

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS:

**COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE
FLEXOCOMPRESIÓN BIAIXIAL DE COLUMNAS Y MUROS DE CORTE AL USAR
LOS PROGRAMAS SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y UN PROGRAMA DE
ELABORACIÓN PROPIA.**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bach. LEÓN VALLEJOS, MUCIO FIDEL

ASESOR:

Dr. Ing. HERMES ROBERTO MOSQUEIRA RAMIREZ

CAJAMARCA-PERU

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: LEÓN VALLEJOS, MUCIO FIDEL
2. DNI: 72174334
3. Escuela Profesional: Ingeniería Civil
4. Asesor: Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramirez
Facultad: Ingeniería
5. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
6. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
7. Título de Trabajo de Investigación: "COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS Y MUROS DE CORTE AL USAR LOS PROGRAMAS SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y UN PROGRAMA DE ELABORACIÓN PROPIA"
8. Fecha de evaluación: 24 de Febrero 2026
9. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
10. Porcentaje de Informe de Similitud: 6%
11. Código Documento: trn:oid:::3117:560190927
12. Resultado de la Evaluación de Similitud: 6%
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 24 de Febrero 2026



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos Hermes Roberto Mosqueira Ramirez
DNI: 26673916



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 24/02/2026 08:40:12-0500

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° 0097-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por 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 **cuatro días del mes de marzo de 2026**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal : Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.
Secretario : M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis **COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS Y MUROS DE CORTE AL USAR LOS PROGRAMAS SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS Y UN PROGRAMA DE ELABORACIÓN PROPIA**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil **MUCIO FIDEL LEÓN VALLEJOS**, asesorado por el Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez, 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 : 6 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 12 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS. Dieciocho (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de 18 (Dieciocho) acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10:25 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Presidente

Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.
Vocal

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

Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Asesor

COPYRIGHT © 2026 by
MUCIO FIDEL LEÓN VALLEJOS
Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su infinita misericordia, por su protección en momentos de adversidad y por reforzar mi fe correspondiendo a mi lucha diaria.

A mi asesor el Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez, por brindarme su apoyo, tiempo y experiencia invaluable durante la elaboración de esta tesis de investigación.

Al jurado de la presente tesis: Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas, Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo, M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares, Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez, por sus observaciones y recomendaciones.

Agradezco a mi padre por formarme en el razonamiento crítico y riguroso, y enseñarme las costuras del mundo matemático y abstracto.

A mi hermana por compartir siempre las metas familiares y por su cariño incondicional.

A mi tío ing. Aníbal Darío León Balladares por su confianza en mis capacidades y apoyo constante, antes y durante esta investigación.

A mi compañera sentimental, Amalia Lizeth Rojas Gutiérrez, que se mantuvo firme en todos los altos y bajos de mi régimen estricto de investigación.

A mis familiares todos que de manera directa o indirecta hicieron posible la culminación de este estudio, contribuyendo circunstancialmente al equilibrio de mi familia.

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre por enseñarme la esperanza, la voluntad infinita, lo valiente de las convicciones, la disciplina que sigue a las caídas, por estar a mi lado cada momento de mi vida, en cada revés y en cada acierto, por hacer de mis sueños los suyos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Formulación del Problema.....	2
1.3. Hipótesis General.....	2
1.4. Justificación de la Investigación	2
1.5. Alcances y Delimitaciones de la Investigación	2
1.6. Limitaciones.....	4
1.7. Objetivos	5
1.8. Organización de la Investigación.....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes Teóricos	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales	9
2.1.3. Antecedentes Locales.....	10
2.2. Bases Teóricas.....	11
2.2.1. Características de la Resistencia a Flexión y a Carga Axial	11
2.2.2. Propiedades de los Materiales.....	18
2.2.3. Límites de Refuerzo Para Columnas y Muros de Corte (ACI 318-25).....	20
2.2.4. Flexocompresión Biaxial	24
2.2.5. Diagrama de Interacción	25
2.2.6. Ecuaciones de Equilibrio Para Flexión Uniaxial	28

2.2.7.	Compatibilidad de Deformaciones	29
2.2.8.	Método del Polígono Cerrado	30
2.2.9.	Centro de Reducción.....	30
2.2.10.	Softwares Estructurales.....	32
2.2.11.	Control de la Zona de Transición Para Secciones de Muros con Alas.....	34
2.2.12.	Cálculo del Error Relativo	35
2.3.	Definiciones de Términos Básicos.....	37
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS		39
3.1.	Ubicación Geográfica	39
3.2.	Periodo de Estudio	39
3.3.	Materiales.....	40
3.4.	Instrumentos.....	41
3.5.	Tipo, Nivel y Diseño de Investigación.....	41
3.5.1.	Tipo de Investigación.....	41
3.5.2.	Nivel de Investigación	42
3.5.3.	Diseño de Investigación.....	42
3.6.	Población y Muestra	42
3.6.1.	Población.....	42
3.6.2.	Muestra	42
3.7.	Unidad de Análisis	43
3.8.	Variable	43
3.9.	Métodos de Investigación	43
3.9.1.	Método Hipotético – Deductivo.....	43
3.9.2.	Método Comparativo	43
3.9.3.	Método Computacional.....	43
3.9.4.	Método Analítico-Sintético	44
3.10.	Procedimientos y Recolección de Datos.....	44
3.10.1.	Recolección de Datos de Casos de Estudio	45
3.11.	Tratamiento, Análisis de Datos y Resultados.....	99
3.11.1.	Tratamiento de Datos	99

3.11.2. Resultados	101
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	162
4.1. Análisis y Discusión de Resultados	167
4.2. Corroboración de Hipótesis	168
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	167
5.1. Conclusiones	167
5.2. Recomendaciones	168
REFERENCIAS.....	169
ANEXOS.....	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de β_1 según el ACI 318-25.	18
Tabla 2 Factor de Reducción de Resistencia ϕ Según ACI 318-25.	35
Tabla 3 Bibliotecas de Python Usadas para Programación.....	40
Tabla 4 Coordenadas de Esquinas del Modelo C1-(30X30).....	45
Tabla 5 Coordenadas de Barras de Acero del Modelo C1-(30X30).	46
Tabla 6 Archivos de Recolección de Datos del Modelo C2.	82
Tabla 7 Archivos de Recolección de Datos del Modelo C3.	84
Tabla 8 Archivos de Recolección de Datos del Modelo C4.	86
Tabla 9 Archivos de Recolección de Datos del Modelo C5.	88
Tabla 10 Archivos de Recolección de Datos del Modelo C6.	90
Tabla 11 Archivos de Recolección de Datos del Modelo M1.	92
Tabla 12 Archivos de Recolección de Datos del Modelo M2.	94
Tabla 13 Archivos de Recolección de Datos del Modelo M3.	96
Tabla 14 Archivos de Recolección de Datos del Modelo M4.	98
Tabla 15 Resumen de Variaciones Máximas por Modelo y por Software	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curvas Carga Axial-Deformación para el Acero y Concreto de una Columna.	12
Figura 2 Curva Típica Esfuerzo-Deformación del Acero Bajo Carga Monotónica.	13
Figura 3 Diagrama de Esfuerzo-Deformación para el Acero de Refuerzo.....	14
Figura 4 Esfuerzos de Compresión en una Sección de Concreto Rectangular.....	15
Figura 5 Curvas Esfuerzo-Deformación en Cilindros de Concreto con Carga Axial.....	16
Figura 6 Análisis de Flexión según Chambaud	16
Figura 7 Diagrama Esfuerzo-Deformación en Flexión según Hognestad	17
Figura 8 Propiedades de Compresión del Concreto en la Resistencia a Flexión.....	17
Figura 9 Indicaciones de Espaciamiento en Columnas según ACI 318-25.....	21
Figura 10 Ubicaciones de Refuerzo Longitudinal para Secciones de Muro.....	23
Figura 11 Flexocompresión Uniaxial y Biaxial en una Sección de Columna	24
Figura 12 Falla en Compresión Pura	25
Figura 13 Condición de Compresión + $\sigma_s \approx 0$	26
Figura 14 Condición de Compresión + $\sigma_s = 0.5f_y$	26
Figura 15 Condición de Falla Balanceada	27
Figura 16 Puntos Notables de los Diagramas de Interacción Nominal y Reducido	27
Figura 17 Diagrama de Equilibrio de una Sección en Flexión Uniaxial	28
Figura 18 Conectividad de Bordes para Secciones Simples y Complejas.....	30
Figura 19 Centros de Reducción para una Sección Típica	31
Figura 20 Forma del Diagrama de Interacción de Diseño para un Muro Tipo T	35
Figura 21 Resultados Aplicando RMSE en Estudios Comparativos.....	36
Figura 22 Ubicación Departamental, Provincial y Distrital de Lugar del Estudio	39
Figura 23 Dimensiones Geométricas del Modelo C1-(30X30).....	45
Figura 24 Recubrimiento y Propiedades del Concreto y el Acero en DIMCOL.....	47
Figura 25 Creación de Sección Transversal de Concreto en DIMCOL	48
Figura 26 Confinamiento y Dimensiones de Barras de Acero en DIMCOL.....	49
Figura 27 Creación Manual de Barras de Acero en DIMCOL	49
Figura 28 Creación de Refuerzo de Esquinas en DIMCOL	50

Figura 29	Creación de Refuerzo de Intermedio y Centro de Reducción en DIMCOL	51
Figura 30	Creación de los Diagramas de Interacción 3D en DIMCOL.....	52
Figura 31	Exportación de los Diagramas de Interacción en DIMCOL	52
Figura 32	Datos Exportados del Diagrama de Interacción Nominal de DIMCOL	53
Figura 33	Datos Exportados del Diagrama de Interacción de Diseño de DIMCOL	53
Figura 34	Definición de las Propiedades de los Materiales en SAP2000.....	54
Figura 35	Configuración de Curvas y Normativa ACI en SAP2000.....	55
Figura 36	Creación de la Sección Transversal de Concreto en SAP2000	56
Figura 37	Definición de Barras de Acero y Refuerzo Longitudinal en SAP2000.....	57
Figura 38	Creación de los Diagramas de Interacción 3D en SAP2000	58
Figura 39	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de SAP2000.....	59
Figura 40	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de SAP2000	60
Figura 41	Definición de las Propiedades de los Materiales en ETABS	61
Figura 42	Configuración de Curvas y Normativa ACI en ETABS	62
Figura 43	Creación de Sección Transversal de Concreto en ETABS.....	63
Figura 44	Definición de Barras de Acero y Refuerzo Longitudinal en ETABS	64
Figura 45	Creación de los Diagramas de Interacción 3D en ETABS.....	65
Figura 46	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de ETABS	66
Figura 47	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de ETABS	67
Figura 48	Definición de Barras, Normativa y Materiales en CsiCOL.....	68
Figura 49	Creación de Sección Transversal de Concreto en CsiCOL	69
Figura 50	Creación de Refuerzo Longitudinal de la Sección en CsiCOL	70
Figura 51	Creación del Diagrama de Interacción Nominal en CsiCOL	71
Figura 52	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de CsiCOL.....	72
Figura 53	Creación del Diagrama de Interacción de Diseño en CsiCOL	73
Figura 54	Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de CsiCOL	74
Figura 55	Definición de Barras, Normativa y Materiales en SpCOLUMN	75
Figura 56	Creación de Sección Transversal de Concreto en SpCOLUMN.....	76
Figura 57	Creación de Refuerzo Longitudinal de la Sección en SpCOLUMN.....	77
Figura 58	Diagramas de Interacción Nominal y de Diseño en SpCOLUMN	78

Figura 59	Recolección de Datos - Diagrama de Interacción Nominal de SpCOLUMN.....	79
Figura 60	Recolección de Datos - Diagrama de Interacción de Diseño de SpCOLUMN.....	80
Figura 61	Dimensiones Geométricas del Modelo C2-(60X60X25)	81
Figura 62	Descripción Geométrica del Modelo de Columna C3-(60X60X25).....	83
Figura 63	Dimensiones Geométricas del Modelo C4-(70X70X25)	85
Figura 64	Dimensiones Geométricas del Modelo C5-(D40)	87
Figura 65	Dimensiones Geométricas del Modelo C6-(D80E25).....	89
Figura 66	Dimensiones Geométricas del Modelo M1-(200x200-35X35).....	91
Figura 67	Dimensiones Geométricas del Modelo M2-(140X140-35X35).....	93
Figura 68	Dimensiones Geométricas del Modelo M3-(135X135-35X35).....	95
Figura 69	Dimensiones Geométricas del Modelo M4-(160X30-45X45).....	97
Figura 70	Enfoque Comparativo de Resultados entre Softwares, por Modelo	99
Figura 71	Tratamiento de Uniformidad de Datos y Cálculo del Error Relativo.....	100
Figura 72	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C1	101
Figura 73	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C1	102
Figura 74	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C1	103
Figura 75	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C1	104
Figura 76	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C1	105
Figura 77	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C1.....	106
Figura 78	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C2.....	107
Figura 79	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C2.....	108
Figura 80	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C2.....	109
Figura 81	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C2.....	110
Figura 82	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C2.....	111
Figura 83	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C2.....	112
Figura 84	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C3.....	113
Figura 85	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C3.....	114
Figura 86	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C3.....	115
Figura 87	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C3.....	116
Figura 88	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C3.....	117

Figura 89	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C3.....	118
Figura 90	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C4.....	119
Figura 91	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C4.....	120
Figura 92	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C4.....	121
Figura 93	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C4.....	122
Figura 94	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C4.....	123
Figura 95	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C4.....	124
Figura 96	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C5.....	125
Figura 97	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C5.....	126
Figura 98	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C5.....	127
Figura 99	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C5.....	128
Figura 100	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C5.....	129
Figura 101	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C5.....	130
Figura 102	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C6.....	131
Figura 103	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C6.....	132
Figura 104	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C6.....	133
Figura 105	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C6.....	134
Figura 106	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C6.....	135
Figura 107	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C6.....	136
Figura 108	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M1	137
Figura 109	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M1	138
Figura 110	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M1	139
Figura 111	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M1	140
Figura 112	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M1	141
Figura 113	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M1.....	142
Figura 114	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M2	143
Figura 115	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M2	144
Figura 116	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M2	145
Figura 117	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M2	146
Figura 118	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M2	147

Figura 119	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M2.....	148
Figura 120	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M3	149
Figura 121	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M3	150
Figura 122	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M3	151
Figura 123	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M3	152
Figura 124	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M3	153
Figura 125	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M3.....	154
Figura 126	Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M4	155
Figura 127	Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M4	156
Figura 128	Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M4	157
Figura 129	Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M4	158
Figura 130	Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M4	159
Figura 131	Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M4.....	160
Figura 132	Factor de Reducción de Resistencia según Versiones del ACI.....	165
Figura 133	Variaciones en la Zona de Transición en DIMCOL.....	166
Figura 134	Algoritmo - Sección Arbitraria de Columna o Muro de Corte.....	174
Figura 135	Algoritmo - Parámetros Iniciales y Cálculo de Área de Sección Bruta	174
Figura 136	Algoritmo - Cálculo de Área Total de Acero y Centro de Reducción	175
Figura 137	Traslación o Cambio del Origen de Coordenadas.....	176
Figura 138	Algoritmo - Traslación del Origen al Centro de Reducción	176
Figura 139	Algoritmo – Determinación General del Diagrama de Interacción	177
Figura 140	Sistema Local Rotado para una Posición Específica del Eje Neutro	178
Figura 141	Alturas del Bloque de Compresión y Distribución de Puntos por Curva.....	178
Figura 142	Algoritmo – Cálculos por Grupos de Puntos de Curva de Interacción	179
Figura 143	Algoritmo - Bloque 5: Equilibrio de Fuerzas	180
Figura 144	Cálculo de los Valores de Carga Axial y Momentos de Diseño	181
Figura 145	Valores del Factor de Reducción de Resistencia, ϕ	181

RESUMEN

El presente estudio comparativo surge de la necesidad de cuantificar el problema de las variaciones excesivas entre diagramas de interacción obtenidos con diferentes algoritmos de programas computacionales, que inducen a diseños antieconómicos y podrían ser perjudiciales durante la acción sísmica, por lo que el objetivo planteado fue comparar los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte usando los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un programa de elaboración propia (DIMCOL), adoptándose un diseño no experimental, comparativo y transversal, y enfocándose en las mediciones sobre los valores de carga axial y de momento de diagramas de interacción de tipo nominal y de diseño de columnas y muros de corte de concreto armado, para lo cual se seleccionó una muestra de 10 secciones típicas: 6 para columnas (rectangular, L, T, cruz, circular y circular con agujero) y 4 para muros de corte (H, T, C e I), las que fueron modeladas en cada programa para condiciones equivalentes de geometría, normativa y materiales, obteniéndose como resultados gráficos comparativos de curvas de interacción y gráficos de barras de distribución de error para las variaciones porcentuales obtenidas con el cálculo del error relativo. Aplicando lo mencionado anteriormente, se logró comparar todos los diagramas de interacción para los casos de secciones consideradas usando SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, verificando que la variación máxima porcentual entre diagramas es inferior al 5%.

PALABRAS CLAVE: diagrama de interacción, flexocompresión biaxial, python, columna, muro de corte, estudio comparativo, ACI 318-25.

ABSTRACT

This comparative study arises from the need to quantify the problem of excessive variations between interaction diagrams obtained with different computer program algorithms, which lead to uneconomical designs and could be detrimental during seismic activity. Therefore, the objective was to compare the biaxial flexural-compression interaction diagrams of columns and shear walls using the programs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS, and a program developed in-house (DIMCOL). A non-experimental, comparative, and cross-sectional design was adopted, focusing on measurements of axial load and moment values from nominal and design interaction diagrams of reinforced concrete columns and shear walls. For this purpose, a sample of 10 typical sections was selected: 6 for columns (rectangular, L, T, cross, circular, and circular with a hole) and 4 for shear walls (H, T, C, and I). These were modeled in each program for equivalent conditions of geometry, regulations, and materials. The results obtained were comparative interaction curve graphs and error distribution bar charts for the percentage variations obtained from the relative error calculation. Applying the above mentioned, all interaction diagrams for the considered sections were compared using SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS, and DIMCOL, verifying that the maximum percentage variation between diagrams is less than 5%.

KEYWORDS: interaction diagram, biaxial flexural-compression, python, column, shear wall, comparative study, ACI 318-25.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

A nivel global, los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte son una propiedad inherente que expresa su capacidad de resistir cargas axiales y momentos flectores combinados en condiciones reales.

Debido a los problemas de inexactitud en la determinación de los diagramas de interacción con cálculos manuales, estos suelen ser determinados mediante programas de ordenador (Holan, 2019, p. 1). Existen muchos de estos programas, tanto comerciales como de licencia libre, que son usados por los ingenieros estructurales para caracterizar la capacidad resistente en columnas y muros de corte, sin embargo, debido a los diferentes algoritmos que se implementan en ellos se obtienen variaciones en sus resultados, como los mostrados por Batista (2020).

Las variaciones excesivas entre los diagramas de interacción en columnas y muros de corte al utilizar diferentes programas computacionales pueden afectar a las etapas posteriores de su diseño. Sobre esto, Benoy et al. (2025, p. 3) indica que al adoptar criterios conservadores subestimando las capacidades de flexión resulta en un diseño antieconómico, y además puede ser perjudicial durante la acción sísmica, ya que la capacidad de deformación posterior a la fluencia de los elementos estructurales con mayor relación de carga axial (P_u/P_{uz} , demanda y la capacidad de carga axial) es limitada. Variaciones menores al 5% en los resultados estructurales son consideradas aceptables para estudios comparativos entre soluciones computacionales (Symington, 2020).

Es por ello que, abordar las variaciones de los valores de capacidad de los diagramas de interacción resultantes a través de un estudio comparativo cuantitativo, entre diferentes softwares, permite mejorar el criterio ingenieril evitando malas decisiones en el diseño

estructural que puedan afectar a las características finales resistentes de columnas y muros de corte, cuyas fallas podrían conllevar el colapso total de una edificación.

1.2. Formulación del Problema

¿En cuánto varían los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un programa de elaboración propia?

1.3. Hipótesis General

La variación máxima en la comparación de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte es inferior al 5% al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un programa de elaboración propia.

1.4. Justificación de la Investigación

Se justifica desde una perspectiva teórica, por qué expande el conocimiento sobre la concordancia de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial para columnas y muros de corte obtenidos al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un programa de elaboración propia; contrastando sus valores resultantes bajo condiciones equivalentes de modelamiento para diversas geometrías y cuantificando discrepancias que estudios previos no han explorado en profundidad.

El aporte metodológico radica en su replicabilidad, porque permite a investigadores extender los procedimientos a otros casos, promoviendo el rigor ético y la reducción de sesgos.

1.5. Alcances y Delimitaciones de la Investigación

1.5.1. Alcances

La presente investigación se enmarca dentro de la etapa del diseño estructural, al abordar el estudio y la comparación de los diagramas de interacción de flexocompresión

biaxial, en lo referente a sus valores en capacidad de carga axial y de momentos, para dos tipos de elementos estructurales: columnas y muros de corte. El objetivo principal es comparar los diagramas de interacción de diferentes secciones de concreto armado y cuantificar sus máximas variaciones al usar los programas: SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y el programa de elaboración propia DIMCOL.

La investigación es de tipo aplicada y tiene un alcance descriptivo-comparativo. Se considera para condiciones de cálculo: un comportamiento elastoplástico en las relaciones esfuerzo – deformación del acero y una distribución rectangular de esfuerzos para el concreto en compresión. Para cuantificar las variaciones máximas de los diagramas de interacción, se aplicó el cálculo del error relativo entre valores de carga axial y de momento, tanto para las curvas nominales como para las de diseño. Los resultados fueron mostrados utilizando gráficos comparativos de curvas de interacción y gráficos de barras de distribución de error porcentual por curva y por puntos de curva, logrando el análisis completo de los diagramas de interacción para las secciones típicas planteadas.

1.5.2. Delimitaciones

El estudio tuvo un periodo de desarrollo entre los meses de abril y diciembre del 2025.

En lo que respecta a su contenido teórico, la investigación se encuentra delimitada al análisis espacial (3D) de los diagramas de interacción de secciones de concreto armado (columnas o muros de corte) para condiciones de compresión acompañadas de momentos en las direcciones X e Y, originados por la aplicación de cargas axiales excéntricas.

La selección de los modelos de estudio en la muestra ha sido intencional y no obedece a un criterio probabilístico, esto con el fin de asegurar que represente a las secciones típicas tratadas en libros de diseño de concreto armado reconocidos, tales como: Reinforced concrete structure, Park y Paulay (1988), Diseño de concreto reforzado, McCormac J. y Brown R.

(2018), Design of Concrete Structures, Darwin D. y Dolan C. (2021) y Reinforced Concrete Mechanics and Design, Wight J. (2022). La muestra se conforma de 6 columnas: 1 rectangular, 1 L, 1 T, 1 cruz, 1 circular, 1 circular hueca; y 4 muros de corte: 1 H, 1 T, 1 C, y 1 I.

Los modelos de sección cumplen con las siguientes disposiciones y características:

- Las secciones fueron definidas como tipo poligonal durante su modelamiento en todos los programas. Las geometrías circulares fueron modeladas con un total de 40 segmentos rectos para mayor aproximación de los arcos.
- Espesores ≥ 25 cm, despreciando efectos esbeltez y según lo dispuesto en el código ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b.
- Las columnas, según normativa, se plantean para cumplir con: $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).
- Los muros de corte, según normativa, se plantean para cumplir con: $h_w/l_w < 2.0$ y $l_w/b_w > 6.0$ (ACI 318-25 §18.10.1).
- El confinamiento es tipo “estribo” en todos los casos.

1.6. Limitaciones

- Limitación en técnicas y algoritmos:

El método del polígono cerrado y los algoritmos de cálculo del área comprimida, estudiados en la presente investigación, no permiten incluir efectos de segundo orden (esbeltez) como en el estudio de Ahmed (2021), u otras afectaciones de daño, como los considerados por Kim (2021) y Ryu et al. (2020), en donde si es necesario el uso de métodos con integración numérica y técnicas de mallado de elementos finitos.

- Limitación sobre casos especiales de sección:

Las variaciones porcentuales obtenidas en la presente investigación, sobre los diagramas de interacción para columnas y muros de corte, no pueden tomarse como valores esperados en estudios comparativos que incluyan secciones compuestas.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

- Comparar los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un programa de elaboración propia.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Realizar el modelamiento de las secciones de columnas y muros de corte, en todos los programas estructurales considerados por el estudio, bajo condiciones equivalentes de geometría, normativas y propiedades de materiales.
- Determinar los diagramas de interacción nominal y de diseño de flexocompresión biaxial, para cada sección de columna y muro de corte de la muestra, utilizando los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, bajo condiciones equivalentes de geometría, normativa, y propiedades de materiales.
- Calcular e interpretar la variación de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte obtenidos con los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, aplicando el cálculo del error relativo.

1.8. Organización de la Investigación

A continuación, se realizará una descripción del desarrollo de cada capítulo:

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN. Este capítulo se compone de: el planteamiento de problema, la formulación del problema, hipótesis, justificación de la investigación, alcances, limitaciones, objetivos y la organización de la investigación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO. En este capítulo se describen los antecedentes teóricos, bases teóricas y definición de términos básicos.

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS. Este capítulo expone la ubicación geográfica del estudio, y presenta los aspectos metodológicos indicando: materiales, tipo, nivel y diseño de investigación, población y muestra, unidad de análisis, técnicas e instrumentos de recolección de datos, análisis y tratamiento de datos, y presentación de resultados.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. En este capítulo se describen y discuten los resultados obtenidos según los objetivos planteados y se los contrasta con los datos de la literatura y antecedentes teóricos. En este estudio comparativo, se discuten las variaciones porcentuales y se las interpreta de acuerdo a la base teórica.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. Se describen las conclusiones derivadas de los resultados para cada objetivo planteado, y se plantean recomendaciones para seguir ampliando los conocimientos sobre el problema de investigación.

REFERENCIAS

ANEXOS

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Bassantes (2018), en su investigación titulada: “Desarrollo de un programa interactivo para el cálculo y diseño de columnas aplicando el software Matlab”, realizada en la Universidad Técnica de Ambato – Ecuador, desarrolló un programa en Matlab para la creación de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial y el diseño de refuerzo. Abordó el estudio de 2 ejemplos de columna: 1 rectangular, 1 circular, concluyendo que los resultados obtenidos entre el cálculo manual y el programa desarrollado son menores al 5%.

Al-Ansari y Afzal (2019), en su investigación titulada: “Mathcad: Teaching and learning tool for biaxial reinforced column design” [Mathcad: Herramienta de enseñanza y aprendizaje para el diseño de columnas reforzadas biaxiales], realizada en la Universidad de Catar – ciudad Doha, comparó los valores de carga axial de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial obtenidos con un programa desarrollado en Mathcad y el software SpCOLUMN, para 1 ejemplo de columna rectangular. De los valores en las tablas, se comprobó un máximo error relativo de 6.18%, concluyendo el autor que tiene una buena concordancia.

Batista (2020), en su investigación titulada: “Diagramas de interacción de columnas con flexocompresión biaxial”, realizada en la Universidad de Matanzas – sede “Camilo Cienfuegos” – Cuba, comparó los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de 4 columnas de sección cuadrada: C30x30, C40x40, C45x45, C50x50, obtenidos con un software desarrollado en Matlab respecto a los softwares SE: Column y Cubecut C2SBeton. Se obtuvo variaciones respecto a valores de carga axial y de momento con las normativas ACI 318M-08, ACI 318-11, ASHTO LRFD, CSA-A23.3-04. De las tablas de resultados, las variaciones máximas, para carga axial y momentos, que se obtuvieron bajo la normativa ACI fueron 6.72% y 12.65%, concluyendo que los resultados son satisfactorios.

Muñoz (2020), en su investigación titulada: “Diagramas de interacción de columnas circulares mediante el software DIIN”, realizada en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla – México, desarrolló el módulo del software DIIN orientado a la obtención de los diagramas de interacción de flexocompresión y diseño de columnas con sección circular, y comparó gráficamente una curva del diagrama de interacción nominal entre los softwares DIIN y SAP2000 bajo los códigos ACI 318-14 y ACI 318-19, respectivamente. Aunque no se cuantifican errores, se concluye que se logra una considerable solución sobre los resultados.

Cedeño (2021), en su investigación titulada: “Análisis de las curvas de interacción en flexocompresión del código ACI 318-19”, realizada en la Pontificia Universidad Católica de Chile, comparó las curvas de interacción de flexocompresión para 3 casos de sección (1 columnas cuadrada, 1 muro rectangular, y un muro tipo T), haciendo variar valores de cuantía del 1% al 6%, resistencias de acero de $f_y = 420, 550$ y 690 MPa, así como variaciones en la longitud del ala para muros de corte. También realizó una comparación gráfica de los diagramas entre ETABS, SpCOLUMN y el software de desarrollo propio en Matlab, concluyendo que, a diferencia de las columnas, en el muro tipo T se genera una punta de sobre resistencia axial, debido a la cercanía entre puntos en la zona de transición de las curvas nominales; además agrega que los programas comerciales suavizan estas puntas al alargar esta zona.

Thien y Tung (2021), en su investigación titulada: "Design interaction diagrams for reinforced concrete circular columns following ACI 319-19" [Diagramas de interacción de diseño para columnas circulares de hormigón armado según ACI 319-19], desarrollada en la Universidad Tecnológica de la Ciudad de Ho Chi Minh – Vietnam, describió un procedimiento para la generación de diagramas de interacción de columnas con sección circular y refuerzo uniformemente distribuido bajo la Normativa ACI 318-19. La implementación del algoritmo se realizó en lenguaje de Mathcad. Se concluyó tener resultados similares respecto al software SP-Column, aunque no se presenta una cuantificación del error.

Kim (2022), en su investigación titulada: “Estimating interaction diagrams for arbitrarily shaped concrete sections by interpolating stationary points” [Estimación de diagramas de interacción para secciones de hormigón de forma arbitraria mediante la interpolación de puntos estacionarios], desarrollada en la Universidad Konkuk – Corea, desarrolló un nuevo método para generar diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de secciones arbitrarias; a partir de 6 puntos estacionarios obtenidos mediante optimización no lineal sin restricciones e interpolaciones en meridianos y paralelos. Comparó sus resultados con soluciones analíticas, concluyendo que para secciones cuadradas las variaciones son menores al 5%, y mayores a este para secciones irregulares de tipo T, L, C, G y B.

Susetyo et al. (2025), en su investigación titulada: “Interaction diagram of hollow-crossed reinforced concrete columns undergoing biaxial bending using the closed polygon method” [Diagrama de interacción de columnas de concreto armado de secciones huecas sometidas a flexión biaxial mediante el método del polígono cerrado], realizada en la Universidad Jenderal Soedirman – Indonesia, comparó los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial para una sección única de columna poligonal hueca, obtenidos con los programas PCA-COL y el programa de elaboración propia INDCOL. Se aplicó el método del polígono cerrado y la compatibilidad de deformaciones para 3 inclinaciones de eje neutro (0° , 30° y 45°). Concluyó en una alta precisión del método, al obtener 0.003% y 5% como máximas variaciones para carga axial y momento, al aplicar la métrica NMSE (Error Cuadrático medio Normalizado).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Espinoza (2019), en su investigación titulada: “Ductilidad en muros de corte y comportamiento a flexocompresión mediante, diagrama de interacciones en edificación “Marbella”, Jesús María, Lima-2019”, realizada en la Universidad César Vallejo – sede Lima, abordó el estudio del comportamiento a flexocompresión de muros de sección tipo: rectangular,

L, C e I, a partir de la generación de diagramas de interacción en excel con datos de ETABS. Concluyó que la capacidad a flexocompresión de los diagramas de interacción se ve afectada por su ductilidad y rigidez; sin embargo, no realiza una comprobación de los diagramas respecto a otros softwares.

Atao (2020), en su investigación titulada: " Comportamiento en Flexocompresión de Columnas y Muros Estructurales de Concreto Armado: Estado del Arte", realizada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, abordó el análisis de secciones de columna: cuadrada y circular; y muros de sección T y rectangular, haciendo uso de los diagramas de interacción de flexocompresión. Concluyó con la presentación de subrutinas en Mathcad para la obtención de diagramas de interacción de secciones rectangulares y poligonales; sin embargo, no hizo una verificación de los diagramas resultantes respecto a otros softwares.

Apaza (2024), en su investigación titulada: “Diseño Estructural Automatizado y Paramétrico de Viviendas de Bajo Costo, Mediante el Uso De Algoritmos De Programación Visual, Cusco – Perú, 2019”, realizada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, comparó diferentes algoritmos de automatización para diseño con ETABS, Python y Mathcad, para columnas cuadradas simétricas, y verificó las combinaciones de diseño obtenidas de ETABS. Concluyó en un algoritmo para la obtención de diagramas de interacción de flexocompresión para columnas en Mathcad; sin embargo, no se hace una comparación respecto a ETABS.

2.1.3. Antecedentes Locales

Garay (2022), en su investigación titulada: “Comparación de la respuesta estructural de la edificación del Módulo "B" de la Institución Educativa Cesar Vallejo - Hualgayoc - Cajamarca al utilizar los Software SAP2000 y Robot Structural”, realizada en la Universidad Privada del Norte – sede Cajamarca, comparó los valores de la respuesta estructural de un módulo educativo de 2 niveles, para secciones de columna tipo L, T y cuadrada entre SAP2000

y Robot Structural, concluyendo que la variación máxima entre los resultados de ambos softwares no es mayor al 5%, sin embargo no cuantifica las variaciones sobre columnas en flexocompresión biaxial.

Sánchez (2022), en su investigación titulada: “Determinar la respuesta estructural del Módulo “I” de la I.E.P. Alfonso Villanueva Pinillos, de la Ciudad de Jaén al ser analizado con los softwares Robot Structural Analysis Professional y ETABS”, realizada en la Universidad Nacional de Cajamarca, comparó los valores de la respuesta estructural de un módulo educativo de 2 niveles, para secciones de columna tipo L, T y cuadrada entre Robot Structural y ETABS, concluyendo que la variación promedio en columnas en flexocompresión biaxial fue del 2.45% para valores de capacidad de carga axial, y de 3.6% para capacidad de momentos.

Rodríguez (2023), en su investigación titulada: “Comparación del proyecto estructural de un hotel de 8 niveles utilizando ETABS y Robot SAP”, realizada en la Universidad Nacional de Cajamarca, comparó los valores de la respuesta estructural de un edificio de Hotel de 8 niveles que consta de columnas cuadradas y muros de corte tipo L, C y rectangular, entre ETABS y Robot Structural, concluyendo que para elementos en estado de flexocompresión biaxial las variaciones promedio en capacidad axial fue de 1.102% mientras que para momentos biaxiales se obtuvo un 0.221%.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Características de la Resistencia a Flexión y a Carga Axial

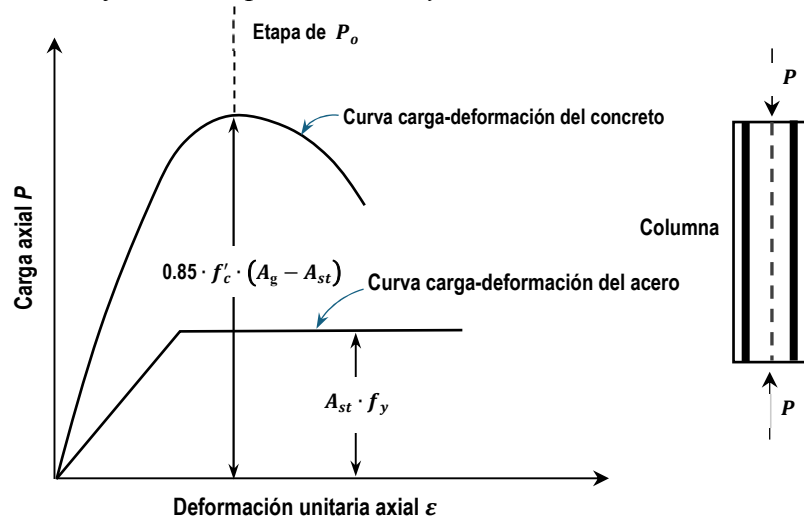
2.2.1.1. Comportamiento a Carga Axial

Cuando un elemento de concreto reforzado con acero de cedencia normal es sometido axialmente a una carga P , y esta carga se aumenta progresivamente, sucede que de los dos materiales, el primero en llegar a su resistencia de cedencia es el acero, como se indica en la Figura 1, y para el caso de aceros de alta resistencia, aunque el concreto llegaría a su resistencia

antes que el acero, las altas deformaciones producidas en el concreto inducirían al acero a alcanzar su resistencia de cedencia (Park y Paulay, 1988, pp. 123).

Figura 1

Curvas Carga Axial-Deformación para el Acero y Concreto de una Columna.



Nota. “Estructuras de concreto reforzado”, (p. 125), por Park y Paulay, 1988.

Las conclusiones a las que llegan Park y Paulay (1988) sobre el comportamiento de un elemento de concreto reforzado cargado axialmente, son las siguientes:

1. La carga última es la suma del aporte de resistencia del concreto y el acero, ambos trabajando juntos.
2. Para un elemento de concreto reforzado con estribos, la carga última se define con la siguiente ecuación:

$$P_u = 0.85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \quad (1)$$

3. Para un elemento de concreto reforzado con espirales, la carga última se define con la ecuación siguiente:

$$P_u = \left(0.85 \cdot f'_c + 8.2 \cdot \frac{f_y \cdot A_{sp}}{d_s \cdot s} \right) \cdot A_{cc} + f_y \cdot A_{st} \quad (2)$$

Donde:

f_y = resistencia de cedencia o fluencia.

d_s = diámetro de la hélice.

A_{sp} = área de la varilla helicoidal.

s = paso de la hélice.

A_{cc} = área del concreto en el núcleo de la columna.

2.2.1.2. Suposiciones de la Resistencia a Flexión

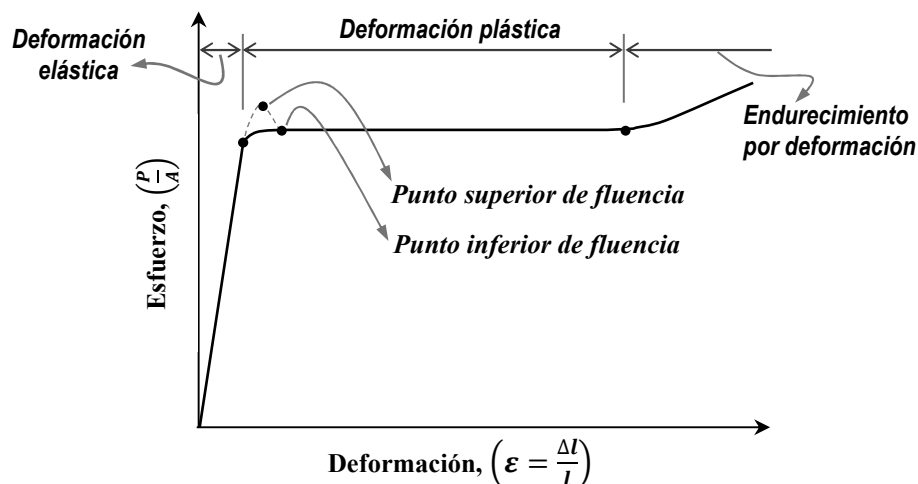
Park y Paulay (1988), basados en los estudios de Hognestad y la PCA (Portland Cement Association), indican que la teoría general de la resistencia a flexión de miembros de concreto reforzado debe contemplar cuatro supuestos:

1. Las secciones del elemento de concreto reforzado permanecerán planas antes y después de la flexión (Teoría de vigas de Euler-Bernoulli).
2. La curva esfuerzo-deformación para el acero es conocida (*Modelo Bilineal*).
3. Se desprecian los esfuerzos de tensión por debajo del eje neutro.
4. La curva esfuerzo-deformación del concreto es conocida (*Curva de Hognestad*)

2.2.1.3. Curva Esfuerzo-Deformación del Acero

Figura 2

Curva Típica Esfuerzo-Deformación del Acero Bajo Carga Monotónica.



Es aquella generada en un ensayo de carga monotónica para una barra de acero. Un ensayo monotónico es un tipo de ensayo en el que la carga va aumentando de cero hasta la rotura sin producirse descargas (Colino, 2025). La forma de una curva típica de esfuerzo-

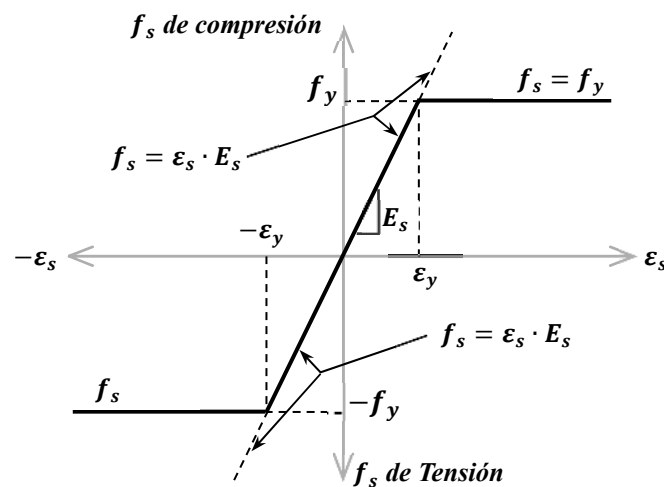
deformación para una barra de acero es mostrada en la Figura 2; sin embargo, para el presente estudio se adoptará la forma idealizada de esta curva real que se muestra en la Figura 3, en donde se ignora el punto superior de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación.

Esta curva idealizada del esfuerzo-deformación del acero es la que adopta la actual norma del ACI 318-25, y queda implícitamente enunciada su Ítem 20.2.2.1 de Propiedades de Diseño como:

Para barras y alambres no preesforzados, la tensión inferior a f_y será igual a E_s multiplicada por la deformación del acero. Para deformaciones superiores a la correspondiente a f_y , la tensión se considerará independiente de la deformación e igual a f_y .

Figura 3

Diagrama de Esfuerzo-Deformación para el Acero de Refuerzo.



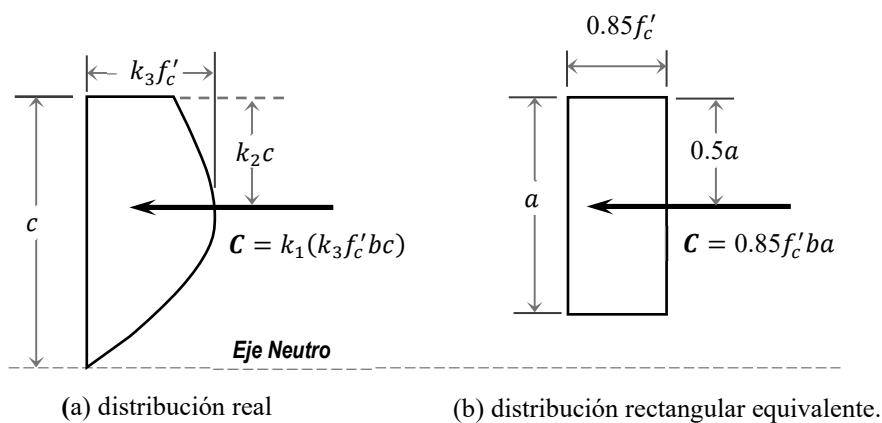
Nota. “Interaction Diagram Of Hollow-Crossed Reinforced Concrete Columns Undergoing Biaxial Bending Using The Closed Polygon Method” por Susetyo et al, 2025, Jurnal Ilmu Dinamika Rekayasa, 21(1), p. 21; y de “Structural and stress analysis”, (p. 654), por Megson, 2019.

2.2.1.4. Bloque Rectangular Equivalente de Whitney

Es una simplificación de la distribución real de esfuerzos de la zona comprimida por una distribución rectangular equivalente propuesta por Whitney (1942), como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Esfuerzos de Compresión en una Sección de Concreto Rectangular.



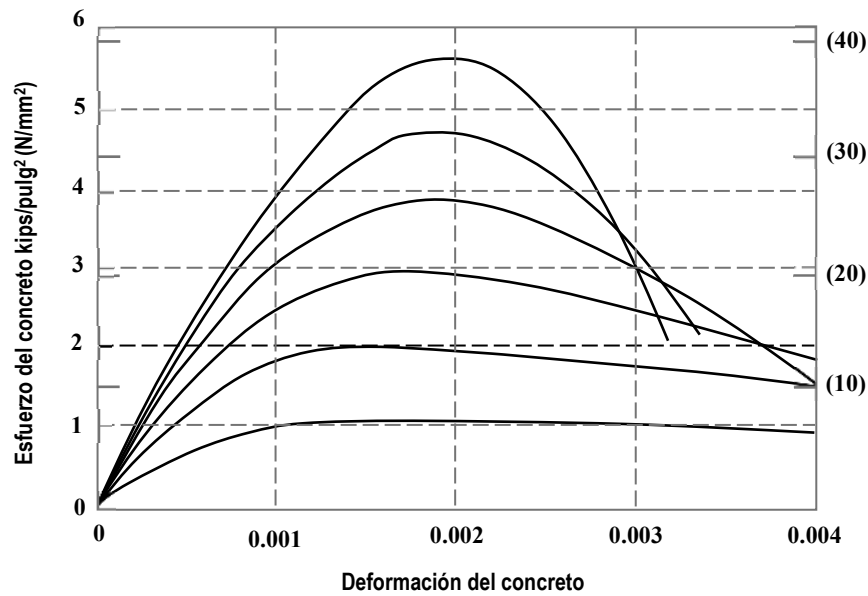
Nota. “Estructuras de concreto reforzado”, (p. 54), por Park y Paulay, 1988.

2.2.1.5. Curva Esfuerzo-Deformación del Concreto

Es una gráfica que relaciona las deformaciones y los esfuerzos en un elemento de concreto sometido a compresión. Hognestad (1951), realizó ensayos con 120 columnas (90 cuadradas y con estribos, y 30 cilíndricas con espirales), y llegó a una curva aproximada como la indicada en la Figura 1, donde para generar la parte curva se aproximaron las gráficas de los ensayos a compresión mediante la parábola de *Ritter* (Figura 7), mientras que la parte recta de la curva se promedió entre los valores de los ensayos a compresión (Figura 5) y la suposición de Chambaud (Figura 6).

Figura 5

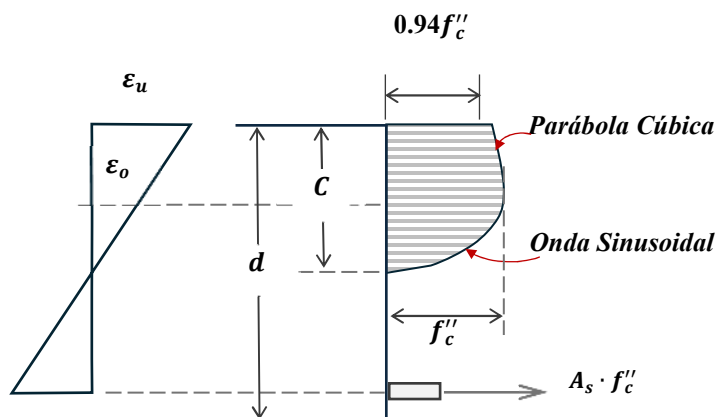
Curvas Esfuerzo-Deformación en Cilindros de Concreto con Carga Axial.



Nota. “Estructuras de concreto reforzado”, (p. 14), por Park y Paulay, 1988.

Figura 6

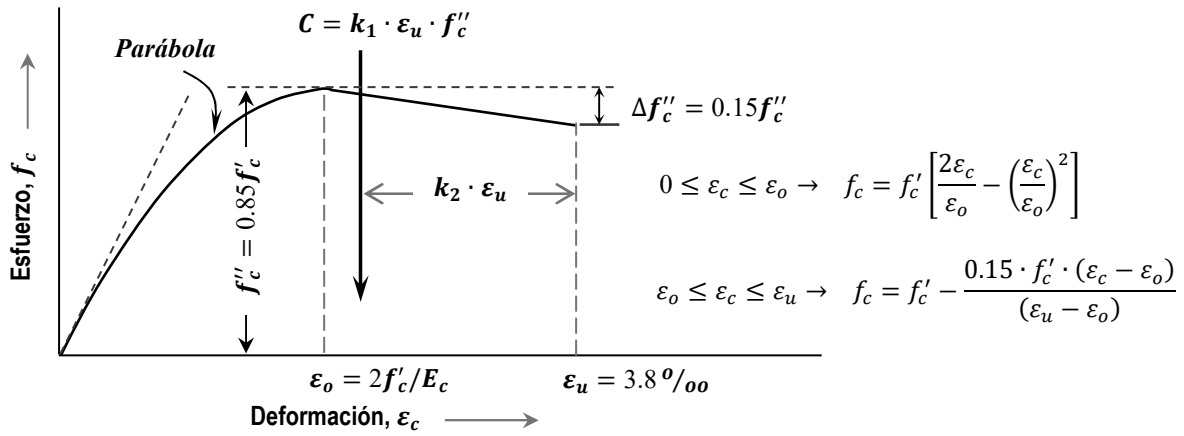
Análisis de Flexión según Chambaud.



Nota. “A study combined bending and axial load in reinforced concrete members”, (p. 31) por Hognestad E., 1951.

Figura 7

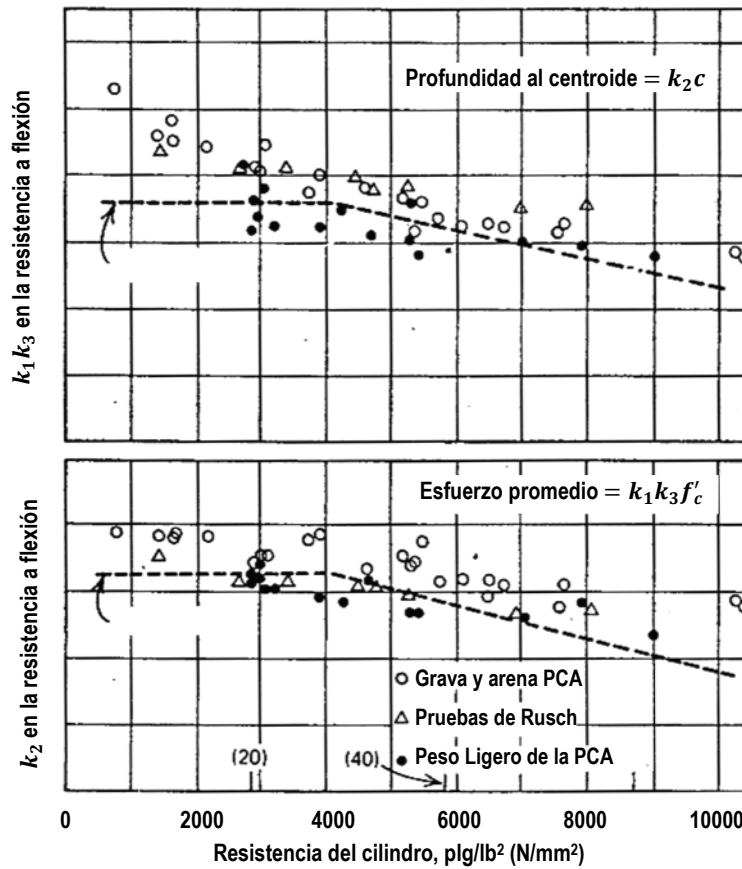
Diagrama Esfuerzo-Deformación en Flexión según Hognestad.



Nota. “A study combined bending and axial load in reinforced concrete members”, (p. 45) por Hognestad E., 1951.

Figura 8

Propiedades de Compresión del Concreto en la Resistencia a Flexión.



Nota. “Estructuras de concreto reforzado”, (p. 56), por Park y Paulay, 1988.

Del equilibrio en (a) y (b) de la Figura 4, se obtiene las expresiones:

$$k_1 k_3 = 0.85 \beta_1, k_2 = 0.5 \beta_1$$

Mediante ensayos de laboratorio ha sido posible medir los valores de $k_1 k_3$ y k_2 generando gráficos de dispersión (Figura 8), a partir de los cuales el ACI ha podido adoptar los valores adecuados de β_1 , y generar límites conservadores sobre los coeficientes de profundidad al centroide y del esfuerzo promedio, k_2 y $k_1 k_3$ respectivamente.

La norma ACI 318-25, muestra los valores de β_1 en su Tabla 22.2.2.4.3 como sigue:

Tabla 1

Valores de β_1 según el ACI 318-25.

f'_c , kg/cm ²	β_1	
$175 \leq f'_c \leq 280$	0.85	(a)
$280 < f'_c < 560$	$0.85 - \frac{0.05 \cdot (f'_c - 280)}{70}$	(b)
$f'_c \geq 560$	0.65	(c)

Nota. “Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary” (p. 439), por ACI 318-25, 2025.

2.2.2. Propiedades de los Materiales

2.2.2.1. Concreto

2.2.2.1.1. Resistencia a la Compresión

Es una propiedad que permite diferenciar a las distintas calidades de concretos, al representar la carga/unidad de área (kg/cm² o MPa) que puede soportar el concreto sometido a fuerzas de compresión. Los límites para f'_c son dados por el ACI 318-25 en su Tabla 19.2.1.1, estos límites se aplican tanto para concretos de peso normal como de peso liviano.

2.2.2.1.2. Módulo de Elasticidad

Según el numeral 19.2.2.1 del ACI 318-25, se permite calcular el módulo de elasticidad, E_c , de acuerdo con (a) o (b), siendo w_c el peso unitario del material:

(a) Para valores de w_c entre 1440 y 2560 kg/m³:

$$E_c = w_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_c} \text{ (en kg/cm}^2\text{)} \quad (19.2.2.1.a)$$

(b) Para concretos de peso normal

$$E_c = 15,100 \sqrt{f'_c} \text{ (en kg/cm}^2\text{)} \quad (19.2.2.1.b)$$

2.2.2.1.3. Deformación Unitaria Máxima

Según el numeral 22.2.2.1 del ACI 318-25, la máxima deformación unitaria (ϵ_{cu}) utilizable en la fibra extrema sometida a compresión del concreto debe suponerse igual a 0.003.

2.2.2.2. Acero

2.2.2.2.1. Resistencia a la Fluencia

La resistencia a la fluencia (f_y) se puede definir como la capacidad de un material para resistir cualquier tipo de distorsión bajo la influencia de tensiones durante un período prolongado de tiempo. En otras palabras, y tomando como referencia a la curva de fluencia del acero, se refiere al punto límite hasta donde la deformación del acero sería elástica.

2.2.2.2.2. Módulo de Elasticidad

Según el numeral 20.2.2.2 del ACI 318-25, el módulo de elasticidad (E_s) para barras y alambres no pre-esforzados puede tomarse como 200,000 MPa.

2.2.2.2.3. Deformación de Fluencia del Acero

Para refuerzo corrugado, en su numeral 21.2.2.1, el ACI 318-25 indica que el valor de la deformación de fluencia será $\varepsilon_{ty} = f_y/E_s$. Para refuerzo corrugado Grado-420, se permite tomar $\varepsilon_{ty} = 0.002$.

2.2.3. Límites de Refuerzo para Columnas y Muros de Corte (ACI 318-25)

En este estudio fue necesario abordar las especificaciones relacionadas con las cuantías de reforzamiento y con los espaciamientos del refuerzo longitudinal según la Norma ACI 318-25; pues es la distribución y la cantidad de barras de refuerzo longitudinal, dentro de la sección transversal de las columnas y muros de corte, las que incidirán en la definición la forma final resistente de los diagramas de interacción asociados con estos elementos estructurales.

2.2.3.1. Refuerzo en Columnas

2.2.3.1.1. Espaciamiento

ACI – Núm. 25.7.2.3: Espaciamiento Máximo

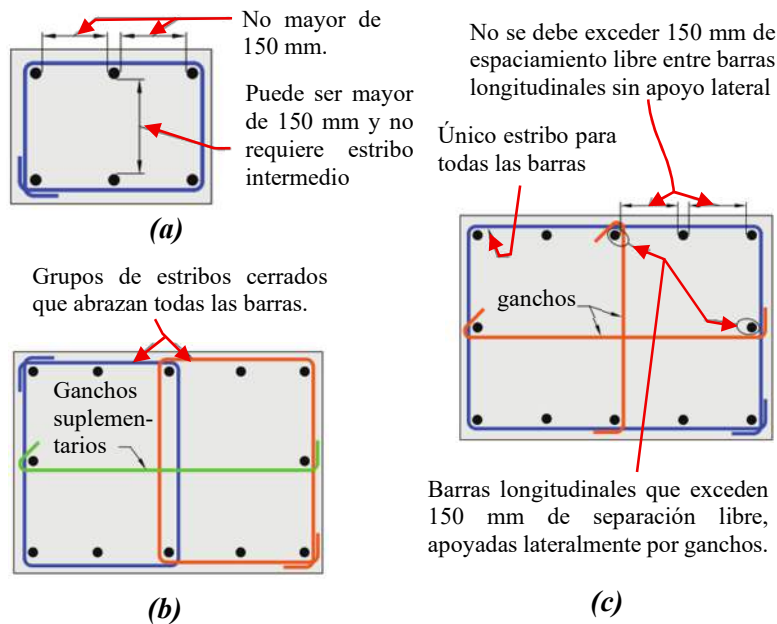
El espaciamiento, s_ℓ , entre barras longitudinales apoyadas lateralmente a los estribos no será mayor que 150 mm ($s_\ell \leq 150\text{mm}$); sin embargo, el espaciamiento entre barras longitudinales no colineal con la línea de estribos puede ser mayor que 150 mm. El ACI describe gráficamente esta indicación como se muestra en la Figura 9.

ACI – Núm. 25.2.3: Espaciamiento Mínimo

Para columnas, pedestales, puntales y elementos de borde en muros, la distancia libre entre barras longitudinales debe ser el menor de 40 mm, $1.5d_b$ y $(4/3) d_{agg}$.

Figura 9

Indicaciones de Espaciamiento en Columnas según ACI 318-25.



Nota. “Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary”, (p. 552), por ACI CODE-318-25, (2025).

2.2.3.1.2. *Cuantía Mínima*

ACI – Núm. 10.6.1: máximo refuerzo longitudinal

Para columnas no preesfrozadas y aquellas con preesfuerzo $< 160 \text{ kg/cm}^2$ tendrán que poseer al menos una cuantía de 0.01 (A_{st}/A_g).

2.2.3.1.3. *Cuantía Máxima*

ACI – Núm. 10.6.1: mínimo refuerzo longitudinal

Para columnas no preesfrozadas y aquellas con preesfuerzo $< 160 \text{ kg/cm}^2$ no deberán exceder a una cuantía de 0.08 (A_{st}/A_g).

2.2.3.2. Refuerzo en Muros de Corte

2.2.3.2.1. *Espaciamiento*

ACI – Núm. 11.7.2: Espaciamiento del Refuerzo Longitudinal

- a) Cuando no se requiere refuerzo de corte para resistencia al plano, el espaciamiento del refuerzo longitudinal (s_ℓ) y transversal (s_t) será:

$$s_\ell \text{ ó } s_t \leq 3h, \text{ donde } h = \text{espesor}$$

$$s_\ell \text{ ó } s_t \leq 45 \text{ cm}$$

- b) Cuando se requiera refuerzo de corte para resistencia al plano, el espaciamiento del refuerzo longitudinal será:

$$s_\ell \leq l_w/3, l_w = \text{longitud del muro}$$

$$s_\ell \leq 3h$$

$$s_\ell \leq 45 \text{ cm}$$

ACI – Núm. 18.10.2.1: Espaciamiento en Muros Estructurales Especiales

El espaciamiento entre barras de refuerzo en cada dirección de los muros estructurales será:

$$s_\ell \text{ ó } s_t \leq 45 \text{ cm}$$

2.2.3.2.2. Cuantía Mínima

A continuación, se indican los numerales de la Norma ACI 318-25 y sus especificaciones de cuantía mínima:

ACI – Núm. 11.6.1: Refuerzo mínimo para muros con $V_u \leq 0.5 \cdot \phi \alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} A_{cv}$

La cuantía longitudinal ρ_l y transversal ρ_t , para un concreto colocado en sitio y barras deformadas, serán:

$$- \text{ Para barras } \emptyset \leq 5/8" \text{ y } f_y \geq 4200 \text{ kg/cm}^2: \Rightarrow \rho_\ell \geq 0.0012$$

$$- \text{ Para barras } \emptyset \leq 5/8" \text{ y } f_y < 4200 \text{ kg/cm}^2: \Rightarrow \rho_\ell \geq 0.0015$$

$$\text{ Para barras } \emptyset > 5/8" \text{ y } f_y \geq 6 < 4200 \text{ kg/cm}^2: \Rightarrow \rho_\ell \geq 0.0015$$

ACI – Núm. 11.6.2: Refuerzo mínimo para muros con $V_u > 0.5 \cdot \phi \alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} A_{cv}$

la cuantía longitudinal ρ_l estará dada por la siguiente expresión:

$$\rho_\ell \geq 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{h_m}{l_m} \right) (\rho_t - 0.0025)$$

ACI – Núm. 18.10.2.4: Refuerzo Mínimo en Muros o Machones de Muro con $h_w/l_w \geq 2$

La cuantía de refuerzo longitudinal dentro de la zona de los $0.15\ell_w$ (Figura 10), será de

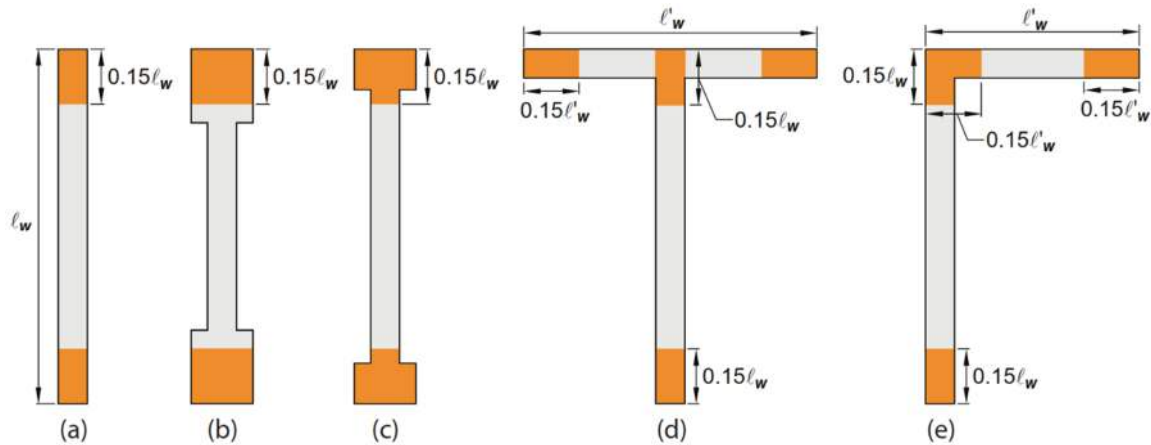
$$\rho_\ell \geq 1.6 \sqrt{f'_c}/f_y$$

ACI – Núm. 18.10.2.1: Refuerzo Mínimo para Muros Estructurales Especiales

Las cuantías: longitudinal ρ_ℓ y transversal ρ_t en el alma no debe ser menores que 0.0025, excepto que si $V_u \leq 0.27 \cdot \lambda \sqrt{f'_c} A_{cv}$, las cuantías pueden reducirse a los valores requeridos en el numeral 11.6 del ACI.

Figura 10

Ubicaciones de Refuerzo Longitudinal para Secciones de Muro.



Nota. “Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary”, (p. 350), por ACI CODE-318-25, 2025.

2.2.3.2.3. *Cuantía Máxima*

A continuación, se indican los numerales de la Norma ACI 318-25 y sus especificaciones de cuantía máxima:

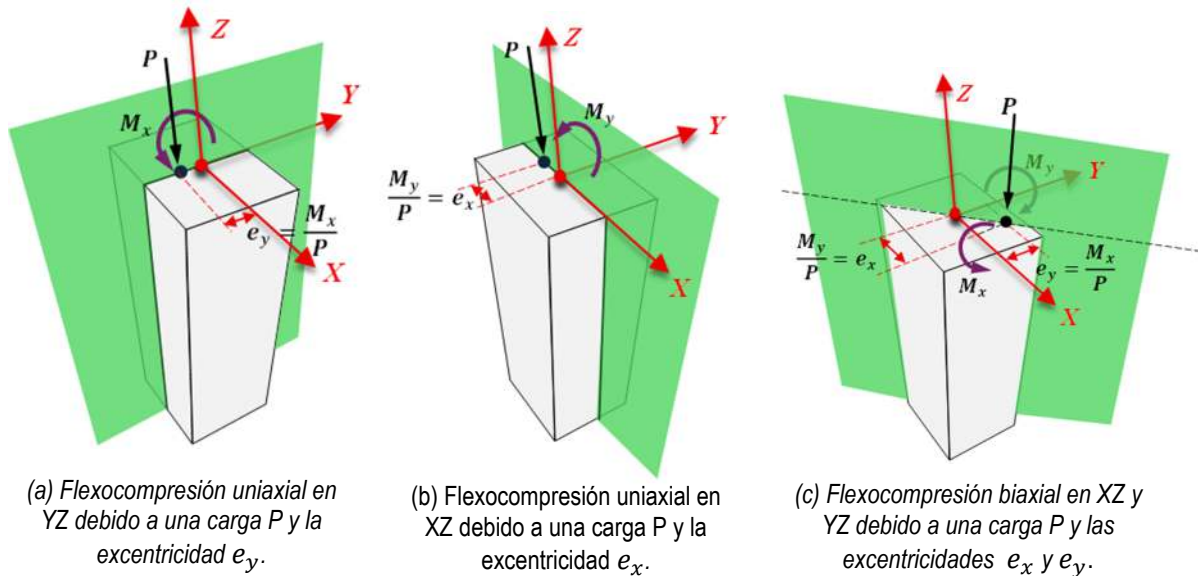
ACI – Núm. 11.6.2: Refuerzo máximo para muros con $V_u > 0.5 \cdot \phi \alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} A_{cv}$

la cuantía longitudinal ρ_l no será mayor que ρ_l requerido para la resistencia según el numeral 11.5.4.3.

2.2.4. Flexocompresión Biaxial

Figura 11

Flexocompresión Uniaxial y Biaxial en una Sección de Columna.



La flexocompresión biaxial es un estado tenso-deformacional que presentan las columnas sometidas a carga axial y solicitaciones flectantes en ambos ejes (Batista, 2020). Este estado se produce debido a que el punto de aplicación de la carga axial (P) no coincide con el centroide de la sección, generándose excentricidades (e_x , e_y) y consecuentemente momentos flectores (M_x ó M_y , o ambas). Por lo tanto, el término *flexocompresión* hace referencia a la acción combinada de fuerzas compresivas y momentos de flexión (M_x , M_y). Sean X e Y los ejes principales de la sección transversal de una columna, se hablará de *flexocompresión uniaxial* cuando, además de la carga axial de compresión, los momentos de flexión actuantes sean o solo paralelos a XZ o solo paralelos a YZ , Figuras 11(a) y 11(b) respectivamente. Sin embargo; cuando se tenga carga axial y momentos de flexión actuantes tanto en XZ como en YZ se hablará de *flexocompresión biaxial*. Según Park y Paulay (1988), las columnas con solo carga axial rara vez ocurren en la práctica, pues casi siempre habrá

flexión, ya sea debido a inclinaciones iniciales, transmisión de cargas desde vigas y losas, o a los momentos durante la misma construcción.

2.2.5. Diagrama de Interacción

Según Susetyo et al. (2023) , un diagrama de interacción es un gráfico que describe la interacción entre la capacidad de fuerza axial y el momento de flexión que es capaz de soportar una columna. Esta definición también es extensible para el caso de muros de corte.

2.2.5.1. Puntos de Control de la Curva de Interacción

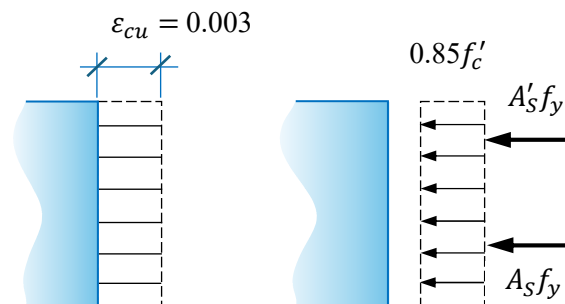
Según Otazzi (2016), los puntos notables se describen como:

2.2.5.1.1. Falla en Compresión Pura

La carga axial es completamente perpendicular a la sección transversal de la columna, sometiénolas a una acción por aplastamiento, como se muestra en la Figura 12:

Figura 12

Falla en Compresión Pura.



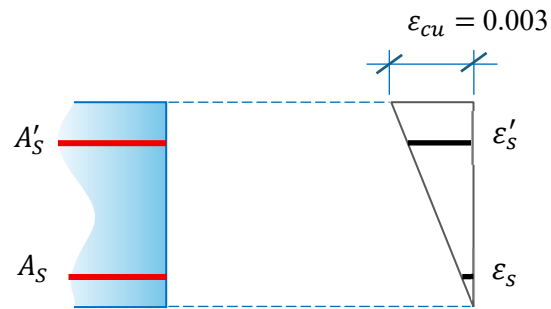
Nota. “Apuntes del curso concreto armado I”, (p. 381), Otazzi, 2016.

2.2.5.1.2. Flexocompresión = Compresión + $\sigma_s \approx 0$

Si se desprecia la resistencia a tracción del concreto, este punto podría considerarse como el límite a partir del cual la sección se agrieta. A partir de este punto, la sección empieza a comportarse como parcialmente fisurada (Figura 13).

Figura 13

Condición de Compresión + $\sigma_s \approx 0$.



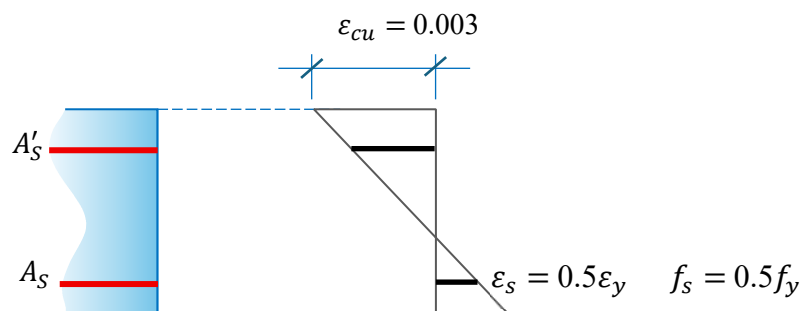
Nota. “Apuntes del curso concreto armado i”, (p. 382), Otazzi, 2016.

2.2.5.1.3. Flexocompresión = Compresión + $\sigma_s = 0.5f_y$

Se presentará en la barra de acero más alejada de la zona comprimida que muestre un esfuerzo a tracción equivalente al 50% de la fluencia (Figura 14 y 16). Este punto afecta la longitud del empalme traslapado en una columna (Reynolds y Kramer, 2007, p. 2).

Figura 14

Condición de Compresión + $\sigma_s = 0.5f_y$.



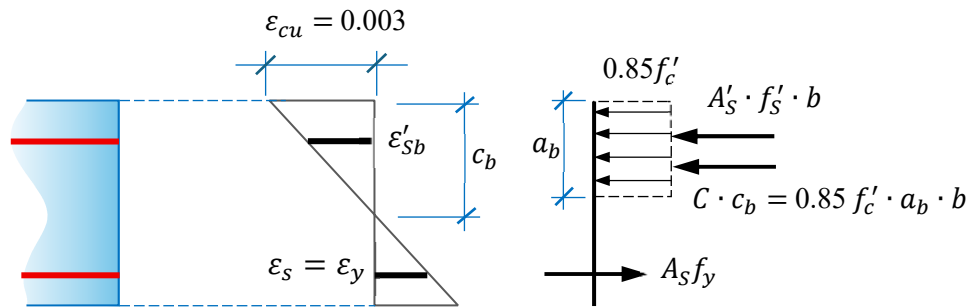
Nota. “Apuntes del curso concreto armado i”, (p. 382), Otazzi, 2016.

2.2.5.1.4. Falla Balanceada

Basados en las definiciones de McCormac y Brown (2018, p. 645), será el punto en donde se produce la “ocurrencia simultánea del aplastamiento del concreto a compresión en un lado de un miembro y la fluencia del acero de tensión en el otro lado”.

