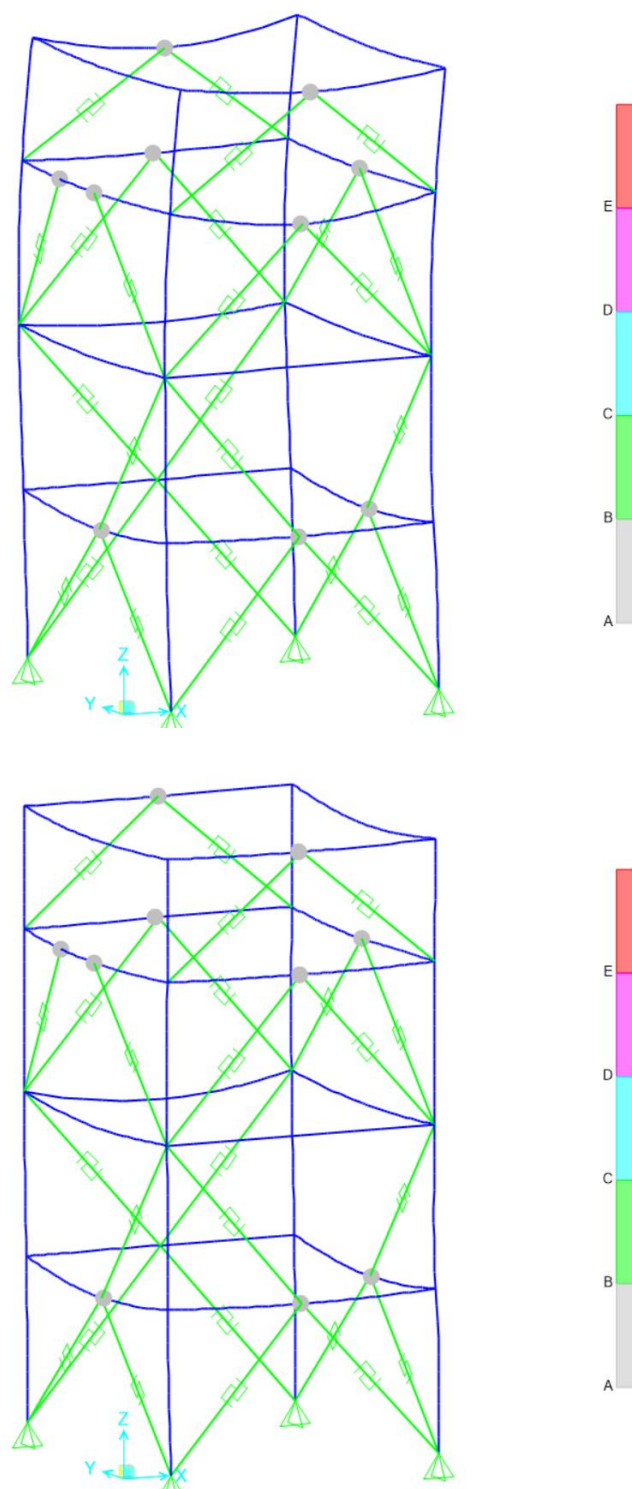


Figura IV-5: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 5 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

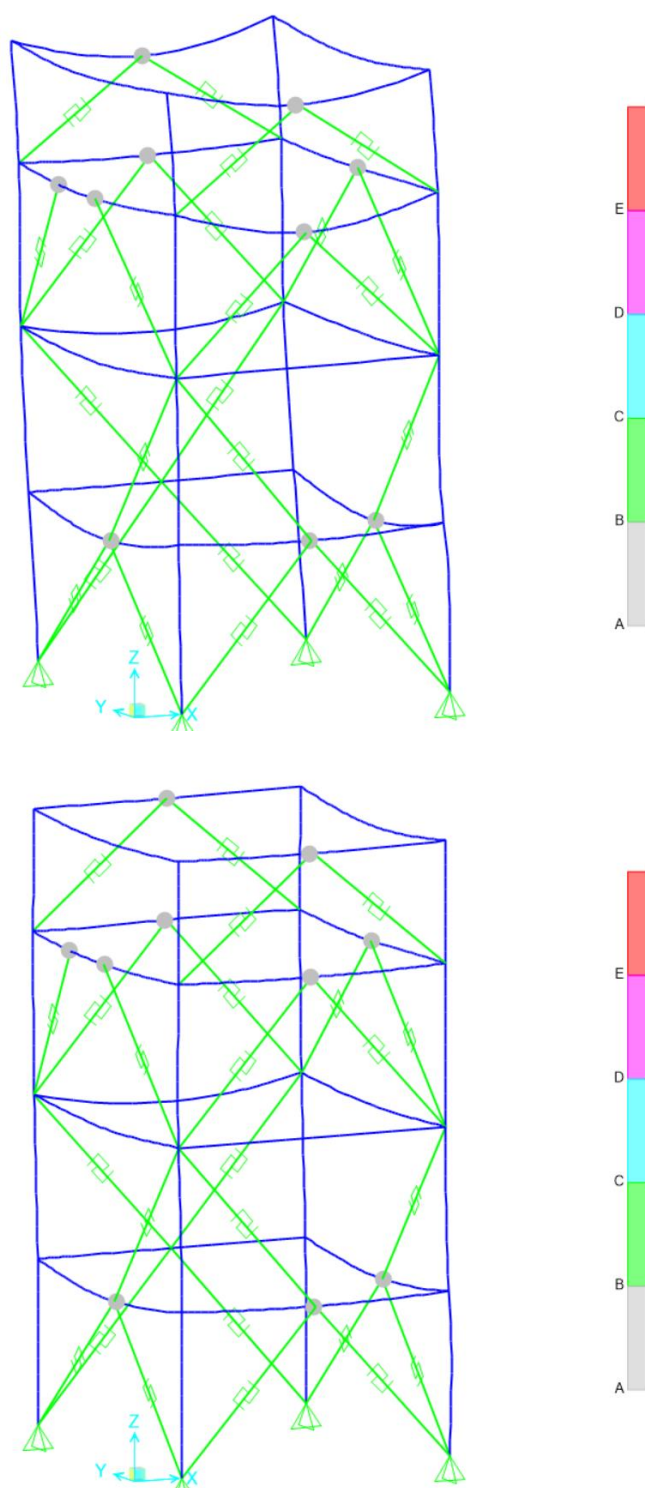


Figura IV-6: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 6 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

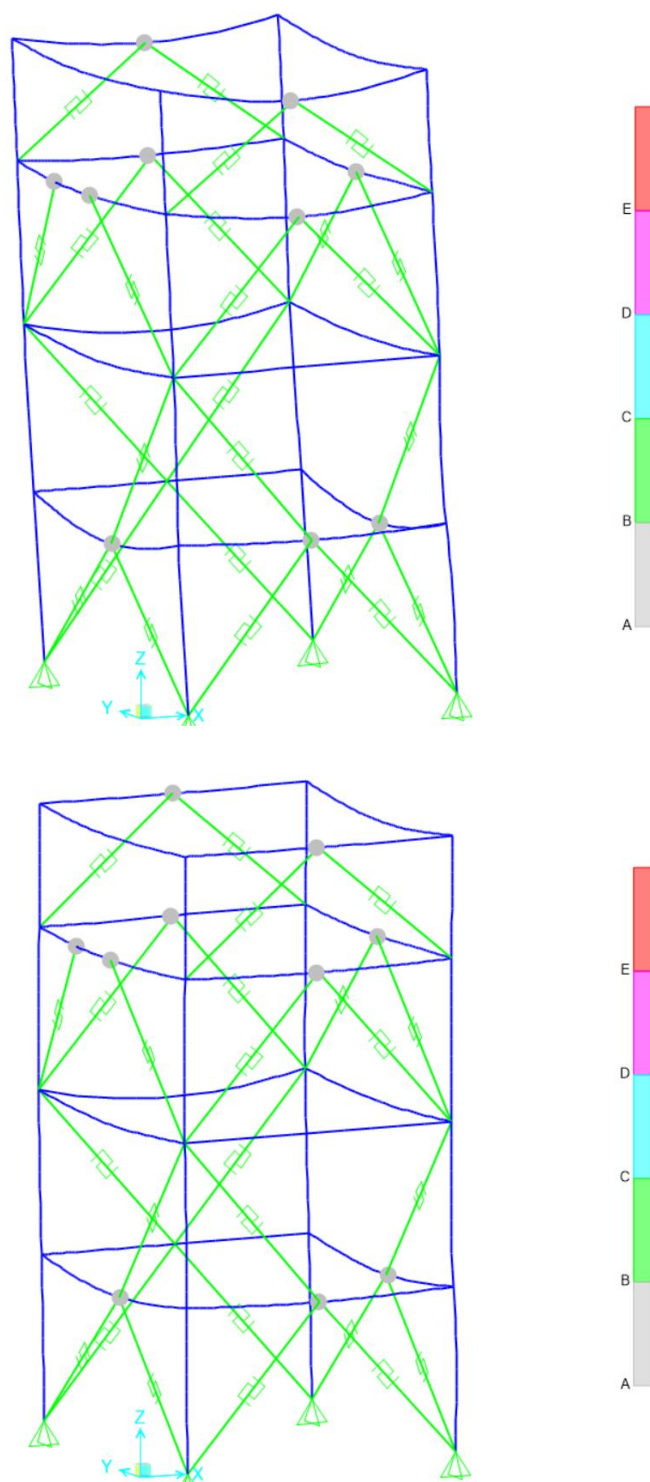


Figura IV-7: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 7 –

Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

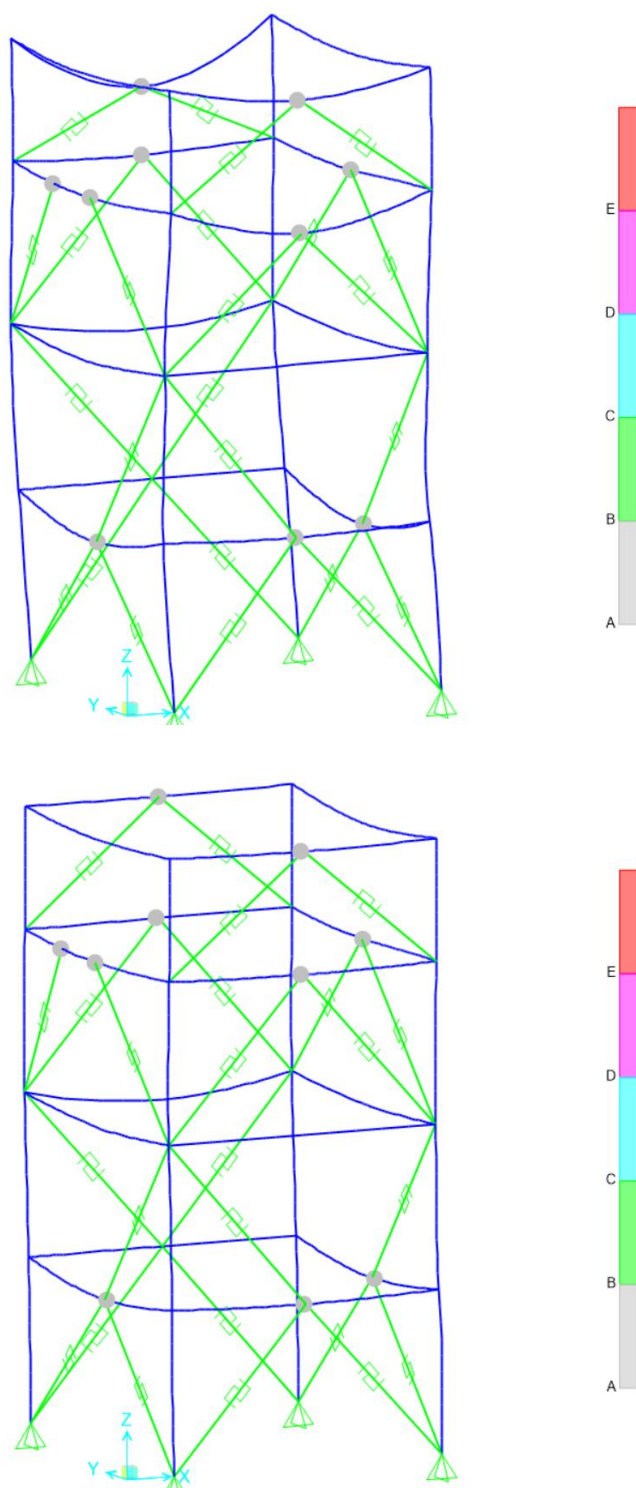


Figura IV-8: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 8 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

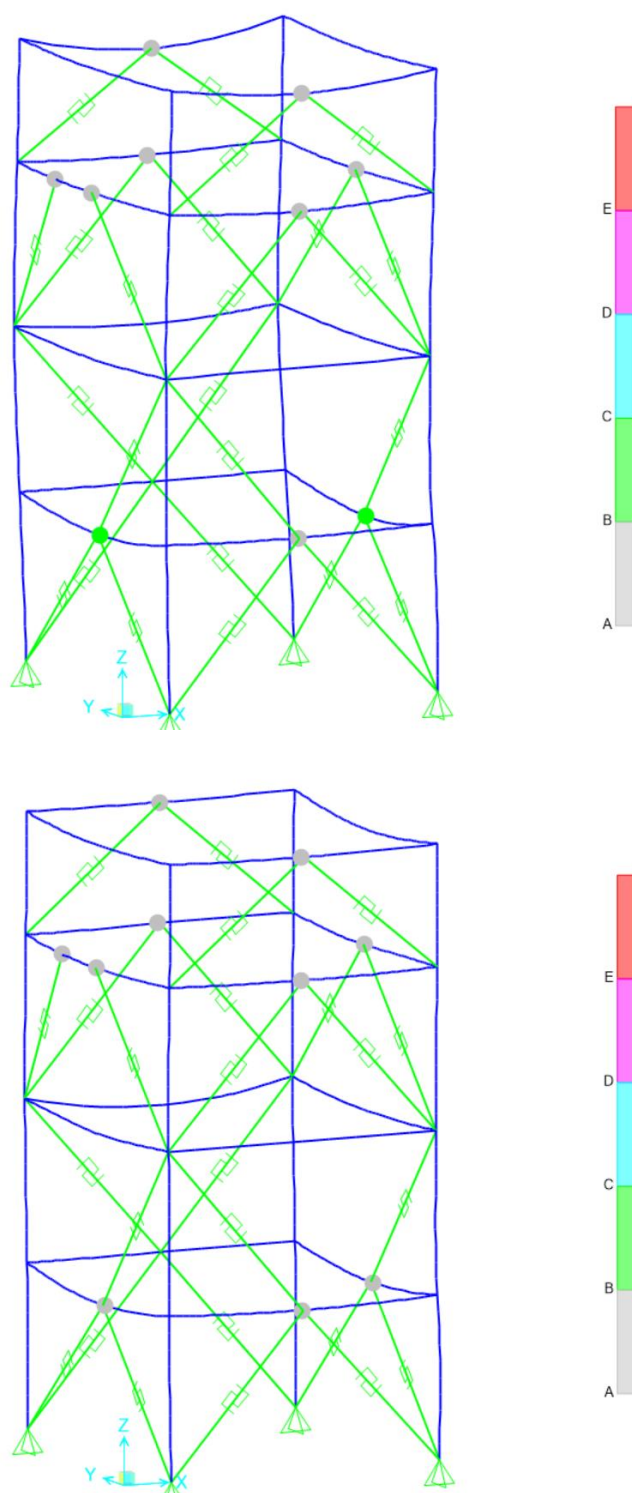


Figura IV-9: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 9 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

