

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

“ANALISIS SISMICO DE TANQUES ESFÉRICOS ELEVADOS”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

CESAR AUGUSTO GARRIDO CHAVEZ

ASESOR

Dr. VICTOR I. FERNANDEZ-DAVILA GONZALES

LIMA- PERÚ

2018

© 2018, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
“El autor autoriza a la UNI a reproducir del Informe de Suficiencia en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Garrido Chávez, César Augusto

cesargarrido56@gmail.com

987186318

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue llevada a cabo gracias al apoyo que tuve en distintos ámbitos. Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de seguir esta carrera, así como la salud y la fortaleza para poder concluirla con éxito.

También doy las gracias a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), ya que sus valiosas enseñanzas fueron clave para poder seguir y comprender el tema de investigación.

A mi asesor de Tesis, Dr. Víctor I. Fernández-Dávila G., por su constante apoyo en todas las etapas de esta investigación. Los comentarios y sugerencias dados en este transcurso, me ayudaron a entender nuevas cosas y ver de distintas formas un problema. Así también, considero importante mencionar la confianza que me brindo, la cual pudo impulsar el desarrollo de esta Tesis.

Agradezco a los compañeros y amigos que encontré en la época universitaria y laboral, así como los momentos que compartimos. La confianza y la amistad que me brindaron me han permitido crecer profesionalmente y personalmente.

Por último, pero no menos importante. Agradezco sinceramente a mis padres y hermanos, ya que me acompañaron en todo este tiempo y su soporte ha sido una gran fuerza para seguir adelante.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	7
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	14
INTRODUCCIÓN	20
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	23
1.1 ANTECEDENTES	23
1.2 ESTADO DEL ARTE	26
1.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO	28
1.3.1 Clasificación de tanques	29
1.3.2 Tanques esféricos	30
1.4 TIPOS DE MATERIALES	31
1.5 CODIGOS Y ESTANDARES RELACIONADOS	32
1.5.1 Normativas de recipientes a presión	33
1.5.2 Normativas de tanques de almacenamiento	34
1.5.3 Normativa Nacional	36
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	37
2.1 ANALISIS DINAMICO DE ESTRUCTURAS	37
2.1.1 Análisis Modal	44
2.1.2 Análisis de Superposición Modal Espectral	46
2.2 INTERACCION ESTRUCTURA-LIQUIDO	47
2.2.1 Teoría de la velocidad potencial	48
2.2.2 Modelos mecánicos equivalentes	52
2.3 EFECTO 2º ORDEN P-DELTA	55
2.4 CRITERIOS DE DISEÑO ESTABLECIDOS POR NORMATIVIDAD ES	56
2.4.1 American Water Works Association AWWA D100	57
2.4.2 Eurocódigo 8	58
2.4.3 American Society of Civil Engineers ASCE 7-10	60
2.4.4 Indian Institute of Technology Kanpur (IITK)	61
2.4.5 Análisis comparativo	62

CAPÍTULO III: RESPUESTAS DINÁMICAS EN TANQUES ESFÉRICOS	65
3.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE CUBA ESFERICA	65
3.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE SOPORTE	69
3.3 CIMENTACION	71
3.4 UNIONES ENTRE ELEMENTOS	73
3.4.1 Unión esfera-columna	73
3.4.2 Unión columna – arriostre	74
3.4.3 Unión columna – cimienta	74
CAPÍTULO IV: MODELO ESTRUCTURAL DE TANQUES ESFERICOS	76
4.1 CARACTERISTICAS DE TANQUES	76
4.2 MODELO MATEMATICO SIMPLIFICADO	77
4.2.1 Rigidez Lateral	79
4.2.2 Rigidez Torsional	80
4.3 MODELO TRIDIMENSIONAL	81
4.3.1 Modelo en ANSYS	82
4.3.2 Modelo en SAP2000	84
4.4 VALIDACION DEL MODELO TRIDIMENSIONAL	87
4.4.1 Análisis de Vibración libre	87
4.4.2 Análisis modal	90
4.5 ESTUDIO DE RESPUESTAS DINAMICAS EN TANQUES REALES	93
4.5.1 Definición Del Espectro Sísmico	93
4.5.2 Expresión de Resultados	96
4.5.3 Conclusiones	98
CAPÍTULO V: ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUES ESFÉRICOS	100
5.1 ANALISIS DE PARAMETROS DE LA ESTRUCTURA	100
5.1.1 Propiedades inerciales del sistema:	100
5.1.2 Parámetros relacionados al comportamiento dinámico estructural:	101
5.1.3 Radio de giro	102
5.2 GENERACIÓN DE TANQUES A ANALIZAR	103
5.2.1 Variación de parámetros	103
5.2.2 Número de casos generados	104
5.3 DEFINICION DE MODELOS PARAMÉTRICOS	105
5.3.1 Propiedades Inerciales	105
5.3.2 Propiedades de soportes	107
5.4 ANÁLISIS SÍSMICO DE FAMILIA DE TANQUES	110

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
6.1 ANALISIS COMPARATIVO DE PERIODOS Y MODOS DE VIBRACIÓN	116
6.2 RESPUESTAS GLOBALES	123
6.2.1 Cortante basal	123
6.2.2 Momento volcante	126
6.2.3 Desplazamiento máximo	128
6.2.4 Momento torsor y giro	132
6.3 RESPUESTAS LOCALES	134
6.3.1 Esfuerzo cortante de columnas	134
6.3.2 Momento flector de columnas	138
6.3.3 Esfuerzo axial de arriostres	141
6.3.4 Comparación de configuraciones de soporte	144
6.4 ANALISIS DEL METODO SIMPLIFICADO	145
6.4.1 Calibración del método	148
6.4.2 Validación	149
6.4.3 Influencia de la altura total en las respuestas	150
CONCLUSIONES	155
RECOMENDACIONES	158
BIBLIOGRAFÍA	159
ANEXOS	163

RESUMEN

Se presenta el estudio del comportamiento sísmico estructural de tanques elevados esféricos, los cuales son utilizados frecuentemente en el almacenamiento de hidrocarburos debido a que su geometría permite una distribución de presiones uniforme. La estructura está conformada por una esfera de acero conectada al suelo mediante un sistema de soporte compuesto por columnas arriostradas y distribuidas en el contorno circular, proporcionando la rigidez y resistencia al sistema.