Figura 15

Condición de Falla Balanceada.

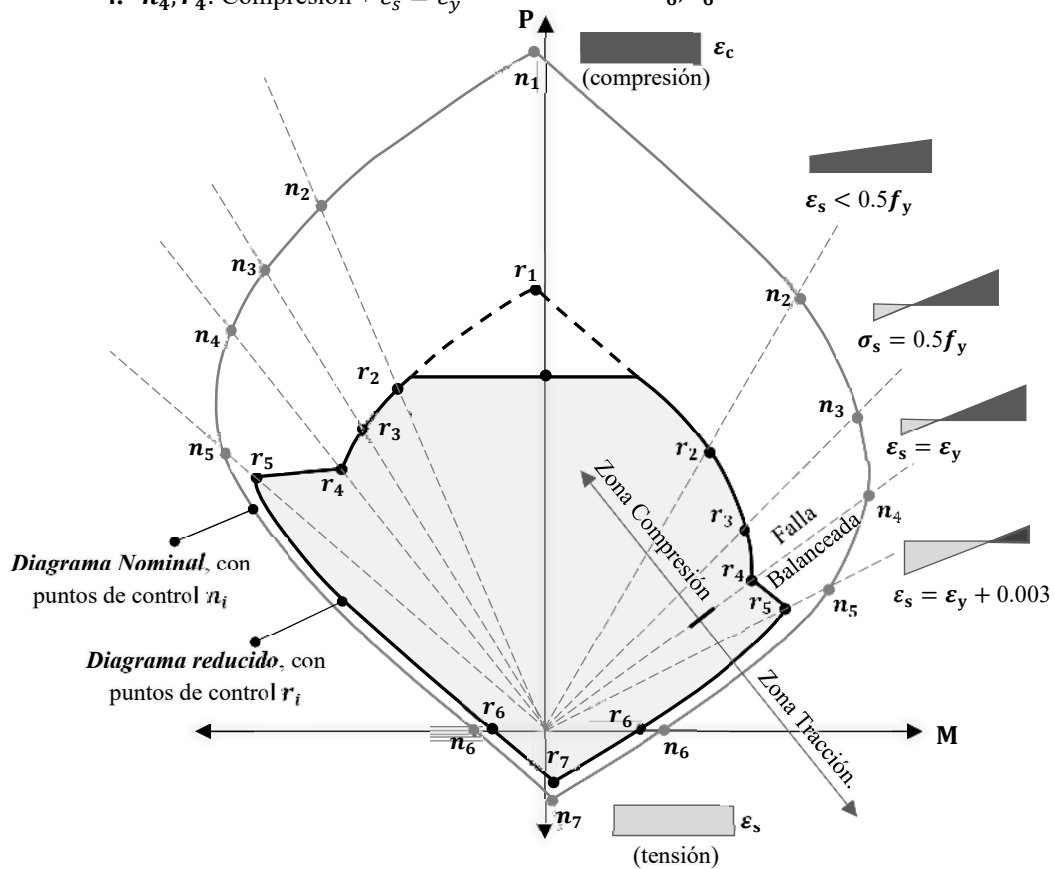


Nota. "Apuntes del curso concreto armado I", (p. 382), Otazzi, 2016.

Figura 16

Puntos Notables de los Diagramas de Interacción Nominal y Reducido.

- | | |
|--|---|
| 1. n_1, r_1 : Compresión axial pura, P_o . | 5. n_5, r_5 : Compresión + |
| 2. n_2, r_2 : Compresión + $\sigma_s \approx 0$. | $\epsilon_s = \epsilon_y + 0.003 \text{ m/m}$. |
| 3. n_3, r_3 : Compresión + $\sigma_s = 0.5f_y$. | 6. n_6, r_6 : Flexión Pura. |
| 4. n_4, r_4 : Compresión + $\epsilon_s = \epsilon_y$ | 7. n_6, r_6 : Tracción Pura. |



2.2.5.1.5. Flexión Pura

Es el punto del diagrama de interacción (Figura 16) en donde la carga axial es nula (n_6). Otazzi (2016) indica que: “es aplicable todo lo estudiado para la sollicitación de flexión simple.

2.2.5.1.6. Tracción Pura

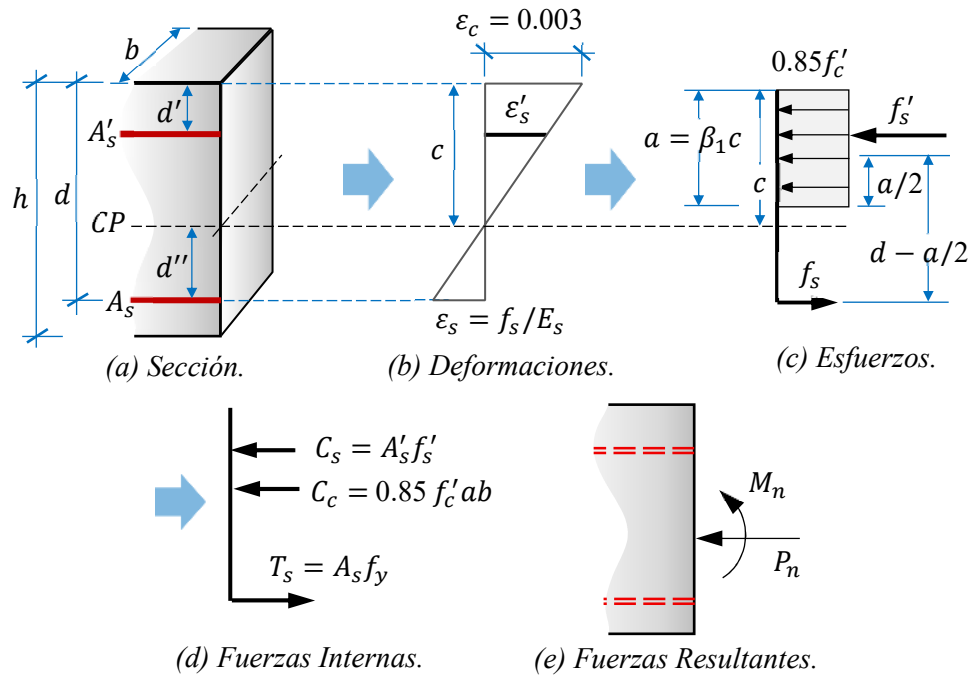
En este punto se considerará solamente el aporte a tracción del refuerzo con: $T_o = A_{st} \cdot f_y$, en donde: A_{st} = área total de las barras de acero, y f_y = esfuerzo de la fluencia en el acero.

2.2.6. Ecuaciones de Equilibrio para Flexión Uniaxial

Compatibilizando las formulaciones de Park y Paulay (1988, pp. 128-133) y Al-Ansari y Afzal (2020, pp. 3-4), podemos escribir las siguientes ecuaciones de equilibrio:

Figura 17

Diagrama de Equilibrio de una Sección en Flexión Uniaxial.



Nota. “Mathematical model for analysis of uniaxial and biaxial reinforced concrete columns”, por Al-Ansari y Afzal, 2020, Hindawi – Advances in Civil Engineering, 20, p. 4.

$$P_n = C_c - T_s + C_s \quad \dots \text{(Ecuación 1)}$$

$$M_n = M_c + M_T + M_{C_s} \quad \dots \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

$$C_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta \cdot c = \text{fuerza de compresión del concreto} \quad \dots \text{(Ecuación 3)}$$

$$M_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) \quad \dots \text{(Ecuación 4)}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = \text{fuerza de tensión del acero} \quad \dots \text{(Ecuación 5)}$$

$$M_T = A_s \cdot f_y \cdot d'' \quad \dots \text{(Ecuación 6)}$$

$$C_s = A'_s \cdot (f'_s - 0.85 \cdot f'_c) = \text{fuerza de compresión del acero} \quad \dots \text{(Ec. 7)}$$

$$M_{C_s} = A'_s \cdot (f'_s - 0.85 \cdot f'_c) \cdot (d - d' - d'') \quad \dots \text{(Ecuación 8)}$$

2.2.7. Compatibilidad de Deformaciones

Brice (2024) nos indica que es “un proceso iterativo en el que se varia la ubicación del eje neutro hasta que se satisfacen las condiciones de equilibrio”. Para entender mejor el proceso ver el “Anexo I” de presente estudio. Se puede resumir en:

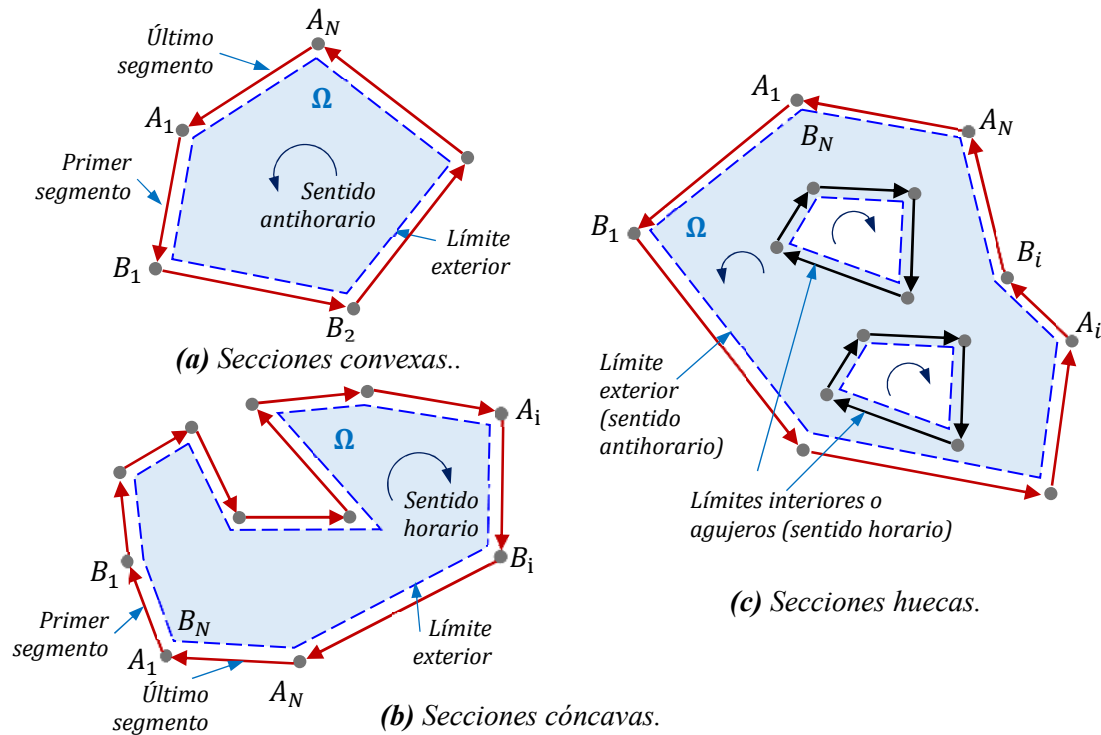
1. Estimar la ubicación del eje neutro.
2. Calcular la deformación en el centroide de cada elemento de la sección transversal, suponiendo una distribución lineal de deformación.
3. Calcular el esfuerzo de cada elemento de la sección transversal utilizando su relación tensión-deformación.
4. Calcular la contribución de fuerza de cada elemento multiplicando la tensión del elemento por el área de su sección transversal.
5. Sumar las contribuciones de fuerza de todos los elementos de la sección transversal.
6. Repetir los pasos del 1 al 5 hasta que la suma de las fuerzas sea cero. Esta es la condición de equilibrio.

2.2.8. Método del Polígono Cerrado

El método del polígono cerrado consiste en tratar una geometría poligonal (convexa, cóncava o con agujeros) como un conjunto de segmentos de líneas rectas consecutivas (*conectividad*) con un sentido de recorrido (horario o antihorario), como se muestra en la Figura 18. Según (Lo, 2015), el límite L de un dominio Ω se pueden definir como $L = \{A_i B_i, i = 1, N\}$, donde A_i es el punto inicial y B_i es el punto final.

Figura 18

Conectividad de Bordes para Secciones Simples y Complejas.

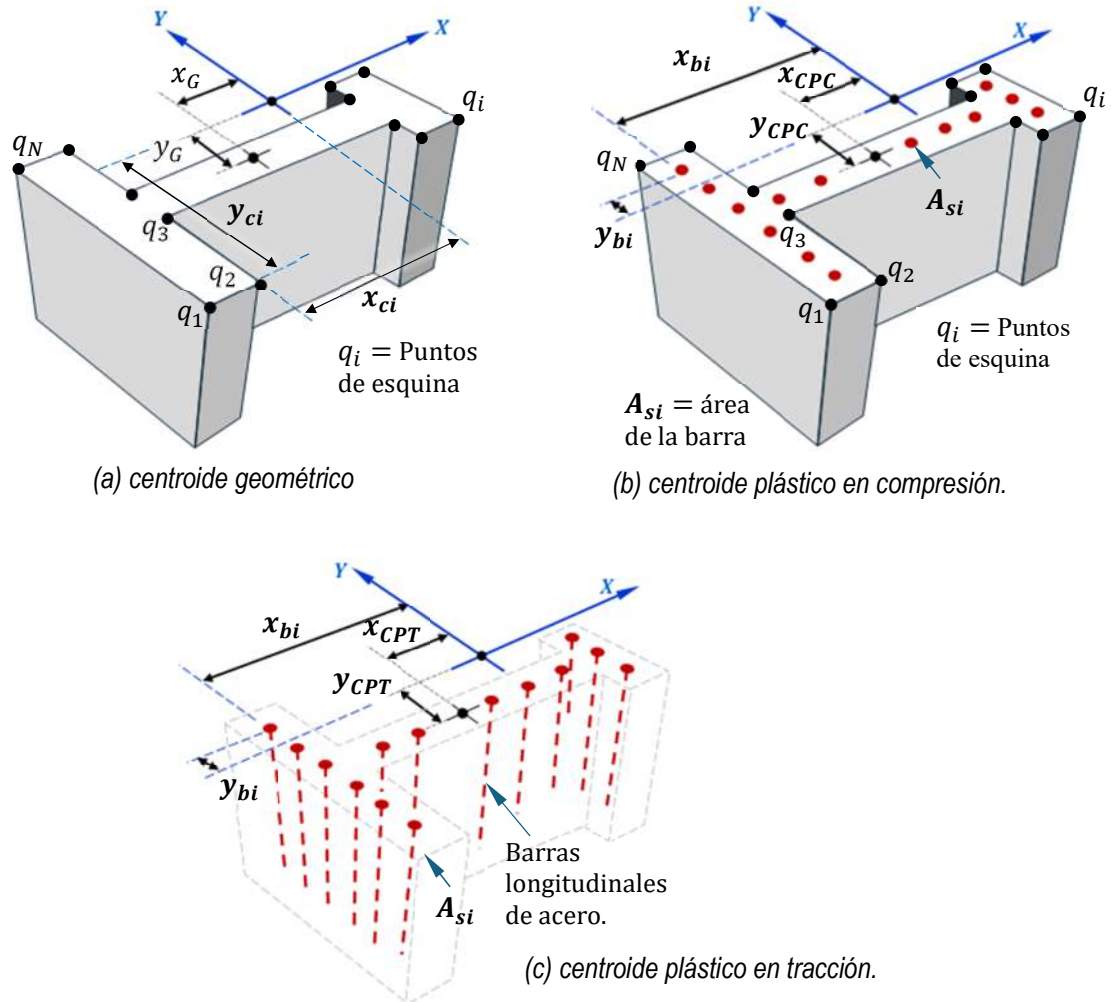


2.2.9. Centro de Reducción

Se puede interpretar como la posición que se utiliza para trasladar y equilibrar las fuerzas internas de la sección bruta ($\sum M = \text{sumatoria de momentos}$). Algunas ubicaciones típicas que son utilizadas como centro de reducción son: *a)* centroide geométrico, *b)* centroide plástico en compresión y *c)* centroide plástico en tracción (Otazzi, 2016, pp. 384-385).

Figura 19

Centros de Reducción para una Sección Típica.



2.2.9.1. Centroide Geométrico (CG)

Su cálculo estará dado solamente por las coordenadas de las esquinas de la sección.

$$x_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ci} + x_{ci+1}) \times (x_{ci} \cdot y_{ci+1} - x_{ci+1} \cdot y_{ci})}{6A_g} \quad \dots(\text{Ecuación 9})$$

$$y_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{ci} + y_{ci+1}) \times (x_{ci} \cdot y_{ci+1} - x_{ci+1} \cdot y_{ci})}{6A_g} \quad \dots(\text{Ecuación 10})$$

2.2.9.2. Centroide Plástico en Compresión (CPC)

Su cálculo estará dado solamente por las coordenadas de las esquinas de la sección incluyendo las ubicaciones de las barras de acero longitudinal.

$$x_{CPC} = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot A_g \cdot x_{CG} + \sum_{i=0}^{n_b} [A_{si} \cdot (f_y - 0.85 \cdot f'_c) \cdot x_{bi}]}{0.85 \cdot f'_c \cdot A_g + \sum_{i=0}^{n_b} [A_{si} \cdot (f_y - 0.85 \cdot f'_c)]} \quad \dots(\text{Ecuación 11})$$

$$y_{CPC} = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot A_g \cdot y_{CG} + \sum_{i=1}^{n_b} [A_{si} \cdot (f_y - 0.85 \cdot f'_c) \cdot y_{bi}]}{0.85 \cdot f'_c \cdot A_g + \sum_{i=1}^{n_b} [A_{si} \cdot (f_y - 0.85 \cdot f'_c)]} \quad \dots(\text{Ecuación 12})$$

donde n_b = numero de barras de acero.

2.2.9.3. Centroide Plástico en Tracción (CPT)

Es aquel donde todo el acero trabajando a f_y , y no se considera el aporte del concreto (Otazzi, 2016). Para su cálculo solo se usarán las ubicaciones de las barras:

$$x_{CPT} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} A_{si} \cdot f_y \cdot x_{bi}}{\sum_{i=1}^{n_b} A_{si} \cdot f_y} \quad \dots(\text{Ecuación 13})$$

$$y_{CPT} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} A_{si} \cdot f_y \cdot y_{bi}}{\sum_{i=1}^{n_b} A_{si} \cdot f_y} \quad \dots(\text{Ecuación 14})$$

2.2.10. Softwares Estructurales

2.2.10.1. SAP2000 v26

Es un software de la empresa Computers and Structures, Inc., orientado al análisis lineal y no lineal de elementos y sistemas estructurales en general, incluyendo las propiedades de diferentes materiales en la industria de la construcción (concreto, acero, albañilería, etc.). SAP2000 permite modelar, analizar, diseñar y generar reportes, además su motor de mallado permite discretizar objetos marco, cascara y sólidos (Computers and Structures, Inc., 2025). Para el análisis de secciones transversales tiene incorporado la funcionalidad de Section Designer, que permite obtener las superficies de interacción secciones simples y compuestas.

2.2.10.2. Software ETABS 21.0

Al igual que SAP2000 pertenece a la misma familia de software de la empresa Computers and Structures, Inc. (CSI America, 2025), pero su aplicación está orientada de manera específica al rubro de las edificaciones civiles; mantiene las capacidades de mallado y el uso de Section Designer, y múltiples tipos de análisis lineales y no lineales para elementos y sistemas estructurales. La versión utilizada en esta investigación la v21.2.0.

2.2.10.3. Software CsiCOL v11.0

Es un software de la familia CSI igual que SAP2000 y ETABS, que permite el análisis y diseño de columnas y muros de corte de concreto armado y de sección compuesta (Computers and Structures, Inc., CSICol API [versión 10.0], 2025). Este programa está especializado en el análisis de secciones transversales para comportamiento lineales y no lineales y estados de flexocompresión uniaxial y biaxial, además posee un espacio integrado de dibujo con múltiples opciones de interoperabilidad de archivos. Aunque es muy completo para la gestión de geometrías, presenta algunas restricciones interactivas durante la edición de diámetros de aceros y compatibilidad de formatos CAD. También consta de paneles de visualización 2D/3D para modelización y verificación de resultados de diagramas de interacción.

2.2.10.4. SpCOLUMN v10.1

Es un software de la empresa StructurePoint que permite investigar y diseñar secciones regulares (rectangulares, circulares) con patrones de refuerzo predefinidos, así como secciones irregulares con patrones refuerzo también irregular (StructurePoint, 2025). Está orientado a la investigación de secciones transversales arbitrarias de concreto y con sección compuesta, y posee paneles interactivos para la visualización 2D/3D del modelamiento y de los resultados. También permite la gestión de datos para la importación y exportación de archivos.

2.2.10.5. DIMCOL v1.0

Este programa ha sido desarrollado en python durante el desarrollo de la presente investigación, y está orientado a la determinación de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial, nominales y de diseño, para columnas y muros de corte mediante una interfaz interactiva con entradas de datos para ingresar las propiedades del material concreto y acero, e indicar dimensiones paramétricas para diez tipos de sección. La interfaz permite el dibujo dinámico con interacción del mouse para la ubicación intuitiva de barras de acero haciendo uso de guías (snaps). Permite la visualización grafica 2D para el proceso de modelización, y la representación 2D/3D de los diagramas de interacción resultantes. DIMCOL también permite la capacidad de exportar datos en formato Excel de manera completa y rápida.

Restricciones del software: El programa DIMCOL de elaboración propia, debido al límite temporal de la investigación, presenta las siguientes restricciones:

- No permite la interoperabilidad e importación de geometrías CAD.
- Genera diagramas de interacción con un número fijo de 72 curvas (cada 5°) y 60 puntos por curva, incluyendo el punto de falla balanceada.

2.2.11. Control de la Zona de Transición Para Secciones de Muros con Alas

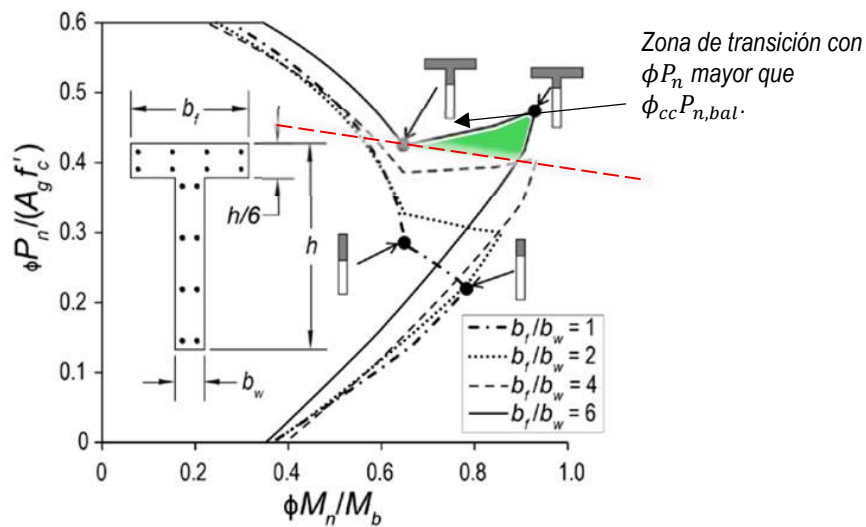
Según el código ACI 318-25 (2025), para secciones con alas o refuerzo asimétrico, la resistencia ϕP_n calculada con la Tabla 2 puede exceder $\phi_{cc} P_{n,bal}$ en las regiones de transición, como se observa en la Figura 20. Lequesne & Pincheira (2014) proponen las siguientes fórmulas para asegurar una variación coherente de la carga axial en estas zonas:

$$\phi_{prop. (estribo)} = \max \left(0.65, 0.65 + 0.25 \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ty}}{\varepsilon_t^* - \varepsilon_{ty}} \right) \leq 0.9 \quad \dots(\text{Ecuación 15})$$

$$\phi_{prop. (espiral)} = \max \left(0.75, 0.75 + 0.15 \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ty}}{\varepsilon_t^* - \varepsilon_{ty}} \right) \leq 0.9 \quad \dots(\text{Ecuación 16})$$

Figura 20

Forma del Diagrama de Interacción de Diseño para un Muro Tipo T.



Nota. “Proposed revisions to the strength reduction factor for axially loaded members”, Lequesne & Pincheira, 2014, Concrete International, 36(9), p. 3.

Tabla 2

Factor de Reducción de Resistencia ϕ Según ACI 318-25.

Deformación unitaria neta a tracción, ε_t	Clasificación	ϕ			
		Tipo de refuerzo transversal			
		Espirales que cumplen con 25.7.3		Otro	
$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{ty}$	Controlada por compresión	0.75	(a)	0.65	(b)
$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ty} + 0.003$	Transición ^[1]	$0.75 + 0.15 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0.003)}$	(c)	$0.65 + 0.25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0.003)}$	(d)
$\varepsilon_t \geq \varepsilon_{ty} + 0.003$	Controlada por Tracción	0.90	€	0.90	(f)

^[1] Para las secciones clasificadas como de transición, se permite usar el valor de correspondiente a secciones controladas por compresión.

Nota. “Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary”, (p. 432), ACI-318-25, 2025.

2.2.12. Cálculo del Error Relativo

Según Chapra y Canale (2015), en métodos numéricos con un enfoque iterativo la medición de cuánto se aproxima un valor calculado (prueba) respecto a un valor esperado (base) se realiza con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_a = \frac{\text{medición base} - \text{medición prueba}}{\text{medición base}} \quad \dots (\text{Ecuación 17})$$

Algunos autores usan otras métricas para la medición del error. Susetyo et al. (2023) utilizó en su estudio el error cuadrático medio normalizado (NMSE) para medir la coherencia entre los resultados obtenidos con sus algoritmos respecto al software PCACOL, planteando la siguiente fórmula:

$$NMSE = \frac{\sum S_i^2 \cdot (1 - k_i)^2}{\sum S_i \cdot k_i}, \text{ donde: } S_i = \frac{C_{coi}}{C_o}, \text{ y } k_i = C_{pi}/C_{coi} \quad \dots(\text{Ecuación 18})$$

Para este estudio se ha elegido calcular el error relativo pues castiga menos el error mostrando porcentajes más representativos de la aproximación hacia los valores esperados, como se observa a continuación:

Figura 21

Resultados Aplicando RMSE en Estudios Comparativos.

N. NMSE Performance Index Evaluation

Table-12. NMSE Performance Index Evaluation for Axial Load at 0° Rotation

No.	Pn PCACOL (kN)	Pn CALC (kN)	NMSE						
			C _s /C _o	si	Ki	si ²	si*ki	(1-ki) ²	si ² * (1-ki) ²
1	7295.22	7295.22	1.000	2.679	1.000	7.179	2.679	3.00638E-13	2.158324E-12
2	6930.46	6947.67	1.005	2.545	1.002	6.479	2.552	6.16326E-06	3.993293E-05
3	6565.70	6589.16	1.007	2.411	1.004	5.815	2.420	1.27699E-05	7.425833E-05
4	6200.94	6225.77	1.008	2.277	1.004	5.187	2.287	1.60287E-05	8.314002E-05
5	5836.18	5858.67	1.008	2.144	1.004	4.595	2.152	1.48472E-05	6.821789E-05
6	5471.42	5473.81	1.001	2.010	1.000	4.038	2.010	1.90967E-07	7.711800E-07
7	5106.66	5128.00	1.008	1.876	1.004	3.518	1.883	1.74612E-05	6.142494E-05
8	4741.90	4759.47	1.007	1.742	1.004	3.033	1.748	1.37352E-05	4.166178E-05
9	4377.13	4393.02	1.007	1.608	1.004	2.584	1.613	1.31827E-05	3.407070E-05
10	4012.37	4027.03	1.007	1.474	1.004	2.172	1.479	1.33427E-05	2.897626E-05
11	3647.61	3661.98	1.008	1.340	1.004	1.795	1.345	1.55234E-05	2.786126E-05
12	3282.85	3296.64	1.008	1.206	1.004	1.454	1.211	1.76490E-05	2.565781E-05
13	2918.09	2930.33	1.008	1.072	1.004	1.149	1.076	1.75847E-05	2.019895E-05
14	2553.33	2560.51	1.006	0.938	1.003	0.879	0.940	7.90302E-06	6.950300E-06
15	2188.57	2199.18	1.010	0.804	1.005	0.646	0.808	2.35145E-05	1.519331E-05
16	1823.81	1832.62	1.010	0.670	1.005	0.449	0.673	2.33143E-05	1.046113E-05
17	1459.04	1463.26	1.006	0.536	1.003	0.287	0.537	8.34863E-06	2.397432E-06
18	1094.28	1097.65	1.006	0.402	1.003	0.162	0.403	9.50325E-06	1.535062E-06
19	729.52	734.66	1.014	0.268	1.007	0.072	0.270	4.96833E-05	3.566826E-06
20	364.76	368.55	1.021	0.134	1.010	0.018	0.135	1.08220E-04	1.942317E-06
21	0.00	2.93	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.00000E+00	0.000000E+00
22	-387.29	-384.77	0.987	-0.142	0.993	0.020	-0.141	4.24786E-05	8.594877E-07
23	-774.58	-772.74	0.995	-0.284	0.998	0.081	-0.284	5.66324E-06	4.583469E-07
24	-1161.87	-1158.31	0.994	-0.427	0.997	0.182	-0.425	9.40079E-06	1.711890E-06
25	-1549.15	-1545.19	0.995	-0.569	0.997	0.324	-0.568	6.52117E-06	2.111102E-06
26	-1936.44	-1936.44	1.000	-0.711	1.000	0.506	-0.711	2.04178E-13	1.032792E-13
Avg	2722.71						Sum 26.094		5.533593E-04
								NMSE	2.12066E-05

Nota. “Interaction diagram of hollow-crossed reinforced concrete columns undergoing biaxial bending using the closed polygon method”, Susetyo et al., 2025, *Dinamika Rekayasa*, 21(1), p. 8.

Según la Figura 21, el error obtenido aplicando RMSE es de: 2.12066E-05 (0.002%), mientras que si aplicamos el error relativo obtenemos $\varepsilon_a = 0.37\%$.

2.3. Definiciones de Términos Básicos

- a) **Python:** es un lenguaje de alto nivel de programación interpretado, dinámico y multiplataforma cuya filosofía hace hincapié en la legibilidad de su código (Wikipedia, 2024).
- b) **Columna:** elemento con una relación entre altura y menor dimensión lateral mayor que tres, usado principalmente para resistir carga axial de compresión (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 26).
- c) **Muro de Corte o Placa:** es un elemento estructural diseñado para resistir combinaciones de fuerzas cortantes, momentos y fuerzas axiales inducidas por cargas laterales (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 28).
- d) **Peralte Efectivo o Altura Útil de la Sección (d):** la distancia medida desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal sometido a tracción (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 28).
- e) **Resistencia Nominal:** resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones e hipótesis del método de diseño por resistencia de esta norma, antes de aplicar el factor de reducción de resistencia (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 29).
- f) **Resistencia Requerida:** resistencia que un elemento o una sección transversal debe tener para soportar las cargas amplificadas o los momentos y fuerzas internas correspondientes combinadas según lo estipulado en esta norma (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 28).
- g) **Resistencia Especificada a la Compresión del Concreto (f'_c):** resistencia a la compresión del concreto empleado en el diseño (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 29).

- h) Resistencia a la Fluencia:** resistencia a la fluencia mínima especificada o punto de fluencia del refuerzo (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 29).
- i) Módulo de Elasticidad:** relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material (comité técnico de la norma e.060, 2020, p. 28).
- j) Diagrama de Interacción:** es una superficie de falla tridimensional que representa todas las posibles combinaciones limitantes de P_u , M_{ux} y M_{uy} (kolapkar, 2023, p. 2).

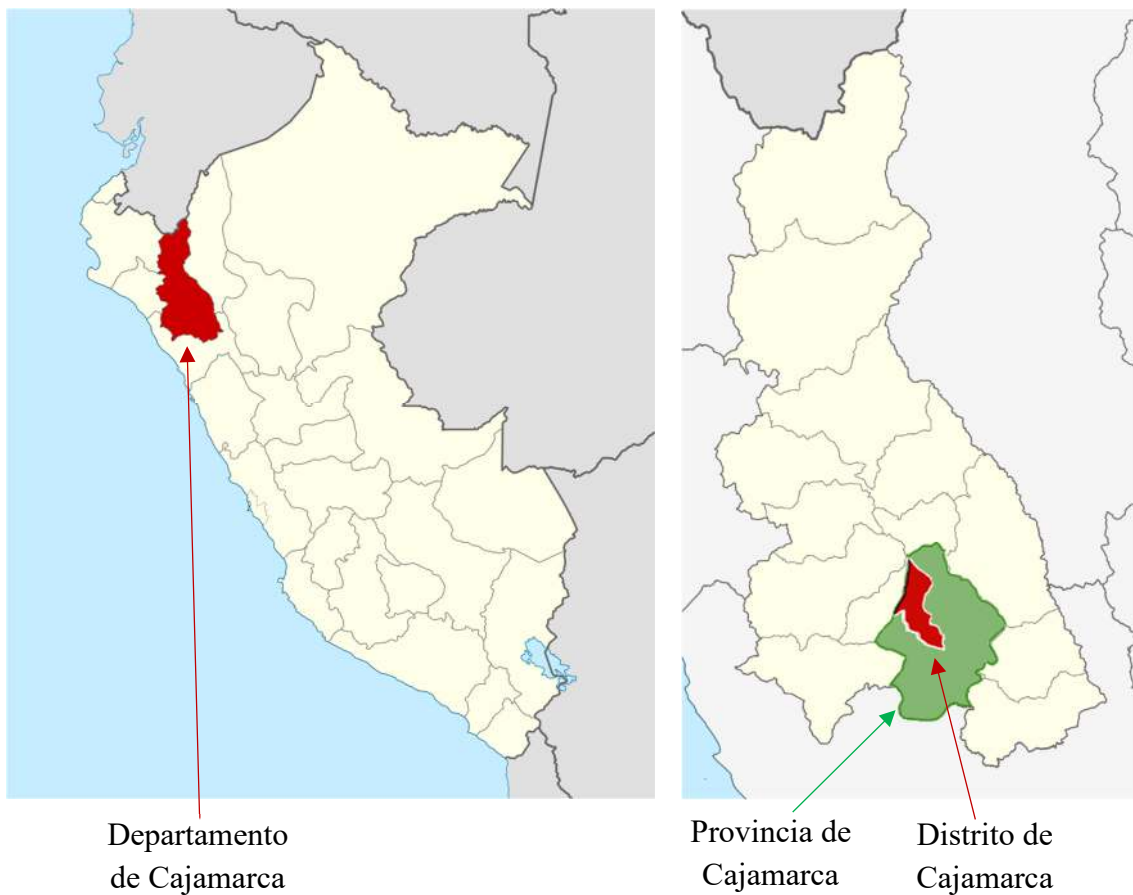
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación Geográfica

La investigación se realizó en el ambiente de Biblioteca de Ingeniería Civil (1A-304) de la Universidad Nacional de Cajamarca ubicada en la misma ciudad de Cajamarca, distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, y departamento de Cajamarca, con las coordenadas UTM: Este: 776606.80E, Norte: 9207068.73N y a una altitud de 2750 m.s.n.m.

Figura 22

Ubicación Departamental, Provincial y Distrital de Lugar del Estudio.



3.2. Periodo de Estudio

El presente estudio tuvo como intervalo de tiempo desde el mes de abril hasta el mes de diciembre del año 2025.

3.3. Materiales

A continuación, listaremos los recursos (insumos o información) que se emplearon en la investigación:

(a) Información Geométrica:

- Coordenadas de esquinas y barras de acero de las secciones transversales de columnas y muros de corte contempladas en los casos de estudio.

(b) Información estructural:

- Propiedades estructurales de columnas y muros de corte de concreto (f'_c , f_y , w , factores de reducción de resistencia ϕ).

(c) Información Documental:

- Manuales o guías de usuario de los Software Estructurales (SAP2000, ETABS, CSiCOL, SpCOLUMN).
- Normas Internacionales: ACI 318-25.
- Libros de Método Numéricos y Artículos Científicos.
- Documentación de Python y de las bibliotecas utilizadas (Tabla 3).

Tabla 3

Bibliotecas de Python Usadas para Programación.

Biblioteca	Versión	Funcionalidades
Matplotlib	3.10.1	Permite la creación de gráficos 2D y 3D estáticos, animados e interactivos en Python.
Numpy	2.2.3	Permite la computación científica en Python proporcionando soporte para el manejo de arreglos multidimensionales y matrices, junto con funciones matemáticas de alto rendimiento.
Openpyxl	3.1.5	Permite leer, escribir, crear y editar archivos de Excel (formato .xlsx) en Python.

<i>Pandas</i>	2.2.3	<i>Permite la manipulación y el análisis de datos, proporcionando estructuras como DataFrames y Series.</i>
<i>PySide6</i>	6.8.2.1	<i>Es un conjunto de herramientas para crear interfaces gráficas de usuario (GUI) en Python.</i>
<i>Scipy</i>	1.15.2	<i>Basada en Numpy, posee módulos que permiten la optimización, integración, interpolación, álgebra lineal, estadística, etc.</i>

3.4. Instrumentos

Se consideraron como instrumentos a las herramientas concretas que se usaron para aplicar técnicas y obtener resultados sobre las unidades de análisis; estos fueron:

- *Software de elaboración propia (DIMCOL),*
- *Software Estructural Comercial (SAP2000, ETABS, CSiCOL, SpCOLUMN)* para la generación de diagramas de interacción de columnas y muros de corte.
- *Entorno de Desarrollo (IDE):* Visual Studio Code, necesario para generación de código del software de elaboración propia con Python.
- *Software Office: Excel* con macros (.xlsm) para procesamiento y análisis de datos.

3.5. Tipo, Nivel y Diseño de Investigación

3.5.1. Tipo de Investigación

El tipo de la investigación es Aplicada, pues aplica conocimientos existentes a casos prácticos de columnas y muros de corte, para comparar los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial obtenidos con los programas DIMCOL (de elaboración propia), SAP2000, ETABS, CsiCOL y SpCOLUMN.

3.5.2. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es Descriptivo-Comparativo, pues describe y profundiza un conocimiento amplio y completo de lo que se pretende comparar (diagramas de interacción de flexocompresión biaxial) y sistematiza métodos de cálculo, teorías e hipótesis estructurales, Normativas (ACI 318-25) y metodologías; finalizando en la comparación cuantitativa de los diagramas de interacción al aplicar métricas para concluir sobre las variaciones máximas.

3.5.3. Diseño de Investigación

El diseño se refiere a cómo se organiza la recolección y análisis de datos, por lo que para este estudio se concluye que la investigación tiene un diseño No-Experimental, Comparativo y Transversal. Es no-experimental comparativo porque no se manipulan las variables: se observa, recolecta y compara datos generados, y transversal porque implica que los datos se recogen en un solo momento o periodo.

3.6. Población y Muestra

3.6.1. Población

El universo de estudio corresponde a: *"las columnas y muros de corte de concreto armado con secciones más típicas en los libros de diseño estructural vigentes"*.

3.6.2. Muestra

Se realizó un muestreo no probabilístico intencional. Para que la muestra sea representativa, se incluyó un ejemplo de cada sección típica encontrada en los libros de diseño estructural, seleccionando un total de 10 secciones típicas:

- **6 columnas** con sección tipo: rectangular, L, T, cruz, circular, circular hueca; y
- **4 muros de corte**, con sección tipo: *H, T, C e I*.

3.7. Unidad de Análisis

Es: “la columna o muro de concreto armado con sección típica en libros de diseño estructural”, pues es el elemento de quien se obtienen los diagramas de interacción a ser medidos.

3.8. Variable

Variable Descriptiva: “Diagrama de Interacción de Flexocompresión biaxial”.

- Definición conceptual: es una superficie de falla tridimensional que representa todas las combinaciones limitantes posibles de P_u , M_{ux} y M_{uy} (kolapkar, 2023, p. 2).
- Definición operacional: la variable será medida aplicando el cálculo del error relativo porcentual sobre sus valores de capacidad de carga axial y de momentos biaxiales.

3.9. Métodos de Investigación

3.9.1. Método Hipotético – Deductivo

Se formula una hipótesis clara sobre la variación máxima aceptable (<5%) y se deducen consecuencias observables (diferencias entre diagramas) a partir de los datos obtenidos de las pruebas sobre modelos de secciones estructurales.

3.9.2. Método Comparativo

Se evalúan diferencias y similitudes entre los diagramas de interacción obtenidos desde los programas: DIMCOL, SAP2000, ETABS, CsiCOL y SpCOLUMN.

3.9.3. Método Computacional

Ejecución de programas y algoritmos para generar diagramas de interacción y obtener datos reproducibles y medibles.

3.9.4. Método Analítico-Sintético

Para el presente estudio esto se evidencia en los siguientes procesos:

3.9.4.1. *Análisis*

Para este estudio, se descompone la información relacionada sobre diagramas de interacción en bloques de conocimientos más pequeños para entender y analizar el problema:

- Algoritmos, formulaciones, hipótesis y normativas,
- Procesos computacionales con SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS, y un programa de elaboración propia.
- Los diagramas de interacción generados para los casos de estudio.

3.9.4.2. *Síntesis*

En este estudio, luego se integran los resultados parciales para formar una visión global y coherente de la variación de los diagramas de interacción obtenidos desde diferentes programas estructurales, combinando:

- Datos procesados,
- Superposición de Diagramas de Interacción, y
- Comparaciones numéricas (errores relativos).

3.10. Procedimientos y Recolección de Datos

A continuación, se empieza el estudio de los modelos de sección para columnas y muros de corte que se seleccionaron en la muestra, describiendo sus características y consideraciones estructurales. Además, se muestra el procedimiento computacional para la obtención de los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial y la recolección de datos en formatos excel, usando los programas DIMCOL, SAP2000, ETABS, CsiCOL y SpCOLUMN.

3.10.1. Recolección de Datos de Casos de Estudio

3.10.1.1. Modelos de Columna

3.10.1.1.1. Modelo C1-(30X30)

La sección de la columna es cuadrada, con una dimensión de 30 cm de lado (mínimo según ACI 318-25 §18.7.2.1-a) y para este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 23

Dimensiones Geométricas del Modelo C1-(30X30).

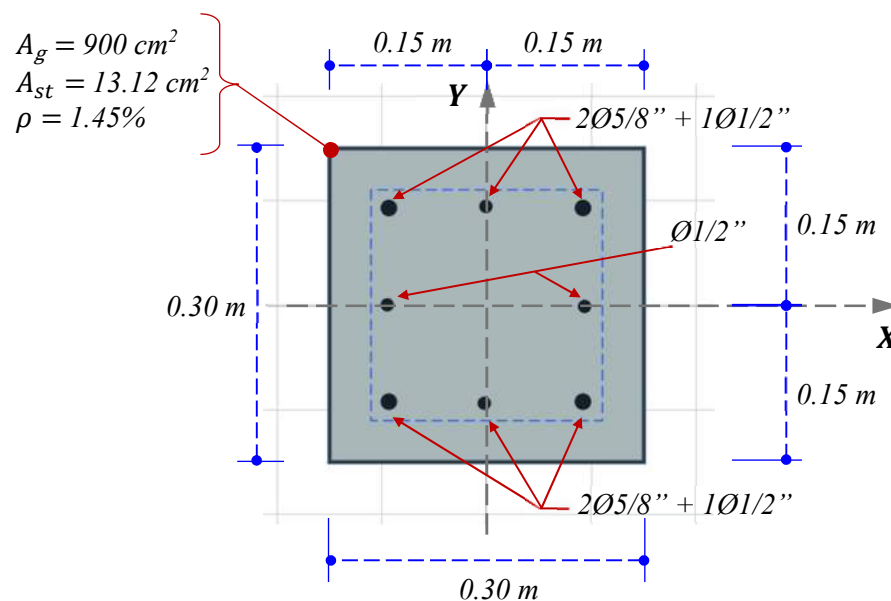


Tabla 4

Coordenadas de Esquinas del Modelo C1-(30X30).

Punto	X	Y
1	0.1500	0.1500
2	-0.1500	0.1500
3	-0.1500	-0.1500
4	0.1500	-0.1500

Tabla 5

Coordenadas de Barras de Acero del Modelo C1-(30X30).

Punto	X	Y	Ø
1	-0.0925	0.0925	5/8"
2	-0.0925	-0.0925	5/8"
3	0.0925	-0.0925	5/8"
4	0.0925	0.0925	5/8"
5	-0.0941	0.0000	1/2"
6	0.0000	0.0941	1/2"
7	0.0941	-0.0015	1/2"
8	-0.0015	-0.0941	1/2"

b. Información General:

Propiedades del Concreto:

<i>Resistencia a la compresión (f'_c)</i>	=	210 kg/cm ²
<i>Peso Específico (w_e)</i>	=	2400.00 kg/m ³
<i>Módulo de Elasticidad (E_c)</i>	=	217370.651 kg/cm ²
<i>Deformación unitaria máxima (ϵ_c)</i>	=	0.003
<i>Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)</i>	=	0.85

Propiedades del Acero:

<i>Resistencia del Acero - Fluencia (f_y)</i>	=	4200.00 kg/cm ²
<i>Módulo de Elasticidad (E_s)</i>	=	2,000,000.00 kg/cm ²
<i>Deformación unitaria máxima (f_y/E_s)</i>	=	0.0021

Tipo de Confinamiento:

<i>Confinamiento de acero longitudinal</i>	=	"Estribo"
--	---	-----------

Verificación de Cuantía:

$1\% < \rho < 8\%$	=	"Cumple"
--------------------	---	----------

Factores de reducción de resistencia:

Factor de reducción por compresión (ϕ_{comp}) = 0.65

Factor de reducción por tracción (ϕ_{trac}) = 0.90

Factor de máxima carga axial (ϕ_{max}) = 0.80

c. Recolección de Datos:

c.1. Programa DIMCOL v1.0

Figura 24

Recubrimiento y Propiedades del Concreto y el Acero en DIMCOL.

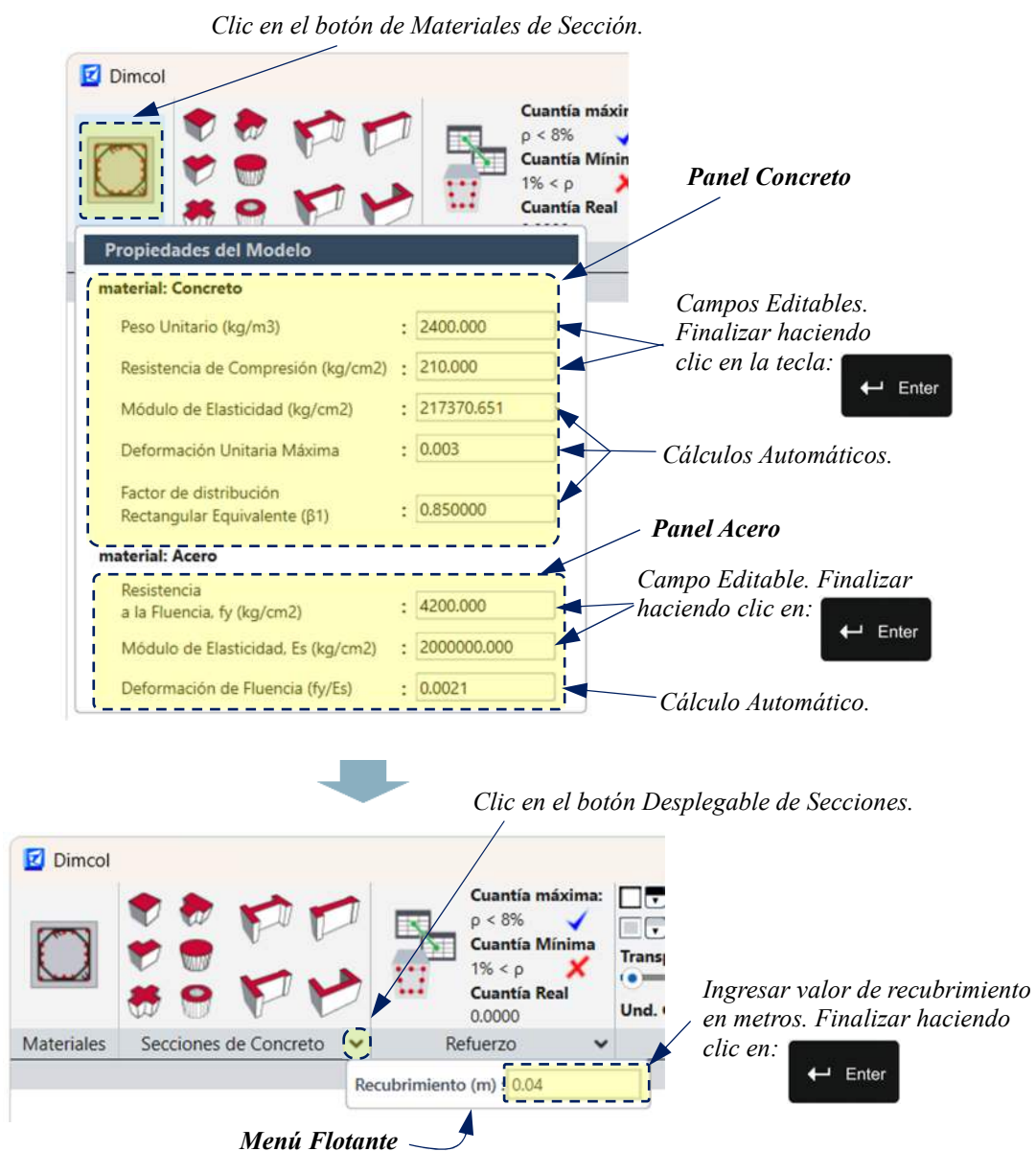
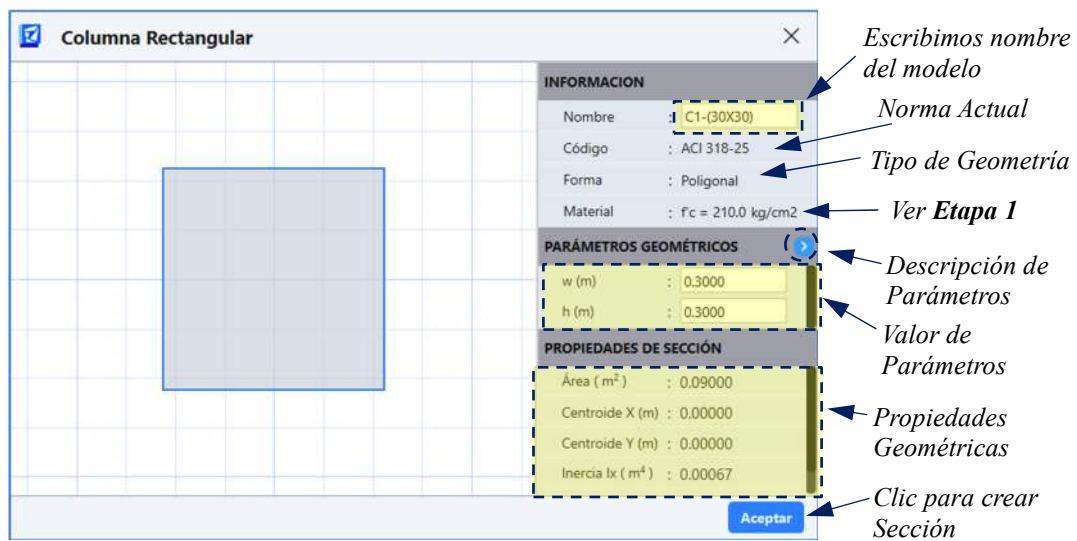


Figura 25

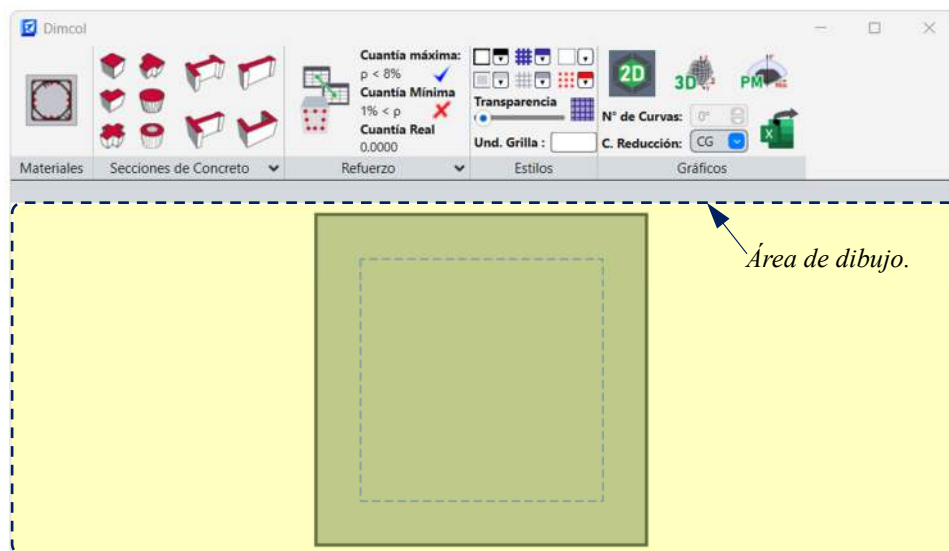
Creación de Sección Transversal de Concreto en DIMCOL.



(a) selección de tipo de sección.



(b) definición de parámetros de sección.



(c) visualización de sección en el área de dibujo.

Figura 26

Confinamiento y Dimensiones de Barras de Acero en DIMCOL.

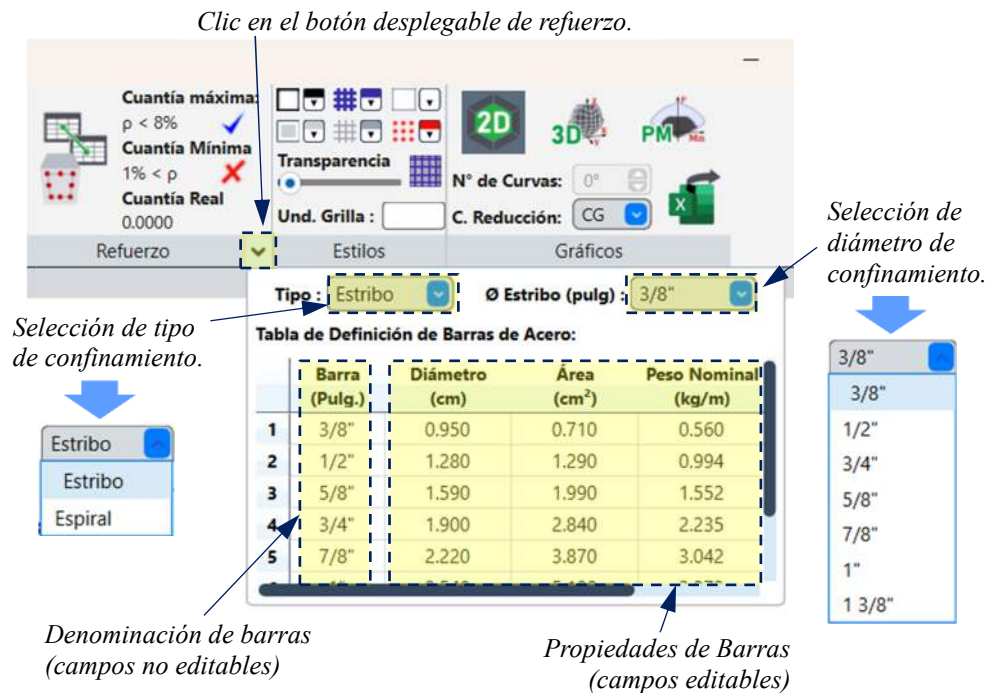


Figura 27

Creación Manual de Barras de Acero en DIMCOL.

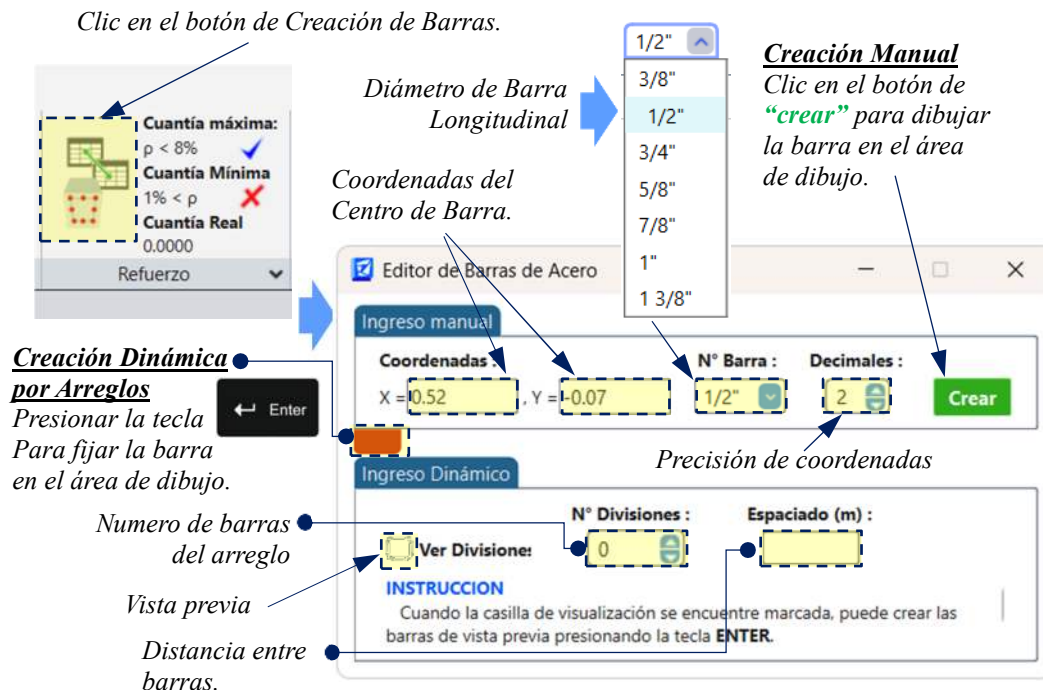
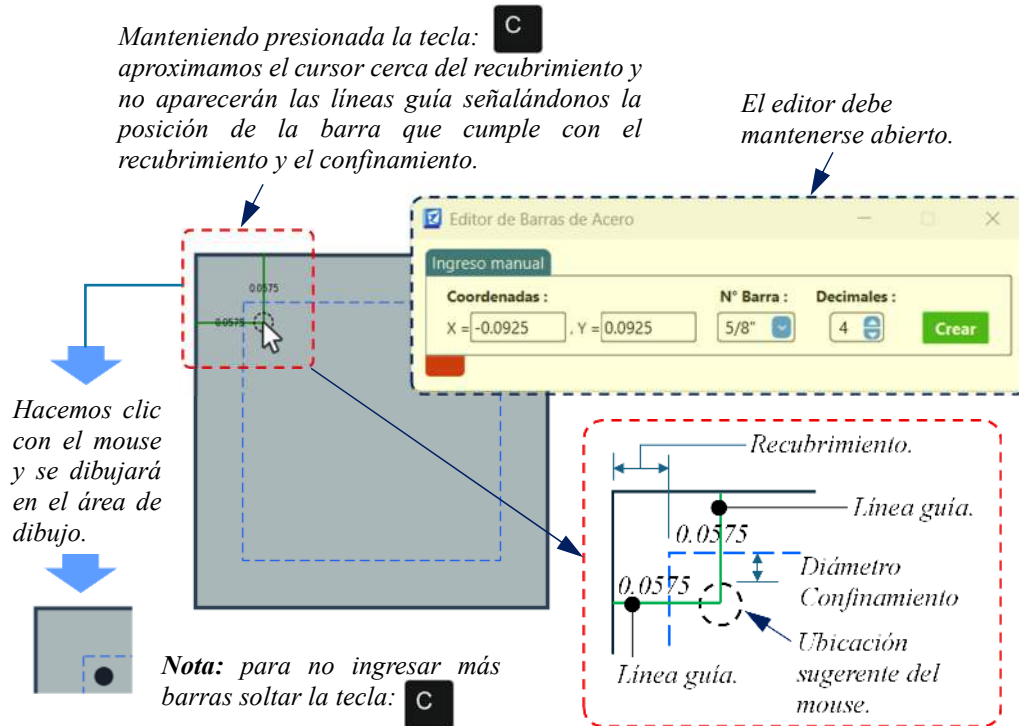
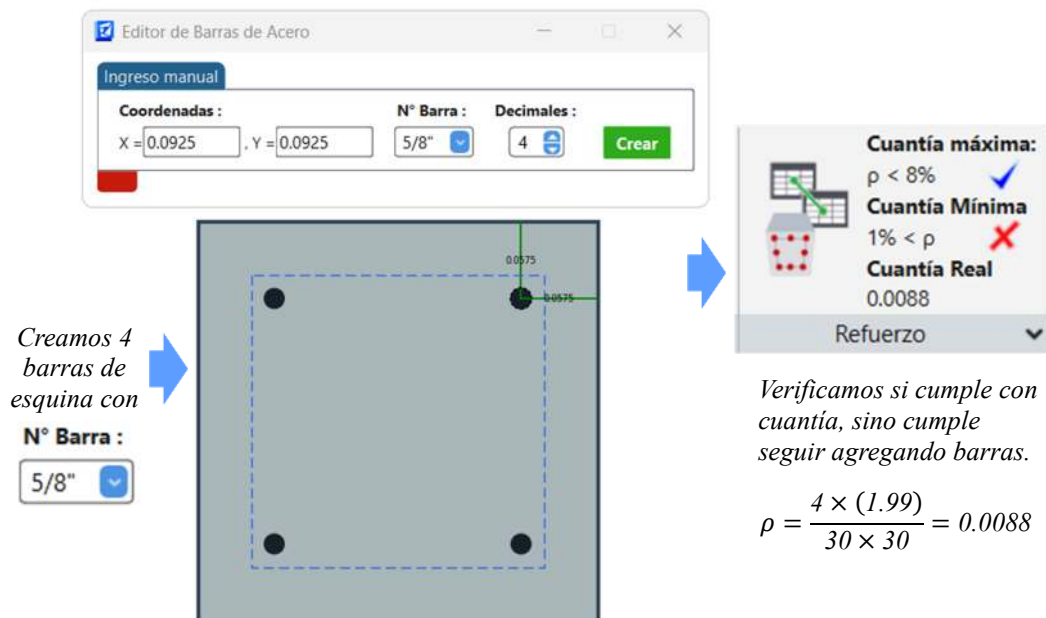


Figura 28

Creación de Refuerzo de Esquinas en DIMCOL.



(a) Interacción (Snaps) del mouse para ubicación de barras.



(b) creación de barras de esquina y verificación de cuantía.

Figura 29

Creación de Refuerzo de Intermedio y Centro de Reducción en DIMCOL.



Activamos Vista Previa
Aproximamos el mouse a la línea imaginaria y paralela al recubrimiento para que se muestre la línea guía y el arreglo de barras sugeridas.

Indicamos una (1) barra entre barras seleccionadas.

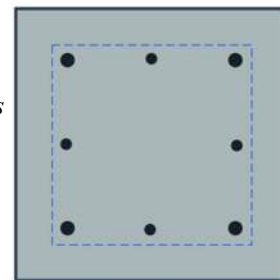
Verificamos la distancia entre barras (recomendado ≥ 0.05 m).

Con el foco en el área de dibujo y con las líneas guías visibles, presionamos **Enter** + **Esc** para que se cree en el área de dibujo.



Creamos 4 barras de intermedias con

N° Barra : 1/2"

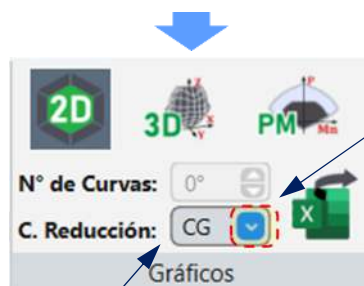


Verificamos que ahora si se cumple con la cuantía:

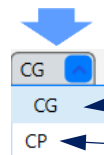
$$\rho = \frac{4 \times (1.99) + 4 \times (1.29)}{30 \times 30} = 0.0145$$

Nota: para iterar más opciones de líneas guía se puede presionar, entre los puntos seleccionados la tecla:

Space



Hacemos clic en el botón desplegable para seleccionar el centro de reducción.



Centroide Geométrico

Centroide Plástico

Seleccionamos el Centroide Geométrico

Figura 30

Creación de los Diagramas de Interacción 3D en DIMCOL.

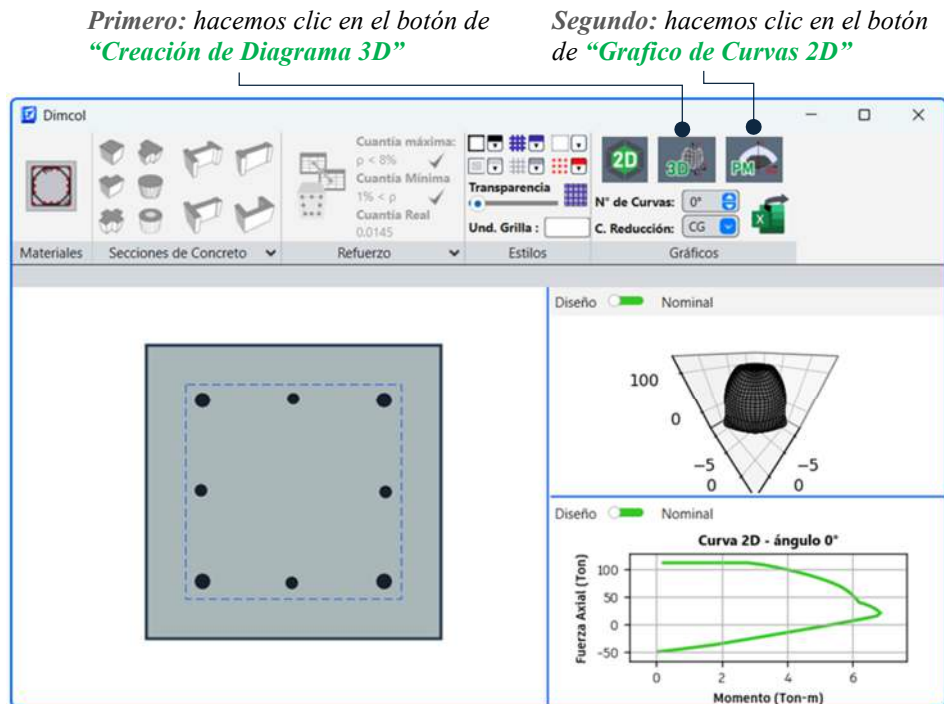


Figura 31

Exportación de los Diagramas de Interacción en DIMCOL.

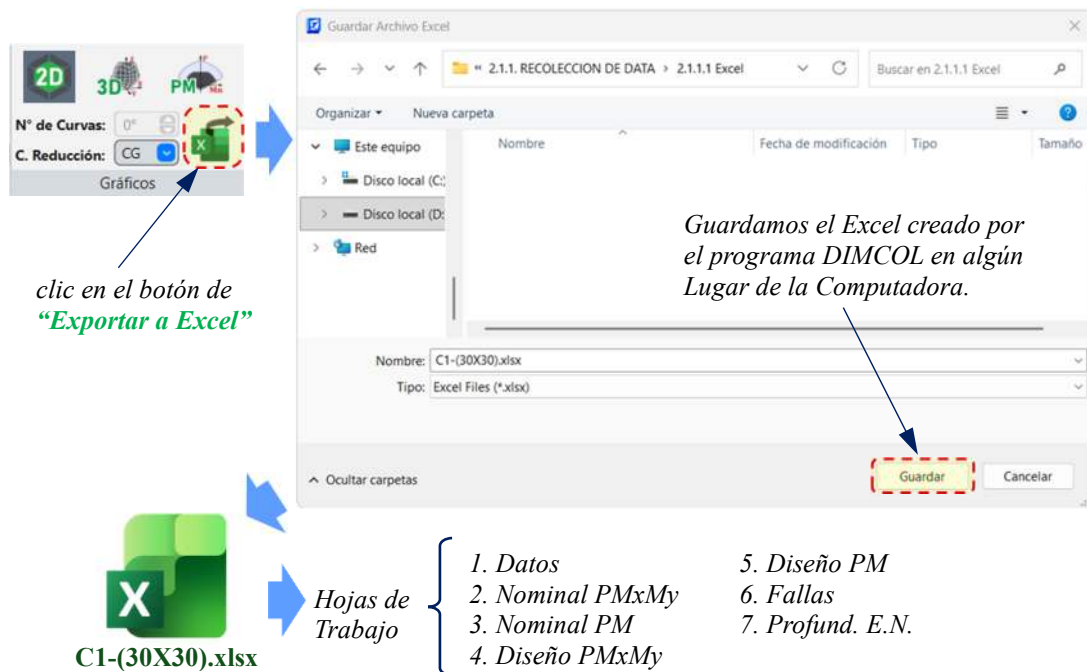


Figura 32

Datos Exportados del Diagrama de Interacción Nominal de DIMCOL.

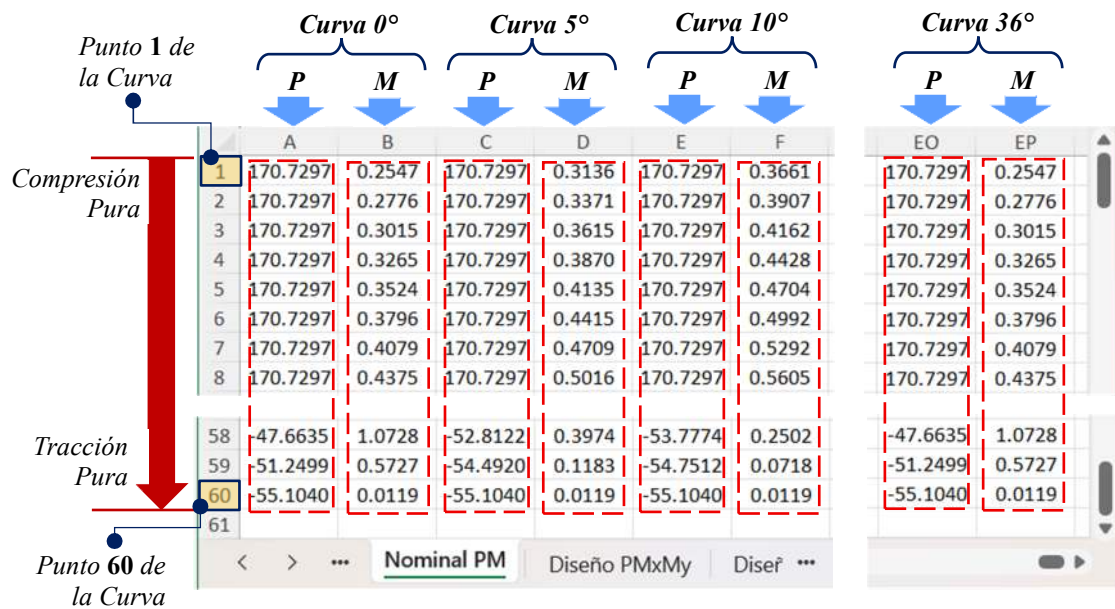
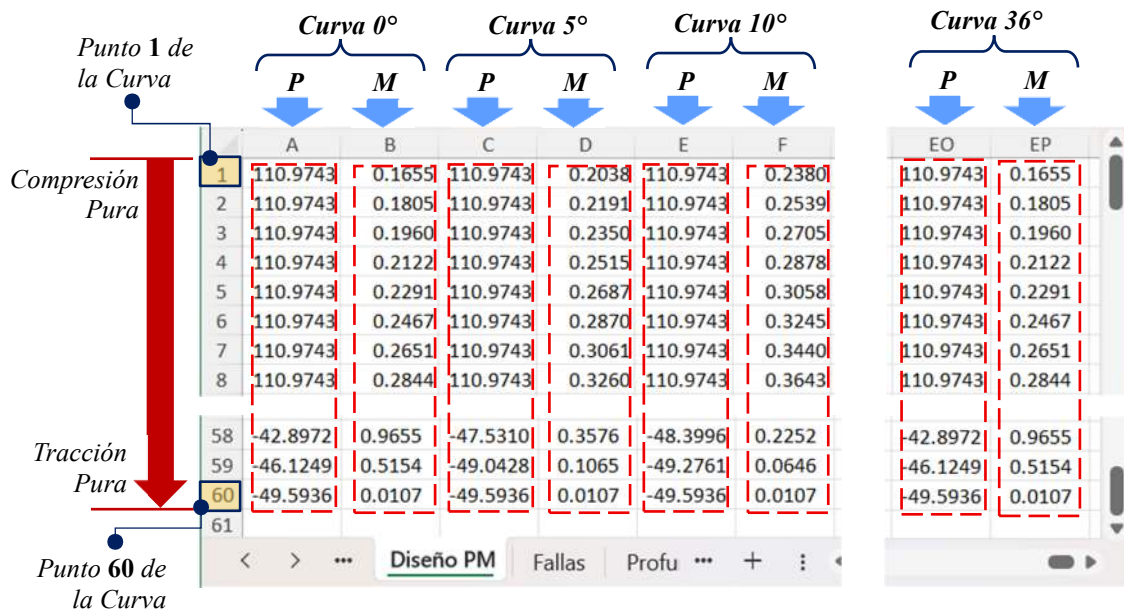


Figura 33

Datos Exportados del Diagrama de Interacción de Diseño de DIMCOL.



c.2. Programa SAP2000 v26

Figura 34

Definición de las Propiedades de los Materiales en SAP2000.