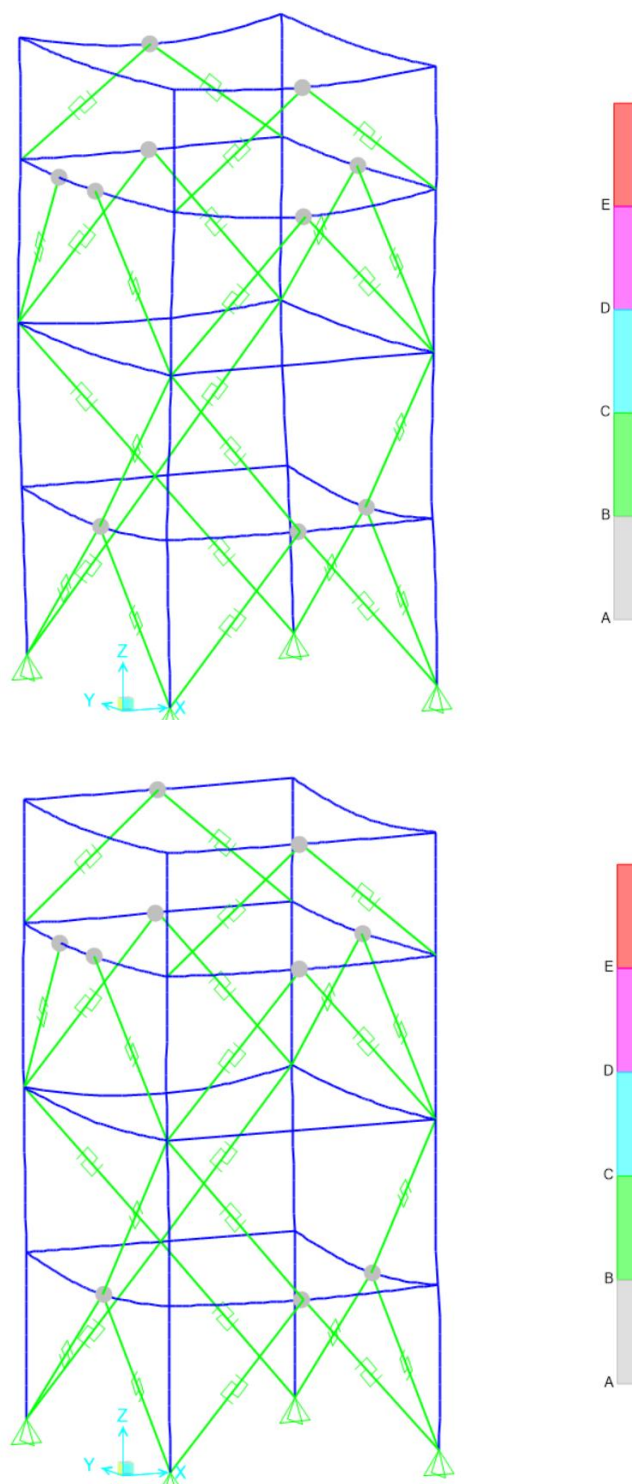


Figura IV-10: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 10 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

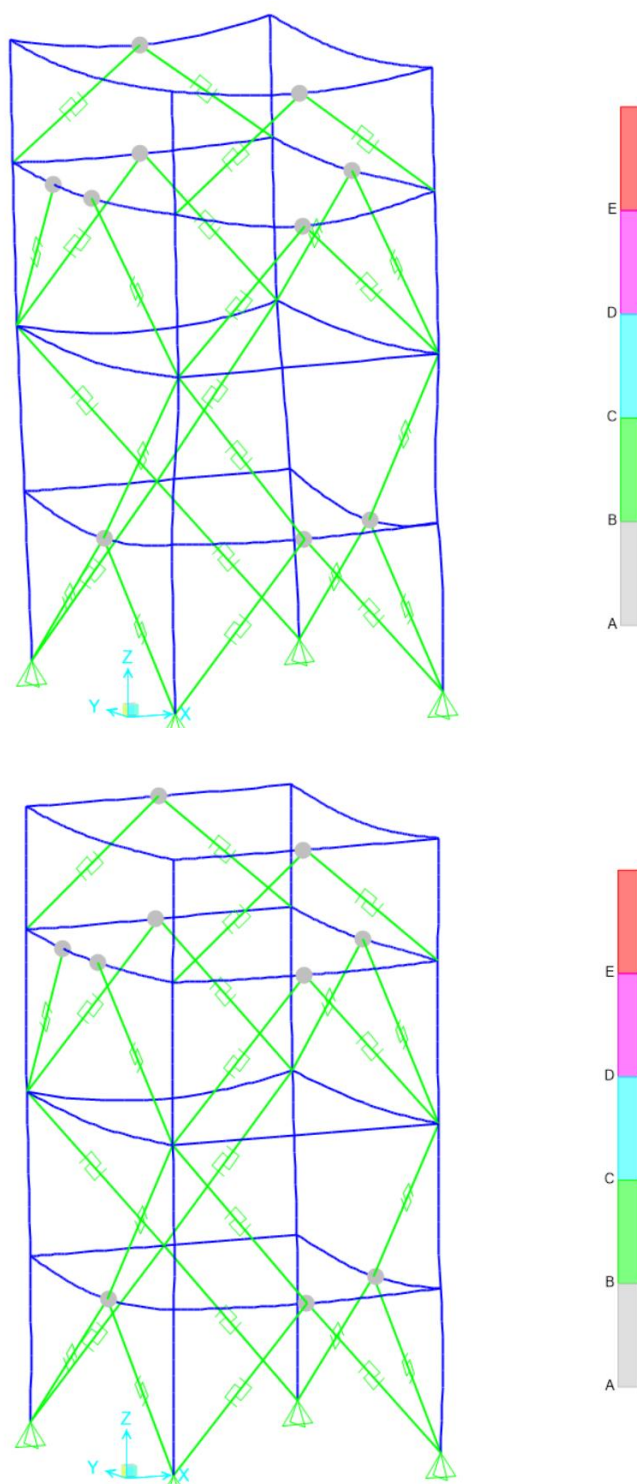


Figura IV-11: Formación de rótulas plásticas para el caso de análisis THNL 11 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

IV.2 Desplazamientos de Techo

Los desplazamientos de techo se muestran en la Tabla IV-1.

Tabla IV-1: Desplazamientos de techo

Caso	Modelo sin BRB		Modelo con BRB		Diferencia [%] respecto del modelo sin BRB	
	U_x [cm]	U_y [cm]	U_x [cm]	U_y [cm]	ΔU_x [%]	ΔU_y [%]
THNL 1	14.67	29.61	5.24	17.46	64%	41%
THNL 2	30.60	43.77	11.42	24.48	63%	44%
THNL 3	12.39	13.80	4.16	4.35	66%	68%
THNL 4	18.69	17.66	12.97	8.14	31%	54%
THNL 5	16.43	16.18	9.47	7.86	42%	51%
THNL 6	9.67	20.47	6.11	10.16	37%	50%
THNL 7	10.64	13.51	4.40	6.52	59%	52%
THNL 8	11.18	12.08	7.01	5.95	37%	51%
THNL 9	15.28	26.24	11.06	13.17	28%	50%
THNL 10	10.40	15.12	3.39	6.45	67%	57%
THNL 11	10.09	16.29	4.11	8.97	59%	45%
Respuesta Media	14.55	20.43	7.21	10.32	50%	51%

IV.3 Factores de Utilización

Las Figuras IV-12 a IV-22 muestran los factores de utilización mayores que 0.90.

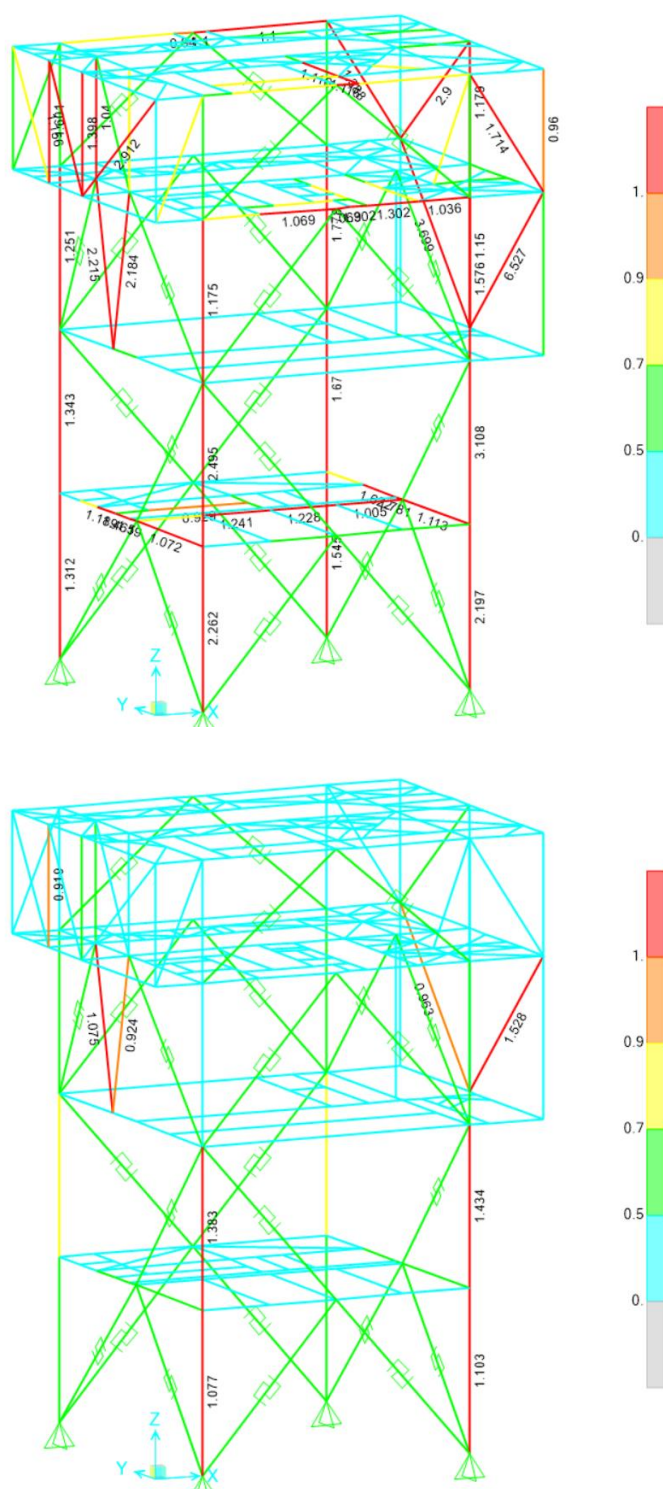


Figura IV-12: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 1 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

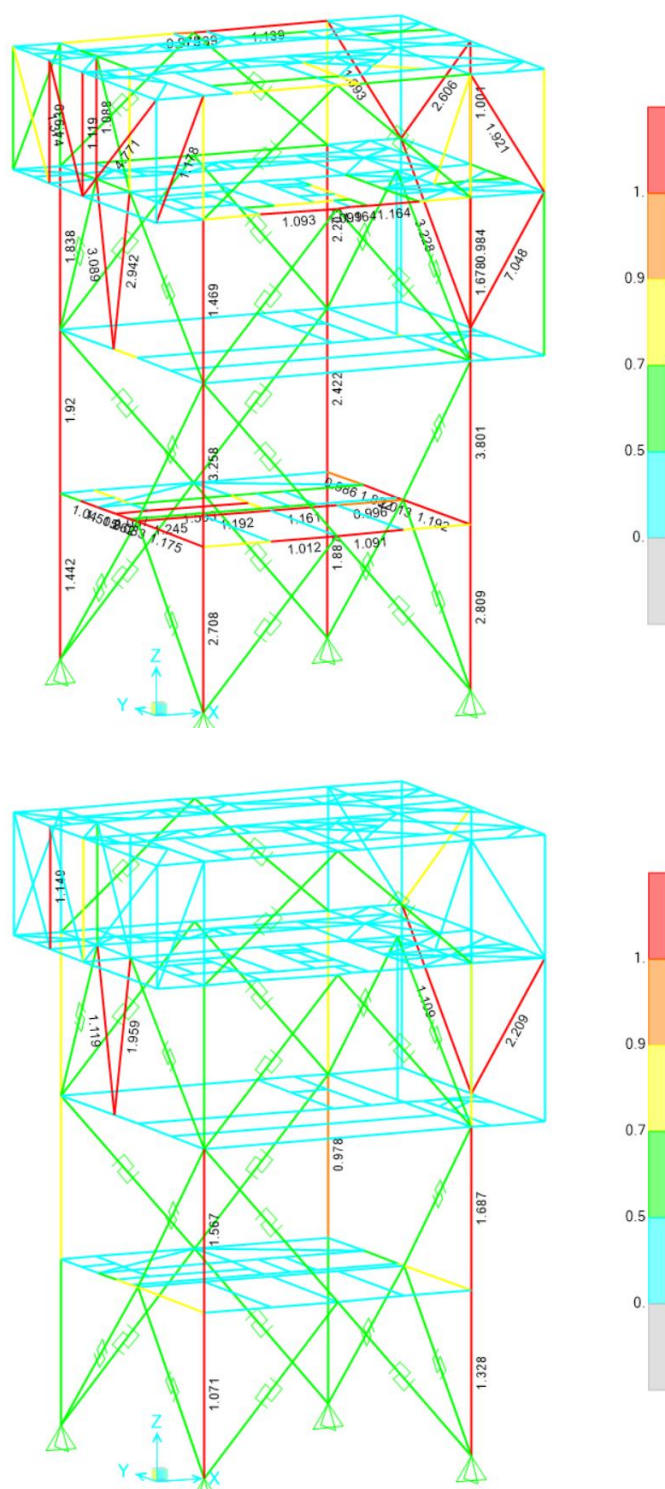


Figura IV-13: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 2 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