Se seleccionaron los parámetros geométricos y dinámicos más representativos del sistema estructural a través de un previo análisis de sensibilidad efectuado a siete tanques esféricos reales, el cual comprendió el estudio analítico de las ecuaciones diferenciales del movimiento y el análisis sísmico de los tanques. Las solicitaciones sísmicas del modelo empleado fueron calculadas a partir del espectro de diseño de pseudo-aceleraciones de la norma peruana E.030 vigente. Se utilizó un modelo tridimensional, donde la interacción líquido-estructura fue definida por modelos equivalente de masa-resorte, y se consideró que el contenido de fluido fuera agua. El modelo generado fue validado con un modelo de elementos finitos para definir la interacción líquido-estructura, alcanzando porcentajes de error menores a 8% en las frecuencias naturales de vibración.

Del estudio sísmico en la familia reducida de tanques se obtuvieron las fuerzas cortantes sísmicas basales y los desplazamientos laterales máximos del tanque, observando que la variación de estas respuestas depende del factor de zona, el volumen de la esfera, el nivel de llenado y las rigideces del sistema de soporte. A partir de estos resultados se lograron identificar cinco parámetros que representan el comportamiento dinámico estructural los cuales son: la relación de esbeltez (RE), la relación diámetro y espesor de la cuba (DE), la relación de llenado del tanque (RH), el periodo de vibración lateral del tanque (T_y) y el grado de acoplamiento torsional (Ω_θ).

Posteriormente, se generó una familia de 324 casos a partir de una combinatoria de los cinco parámetros mencionados, los cuales fueron analizados con espectros correspondientes a las cuatro zonas sísmicas que indica la norma

E.030. Del análisis sísmico se obtuvieron los periodos de vibración, las fuerzas cortantes basales, los momentos de volteo y los desplazamientos laterales, observando una clara diferencia entre los modelos de periodo de vibración corto ($T_y = 0.1s \sim 0.3s$) y los de periodo de vibración largo ($T_y = 0.4s \sim 0.6s$), en donde en este último se tuvo un comportamiento acoplado entre el líquido y la estructura, es decir no existía un modo exclusivo relacionado al movimiento del líquido. Además, se apreció que el parámetro DE resulto muy influyente en todas las respuestas debido a su relación directa con el peso de la estructura y por ende de su rigidez. Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos se formuló un modelo simplificado que permitió representar los resultados globales de los modelos tridimensionales con un margen de error promedio menor a 7% en dichos valores.

ABSTRACT

We present a study of seismic behavior of spherical elevated tanks, which are often used in hydrocarbon storage due to its geometry allows a uniform pressure distribution. The structure is composed of a steel sphere connected to the base level by a support system consisting of columns braced and distributed in the circular perimeter, responsible for providing rigidity and strength to the system.

The geometric and physic parameters that represent of the structural model were selected through a prior sensitivity analysis performed to seven real spherical tanks, which includes the analytical study of the equations of motion and seismic analysis of tanks. The seismic forces were calculated from seismic design spectra of the Peruvian code E.030. A three-dimensional model was used, where the liquid-structure interaction was defined by mass-spring models, and the fluid content was considered as water. The generated model was validated with a finite element model to define the liquid-structure interaction, reaching error percentages that do not exceed 8% in the natural frequencies of vibration.

From the seismic study applied to the reduced family of tanks it was observed that the variation of the main responses depended on the zone factor, the sphere volume, the filling level and stiffness of the support system. From these results were able to identify five parameters representing its structural dynamic behavior which are: slenderness ratio (RE), tank diameter/thickness ratio (DE), tank filling ratio (RH), lateral period of the tank (T_y) and degree of torsional coupling (Ω_θ).

Subsequently, a family of 324 cases was generated by a combinatorial of the five parameters mentioned, which were analyzed with spectra corresponding to the 4 seismic zones that indicate the norm E.030. The results observed were both local and global. From the seismic study the periods of vibration, the shear forces, the overturning moments and the lateral displacements were obtained, noting a clear difference between the models of short period ($T_y = 0.1s \sim 0.3s$) and long period ($T_y = 0.4s \sim 0.6s$), where in the latter a behavior was coupled between the liquid and the structure. It was also noted that DE parameter was very influential in all responses due to its direct relation with the weight and stiffness of the structure. In addition, a simplified method was developed based on the results obtained, allowing the overall results to be obtained quickly and reliably, with an average margin of error of 7% in relation to three-dimensional models.

PRÓLOGO

El presente trabajo desarrollado por el Sr. César A. Garrido estudia un tipo particular de estructuras: los tanques elevados esféricos. Estas estructuras están más enfocadas al almacenamiento de fluidos volátiles a alta presión en refinerías y no han sido tan estudiados en comparación con otras estructuras de almacenamiento, por lo que la presente investigación resulta importante para conocer el comportamiento de este tipo especial de estructuras.

El trabajo se enfocó en la respuesta dinámica de estas estructuras, ya que el comportamiento del líquido almacenado es diferente al de tanques con otras geometrías (rectangulares y cilíndricas), generándose distintas distribuciones de presiones en las paredes. Los elementos de soporte de la estructura son solicitados entonces de distinta forma para casos de fuerzas estáticas y dinámicas, por lo que el estudio del comportamiento general de cada elemento de la estructura es descrito y resulta esencial en la generación de un modelo matemático.

La metodología seguida consistió, en primer lugar, en definir un modelo estructural que represente el comportamiento de la estructura. Posteriormente se definieron parámetros característicos que representen el comportamiento dinámico de los tanques. A partir de estos parámetros se generó una familia de 324 casos, que permitió conocer la influencia de los parámetros en las respuestas de interés. La importancia de este estudio radica en la posibilidad de abarcar el estudio de una gran cantidad de tanques, con la variabilidad de unos cuantos parámetros.

Finalmente, esta investigación permitirá entender de una manera más profunda el comportamiento dinámico de los tanques elevados esféricos definidos paramétricamente.