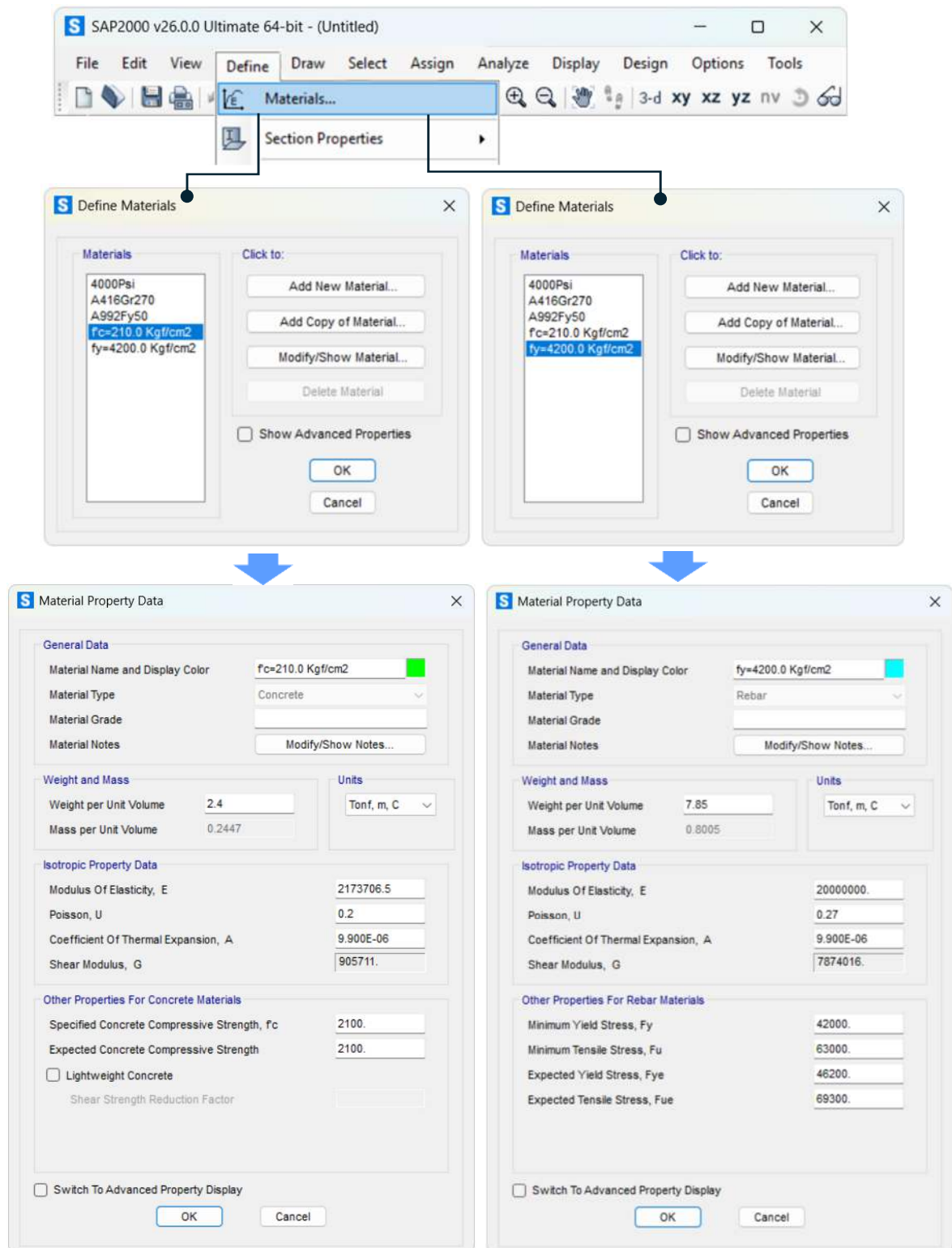


Figura 35

Configuración de Curvas y Normativa ACI en SAP2000.

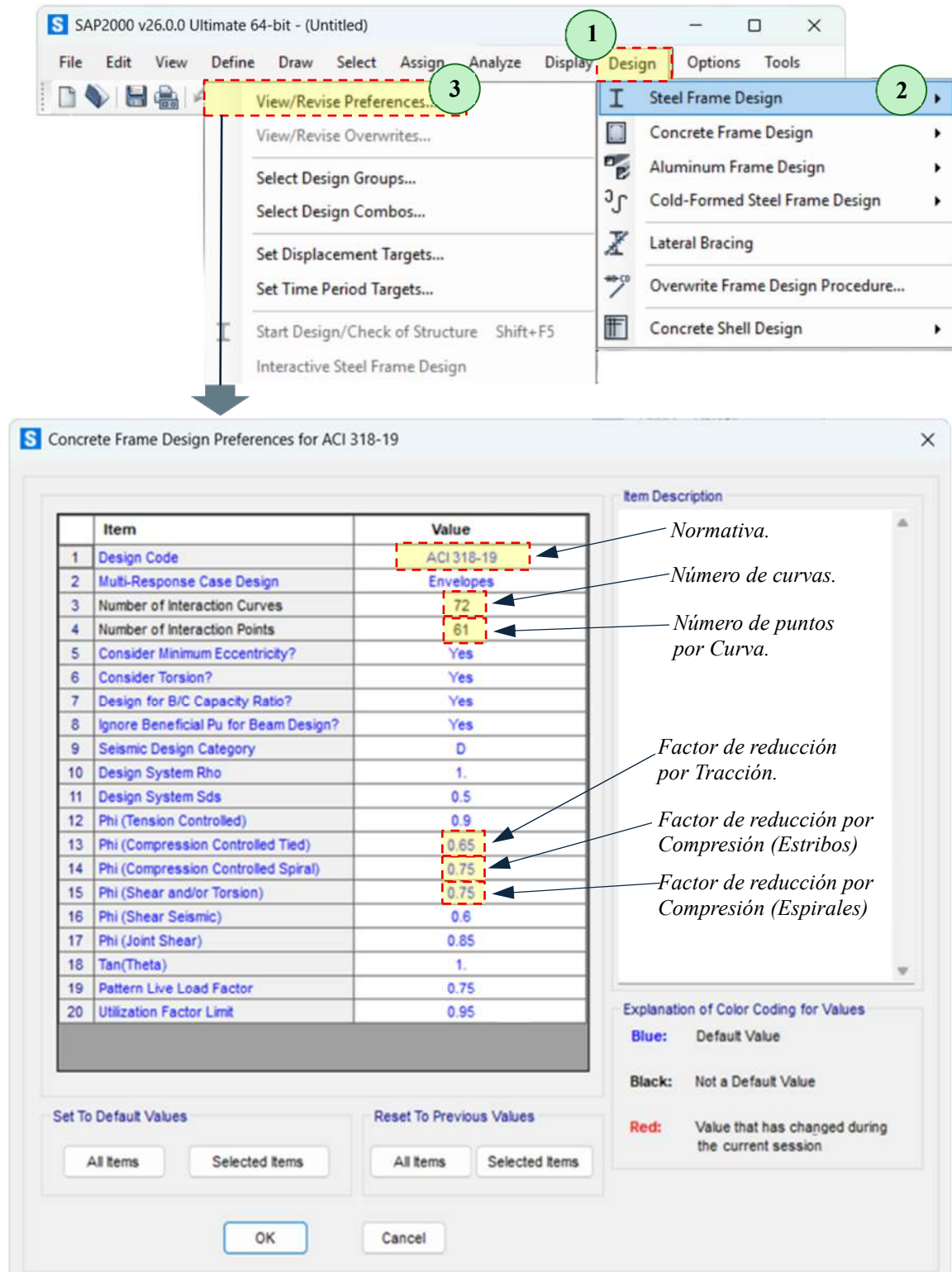


Figura 36

Creación de la Sección Transversal de Concreto en SAP2000.

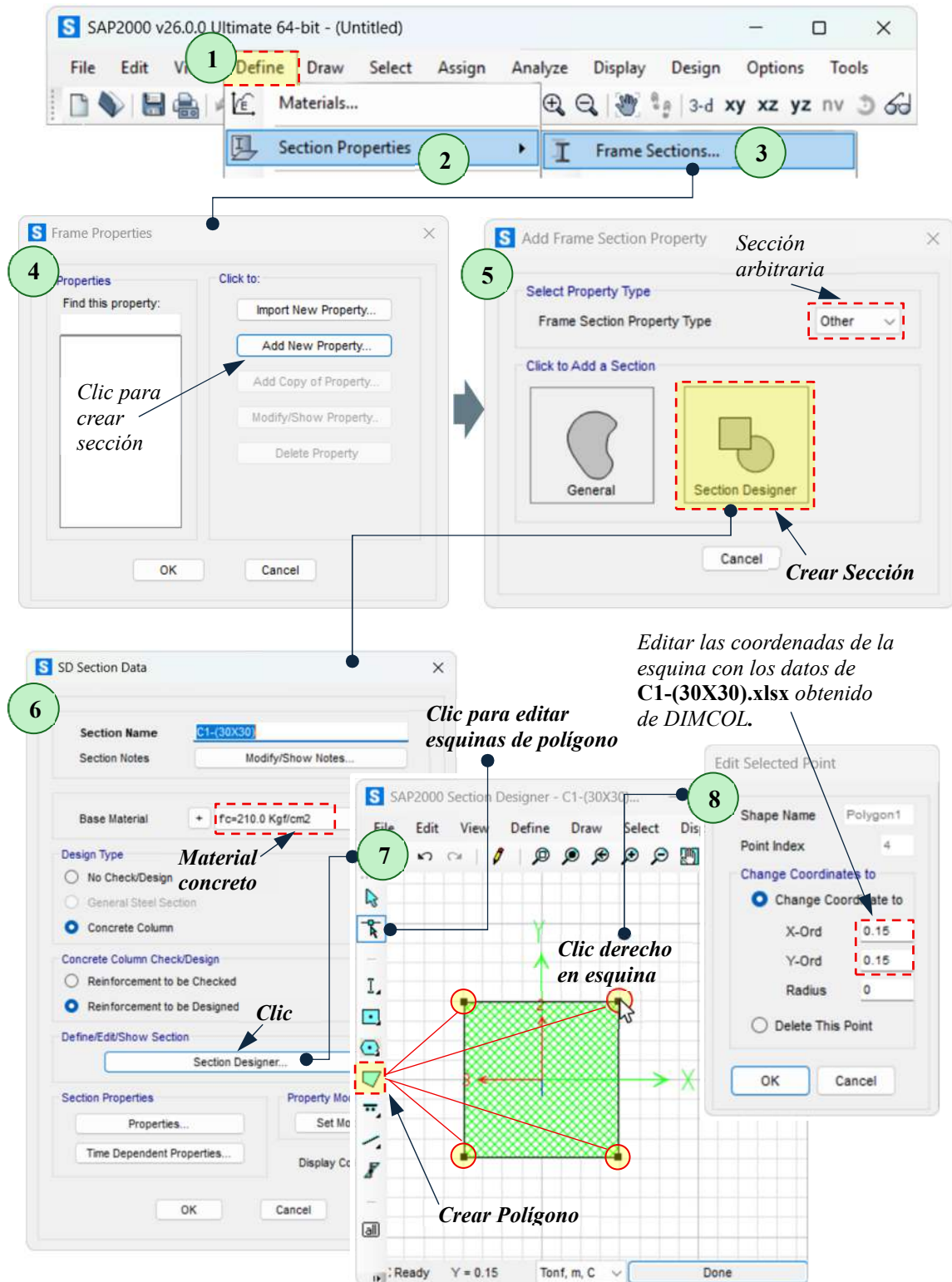


Figura 37

Definición de Barras de Acero y Refuerzo Longitudinal en SAP2000.

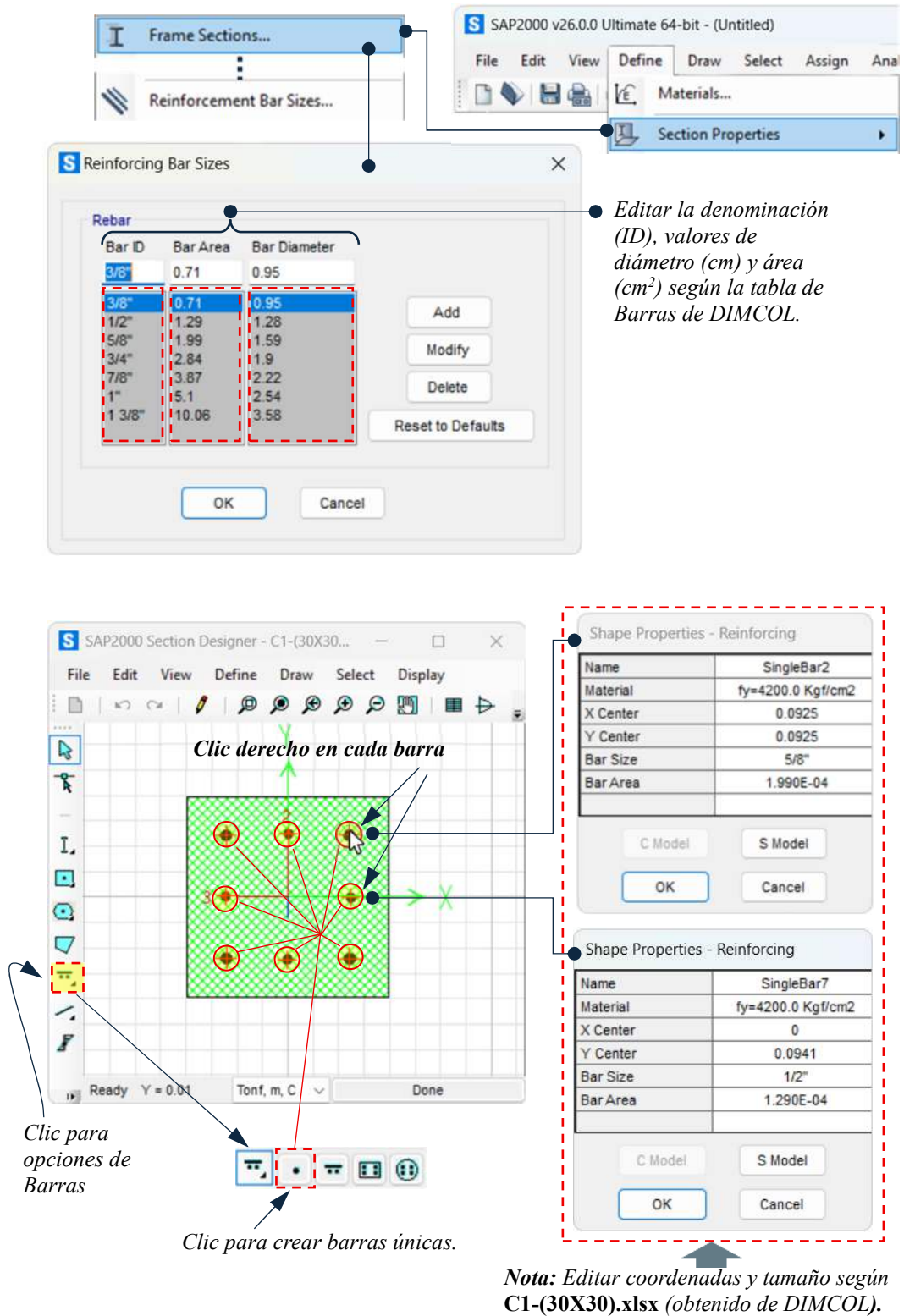
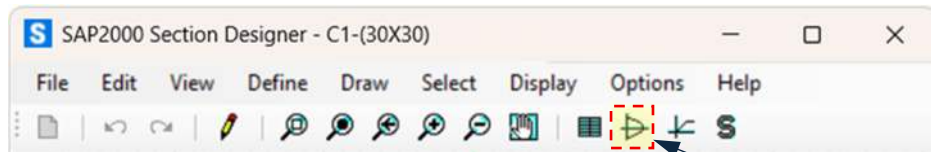


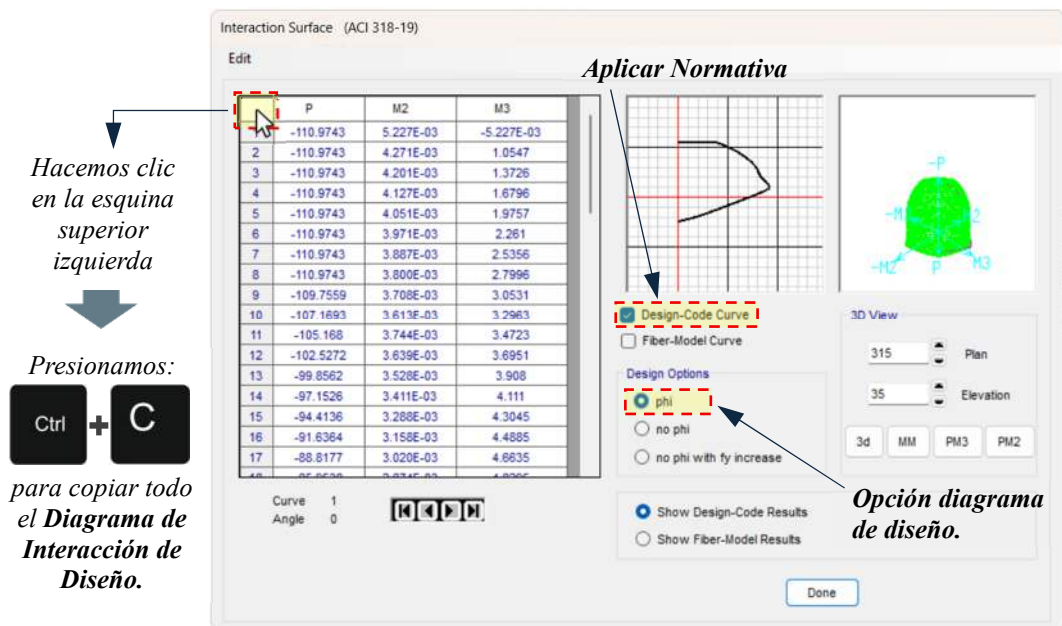
Figura 38

Creación de los Diagramas de Interacción 3D en SAP2000.

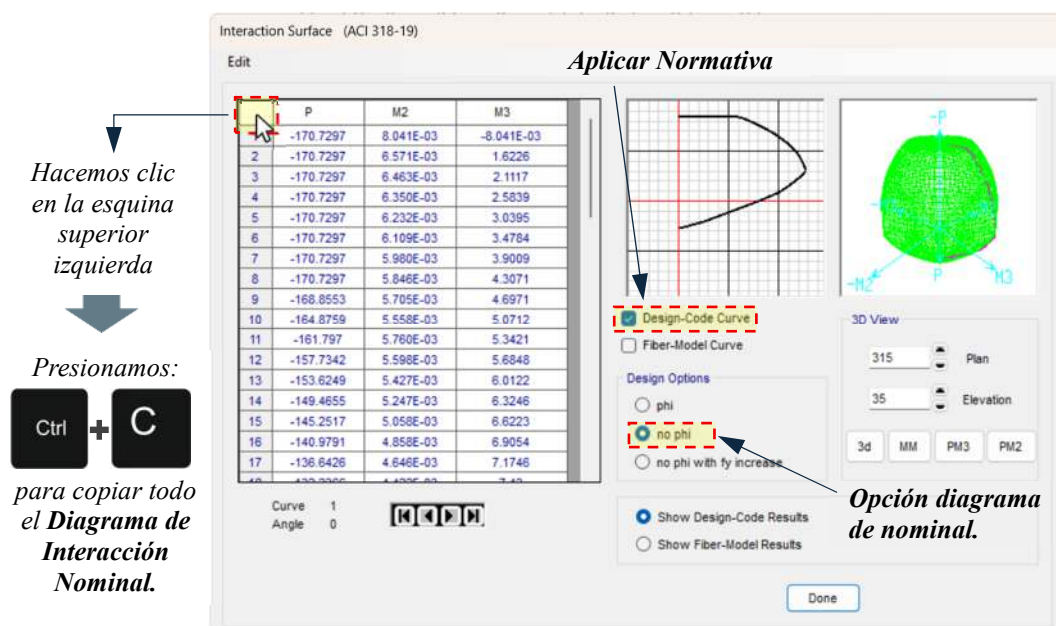


(a) Creación de los Diagrama de Interacción.

Clic para generar diagramas de Interacción.



(b) Configuración y Copia del Diagrama de Diseño.



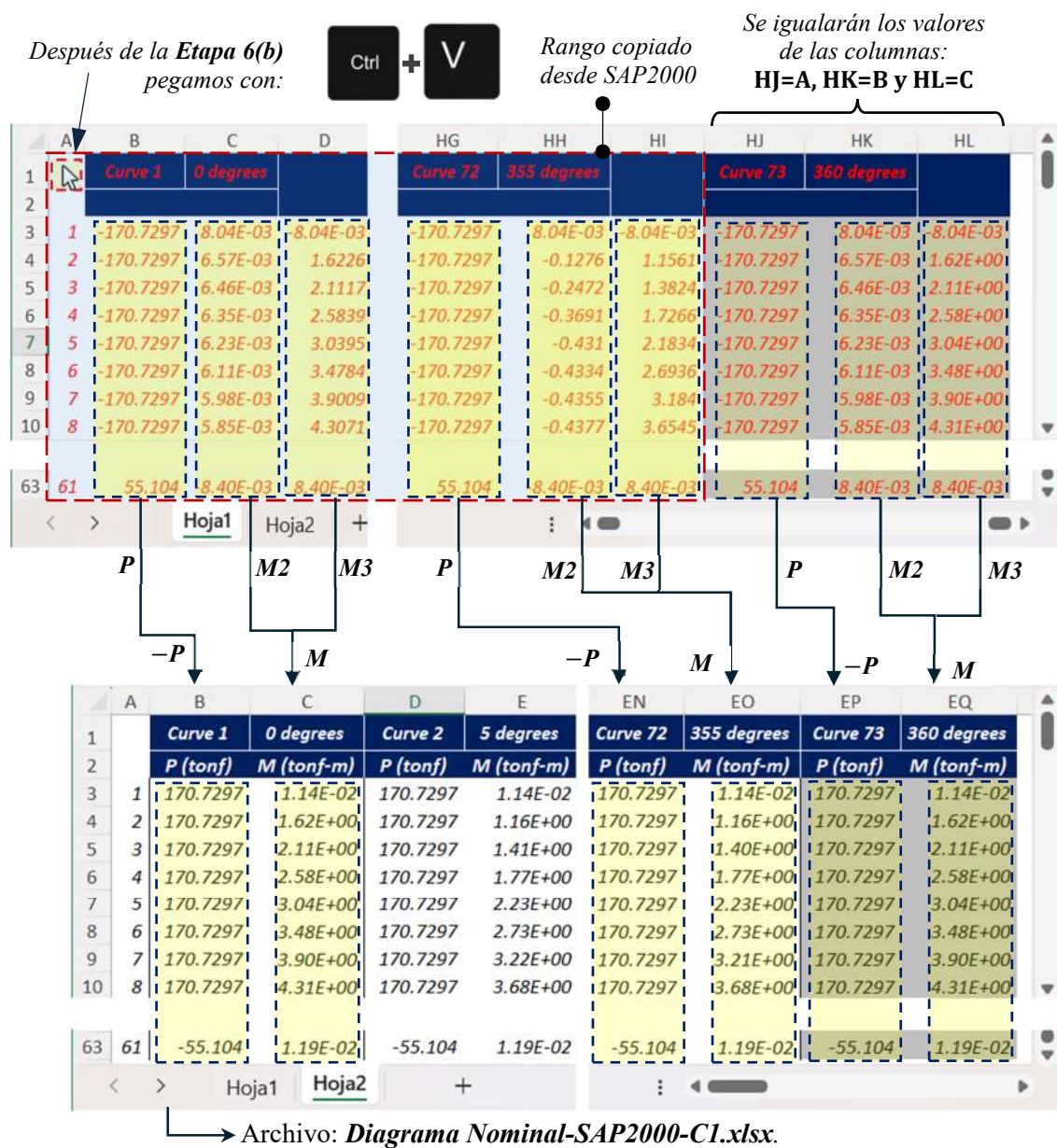
(c) Configuración y Copia del Diagrama Nominal.

Crearemos el archivo: **Diagrama Nominal-SAP2000-C1.xlsx** con dos hojas, en la “**hoja 1**” seleccionamos la celda A1 y pegamos con Ctrl+V, y en la “**hoja 2**” para cada curva invertimos el valor de la carga axial ($-P$) y calculamos el valor del

$$\text{momento resultante con: } M = \sqrt{M_2^2 + M_3^2}.$$

Figura 39

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de SAP2000.

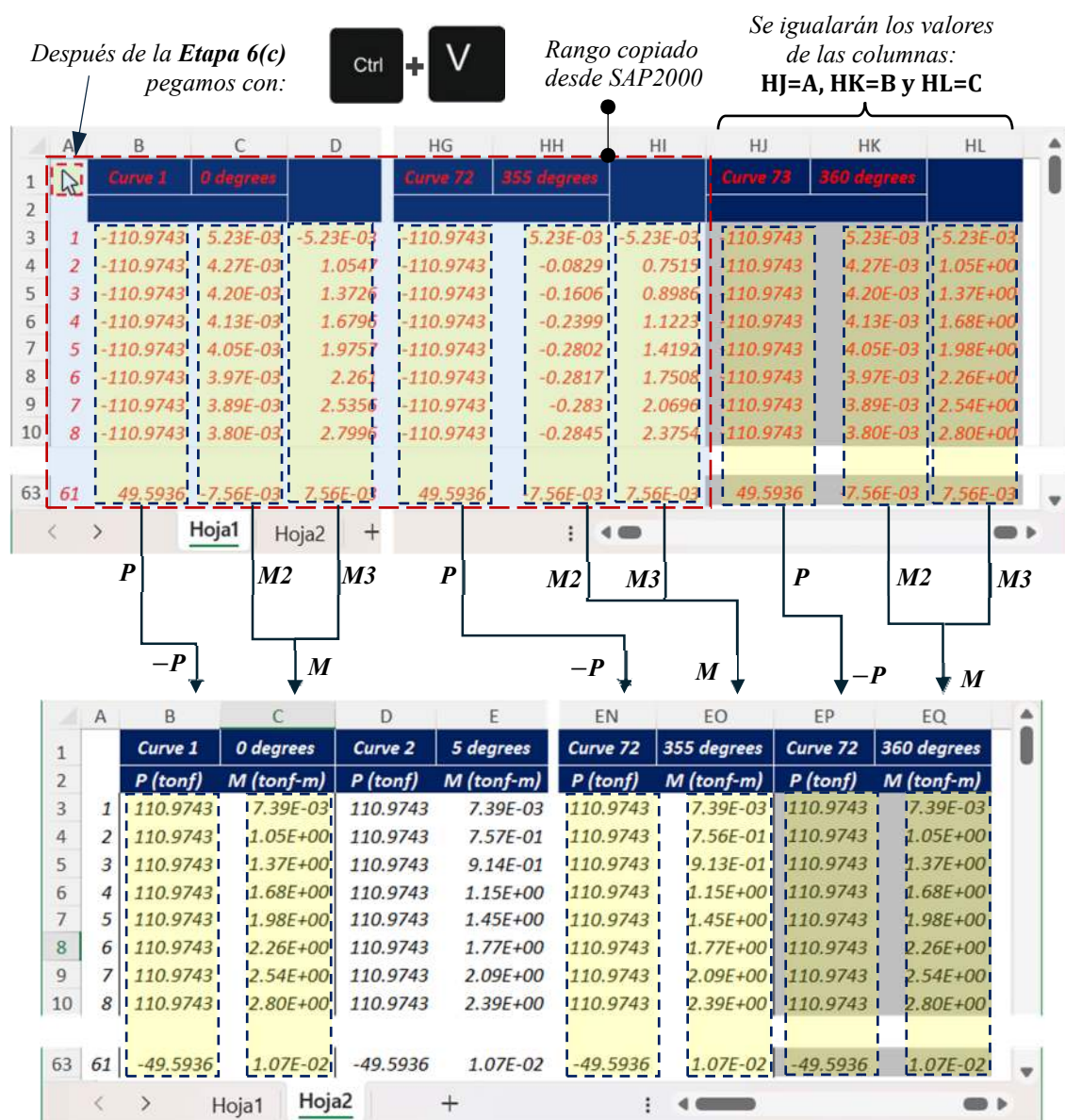


Crearemos el archivo: **Diagrama Diseño-SAP2000-C1.xlsx** con dos hojas, en la “**hoja 1**” seleccionamos la celda A1 y pegamos con Ctrl+V, y en la “**hoja 2**” para cada curva invertimos el valor de la carga axial ($-P$) y calculamos el valor del

$$\text{momento resultante con: } M = \sqrt{M_2^2 + M_3^2}.$$

Figura 40

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de SAP2000.



Archivo: **Diagrama Diseño-SAP2000-C1.xlsx**.

c.3. Programa ETABS v21

Figura 41

Definición de las Propiedades de los Materiales en ETABS.

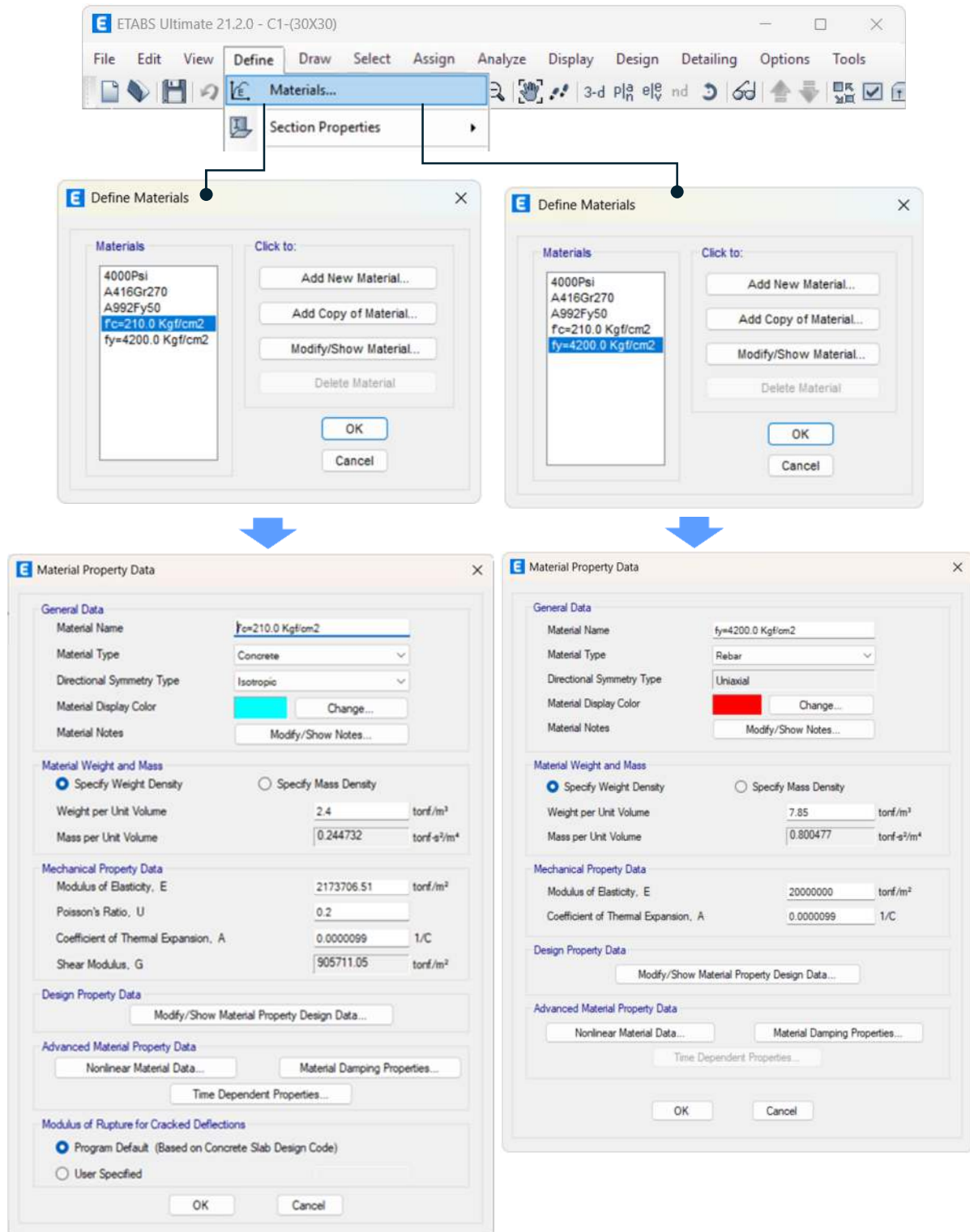


Figura 42

Configuración de Curvas y Normativa ACI en ETABS.

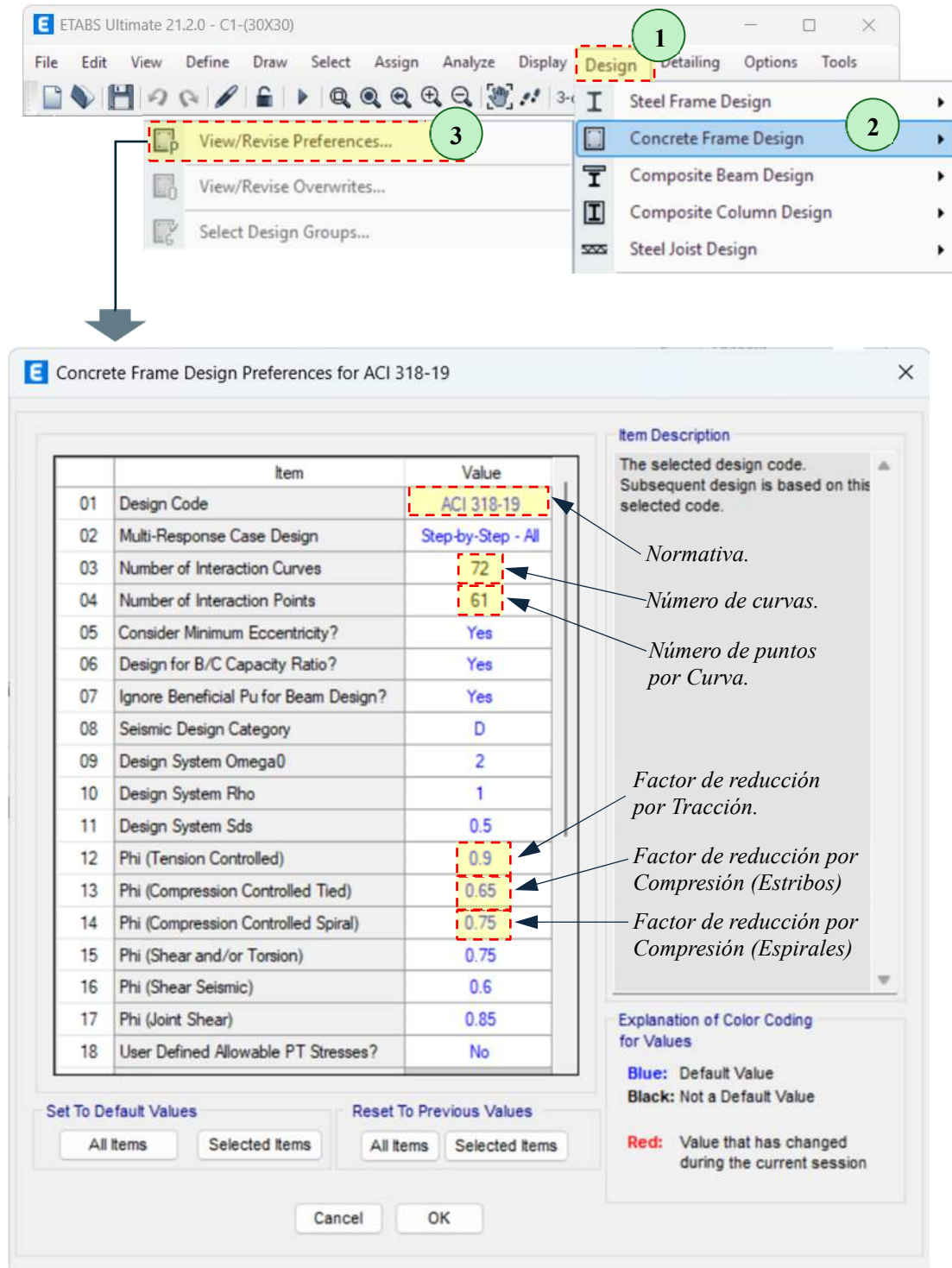
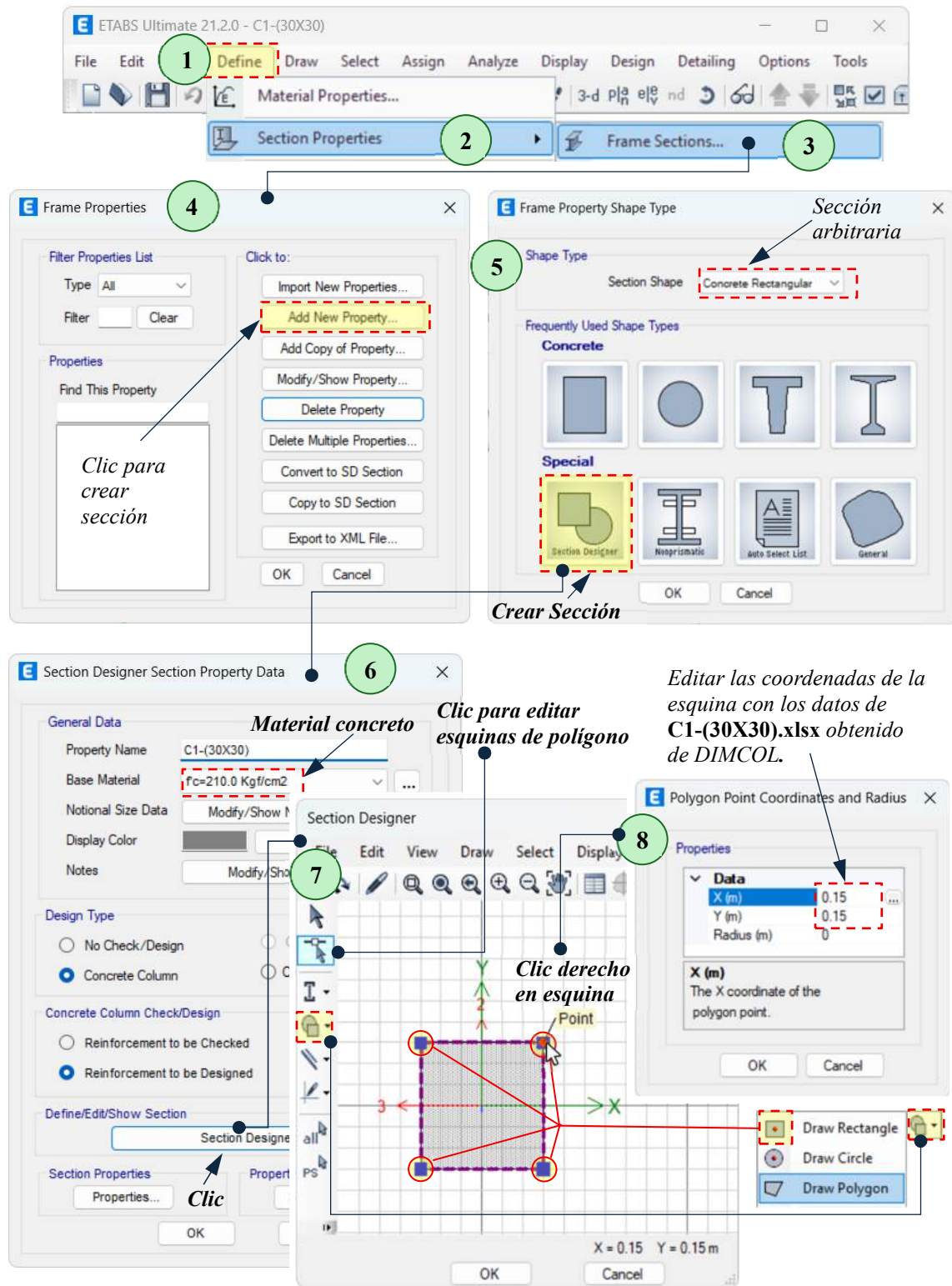


Figura 43

Creación de Sección Transversal de Concreto en ETABS.



Definición de Barras de Acero y Refuerzo Longitudinal en ETABS.

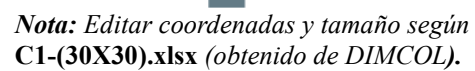
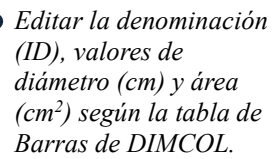
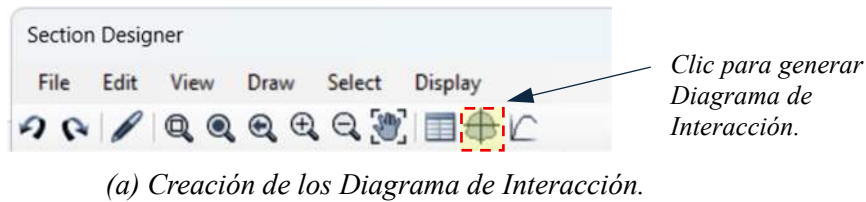
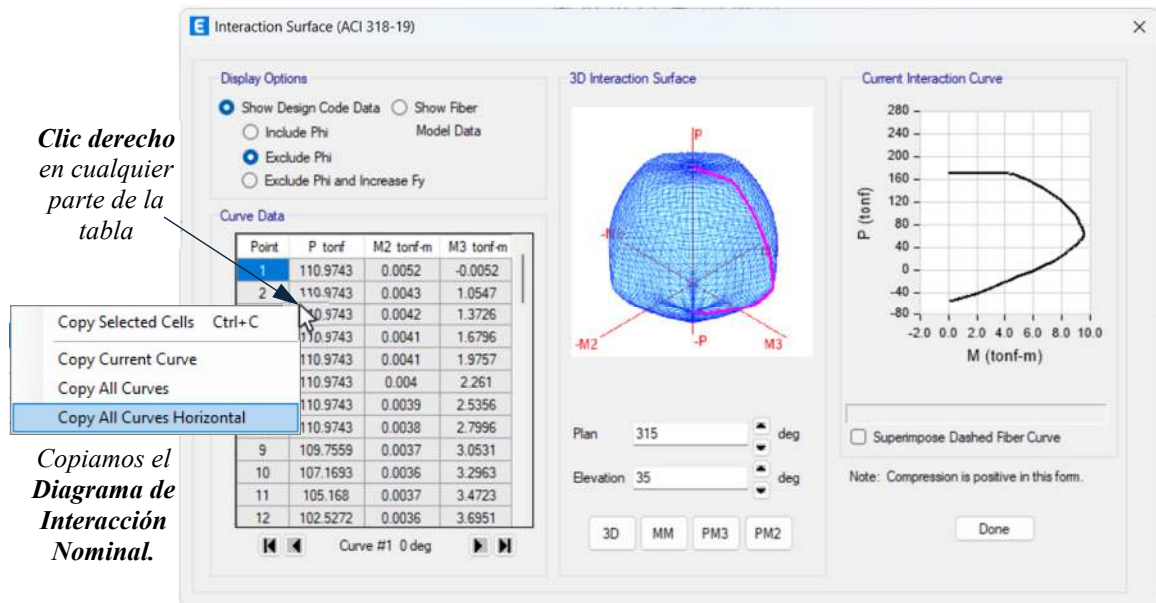


Figura 45

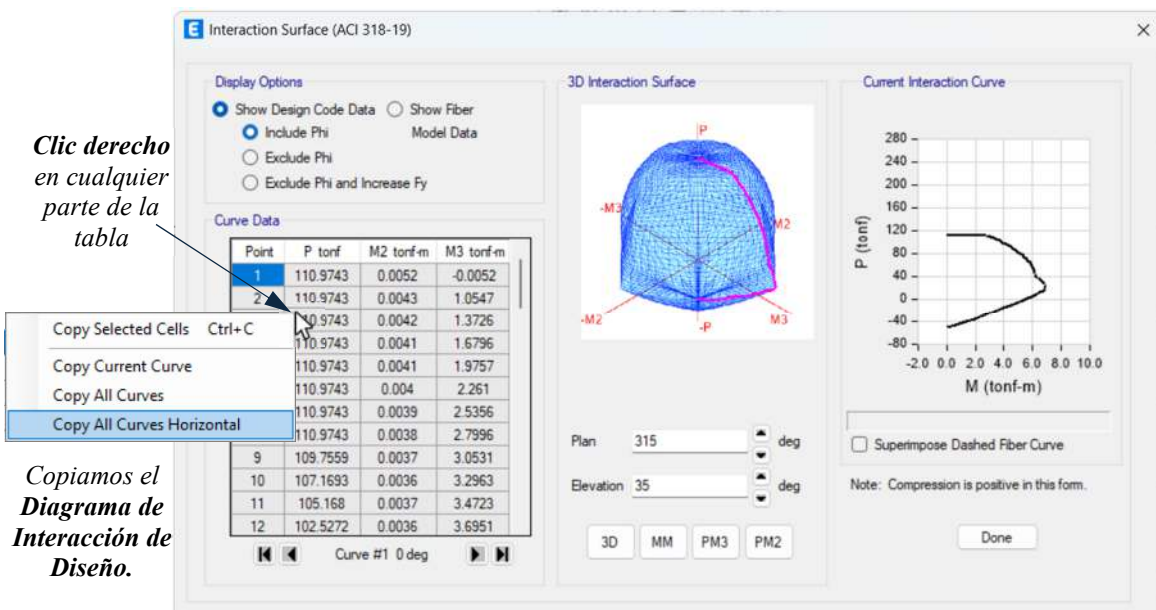
Creación de los Diagramas de Interacción 3D en ETABS.



(a) Creación de los Diagrama de Interacción.



(b) Configuración y Copia del Diagrama de Diseño.



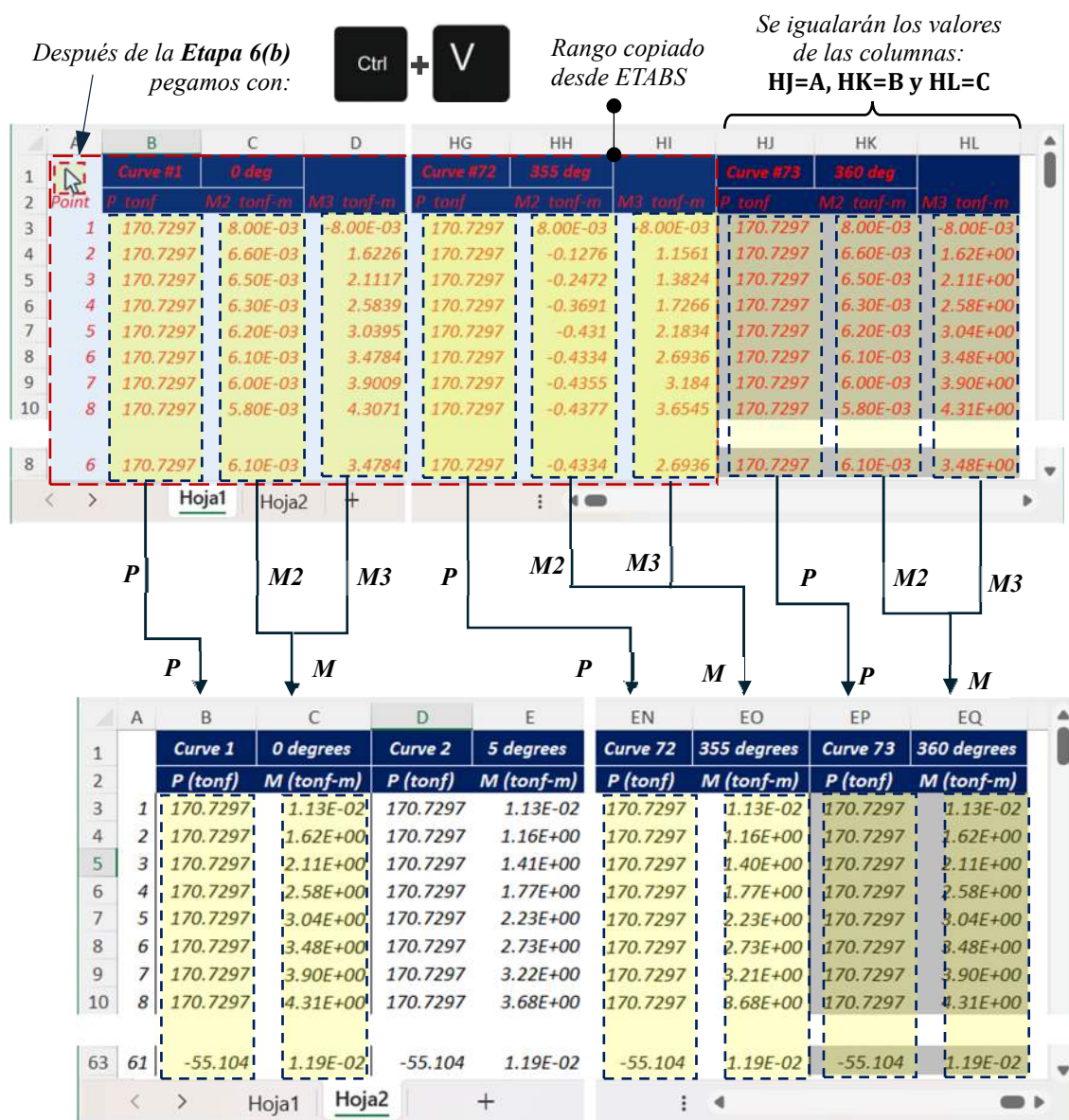
(c) Configuración y Copia del Diagrama Nominal.

Crearemos el archivo: **Diagrama Nominal-ETABS-C1.xlsx** con dos hojas, en la “**hoja 1**” seleccionamos la celda A1 y pegamos con Ctrl+V, y en la “**hoja 2**” para cada curva mantenemos el valor de la carga axial (**P**) y calculamos el valor del

$$\text{momento resultante con: } M = \sqrt{M_2^2 + M_3^2}.$$

Figura 46

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de ETABS.

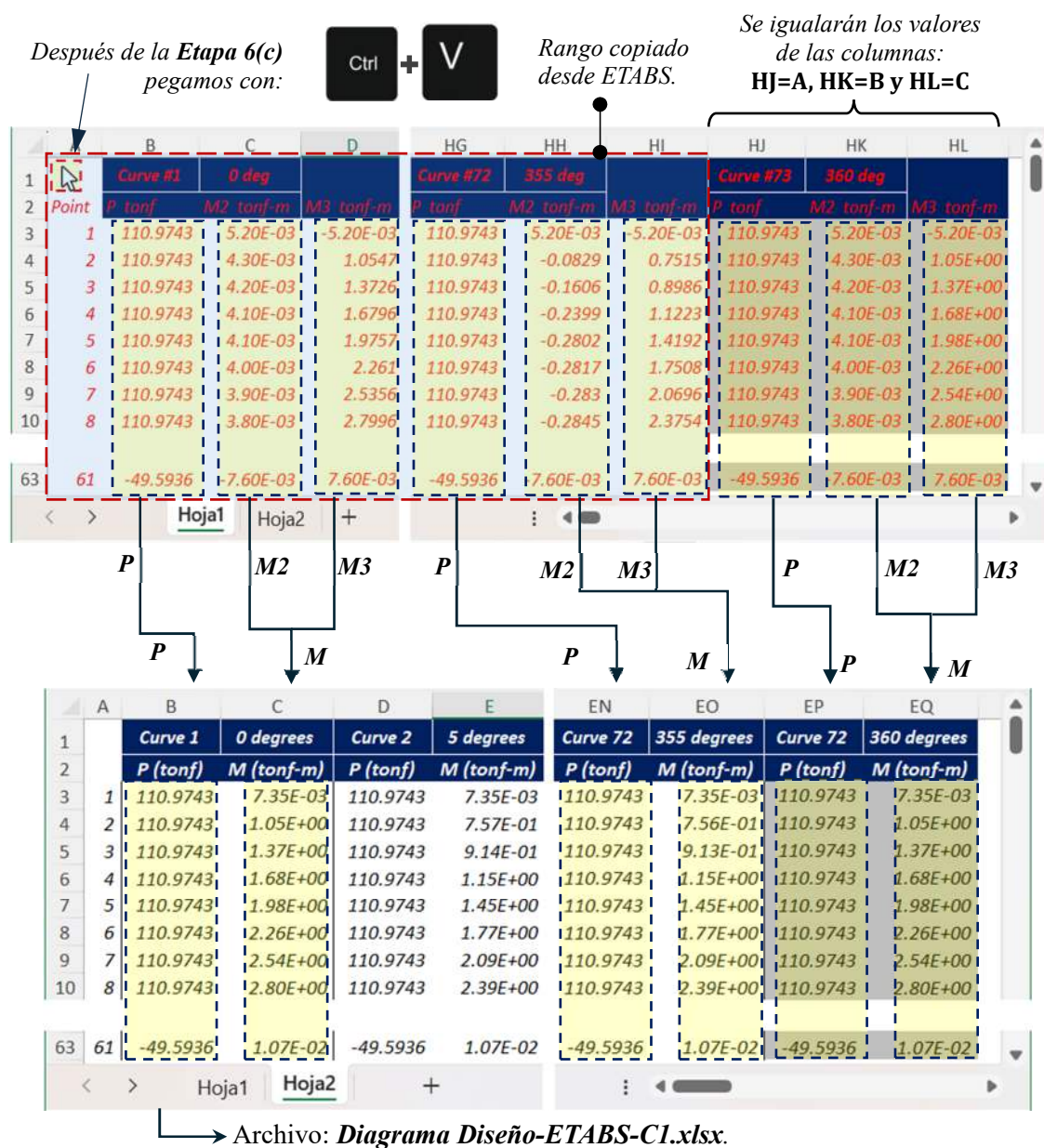


→ Archivo: **Diagrama Nominal-ETABS-C1.xlsx**.

Crearemos el archivo: **Diagrama Diseño-ETABS-C1.xlsx** con dos hojas, en la “**hoja 1**” seleccionamos la celda A1 y pegamos con Ctrl+V, y en la “**hoja 2**” para cada curva mantenemos el valor de la carga axial (P) y calculamos el valor del momento resultante con: $M = \sqrt{M_2^2 + M_3^2}$.

Figura 47

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de ETABS.



c.4. Programa CsiCOL v11

Figura 48

Definición de Barras, Normativa y Materiales en CsiCOL.

Unidades SI

Normativa ACI 318-19

Clic en "Options"

Factores de Reducción según la Norma ACI 318-19

Configurar con los datos de barra en DIMCOL.

Clic en "Define"

Tipo de Confinamiento

Factor de Conversión:
 $1\text{MPa} = 0.0980665\text{ kg/cm}^2$

Add Rebar Sets

BAR NAME	DIAMETER (MM)	AREA (MM²)
1	3/8"	9.50
2	1/2"	12.80
3	5/8"	15.90
4	3/4"	19.00
5	7/8"	22.20
6	1"	25.40
7	1 3/8"	35.80

Define Materials

Materials

- Steel (A36)
- fc_210.0 kg/cm2
- fy_4200.0 kg/cm2

Material Properties

GENERAL

Name: fy_4200.0 kg/cm2

Type: Rebar

Material Grade: Grade 60

Stress-Strain Curve: Park Strain Harder

PROPERTIES

Elastic Modulus MPa: 196133

Minimum Yield Stress MPa: 411.88

Minimum Tensile Stress MPa: 620

Expected Yield Stress MPa: 468.84

Expected Tensile Stress MPa: 655

Define Materials

Materials

- Steel (A36)
- fc_210.0 kg/cm2
- fy_4200.0 kg/cm2

Material Properties

GENERAL

Name: fc_210.0 kg/cm2

Type: Concrete

Material Grade: Grado 60

PROPERTIES

Elastic Modulus MPa: 21316.78

Compressive Strength MPa: 20.59

Tensile Strength MPa: 3.09

Figura 49

Creación de Sección Transversal de Concreto en CsiCOL.

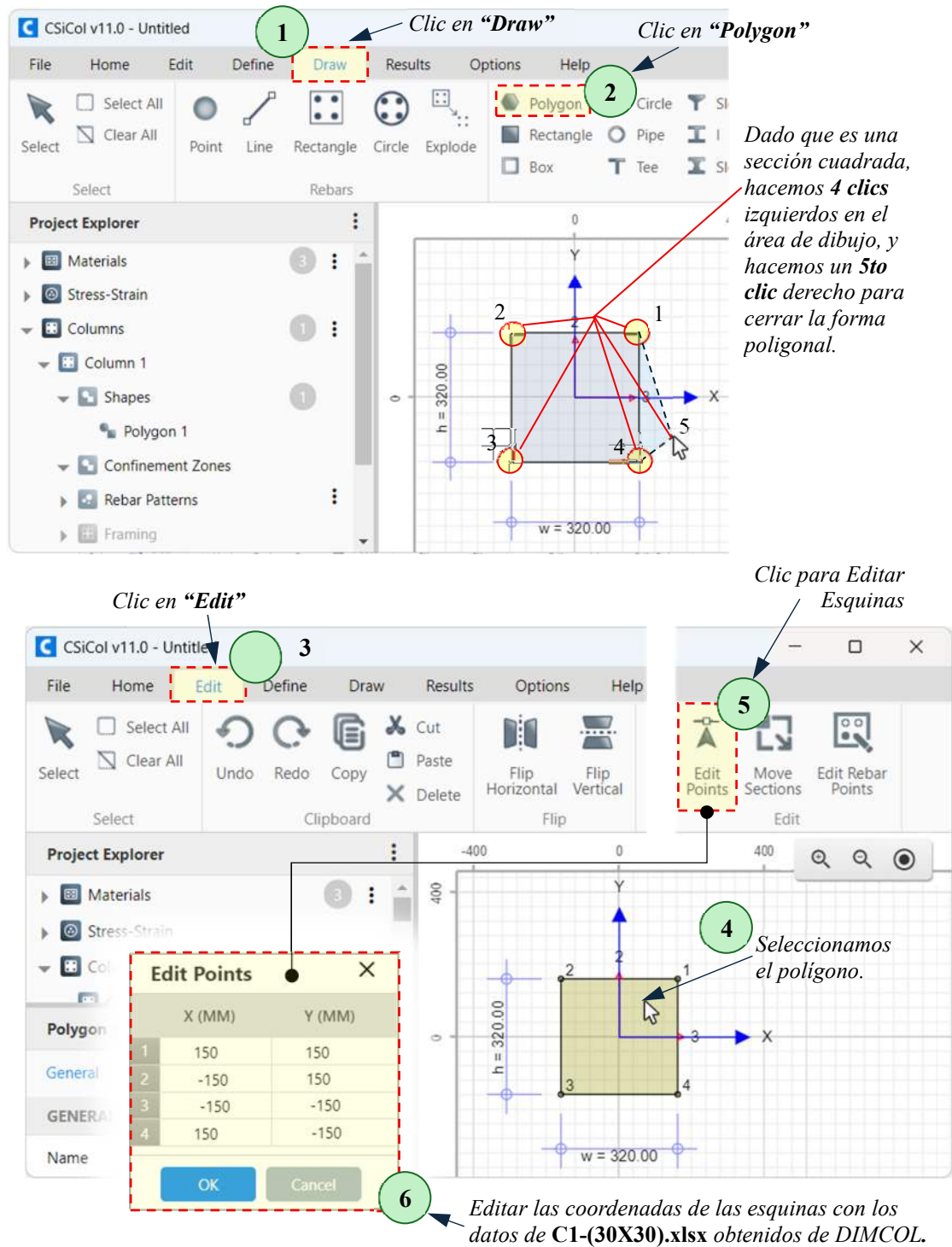


Figura 50

Creación de Refuerzo Longitudinal de la Sección en CsiCOL.

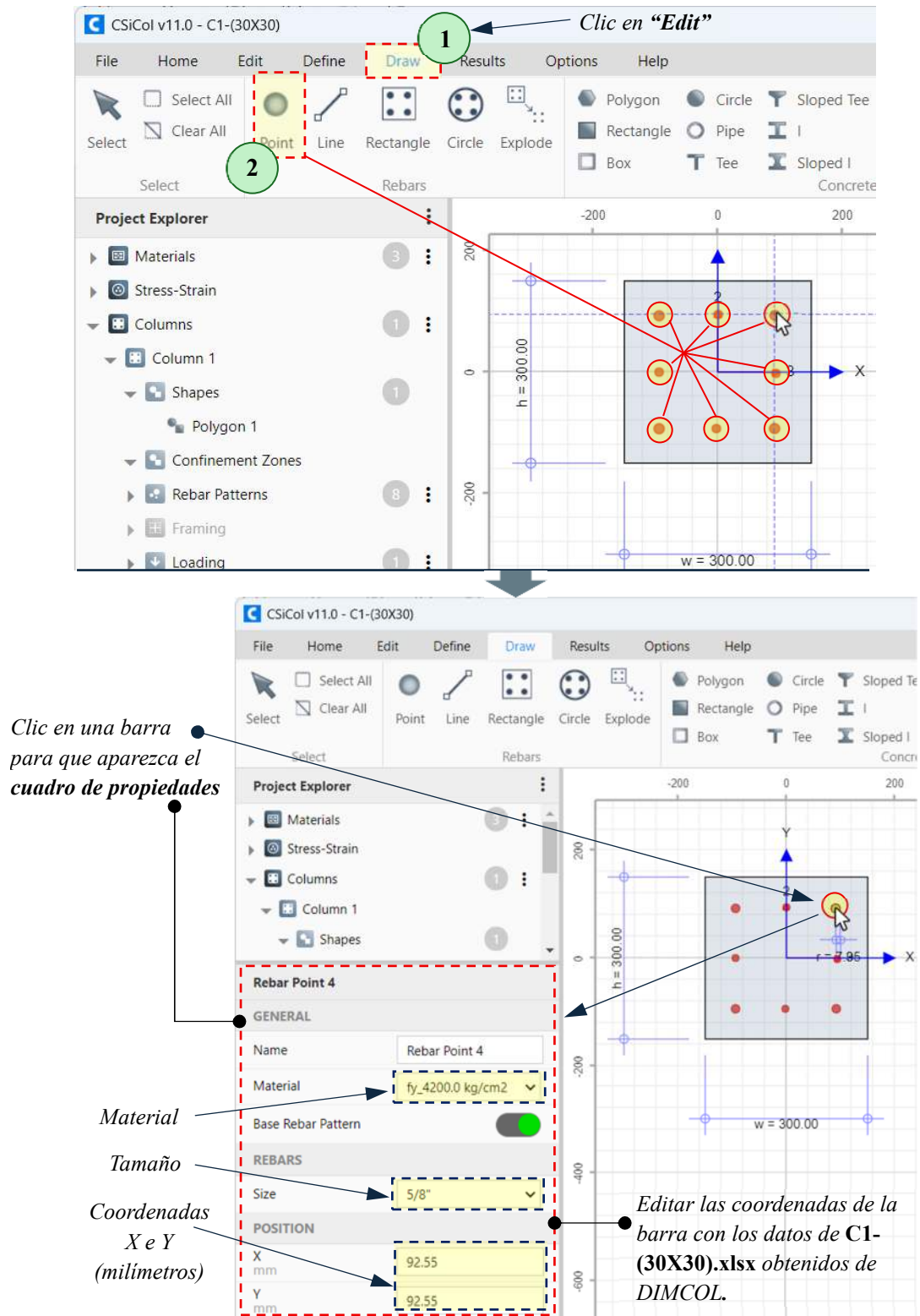


Figura 51

Creación del Diagrama de Interacción Nominal en CsiCOL.

Clic para Crear Diagrama

Clic en "Results"

Clic para mostrar tabla de datos.

Curva a extraer sus datos.

Clic para Actualizar

Configuración para curvas del Diagrama Nominal.

Tabla de datos Para "Curva 0°"

Clic en "Copy" para copiar los datos de la Curva 0°

POINT STATUS	ANGLE (°)	NEUTRAL AXIS DEPTH (MM)	AXIAL LOAD (KN)	RESULTANT MOMENT (KN-M)	MOMENT 2 (KN-M)	MOMENT 3 (KN-M)	CONCRETE FORCE (KN)	CONCRETE MOMENT 2 (KN-M)	CONCRETE MOMENT 3 (KN-M)	REBAR FORCE (KN)	REBAR MOMENT 2 (KN-M)	REBAR MOMENT 3 (KN-M)
1 Pure Compression	0.00	300.00	1,674.29	0.11	-7.43e-2	-0.07	1,575.44	3.46e-3	3.46e-3	517.42	-7.77e-2	-0.
2 Compression Controlled	0.00	300.00	1,674.29	23.27	-5.75e-2	23.27	1,497.56	3.29e-3	1.11e+1	363.23	-6.08e-2	12.
3 Compression Controlled	0.00	300.00	1,674.29	34.36	-5.48e-2	34.36	1,419.69	3.12e-3	2.11e+1	347.17	-5.79e-2	13.
4 Compression Controlled	0.00	300.00	1,671.07	44.44	-5.18e-2	44.44	1,341.81	2.94e-3	2.98e+1	329.25	-5.47e-2	14.
5 Compression Controlled	0.00	283.16	1,573.06	53.52	-4.84e-2	53.52	1,263.94	2.78e-3	3.75e+1	309.12	-5.11e-2	16.
6 Compression Controlled	0.00	265.71	1,472.41	61.63	-4.45e-2	61.63	1,186.06	2.60e-3	4.40e+1	286.35	-4.71e-2	17.
7 Compression Controlled	0.00	248.26	1,368.56	68.81	-4.01e-2	68.81	1,108.19	2.44e-3	4.93e+1	260.37	-4.25e-2	19.
8 Compression Controlled	0.00	230.82	1,270.01	74.27	-3.84e-2	74.27	1,030.31	2.27e-3	5.35e+1	239.69	-4.07e-2	20.
9 Compression Controlled	0.00	213.37	1,157.34	79.77	-3.24e-2	79.77	952.44	2.09e-3	5.65e+1	204.90	-3.45e-2	23.
10 Compression Controlled	0.00	195.93	1,038.48	84.57	-2.53e-2	84.57	874.57	1.92e-3	5.84e+1	163.91	-2.72e-2	26.

Figura 52

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción Nominal de CsiCOL.

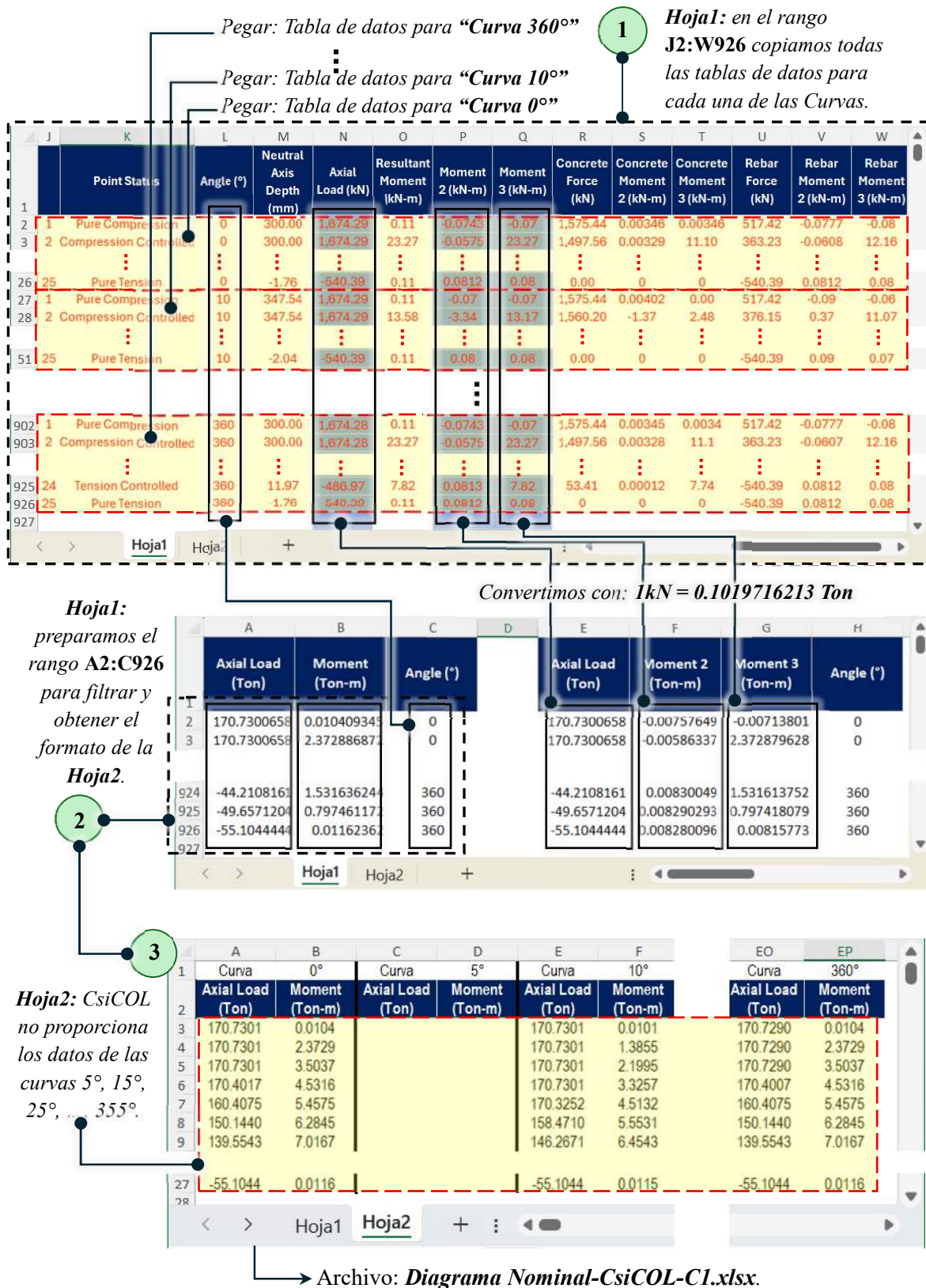
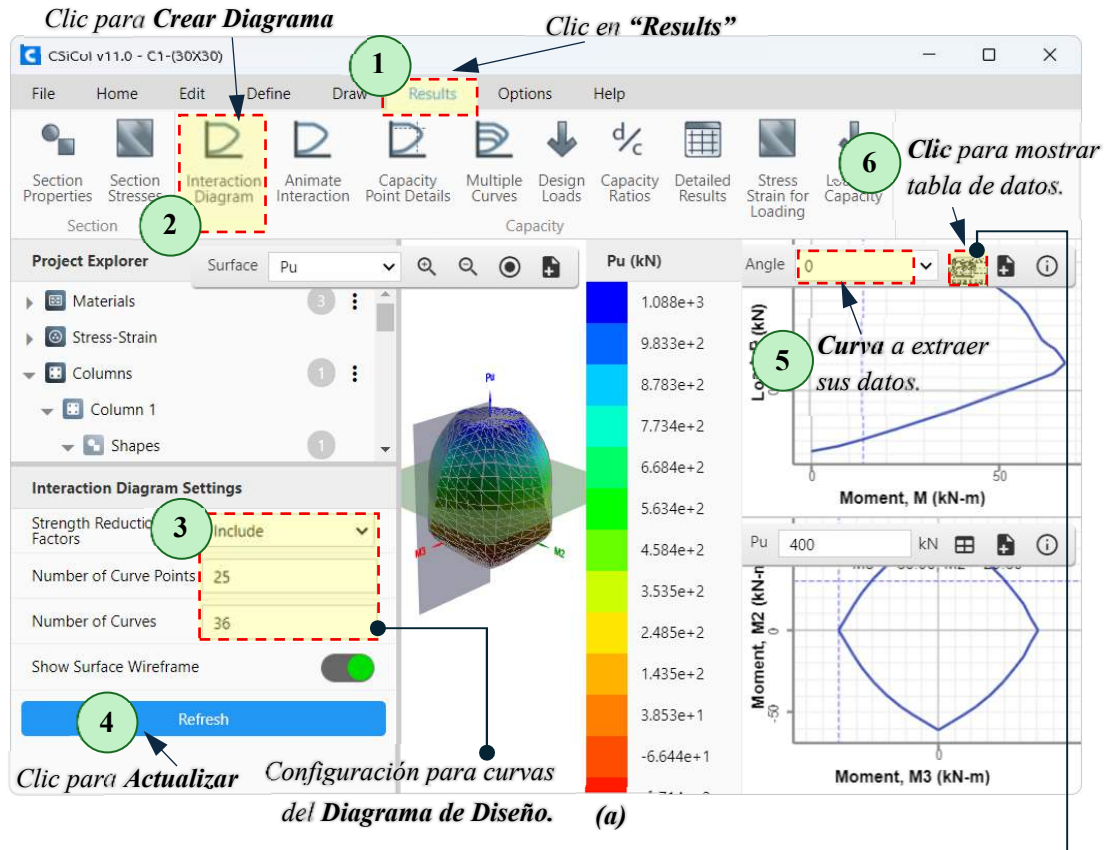


Figura 53

Creación del Diagrama de Interacción de Diseño en CsiCOL.