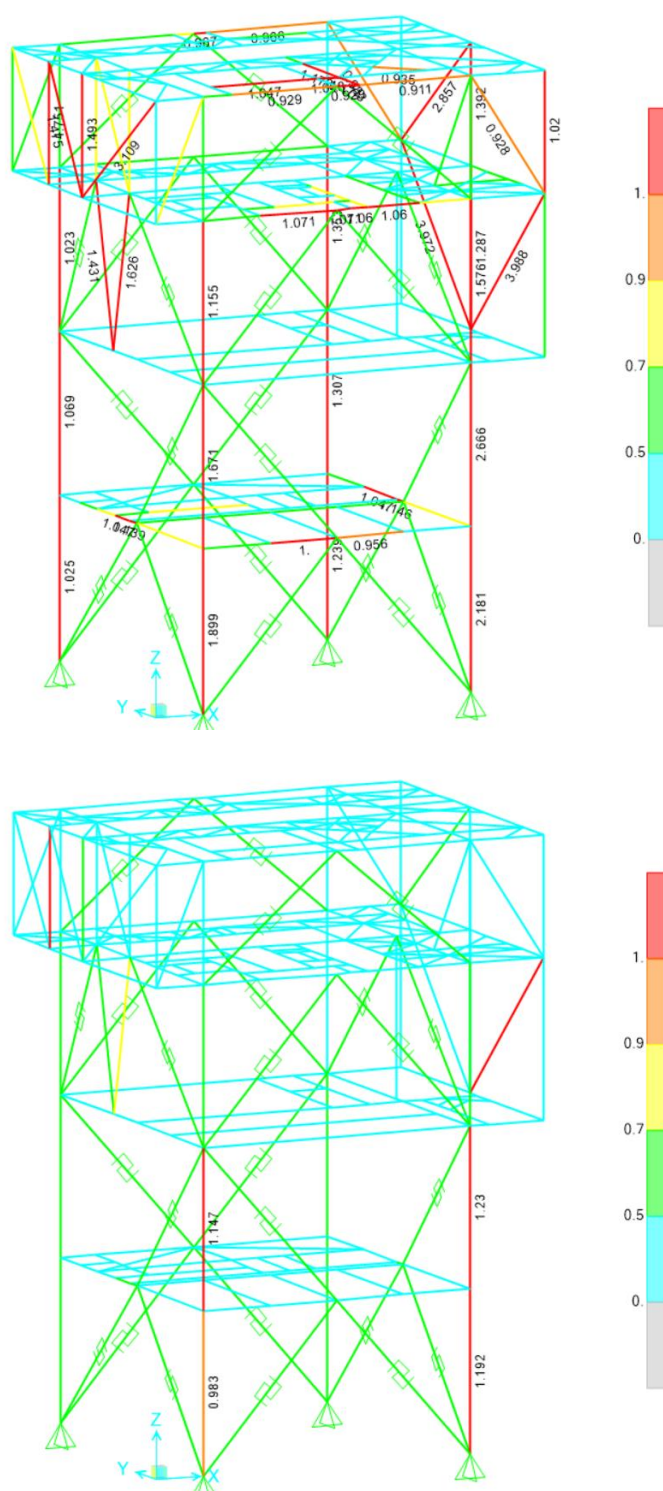


Figura IV-15: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 4 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

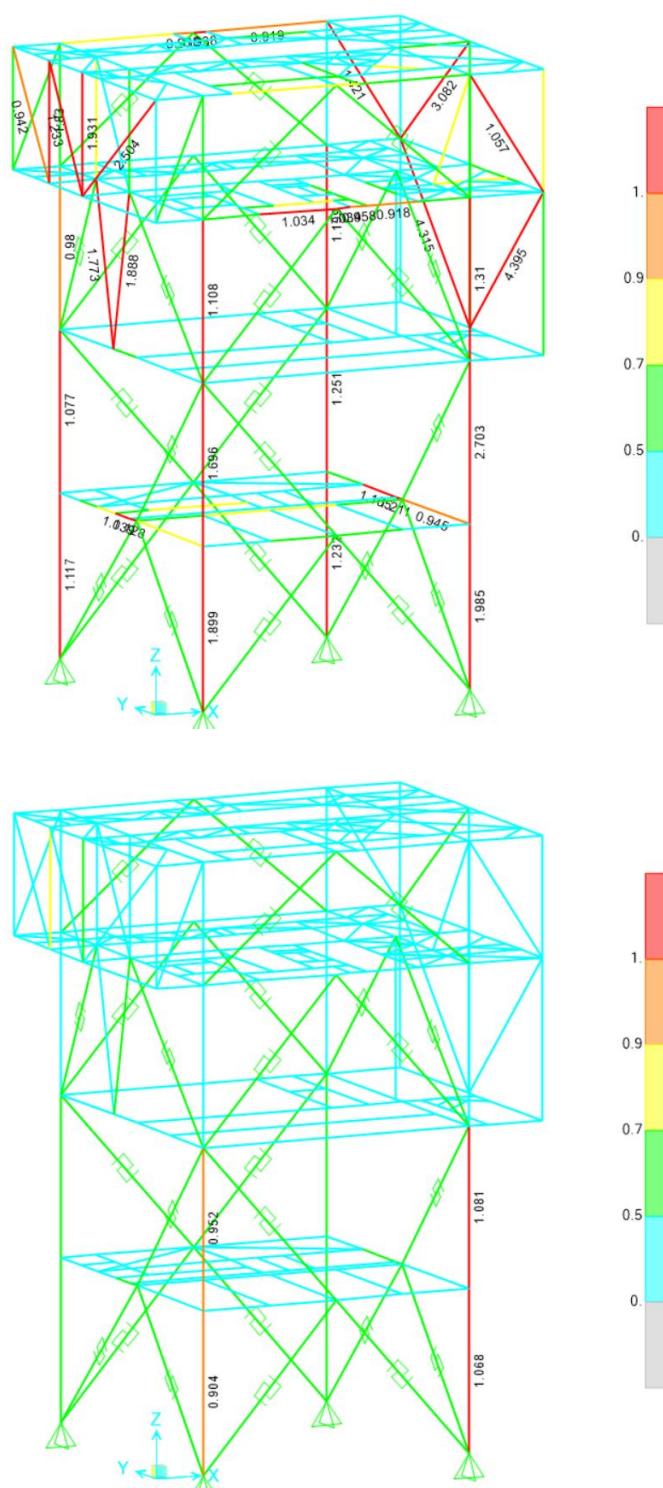


Figura IV-16: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 5 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

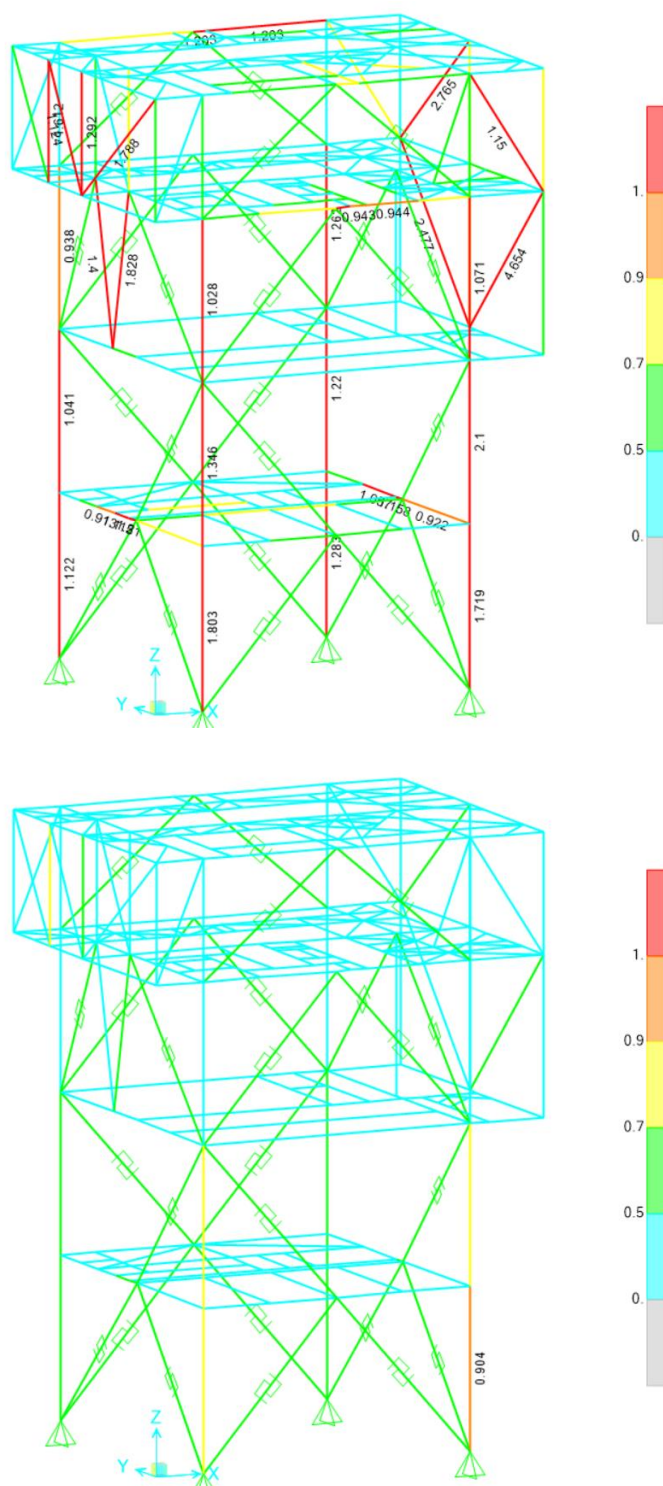


Figura IV-18: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 7 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

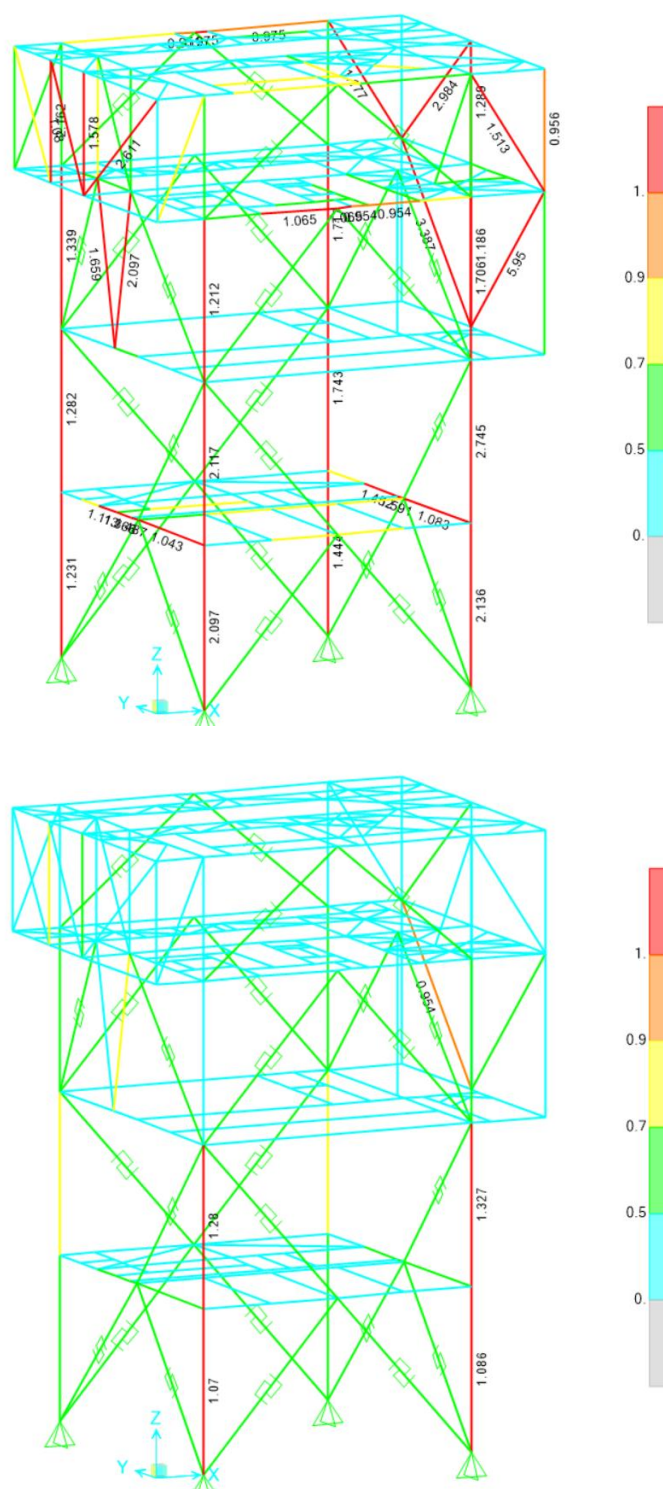


Figura IV-20: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 9 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

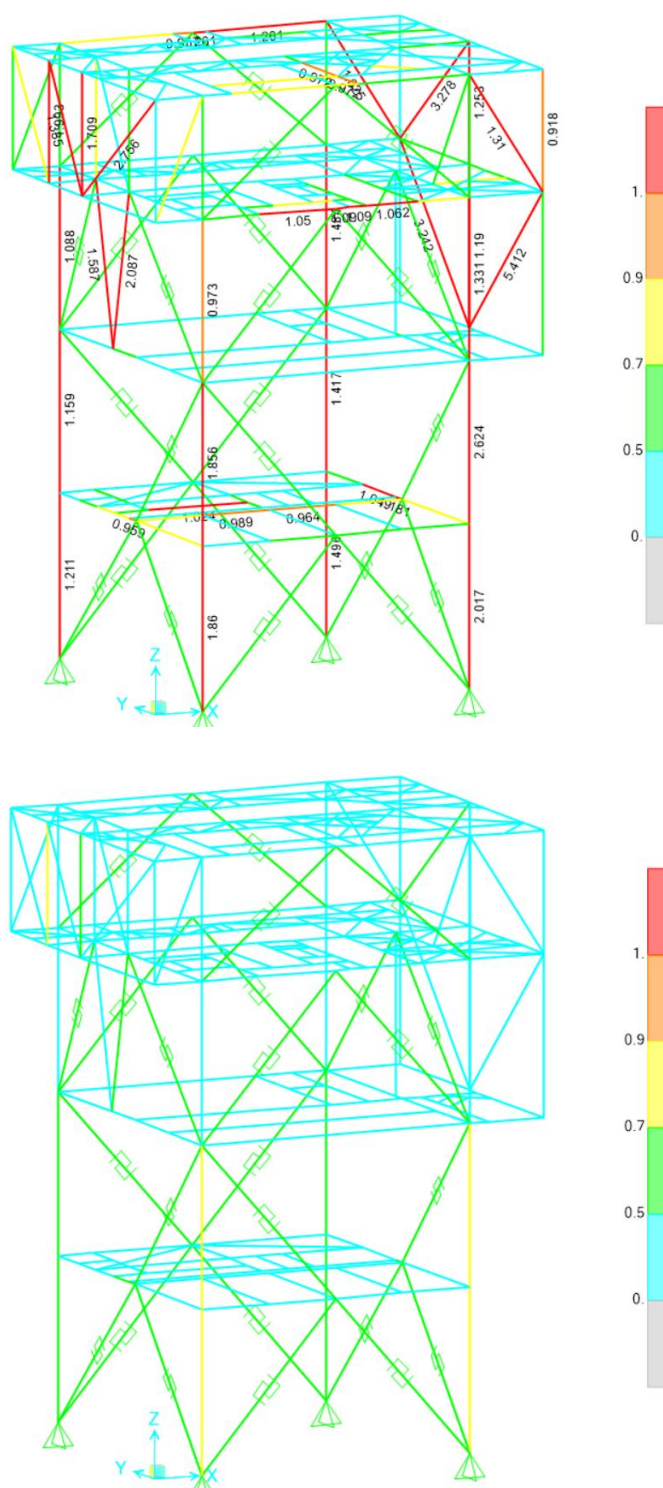


Figura IV-21: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 10 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