Dr. Víctor I. Fernandez-Dávila Gonzáles

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Comparación de periodos periodos experimentales y teóricos	51
Tabla 2.2: Relación de valores normales del oleaje ($\lambda n = \omega n^2 \cdot R/g$) según altura de llenado	52
Tabla 2.3: Relación de masas impulsivas y convectivas según altura de llenado	52
Tabla 2.4: Factor de Importancia (AWWAD100)	57
Tabla 2.5: Factor de reducción (AWWAD100)	58
Tabla 2.6: Factor de Importancia (Eurocodigo 8)	59
Tabla 2.7: Factor de ductilidad (Eurocódigo 8)	59
Tabla 2.8: Factor de importancia (ASCE 7-10)	60
Tabla 2.9: Factor de reducción (ASCE 7-10)	61
Tabla 2.10: Factor de importancia (Indian Code)	62
Tabla 2.11: Factor de reducción (Indian Code)	62
Tabla 2.12: Parámetros sísmicos de códigos Internacionales	63
Tabla 4.1: Dimensiones de tanques esféricos reales	76
Tabla 4.2: Análisis de condición de péndulo invertido	77
Tabla 4.3: Rigideces equivalentes de masas convectivas	86
Tabla 4.4: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=0.6).	88
Tabla 4.5: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=1).	89
Tabla 4.6: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=1.4).	89
Tabla 4.7: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=0.6).	90
Tabla 4.8: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=1).	91
Tabla 4.9: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=1.4).	91
Tabla 4.10: Factores de Zona	94
Tabla 4.11: Factor de suelo	94
Tabla 4.12: Períodos T_P y T_L	95
Tabla 4.13. Parámetros sísmicos	95
Tabla 4.14. Factores de Zona de los siete tanques	96
Tabla 4.15: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=0.6)	97

Tabla 4.16: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=1).	97
Tabla 4.17: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=1.4).	97
Tabla 5.1: Análisis de Sensibilidad de masas de la estructura	100
Tabla 5.2: Análisis de Sensibilidad del radio de giro de la estructura	102
Tabla 5.3: Parámetros de tanques esféricos elevados	103
Tabla 5.4: Tanques esféricos parametrizados	103
Tabla 5.5: Parámetros variables del tanque	104
Tabla 5.6: Inercia de columna (m^4) – Modelo 6 soportes	108
Tabla 5.7: Área de arriostres (m^2) – Modelo 6 soportes	108
Tabla 5.8: Diferencia de rigideces laterales (%) – Modelo 6 soportes	109
Tabla 5.9: Inercia de columna y área de arriostre-Tanques reales	110
Tabla 5.10: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 6 soportes	111
Tabla 5.11: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 8 soportes	112
Tabla 5.12: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 10 soportes	113
Tabla 6.1: Comparación entre rigideces k_1 y k_2	122
Tabla 6.2: Derivas permitidas (ASCE7-10)	129
Tabla 6.3: Relación de Periodos impulsivos y convectivos con la altura total de la estructura para $T_y=0.6$, $\Omega_\theta =1.4$ y $RH=1.6$	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista de la refinería durante y después del terremoto	24
Figura 1.2. Clasificación de tanques de almacenamiento	29
Figura 1.3 Diferentes configuraciones de columnas en tanque esférico	31
Figura 1.4 Tanque esférico sin columnas	31
Figura 2.1 Elementos finitos en una viga	38
Figura 2.2 a) Sistema de 1GDL sometido a fuerza externa, b) Fuerzas en internas del sistema	38
Figura 2.3 Discretización de una viga	39
Figura 2.4 Viga sometida a una rotación unitaria y un desplazamiento virtual	41
Figura 2.5 Sistema de masas concentradas	42
Figura 2.6 Viga sometida a una aceleración angular unitaria y un desplazamiento virtual	42
Figura 2.7 Amortiguamiento de Rayleigh.	43
Figura 2.8 Esquema de recipiente con líquido bajo acción dinámica	48
Figura 2.9 Gráfico comparativo entre frecuencias experimentales y teóricas	49
Figura 2.10 Modelo de Péndulo Simple	53
Figura 2.11 Modelo de masa - resorte - amortiguador	53
Figura 2.12 Modelo mecánico en tanque esférico	54
Figura 2.13 Variación de la frecuencia frente a la relación H/D para el primer modo de oleaje	54
Figura 2.14 Variación de la frecuencia frente a la relación H/D para el segundo modo de oleaje	54
Figura 2.15 Variación de las masas convectivas e impulsivas frente a la relación H/D	55
Figura 2.16 Efecto P-Delta en a) Edificios y b) Tanques Elevados	55
Figura 2.17. Gráfica comparativa de espectros por códigos internacionales – Componente Impulsiva	64
Figura 2.18. Gráfica comparativa de espectros por códigos internacionales – Componente Convectiva	64
Figura. 3.1. Diferencial de un elemento tipo lamina y fuerzas internas existentes.	65

Figura 3.2. Tanque esférico sostenido por anillo rígido en el eje A-A	66
Figura 3.3 Distribución de presiones de componente convectiva para diferentes niveles de llenado	68
Figura 3.4 Distribución de presiones de componente impulsiva para diferentes niveles de llenado	68
Figura 3.5 Sistema de soporte de tanques esféricos	69
Figura 3.6 Sistema simplificado estructura-liquido	70
Figura 3.7 Cimentación tipo anillo en tanques esféricos	71
Figura 3.8 Esfuerzos transversales típicos en zapatas	72
Figura 3.9 Cimentación típica por pilotes en tanques esféricos	72
Figura 3.10 Unión típica esfera – columna	73
Figura 3.11 Unión típica entre elementos tubulares	74
Figura 3.12 Unión de columnas tubulares con plancha base	75
Figura 3.13 Esfuerzos típicos en plancha base por axial y momento	75
Figura 4.1 Dimensiones geométricas de tanque esférico	77
Figura 4.2 Modelo simplificado tipo Péndulo Invertido.	78
Figura 4.3. Modelo simplificado de una columna con arriostre.	79
Figura 4.4. Fuerzas laterales resistentes al giro	81
Figura 4.5. Elemento Shell63	82
Figura 4.6. Elemento Fluid80	83
Figura 4.7 Modelo tridimensional - ANSYS	84
Figura.4.8 Modelo equivalente de masa convectiva	86
Figura 4.9 Modelo tridimensional - SAP2000	87
Figura 4.10. Modelo de vibración libre - ANSYS	87
Figura 4.11. Formas modales convectivas de un tanque esférico	88
Figura 4.12 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=0.6).	92
Figura 4.13 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=1).	92
Figura 4.14 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=1.4).	93
Figura 4.15 Zonas Sísmicas	94
Figura 4.16 Espectro elástico reducido	96
Figura 4.17 Fuerza cortante de los siete tanques	98
Figura 4.18 Desplazamiento lateral máximo de los siete tanques	98