PM Curve Table *Tabla de datos Para "Curva 0°"*

POINT STATUS	ANGLE (°)	NEUTRAL AXIS DEPTH (MM)	AXIAL LOAD (KN)	RESULTANT MOMENT (KN-M)	MOMENT 2 (KN-M)	MOMENT 3 (KN-M)	CONCRETE FORCE (KN)	CONCRETE MOMENT 2 (KN-M)	CONCRETE MOMENT 3 (KN-M)	REBAR FORCE (KN)	REBAR MOMENT 2 (KN-M)	REBAR MOMENT 3 (KN-M)
1 Pure Compression	0.00	300.00	1,088.29	0.07	-4.83e-2	-0.05	1,575.44	3.46e-3	3.46e-3	517.42	-7.77e-2	-0.
2 Compression Controlled	0.00	300.00	1,088.29	15.12	-3.74e-2	15.12	1,497.56	3.29e-3	1.11e+1	363.23	-6.08e-2	12.
3 Compression Controlled	0.00	300.00	1,088.29	22.34	-3.56e-2	22.34	1,419.69	3.12e-3	2.11e+1	347.17	-5.79e-2	13.
4 Compression Controlled	0.00	300.00	1,086.19	28.89	-3.37e-2	28.89	1,341.81	2.94e-3	2.98e+1	329.25	-5.47e-2	14.
5 Compression Controlled	0.00	283.16	1,022.49	34.79	-3.14e-2	34.79	1,263.94	2.78e-3	3.75e+1	309.12	-5.11e-2	16.
6 Compression Controlled	0.00	265.71	957.07	40.06	-2.89e-2	40.06	1,186.06	2.60e-3	4.40e+1	286.35	-4.71e-2	17.
7 Compression Controlled	0.00	248.26	889.56	44.73	-2.60e-2	44.73	1,108.19	2.44e-3	4.93e+1	260.37	-4.25e-2	19.
8 Compression Controlled	0.00	230.82	825.51	48.27	-2.50e-2	48.27	1,030.31	2.27e-3	5.35e+1	239.69	-4.07e-2	20.
9 Compression Controlled	0.00	213.37	752.27	51.85	-2.11e-2	51.85	952.44	2.09e-3	5.65e+1	204.90	-3.45e-2	23.
10 Compression	0.00	155.93	675.01	54.97	-1.64e-2	54.97	874.57	1.92e-3	5.84e+1	163.91	-2.72e-2	26.

Clic en "Copy" para copiar los datos de la Curva 0° (b)

Figura 54

Recolección de Datos del Diagrama de Interacción de Diseño de CsiCOL.



c.5. Programa SpCOLUMN v10.1

Figura 55

Definición de Barras, Normativa y Materiales en SpCOLUMN.

The image displays the SpCOLUMN v10.1 software interface with four 'Definitions' dialog boxes open, illustrating the configuration of project, material, and reinforcement properties. The main application window shows the 'PROJECT' tab with the following settings:

- Design code: ACI 318-19
- Unit system: Metric
- Bar set: User-defined
- Confinement: Tied
- Section capacity: Critical capacity

The 'Definitions' dialog boxes are configured as follows:

- Concrete Properties:**
 - Strength, f_c : 20.594 MPa
 - Elasticity, E_c : 21316.8 MPa
 - Max. stress, f_c : 17.5049 MPa
 - β_1 : 0.85
 - Ultimate strain, ϵ_u : 0.003 mm/mm
- Reinforcing Steel Properties:**
 - Strength, f_y : 411.879 MPa
 - Elasticity, E_s : 196133 MPa
 - ϵ_{ty} : 0.0021 mm/mm
- Bar Set Properties:**
 - Bar set: User-defined
 - Table of reinforcement bars:

Factor de Conversión:
 $1 \text{ MPa} = 0.0980665 \text{ kg/cm}^2$

No	Size	Diameter	Area	Weight
		mm	mm ²	kg/m
1	#3	9.5	71	0.56
2	#4	12.8	129	0.994
3	#5	15.9	199	1.552
4	#6	19	284	2.235
5	#7	22.2	387	3.042
6	#8	25.4	510	3.973
7	#11	35.8	1006	7.907

Figura 56

Creación de Sección Transversal de Concreto en SpCOLUMN.

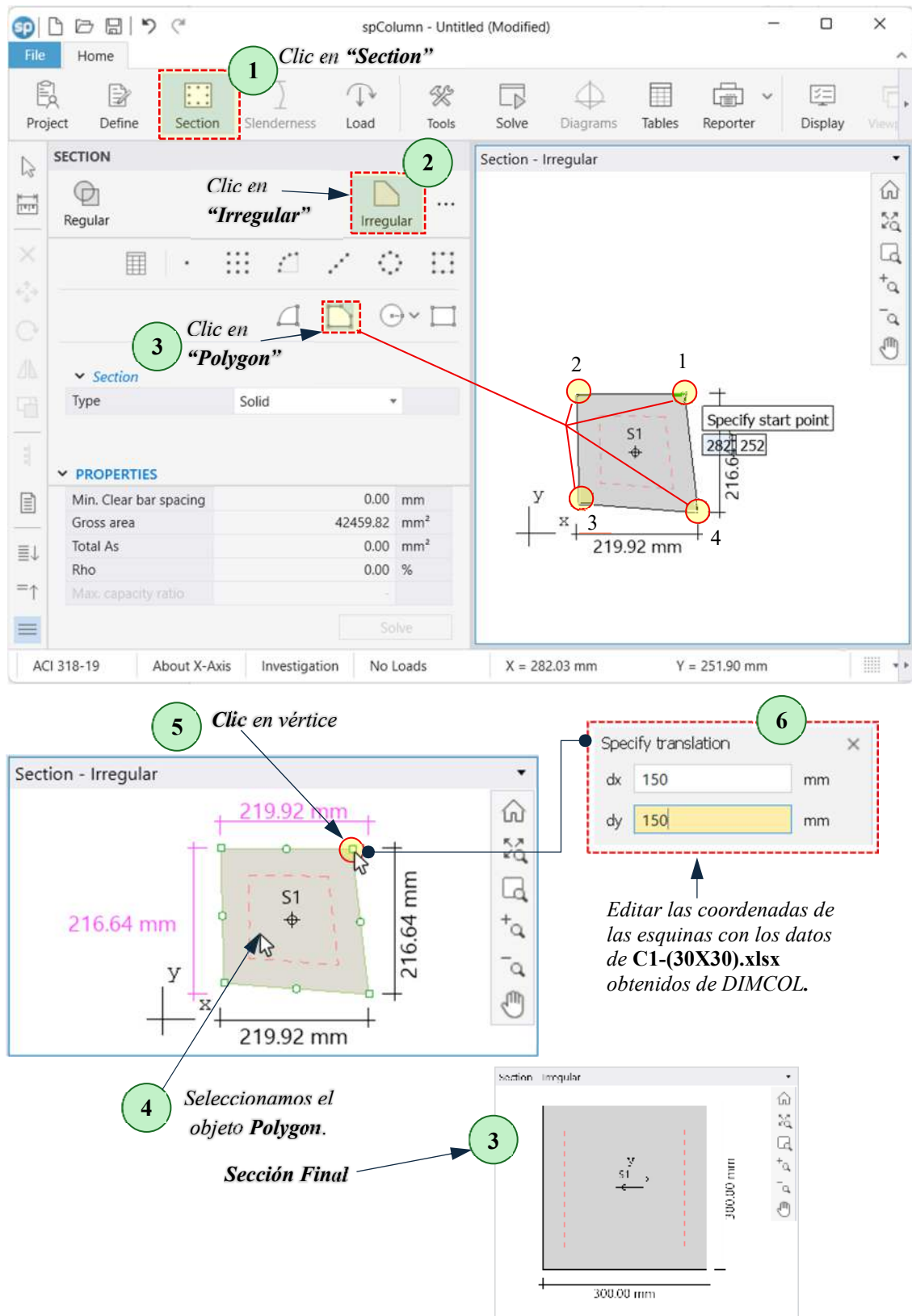


Figura 57

Creación de Refuerzo Longitudinal de la Sección en SpCOLUMN.

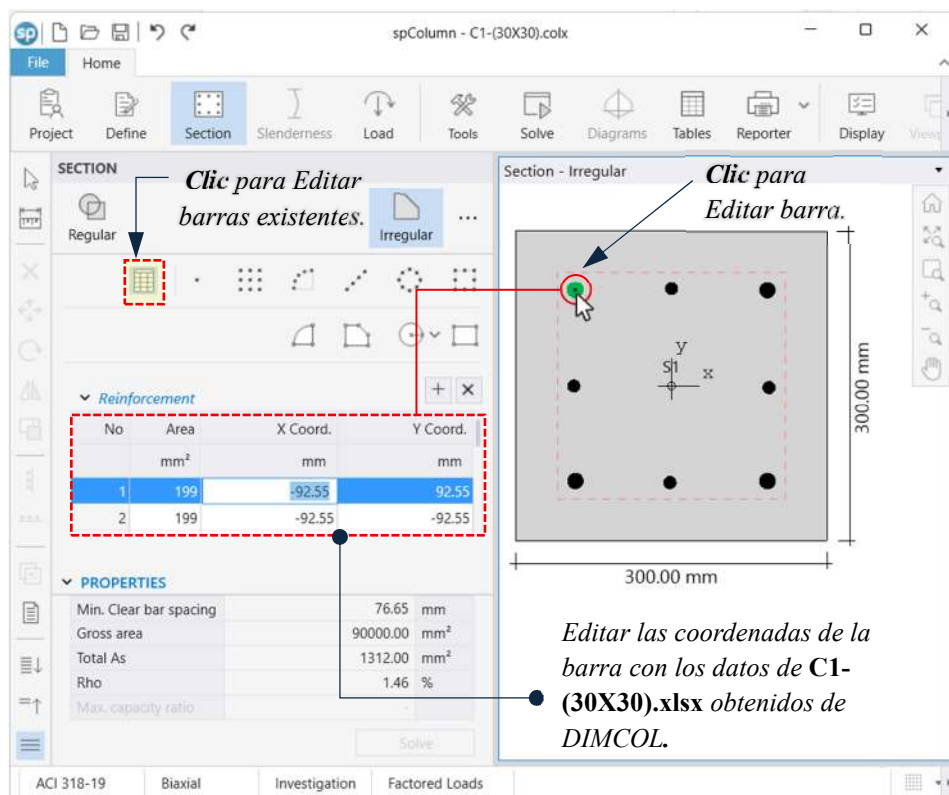
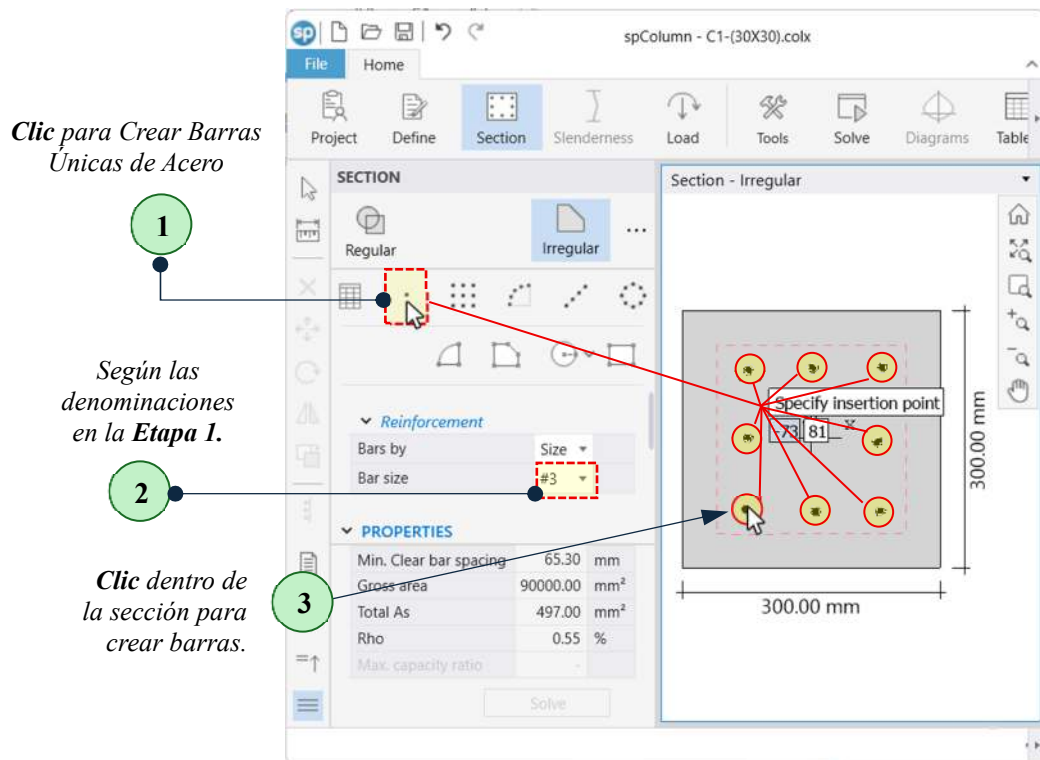
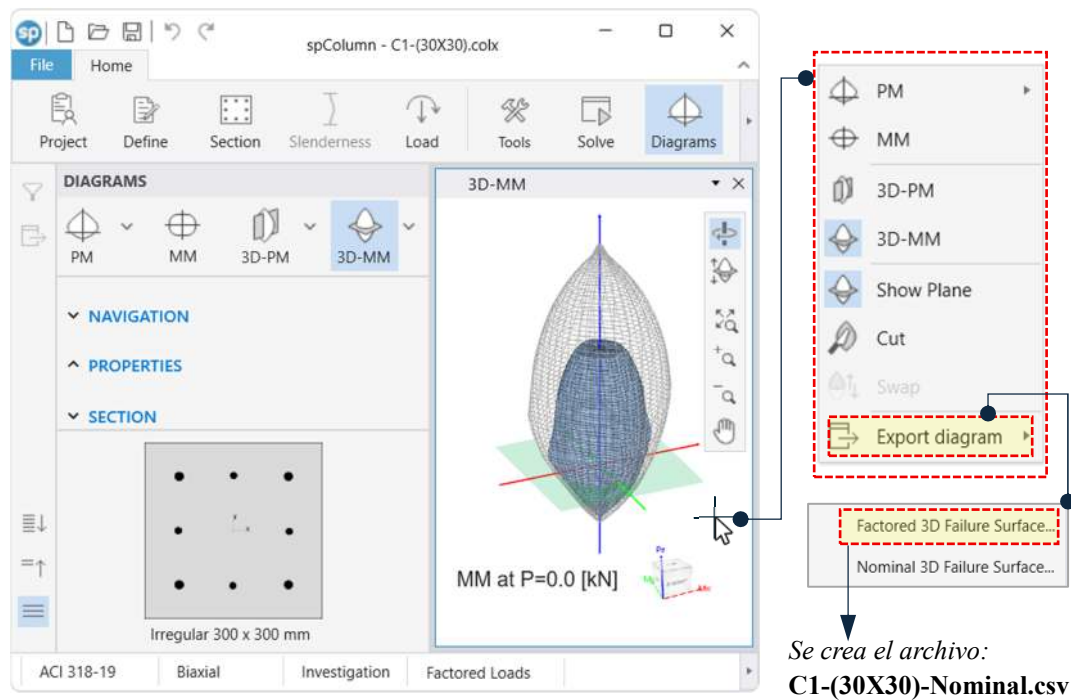
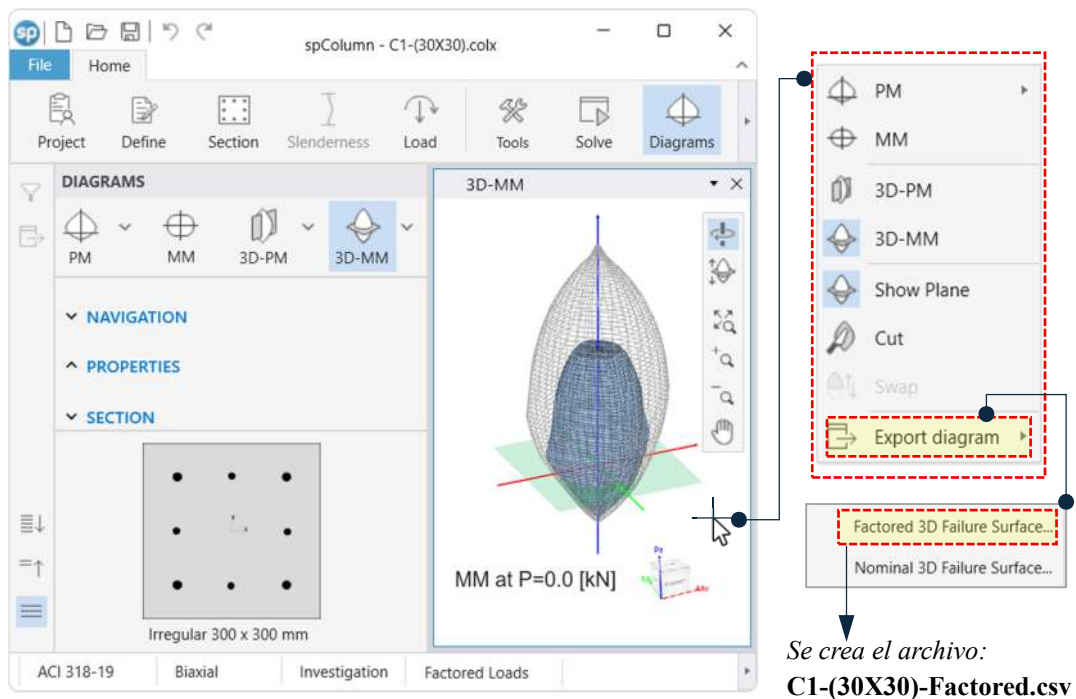


Figura 58

Diagramas de Interacción Nominal y de Diseño en SpCOLUMN.



(a) Obtención y Exportación del Diagrama Nominal.



(b) Obtención y Exportación del Diagrama de Diseño.

Figura 59

Recolección de Datos - Diagrama de Interacción Nominal de SpCOLUMN.

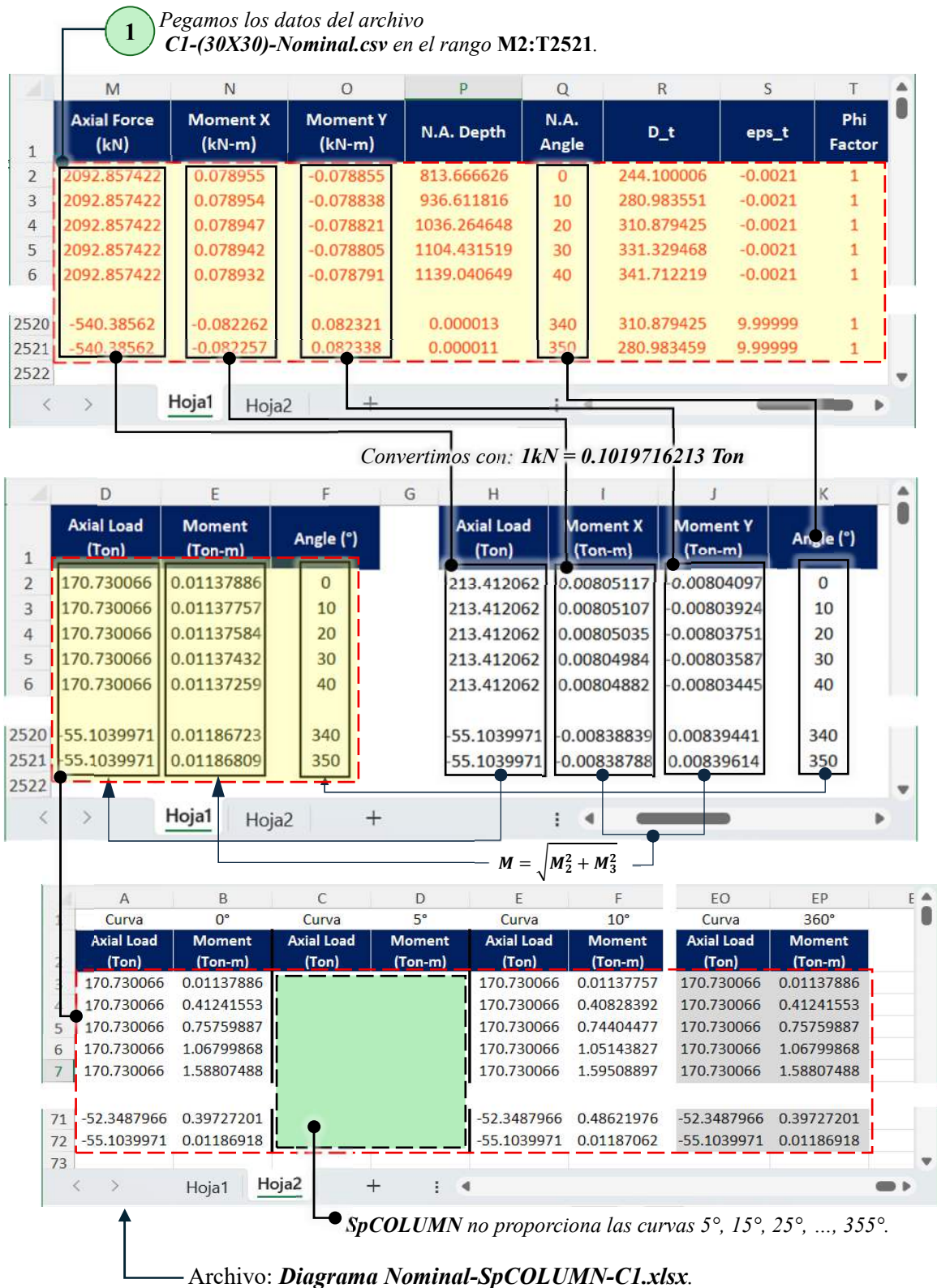
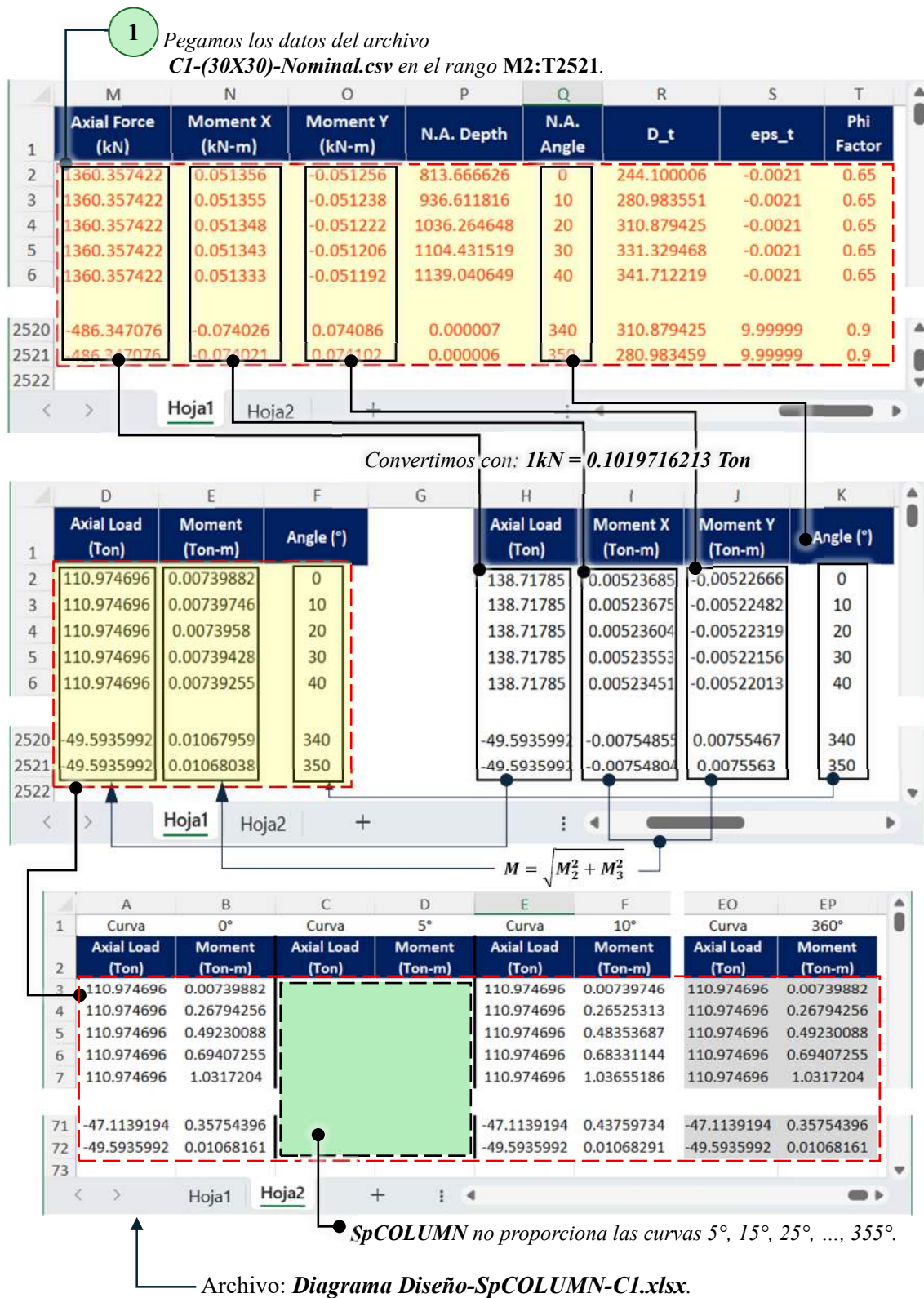


Figura 60

Recolección de Datos - Diagrama de Interacción de Diseño de SpCOLUMN.



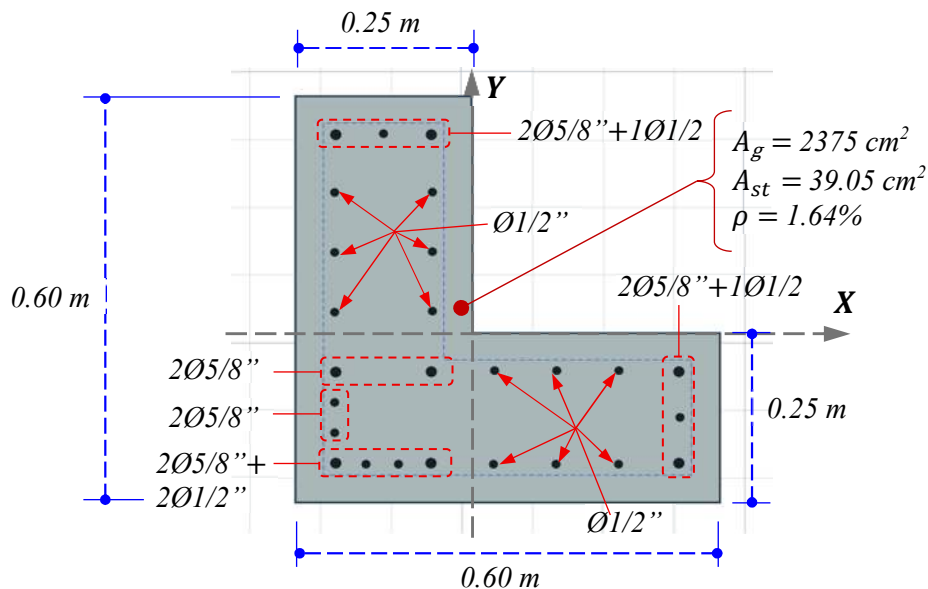
3.10.1.1.2. Modelo C2-(60X60X25)

La sección de la columna es de forma L con un espesor uniforme de alas de 25 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 61

Dimensiones Geométricas del Modelo C2-(60X60X25).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_e)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

Resistencia del Acero - Fluencia (f_y)	=	4200.00 kg/cm ²
--	---	----------------------------

$$\text{Módulo de Elasticidad } (E_s) = 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) = 0.0021$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{\text{comp}}) = 0.65$$

$$\text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{\text{trac}}) = 0.90$$

$$\text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{\text{max}}) = 0.80$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 6

Archivos de Recolección de Datos del Modelo C2.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal		1
	Diseño	C2-(60X60X25).xlsx	
c.2. SAP2000 v26	Nominal	Surface-Nominal-SAP2000-C2.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-SAP2000-C2.xlsx	
c.3. ETABS v21	Nominal	Surface-Nominal-ETABS-C2.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-ETABS-C2.xlsx	
c.4. CsiCOL v11	Nominal	Surface-Nominal-CsiCOL-C2.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño- CsiCOL -C2.xlsx	
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal	Surface-Nominal-SpCOLUMN-C2.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-SpCOLUMN-C2.xlsx	
Número total de archivos del modelo			9

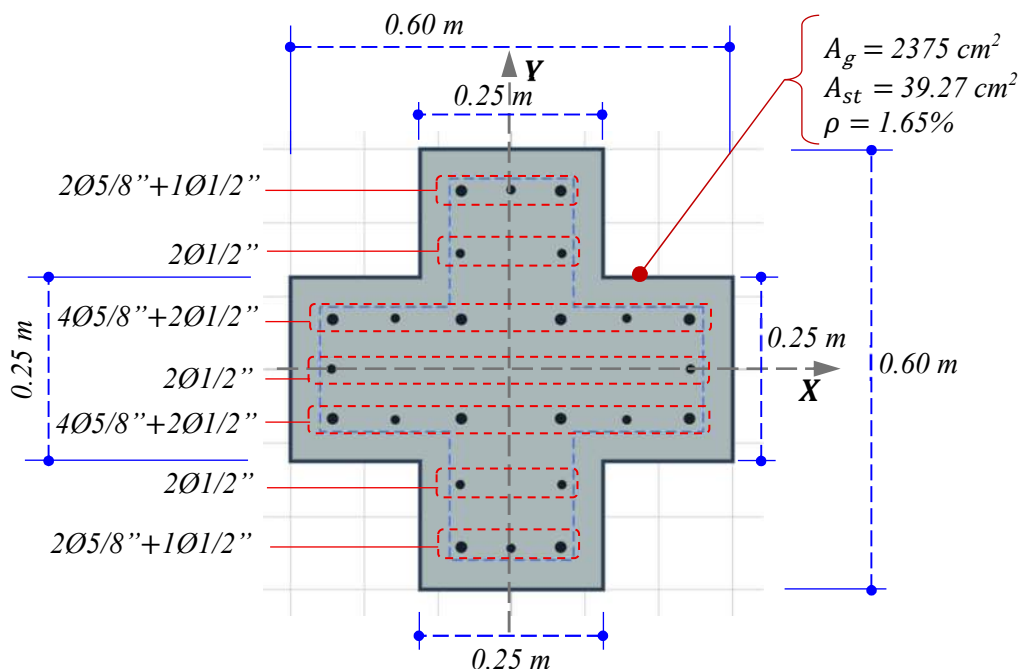
3.10.1.1.3. Modelo C3-(60X60X25)

La sección de la columna es en forma de Cruz con un espesor uniforme de alas de 25 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 62

Dimensiones Geométricas del Modelo C3-(60X60X25).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_e)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

$$\begin{aligned}
 \text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) &= 4200.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Módulo de Elasticidad } (E_s) &= 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) &= 0.0021
 \end{aligned}$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\begin{aligned}
 \text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{\text{comp}}) &= 0.65 \\
 \text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{\text{trac}}) &= 0.90 \\
 \text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{\text{max}}) &= 0.80
 \end{aligned}$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 7

Archivos de Recolección de Datos del Modelo C3.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal		
	Diseño	C3-(60X60X25).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal	Surface-Nominal-SAP2000-C3.xlsx	
	Diseño	Surface-Diseño-SAP2000-C3.xlsx	2
c.3. ETABS v21	Nominal	Surface-Nominal-ETABS-C3.xlsx	
	Diseño	Surface-Diseño-ETABS-C3.xlsx	2
c.4. CsiCOL v11	Nominal	Surface-Nominal-CsiCOL-C3.xlsx	
	Diseño	Surface-Diseño- CsiCOL -C3.xlsx	2
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal	Surface-Nominal-SpCOLUMN-C3.xlsx	
	Diseño	Surface-Diseño-SpCOLUMN-C3.xlsx	2
Número total de archivos del modelo			9

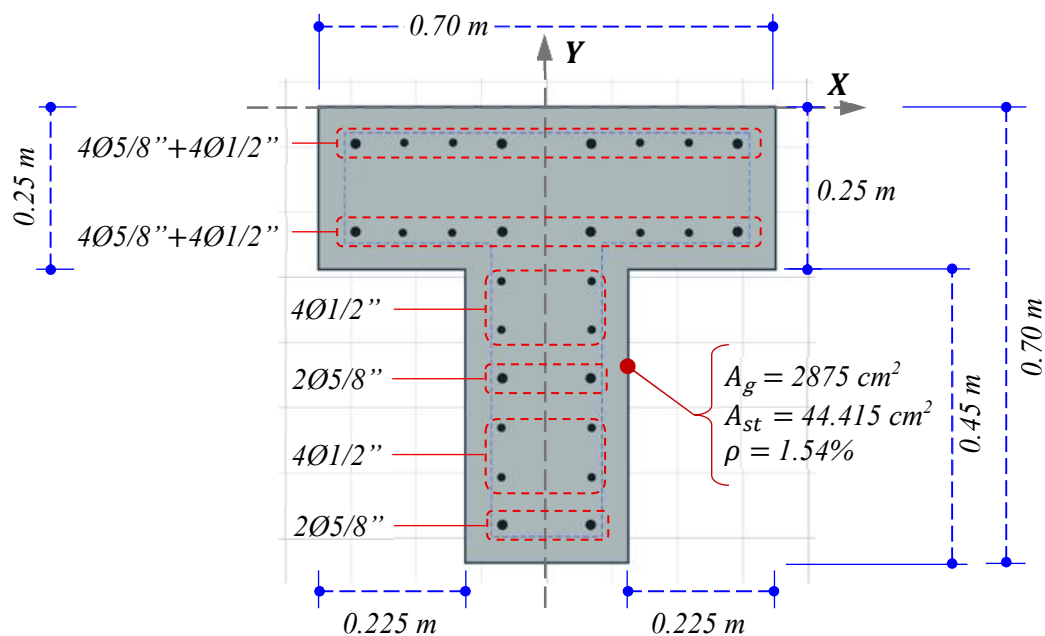
3.10.1.1.4. Modelo C4-(70X70X25)

La sección de la columna tiene la forma de T con un espesor uniforme de 25 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 63

Dimensiones Geométricas del Modelo C4-(70X70X25).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_e)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

$$\begin{aligned}
 \text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) &= 4200.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Módulo de Elasticidad } (E_s) &= 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) &= 0.0021
 \end{aligned}$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{comp}) = 0.65$$

$$\text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{trac}) = 0.90$$

$$\text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{max}) = 0.80$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 8

Archivos de Recolección de Datos del Modelo C4.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	C4-(70X70X25).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal Diseño	Surface-Nominal-SAP2000-C4.xlsx Surface-Diseño-SAP2000-C4.xlsx	2
c.3. ETABS v21	Nominal Diseño	Surface-Nominal-ETABS-C4.xlsx Surface-Diseño-ETABS-C4.xlsx	2
c.4. CsiCOL v11	Nominal Diseño	Surface-Nominal-CsiCOL-C4.xlsx Surface-Diseño- CsiCOL -C4.xlsx	2
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal Diseño	Surface-Nominal-SpCOLUMN-C4.xlsx Surface-Diseño-SpCOLUMN-C4.xlsx	2
Número total de archivos del modelo			9

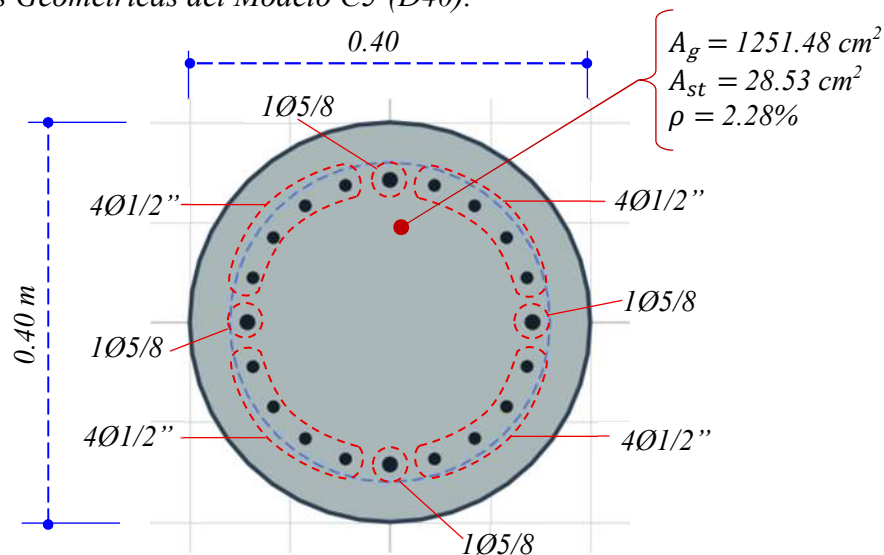
3.10.1.1.5. Modelo C5-(D40)

La sección de la columna es de forma circular con un diámetro de 40 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 64

Dimensiones Geométricas del Modelo C5-(D40).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_c)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

Resistencia del Acero - Fluencia (f_y)	=	4200.00 kg/cm ²
Módulo de Elasticidad (E_s)	=	2,000,000.00 kg/cm ²

$$\text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) = 0.0021$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{comp}) = 0.65$$

$$\text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{trac}) = 0.90$$

$$\text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{max}) = 0.80$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 9

Archivos de Recolección de Datos del Modelo C5.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	C5-(D40).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal	Surface-Nominal-SAP2000-C5.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-SAP2000-C5.xlsx	
c.3. ETABS v21	Nominal	Surface-Nominal-ETABS-C5.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-ETABS-C5.xlsx	
c.4. CsiCOL v11	Nominal	Surface-Nominal-CsiCOL-C5.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño- CsiCOL -C5.xlsx	
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal	Surface-Nominal-SpCOLUMN-C5.xlsx	2
	Diseño	Surface-Diseño-SpCOLUMN-C5.xlsx	
Número total de archivos del modelo			9

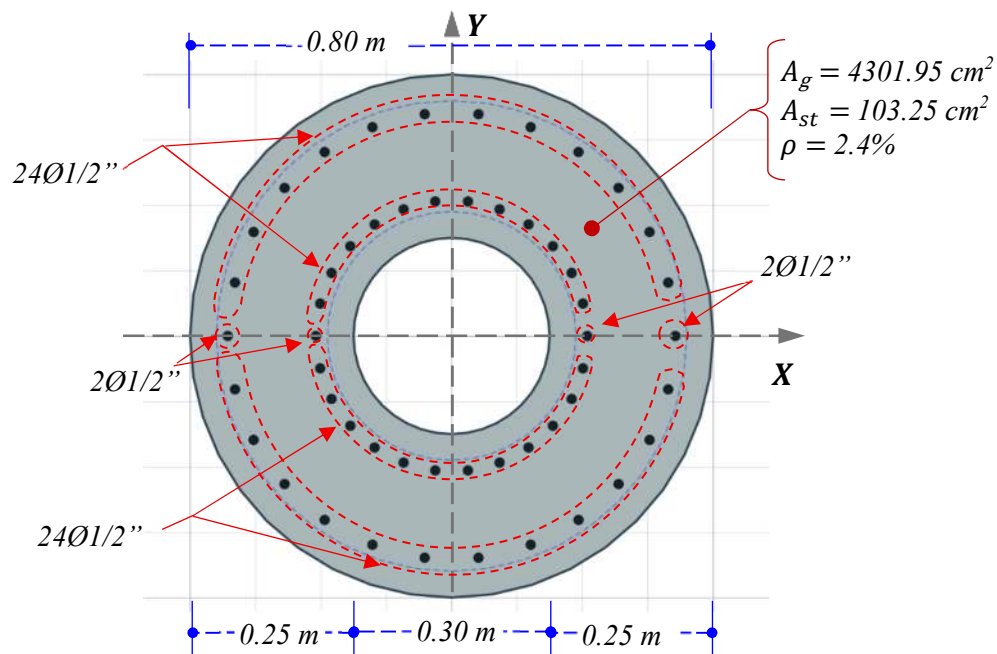
3.10.1.1.6. Modelo C6-(D80E25)

La sección de la columna es de forma circular hueca con un espesor de pared de 25 cm y un diámetro total de 80 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera una columna cumpliendo con $h_w/l_w \geq 2$ y $l_w/b_w \leq 2.5$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 65

Dimensiones Geométricas del Modelo C6-(D80E25).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_c)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

$$\begin{aligned}
 \text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) &= 4200.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Módulo de Elasticidad } (E_s) &= 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) &= 0.0021
 \end{aligned}$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{"Estribo"}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{"Cumple"}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{comp}) = 0.65$$

$$\text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{trac}) = 0.90$$

$$\text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{max}) = 0.80$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 10

Archivos de Recolección de Datos del Modelo C6.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	C6-(D80E25).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal	Diagrama Nominal-SAP2000-C6.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-SAP2000-C6.xlsx	
c.3. ETABS v21	Nominal	Diagrama Nominal-ETABS-C6.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-ETABS-C6.xlsx	
c.4. CsiCOL v11	Nominal	Diagrama Nominal-CsiCOL-C6.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño- CsiCOL -C6.xlsx	
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal	Diagrama Nominal-SpCOLUMN-C6.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-SpCOLUMN-C6.xlsx	
<i>Número total de archivos del modelo</i>			9

3.10.1.2. Modelos de Muro de Corte

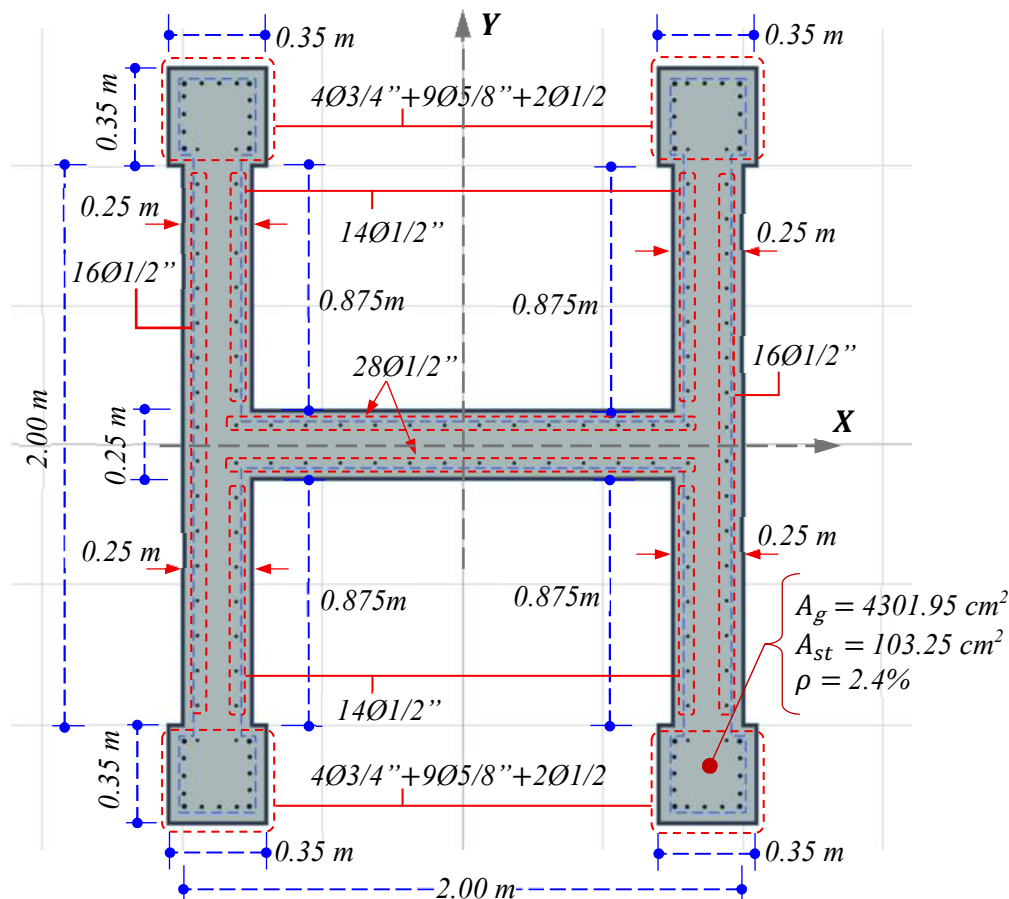
3.10.1.2.1. Modelo M1-(200x200-35X35)

La sección del muro es en forma de H con un espesor en las alas y el alma de 25 cm y elementos de bordes de 35cm × 35 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera un muro de corte cumpliendo con $h_w/l_w < 2.0$ y $l_w/b_w > 6.0$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 66

Dimensiones Geométricas del Modelo M1-(200x200-35X35).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

$$\text{Resistencia a la compresión } (f'_c) = 210 \text{ kg/cm}^2$$

Peso Específico (w_e)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

Resistencia del Acero - Fluencia (f_y)	=	4200.00 kg/cm ²
Módulo de Elasticidad (E_s)	=	2,000,000.00 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (f_y/E_s)	=	0.0021

Tipo de Confinamiento:

Confinamiento de acero longitudinal	=	“Estribo”
-------------------------------------	---	-----------

Verificación de Cuantía:

$1\% < \rho < 8\%$	=	“Cumple”
--------------------	---	----------

Factores de reducción de resistencia:

Factor de reducción por compresión (ϕ_{comp})	=	0.65
Factor de reducción por tracción (ϕ_{trac})	=	0.90
Factor de máxima carga axial (ϕ_{max})	=	0.80

c. Recolección de Datos:

Tabla 11

Archivos de Recolección de Datos del Modelo M1.

PROGRAMAS ESTRUTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	M1-(200x200-35X35).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SAP2000-M1.xlsx Diagrama Diseño-SAP2000-M1.xlsx	2
c.3. ETABS v21	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-ETABS-M1.xlsx Diagrama Diseño-ETABS-M1.xlsx	2
c.4. CsiCOL v11	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-CsiCOL-M1.xlsx Diagrama Diseño- CsiCOL -M1.xlsx	2
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SpCOLUMN-M1.xlsx Diagrama Diseño-SpCOLUMN-M1.xlsx	2
Número total de archivos del modelo			9

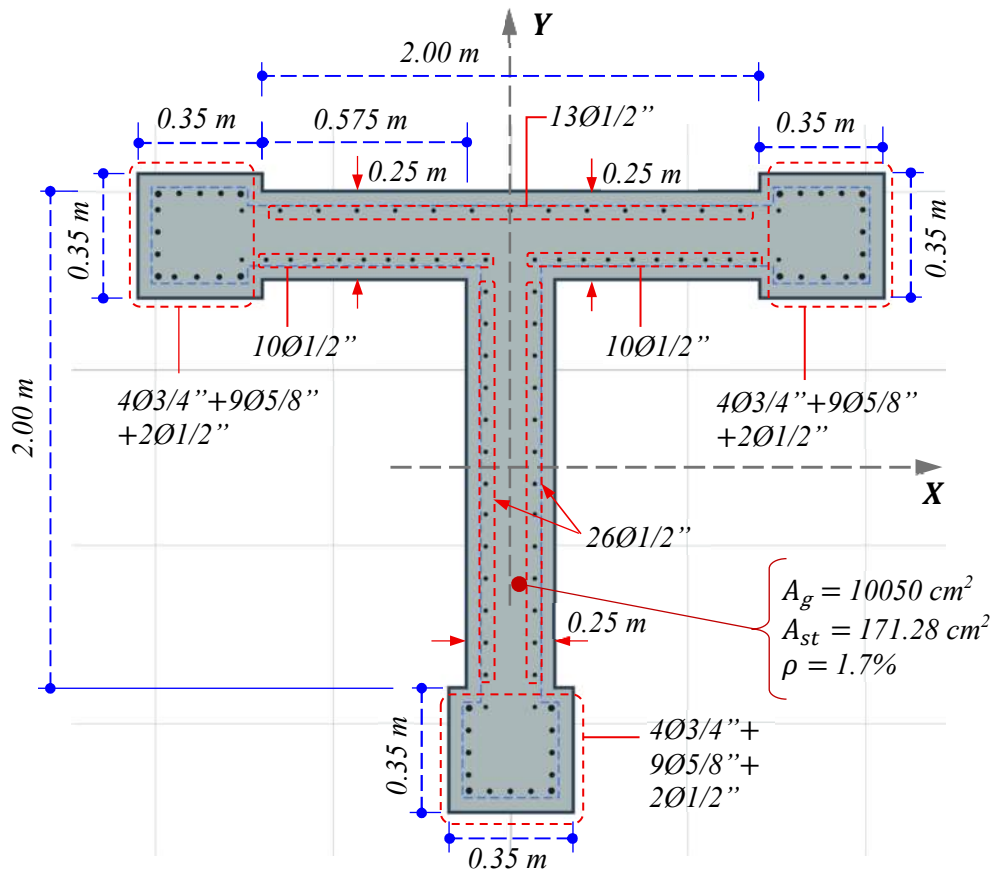
3.10.1.2.2. Modelo M2-(140X140-35X35)

La sección del muro es en forma de T con un espesor en las alas y el alma de 25 cm y elementos de bordes de 35cm × 35 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera un muro de corte cumpliendo con $h_w/l_w < 2.0$ y $l_w/b_w > 6.0$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 67

Dimensiones Geométricas del Modelo M2-(140X140-35X35).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_c)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003

$$\begin{aligned} \text{Factor de distribución rectangular} \\ \text{equivalente } (\beta_1) &= 0.85 \end{aligned}$$

Propiedades del Acero:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) &= 4200.00 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Módulo de Elasticidad } (E_s) &= 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) &= 0.0021 \end{aligned}$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\begin{aligned} \text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{\text{comp}}) &= 0.65 \\ \text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{\text{trac}}) &= 0.90 \\ \text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{\text{max}}) &= 0.80 \end{aligned}$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 12

Archivos de Recolección de Datos del Modelo M2.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal	M2-(140X140-35X35).xlsx	1
	Diseño		
c.2. SAP2000 v26	Nominal	Diagrama Nominal-SAP2000-M2.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-SAP2000-M2.xlsx	
c.3. ETABS v21	Nominal	Diagrama Nominal-ETABS-M2.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-ETABS-M2.xlsx	
c.4. CsiCOL v11	Nominal	Diagrama Nominal-CsiCOL-M2.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño- CsiCOL -M2.xlsx	
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal	Diagrama Nominal-SpCOLUMN-M2.xlsx	2
	Diseño	Diagrama Diseño-SpCOLUMN-M2.xlsx	
Número total de archivos del modelo			9

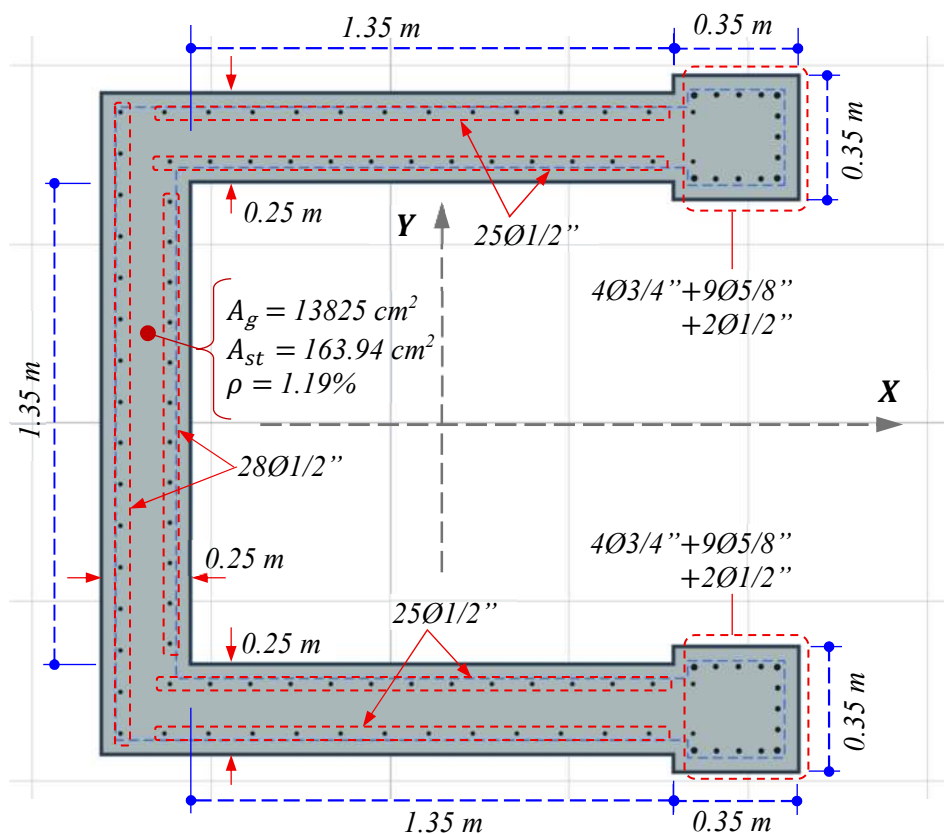
3.10.1.2.3. Modelo M3-(135X135-35X35)

La sección del muro es en forma de C con un espesor en las alas y el alma de 25 cm y elementos de bordes de 35cm × 35 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera un muro de corte cumpliendo con $h_w/l_w < 2.0$ y $l_w/b_w > 6.0$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 68

Dimensiones Geométricas del Modelo M3-(135X135-35X35).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_c)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003

$$\begin{aligned} \text{Factor de distribución rectangular} \\ \text{equivalente } (\beta_1) &= 0.85 \end{aligned}$$

Propiedades del Acero:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) &= 4200.00 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Módulo de Elasticidad } (E_s) &= 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) &= 0.0021 \end{aligned}$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\begin{aligned} \text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{\text{comp}}) &= 0.65 \\ \text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{\text{trac}}) &= 0.90 \\ \text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{\text{max}}) &= 0.80 \end{aligned}$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 13

Archivos de Recolección de Datos del Modelo M3.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	M3-(135X135-35X35).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SAP2000-M3.xlsx Diagrama Diseño-SAP2000-M3.xlsx	2
c.3. ETABS v21	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-ETABS-M3.xlsx Diagrama Diseño-ETABS-M3.xlsx	2
c.4. CsiCOL v11	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-CsiCOL-M3.xlsx Diagrama Diseño- CsiCOL -M3.xlsx	2
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SpCOLUMN-M3.xlsx Diagrama Diseño-SpCOLUMN-M3.xlsx	2
Número total de archivos del modelo			9

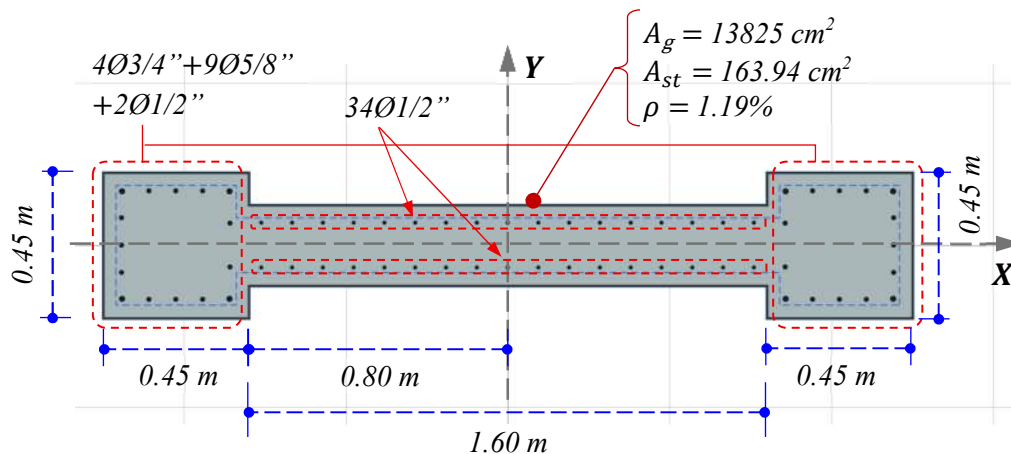
3.10.1.2.4. Modelo M4-(160X30-45X45)

La sección del muro es en forma de I con un espesor del alma de 25 cm y elementos de bordes de 45cm × 45 cm; en este modelo se han despreciado los efectos de esbeltez cumpliendo lo dispuesto en ACI 318-25 §6.2.5.1-a y b. El elemento se considera un muro de corte cumpliendo con $h_w/l_w < 2.0$ y $l_w/b_w > 6.0$ (ACI 318-25 §18.10.1).

a. Descripción Geométrica

Figura 69

Dimensiones Geométricas del Modelo M4-(160X30-45X45).



b. Información General:

Propiedades del Concreto:

Resistencia a la compresión (f'_c)	=	210 kg/cm ²
Peso Específico (w_e)	=	2400.00 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	=	217370.651 kg/cm ²
Deformación unitaria máxima (ϵ_c)	=	0.003
Factor de distribución rectangular equivalente (β_1)	=	0.85

Propiedades del Acero:

$$\text{Resistencia del Acero - Fluencia } (f_y) = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de Elasticidad } (E_s) = 2,000,000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Deformación unitaria máxima } (f_y/E_s) = 0.0021$$

Tipo de Confinamiento:

$$\text{Confinamiento de acero longitudinal} = \text{“Estribo”}$$

Verificación de Cuantía:

$$1\% < \rho < 8\% = \text{“Cumple”}$$

Factores de reducción de resistencia:

$$\text{Factor de reducción por compresión } (\phi_{\text{comp}}) = 0.65$$

$$\text{Factor de reducción por tracción } (\phi_{\text{trac}}) = 0.90$$

$$\text{Factor de máxima carga axial } (\phi_{\text{max}}) = 0.80$$

c. Recolección de Datos:

Tabla 14

Archivos de Recolección de Datos del Modelo M4.

PROGRAMAS ESTRUCTURALES	ARCHIVOS GENERADOS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN		NUMERO DE ARCHIVOS
c.1. DIMCOL v1.0	Nominal Diseño	M4-(160X30-45X45).xlsx	1
c.2. SAP2000 v26	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SAP2000-M4.xlsx Diagrama Diseño-SAP2000-M4.xlsx	2
c.3. ETABS v21	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-ETABS-M4.xlsx Diagrama Diseño-ETABS-M4.xlsx	2
c.4. CsiCOL v11	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-CsiCOL-M4.xlsx Diagrama Diseño- CsiCOL -M4.xlsx	2
c.5. SpCOLUMN v10.1	Nominal Diseño	Diagrama Nominal-SpCOLUMN-M4.xlsx Diagrama Diseño-SpCOLUMN-M4.xlsx	2
Número total de archivos del modelo			9

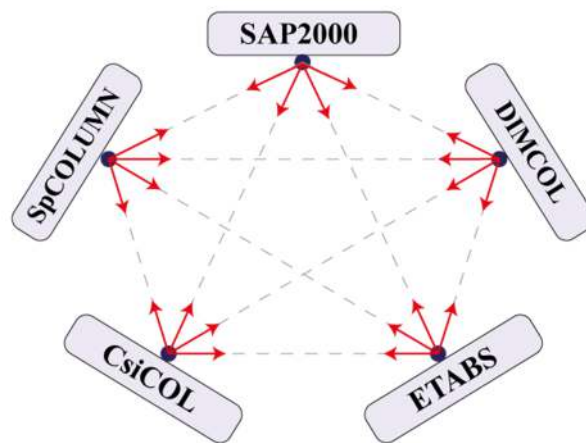
3.11. Tratamiento, Análisis de Datos y Resultados

3.11.1. Tratamiento de Datos

En la etapa de recolección de datos se han obtenido, para cada modelo y desde cada programa estructural, información sobre los valores de carga axial y de momento en cada punto de los diagramas de interacción tanto nominales como de diseño. El flujo de comparación de los datos obtenidos desde un programa respecto a los restantes siguió el enfoque mostrado en la Figura 70, para cada modelo de sección abordado en este estudio.

Figura 70

Enfoque Comparativo de Resultados entre Softwares, por Modelo.



Se aplicó un tratamiento de *uniformidad de datos*, proyectando cada punto de prueba S_{1i} sobre las curvas de los diagramas obtenidos con los softwares restantes, determinando los puntos base S_{2i} , S_{3i} , S_{4i} y S_{5i} . La proyección de puntos de prueba se realiza mediante la función python `Get_CoordPI` que se adjunta en Anexo II, y su interpretación geométrica se muestra en la Figura 71. Además, $S_{mi} = (S_{miX}, S_{miY}) = (P, M)$ representa un punto cuyas coordenadas son los valores de carga axial y de momento para un diagrama determinado; donde: $m = 1$ es el software de prueba, $m = 2, 3, 4, 5$ son los softwares restantes tomados como base para la comparación, e i = representa cualquier punto de un diagrama.

Una vez determinados S_{2i} , S_{3i} , S_{4i} y S_{5i} para cada S_{1i} respectivo, se procede al cálculo del error relativo para cada uno de los valores de carga axial y de momento:

– Para momento:

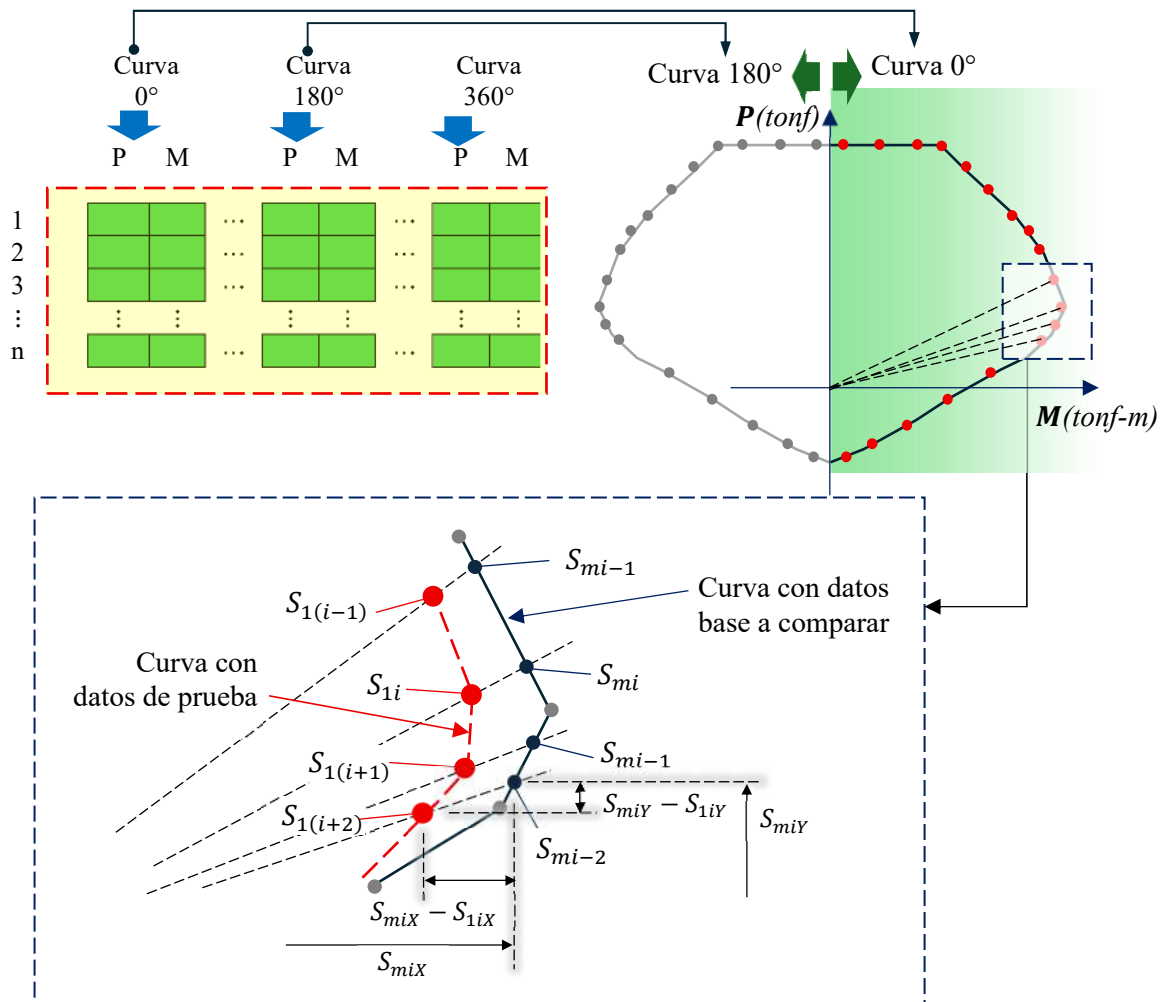
$$E_{[1-m]iX}(\%) = \frac{S_{miX} - S_{1iX}}{S_{miY}} \times 100, \text{ donde } m = 2,3,4,5.$$

– Para carga axial:

$$E_{[1-m]iY}(\%) = \frac{S_{miY} - S_{1iY}}{S_{miY}} \times 100, \text{ donde } m = 2,3,4,5.$$

Figura 71

Tratamiento de Uniformidad de Datos y Cálculo del Error Relativo.



3.11.2. Resultados

3.11.2.1. Modelo C1-(30X30)

Figura 72

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C1.

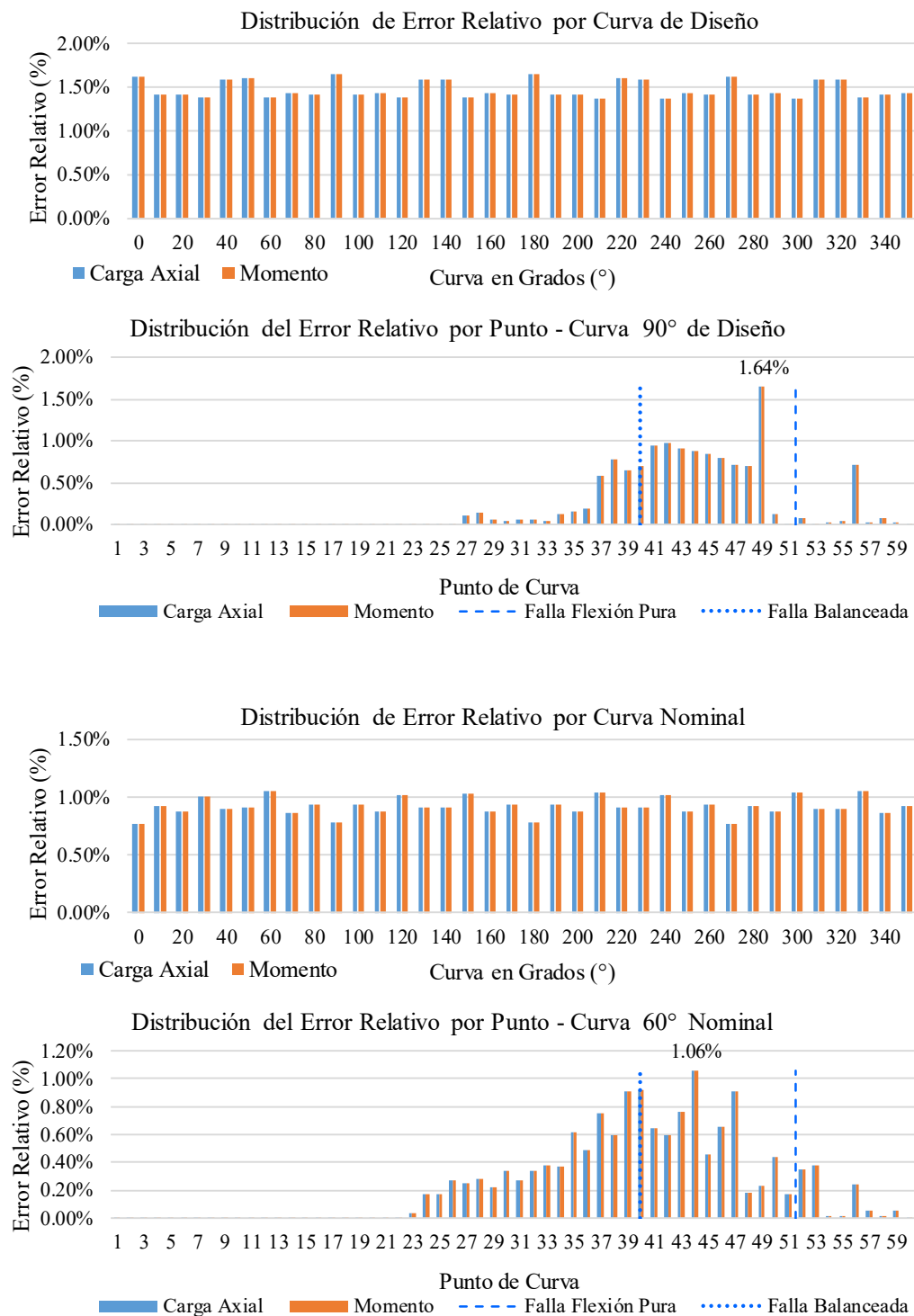


Figura 73

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C1.