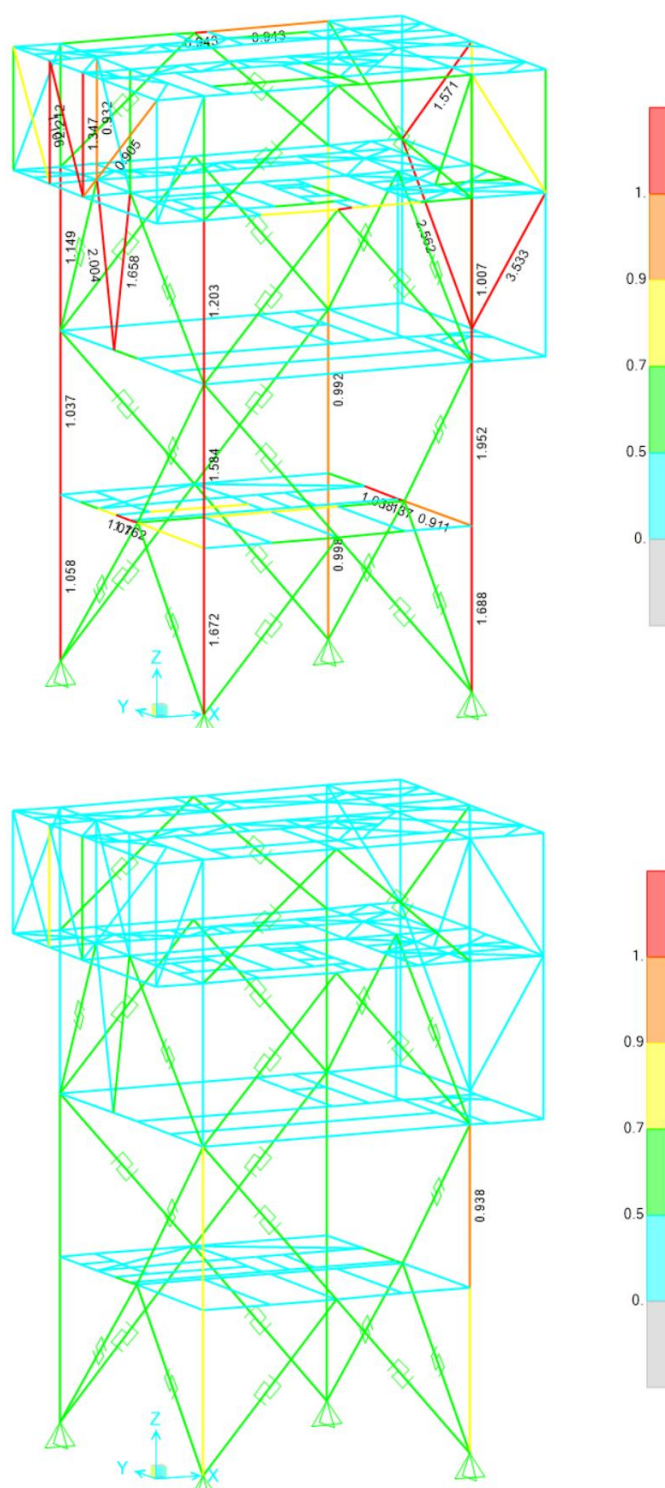


Figura IV-22: Factores de utilización obtenidos para el caso de análisis THNL 11 –
Modelo sin BRB (superior) y modelo con BRB (inferior)

Las Figuras IV-23 y IV-24 muestran los factores de utilización promedio en columnas (modelo sin BRB y con BRB, respectivamente).

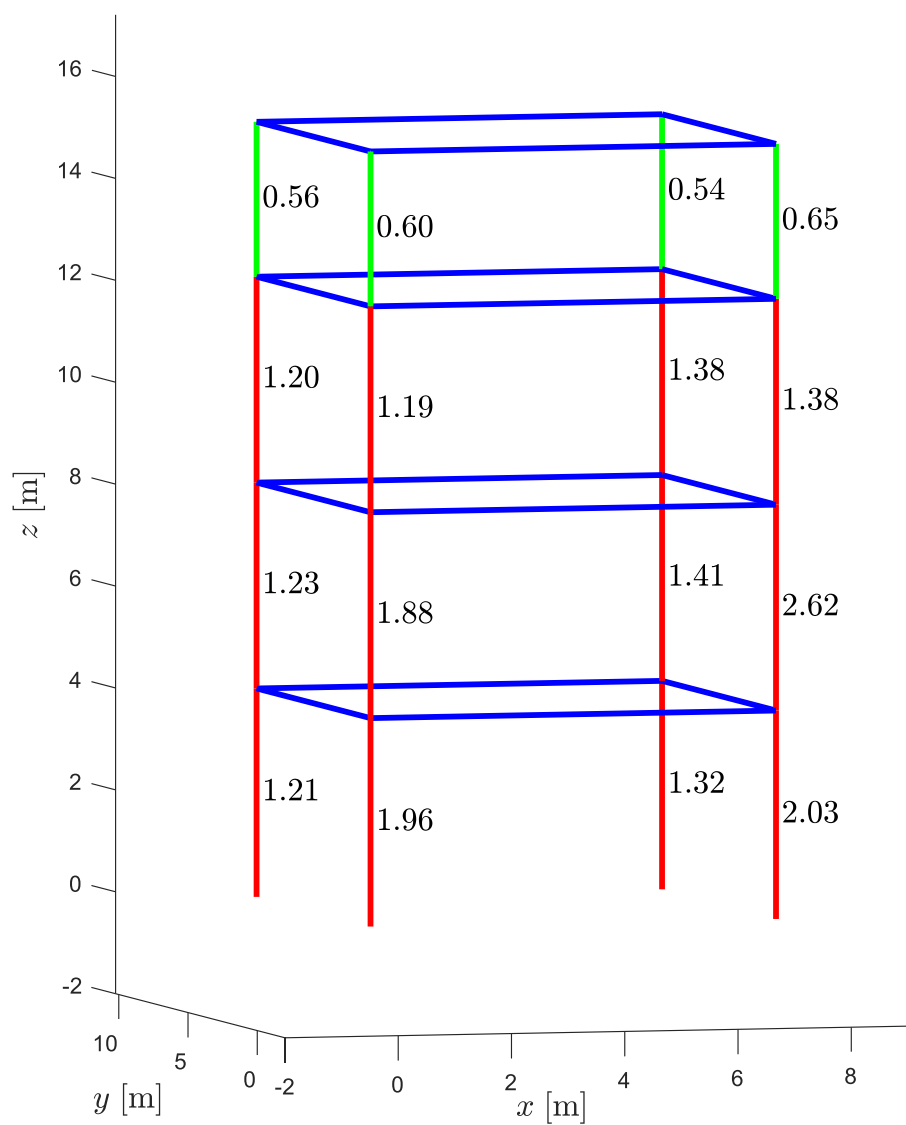


Figura IV-23: Factores de utilización promedio en columnas para modelo sin BRB

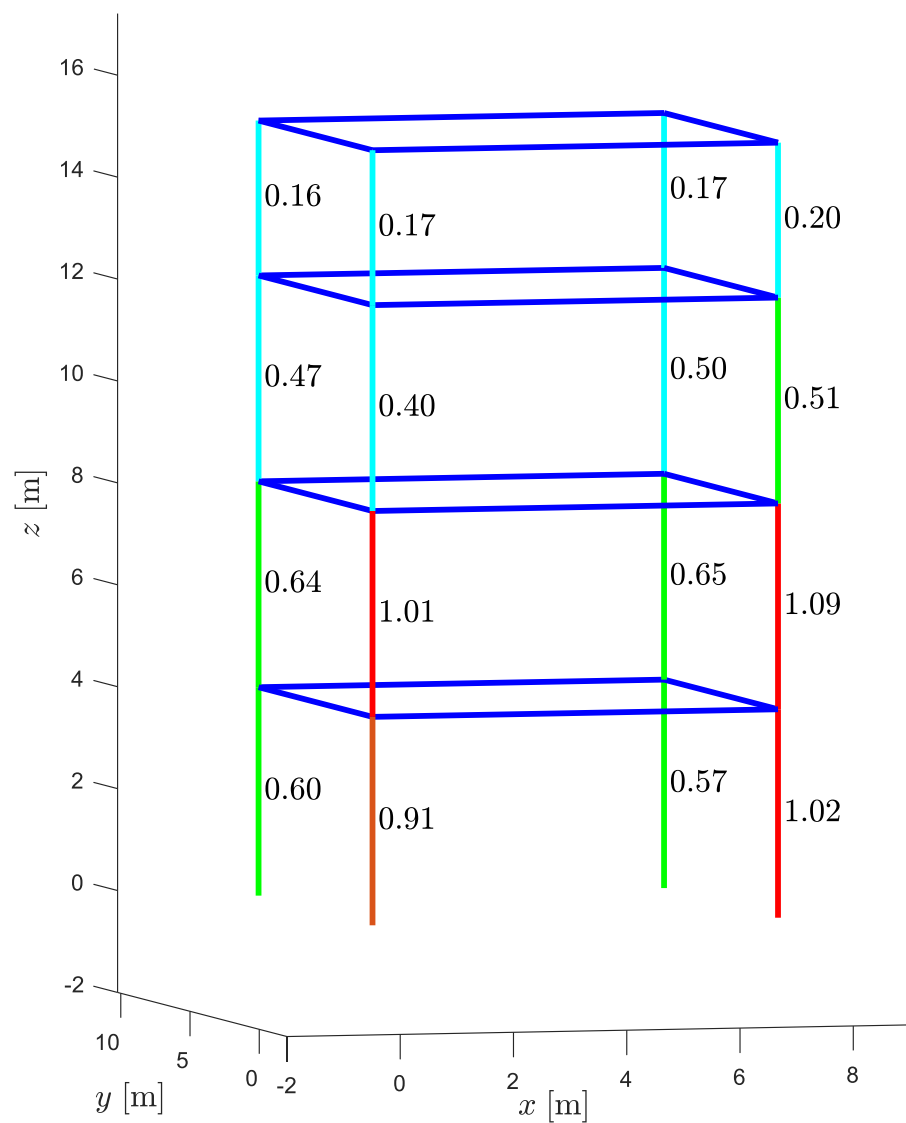


Figura IV-24: Factores de utilización promedio en columnas para modelo con BRB

La Figura IV-25 muestra la reducción porcentual de los factores de utilización promedio en columnas debida a la incorporación de BRBs.

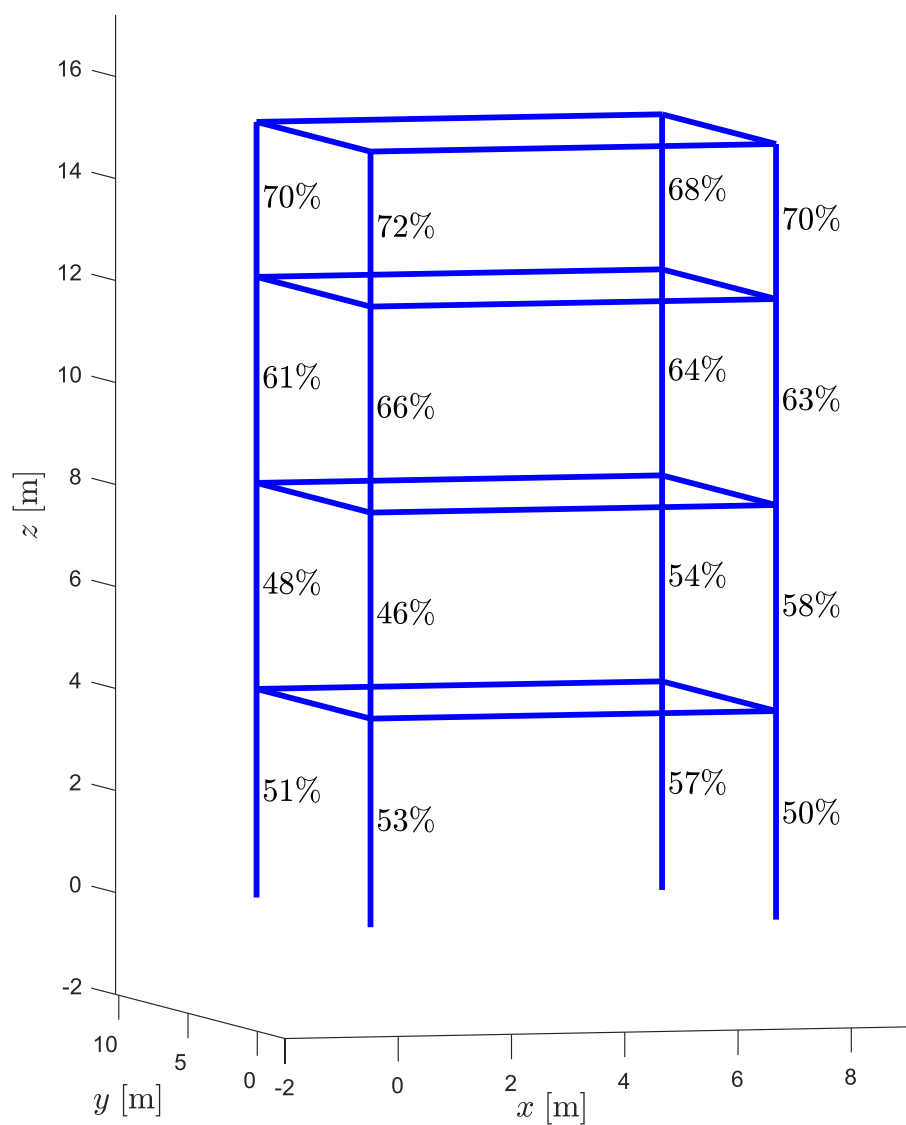


Figura IV-25: Reducción porcentual de factores de utilización promedio en columnas utilizando BRBs

V. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

V.1 Comportamiento de Diagonales y Rótulas Plásticas

Los resultados mostrados en IV.1 y IV.3, en conjunto con el ejemplo mostrado en la Figura III-23, indican que algunas de las diagonales convencionales pandearon en compresión, induciendo formación de rótulas plásticas y factores de utilización mayores a 1.0 en *vigas chevron*. Es importante destacar que muchas de las diagonales convencionales pandearon en compresión pero ninguna llegó a la fluencia en tracción, por lo cual se consideran ineficientes como elementos fusibles encargados de disipar energía.