Figura 5.1. Parámetros estructurales en tanques esféricos elevados.	102
Figura 5.2. Parámetros estructurales en tanques esféricos elevados	106
Figura 5.3. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 6 soportes	114
Figura 5.4. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 8 soportes	114
Figura 5.5. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 10 soportes	115
Figura 6.1. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros.	117
Figura 6.2. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros.	118
Figura 6.3. Relación del Cortante basal frente a los parámetros.	123
Figura 6.4. Comportamiento del cortante basal según grado de acoplamiento	125
Figura 6.5. Relación del Momento volcante frente a los parámetros.	126
Figura 6.6. Relación del desplazamiento máximo frente a los parámetros.	128
Figura 6.7. Relación de derivas frente a los parámetros.	130
Figura 6.8. Comportamiento de Derivas por zonas y períodos	131
Figura 6.9. Relación del momento torsor frente a los parámetros.	132
Figura 6.10. Comportamiento del giro según grado de acoplamiento	133
Figura 6.11. Relación del cortante en columnas frente a los parámetros.	134
Figura 6.12. Esfuerzos cortantes - Modelo 11113	135
Figura 6.13. Comportamiento de cortante en columnas según configuración	137
Figura 6.14. Relación del momento en columnas frente a los parámetros	138
Figura 6.15. Momentos Flectores - Modelo 11113	139
Figura 6.16. Comportamiento del momento en columnas según configuración	140
Figura 6.17. Relación del axial en arriostres frente a los parámetros	141
Figura 6.18. Esfuerzos Axiales - Modelo 11113	142
Figura 6.19. Comportamiento del axial en arriostres según configuración	143
Figura 6.20. Comparación del volumen total de acero según configuración	144
Figura 6.21 Modelo simplificado tipo Péndulo Invertido.	145
Figura 6.22. Variación de T_y para los casos paramétricos	148
Figura 6.23. Relación entre ratio T_{re}/T_y vs T_y	149
Figura 6.24. Porcentaje de error entre modelo simplificado y modelo tridimensional	150
Figura 6.25. Periodo Impulsivo vs Altura total	151

Figura 6.26. Periodo Convectivo vs Altura total	152
Figura 6.27. Variación del factor de desplazamiento vs Altura total para el modo 1	154
Figura 6.28. Variación del factor de desplazamiento vs Altura total para el modo 2	154

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- a_0, a_1 : Coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh
- A_{ar} : Área de la sección del arriostre
- A_h : Coeficiente Sísmico de diseño horizontal (Indian Code)
- A_n : Pseudo-aceleración
- $[B]$: Diferenciación de la matriz $[N]$
- c : Amortiguamiento de un sistema de 1 gdl
- \mathbf{c} : Matriz de amortiguamiento
- \mathbf{C} : Matriz de amortiguamiento generalizado
- Ca : Coeficiente de amplificación sísmica
- C_{cn} : Función de presión asociado a la componente convectiva
- C_d : Factor de ampliación de desplazamiento
- C_I : Función de presión asociado a la componente impulsiva
- D : Diámetro externo de la esfera
- D_{col} : Diámetro de columna
- D_{esf} : Diámetro de la esfera
- DE : Relación diámetro-espesor de la esfera
- e_{esf} : Espesor de la esfera
- e_x : Vector unitario en la dirección x
- e_1 : Excentricidad accidental asociada a la masa m_1 .
- E : Modulo de Young
- $f_{(RH)}$: Constante de masa convectiva en relación a la altura de llenado (Tabla 2.3)
- \mathbf{f} : Vector definido en Ec (A.5)
- f_D : Fuerza de amortiguamiento de un sistema de 1 gdl
- \mathbf{f}_D : Matriz de fuerza de amortiguamiento
- f_i : Fuerza inercial de un sistema de 1 gdl
- \mathbf{f}_i : Matriz de fuerzas inerciales
- f_j : Coeficiente del vector \mathbf{f}
- f_s : Fuerza restauradora de un sistema de 1 gdl
- \mathbf{f}_s : Matriz de fuerza restauradora
- F : Fuerza externa
- g : aceleración de la gravedad

G	: Fuerza externa equivalente en la dirección Z
h_{ar}	: Altura vertical proyectada del arriostre
h_{sx}	: Altura de entrepiso
h_1	: Altura de la columna comprendida entre la esfera y el arriostre
h_2	: Altura de la columna comprendida entre el arriostre y el suelo
H	: Altura de llenado del liquido
H_{col}	: Altura total de la columna
H_{agua}	: Altura de llenado de agua
H_t	: Altura total de la esfera
I	: Momento de inercia de la sección
lo	: Inercia rotacional
k	: Rigidez de un sistema de 1 gdl
k	: Matriz de rigidez
k_1	: Rigidez lateral del soporte
k_2	: Rigidez del resorte equivalente
$k_{\theta 1}$: Rigidez torsional del soporte.
k_{ij}	: Coeficientes de la matriz de rigidez
K	: Rigidez lateral de la estructura
K	: Matriz de rigidez generalizado
[K]	: Matriz de rigidez asociado al fluido
K_{arr}	: Rigidez equivalente del arriostre
K_{ij}	: Coeficiente de la matriz de rigidez [K]
K_{θ}	: Rigidez torsional de la estructura
$K_{lat(p)}$: Rigidez lateral del soporte según parámetros
$K_{lat(ex)}$: Rigidez lateral del soporte según expresiones teóricas.
K_c	: Rigidez de la masa convectiva
K_l	: Rigidez lateral conjunta de una columna y sus arriostre
L_n	: Definido en la ecuación 2.24
l_{arr}	: Longitud del arriostre
m	: Masa de un sistema de 1 gdl
m	: Matriz de masa
m_{ij}	: Coeficientes de la matriz de masa
m_1	: Masa de la estructura más la masa impulsiva del agua (Fig.4.2)
m_2	: Masa convectiva del agua (Fig.4.2)
M	: Matriz de masa generalizada