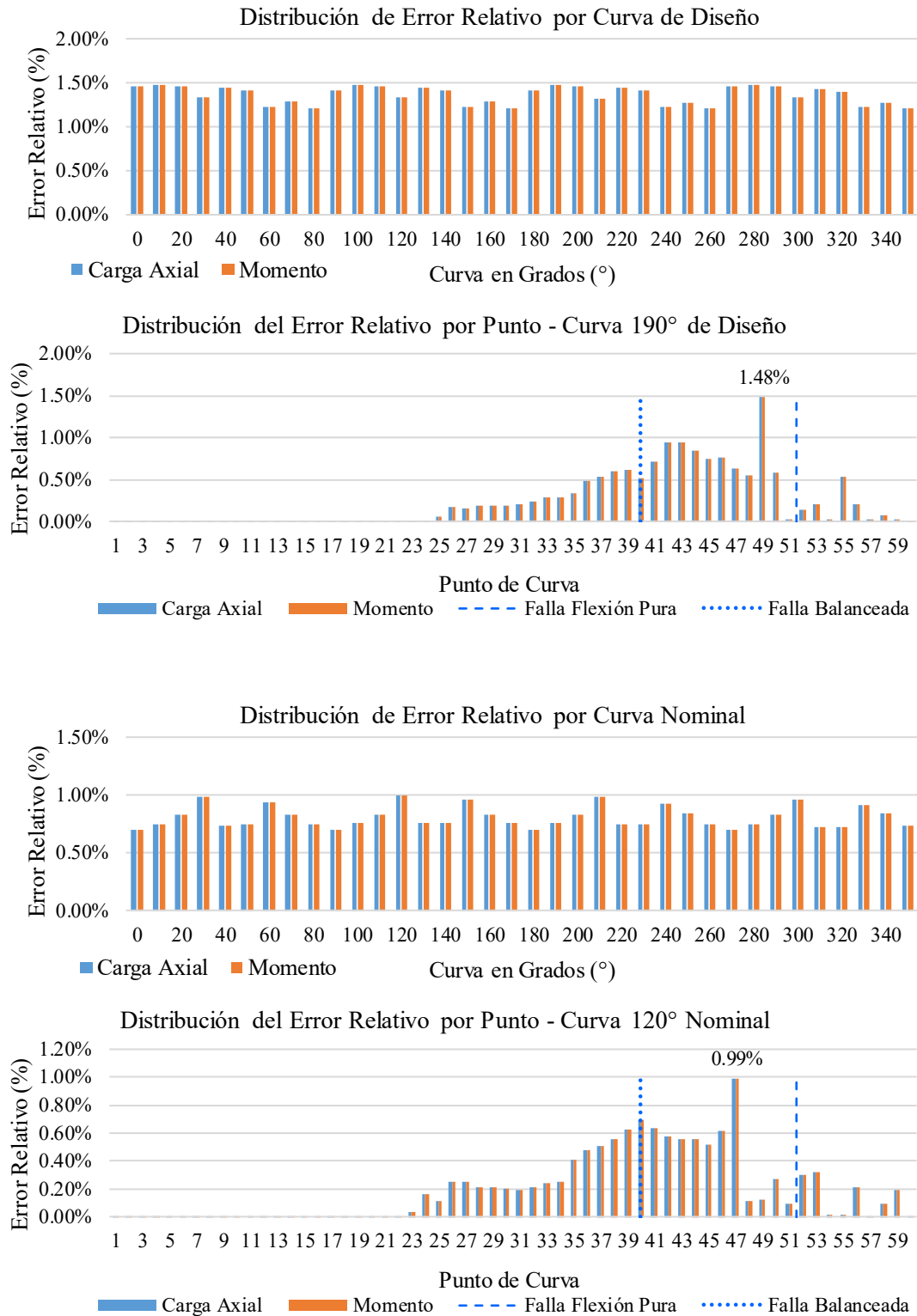


Figura 74

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C1.

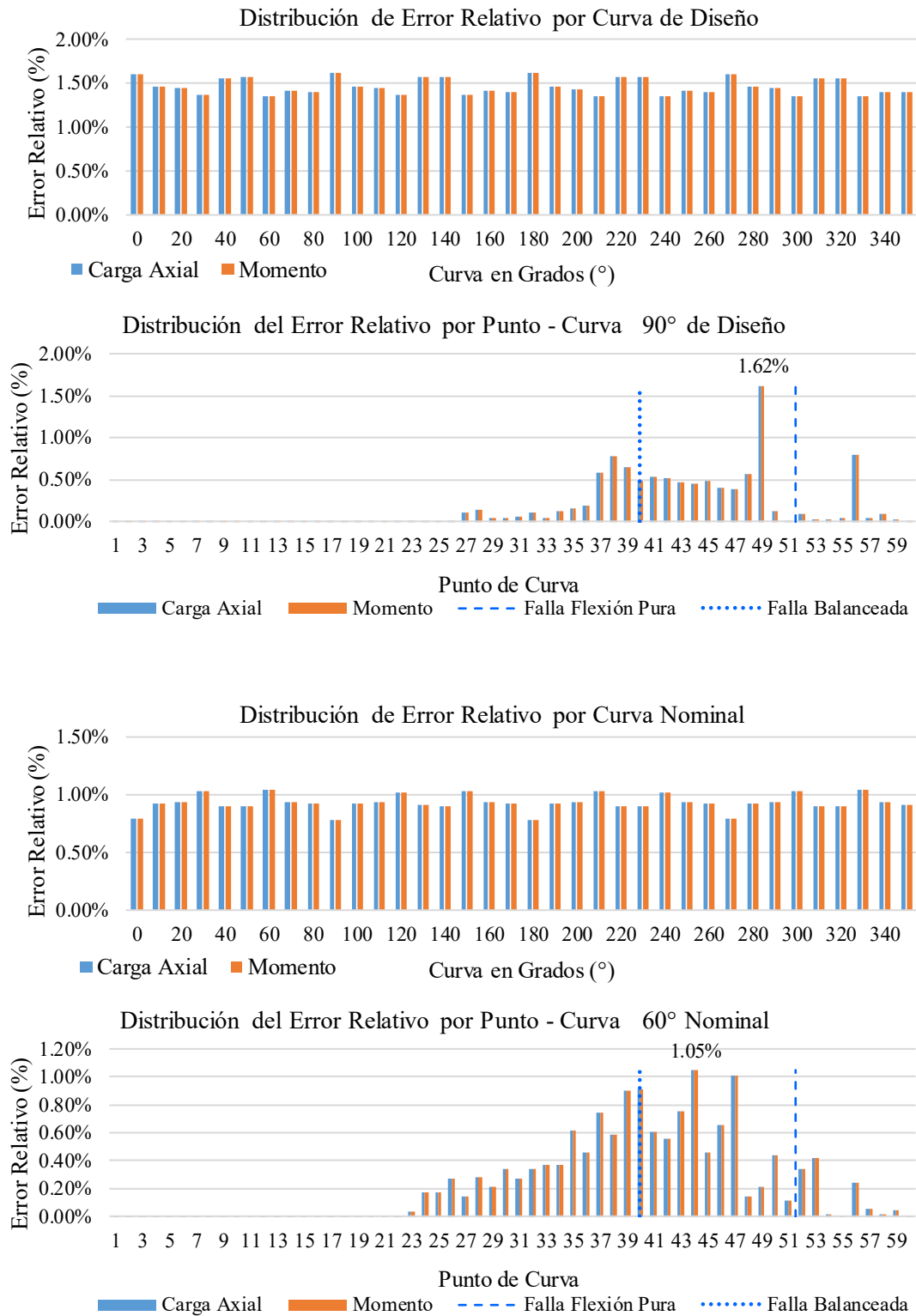


Figura 75

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C1.

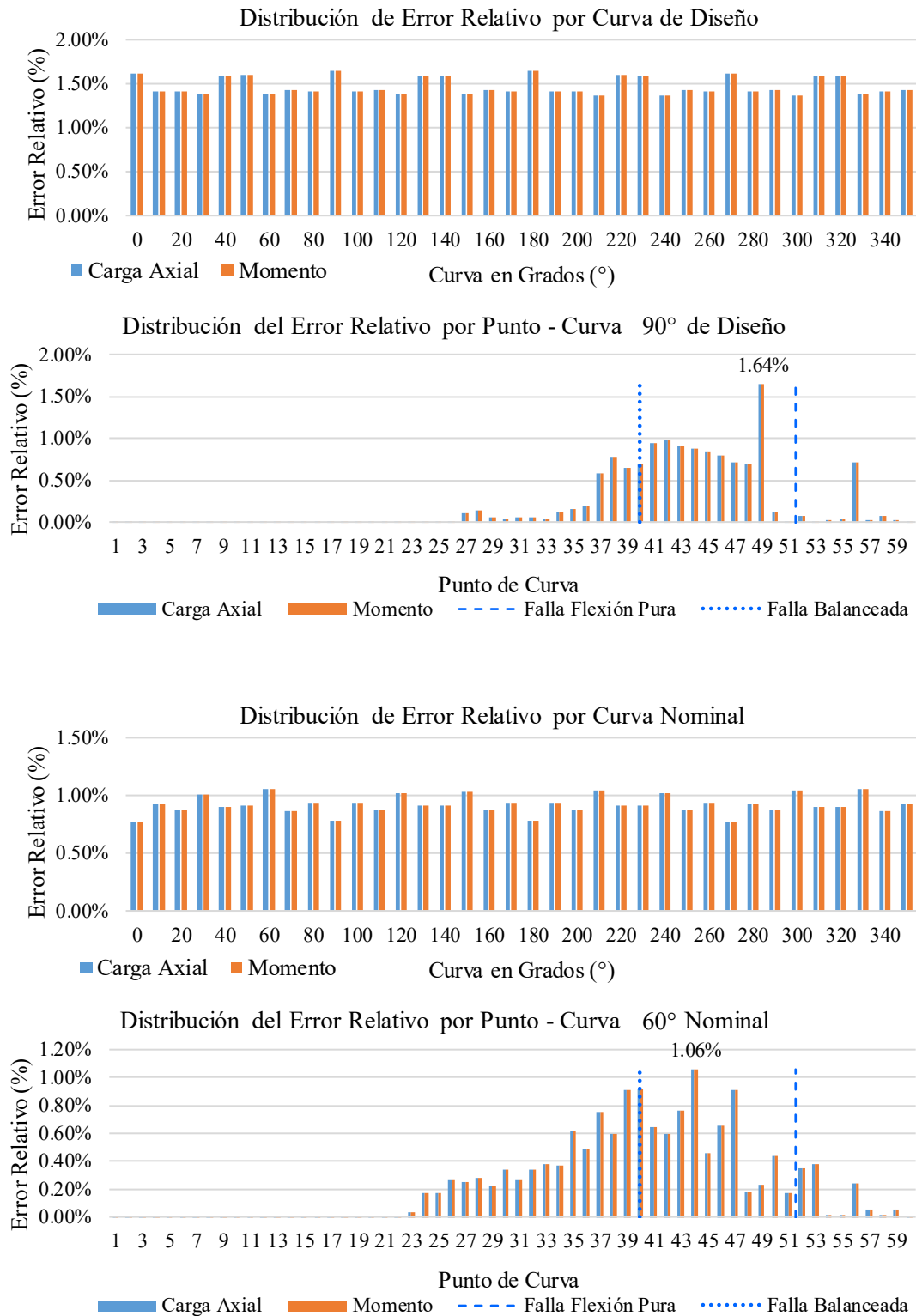


Figura 76

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C1.

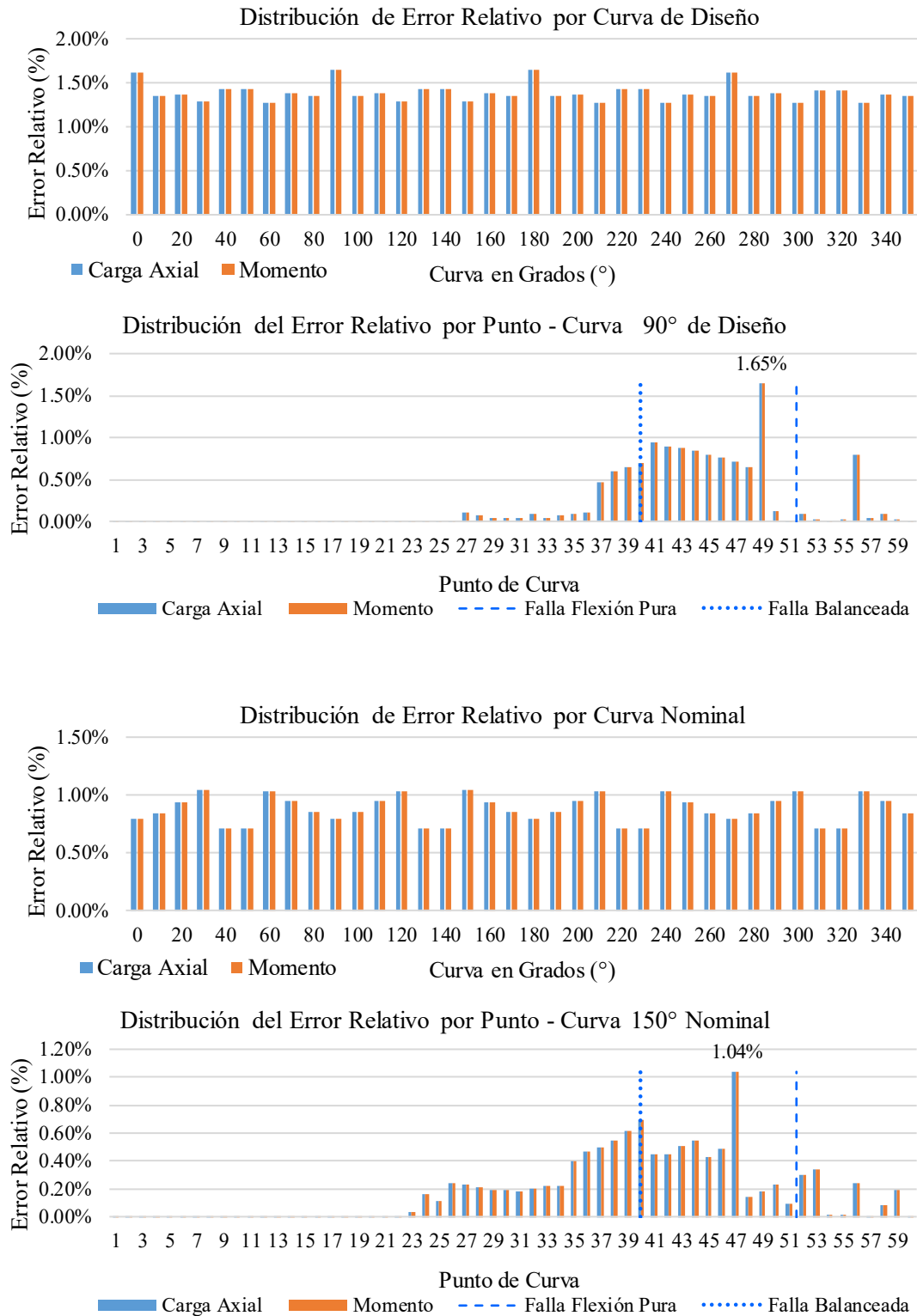
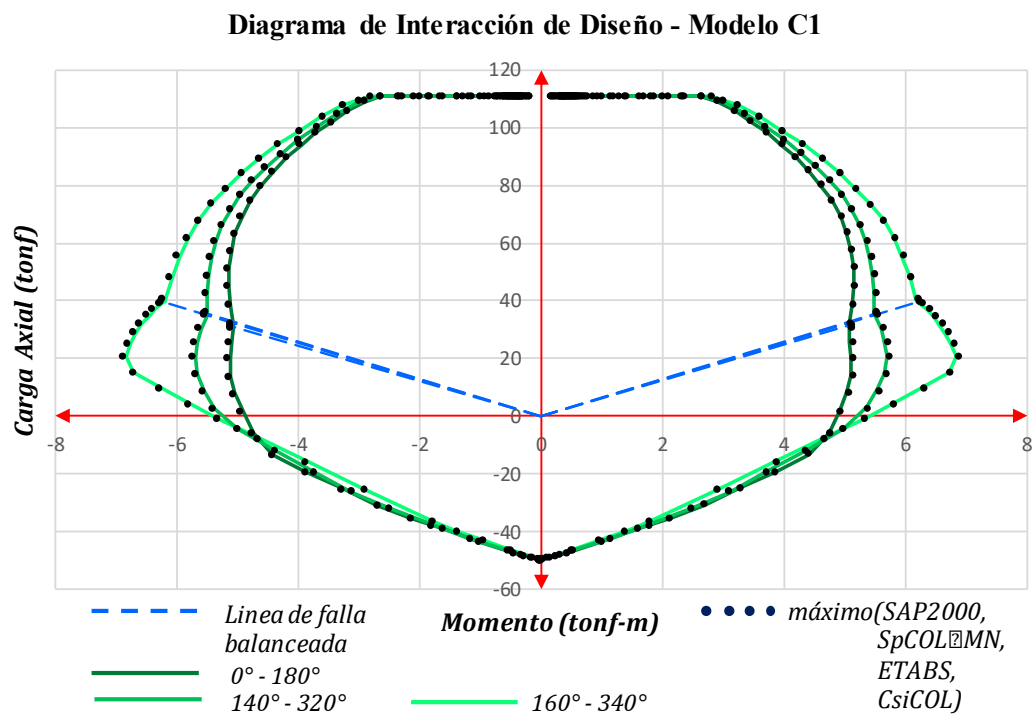
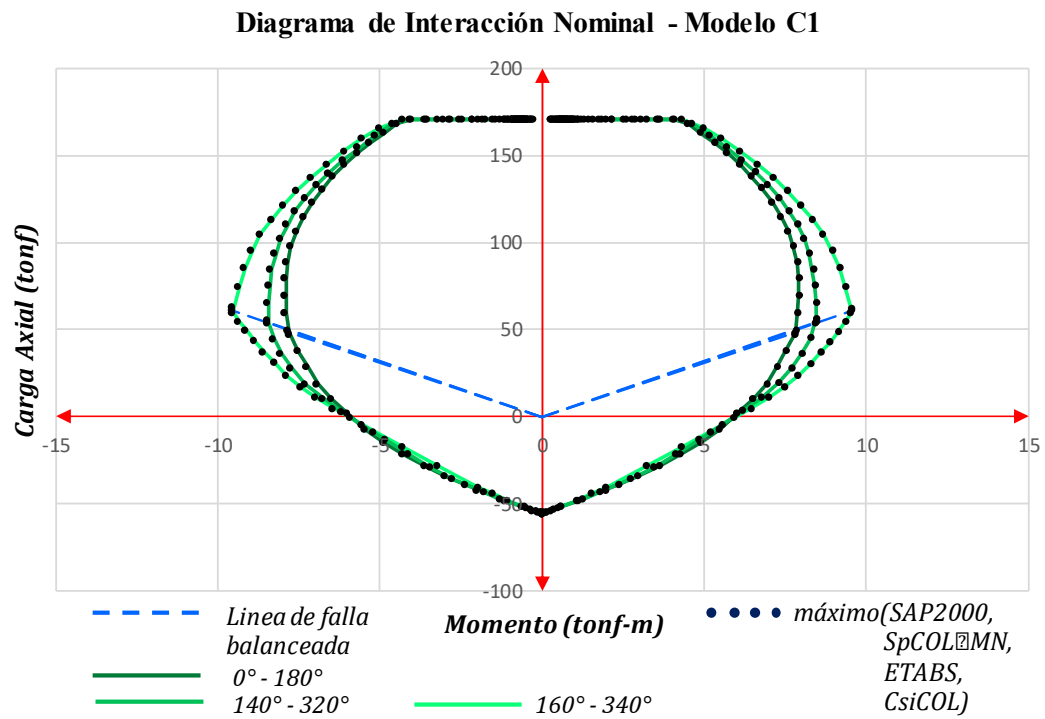


Figura 77

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C1.



3.11.2.2. Modelo C2-(60X60X25)

Figura 78

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C2.

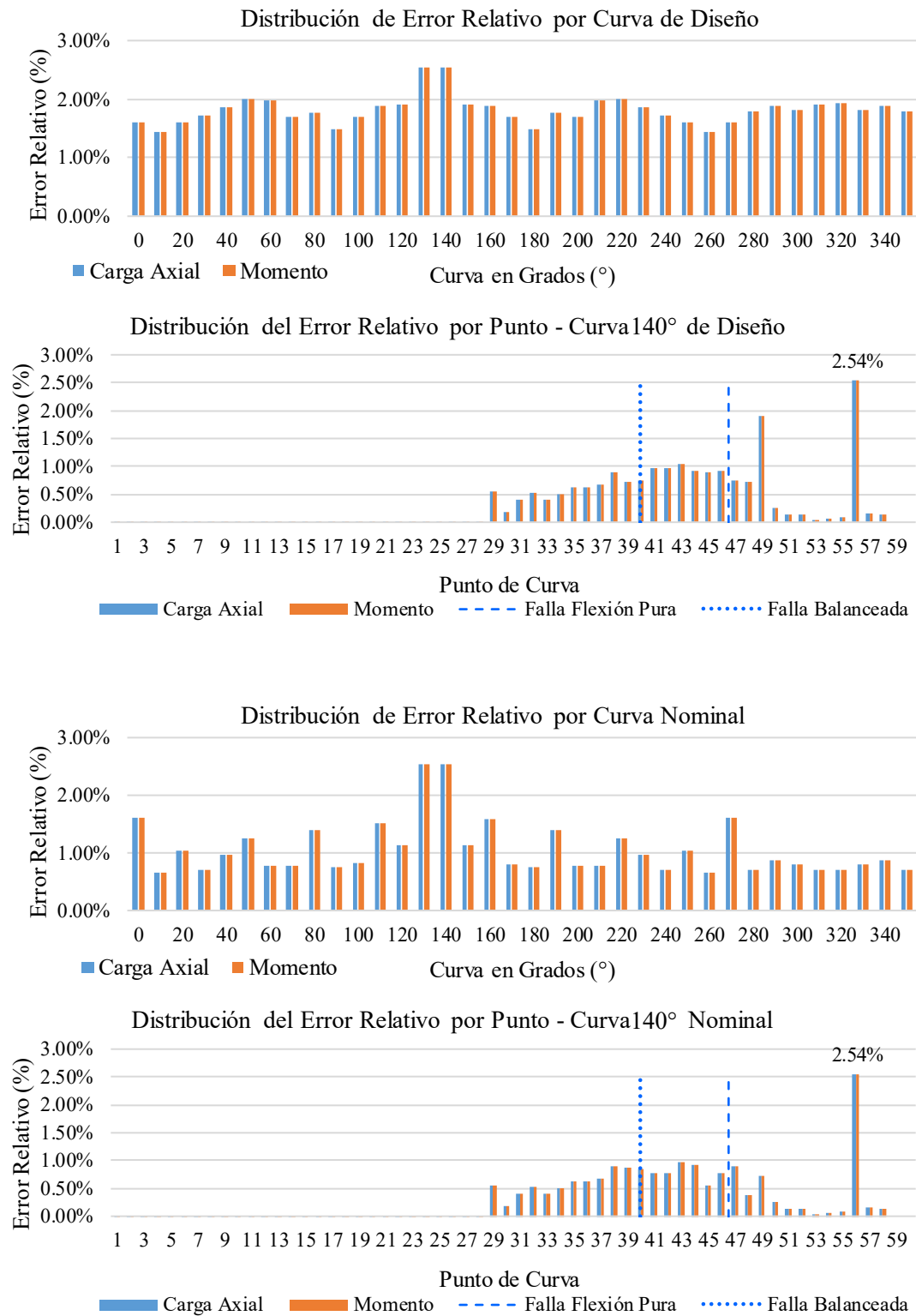


Figura 79

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C2.

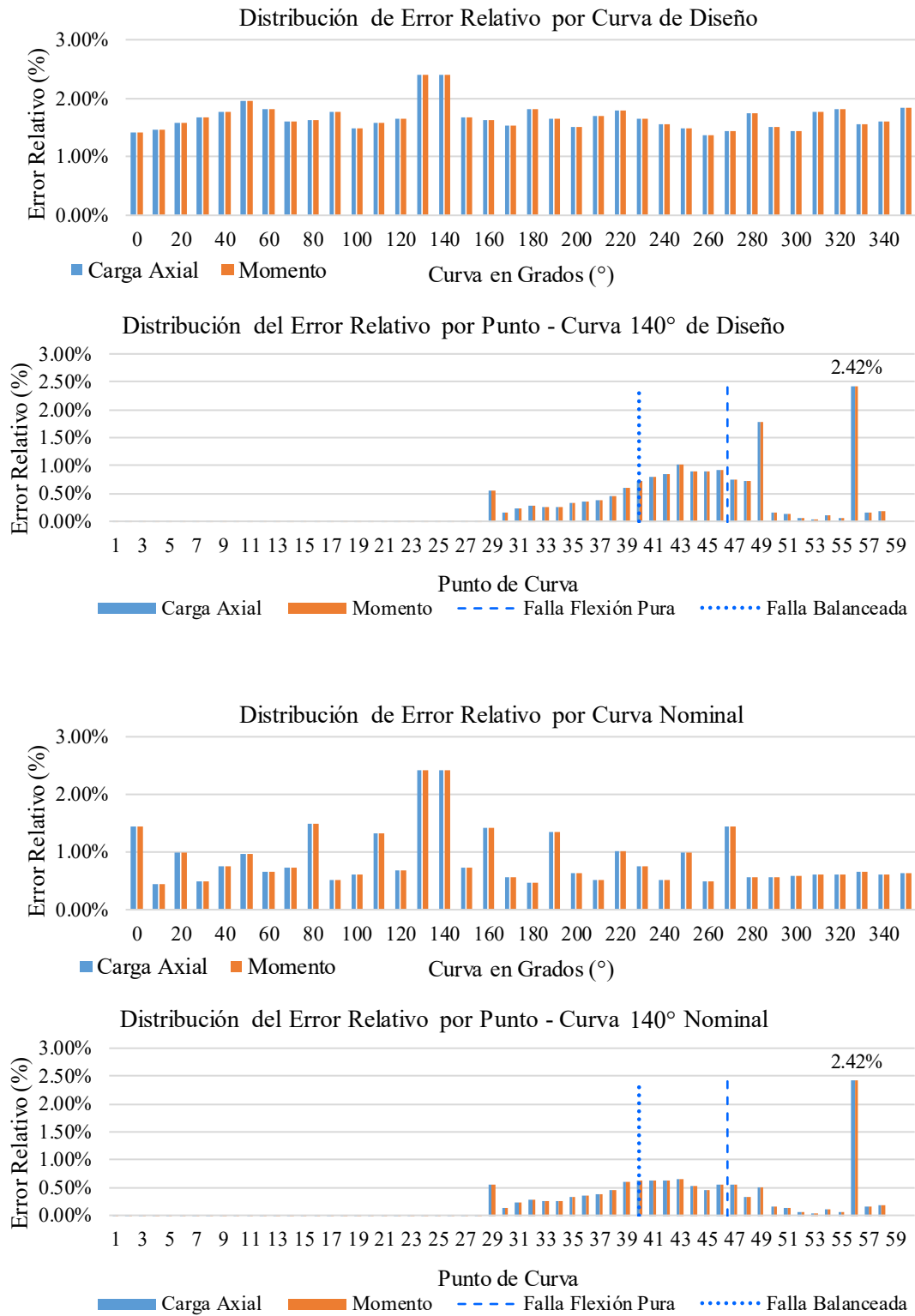


Figura 80

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C2.

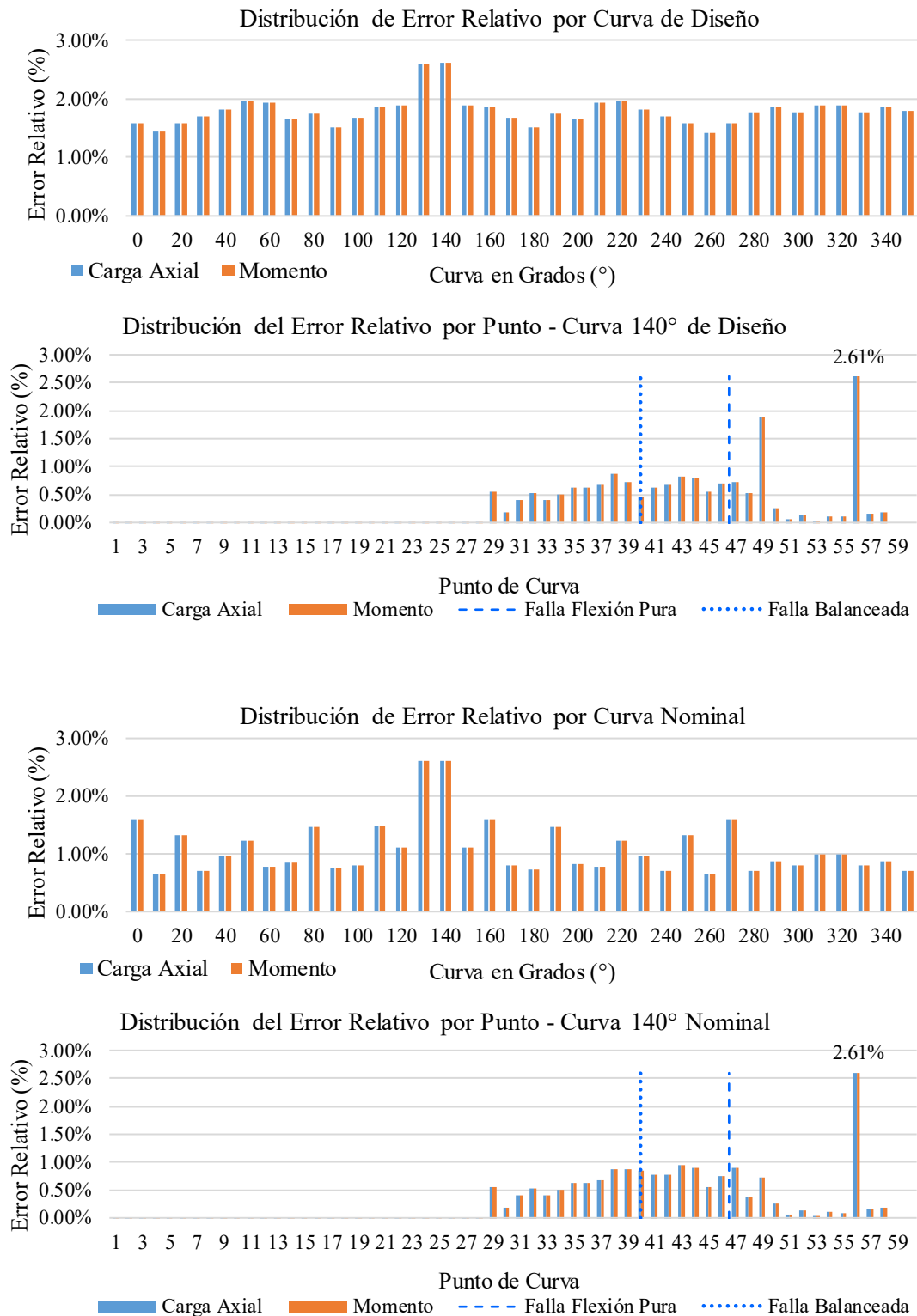


Figura 81

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C2.

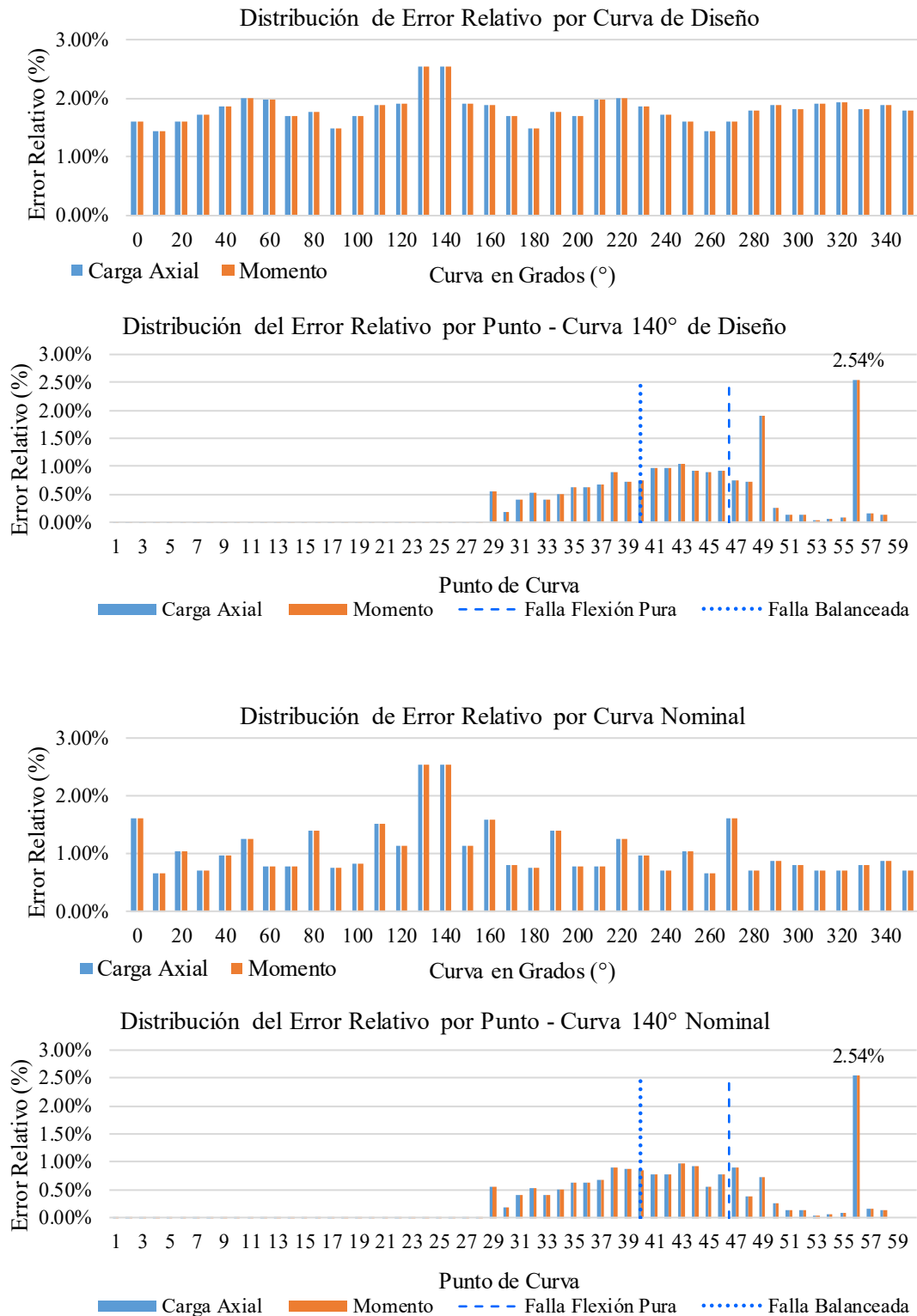


Figura 82

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C2.

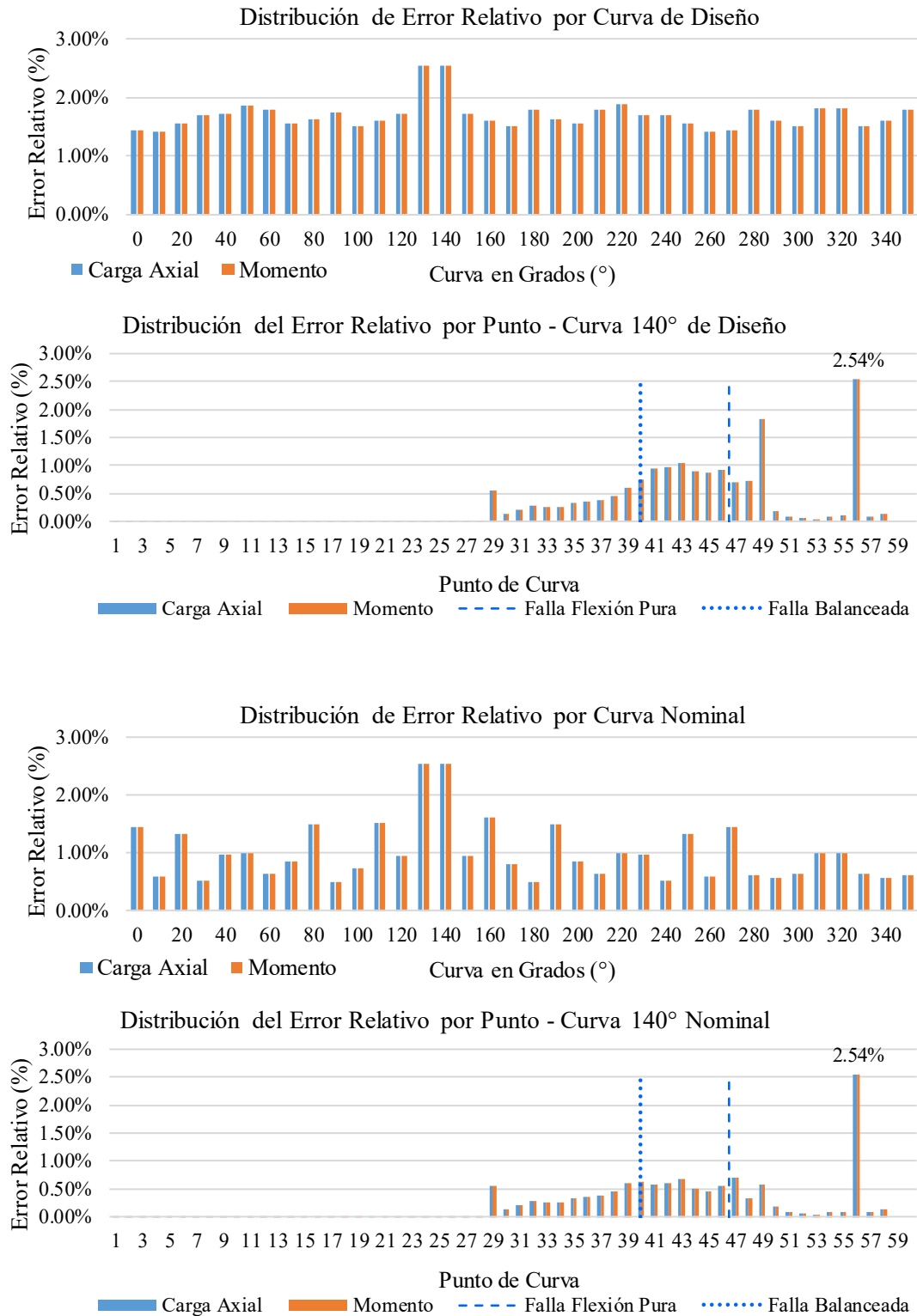
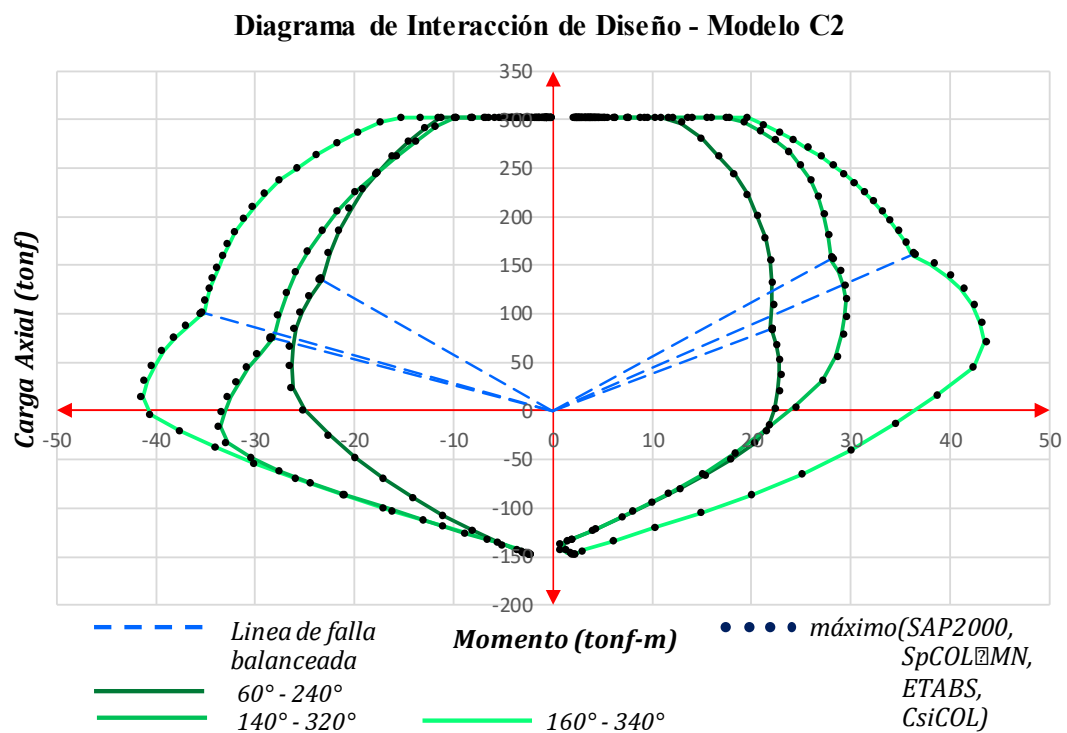
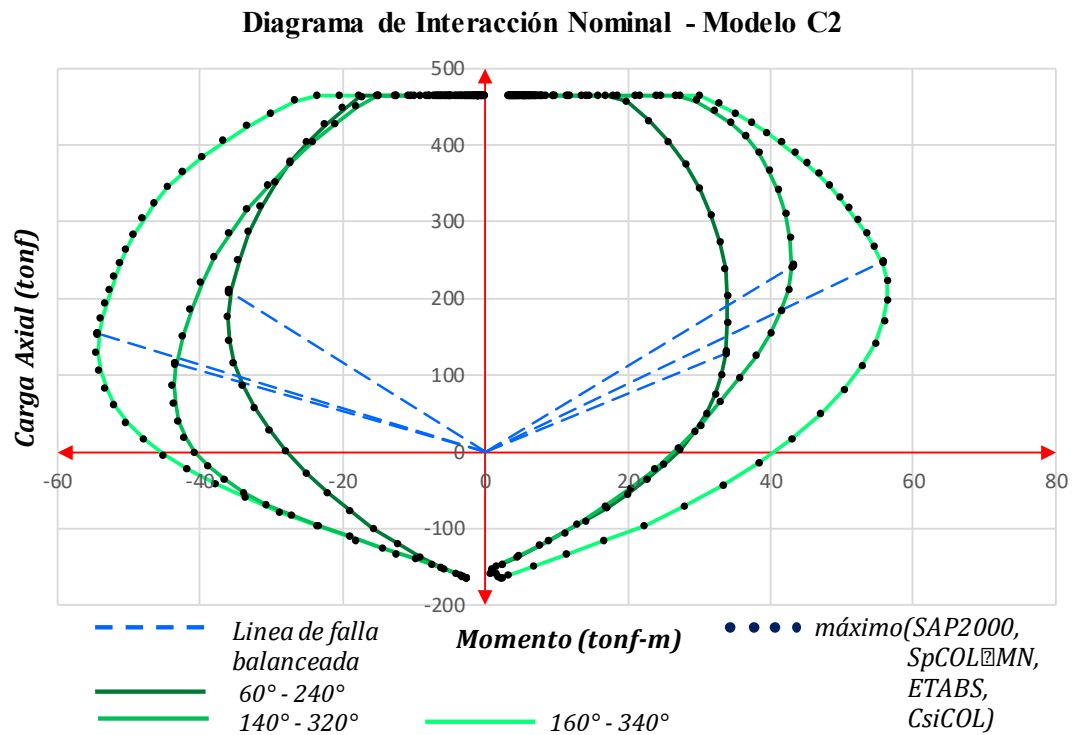


Figura 83

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C2.



3.11.2.3. Modelo C3-(60X60X25)

Figura 84

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C3.

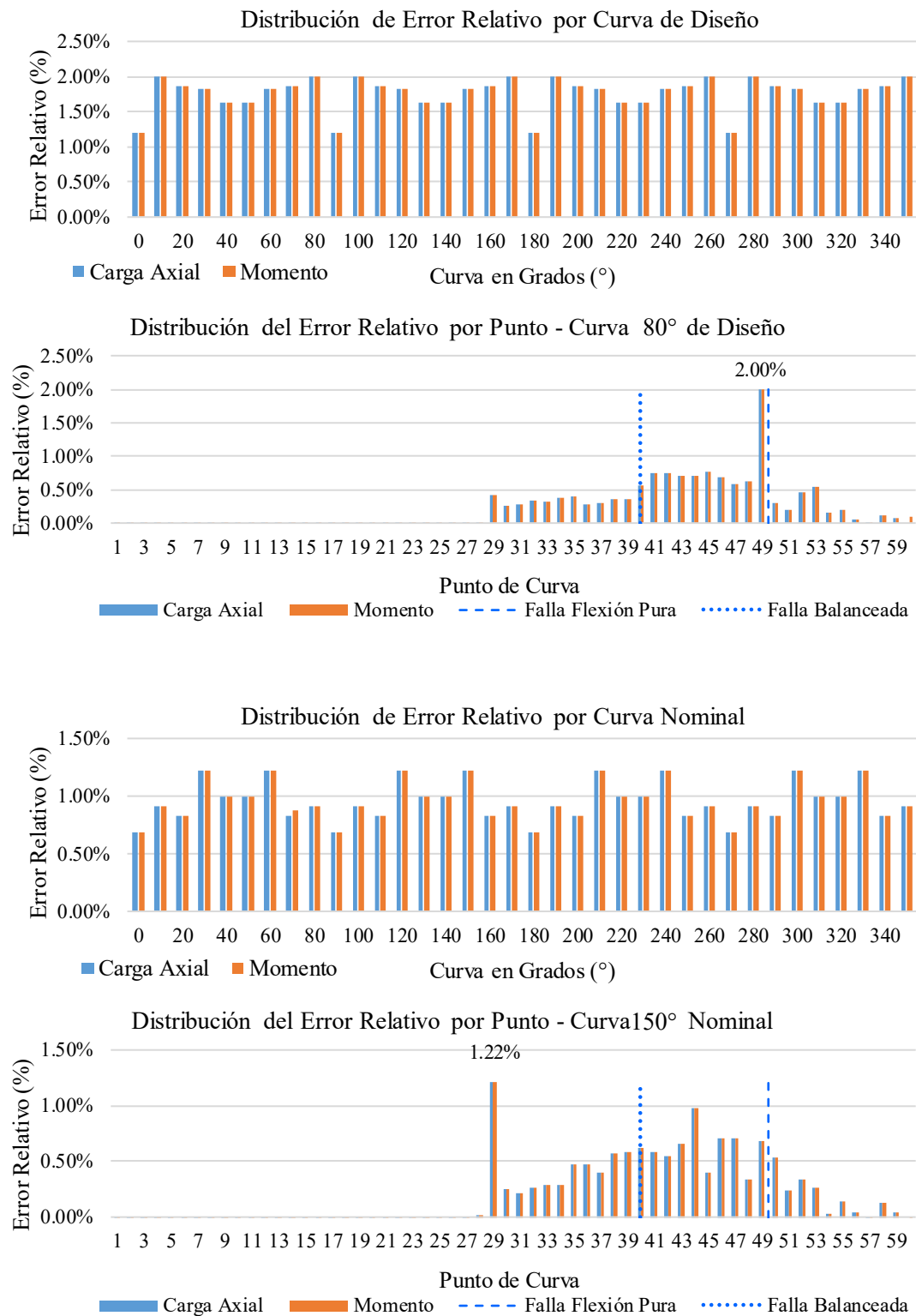


Figura 85

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C3.

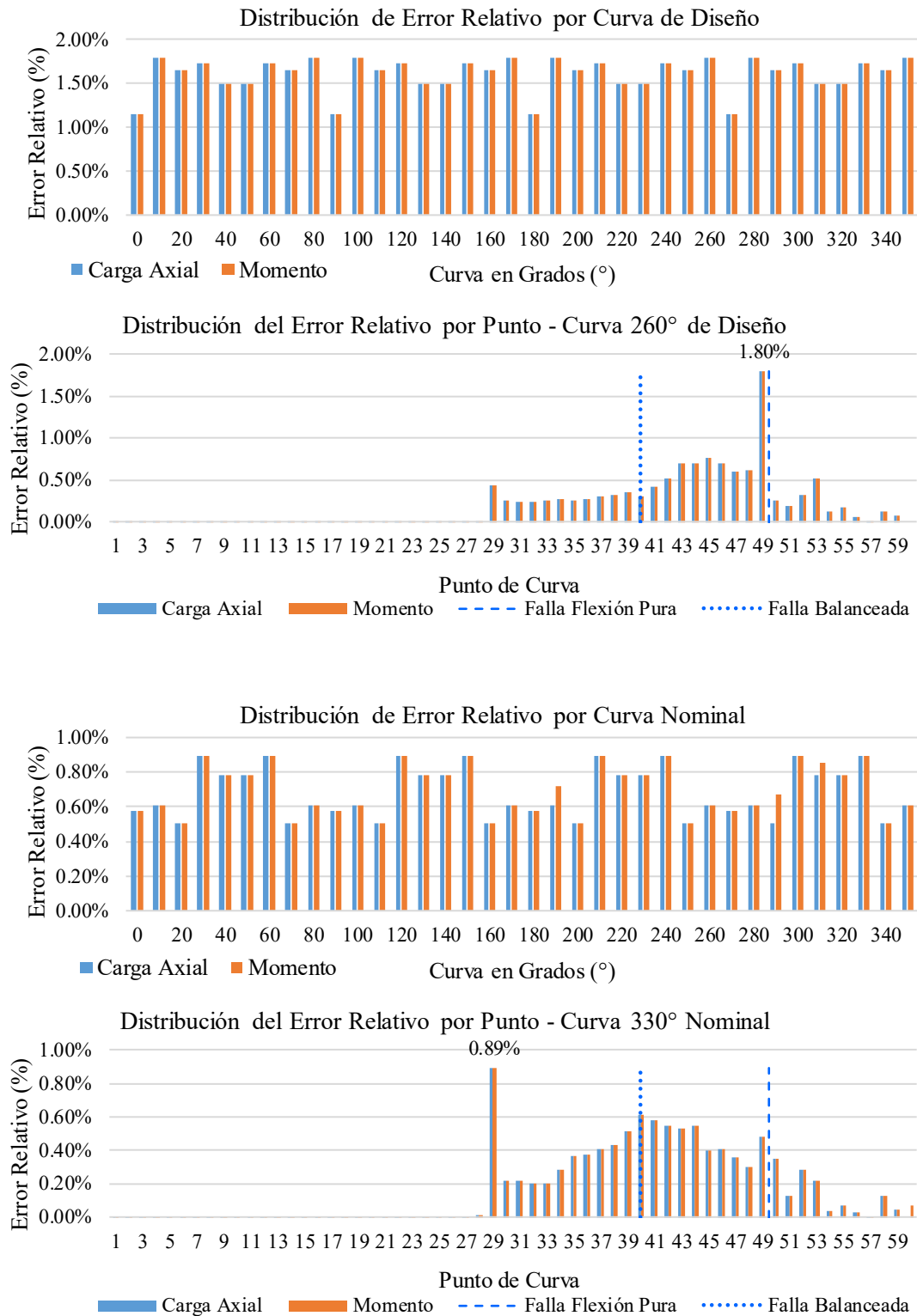


Figura 86

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C3.

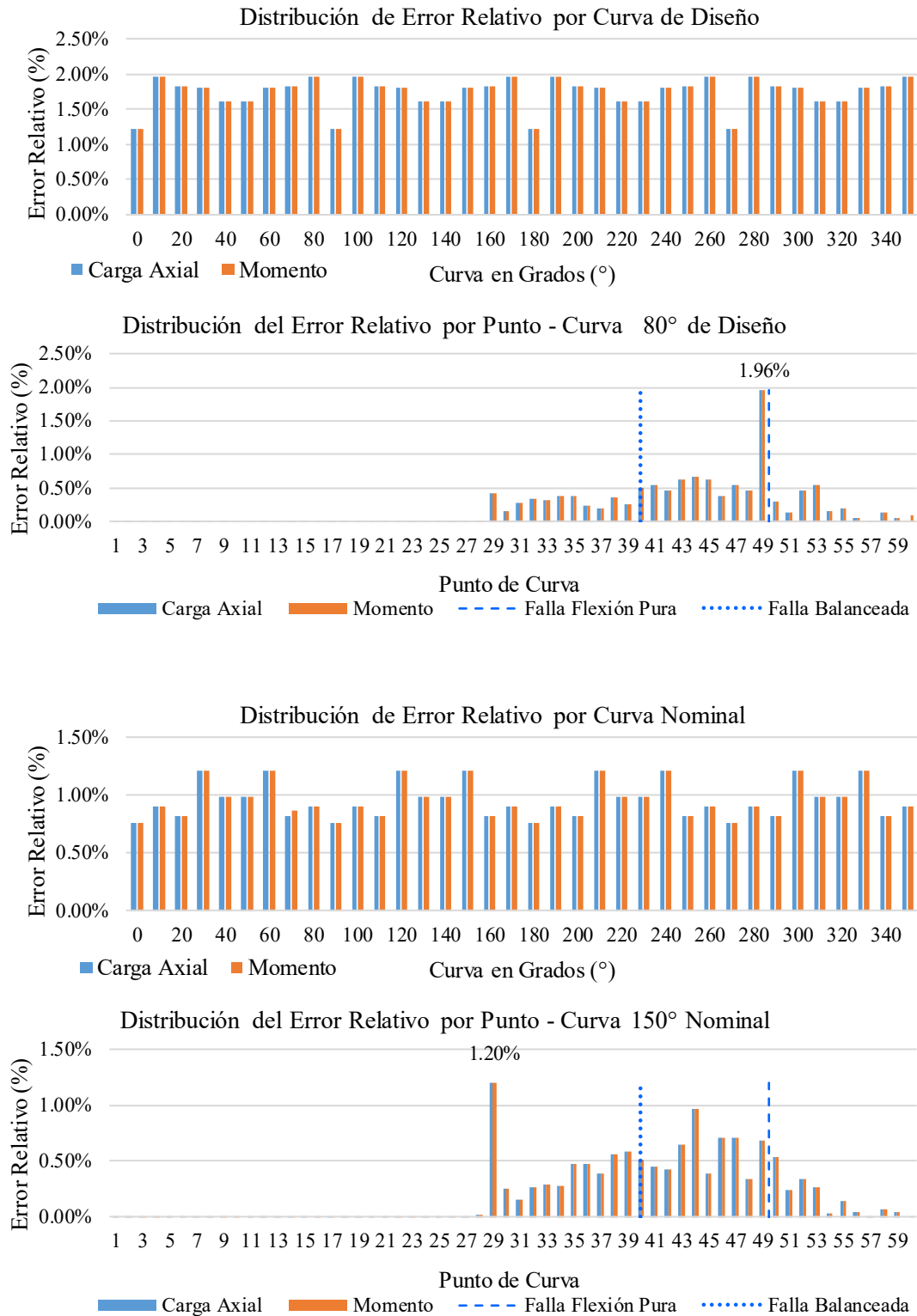


Figura 87

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C3.

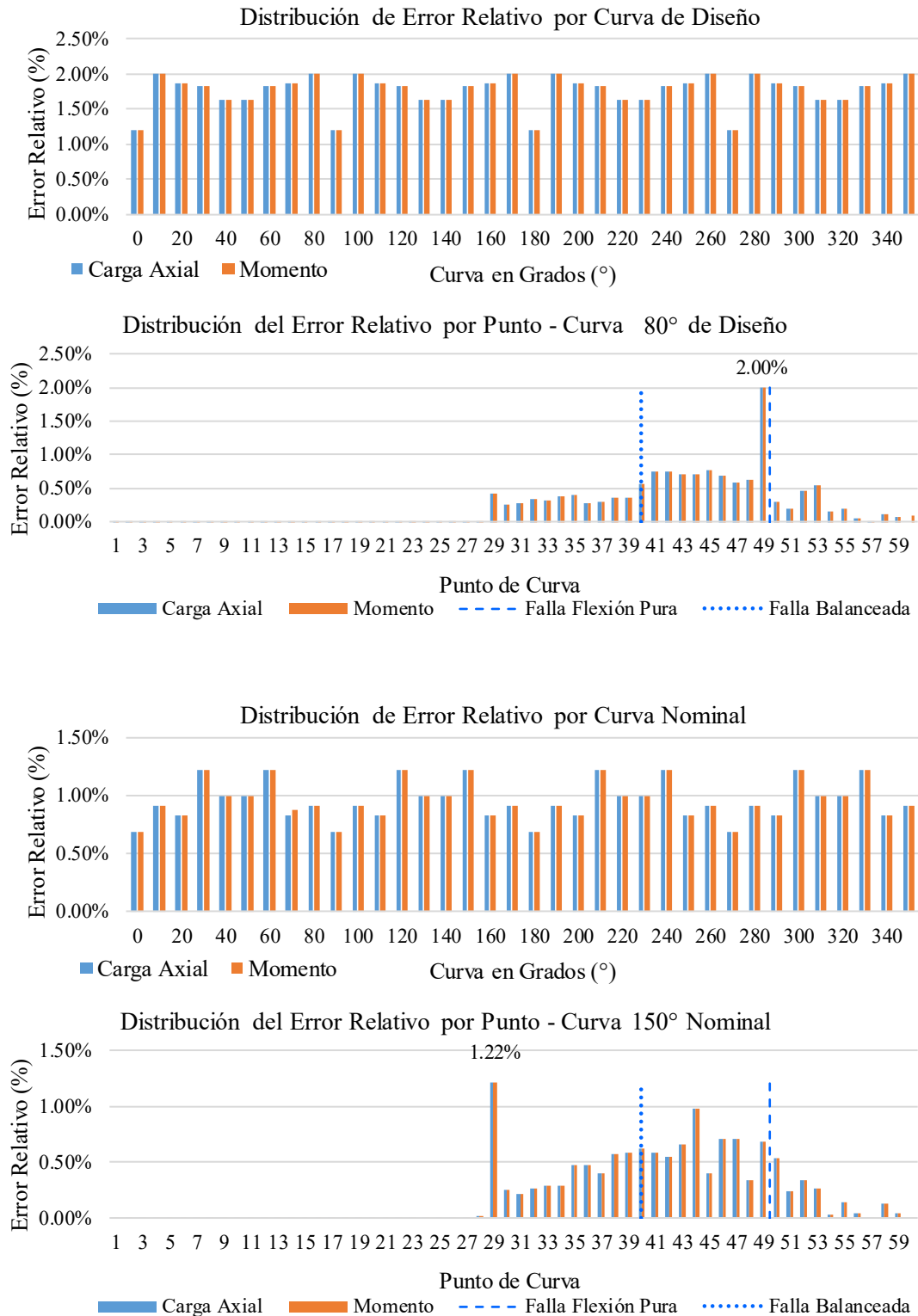


Figura 88

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C3.

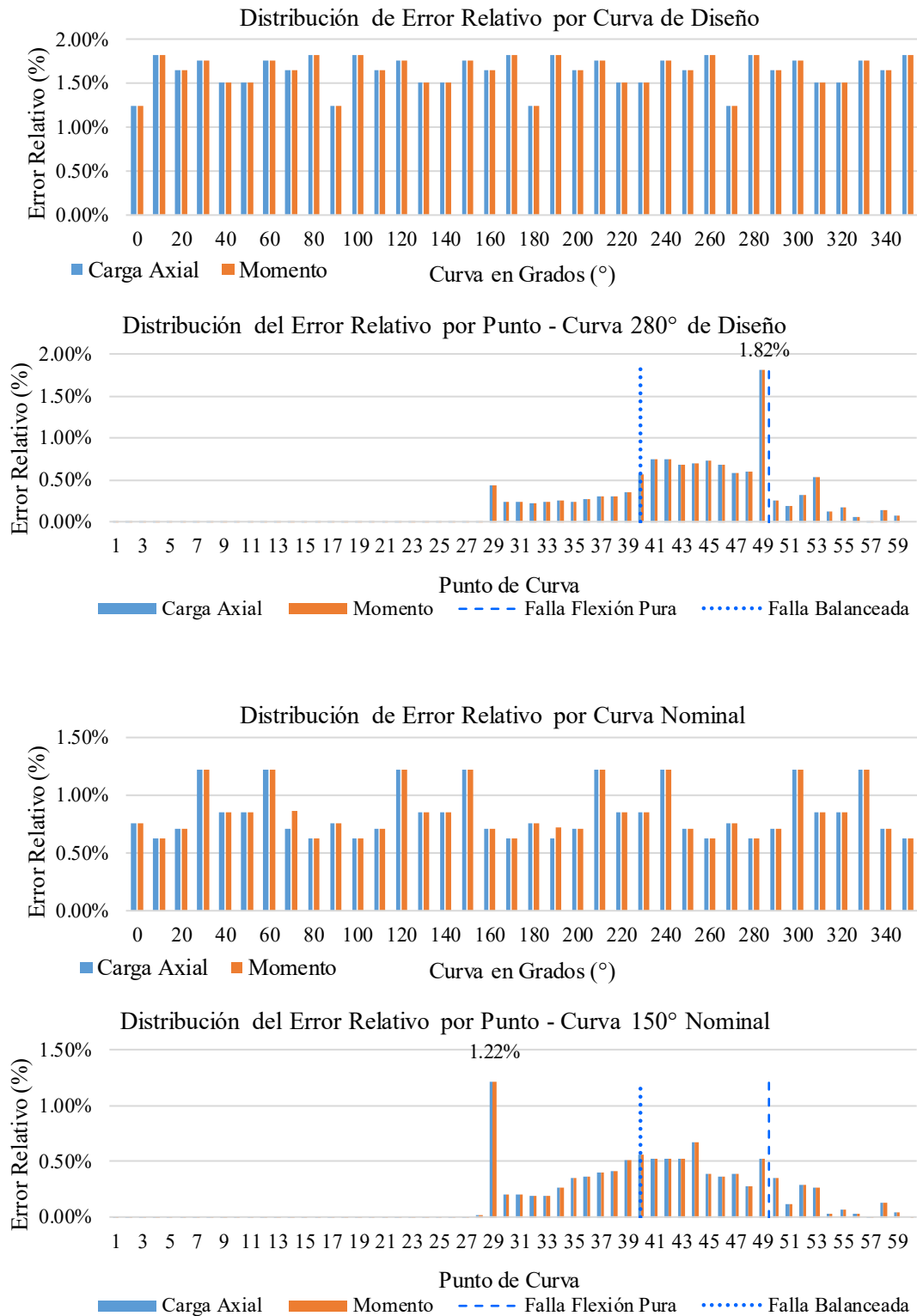
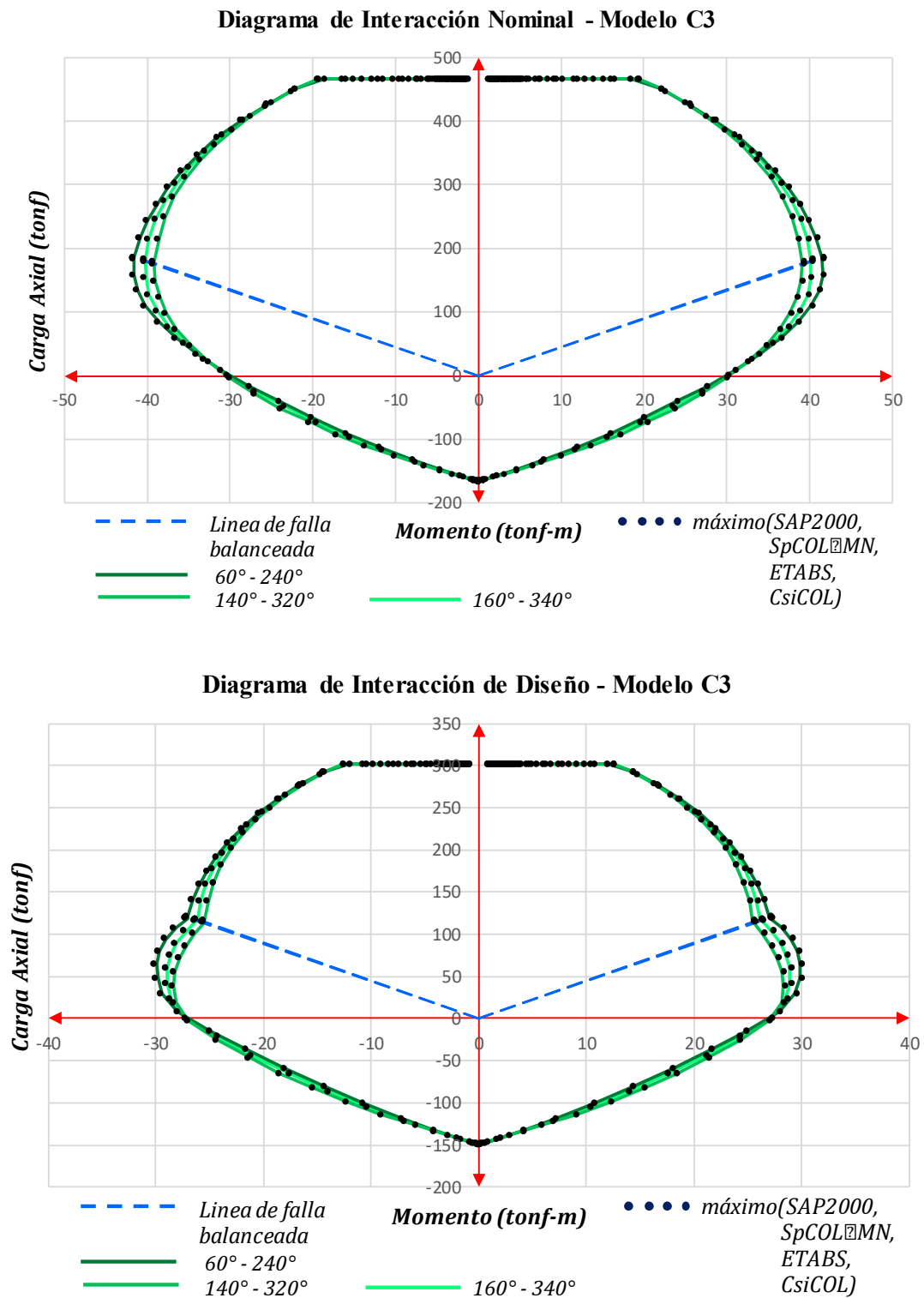


Figura 89

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C3.



3.11.2.4. Modelo C4-(70X70X25)

Figura 90

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C4.

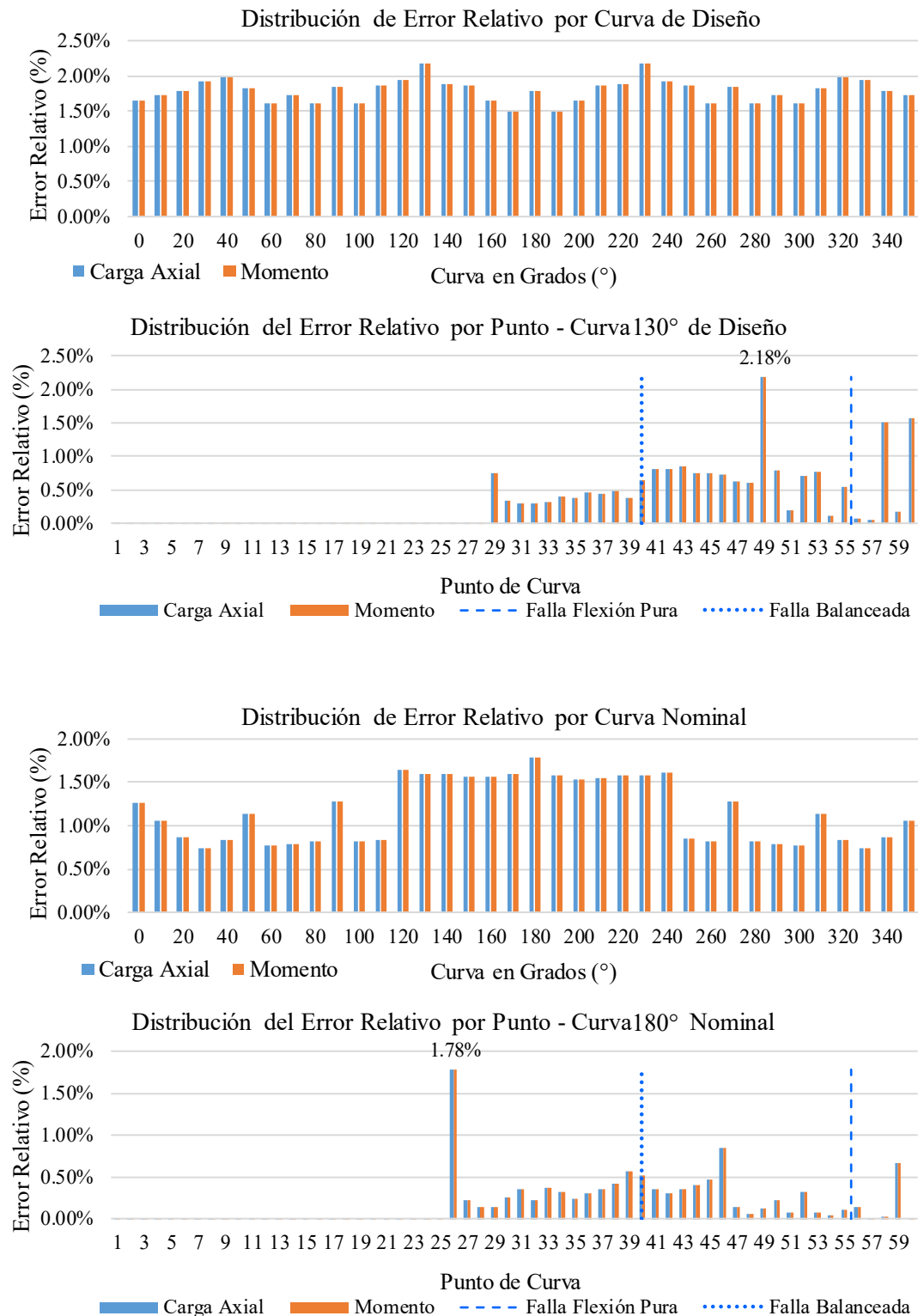


Figura 91

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C4.



Figura 92

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C4.

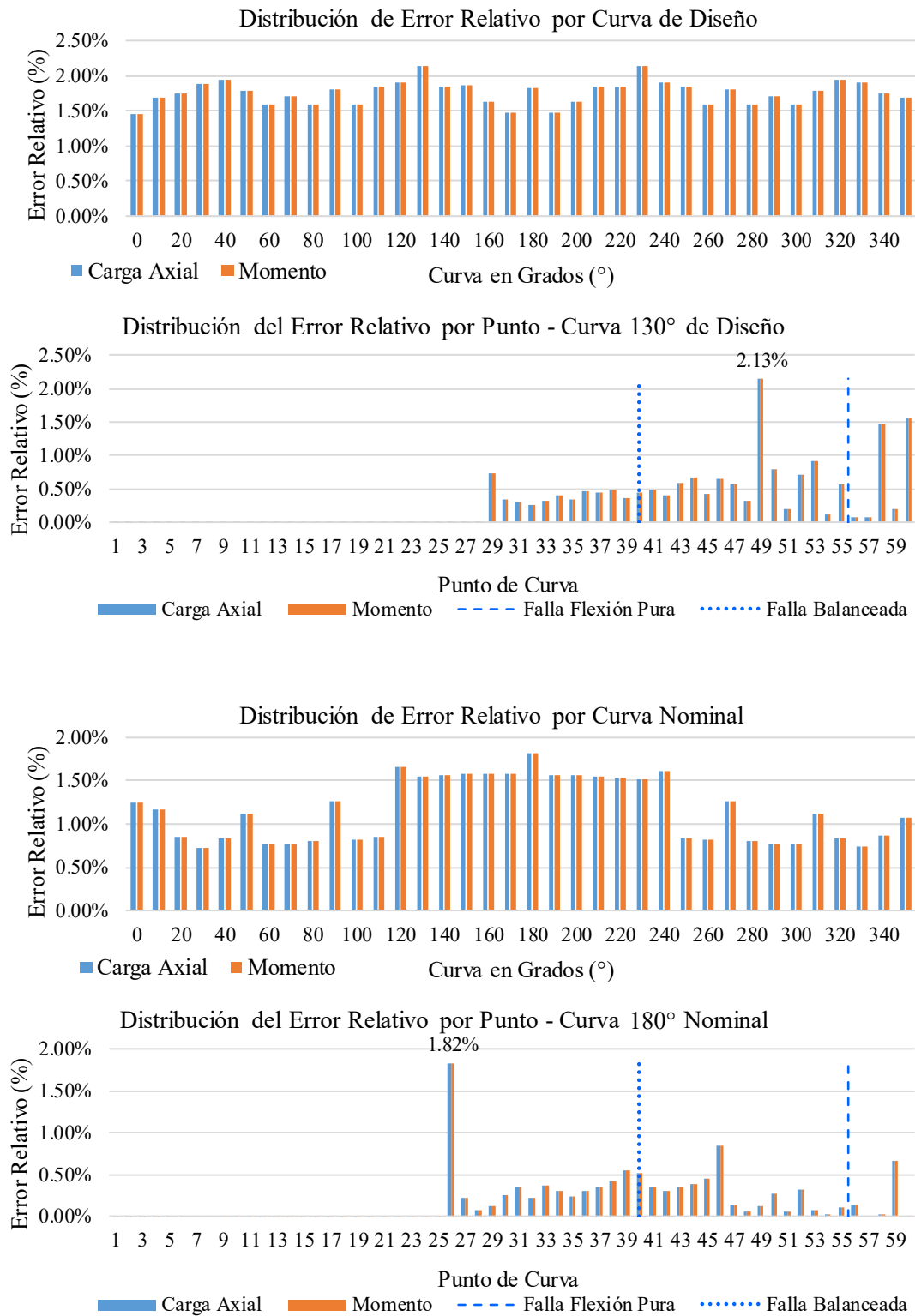


Figura 93

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C4.