Por otro lado, los resultados mostrados en IV.1 y IV.3 en conjunto con el ejemplo mostrado en la Figura III-37 indican que las diagonales de pandeo restringido de los niveles inferiores (en los cuales se concentra el corte sísmico) fluyeron tanto en tracción como en compresión, manteniendo a las *vigas chevron* dentro del rango lineal elástico esperado. Se observa nula formación de rótulas plásticas y factores de utilización menores a 1.0 en las Figuras IV-1 a IV-11 y Figuras IV-12 a IV-22 para el modelo con BRB. En otras palabras, las diagonales de pandeo restringido son eficientes para disipar de energía y son los únicos elementos en donde hay deformaciones plásticas (elemento fusible).

V.2 Reducción de Desplazamientos de Techo

Los resultados mostrados en IV.2, específicamente en la Tabla IV-1, indican que el reemplazo de las diagonales convencionales por diagonales de pandeo restringido resulta en una reducción promedio de los desplazamientos de techo, tanto en dirección x como en y, de 50%.

V.3 Reducción de Factores de Utilización en Columnas

Los resultados mostrados en IV.3, específicamente en la Figura IV-25, indican que el reemplazo de las diagonales convencionales por diagonales de pandeo restringido reduce los factores de utilización en columnas entre un 46% y un 72%. Dicha reducción resulta en factores de utilización promedio apenas superiores a 1.0 ($FU_{\max} = 1.09$), lo cual indica que la adición de diagonales de pandeo restringido (BRB) puede ser complementada con refuerzos localizados (planchas soldadas en almas y alas) de fácil ejecución y poco peso, manteniendo así la masa y la rigidez original de la estructura.

V.4 Reducción de Factores de Utilización en General

Los resultados mostrados en IV.3, en las Figuras IV-12 a IV-22, indican que el reemplazo de las diagonales convencionales por diagonales de pandeo restringido reduce los factores de utilización de todos los elementos, concentrando la inelasticidad sólo en el sistema sismorresistente y alivia los esfuerzos en los elementos secundarios. Esta reducción es de gran importancia debido a que los elementos secundarios cumplen un rol fundamental en el proceso industrial minero, por lo que su permanencia dentro del rango elástico para terremotos de gran magnitud es imprescindible.

V.5 Comentarios Constructivos y Económicos

El reemplazo de las diagonales existentes por diagonales de pandeo restringido estudiado en este trabajo resulta en un peso total de 1.70 ton. Por otro lado, si se consideran los eventuales refuerzos (planchas) mencionados en V.3 el peso total resultaría en aproximadamente 2.00 ton, lo cual es una cantidad marginal respecto del peso total de la estructura. A modo de comparación, el proyecto de referencia indicado en II.1 (desarrollado por RFA Ingenieros en el año 2021) resultó en una serie de refuerzos en un peso total de 15.56 ton (Figura V-1).

CUBICACION PLANOS N° 010 @ 014		
PERFIL	LONG. (mm)	P. TOT.
IN20x22.8	1626	37,1
T15x32.7	92603,8	3028,0
TL15x52.8	130807,8	6907,0
TL12.5x25.2	8318	209,2
T12.5x18.3	1708	31,2
TE30x65.1	5714	372,0
TE35x77.8	15260	1187,2
TE22x56.3	24434	1375,6
L10x11.7	48554	568,0
PL6	3276	24,7
PL8	106117	472,7
PL10	14752	257,2
PL12	24434	529,0
PL14	12526	274,1
PL16	10160	289,7
TOTAL		15562,7

Figura V-1: Cubicación de refuerzos estructurales – Proyecto de referencia

BIBLIOGRAFIA

AISC (2016). *ANSI/AISC 341, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.

FEMA (2000). *FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*. Federal Emergency Management Agency, Washington, USA.

INN (2016). *NCh 170, Hormigón – Requisitos Generales*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2006). *NCh 203, Acero para Uso Estructural*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2016). *NCh 427/1, Construcción – Estructuras de Acero – Parte 1: Requisitos para el Cálculo de Estructuras de Acero para Edificios*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2003). *NCh 2369, Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2023). *NCh 2369, Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2013). *NCh 2745, Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2017). *NCh 3411, Diseño Sísmico de Edificios con Sistemas Pasivos de Disipación de Energía – Requisitos y Métodos de Ensayo*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

Kersting, R. A., Fahnestock, L. A., López, W. A. (2015). *Seismic Design of Steel Buckling Restrained Braced Frames, A Guide for Practicing Engineers*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Engineering Laboratory, Gaithersburg, USA.

Urzúa, C. (2015). *Comparación del Desempeño de Dos Estructuras Industriales de Acero Diseñadas según la Práctica Nacional y Disposiciones AISC*. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ANEXOS

ANEXO A : PROPIEDADES PERFILES

Tabla A-1: Propiedades de los perfiles en nomenclatura SAP2000

SectionName	Shape	t3 [mm]	t2 [mm]	tf [mm]	tw [mm]
10C15.3	Channel	254.00	66.04	9.11	4.35
10WF21	I/Wide Flange	251.46	146.05	5.93	4.35
10WF25	I/Wide Flange	257.00	146.36	9.11	4.35
10WF33	I/Wide Flange	247.14	202.18	9.11	5.93
10WF39	I/Wide Flange	252.48	202.95	10.70	5.93
12C20.7	Channel	304.80	76.20	10.73	5.93
12WF27	I/Wide Flange	303.78	165.10	7.53	4.35
14WF30	I/Wide Flange	351.54	170.94	7.53	5.93
16WF36	I/Wide Flange	402.84	177.42	9.11	5.93
16WF58	I/Wide Flange	402.84	214.99	13.88	9.11
18WF45	I/Wide Flange	453.64	189.90	10.70	5.93
18WF50	I/Wide Flange	457.20	190.50	12.28	7.53
18WF55	I/Wide Flange	460.25	191.31	13.87	7.53
2L3x3x5/16	Double Angle	76.20	162.40	5.94	5.94
6C8.2	Channel	152.40	47.65	7.52	2.76
6WF15.5	I/Wide Flange	152.40	152.40	4.35	4.35
8B10	I/Wide Flange	200.66	100.08	2.76	2.76
8C11.5	Channel	203.20	57.40	7.53	4.35

8WF17	I/Wide Flange	203.20	133.40	5.93	4.35
8WF24	I/Wide Flange	201.42	165.10	7.52	4.35
8WF31	I/Wide Flange	203.20	203.20	9.11	5.93
L2.5x2.5x1/4	Angle	63.50	63.50	4.35	4.35
L3x3x5/16	Angle	76.20	76.20	5.94	5.94
ST4WF8.5	Tee	101.60	133.35	5.82	3.84
ST5WF10.5	Tee	125.73	146.05	6.64	4.10
ST5WF24.5	Tee	127.00	254.00	12.17	6.64
ST6WF13.5	Tee	151.89	165.10	8.16	4.10

ANEXO B : ASIGNACIÓN DE CARGAS

Peso propio barandas:

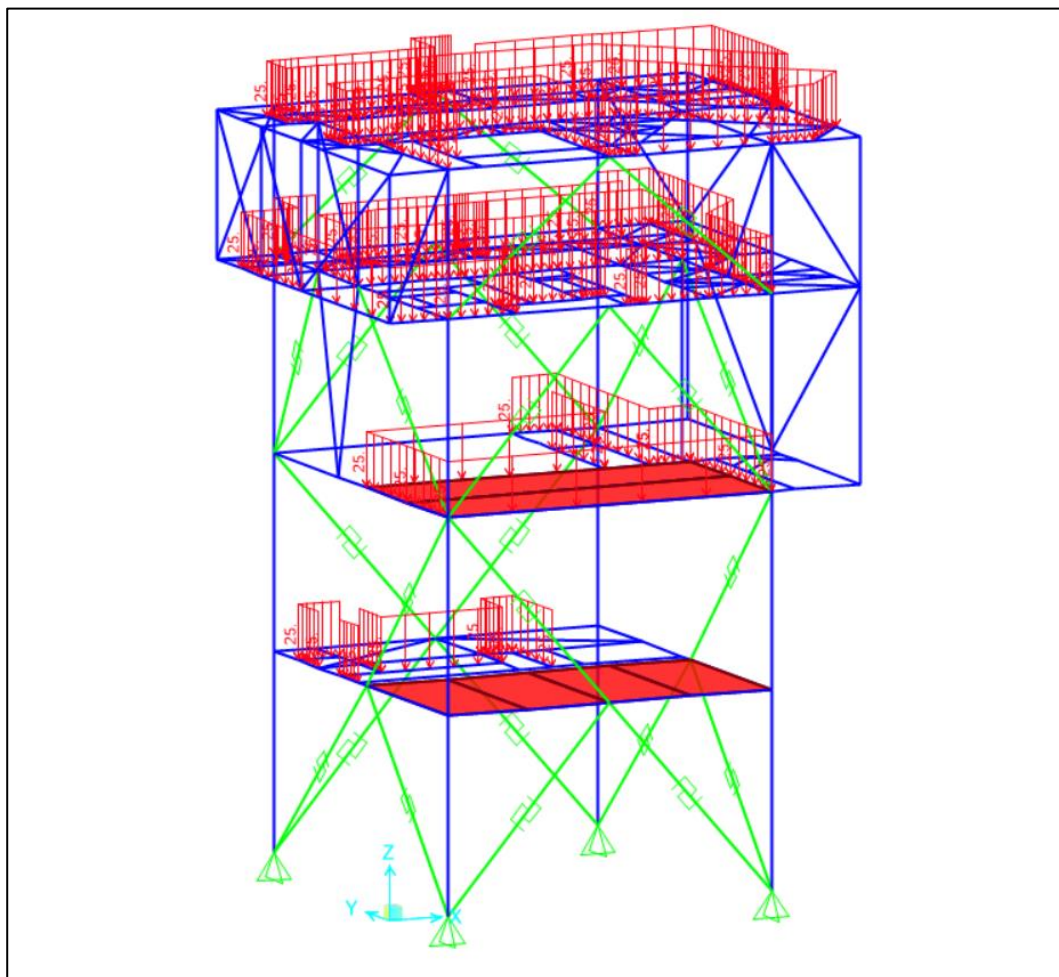


Figura B-1: Asignación peso propio barandas

Peso propio parrillas:

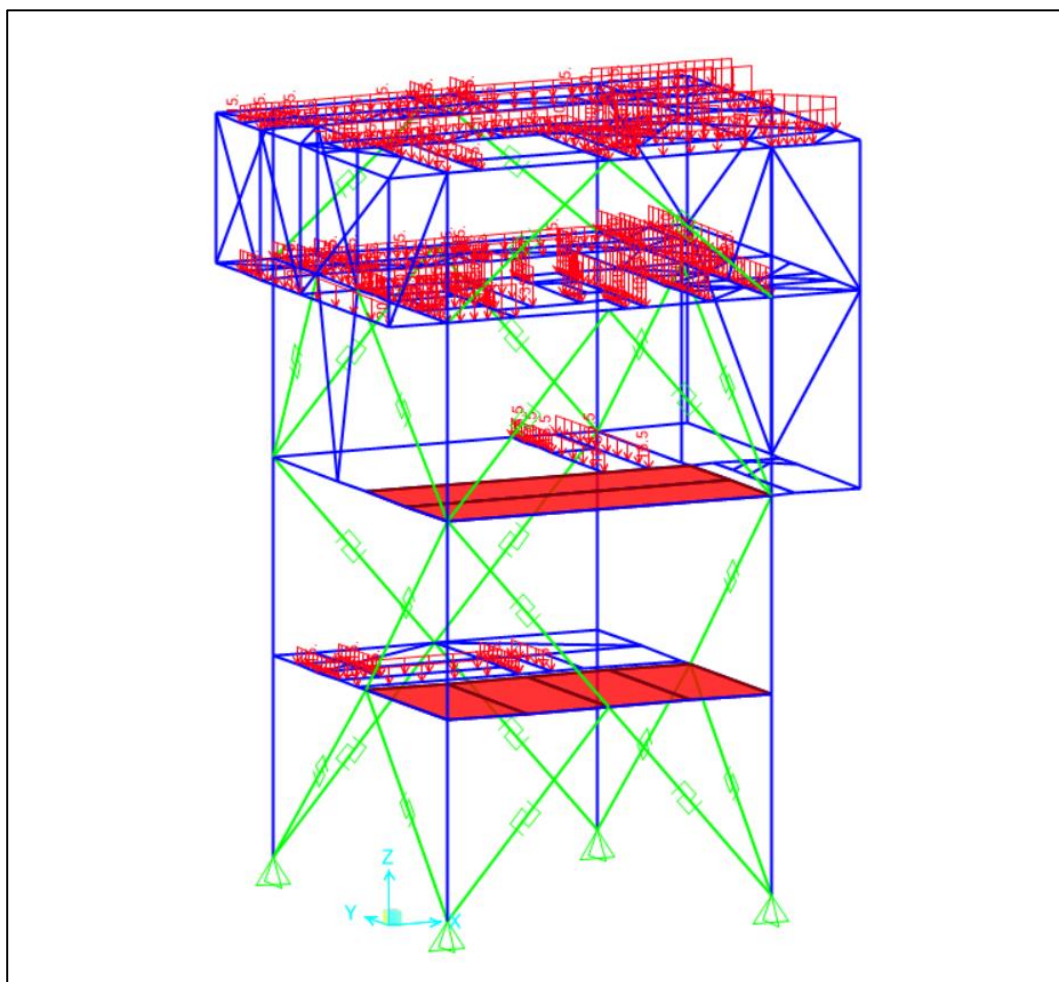


Figura B-2: Asignación peso propio parrillas

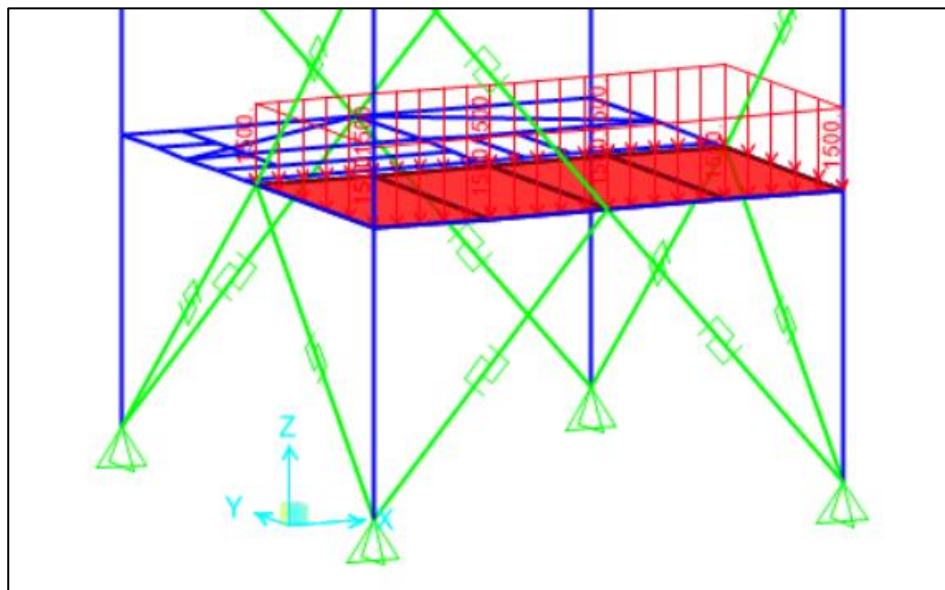
Peso propio casetas:

Figura B-4: Asignación peso propio caseta

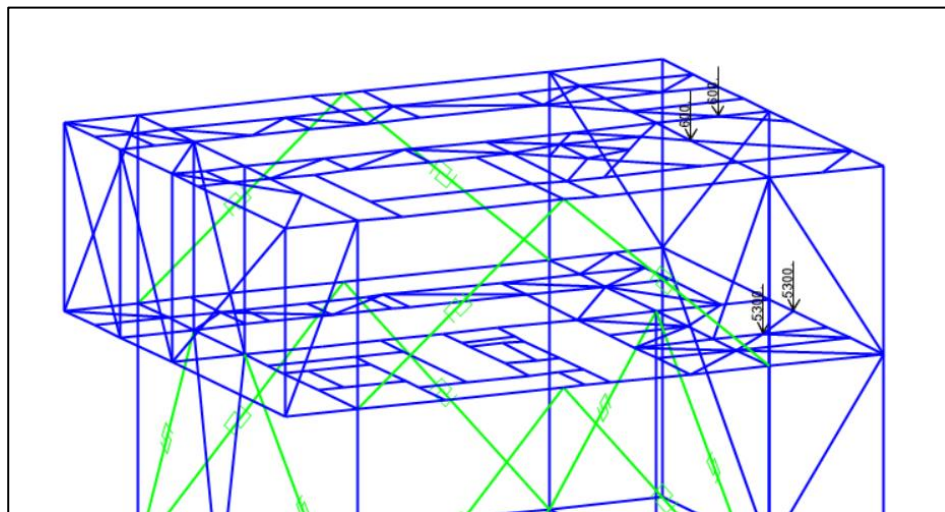
Peso propio correa G10:

Figura B-5: Asignación peso propio correa G10

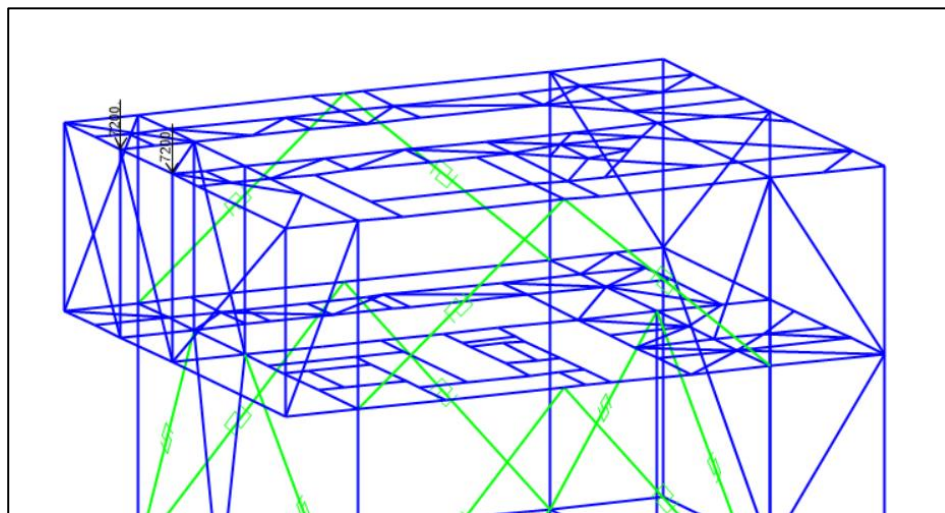
Peso propio correa G11:

Figura B-6: Asignación peso propio correa G11

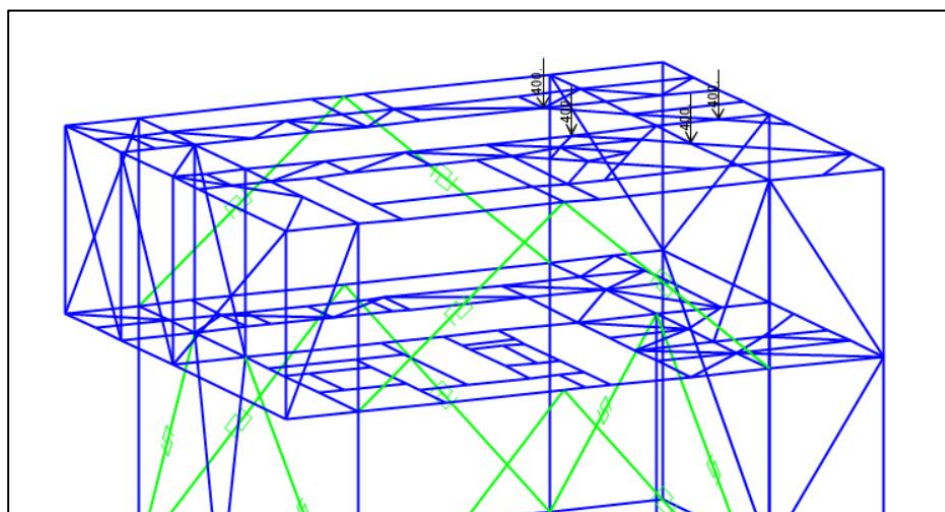
Peso propio chute:

Figura B-7: Asignación peso propio chute

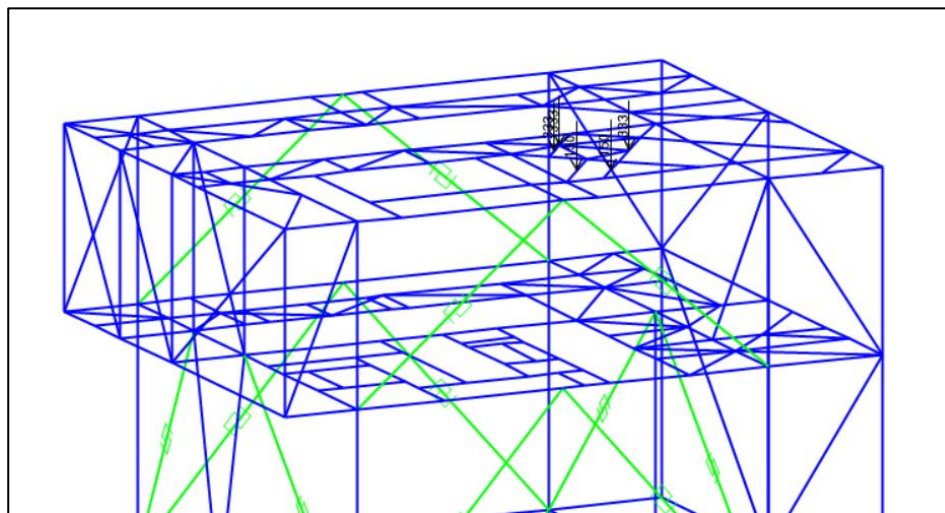
Peso propio equipos G10:

Figura B-10: Asignación peso propio equipos G10

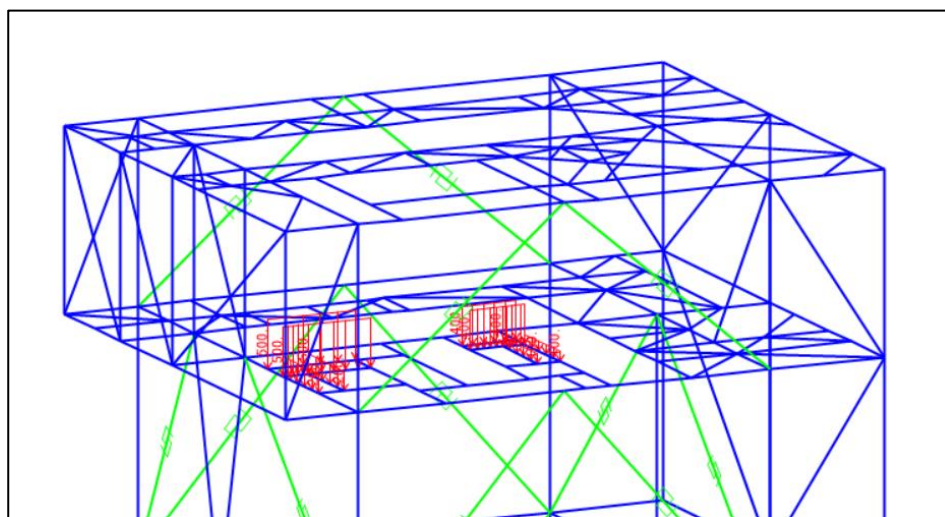
Peso propio equipos G11:

Figura B-11: Asignación peso propio equipos G11

Sobrecarga plataformas (elementos frame):

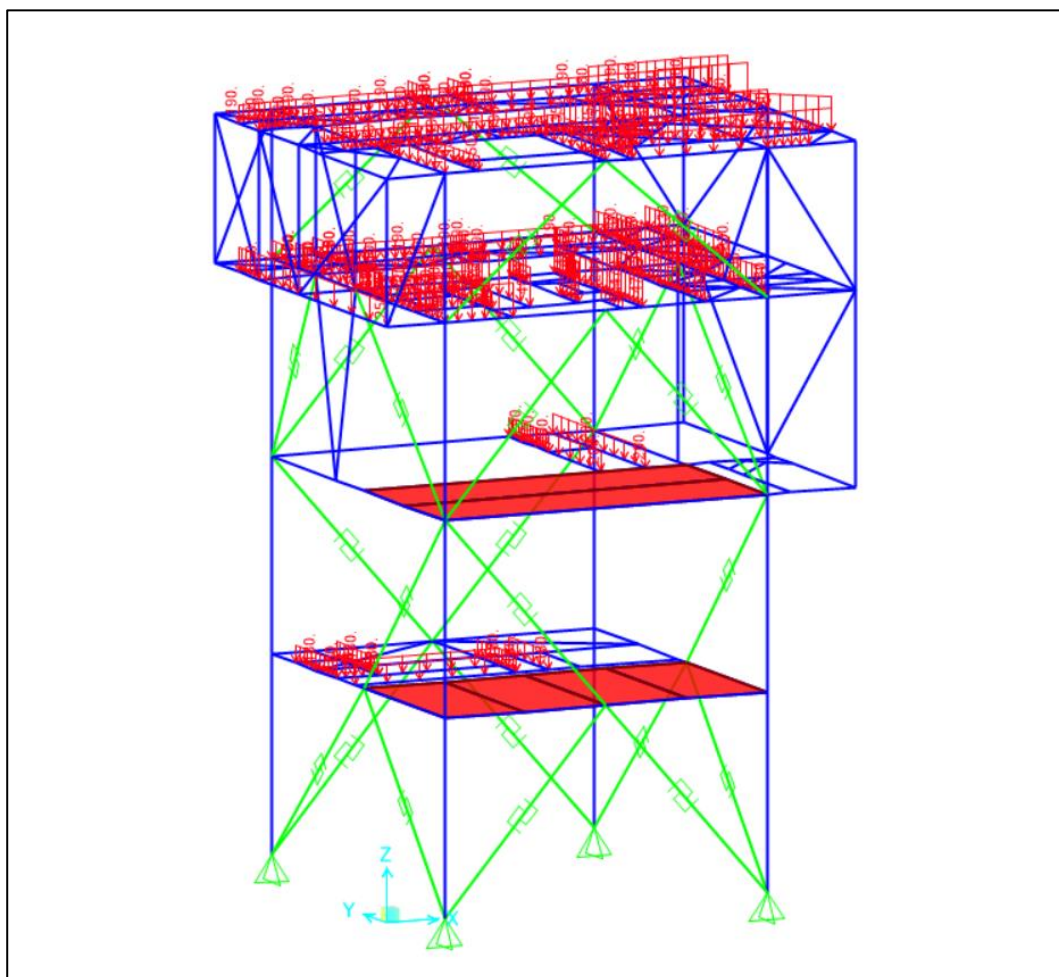


Figura B-12: Asignación sobrecarga plataformas (elementos frame)

Sobrecarga plataformas (elementos area):

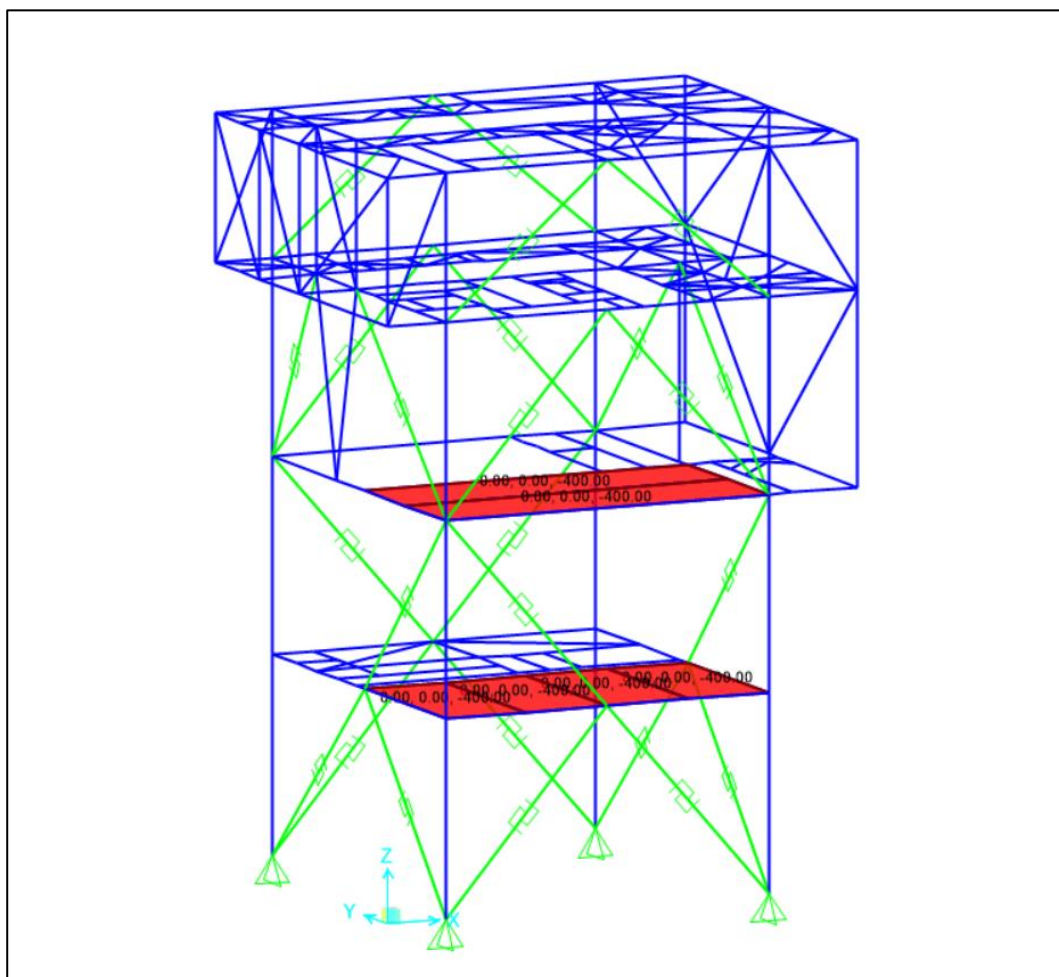


Figura B-13: Asignación sobrecarga plataformas (elementos area)