- [M] : Matriz de masa asociado al fluido
- M_c : Masa convectiva del líquido
- M_e : Masa de la esfera
- M_{ij} : Coeficiente de la matriz de masa [M]
- M_i : Masa impulsiva del líquido
- M_L : Masa total del líquido
- M_n : Masa generalizada correspondiente al n-ésimo modo
- M_s : Masa del tanque vacío
- M_T : Masa de la esfera más el soporte
- n : Vector unitario normal al contenedor
- N : Número de columnas
- [N] : Matriz fila con las funciones N_n
- N_n : Funciones espaciales conocidas en coordenadas esféricas
- N_θ : Esfuerzo meridional
- N_φ : Esfuerzo tangencial
- $p(t)$: Fuerza dinámica externa en el tiempo t
- $p(t)$** : Vector de fuerzas dinámicas externas
- P_i : Peso del piso i
- p_C : Presión convectiva
- p_I : Presión impulsiva
- p_a : Fuerza virtual
- $P_{esp.}$: Peso específico
- $P(t)$** : Vector de fuerzas dinámicas externas generalizadas
- $P_n(t)$: Fuerza dinámica externa correspondiente al n-ésimo modo
- $P_n^1()$: Polinomio de Legendre asociado
- q : Coeficiente de ductilidad (Eurocódigo 8)
- Q : Factor de estabilidad global
- r : Radio en coordenadas esféricas
- r_{g1} : Radio de giro del soporte
- r_{no} : Respuesta máxima correspondiente al n-ésimo modo
- r_n^{st} : Respuesta estática modal correspondiente al n-ésimo modo
- r_o : Valor máximo de $r(t)$
- r_0, r_1, r_2 : Radios de curvatura definida en Figura 3.1
- R : Radio externo de la esfera

R	: Factor de Reducción
R_c	: Factor de Reducción asociado a la componente convectiva
R_i	: Factor de Reducción asociado a la componente impulsiva
RE	: Relación de esbeltez
RH	: Relación de altura de llenado
$s_n(t)$: Función no conocida en función del tiempo (Ec A.1)
s_n^*	: Función arbitraria
s_n	: Definido en la ecuación 2.23
\mathbf{s}^*	: Vector con las funciones s_n^*
$\dot{\mathbf{s}}$: Vector con funciones $s_n(t)$
S	: Factor del tipo de suelo
S_{ac}	: Espectro de pseudo-aceleración de la componente convectiva
S_{ai}	: Espectro de pseudo-aceleración de la componente impulsiva
t_{col}	: Espesor de la columna
t_{esf}	: Espesor de la esfera
T	: Periodo de vibración fundamental de la estructura
T_c	: Periodo de la componente convectiva
T_i	: Periodo de la componente impulsiva
T_l	: Período de vibración que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante.
T_p	: Periodo de vibración que define la plataforma del factor C
T_y	: Periodo de vibración lateral la estructura en el eje y
T_y^*	: Periodo de vibración lateral corregido en el eje y
u_g	: Desplazamiento horizontal del suelo
$u_{\theta 1}$: Desplazamiento rotacional de la masa m_1 alrededor del eje Z
u	: Desplazamiento lateral
\mathbf{u}	: Vector de desplazamiento lateral
\ddot{u}	: Aceleración lateral
\ddot{u}_g	: Aceleración del suelo
$\dot{\mathbf{u}}$: Vector de aceleración lateral
\dot{u}	: Velocidad lateral
$\dot{\mathbf{u}}$: Vector de velocidad lateral
U	: Coeficiente de importancia
v_n	: Vector propio
V	: Cortante sísmico de entrepiso

V_c	: Cortante sísmico asociado a la masa convectiva
V_i	: Cortante sísmico asociado a la masa impulsiva
W	: Peso total de la estructura
W_c	: Peso de la componente convectiva
W_E	: Trabajo virtual externo
W_i	: Peso de la componente impulsiva
W_I	: Trabajo virtual interno
\mathbf{y}	: Vector de coordenadas modales.
$y(t)$: Coordenada modal en el tiempo t .
y_n	: Coordenada modal correspondiente al n -ésimo modo
Z	: Factor de Zona sísmica
α	: Ángulo de elevación del arriostre
β	: Ángulo generado por la dirección de la fuerza aplicada y el pórtico de la estructura.
γ	: Densidad
$\boldsymbol{\gamma}$: Relación entre las longitudes h_1 y h_2
Γ_n	: Factor de participación modal
δ	: Desplazamiento de diseño (ASCE7-10)
δ_{max}	: Desplazamiento máximo del análisis elástico
δu	: Desplazamiento virtual
Δi	: Desplazamiento de entrepiso
ξ	: Coeficiente de amortiguamiento
ξ_n	: Coeficiente de amortiguamiento correspondiente al n -ésimo modo
θ	: Ángulo azimutal
$\boldsymbol{\tau}$: Vector de influencia
λ_n	: Valores normales del oleaje correspondiente al n -ésimo modo
μ	: Definido en la Ec. A.10
ν	: Módulo de Poisson
φ	: Ángulo meridional
φ^*	: Función admisible en función de coordenadas cartesianas
ρ_{in}	: Coeficiente de correlación cruzada para los modos i y n
ϕ_s	: Potencial del oleaje
ϕ_u	: Potencial uniforme

- Φ : Flujo potencial
- Φ_n : Vector de forma de modo correspondiente al n-ésimo modo
- ψ : Función de desplazamiento generalizado
- ω_n : Frecuencia angular correspondiente al n-ésimo modo
- Ω_θ : Grado de acoplamiento torsional

INTRODUCCIÓN

El desarrollo constante del sector industrial genera una necesidad en el uso de tanques de almacenamiento para materias primas o recursos energéticos. Dentro de estos tanques se encuentran los tanques esféricos, los cuales son usados para almacenar fluidos bajo gran presión, debido a que su geometría permite distribuir de una manera uniforme las presiones. Es común que estos tanques almacenen fluidos altamente volátiles, por lo que resulta importante realizar un adecuado estudio para mantener niveles de seguridad satisfactorios en caso de desastres.