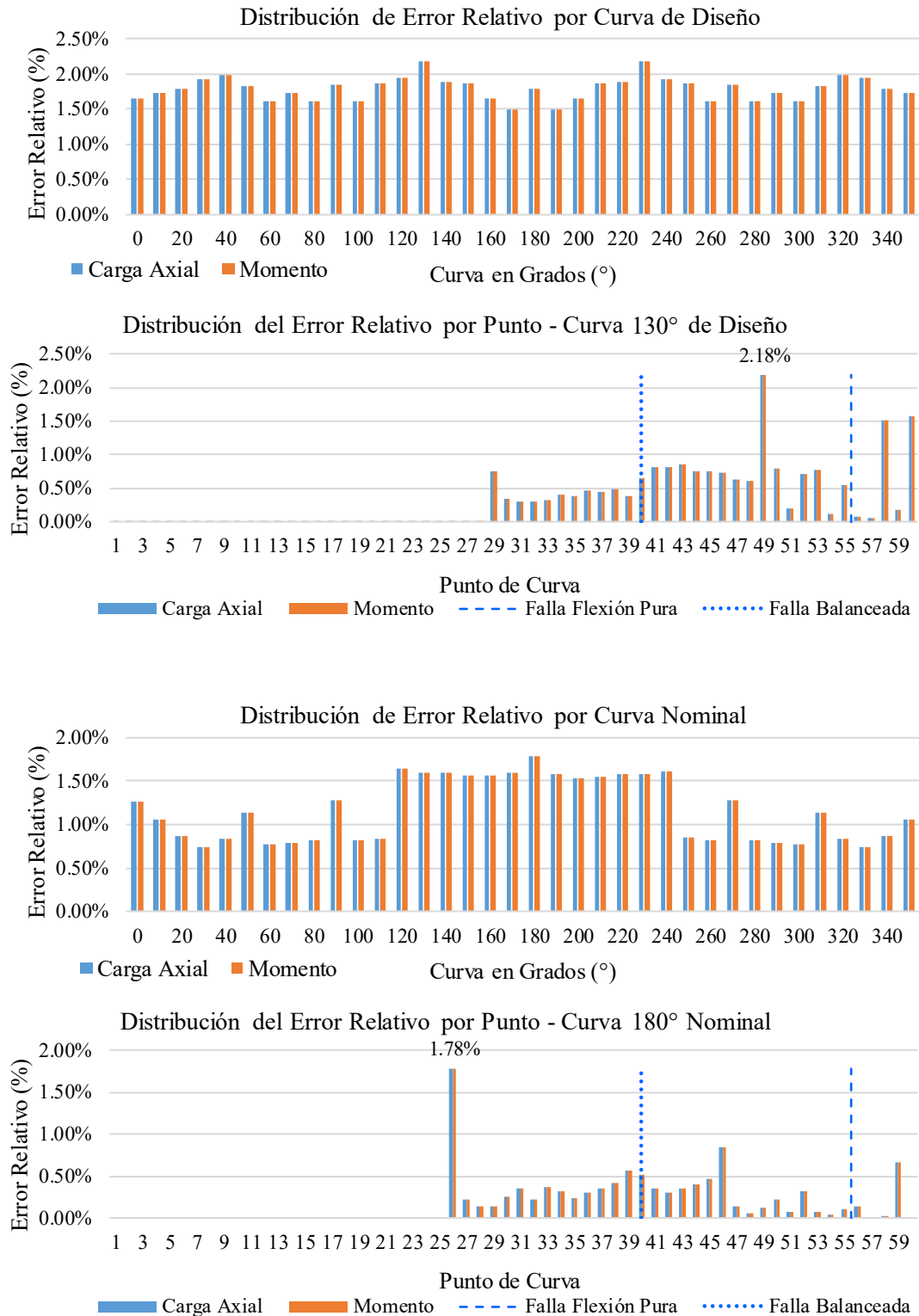


Figura 94

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C4.

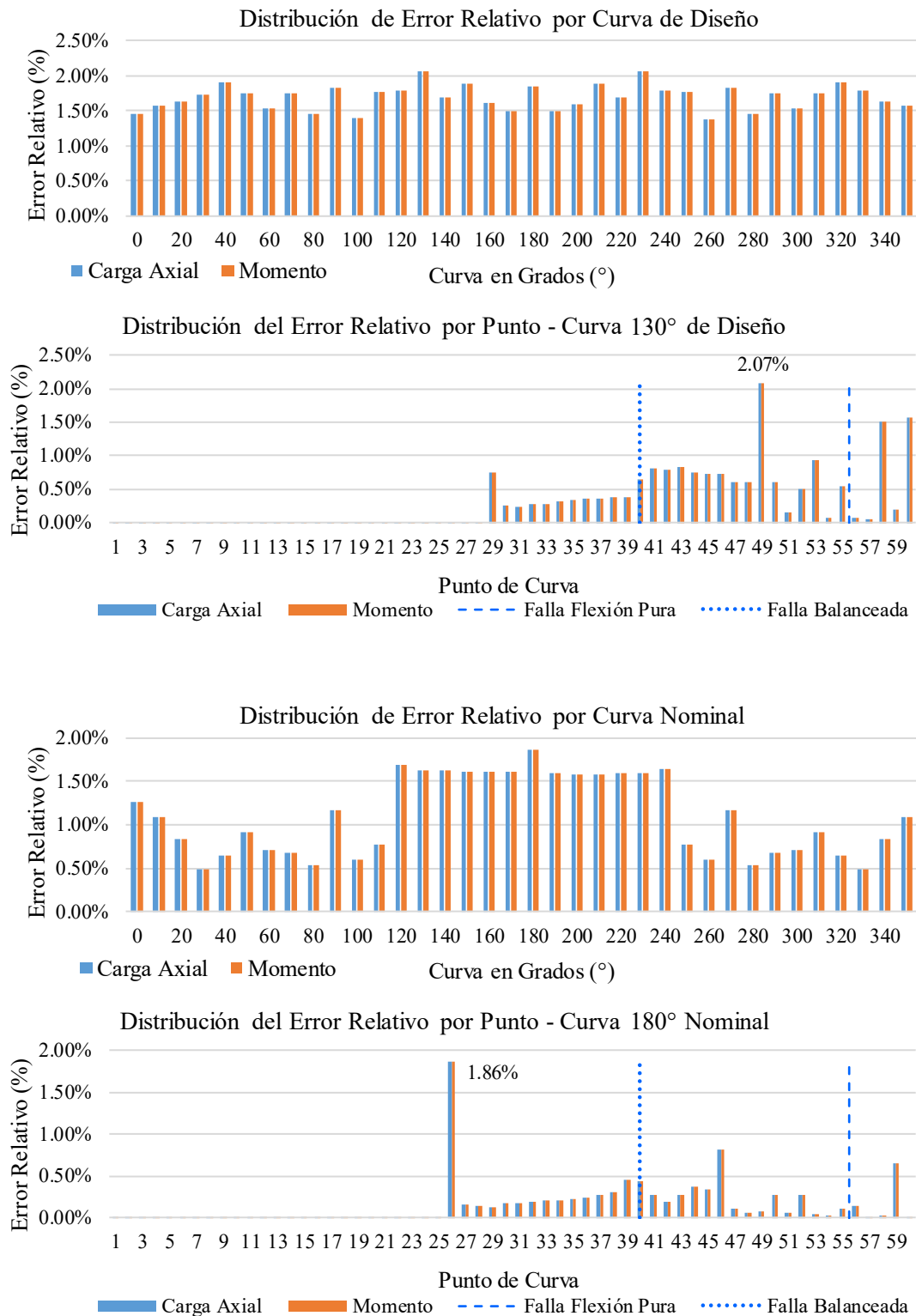
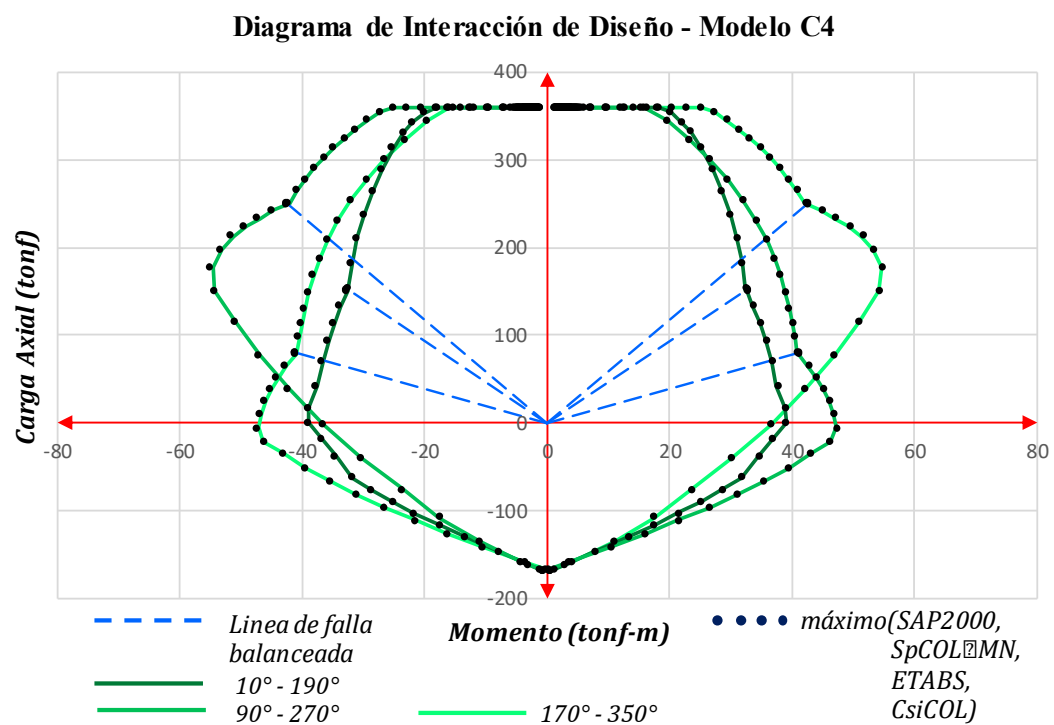
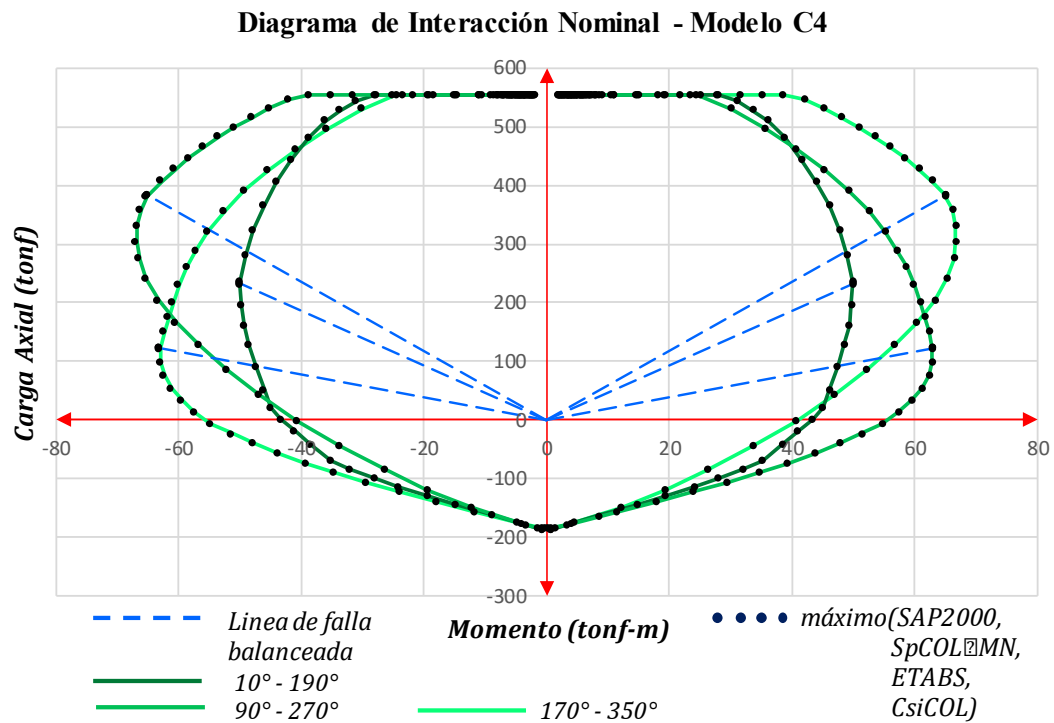


Figura 95

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C4.



3.11.2.5. Modelo C5-(D40)

Figura 96

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C5.

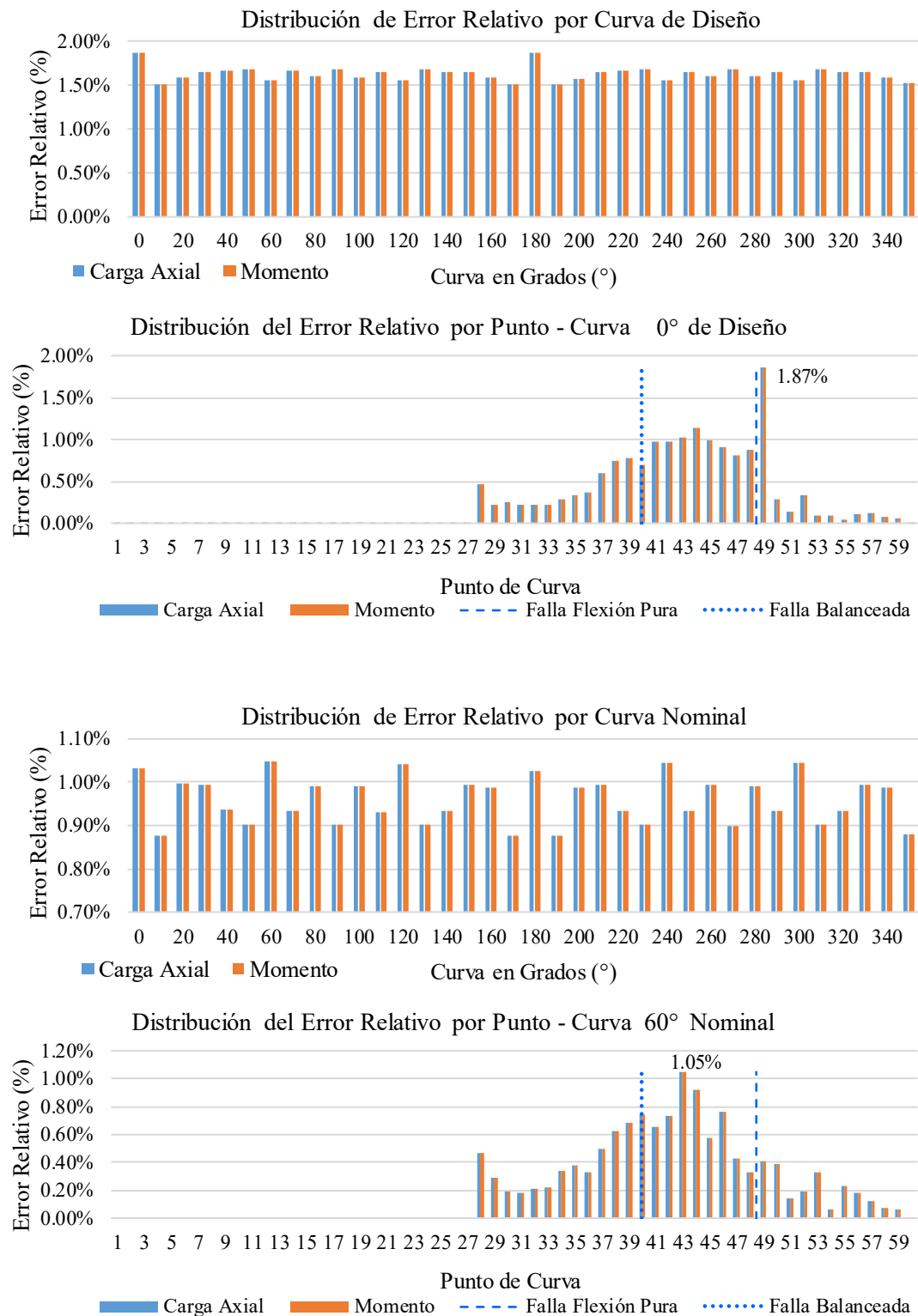


Figura 97

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C5.

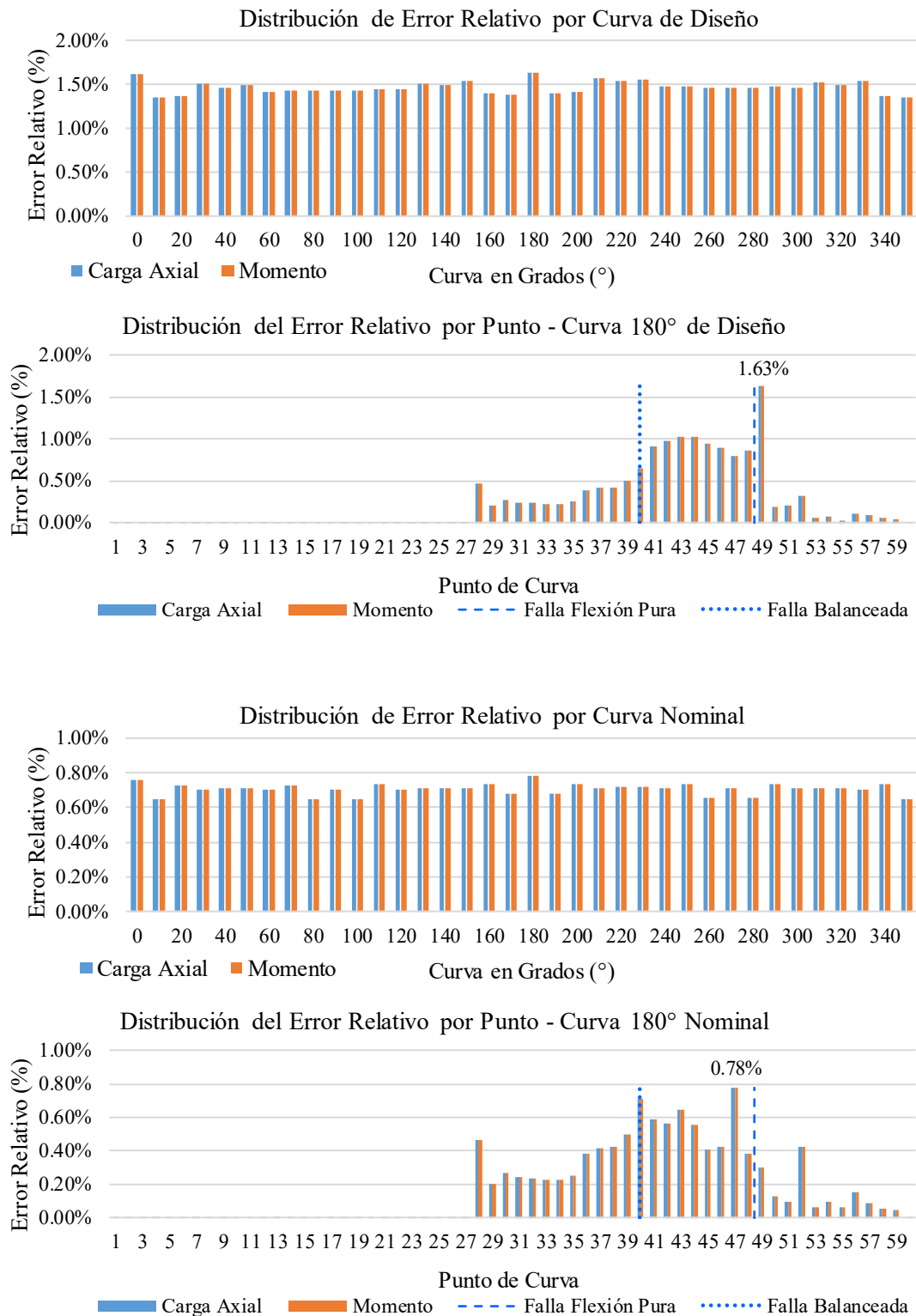


Figura 98

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C5.

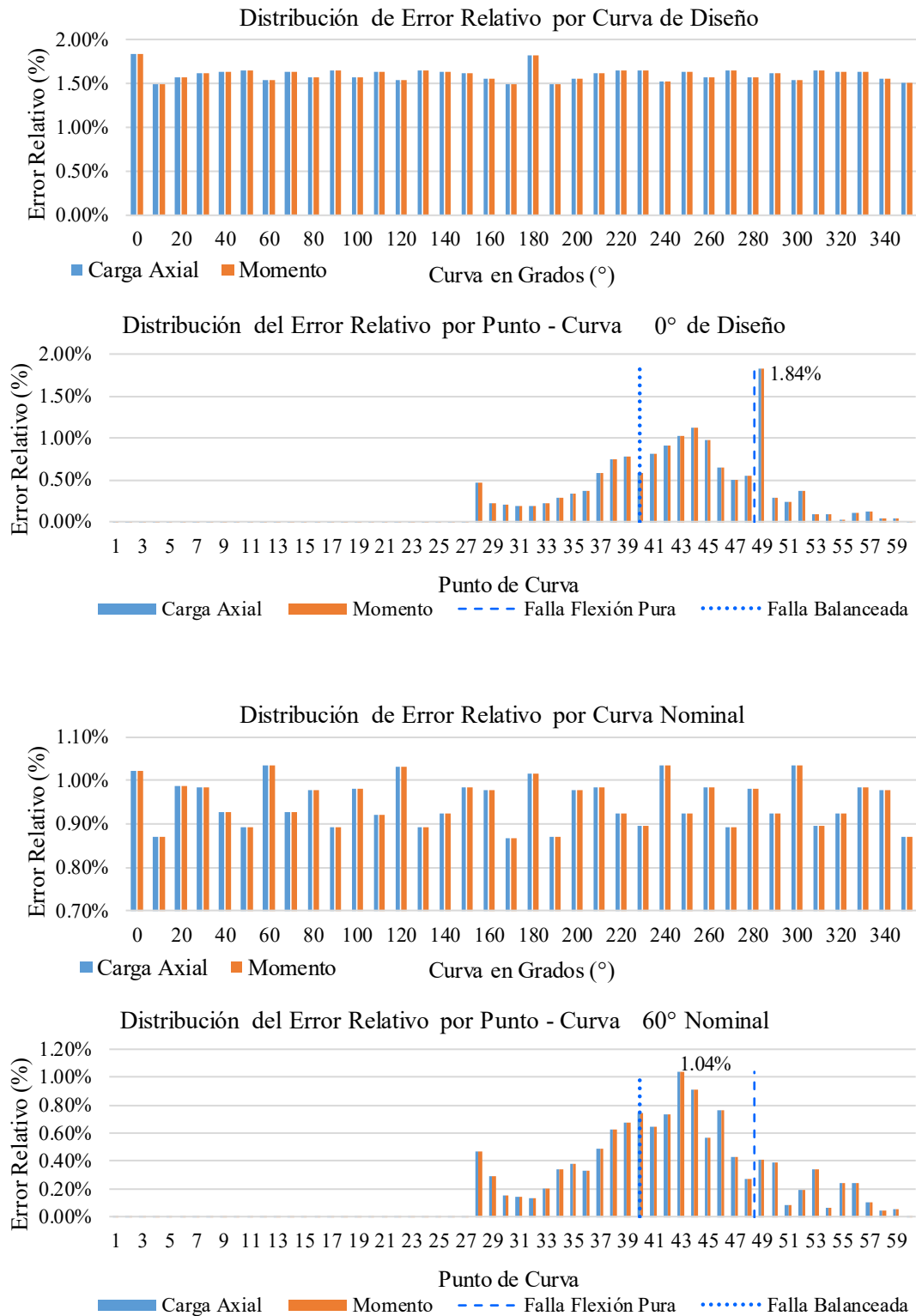


Figura 99

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C5.

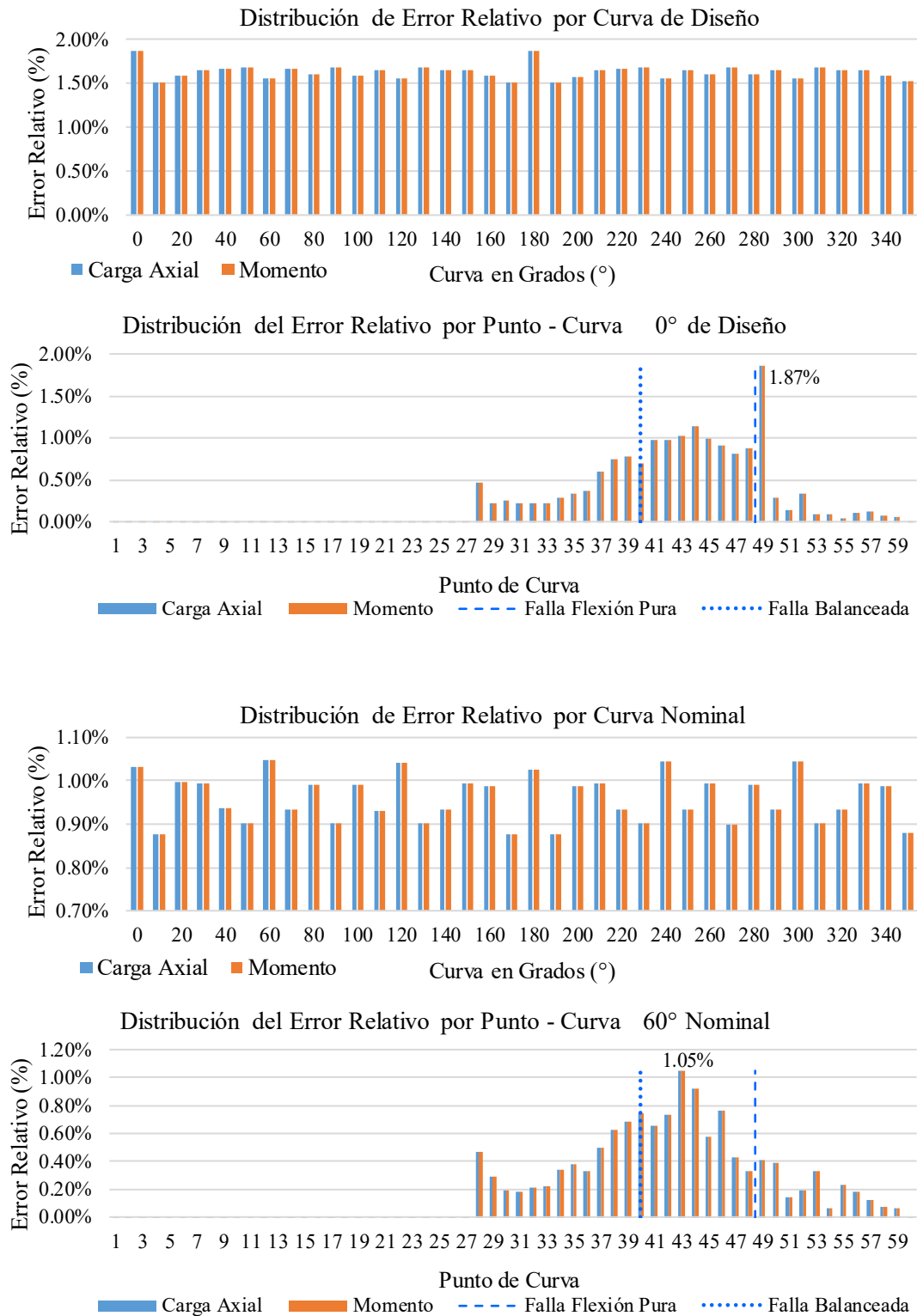


Figura 100

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C5.

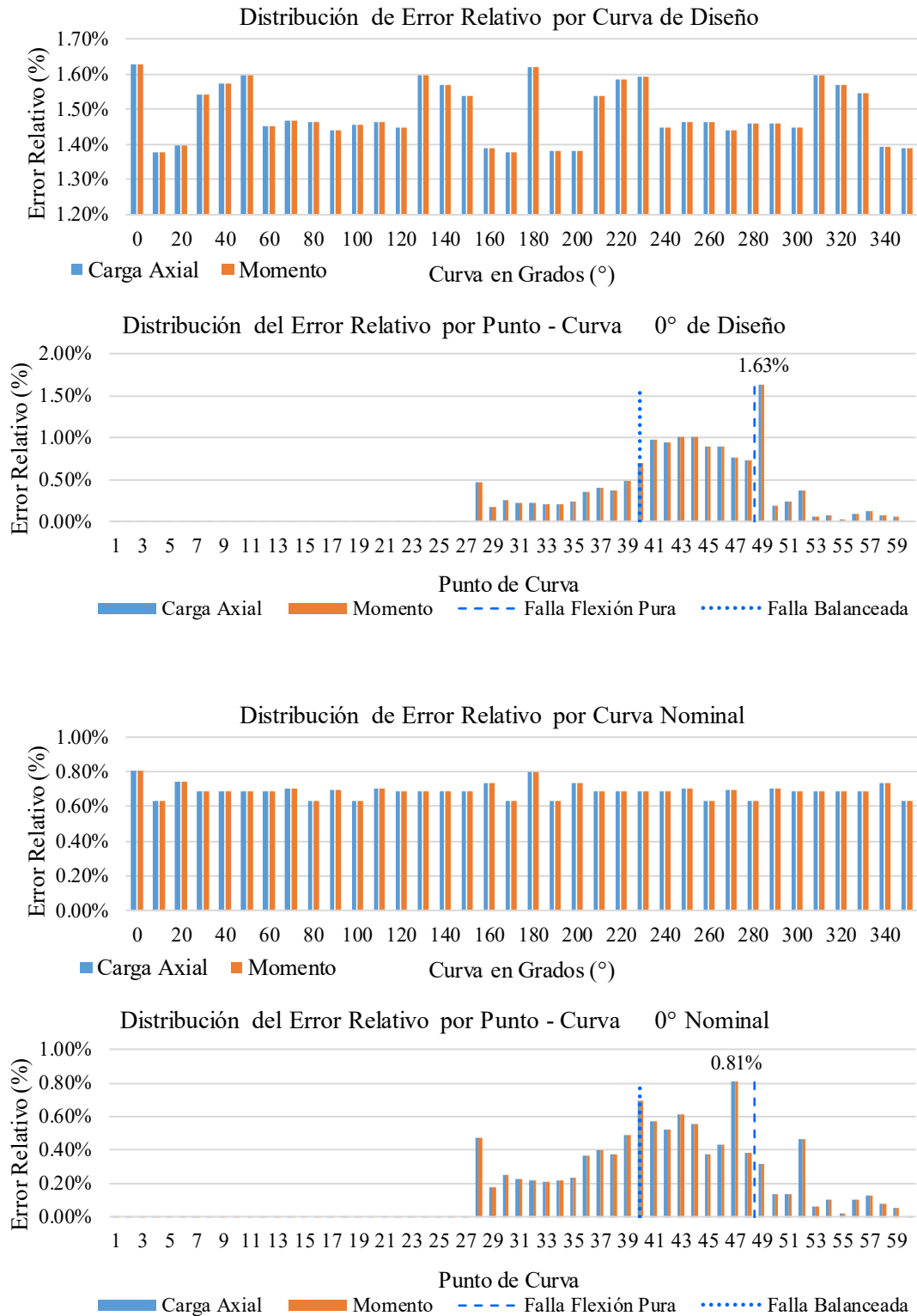
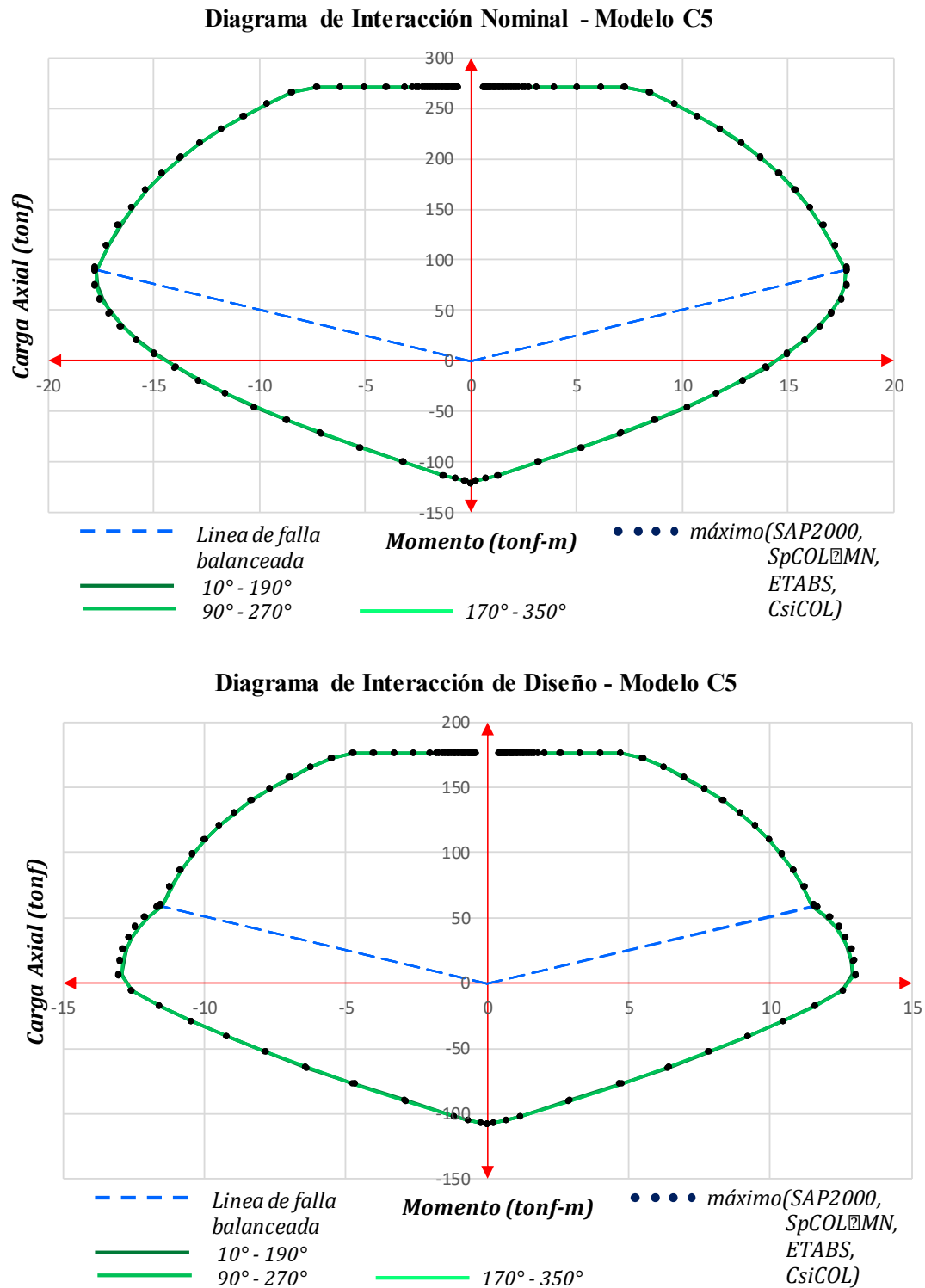


Figura 101

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C5.



3.11.2.6. Modelo C6-(D80E25)

Figura 102

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C6.

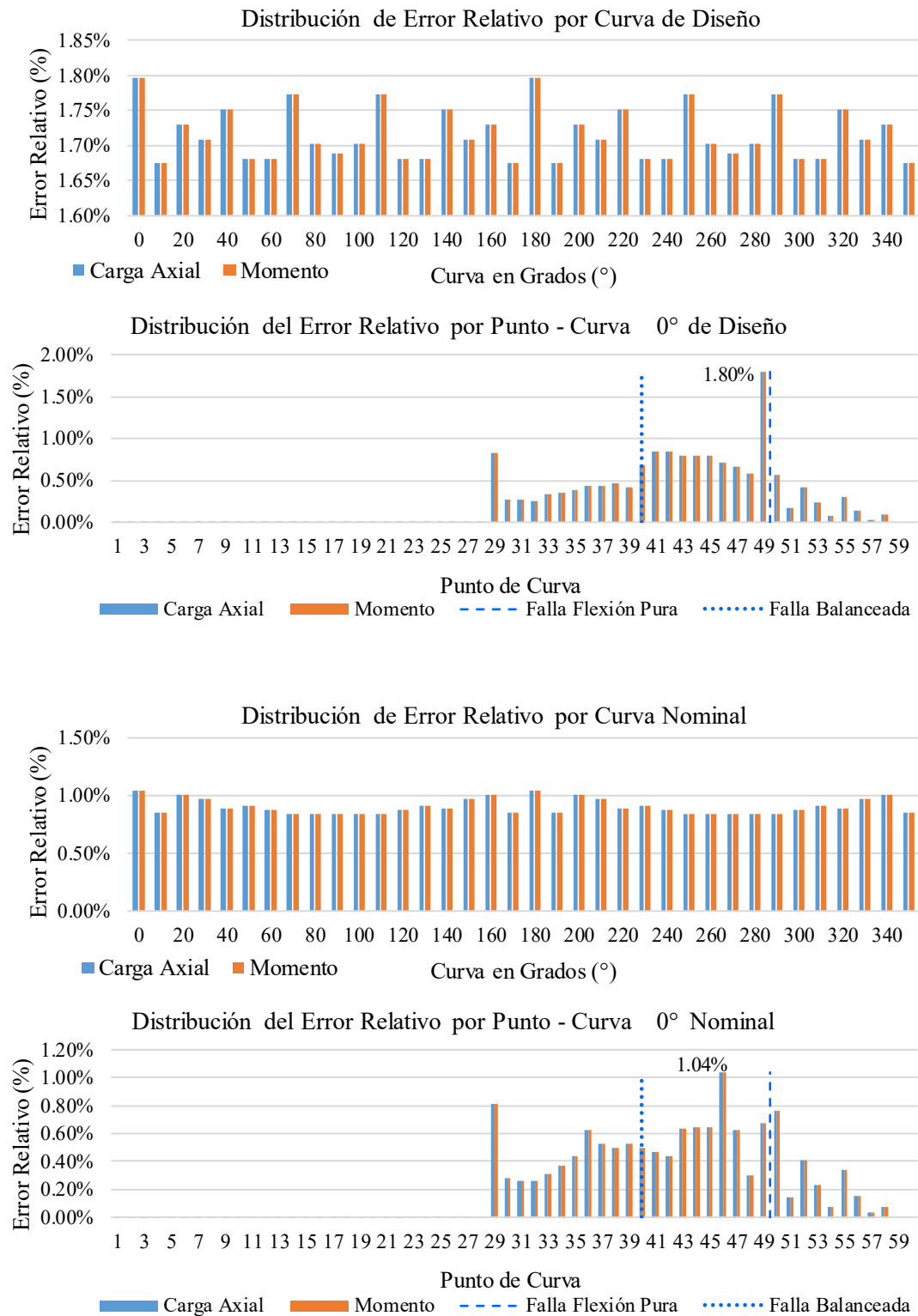


Figura 103

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – C6.

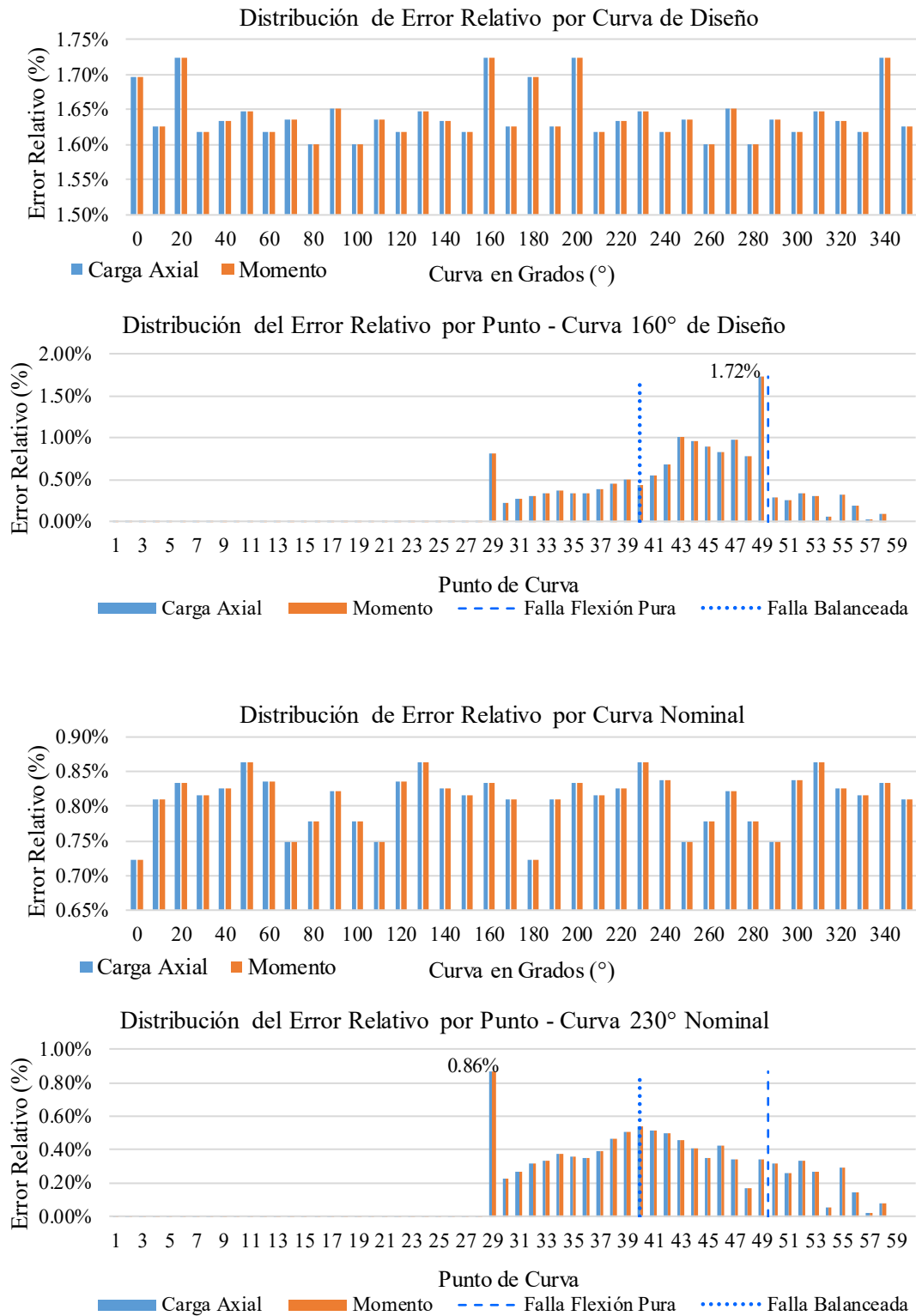


Figura 104

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – C6.

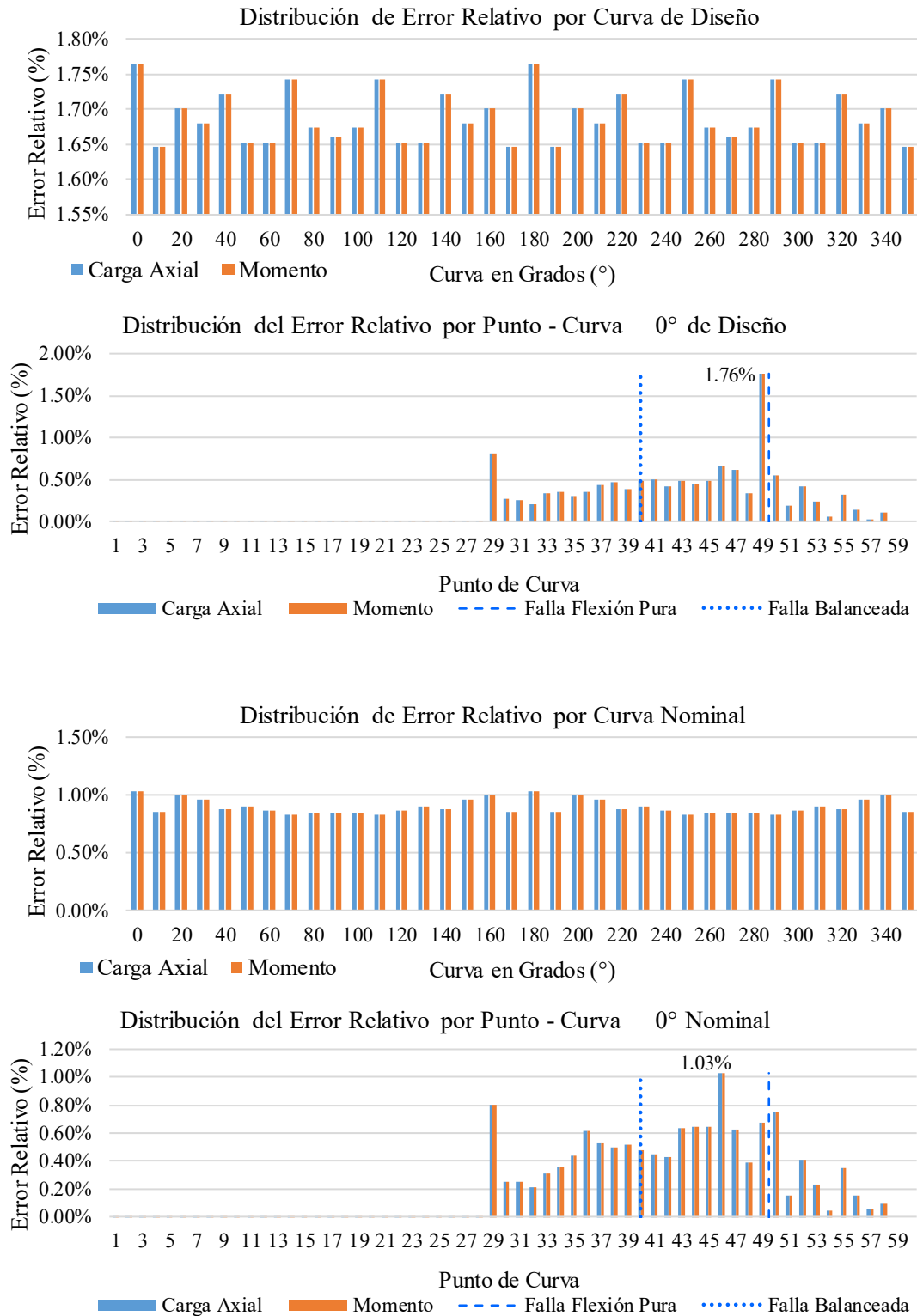


Figura 105

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – C6.

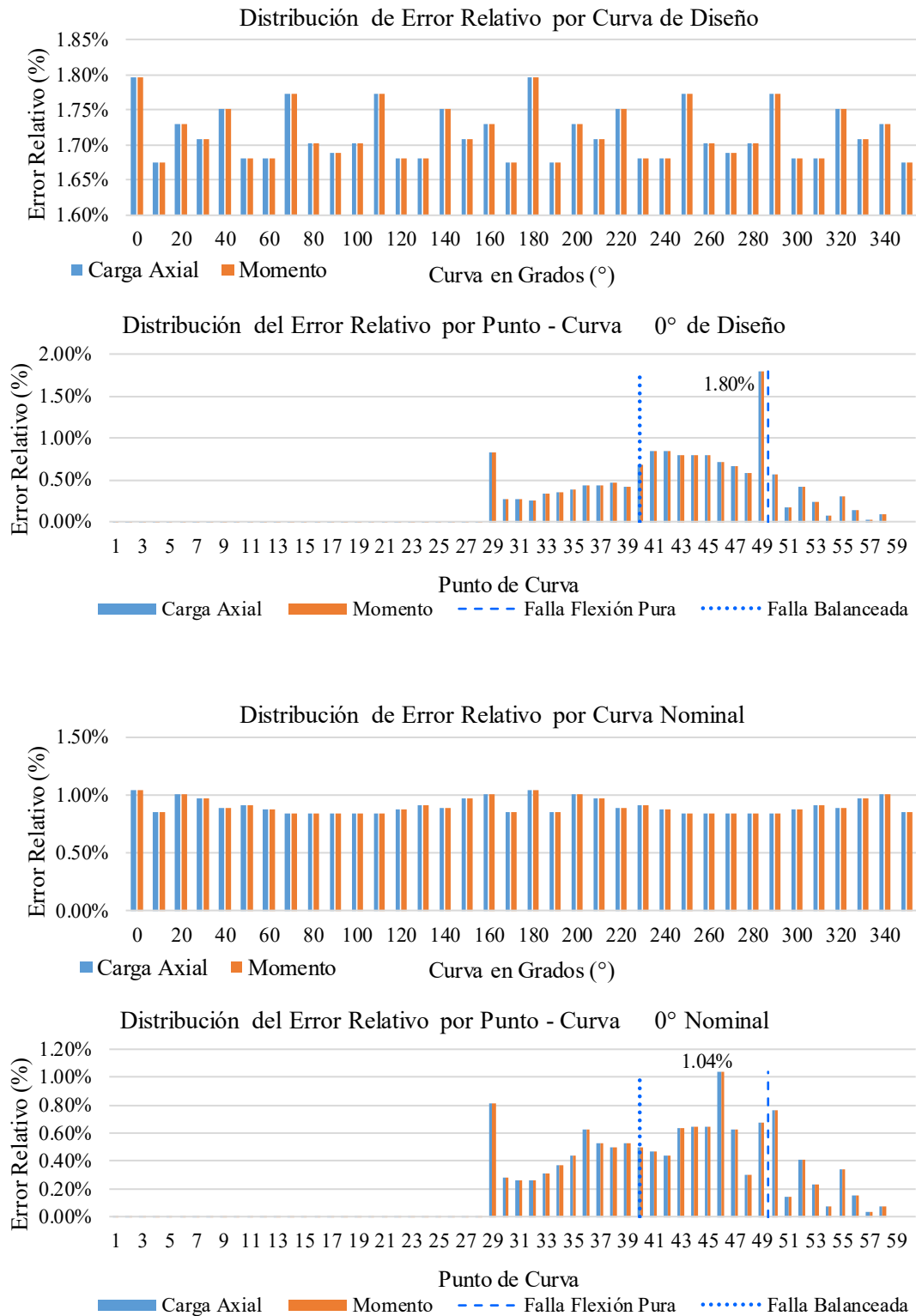


Figura 106

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – C6.

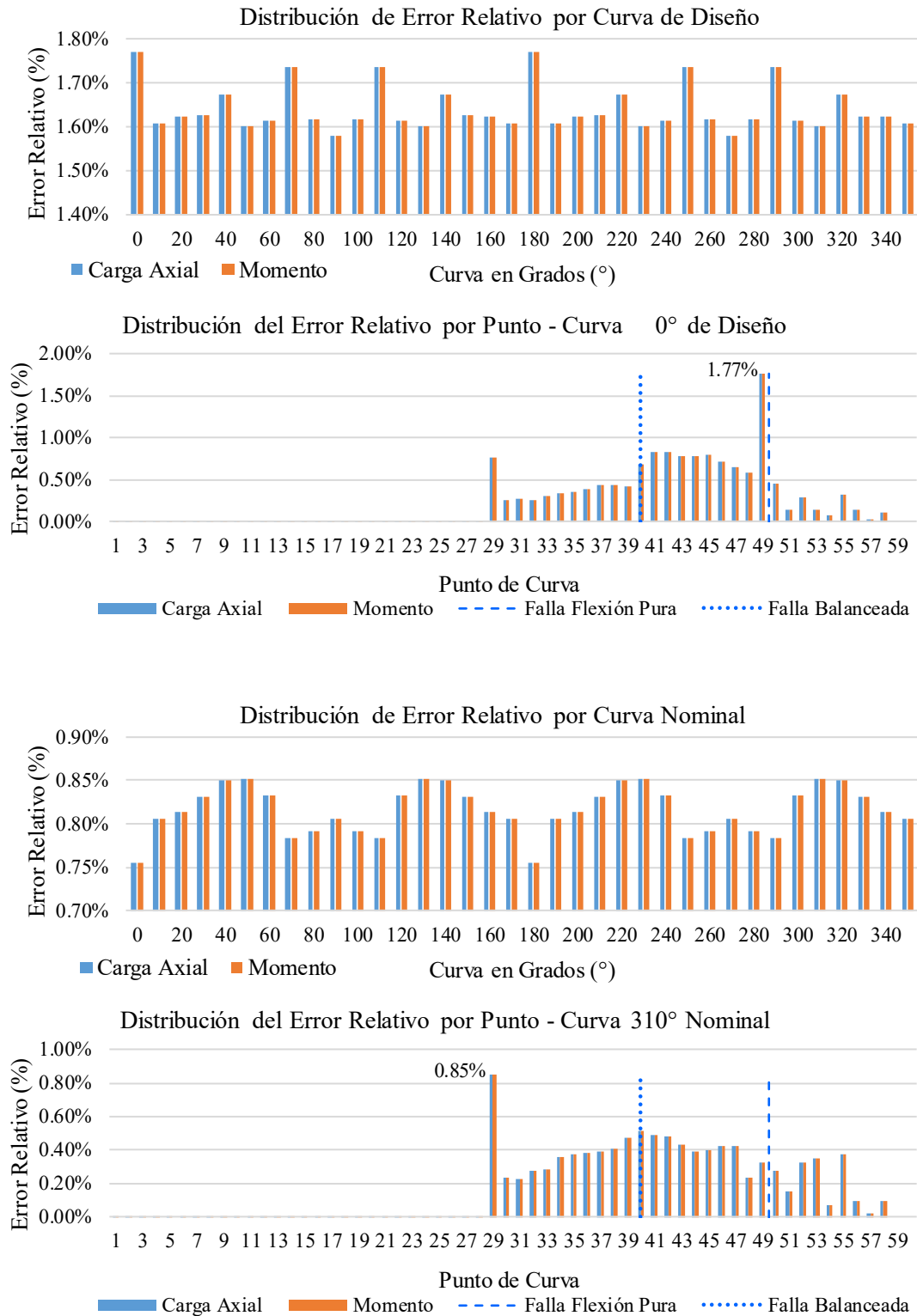
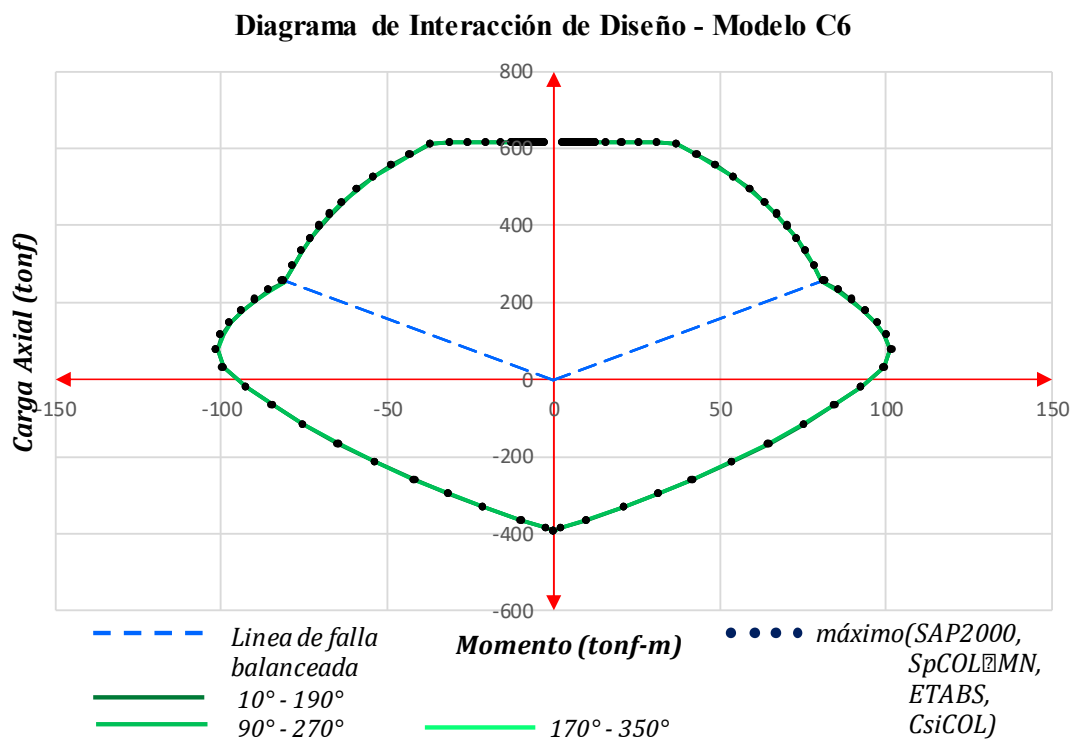
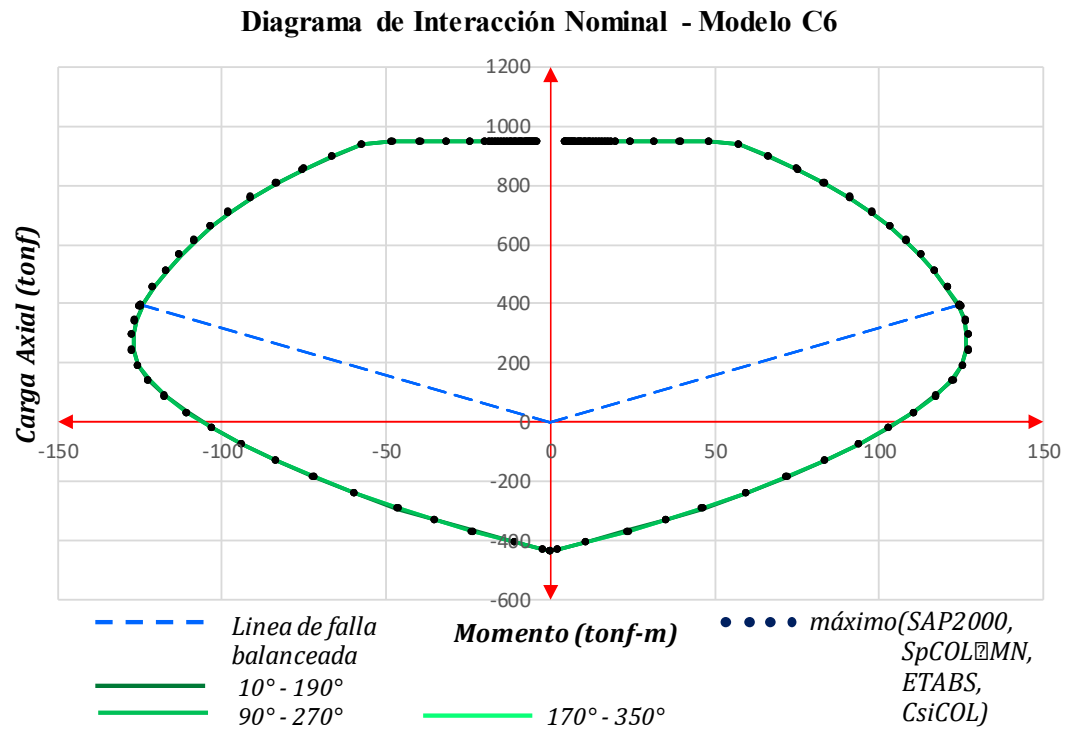


Figura 107

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo C6.



3.11.2.7. Modelo M1-(200x200-35X35)

Figura 108

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M1.

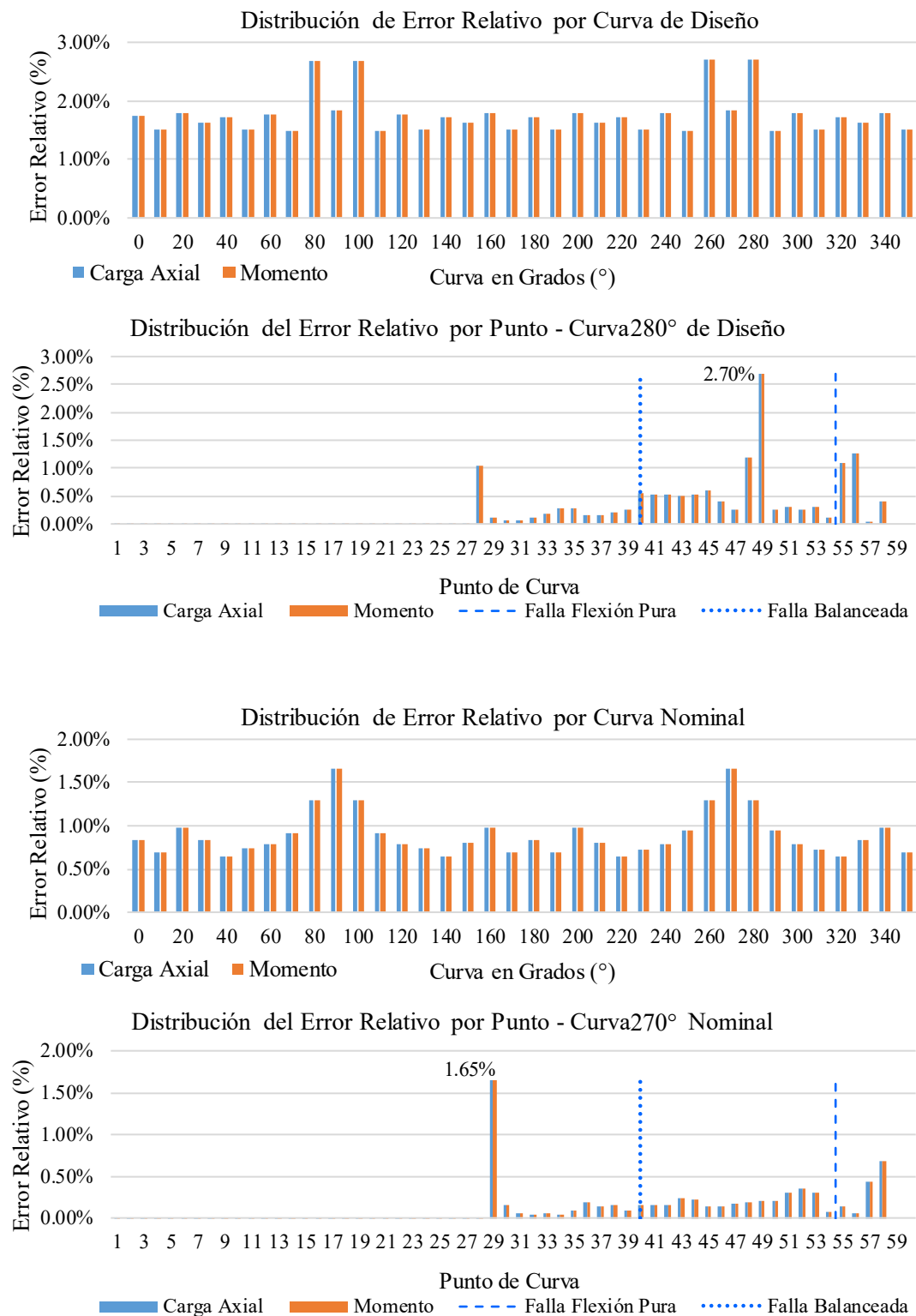


Figura 109

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M1.

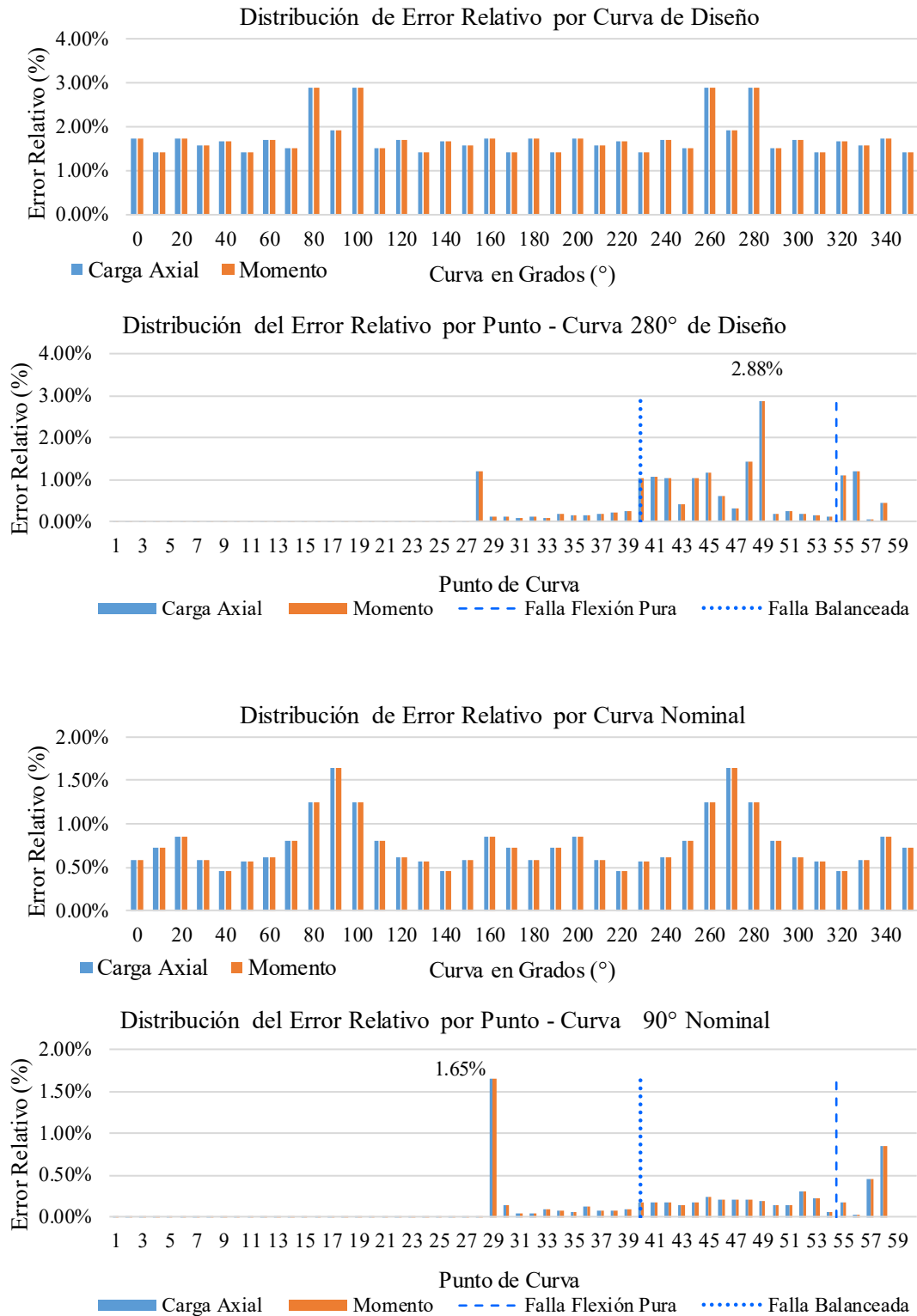


Figura 110

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M1.

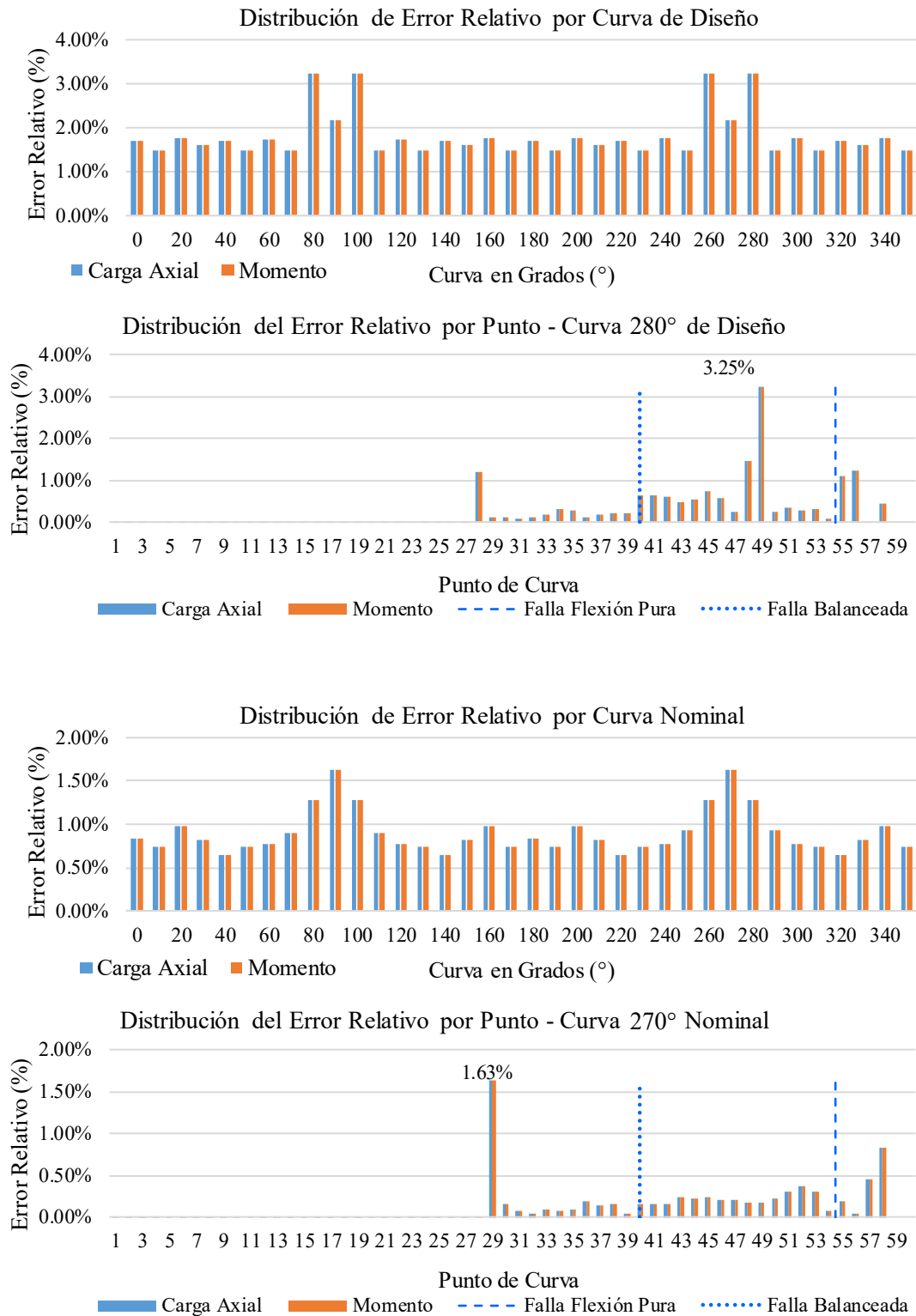


Figura 111

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M1.