Sobrecarga escaleras:

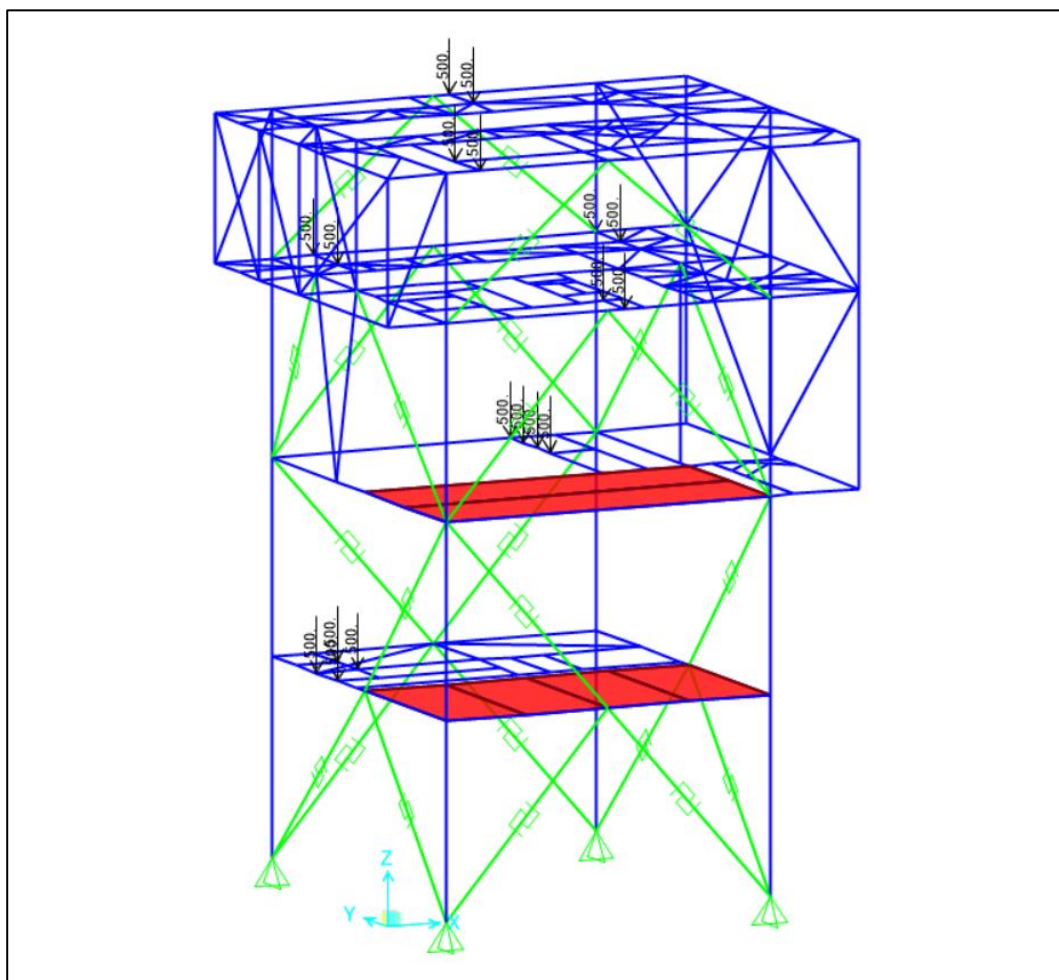


Figura B-14: Asignación sobrecarga escaleras

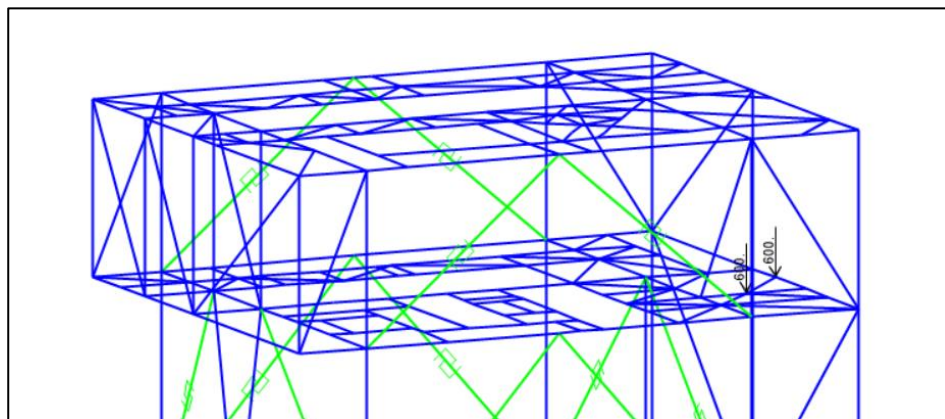
Sobrecarga correa G10:

Figura B-15: Asignación sobrecarga correa G10

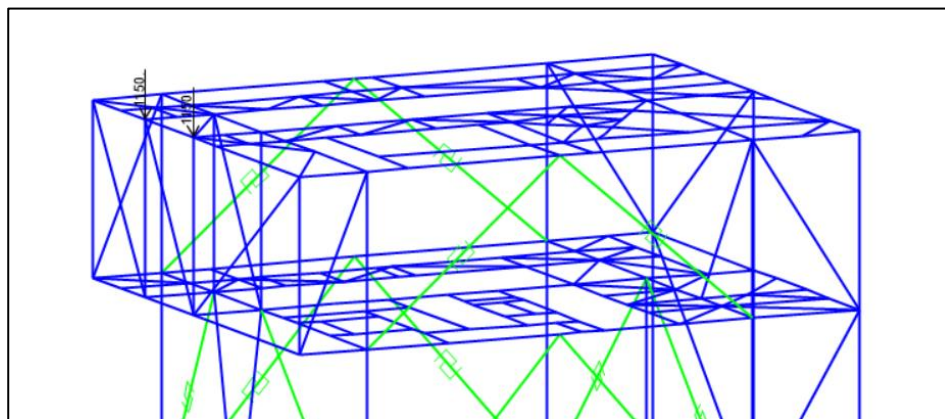
Sobrecarga correa G11:

Figura B-16: Asignación sobrecarga correa G11

ANEXO C : SELECCIÓN Y ESCALAMIENTO DE REGISTROS

El presente anexo es un extracto de la información entregada por el estudiante de doctorado Marco Gallegos, quien proporcionó los archivos *Selection.xlsx* y *Set_SF5.mat* con 11 registros en ambas direcciones, así como sus espectros asociados, para suelos tipo C, D y E. Los registros seleccionados se indican en la Tabla C-1.

Tabla C-1: Registros seleccionados para el análisis

ID	Nombre	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Estación
1	20010707_7.2Mw_17.53S_72.07W_33KM	7.2	33.0	ARICA CHACALLUTA
2	20071114_7.7Mw_22.24S_70.07W_39KM	7.7	39.0	SAN PEDRO DE ATACAMA
3	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	8.8	30.0	MATANZAS
4	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	8.8	30.0	VALP06R
5	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	8.8	30.0	VINA DEL MAR CENTRO
6	20140823_6.4Mw_32.74S_71.5W_40KM	6.4	40.0	R13M
7	20150916_7.6Mw_31.59S_71.79W_16KM	7.6	16.0	R13M
8	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	8.4	11.0	V09A
9	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	8.4	11.0	GO04
10	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	8.4	11.0	R13M
11	20161225_7.6Mw_43.52S_74.39W_30KM	7.6	30.0	L05L

Los espectros asociados a dichos registros se escalaron a la ordenada espectral del espectro objetivo mostrado en la Figura III-9 para un periodo de $T = 0.45$ s mediante la ecuación (C.1).

$$f_i = \frac{S_{objetivo}(0.45)}{S_a(0.45)} \quad (C.1)$$

Donde:

f_i : Factor de escala para el espectro i .

$S_{objetivo}$: Ordenada espectral del espectro objetivo para $T = 0.45$ s.

S_a : Ordenada espectral del espectro i para $T = 0.45$ s.

Obteniendo los factores de escala indicados en la Tabla C.2.

Tabla C-2: Factores de escala obtenidos

ID	Nombre	f
1	20010707_7.2Mw_17.53S_72.07W_33KM	6.0711
2	20071114_7.7Mw_22.24S_70.07W_39KM	6.7986
3	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	0.7630
4	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	1.6623
5	20100227_8.8Mw_36.10S_73.08W_30KM	1.3048
6	20140823_6.4Mw_32.74S_71.5W_40KM	3.7502
7	20150916_7.6Mw_31.59S_71.79W_16KM	3.7222
8	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	5.8355
9	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	1.4235
10	20150916_8.4Mw_31.55S_71.86W_11KM	2.5955
11	20161225_7.6Mw_43.52S_74.39W_30KM	4.2726

Los espectros escalados al sismo máximo posible (SMP) se indican en las Figuras C-1 a C-11.