En anteriores años se han observado varias fallas de tanques de almacenamiento producto de eventos sísmicos, tsunamis o por explosiones. Los daños registrados han sido diversos, por ejemplo, en tanques apoyados se observaron pandeos en la parte inferior de las paredes y daños en la cubierta; por otro lado, para tanques elevados se tuvo fallas en la estructura de soporte por exceder la resistencia de sus elementos y por problemas de asentamiento diferencial. La mayoría de estos problemas fueron debido a que no se consideró el comportamiento dinámico del fluido.

Los códigos utilizados para el diseño de este tipo particular de estructuras son normas de tanques a presión, sin embargo en éstas no se indican aspectos relacionados a la fuerza del líquido en un análisis dinámico. En cambio, estas consideraciones sí están descritas para otras geometrías en los códigos API650, AWWA D100 y el código ACI-350. Algunos estudios realizados para tanques esféricos han demostrado que la inclusión del efecto dinámico del líquido genera una diferencia significativa en las respuestas de interés (Wieschollek, 2011). Es por ello que es necesario definir adecuadamente un modelo que incluya este efecto.

En nuestro país, los mayores riesgos que se han evidenciado fueron los producidos por los movimientos sísmicos, por lo que el presente proyecto plantea el estudio sísmico de estos tanques, a través del estudio de una familia de éstas estructuras, con el fin de identificar parámetros que influyen en su comportamiento dinámico.

El documento está organizado en seis capítulos. En el Capítulo I se presenta un breve repaso de las fallas observadas en años anteriores y la revisión de la bibliografía existente; además se muestra información general de los tanques de almacenamiento, como son las características, los materiales y los códigos aplicables. En el Capítulo II se presenta el fundamento teórico con el que se desarrolló el proyecto; se describen las expresiones relacionadas con el análisis dinámico, la interacción estructura - líquido, el efecto de 2° orden y criterios de diseño de las principales normas. En el Capítulo III se detalla el comportamiento general de los tanques esféricos elevados, observando los esfuerzos en la cuba, el soporte y la subestructura. Luego en el Capítulo IV se estudian expresiones que definen el comportamiento dinámico de la estructura, se definió el espectro sísmico a utilizar y se determinó el modelo tridimensional con modelos equivalentes, el cual fue validado con un modelo de elementos finitos a través de un análisis realizado a una familia reducida de siete tanques reales. En el capítulo V se definieron los parámetros de la estructura, se generaron los casos paramétricos y se realizó el análisis modal de los mismos. Finalmente, en el Capítulo VI se presenta el análisis de los resultados a partir de las respuestas sísmicas obtenidas, los cuales fueron divididos en respuestas globales y locales; asimismo se presenta el método simplificado, el cual es definido a partir de los parámetros escogidos y fue validado con los resultados del modelo tridimensional.

El análisis realizado consideró que la estructura está en el rango lineal, que la presión en el interior de la estructura sea igual a la atmosférica, que el líquido almacenado es agua, que los materiales tienen comportamiento lineal-elástico, que la unión entre los elementos verticales de soporte y la cuba esférica tienen capacidad de rotación y que la base se encuentran perfectamente empotrada. El modelo utilizado fue un modelo de elementos finitos, en donde los efectos de la interacción fluido - estructura fueron considerados mediante masas y resortes equivalentes, a partir de estudios previos.

El análisis de validación del modelo ayudó a definir de forma adecuada el modelo y además a estudiar su comportamiento. Posteriormente con un análisis de sensibilidad se pudo obtener cinco parámetros que representen el comportamiento dinámico general. Esta parte fue de gran importancia, ya que

con estos resultados se pudo generar una familia de casos más grande, los cuales fueron estudiados y de ello se pudo definir de manera más precisa la influencia de cada uno de estos parámetros. Asimismo, se planteó un método simplificado a partir de los parámetros definidos, el cual fue validado con los resultados de los modelos tridimensionales, observando pequeñas diferencias entre ambos.

Finalmente, el presente trabajo pretende dar a conocer el comportamiento de este tipo particular de estructuras, ya que si bien no son tan utilizadas como otros tanques son iguales de importantes. Es por ello que resulta necesario conocer las consideraciones en la modelación, en los factores sísmicos y en su comportamiento general para realizar un apropiado análisis y así evitar posibles defectos en el diseño. Además, resulta inevitable recalcar la carencia de una norma exclusiva de tanques de almacenamiento en nuestro país, ya que el uso de normas extranjeras no garantiza un buen diseño al no tener en cuenta las características geológicas locales.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los movimientos telúricos siempre han originado dificultades en la vida de los hombres, generando desastres de diferente índole. Este fenómeno ha sido un gran problema a la hora de realizar el diseño de estructuras, debido a la incertidumbre que se tiene en relación a su posible ubicación y al grado de intensidad. A través de los años se han planteado diferentes hipótesis acerca de los orígenes de los sismos, actualmente se puede explicar con la teoría del movimiento de las placas, en la cual se define al sismo como producto de la vibración que se genera por el movimiento relativo entre grandes masas de tierra, que se encuentran en la litosfera, denominadas placas tectónicas (L. García, 1998). Las placas existentes en el planeta son 58, siendo 15 los más grandes y los que generan los movimientos más fuertes. Entre los lugares que son frecuentemente más afectados, se pueden nombrar los países en el cinturón de fuego, la región cercana a la cordillera del Himalaya y en los países alrededor del Mediterráneo. A pesar de que por ahora no es posible predecirlo, la ingeniería ha ayudado considerablemente a entender el fenómeno y es posible prevenirlo hasta cierto grado, para lograr ello se han realizado estudios relacionados con las características del sitio, del terreno y de los tipos de estructuras, verificando así la influencia de estos parámetros y llegando a ciertas recomendaciones. En esta sección se revisarán los principales daños registrados en tanques de almacenamiento, producto de fuerzas sísmicas:

Terremoto Kern Kounty, USA (1952)

El terremoto de Kern fue de una magnitud de 7.3, considerándose como uno de los más desastrosos después del de San Francisco. Luego del sismo se registraron daños en edificaciones, tanques de almacenamiento de agua y de crudo, tuberías y carreteras, estimándose que las pérdidas alcanzaron los 60 millones de dólares. Los más afectados fueron los tanques de almacenamiento que se encontraban en la planta *"The Paloma Cycling"*, debido a su cercanía con el hipocentro (Fig. 1.1). Entre ellas se mencionan dos tanques esféricos que colapsaron debido al movimiento, provocando desconexiones en las tuberías y

más tarde un poderoso incendio, el cual generó explosiones en cadena (Oakeshott, 1955).

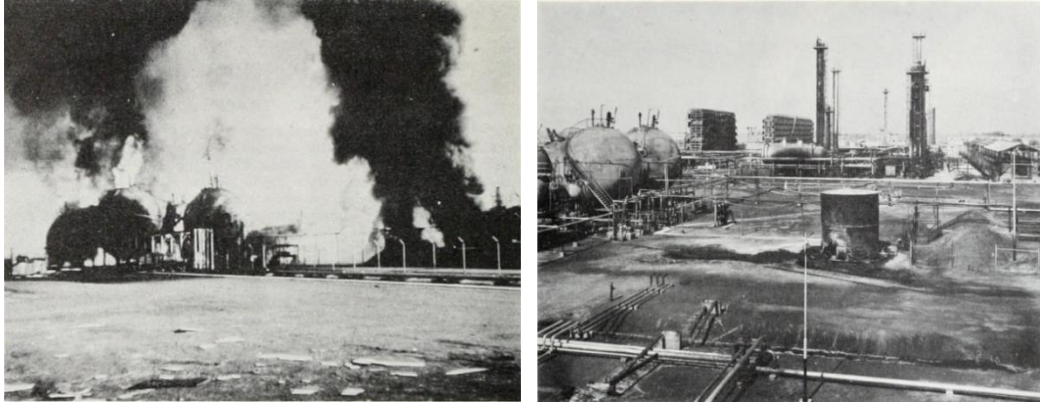


Figura 1.1 Vista de la refinera durante y después del terremoto (Oakeshott, 1955)

Terremoto Niigata, Japón (1964)

Este terremoto tuvo una magnitud de 7.5 y una escala de 6 en la de Mercalli, provocando grandes pérdidas humanas y económicas. Además, es registrado como el primer desastre sísmico en Japón en el que se notó la licuefacción del suelo. Los tanques afectados sufrieron diferentes fallas, fueron 5 tanques los que se incendiaron, las investigaciones indican que todo fue generado por el fenómeno del oleaje, ya que se produjo una chispa debido al roce entre las paredes del tanque y el líquido. También se observaron fallas en tanques apoyados, en donde producto de la licuefacción se asentaron, originando desconexiones en las tuberías. Asimismo, un tanque esférico de GLP fue afectado por el fuego, produciendo el colapso de una columna, debido al aumento de presión (Akatsuka, 1964).

Terremoto Kobe, Japón (1995)

La magnitud de este terremoto fue de 6.9. Los daños mayores fueron para las edificaciones, en cambio para los tanques industriales, debido a su lejanía, no se tuvo grandes pérdidas. El motivo principal de las fallas en los tanques fue la licuefacción del suelo. Para el caso de tanques apoyados, se observaron asentamientos y desconexiones. Por otro lado, para tanques esféricos, debido a

que estaban cimentados mediante pilotes, durante el terremoto se presentó un desplazamiento lateral del suelo, que generó la falla de estas (Ishihara, 2005).

Terremoto Kocaeli, Turquía (1999)

El terremoto de Kocaeli con una magnitud de 7.4 tuvo su hipocentro a una profundidad de 15 kilómetros y alejado 10 km de la ciudad de Golcuk. Este terremoto está considerado como uno de los más destructivos en áreas industriales. Si bien hubo varios colapsos de edificios, la mayor pérdida fue debido a las estructuras industriales, estimándose que las pérdidas económicas directas fueron de un 70%, mientras que el 30% se debió a las negociaciones canceladas

Entre las estructuras dañadas, se pueden observar varios tanques cilíndricos quemados, así como también tanques con deformaciones térmicas. Asimismo, se presentaron casos de daños en la parte superior de estos tanques, debido al oleaje. En relación a tanques esféricos, no se registraron daños significativos (Durukal, 2008).

Terremoto Tohoku, Japón (2011)

Uno de los terremotos más recientes es el ocurrido en el noroeste Japón el 11 de marzo del 2011, teniendo una magnitud de 9 y provocando además Tsunamis con olas desde 5 hasta 15 metros. Los daños que se generaron en los tanques de almacenamiento fueron de tres tipos: debido al Tsunami y a los movimientos del terreno de periodos corto y largo. Los tanques afectados por el movimiento de periodo largo, fueron tanque apoyados, siendo principalmente la causa de falla el oleaje del agua, presentando deformaciones y fracturas en las paredes. Por otro lado en los lugares donde se tuvo las fuerzas de periodo corto se observaron que los tanques cilíndricos mostraban deformaciones en la parte inferior, conocidas como pata de elefante, y que algunas columnas de los tanques esféricos habían fallado, debido al movimiento del terreno y a las explosiones que se originaron (Zama, 2012).

1.2 ESTADO DEL ARTE

El problema para entender el comportamiento de un depósito con líquido cuando está sometido a una fuerza dinámica ha sido analizado continuamente por varios años, tomando diferentes enfoques y ayudándose de diferentes medios, así en la actualidad se pueden encontrar numerosos estudios experimentales, analíticos y numéricos. Las primeras investigaciones fueron realizadas en tanques rectangulares y cilíndricos, por ser geometrías que facilitaban el cálculo.