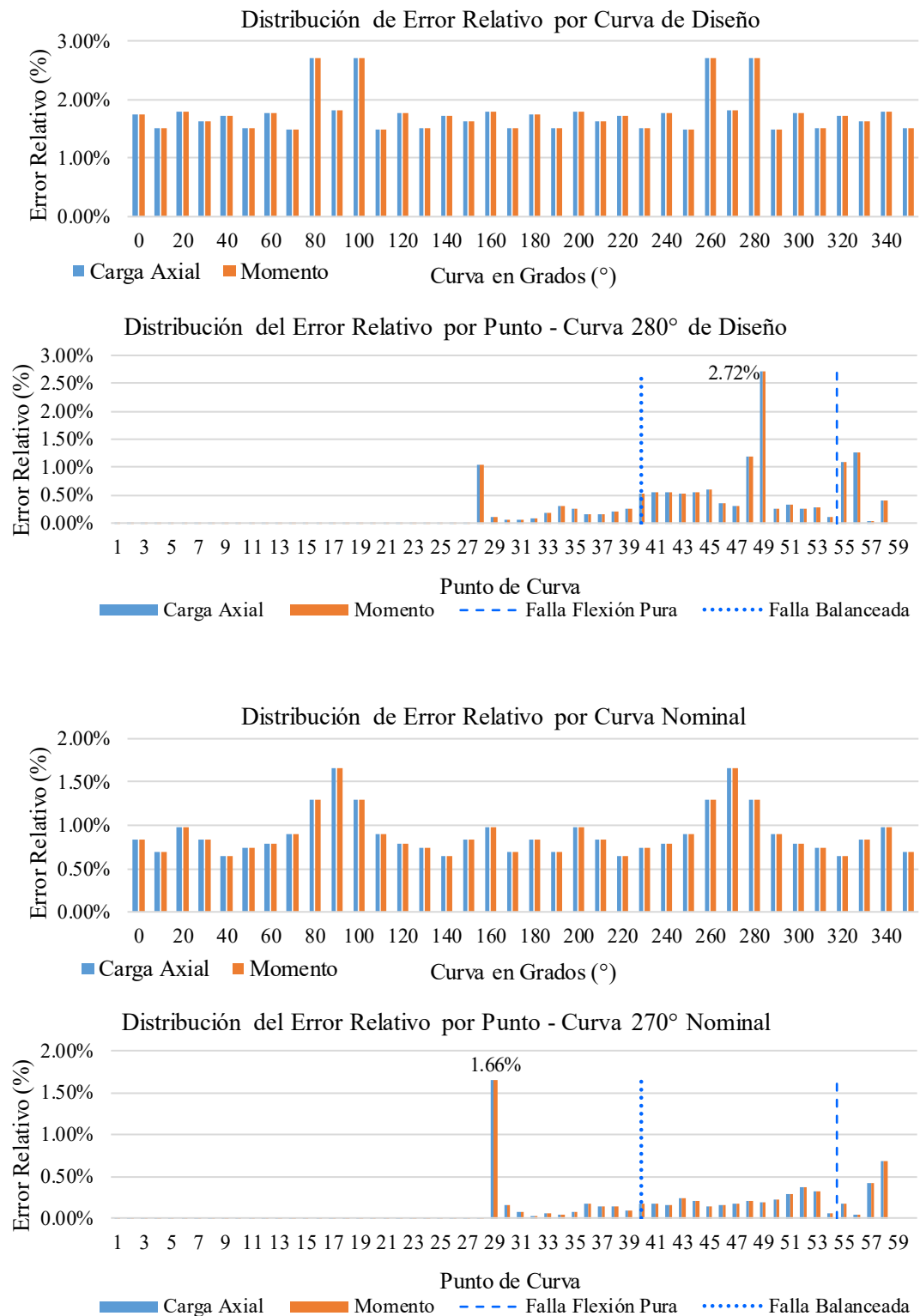


Figura 112

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M1.

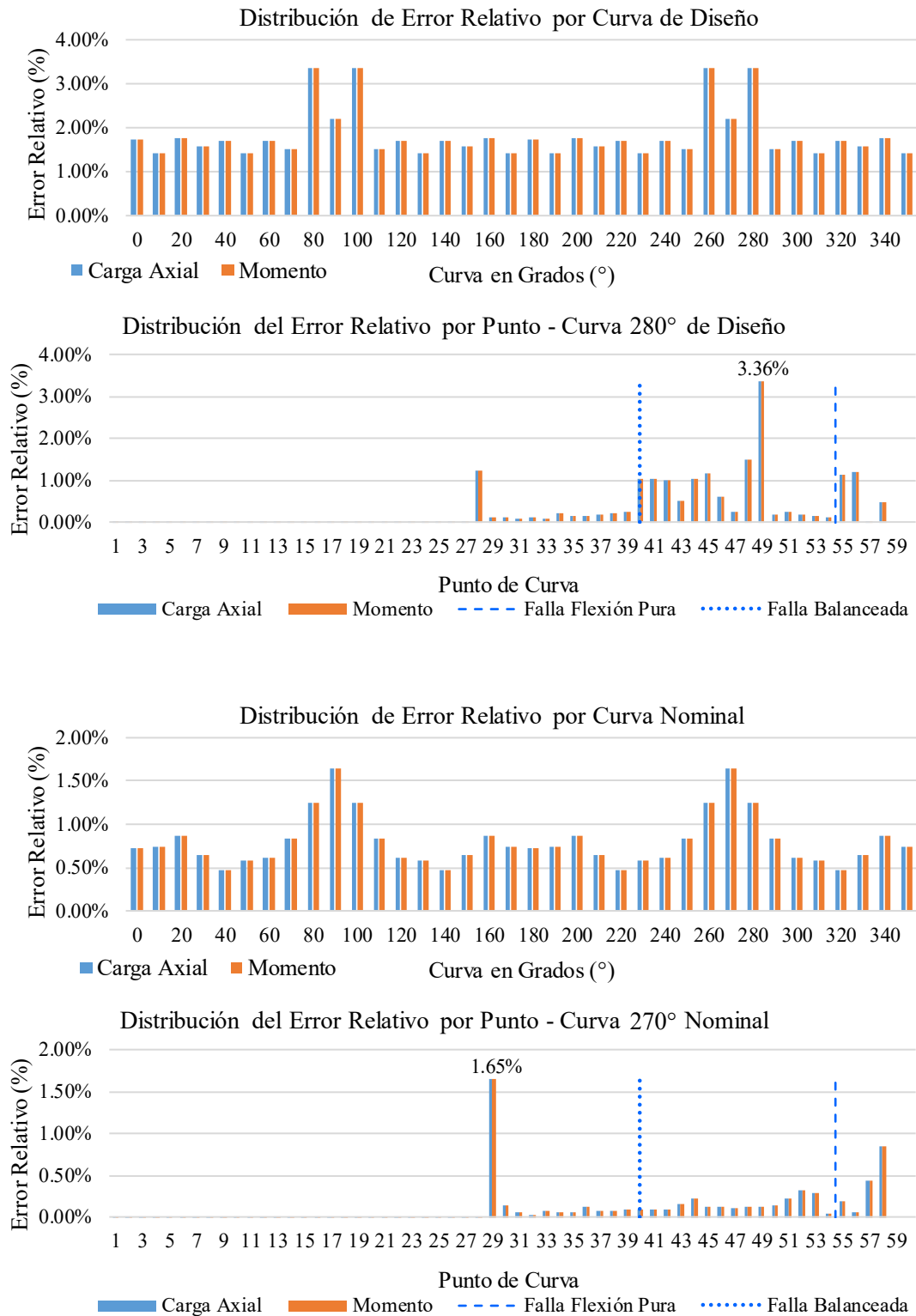
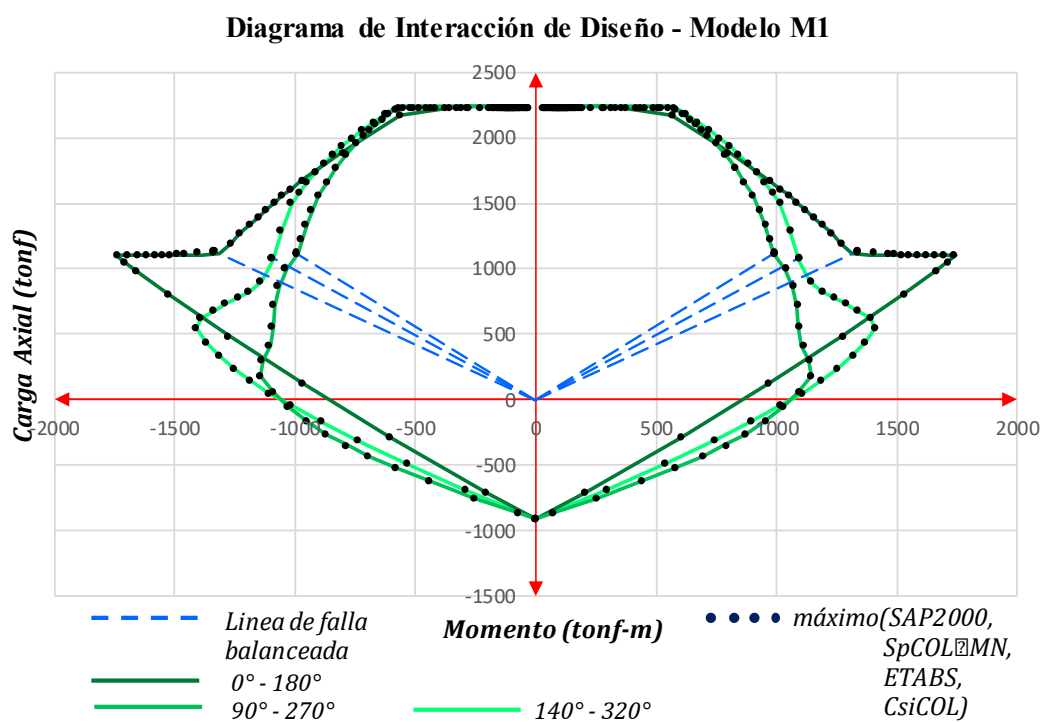
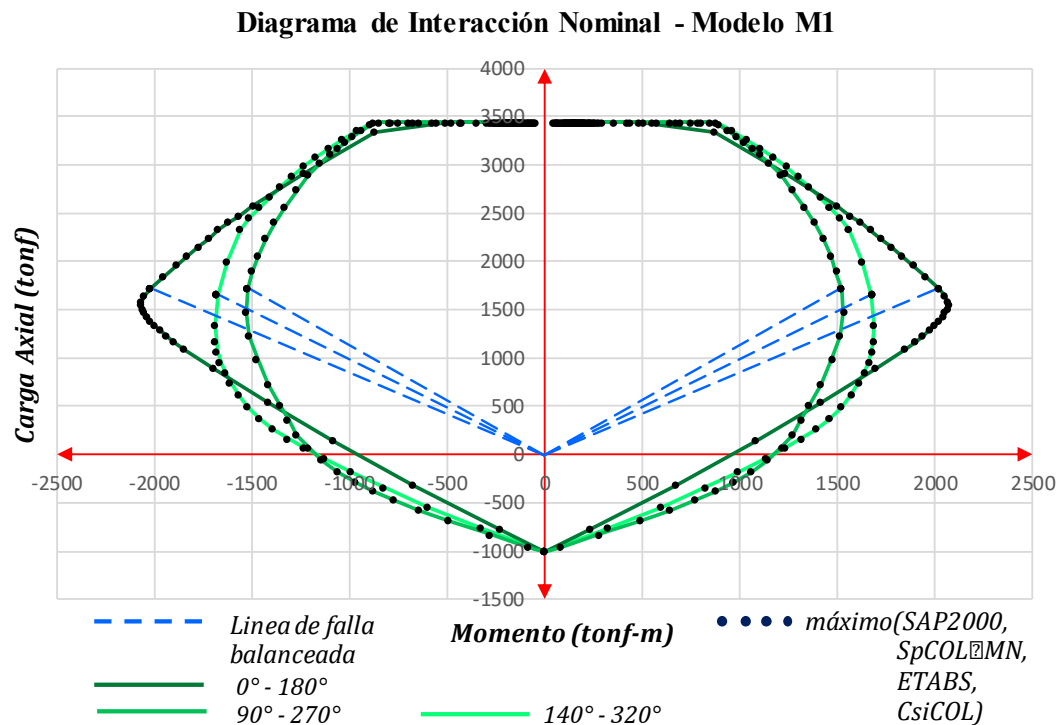


Figura 113

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M1.



3.11.2.8. Modelo M2-(140X140-35X35)

Figura 114

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M2.

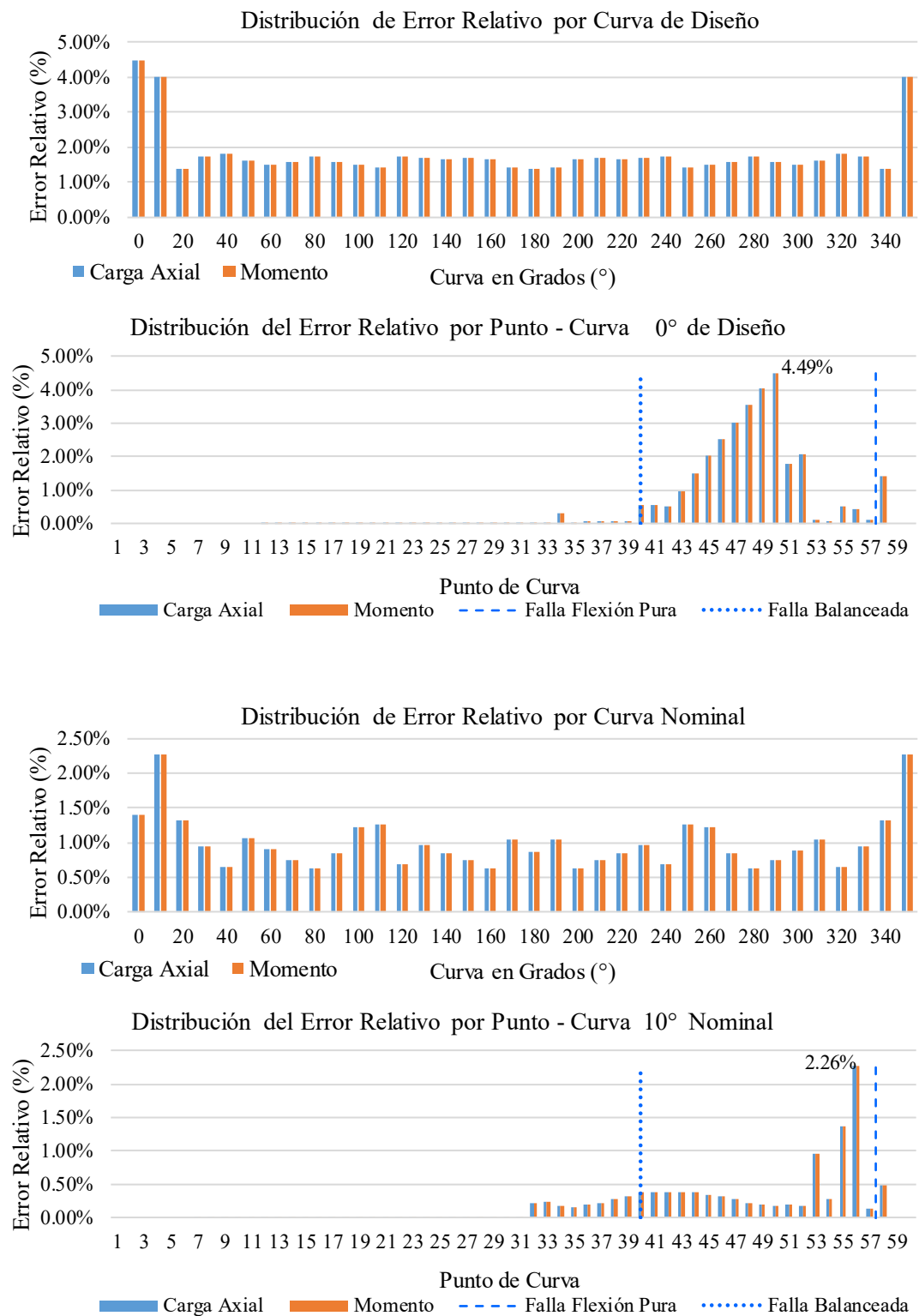


Figura 115

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M2.

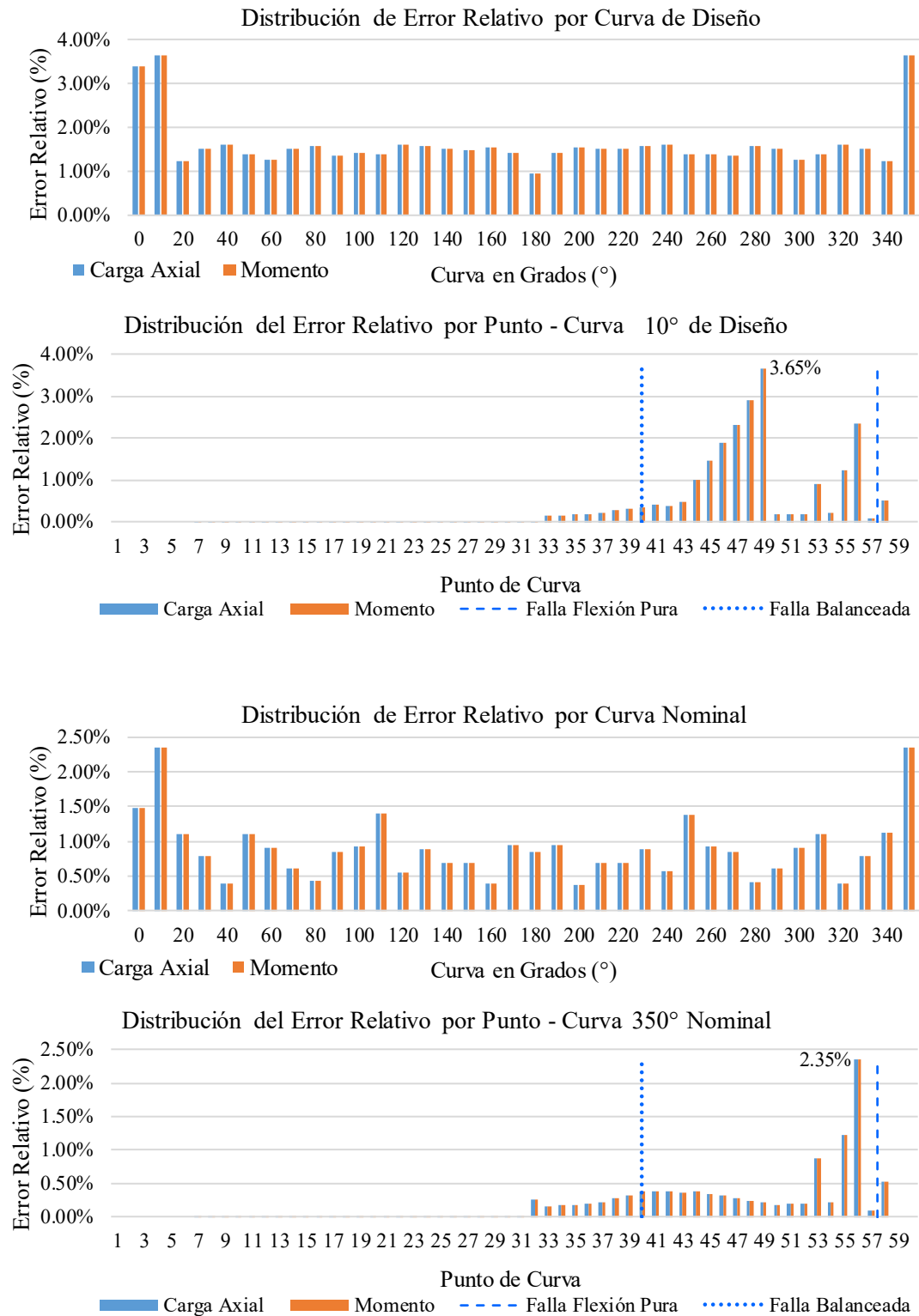


Figura 116

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M2.

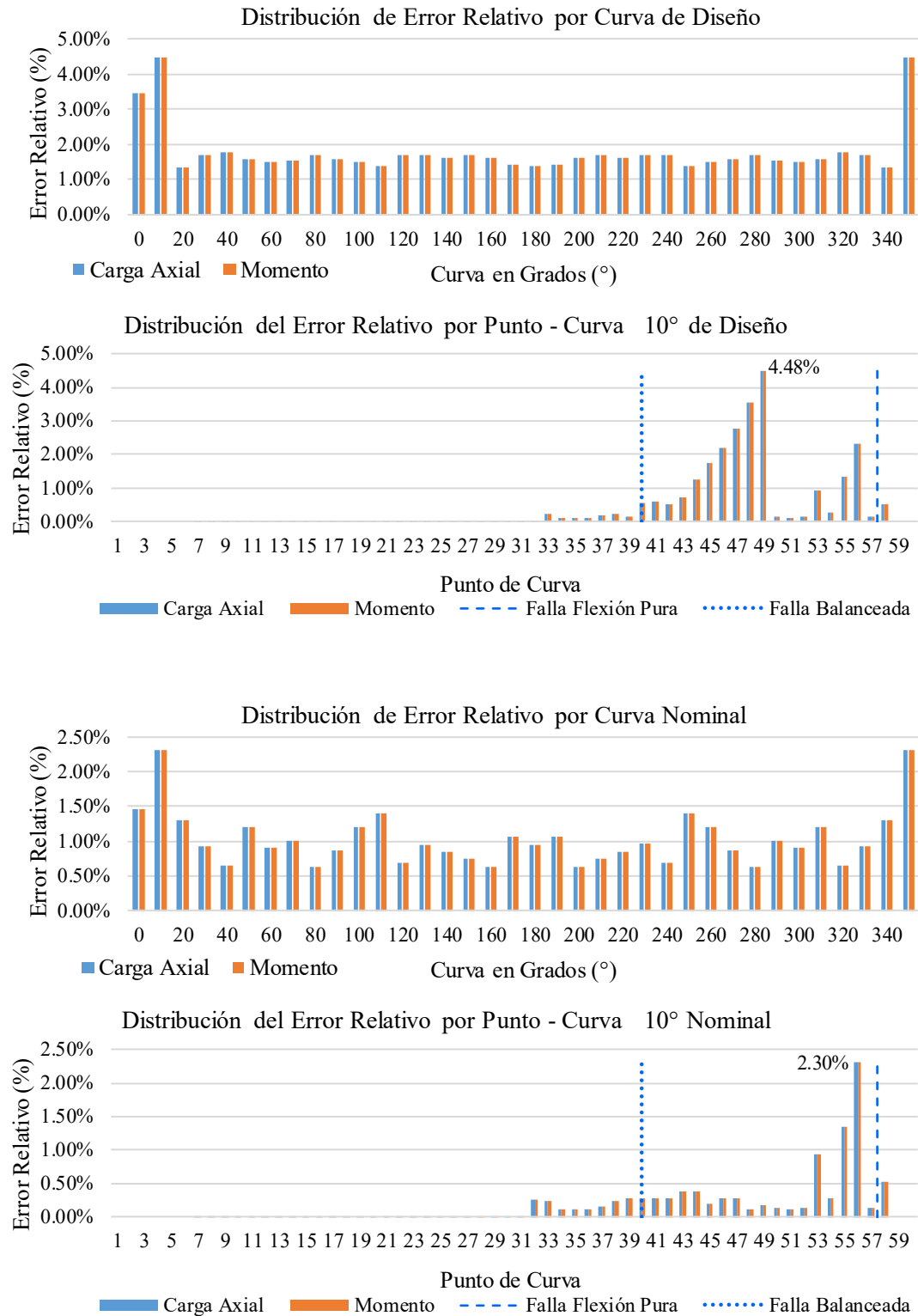


Figura 117

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M2.

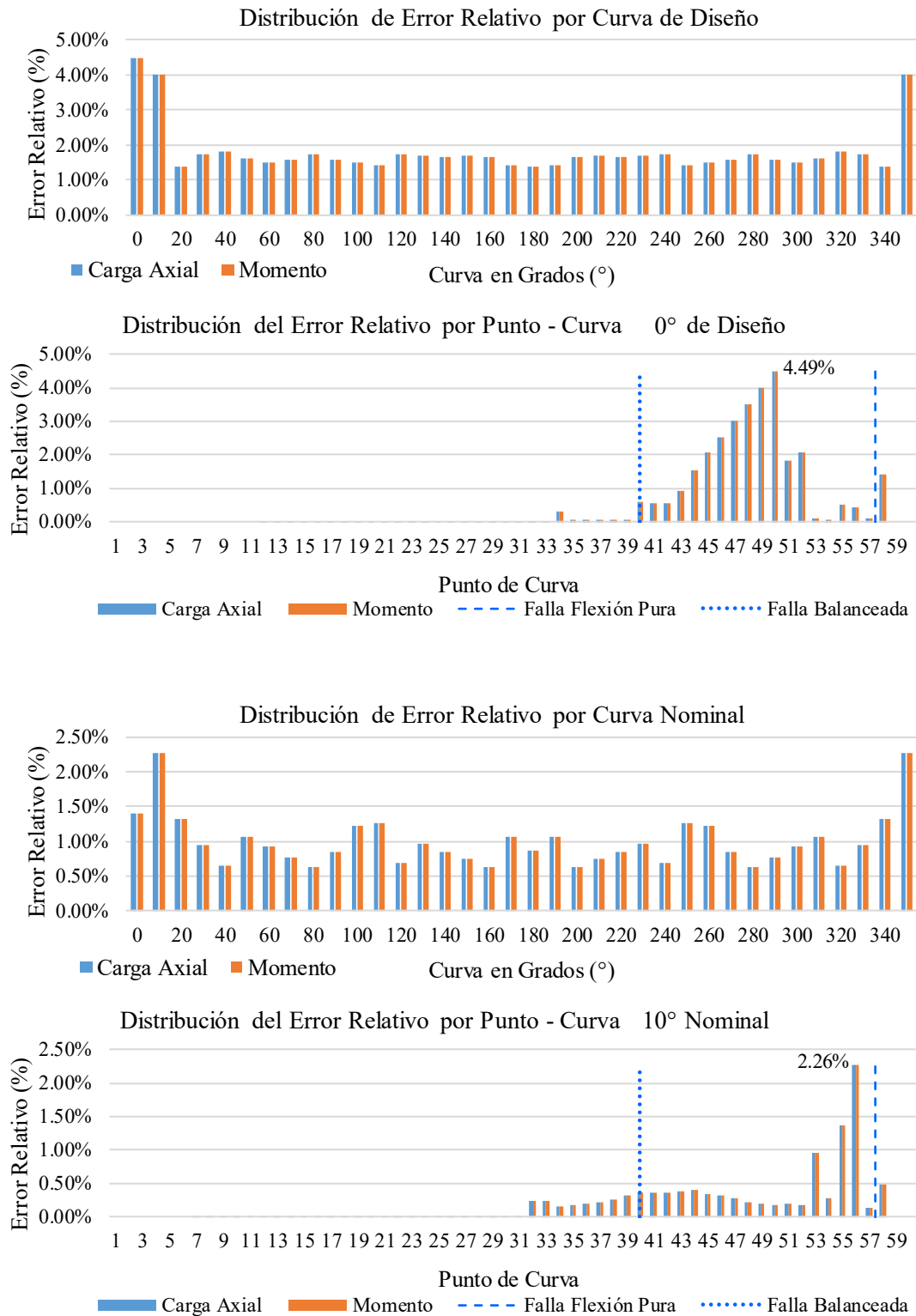


Figura 118

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M2.

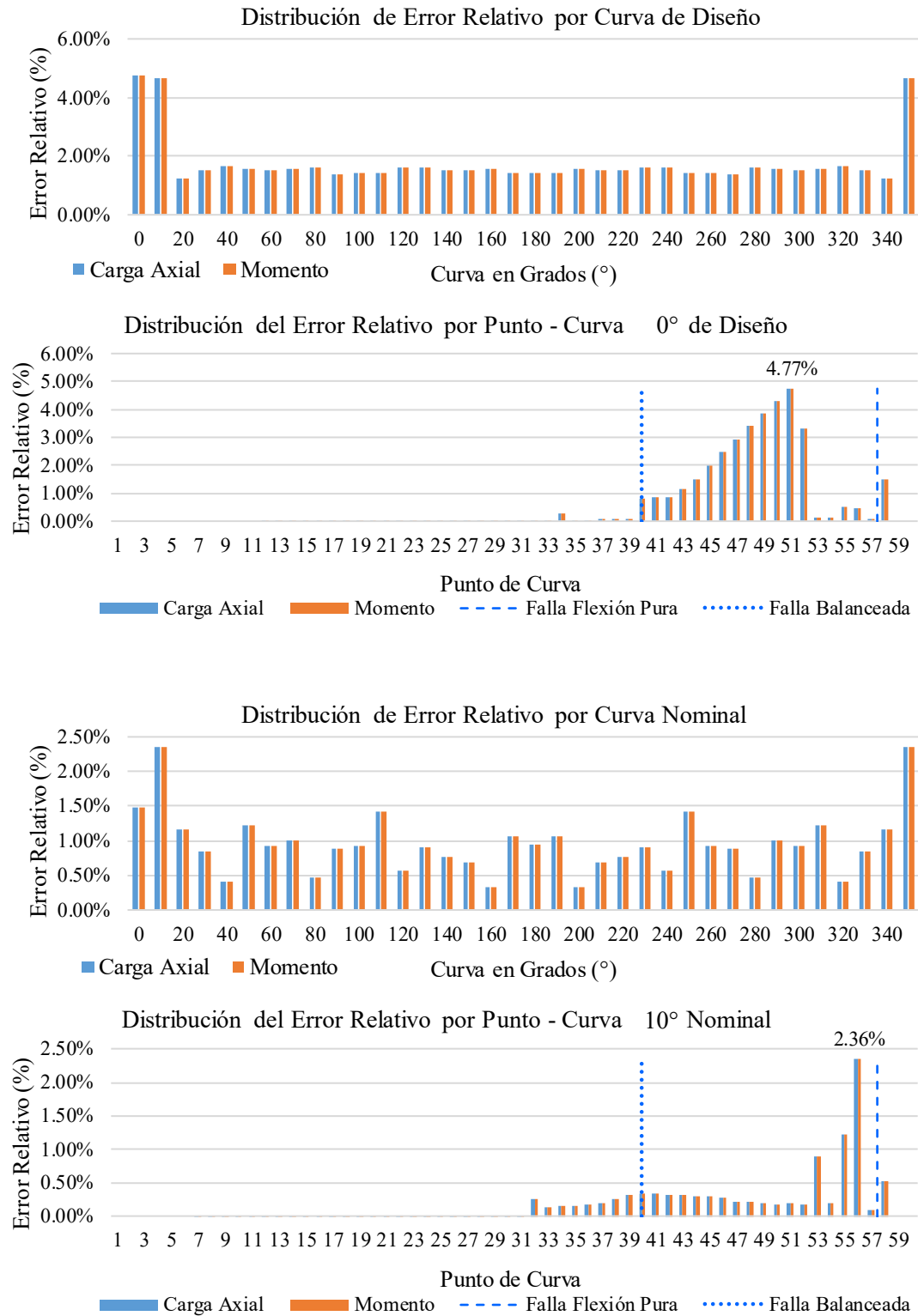
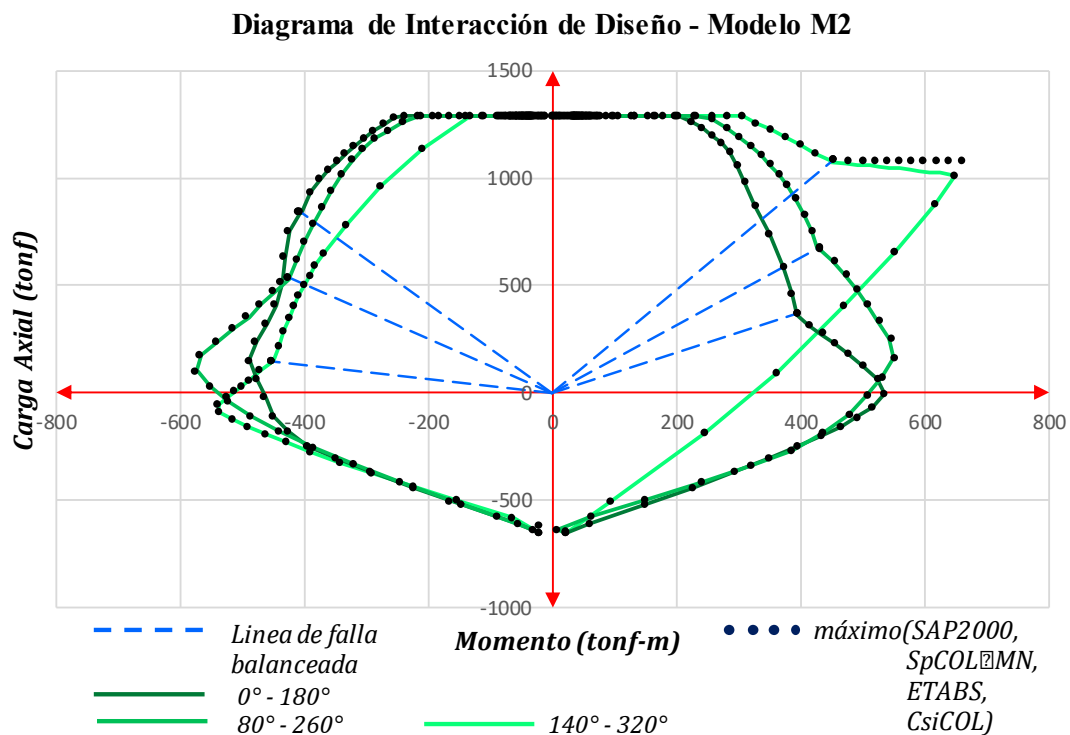
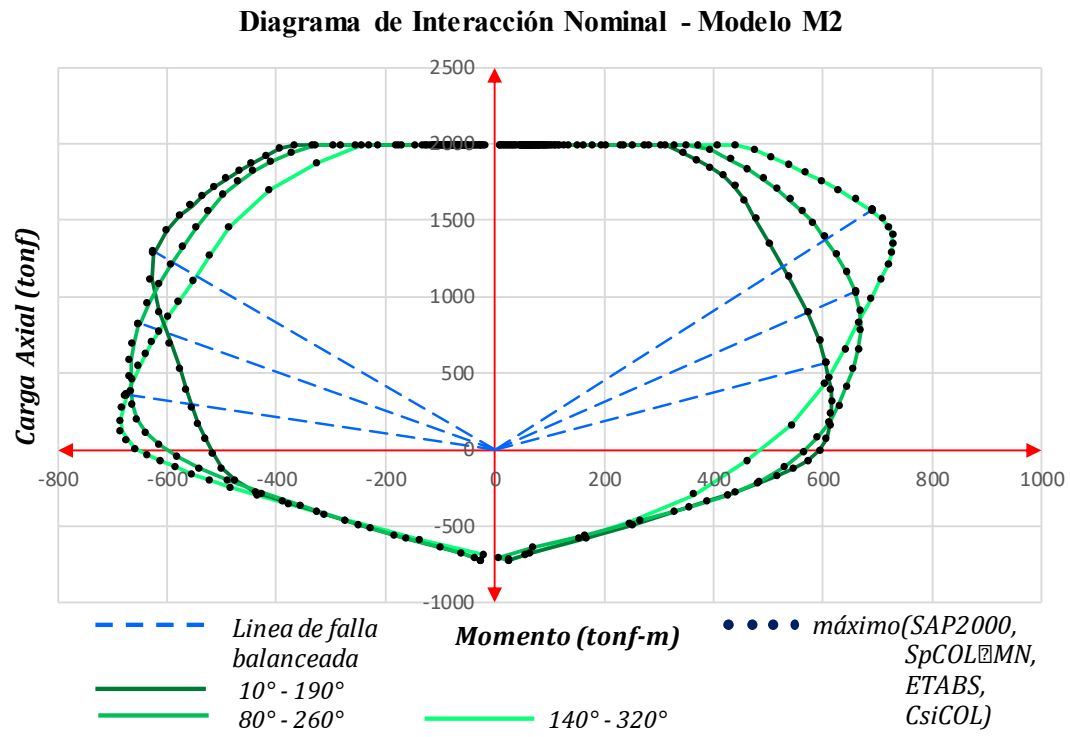


Figura 119

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M2.



3.11.2.9. Modelo M3-(135X135-35X35)

Figura 120

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M3.

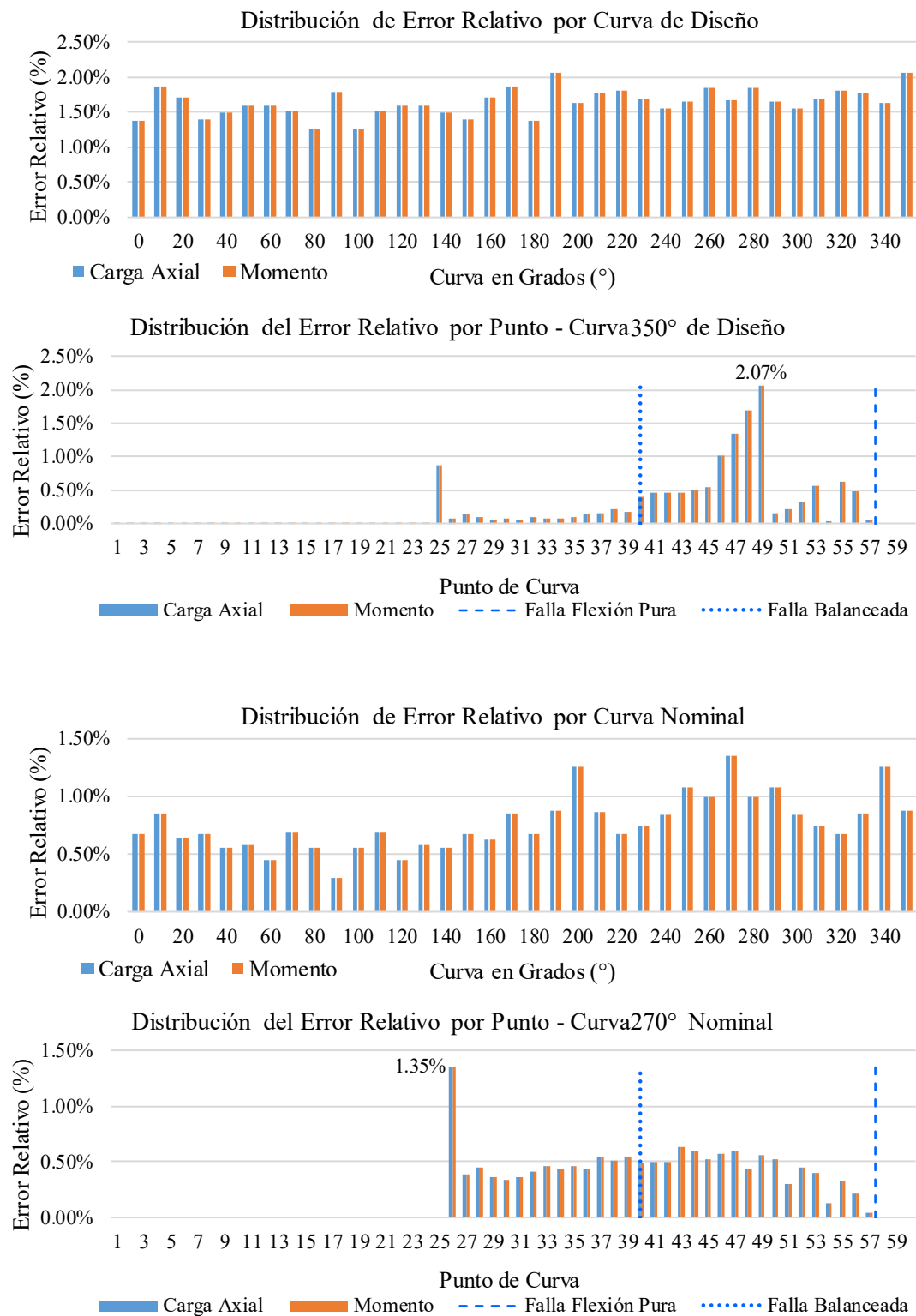


Figura 121

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M3.

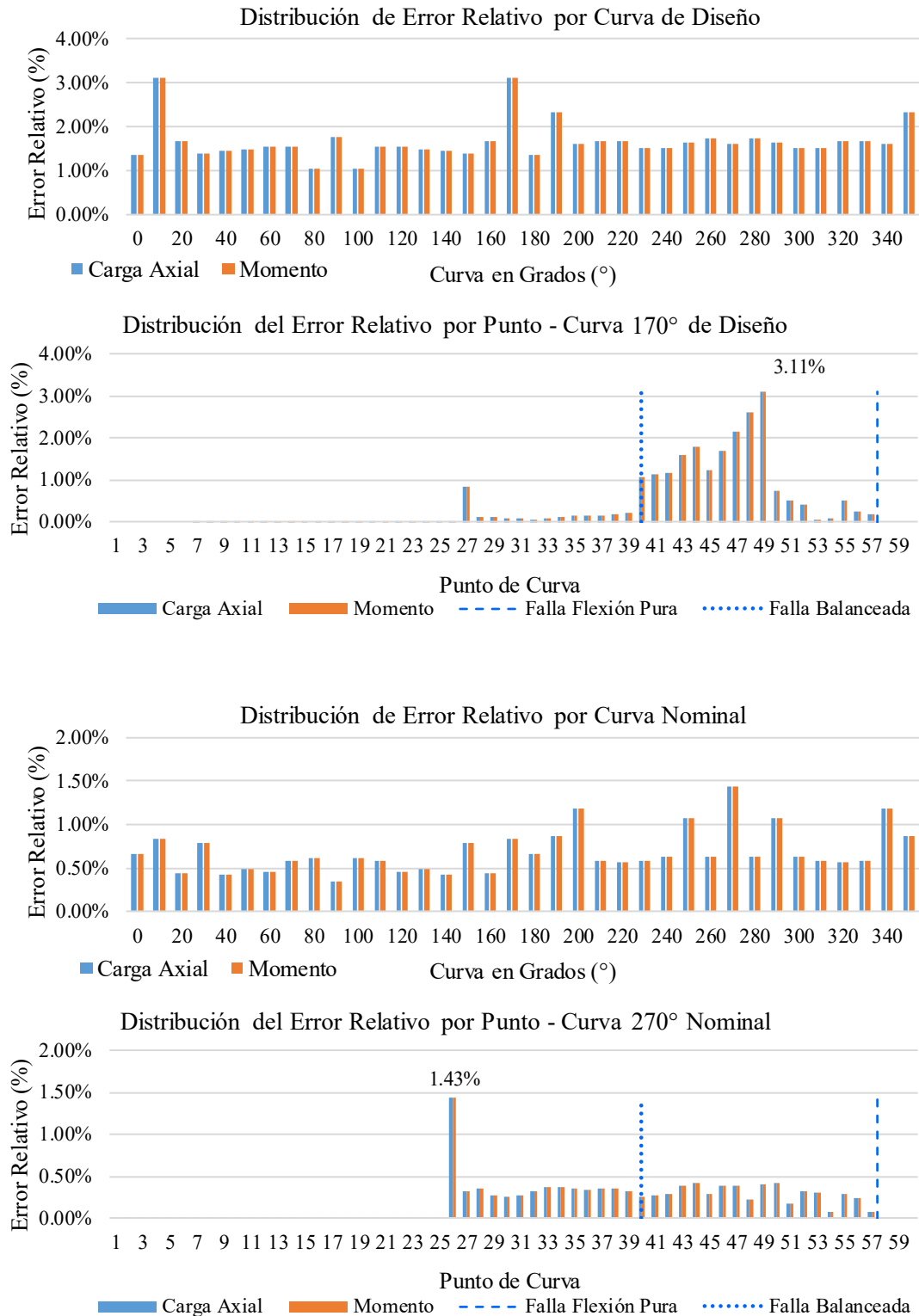


Figura 122

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M3.

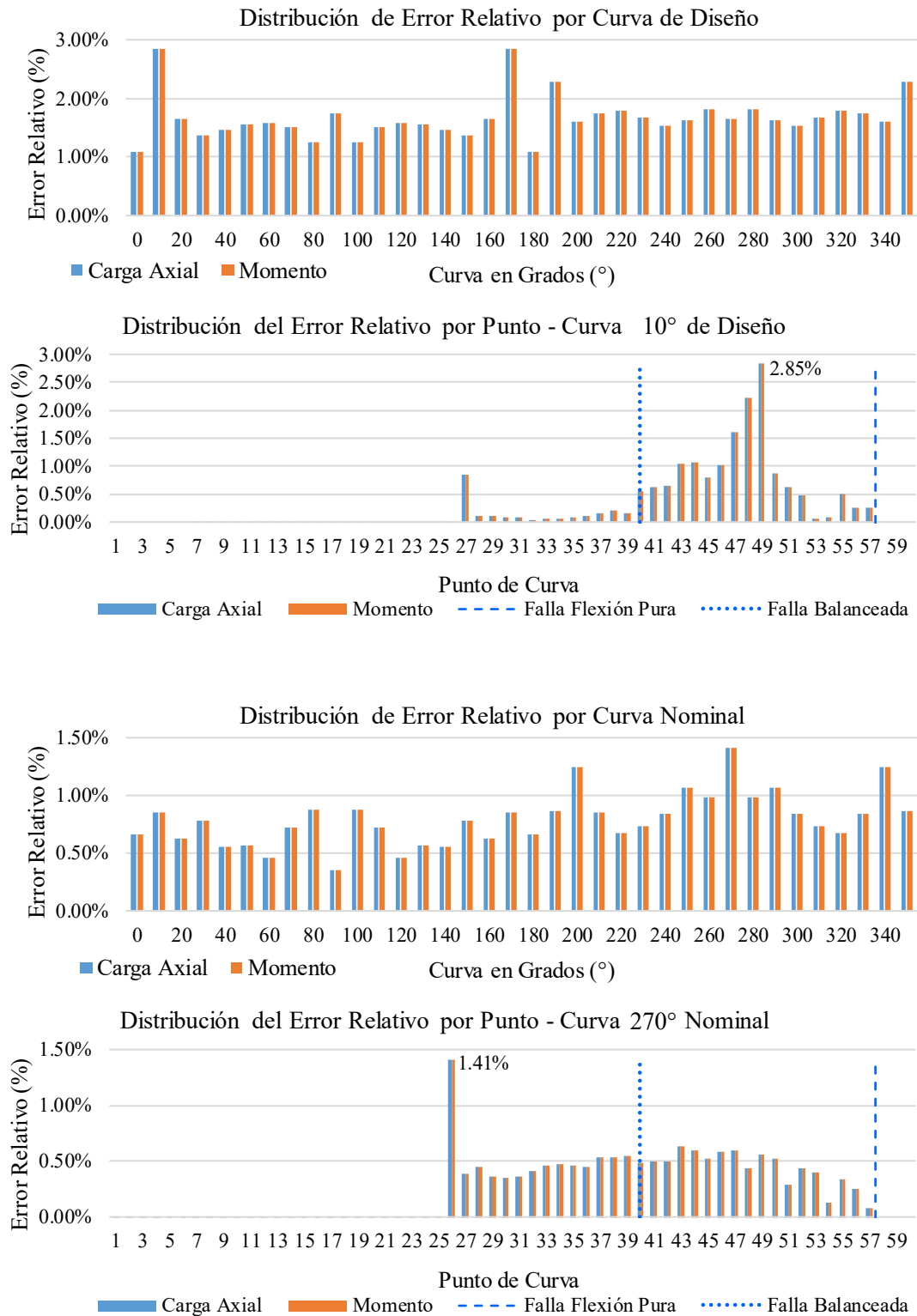


Figura 123

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M3.

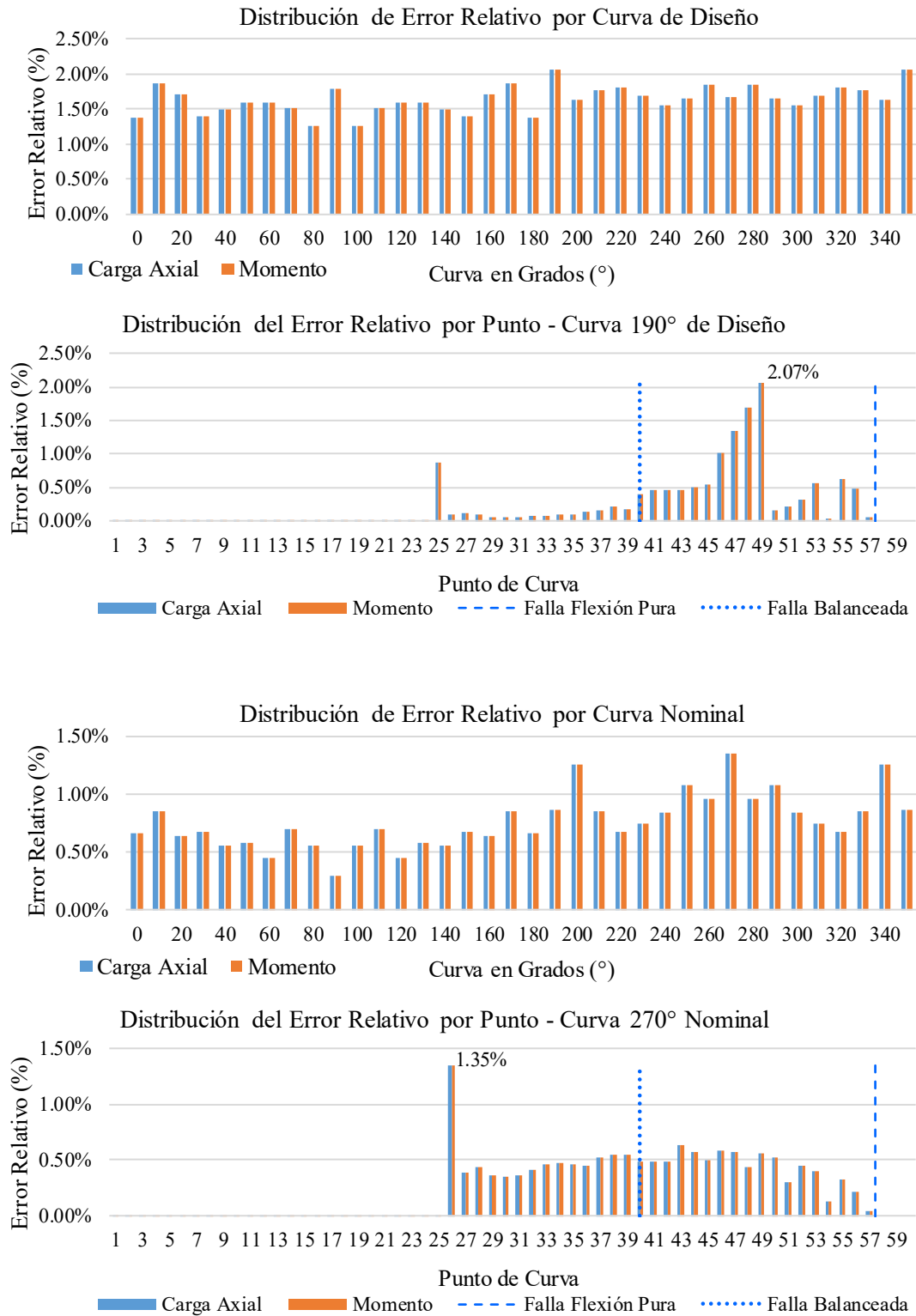


Figura 124

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M3.

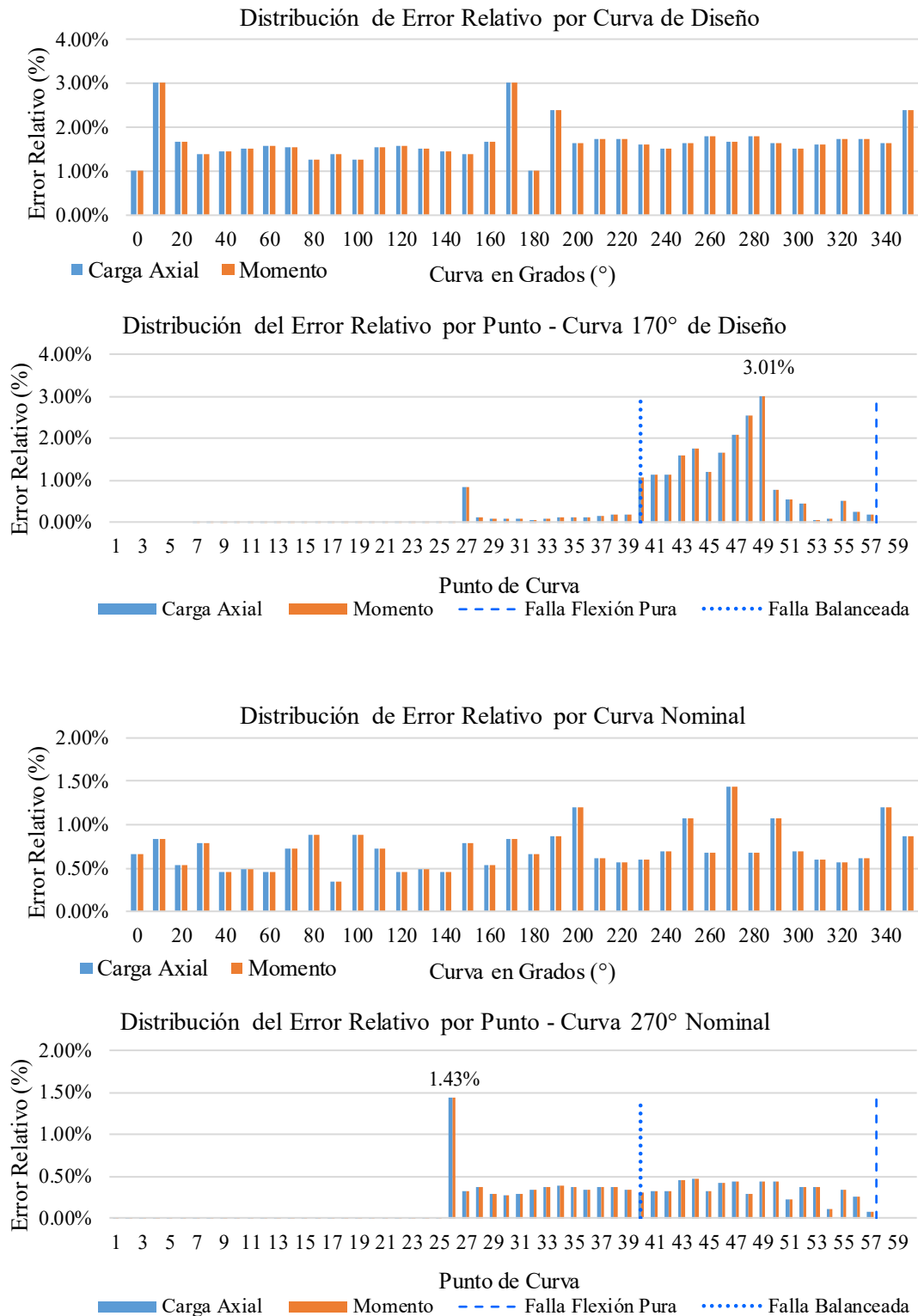
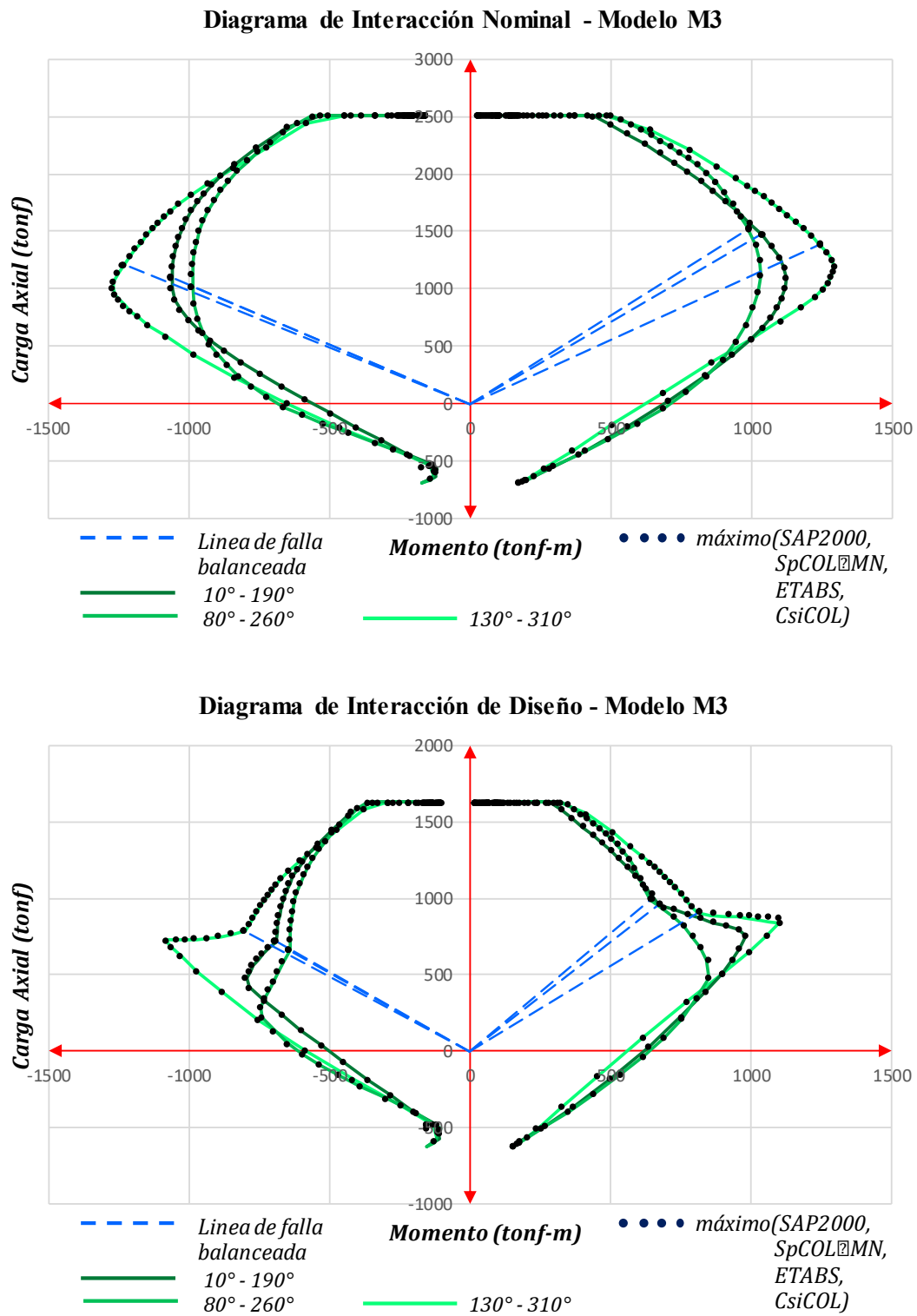


Figura 125

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M3.



3.11.2.10. Modelo M4-(160X30-45X45)

Figura 126

Variaciones SAP2000 vs SpCOLUMN, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M4.

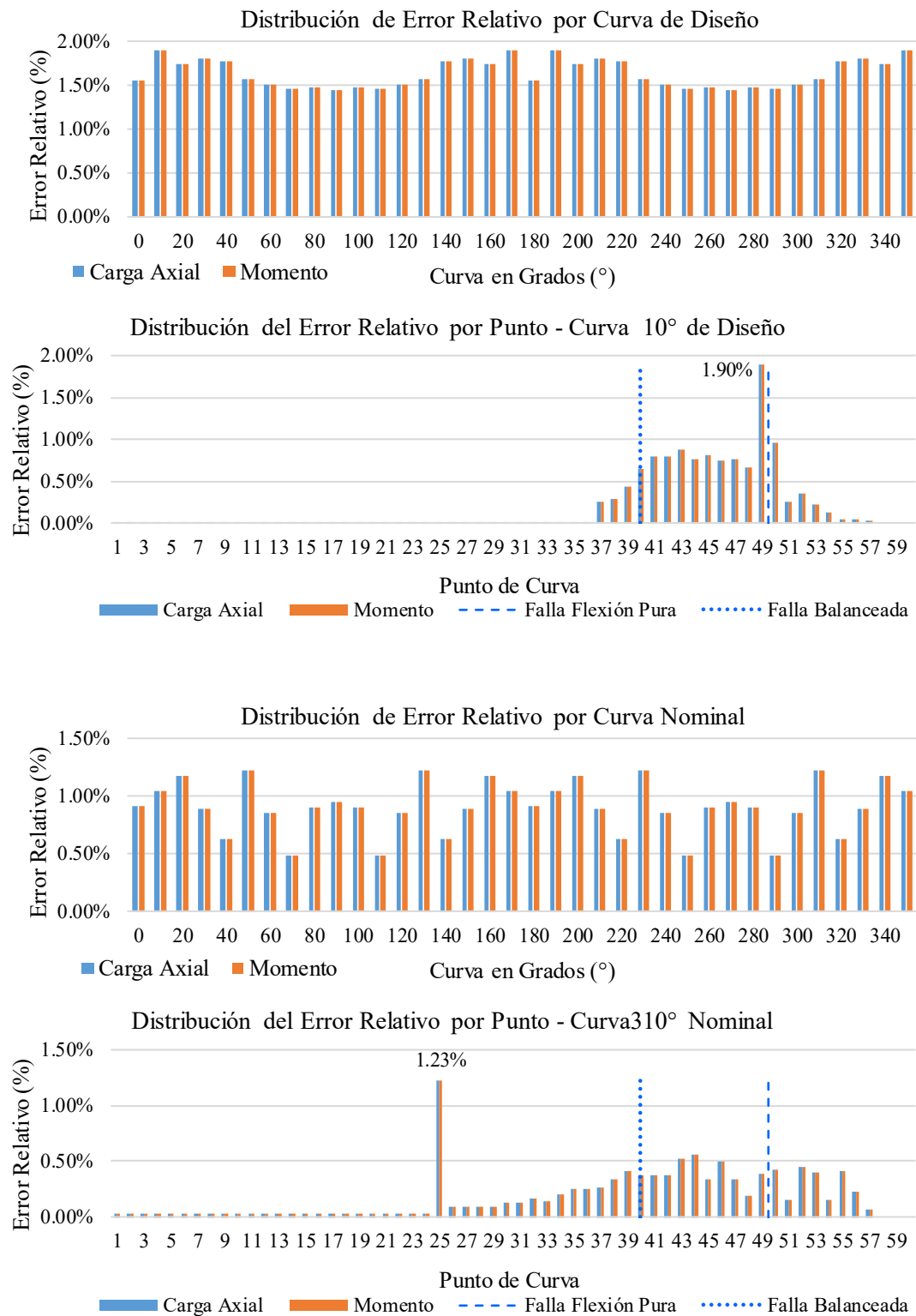


Figura 127

Variaciones SpCOLUMN vs SAP2000, ETABS, CsiCOL, DIMCOL – M4.

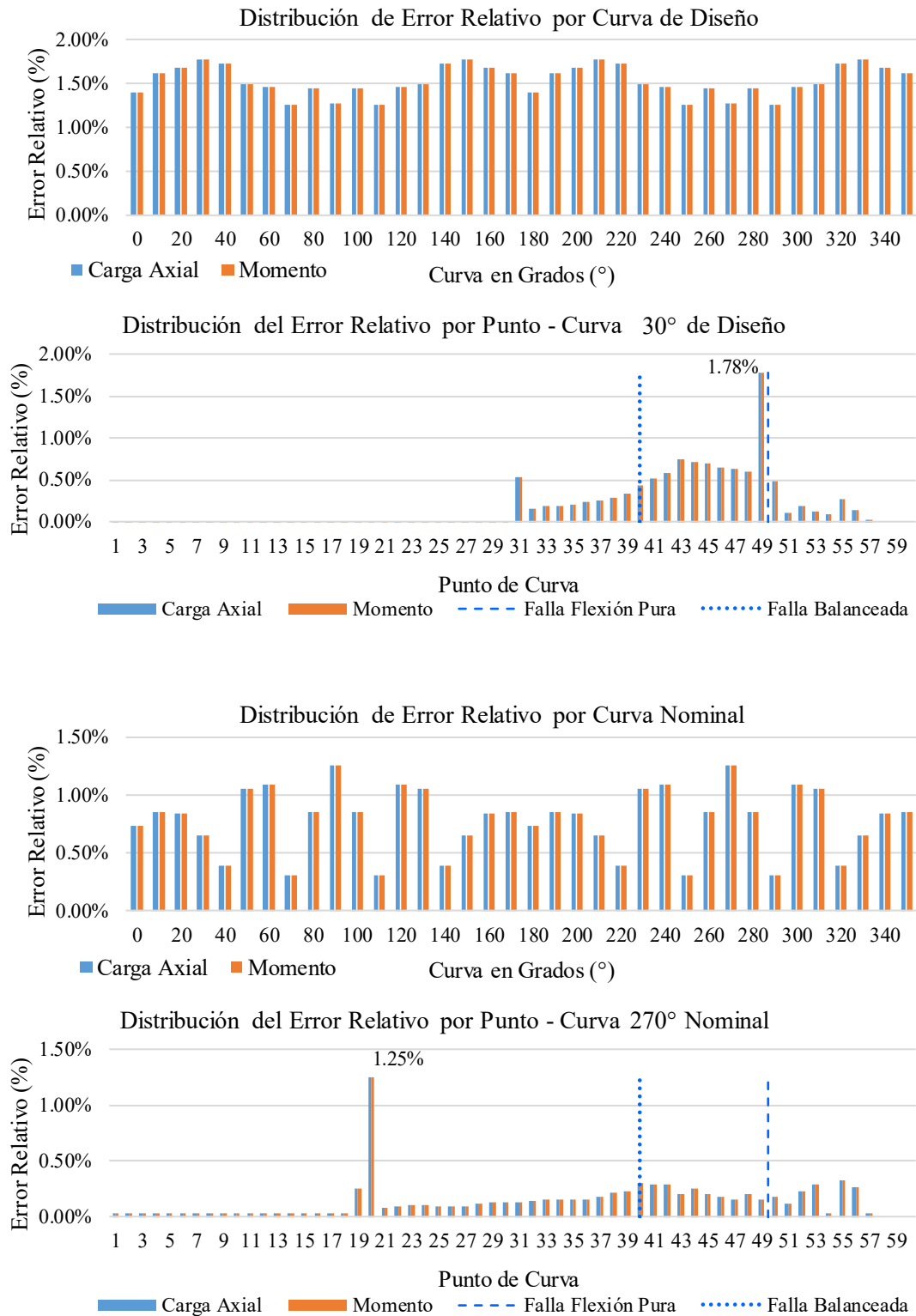


Figura 128

Variaciones CsiCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL – M4.

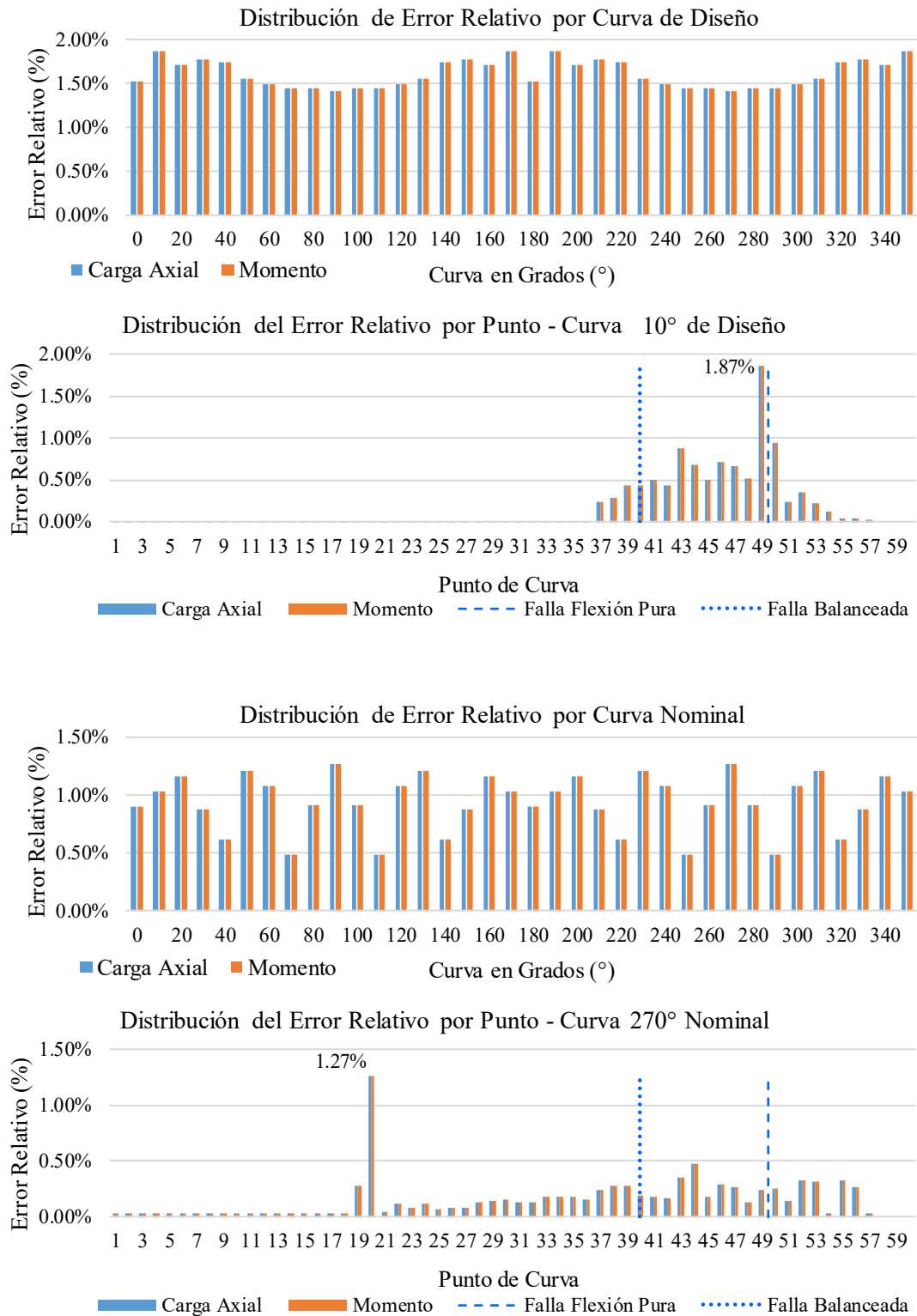


Figura 129

Variaciones ETABS vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL – M4.

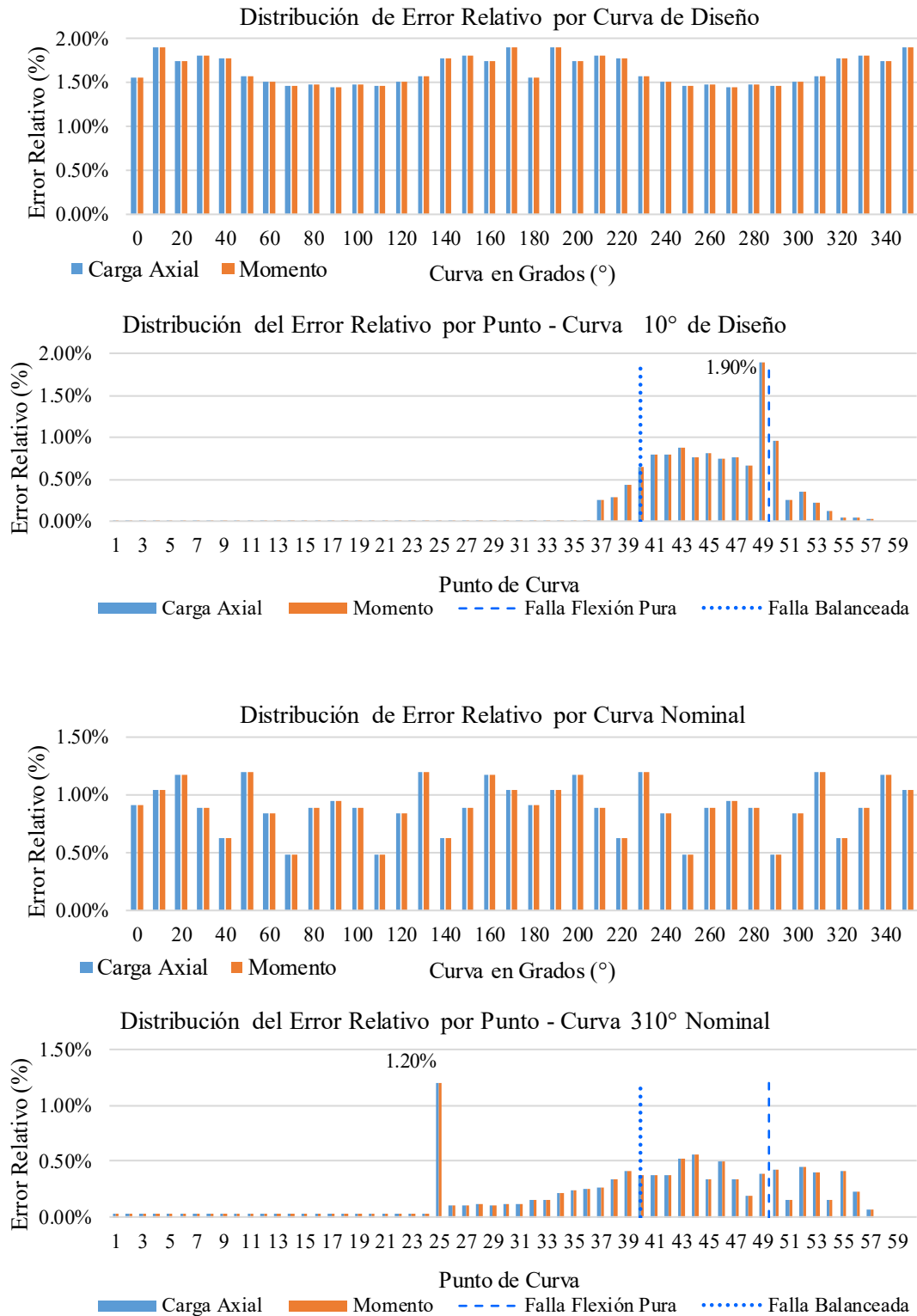


Figura 130

Variaciones DIMCOL vs SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS – M4.