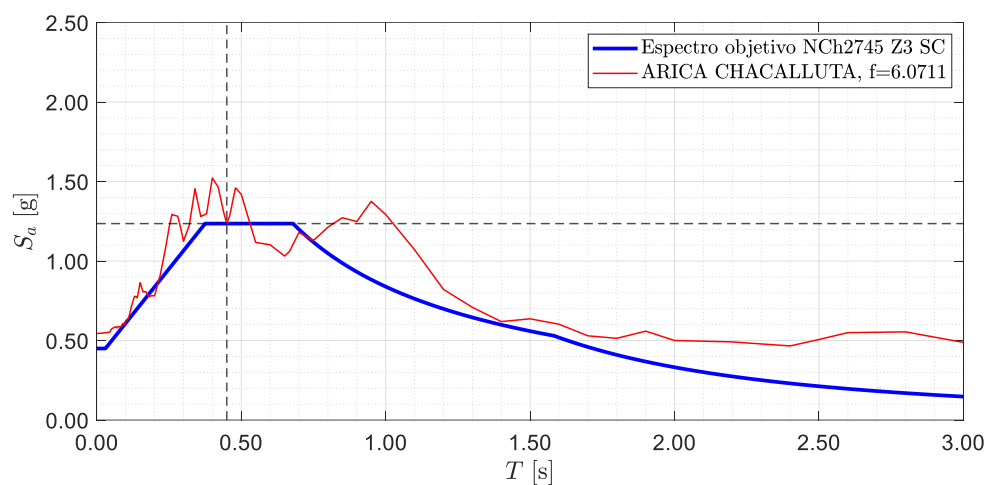


Figura C-1: Espectro de registro “ARICA CHACALLUTA” escalado al SMP

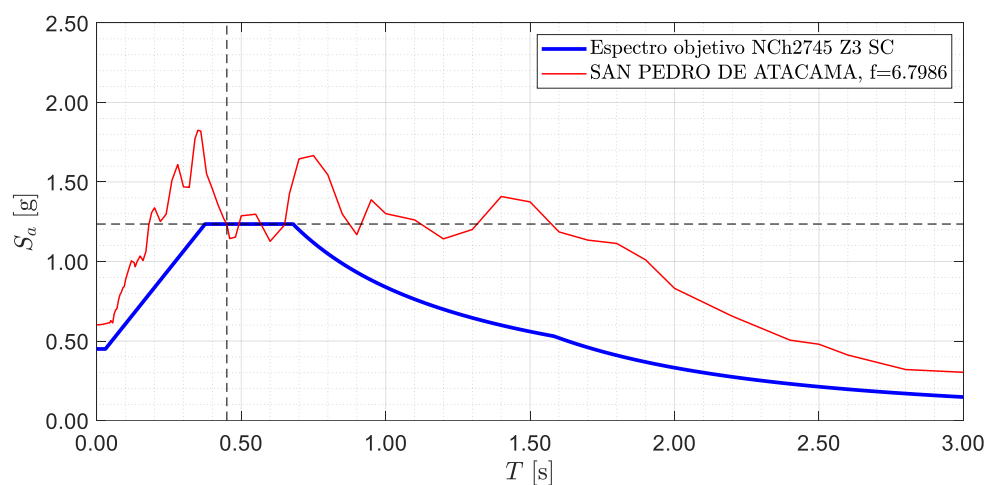


Figura C-2: Espectro de registro “SAN PEDRO DE ATACAMA” escalado al SMP

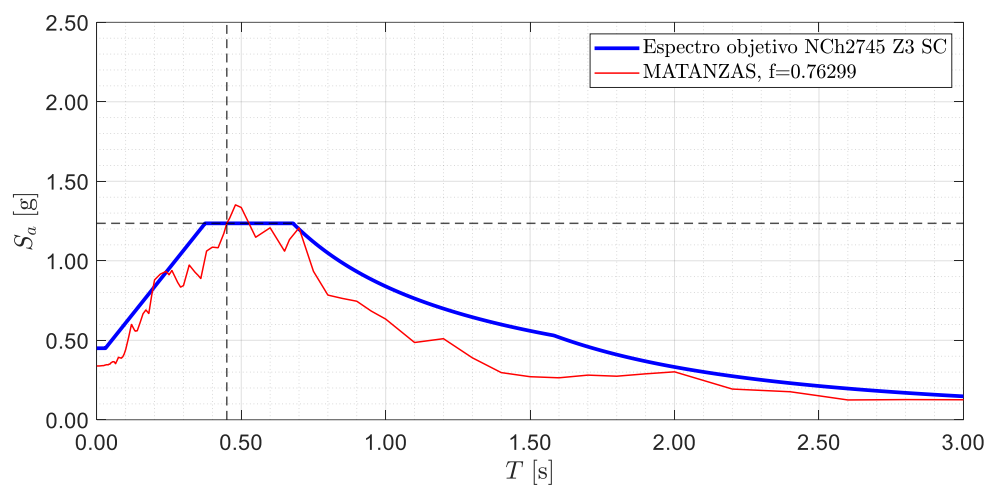


Figura C-3: Espectro de registro “MATANZAS” escalado al SMP

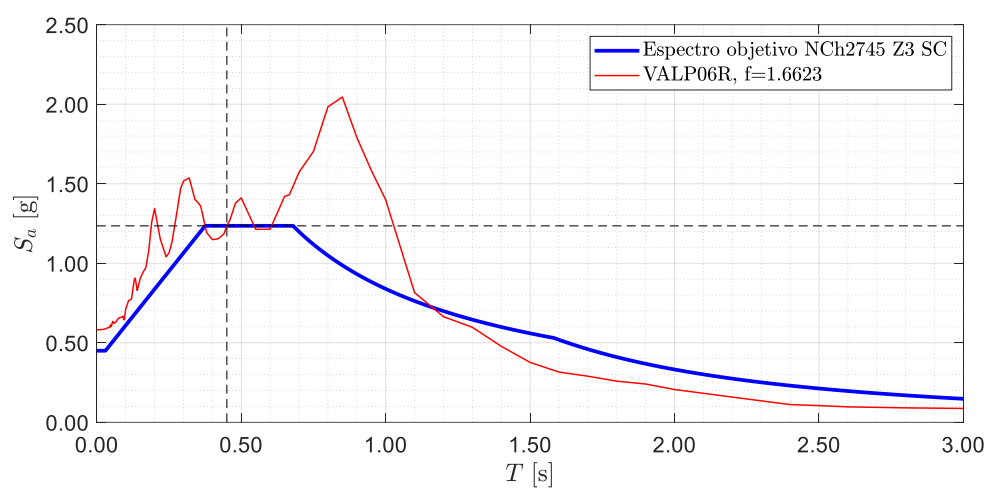


Figura C-4: Espectro de registro “VALP06R” escalado al SMP

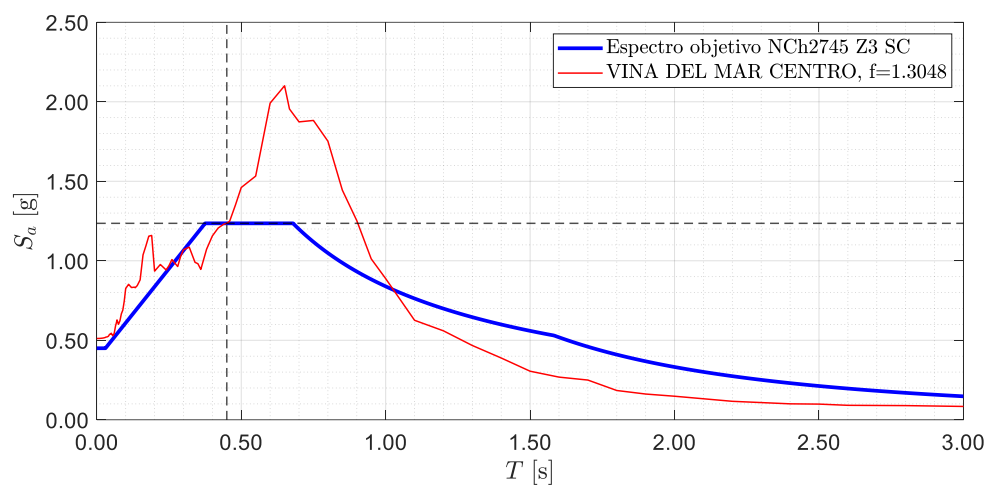


Figura C-5: Espectro de registro “VIÑA DEL MAR CENTRO” escalado al SMP

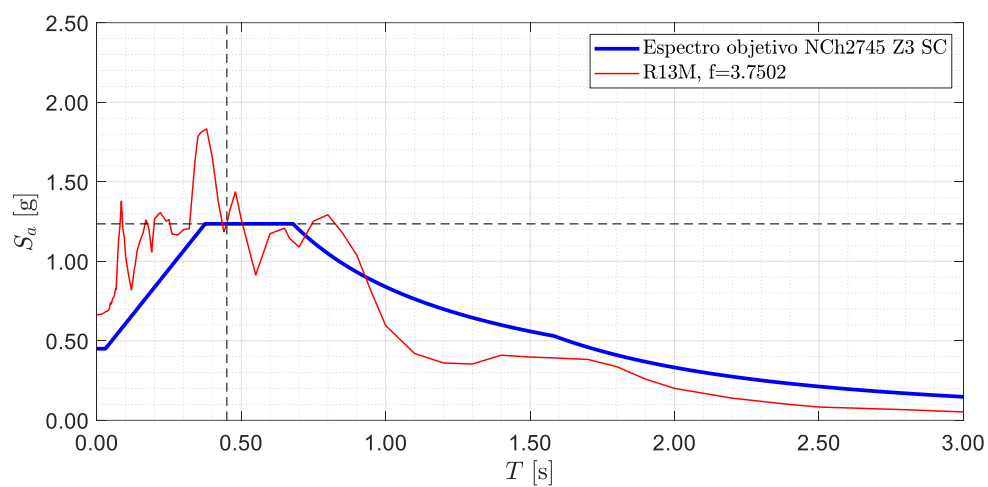


Figura C-6: Espectro de registro “R13M” escalado al SMP

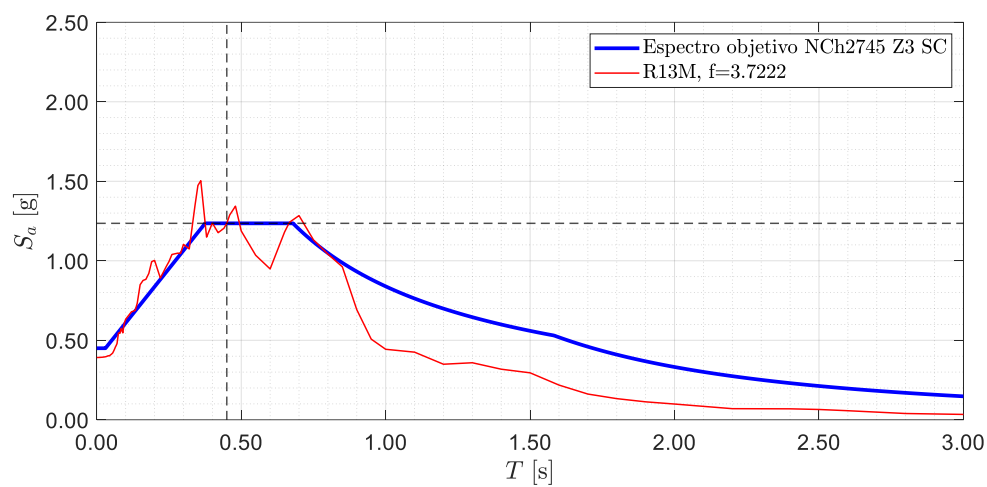


Figura C-7: Espectro de registro “R13M” escalado al SMP

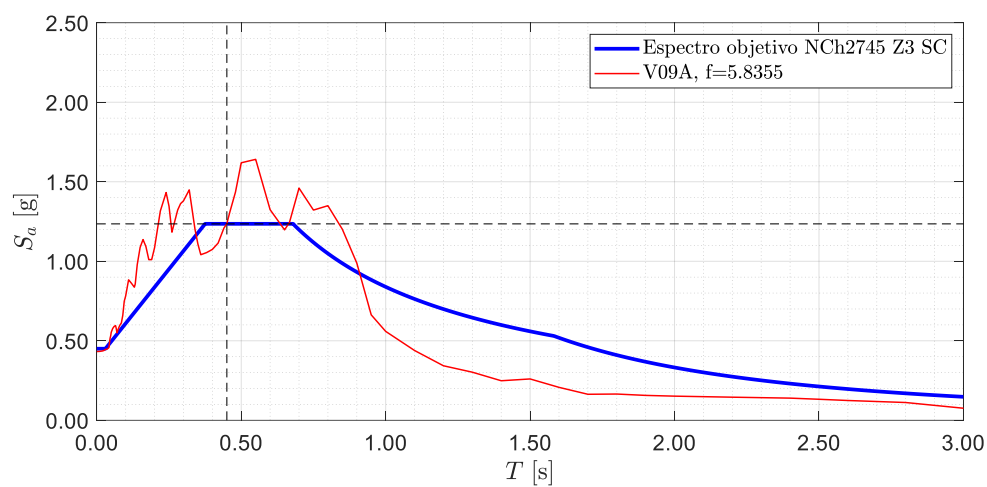


Figura C-8: Espectro de registro “V09A” escalado al SMP

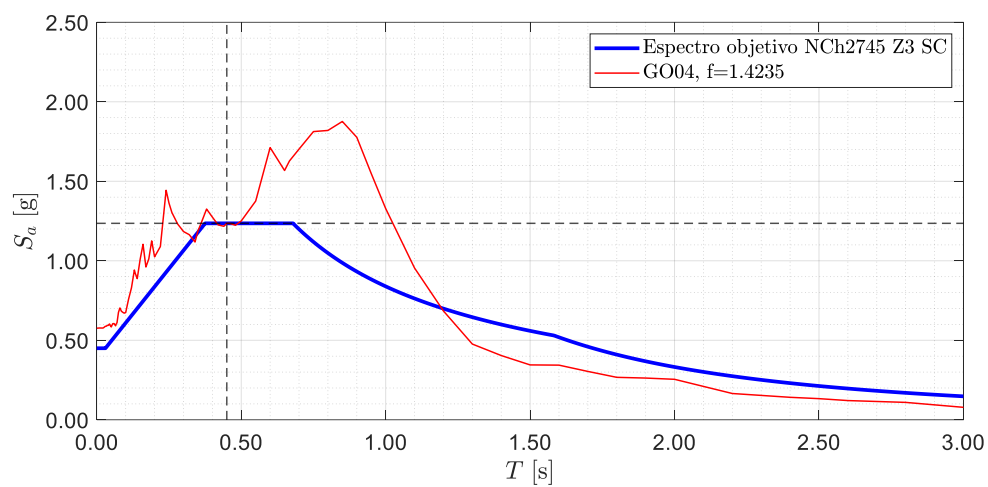


Figura C-9: Espectro de registro “GO04” escalado al SMP

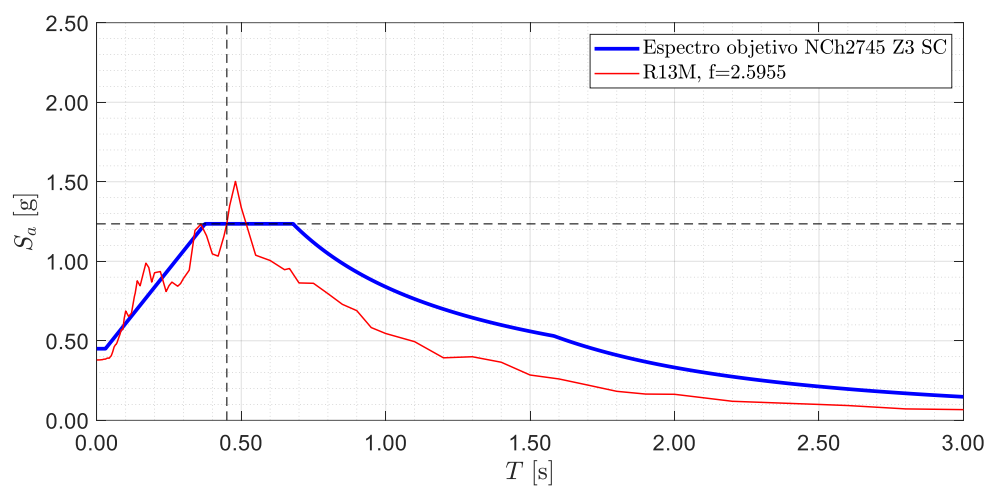


Figura C-10: Espectro de registro “R13M” escalado al SMP

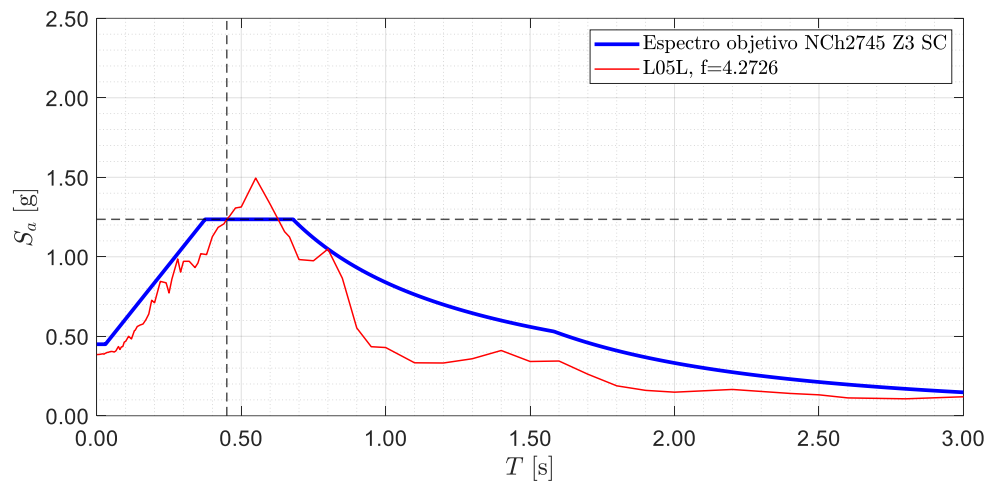


Figura C-11: Espectro de registro “L05L” escalado al SMP

Finalmente, dichos factores de escala se aplicaron a los registros recibidos para luego ingresarlos a SAP2000. El algoritmo elaborado para el escalamiento de los registros se muestra en el siguiente extracto MATLAB.

```
% Escalamiento de Espectros
% Mauricio Ormeno
% Unidades: g, s

close all
clear
clc

g=981;           % [cm/s2]
T1=0.45;         % Periodo en [s] para el escalamiento de espectros

% 1. Input
load('EspectroNCh2745Zona3SueloC.txt')
load('Set_SF5.mat')
Tesp=EspectroNCh2745Zona3SueloC(:,1);
Saesp=EspectroNCh2745Zona3SueloC(:,2);
posTesp=find(Tesp==T1);
posT=find(T==T1);

% 2. Ploteo espectro objetivo y espectros escalados (todos)
figure
plot(Tesp,Saesp/g,'color','blue','linewidth',2.5)
set(gca,'FontSize',11)
```

```

xlabel('$T \; \rm{[s]}$', 'FontSize',14, 'interpreter','latex');
ylabel('$S_a \; \rm{[g]}$', 'FontSize',14, 'interpreter','latex');
xtickformat('%.2f')
ytickformat('%.2f')
grid on
grid minor
axis([0 3 0 2.5])
fig=gcf;
fig.Position(3:4)=[1000,450];
xline(T1, '--', 'color', 'black', 'linewidth',1)
yline(Saesp(posTesp)/g, '--', 'color', 'black', 'linewidth',1)
hold on
% Escalamiento
f=zeros(height(PSa),1);
for i=1:height(PSa)
    f(i)=(Saesp(posTesp)/g)/PSa(i,posT);
    plot(T,PSa(i,:)*f(i), 'linewidth',0.5)
    if string(info(i,3))=="R13M"
        writematrix(cell2mat(agc1(i)).*f(i),strcat(string(info(i,3)), " X
",string(i)), 'Delimiter', '\t')
        writematrix(cell2mat(agc2(i)).*f(i),strcat(string(info(i,3)), " Y
",string(i)), 'Delimiter', '\t')
    else
        writematrix(cell2mat(agc1(i)).*f(i),strcat(string(info(i,3)), "
X"), 'Delimiter', '\t')
        writematrix(cell2mat(agc2(i)).*f(i),strcat(string(info(i,3)), "
Y"), 'Delimiter', '\t')
    end
end
l=strcat(string(info(:,3)), ", f=", string(f));
legend({'Espectro objetivo Nch2745 Z3
SC', '', '', l(1), l(2), l(3), l(4), l(5), l(6), l(7), l(8), l(9), l(10), l(11)}, 'interpreter','latex', '
location','northeast')

```