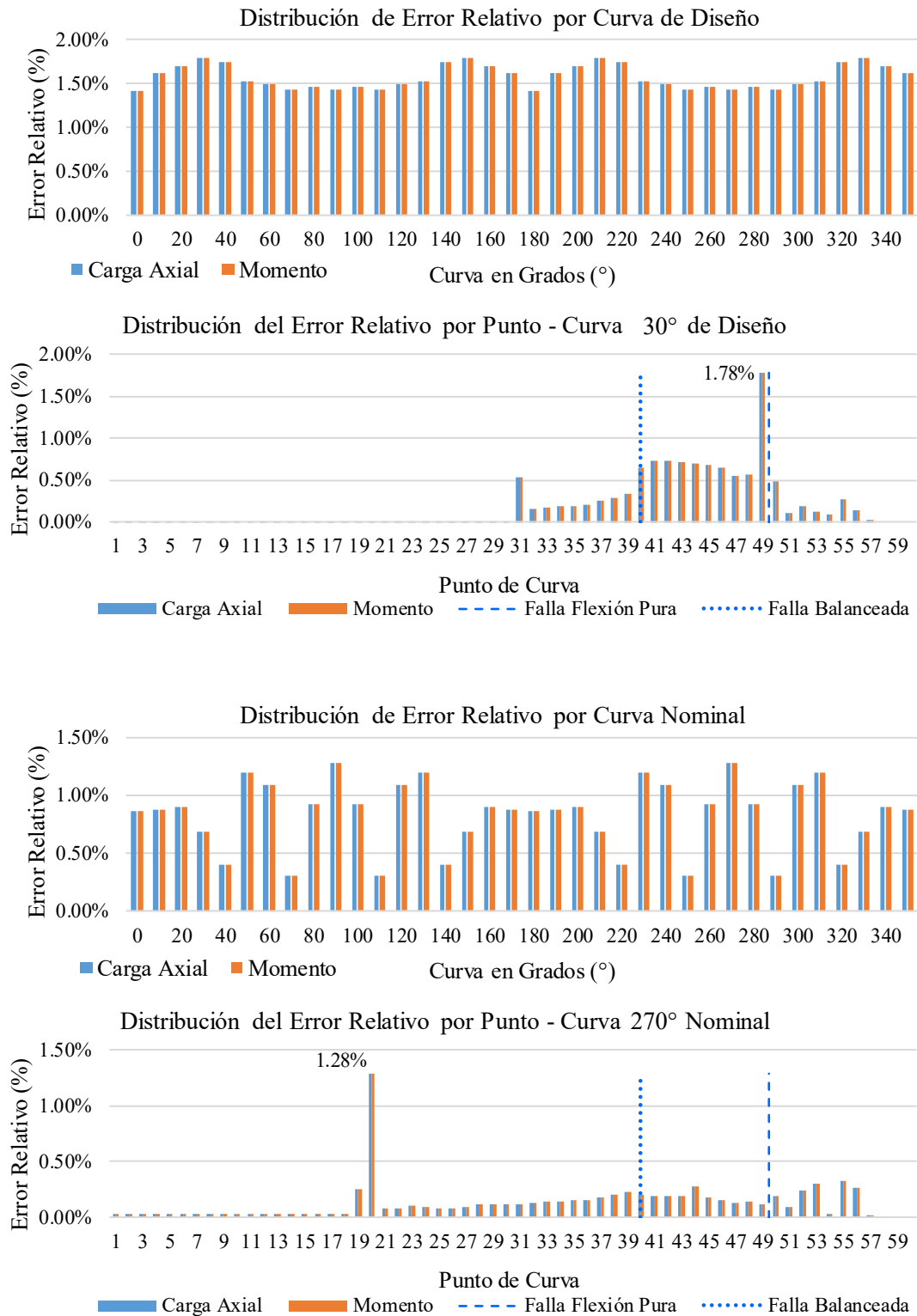
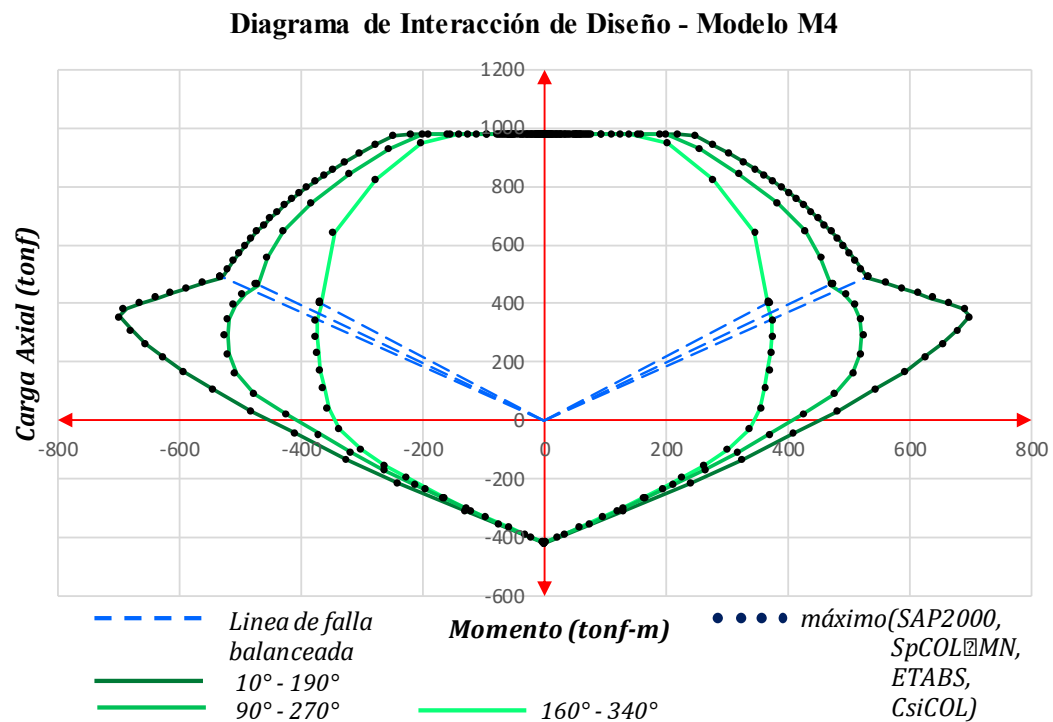
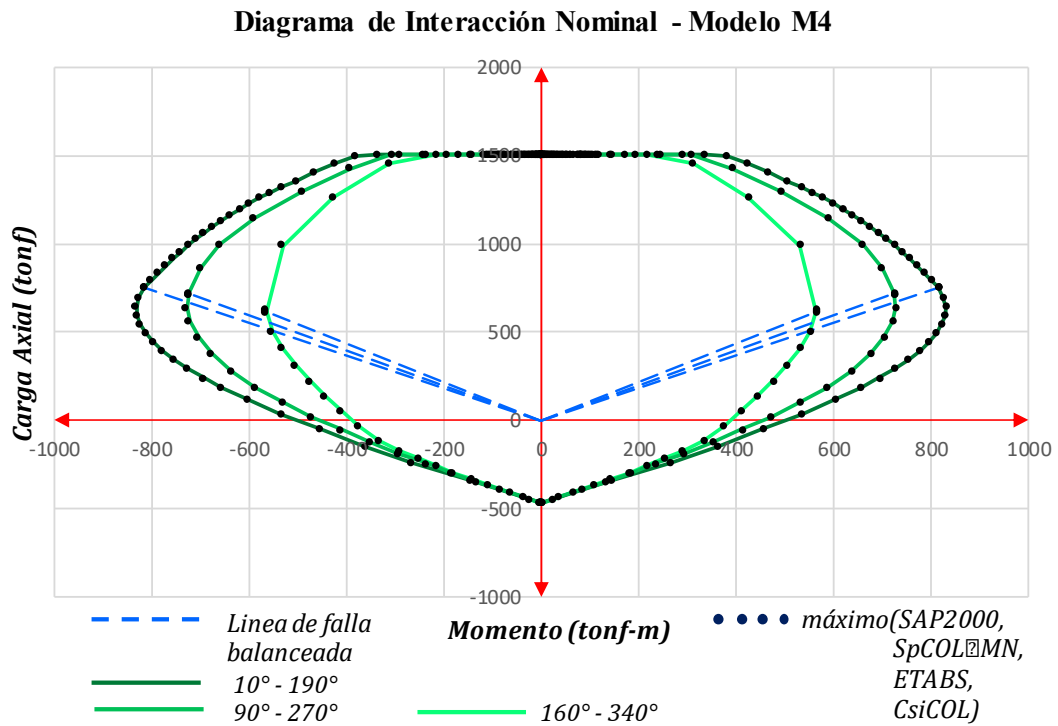


Figura 131

Comparación Gráfica de Diagramas de Interacción para Modelo M4.



3.11.2.11. Resumen de Resultados

Tabla 15

Resumen de Variaciones Máximas por Modelo y por Software.

TIPO DE SECCIÓN	TIPO DE DIAGRAMA	MÁXIMAS VARIACIONES (%)									
		SAP2000 vs (SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS, DIMCOL)		SpCOLUMN vs (SAP2000, CsiCOL, ETABS, DIMCOL)		CsiCOL vs (SAP2000, SpCOLUMN, ETABS, DIMCOL)		ETABS vs (SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, DIMCOL)		DIMCOL vs (SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS)	
		%	PT	%	PT	%	PT	ETABS	PT	DIMCOL	PT
C1	Diseño	1.64	49	1.48	49	1.62	49	1.64	49	1.65	49
	Nominal	1.06	44	0.99	47	1.05	47	1.06	44	1.04	47
C2	Diseño	2.54	56	2.42	56	2.61	56	2.54	56	2.54	56
	Nominal	2.54	56	2.42	56	2.61	56	2.54	56	2.54	56
C3	Diseño	2.00	49	1.80	49	1.96	49	2.00	49	1.82	49
	Nominal	1.22	29	0.89	29	1.20	29	1.22	29	1.22	29
C4	Diseño	2.18	49	2.10	49	2.13	49	2.18	49	2.07	49
	Nominal	1.78	26	1.69	60	1.82	26	1.78	26	1.86	29
C5	Diseño	1.87	49	1.63	49	1.84	49	1.87	49	1.63	49
	Nominal	1.05	43	0.78	47	1.04	43	1.05	43	0.81	47
C6	Diseño	1.80	49	1.72	49	1.76	49	1.80	49	1.77	49
	Nominal	1.04	46	0.86	29	1.03	46	1.04	46	0.85	29
M1	Diseño	2.70	49	2.88	49	3.25	49	2.72	49	3.36	49
	Nominal	1.65	29	1.65	29	1.63	29	1.66	29	1.65	29
M2	Diseño	4.49	50	3.65	49	4.48	49	4.49	50	4.77	51
	Nominal	2.26	56	2.35	56	2.30	56	2.26	56	2.36	56
M3	Diseño	2.07	49	3.11	49	2.85	49	2.07	49	3.01	49
	Nominal	1.35	26	1.43	26	1.41	26	1.35	26	1.43	26
M4	Diseño	1.90	49	1.78	49	1.87	49	1.90	49	1.78	49
	Nominal	1.23	25	1.25	20	1.27	20	1.20	25	1.28	20

Nota. En las columnas '**PT**' se indica el punto de la curva del diagrama de interacción asociado, en donde se produce la variación máxima, cuyo porcentaje es colocado en las columnas '%'. Cada uno de los valores de las columnas '%' también se encuentran ubicados en los gráficos de la sección de **3.11.2. Resultados**, de esta investigación, para una mejor comprensión.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis y Discusión de Resultados

Los resultados materializan el objetivo general con la comparación cuantitativa (con porcentajes) y cualitativa (superposición de curvas) de los diagramas de interacción obtenidos con los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, para cada sección típica de columna o muro de corte en la muestra seleccionada. La comparación cuantitativa aplica la métrica del Error Relativo sobre los valores de carga axial y de momento de cada diagrama nominal y de diseño resultantes. Para una sección específica, se determinan 5 diagramas de interacción con cada software y la comparación se realiza bajo el enfoque de la Figura 70.

La comparación cuantitativa se consolida y resume en los porcentajes de la Tabla 15. Los valores de esta tabla, se encuentran presentes en cada una de las figuras de la sección de resultados. Si analizamos desde la Figura 72 hasta la Figura 130, exceptuando las de comparación grafica de curvas, cada figura consta de 4 gráficos de distribución de Error Relativo: 1) el primer y tercer gráfico corresponden al diagrama de diseño y diagrama nominal respectivamente, y ambos muestran las máximas variaciones por curva, 2) el segundo y cuarto gráfico muestran las máximas variaciones por punto de la curva con mayor porcentaje del primer y tercer gráfico. En los gráficos de distribución de error por punto se identifica el punto de falla balanceada (punto 40) y de falla por flexión pura, lo cual ayuda a identificar las zonas que acumulan mayor error y sus posibles causas.

y la ubicación de sus refuerzos se realizó primeramente en el software DIMCOL, y luego se procedió a exportar esta información en un formato excel.

El modelamiento de las secciones transversales se realizó bajo condiciones equivalentes de geometría ingresando las ubicaciones y dimensiones de barras de acero y de sección de

concreto en los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL y ETABS, asegurando la obtención de diagramas de interacción aproximados durante el proceso comparativo. También se ingresó similares valores de propiedades de materiales tanto para el concreto y el acero, así como configuraciones normativas equivalentes en todos los programas: en DIMCOL se incluyó la normativa ACI 318-25, y para el resto de los softwares se trabajó con el ACI 318-19.

Se determinaron los diagramas de interacción nominal y de diseño para cada modelo de sección en cada una de las interfaces gráficas de los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, tal como se indica en la sección de procedimientos, bajo condiciones equivalentes de geometría, normativa y de materiales. Cada diagrama fue determinado con 36 curvas de interacción y con 60 puntos por curva. La distribución de puntos en una curva se realizó a partir del punto de falla balanceada: 39 puntos fueron generados desde la falla por compresión pura hasta antes de la falla balanceada, y 20 puntos se colocaron después de la falla balanceada hasta el punto de falla por tracción pura.

En esta investigación, las variaciones fueron similares a otros estudios con un porcentaje menor al 5%, para el caso de secciones regulares y simétricas. Para el modelo C1 de 30x30, se ha obtenido una variación máxima 1.65% y para el modelo C5 circular se ha obtenido un máximo de error del 1.80% entre diagramas nominales y de diseño, usando los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un software en python DIMCOL, y bajo las normativas ACI 318-19 y ACI 318-25. Estos porcentajes de error son coherentes con los máximos verificados por Bassantes (2018), para los diagramas de interacción de columnas cuadradas y circulares, bajo la normativa ACI 318-14, obtenidos con un software en Matlab. El grado de aproximación gráfica entre los diagramas de interacción nominales, del presente estudio para el modelo circular C5 (ver Figura 101), obtenidos de SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, es similar al obtenido por Muñoz (2020) para el caso de columnas circulares bajo la normativa ACI 318-19, y para una comparación entre los softwares

DIIN y SAP2000. Thien y Tung (2021) también logran aproximaciones graficas adecuadas a las del presente estudio para el caso de columnas circulares, bajo las consideraciones normativas del ACI 318-19.

Los resultados del presente estudio, también difiere de otras investigaciones, donde la variación entre diagramas llega a ser mayor al 5% para el caso de secciones regulares y simétricas. Batista (2020), para una sección cuadrada de 30x30, obtiene una variación mínima y máxima de $\pm 3.00\%$ y 10.49% al usar el programa SE: Column 2016 bajo normativa ACI 318-11 y un programa elaborado en Matlab (*fc**b*) bajo consideraciones del ACI 318-14. Estas diferencias son debidas a los ajustes en los factores de reducción de resistencia que el ACI ha introducido en sus diferentes versiones, como se muestra en la Figura 132. Al-Ansari y Afzal (2019), muestra en una tabla comparativa los valores de carga axial de los diagramas de interacción entre Mathcad y SpCOLUMN con una variación máxima de 6.18% , aplicando el metodo de Bresler para determinar la capacidad de carga axial y la normativa ACI 318-14.

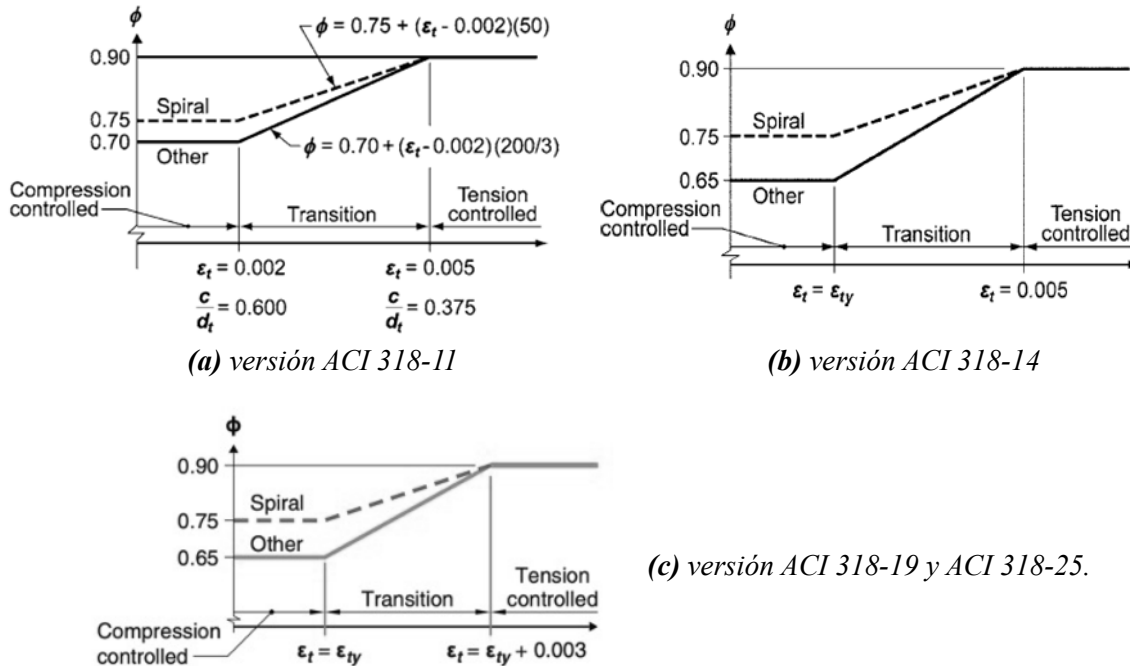
Para secciones con agujeros se obtienen variaciones aceptables ($< 5\%$) similares a otros autores, para el modelo C6, con simetría en sección y refuerzo, se obtuvieron variaciones máximas de 1.04% y 1.80% para diagramas de interacción nominal y de diseño al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y un software en python DIMCOL aplicando la métrica del Error Relativo; mientras que, para una sección con doble agujero y con las mismas condiciones de simetría, Susetyo et al. (2025) obtuvo una variación máxima de 4.994% aplicando la métrica RMSE.

Para el modelo de columna C2, del presente estudio, se obtuvo una variación máxima de 2.54% para los diagramas de interacción nominal y de diseño obtenidos con los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL; esta variación se produjo en el punto 56, cerca de la zona de falla por tracción pura, lo que indica que se debe a errores por irregularidades geométricas en esta zona como se muestra la Figura 83. Para este mismo tipo

de sección, Kim (2022) obtiene variaciones mayores al 5% entre los diagramas de interacción, al implementar un método de optimización no lineal.

Figura 132

Factor de Reducción de Resistencia según Versiones del ACI.

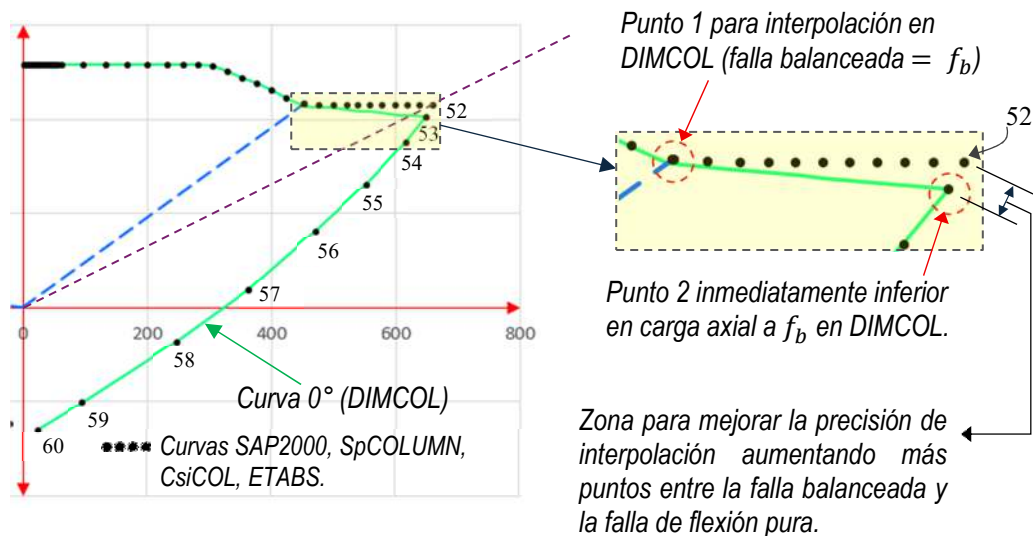


Para el caso de muros de corte del presente estudio, el mayor error o variación se presentó al comparar los diagramas de interacción para el modelo M2 (tipo T), ubicándose este máximo en el punto 51 entre la falla balanceada y la falla de flexión pura de la curva de interacción para 0° de inclinación del eje neutro. Los porcentajes máximos para esta curva, resultaron de la comparación de DIMCOL versus SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL y ETABS, alcanzando los valores de 4.49%, 3.65%, 4.48% y 4.77% respectivamente, y esto se debió a la escasa densidad de puntos entre la falla balanceada y la falla por flexión pura que genera DIMCOL en su función de interpolación para zona de transición, mas no a errores numéricos como se puede mostrar en la Figura 133. A pesar de estas variaciones máximas, existe un buen grado de aproximación entre los diagramas de interacción obtenidos con SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, para secciones de muros con alas. Sin embargo,

otros estudios, tales como el de Cedeño (2021), no ejercen control sobre la zona de transición, generando diagramas cuyas curvas de interacción evidencian una punta de sobrerresistencia axial después del punto de falla balanceada.

Figura 133

Variaciones en la Zona de Transición en DIMCOL.



4.2. Corroboración de Hipótesis

De acuerdo con el enfoque cuantitativo adoptado, la hipótesis formulada en el capítulo I ha sido sometida a prueba mediante el análisis comparativo de los diagramas de interacción obtenidas con los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, tanto a nivel cuantitativo (graficas de barras de distribución de error) y a nivel cualitativo (graficas de curvas), como se muestra desde la Figura 72 hasta la Figura 130; en estos gráficos se evidenció que el máximo porcentaje de error o variación para capacidad de carga axial y momentos biaxiales fue inferior al 5%, por lo tanto la hipótesis queda plenamente corroborada.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- De la comparación realizada entre diagramas de interacción de flexocompresión biaxial de columnas y muros de corte al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL se concluye que para las secciones simétricas en refuerzo y geometría (C1, C3, C5, C6 y M4) la variación no excede el 2% al usar cualquier programa; mientras que para las secciones asimétricas (C2, C4, M1, M2 y M3) la variación osciló entre el 2% y el 4.80%, alcanzado las mayores variaciones para el modelo M2 entre DIMCOL respecto a SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL y ETABS con 4.49%, 3.65%, 4.48% y 4.77% respectivamente, verificándose que la variación máxima porcentual entre diagramas es inferior al 5% y obteniendo las menores variaciones entre SAP2000 y ETABS.
- El correcto modelamiento de las secciones en los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, bajo condiciones equivalentes de geometría, normativa, y materiales, contribuyó a obtener diagramas de interacción aproximados.
- Los diagramas de interacción nominales y de diseño, obtenidos con los diferentes programas estructurales, proporcionaron datos suficientes para cuantificar adecuadamente las variaciones máximas en capacidad de carga axial y de momento.
- Se obtuvo una variación máxima promedio del 4.38%, aplicando el Error Relativo, al comparar entre si los diagramas de interacción obtenidos al usar los programas SAP2000, SpCOLUMN, CsiCOL, ETABS y DIMCOL, indicando un buen grado de aproximación entre los valores de capacidad de carga axial y de momento de los diagramas.

5.2. Recomendaciones

- Mejorar los algoritmos, las técnicas geométricas y las ecuaciones de equilibrio del presente estudio para abordar casos de columnas y muros de corte con efectos de esbeltez u otros tipos de daño que puedan afectar la capacidad resistente.
- Realizar estudios comparativos entre los diagramas de interacción de flexocompresión biaxial para el caso de secciones compuestas o con reforzamiento estructural de columnas y muros de corte.

REFERENCIAS

- ACI. (2025). *Building Code for Structural Concrete: Code Requirements and Commentary [SI - International System of Units]*. Farmington Hills, MI, EEUU: American Concrete Institute. Obtenido de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U25&Format=HARD_COPY&Language=English&Units=US_Units
- Ahmed, B., Zerfu, K., y Agon, E. C. (2021). *Construction of uniaxial Interaction Diagram for Slender Reinforced Concrete Column Based on Nonlinear Finite Element Analysis*. Hindawi Publishing Corporation, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1155/2021/3275512>
- Al-Ansari, M. S., y Afzal, M. S. (2019). *Mathcad: Teaching and learning tool for biaxial reinforced column design*. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), 9(2), 43-52. Obtenido de https://iosrjen.org/Papers/vol9_issue2/Ser%20-2/F0902024352.pdf
- Al-Ansari, M. S., y Afzal, M. S. (2020). *Mathematical model for analysis of uniaxial and biaxial reinforced concrete columns*. Advances in Civil Engineering, 2020(1), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/8868481>
- Apaza, W. (2024). *Diseño estructural automatizado y paramétrico de viviendas de bajo costo, mediante el uso de algoritmos de programación visual, Cusco – Perú, 2019*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/9757>
- Atao, J. W. (2020). *Comportamiento en flexocompresión de columnas y muros estructurales de concreto armado: estado del arte*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Pontificia Universidad Católica Del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19299>
- Bassantes, E. J. (2018). *Desarrollo de un programa interactivo para el cálculo y diseño de columnas aplicando el software Matlab*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27815>
- Batista, R. A. (2020). *Diagramas de interacción de columnas con flexocompresión biaxial*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad de Matanzas. <https://rein.umcc.cu/handle/123456789/3590>
- Benoy, S., Anusree, C. P., Saravanan, M., Zeneeb, M. A., & Vijayanarayanan, A. R. (2025). Analytical equations to estimate design biaxial response of high strength concrete structural walls [Ecuaciones analíticas para estimar la respuesta biaxial de diseño de muros estructurales de concreto de alta resistencia]. *Structures*, 74, 108486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108486>
- Brice, R. (2024). *Strain compatibility: Primer part I*. *Aspire - The Concrete Bridge Magazine*, 26-29. <https://www.aspirebridge.com/magazine/2024Fall/CBT-StrainCompatibilityPrimer-Part1.pdf>

- Cedeño, B. A. (2021). *Análisis de las curvas de interacción en flexocompresión del código ACI 318-19*. [Tesis de Maestría]. Repositorio de la Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://masterieg.uc.cl/wp-content/uploads/2024/11/AG-2021-CEDENO-C-BOLIVAR.pdf>
- Chapra, S. C., y Canale, R. P. (2015). *Numerical methods for engineers*. New York, EEUU.: McGraw-Hill Education.
- Colino, A. (1 de Enero de 2025). *Diccionario Español de Ingeniería. Obtenido de Real Academia de Ingeniería*: <https://diccionario.raing.es/es/lema/ensayo-monot%C3%B3nico>
- Computers and Structures, Inc. (1 de Enero de 2025). *ETABS API* [versión 21.2.0]. Berkeley, California, EEUU.
- Computers and Structures, Inc. (1 de Enero de 2025). *CSICol API* [versión 10.0]. Berkeley, California, EEUU.
- Computers and Structures, Inc. (1 de Enero de 2025). *SAP2000 API* [versión 26.0]. Berkeley, California, EEUU.
- CSI America. (1 de Enero de 2025). *CSI America. SAP2000 - User Interface*: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000/features/user-interface>
- Especializado, C. T. (2020). *Norma E.060 Concreto Armado*. San Borja, Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Espinoza, Z. M. (2019). *Ductilidad en muros de corte y comportamiento a flexocompresión mediante, diagrama de interacciones en edificación "Marbella", Jesús María, Lima-2019*. [Tesis de Título Profesional]. Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/71569>
- Garay, H. C. (2022). *Comparación de la respuesta estructural de la edificación del Módulo "B" de la Institución Educativa Cesar Vallejo - Hualgayoc - Cajamarca al utilizar los Software SAP2000 y Robot Structural*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/31223>
- Hognestad, E. (1951). *Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois Bulletin, Illinois*. <https://hdl.handle.net/2142/4360>
- Holan, J., y Stefan R. (2019). *Regarding the Interaction Diagram of Reinforced Concrete Cross-Section. Solid State Phenomena*. 292, 164-172
doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.292.164
- Kim, H.-S. (2021). *Obtaining interaction diagram of concrete section exposed to fire by mathematical optimization. Structures*, 44, 1-13.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102993>

- Kim, H.-S. (2022). *Estimating interaction diagrams for arbitrarily shaped concrete sections by interpolating stationary points*. (G.-C. Cho, Ed.) KSCE Journal of Civil Engineering, 11. doi:10.1007/s12205-022-1633-9
- Kolapkar, B. N., Balakrishnan, B., y Menon, D. (2023). *Biaxial bending of RC rectangular column sections Improved load contour*. *Structural Concrete*, 25, 19. doi:10.1002/suco.202300650
- Lequesne, R., & Pincheira, J. (2014). *Proposed revisions to the strength reduction factor for axially loaded members*. *Concrete International*, 36, 43-49. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113336279>
- Lo, D. S. (2015). *Finite element mesh generation*. Boca Raton, Florida, EEUU: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b17713>
- McCormac, J., & Brown, R. (2018). *Diseño de concreto reforzado*. Colombia: Alfaomega.
- Megson, T. (2019). *Structural and stress analysis*. Oxford. Reino Unido: Elsevier.
- Muñoz, D. M. (2020). *Diagramas de interacción de columnas circulares mediante el software DIIN*. [Tesis de Maestría]. Repositorio de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/11399>
- Otazzi, G. (2016). *Apuntes del curso concreto armado I*. Lima: Asociación del Capítulo Peruano del Instituto Americano de Concreto.
- Park, R., y Paulay, T. (1988). *Estructuras de concreto reforzado*. christchurch, Nueva Zelanda: John Wiley & Sons.
- Reynolds, D. D., y Kramer, K. W. (2007). *Interaction diagrams for concrete columns*. ACI (American Concrete Institute).
- Rodríguez, K. (2023). *Comparación del proyecto estructural de un hotel de 8 niveles utilizando Etabs y Robot SAP*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5957>
- Ryu, E., Kim, H., y Shin, Y. (2020). *Analytical study for the development of interaction diagram of the fire-damaged rc columns with varied heated areas*. *Journal of the Korean Society for Hazard Mitigation*, 20(3), 61-66. doi:<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.3.61>
- Sánchez, G. D. (2022). *Determinar la respuesta estructural del Módulo "I" de la I.E.P. Alfonso Villanueva Pinillos, de la Ciudad de Jaén al ser analizado con los softwares Robot Structural Analysis Professional y ETABS*. [Tesis de Título Profesional]. Repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4902>
- StructurePoint. (1 de Enero de 2025). *Frequently Asked Questions*. StructurePoint - Concrete Software Solutions. <https://structurepoint.org/frequently-asked-question.asp?productName=spColumn>
- Susetyo, Y., Maryoto, A., y Wariyatno, d. G. (2025). *Interaction diagram of hollow-crossed reinforced concrete columns undergoing biaxial bending using the closed polygon*

- method.* (H. A. Susanto, Ed.) *Jurnal Ilmu Dinamika Rekayasa*, 21(1). Obtenido de <https://jurnaldinarek.id/index.php/jidr/article/download/3/2/7>
- Susetyo, Y., Maryoto, A., & Wariyatno, N. G. (2023). *A study of interaction diagrams of irregularly shaped reinforced concrete column with hollow cross section using the closed polygon method.* *EasyChair*, 6. Obtenido de <https://easychair.org/publications/preprint/7wdD>
- Symington, I. (2020). *Designer Oriented Software - Is it Accurate? BENCH MARK*, 32-44.
- Thien, M., & Tung, T. (2021). *Design interaction diagrams for reinforced concrete circular columns following ACI 319-19.* (D. L. Hong, Ed.) *Journal of Materials and Construction (JOMC)*, 11(1), 8. doi:<https://doi.org/10.54772/jomc.v1i01.132>
- Whitney, C. (1942). *Plastic theory of reinforced concrete design.* *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 76. doi:<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005554>
- Wikipedia. (30 de Noviembre de 2024). *Wikipedia - La Enciclopedia Libre.* <https://es.wikipedia.org/wiki/Python>

ANEXOS

Anexo I. *Algoritmo General de Cálculo Para DIMCOL.*

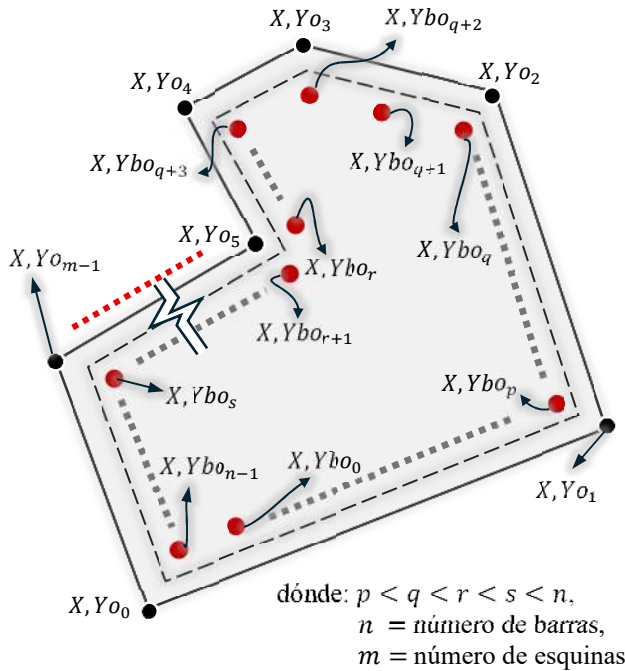
Anexo II. *Función Python para Proyección de Puntos de Prueba.*

Anexo I. Algoritmo General de Cálculo Para DIMCOL.

Para cualquier sección de forma arbitraria, el procedimiento será el siguiente:

Figura 134

Algoritmo - Sección Arbitraria de Columna o Muro de Corte.



PARÁMETROS DE SECCIÓN

- w = peso volumétrico concreto.
- f'_c = resistencia a la compresión del concreto.
- ϵ_u = deformación unitaria del concreto.
- f_y = resistencia de fluencia.
- E_s = módulo de elasticidad del acero.
- ϵ_s = deformación unitaria del acero.
- A_g = área bruta de la sección de concreto.
- Asl = lista de área de barras de acero.
- Xo = Lista de coordenadas X de las esquinas de la sección.
- Yo = Lista de coordenadas Y de las esquinas de la sección.
- Xbo = Lista de coordenadas X de los centros de barras de acero.
- Ybo = Lista de coordenadas Y de los centros de barras de acero.

Figura 135

Algoritmo - Parámetros Iniciales y Cálculo de Área de Sección Bruta.

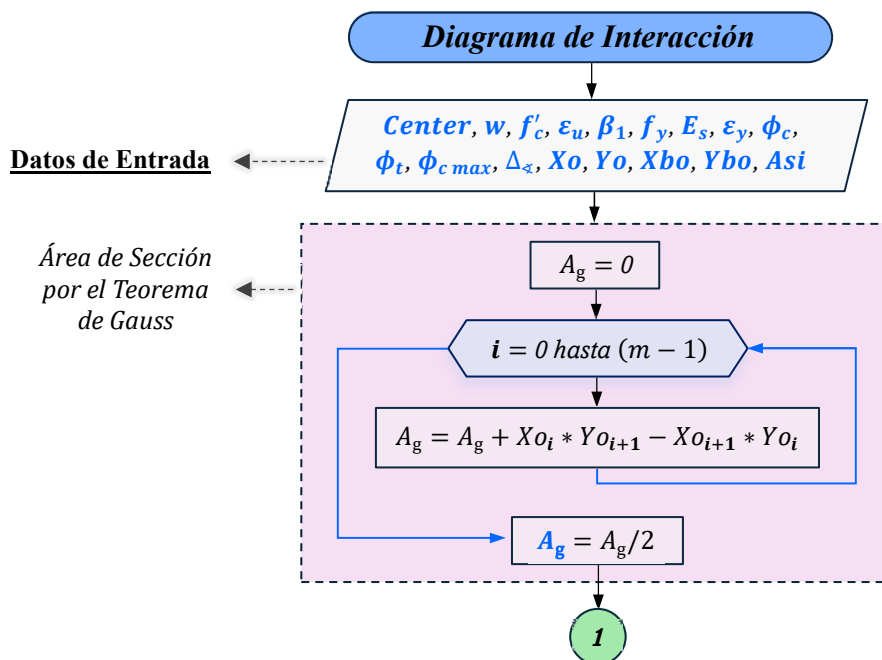
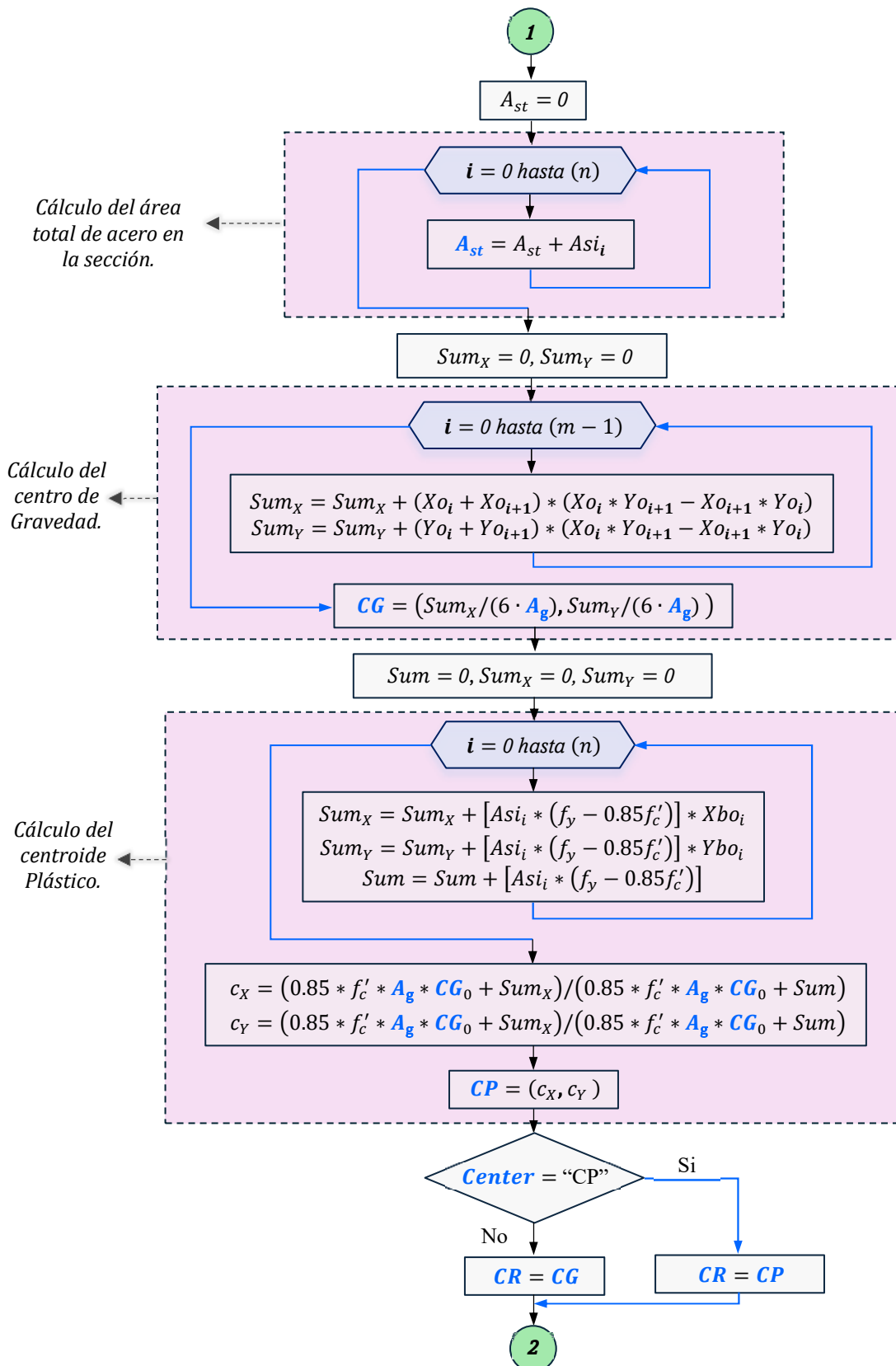


Figura 136

Algoritmo - Cálculo de Área Total de Acero y Centro de Reducción.



Luego, se procede a trasladar el origen del sistema de coordenadas a la ubicación del CR calculado, como se ilustra a continuación:

Figura 137

Traslación o Cambio del Origen de Coordenadas.

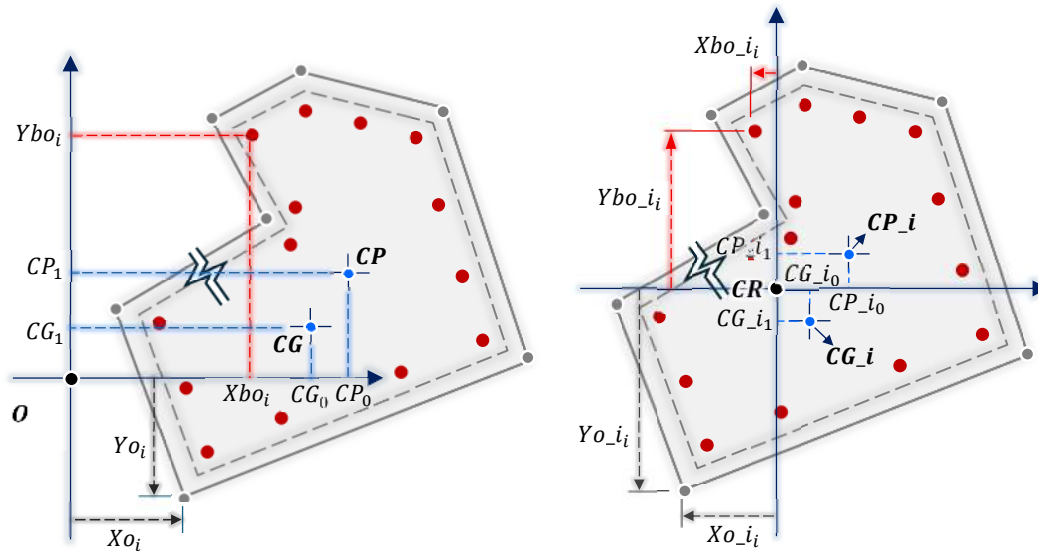


Figura 138

Algoritmo - Traslación del Origen al Centro de Reducción.

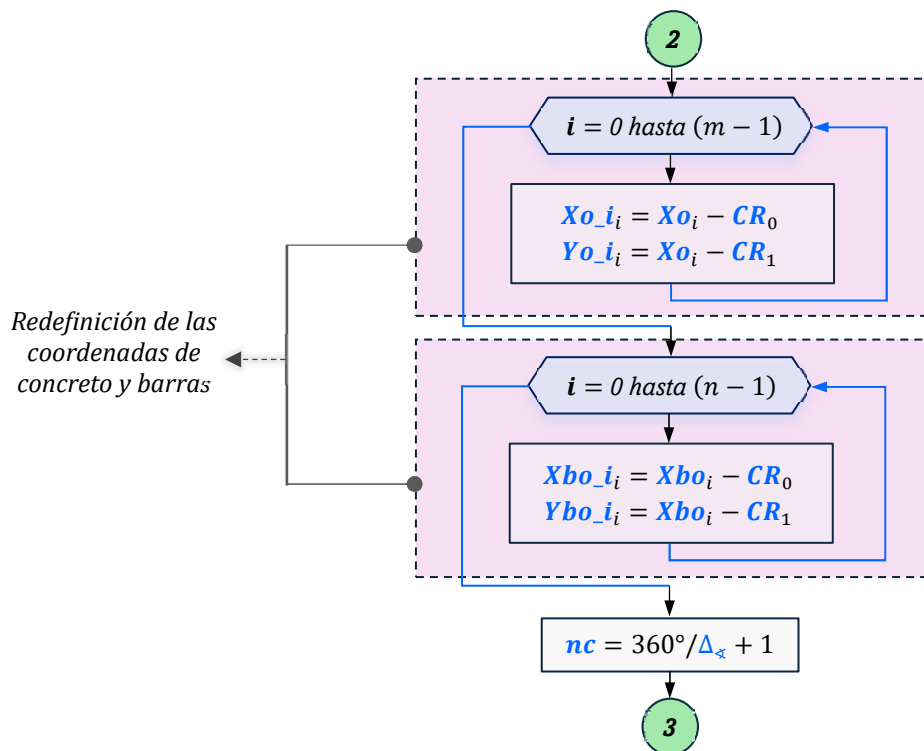


Figura 139

Algoritmo – Determinación General del Diagrama de Interacción.

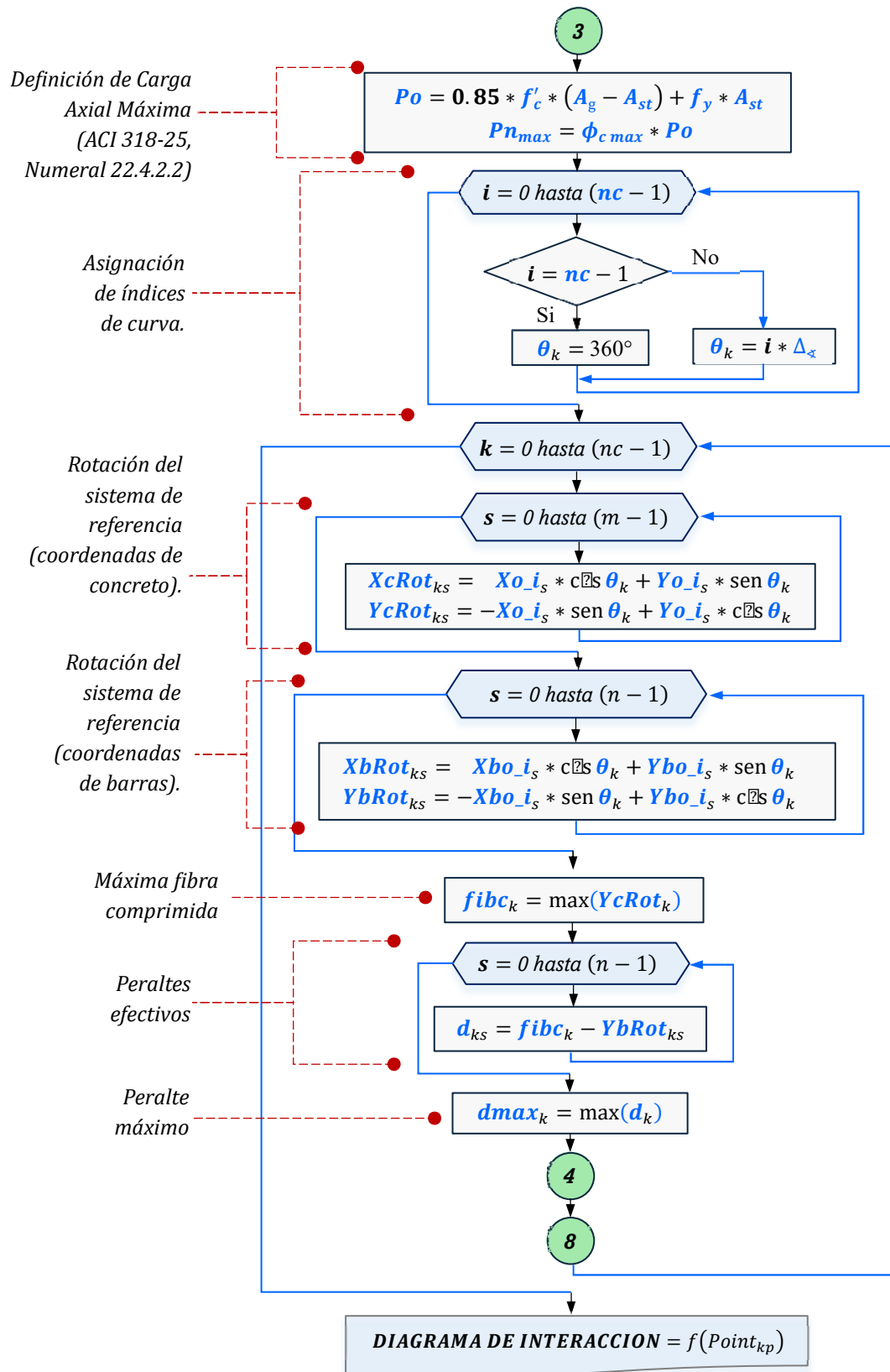


Figura 140

Sistema Local Rotado para una Posición Específica del Eje Neutro.

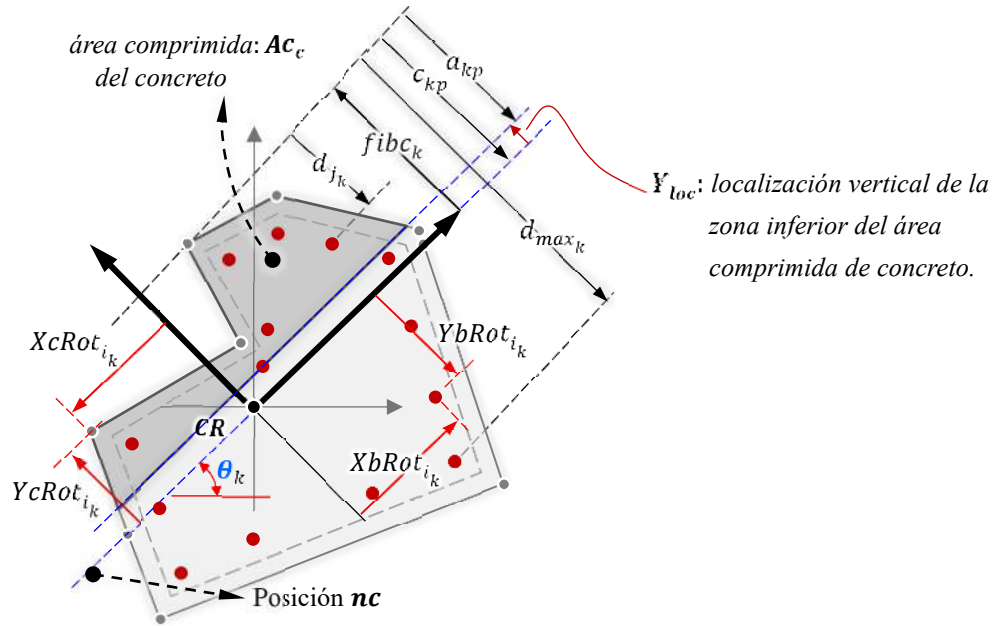


Figura 141

Alturas del Bloque de Compresión y Distribución de Puntos por Curva.

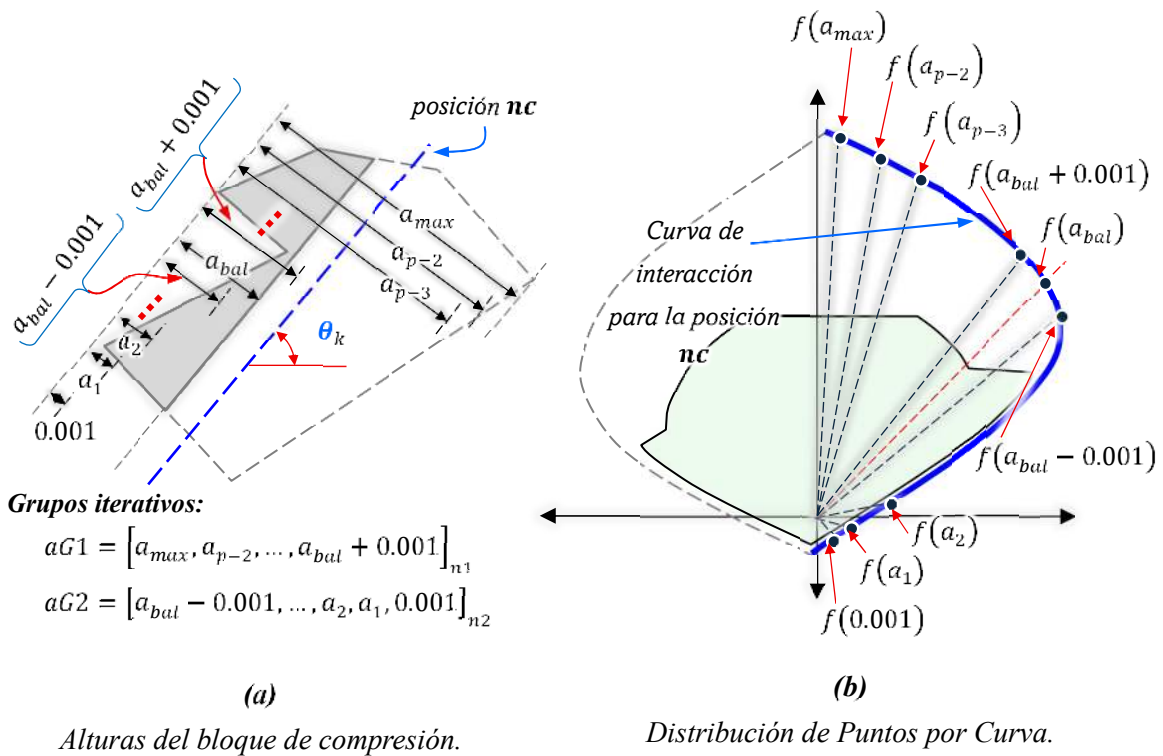


Figura 142

Algoritmo – Cálculos por Grupos de Puntos de Curva de Interacción.

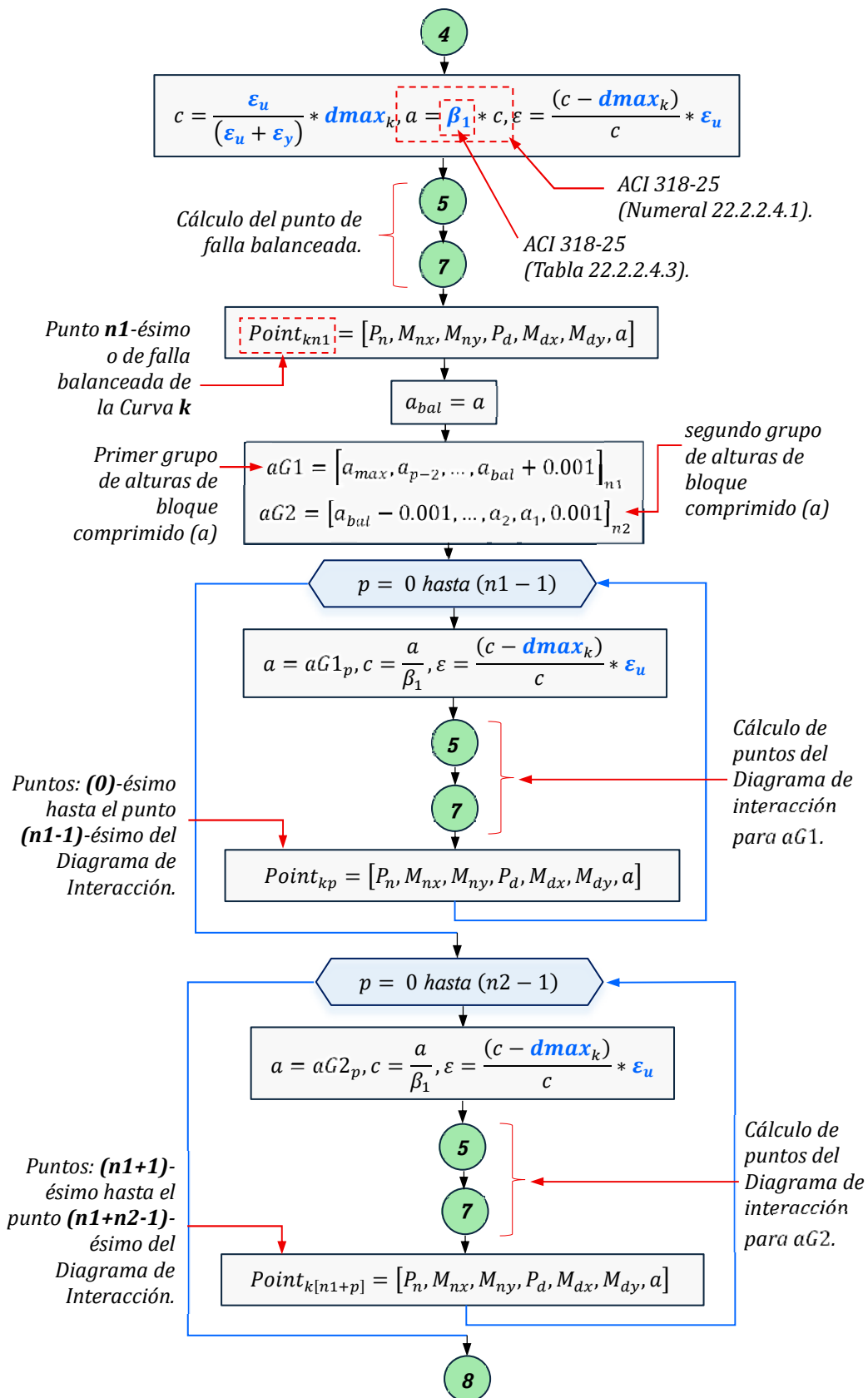


Figura 143

Algoritmo - Bloque 5: Equilibrio de Fuerzas.

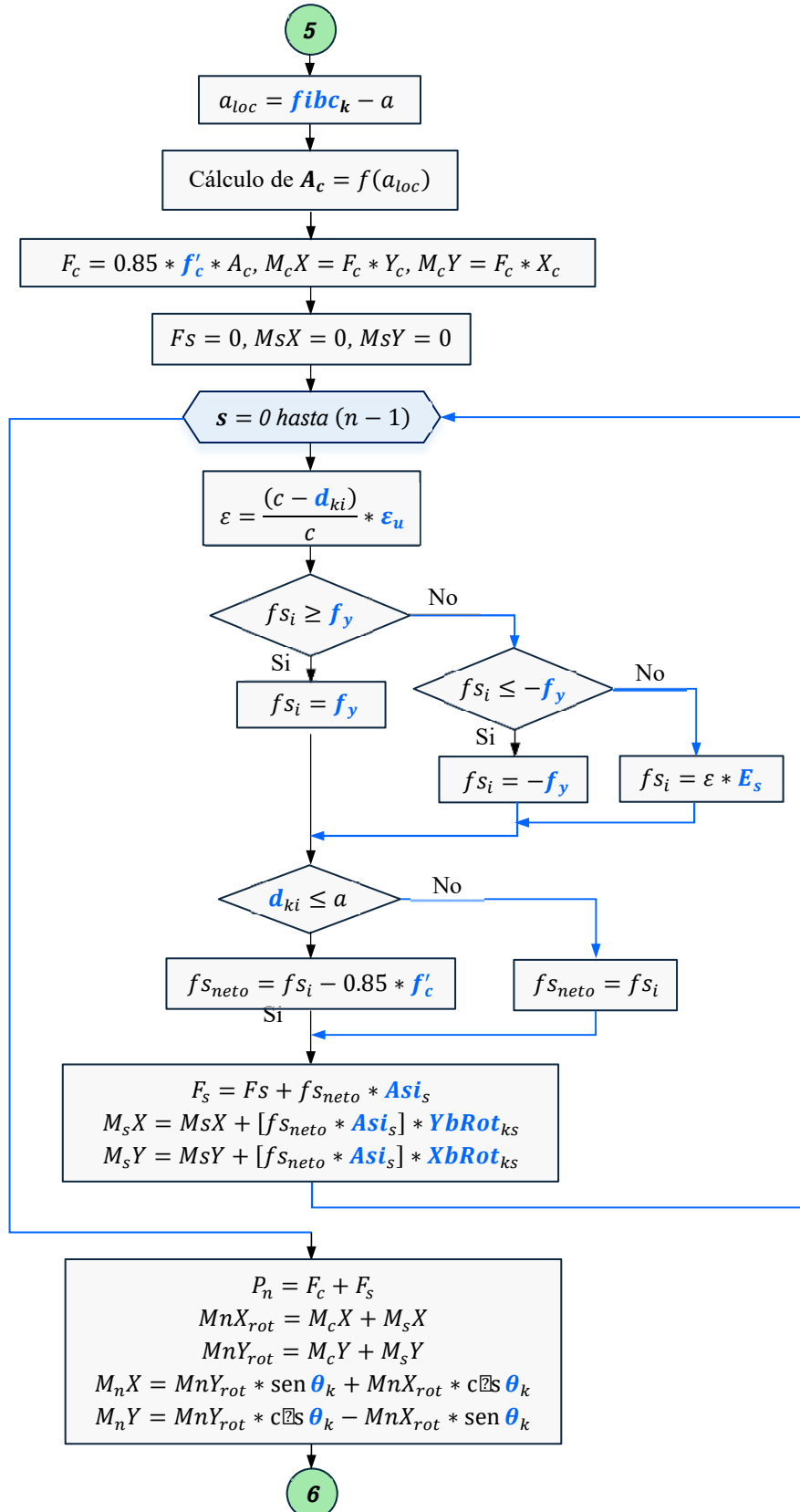


Figura 144

Cálculo de los Valores de Carga Axial y Momentos de Diseño.

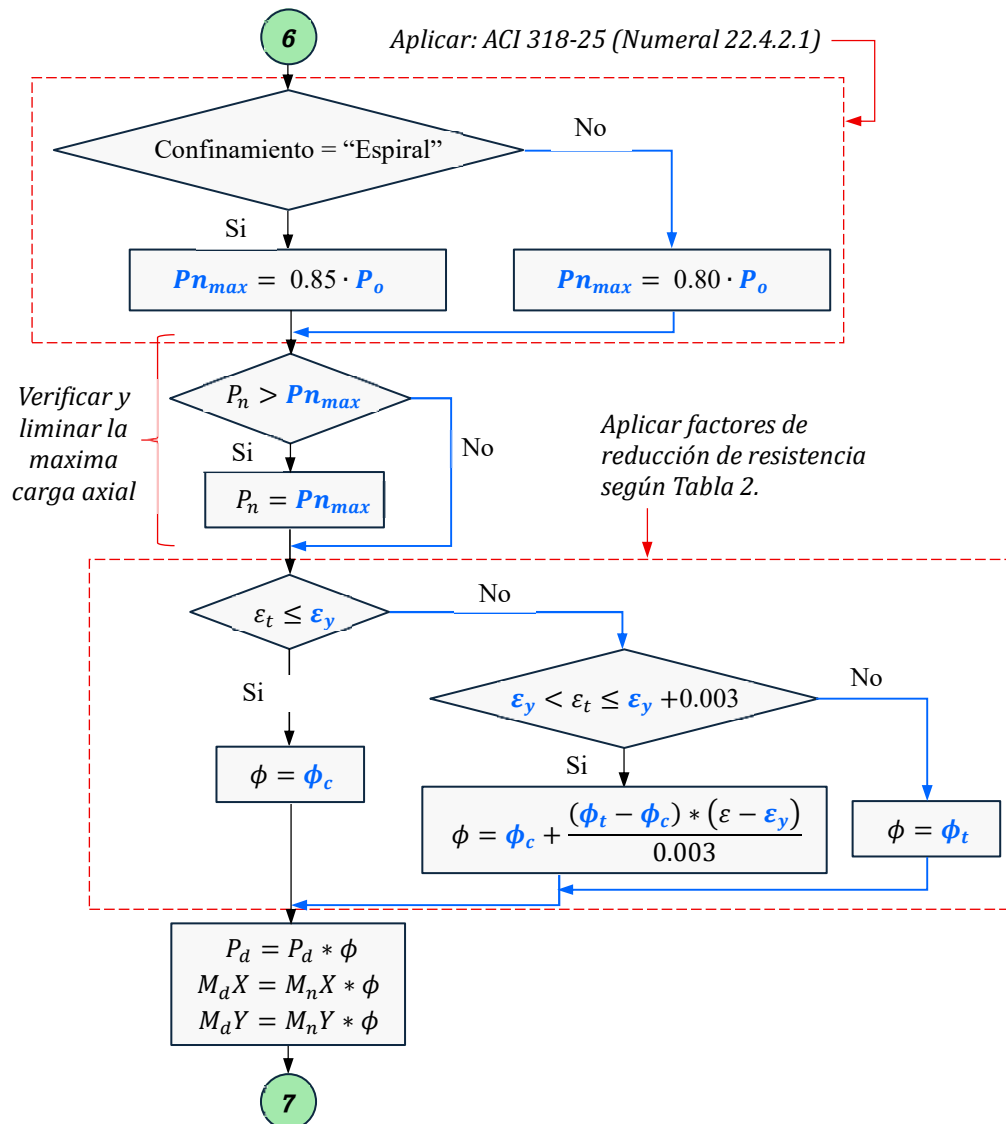
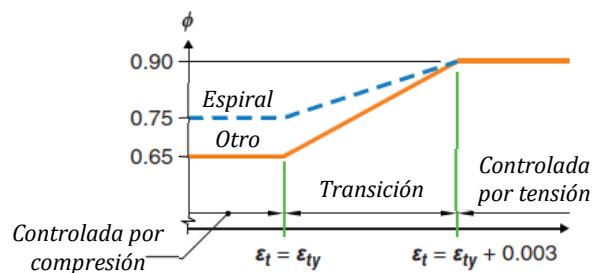


Figura 145

Valores del Factor de Reducción de Resistencia, ϕ .



Nota. “Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary [SI]” (p. 433), por ACI 318-25, 2025.

Anexo II. Función Python para Proyección de Puntos de Prueba.

```
#####
#                                METODO: Get_CoordPI                                #
#-----#
# Datos asociados:                                                         #
#   En el Formato N°1 (Anexo 5) se encuentran almacenados los #
#   valores de carga axial y de momento de las 36 curvas de #
#   la superficie de interacción Nominal o Diseño de un modelo #
#   determinado, tanto como para DIMCOL vs SAP2000 (o DIMCOL #
#   vs ETABS.                                                         #
# Uso:                                                                     #
#   Abre y selecciona un archivo .xlsx con el Formato N°1 y se #
#   proyectarán todos los puntos de DIMCOL sobre la curva de #
#   SAP2000 (o ETABS). Seguidamente se colocarán (en el mismo #
#   .xlsx), para cada punto de DIMCOL, puntos de SAP2000 (o #
#   ETABS) válidos para comparación.                                   #
#-----#
import openpyxl
import math
import sys
from PySide6.QtWidgets import QApplication, QFileDialog

def Get_CoordPI(RangoX, RangoY, Px, Py):
    # Validar que Px y Py sean numéricos
    try:
        Px = float(Px)
        Py = float(Py)
    except (ValueError, TypeError):
        return "Error: Px o Py no son valores numéricos válidos"

    n = len(RangoX)
    if n != len(RangoY):
        return "Error: Los rangos X e Y no tienen la misma longitud"

    x3 = 0.0
    y3 = 0.0
    x4 = Px
    y4 = Py

    contador = 0
    interseccionesX = []
    interseccionesY = []
    distancias = []

    for i in range(n - 1):
        try:
```

```

        x1 = float(RangoX[i])
        y1 = float(RangoY[i])
        x2 = float(RangoX[i + 1])
        y2 = float(RangoY[i + 1])
    except (ValueError, TypeError):
        return "Error: Valores no numéricos en la polilínea"

    denom = (y4 - y3) * (x2 - x1) - (x4 - x3) * (y2 - y1)

    if denom != 0:
        ua = ((x4 - x3) * (y1 - y3) - (y4 - y3) * (x1 - x3)) / denom
        ub = ((x2 - x1) * (y1 - y3) - (y2 - y1) * (x1 - x3)) / denom

        # Solo verificar que la intersección
        # esté dentro del segmento de la polilínea
        if 0 <= ua <= 1:
            xi = x1 + ua * (x2 - x1)
            yi = y1 + ua * (y2 - y1)
            dist = math.sqrt((xi - Px) ** 2 + (yi - Py) ** 2)

            contador += 1
            interseccionesX.append(xi)
            interseccionesY.append(yi)
            distancias.append(dist)

    if contador == 0:
        # No se encontraron intersecciones,
        # devolver coordenada del punto
        # objetivo.
        return (Px, Py)

    # Encontrar el índice del punto más cercano
    minDist = min(distancias)
    idxMin = distancias.index(minDist)

    # Devolver las coordenadas
    return (interseccionesX[idxMin], interseccionesY[idxMin])

# Función principal
def main():
    # Crear aplicación Qt si no existe
    app = QApplication.instance()
    if app is None:
        app = QApplication(sys.argv)

    # Abrir diálogo para seleccionar archivo
    file_path, _ = QFileDialog.getOpenFileName(
        None,

```

```

        "Seleccionar archivo Excel",
        "",
        "Archivos Excel (*.xlsx *.xls *.xlsm)"
    )

if not file_path:
    print("No se seleccionó ningún archivo.")
    sys.exit(1)

try:
    # Intentar abrir el archivo (si está abierto en Excel,
    # openpyxl puede leerlo en modo read_only)
    wb = openpyxl.load_workbook(file_path)
    ws = wb['DATA']

    for k in range(37):

        k3 = k + (k + 1)*3
        k4 = k3 + 1

        # Leer RangoX: D5:D65
        RangoX = []
        for row in range(5, 66): # Filas 5 a 65
            cell_value = ws.cell(row=row, column=k4).value
            RangoX.append(cell_value)

        # Leer RangoY: C5:C65
        RangoY = []
        for row in range(5, 66): # Filas 5 a 65
            cell_value = ws.cell(row=row, column=k3).value
            RangoY.append(cell_value)

        for i in range(60):

            Px = ws.cell(row=71+i, column=k4).value
            Py = ws.cell(row=71+i, column=k3).value
            _px, _py= Get_CoordPI(RangoX, RangoY, Px, Py)

            ws.cell(row=136+i, column=k4).value = _px
            ws.cell(row=136+i, column=k3).value = _py

        # Guardar el archivo
        wb.save(file_path)
        wb.close()

except FileNotFoundError:
    print("Error: El archivo no se encontró.")
except openpyxl.utils.exceptions.InvalidFileException:

```

```
        print("Error: El archivo no es un archivo Excel válido.")
    except KeyError:
        print("Error: La hoja 'DATA' no existe en el archivo.")
    except PermissionError:
        print("Error: Archivo abierto! Cerrar y ejecutar el script!")
    except Exception as e:
        print(f"Error inesperado: {e}")

if __name__ == "__main__":
    main()
```