Westergaard (1933) fue quien trató el problema para presas rectangulares y verticales, calculando las presiones y fuerzas generadas en ella cuando está sujeto a una fuerza sísmica con dirección paralela al río. Más tarde, se realizó un análisis similar para tanques cilíndricos de forma analítica y experimental, obteniendo resultados aceptables (Jacobsen, 1949). Siguiendo la misma ideología, Graham y Rodríguez (1952) realizaron un estudio mucho más completo, considerando tanques rectangulares y cilíndricos, proponiendo además, dos comportamientos del líquido: uno impulsivo, que se mueve conjuntamente con el recipiente; y el otro convectivo, que se mueve libremente.

Housner (1957) de igual forma que los anteriores autores consideró que el líquido era no viscoso, incompresible e irrotacional, sin embargo le dio otro enfoque al problema, para su solución asumió que el líquido se comportaba como láminas delgadas, y continuando con la idea de Graham y Rodríguez, considero los dos comportamientos del líquido. Para la solución de la componente impulsiva asumió que las láminas eran verticales, mientras que para la convectiva, eran horizontales. Los resultados que se obtuvo fueron muy similares a los estudios previos. A partir de sus ecuaciones, formuló un modelo equivalente, en donde toma en cuenta los dos tipos de movimientos y los representa con diferentes masas, una fija a la estructura y la otra unidad mediante resortes. Debido a ser de fácil entendimiento, ha influido de gran manera en el desarrollo de los códigos de diseño de tanques de almacenamiento, contando cada uno de ellos con variaciones de acuerdo a sus criterios.

Más adelante se extendieron los estudios al incluir el efecto que genera una pared flexible, tanto Veletsos y Yang (1977) como Haroun et al (1981)

desarrollaron nuevos modelos. Mientras que Veletsos asumía tres diferentes estados de deformación, generando así una aceleración horizontal mayor para la componente impulsiva; Haroun planteaba incluir dicho fenómeno añadiendo una masa adicional, con su respectiva rigidez. Estos modelos han sido usados varias veces para el diseño sísmico. Muchos más estudios se han realizado para estos tipos de tanques, siendo los mencionados los más influyentes.

Por otro lado, los tanques esféricos fueron menos estudiados debido a su geometría y a su poca necesidad. En un principio, las investigaciones fueron motivadas por razones de diseño aeroespaciales, siendo las estructuras más resistentes por su geometría, asegurando una distribución uniforme de presiones. Poco después, a raíz del desarrollo del petróleo y sus derivados, se generó una fuerte demanda, por lo que era necesario incrementar los tanques de almacenamiento. Debido a que los tanques esféricos fueron una alternativa, los estudios fueron mayores. Uno de los primeros estudios fue realizado por Budiansky (1960), en el cual para el cálculo de los modos y periodos se apoyó en métodos numéricos, los resultados obtenidos fueron muy similares a los dados experimentalmente. Posteriormente, Abramson *et al* (1963) realizaron análisis experimentales, con la finalidad de verificar los resultados teóricos existente. A partir de ello se generaron varios estudios en el oleaje, por ejemplo se pueden citar los realizados por: Moiseev y Petrov (1966), McIver (1989), Evans y Linton (1993).

Más recientemente se puede mencionar el estudio de Curadelli *et al* (2008), el cual hace una análisis experimental en un tanque elevado esférico, corroborando los resultados teóricos dados por otros autores, principalmente compara los periodos y modos de vibración. Además de ello Karamanos *et al* (2006, 2011) presentan la solución del problema mediante dos procedimientos, uno numérico y el otro semi-analítico, en ambas se obtuvieron resultados que concordaban con los estudios anteriores, reduciendo el tiempo de cálculo por su rápida convergencia. Asimismo, se obtuvo relaciones entre las masas convectivas en impulsivas. También se tiene la investigación de Faltinsen *et al.* (2012), quienes desarrollan un análisis no lineal del comportamiento del líquido, proponiendo para su solución el método multimodal, en el cual es necesario conocer un modo que satisfaga la ecuación de Laplace y sus ecuaciones de borde.

En referencia a investigaciones con modelos mecánicos equivalentes para este tipo de estructuras, se indican los datos por Drosos *et al* (2008) y Jing Lü *et al* (2012). Si bien en ambas se asumen solo dos masas (impulsiva y convectiva), difieren en la forma en que plantean el problema, mientras que en el primero se apoyan en el método de elementos finitos, y a partir de ello logran hallar los parámetros necesarios para la modelación; en el otro se realiza un análisis acoplado del líquido con la estructura, donde se utiliza equilibrio de energía a través del principio de Hamilton para combinar el efecto del líquido y de la pared. A pesar de las diferencias en las formulaciones, en ambas se alcanzan buenas aproximaciones cuando son comparadas con los resultados numéricos.

En relación al análisis sísmico de la estructura propiamente dicha, a pesar de la escasez de estudios, podemos encontrar investigaciones en donde consideran el movimiento del líquido y en los que no. Como ejemplo podemos citar el análisis de Rixon K. L. y Balamurugan (2012), quienes no toma en cuenta el efecto del oleaje, enfocándose únicamente en el estudio sísmico de un conjunto de tanques con el propósito de encontrar la mejor configuración de las columnas. Por otro lado se cuentan con estudios que asumen en el análisis sísmico de tanques esféricos una interacción del fluido, estructura y suelo (Karavasilis *et al*, 2004); para sus solución se utilizó el método de elementos finitos (FEM) para el fluido, y el método de elementos de borde (BEM) para el suelo. También se puede citar el estudio realizado por Wieschollek *et al* (2011), quienes propusieron el análisis sísmico de un tanque esférico, mediante las normas americanas y europeas, comparando sus requerimientos en la elección de los parámetros, asimismo incluye adicionalmente el efecto del oleaje, notándose claramente el incremento de los esfuerzo en las columnas. Además de estos, se tienen otros estudios sísmicos en tanques elevados esféricos en donde dan énfasis a la disminución de esfuerzos por medio de disipadores, en ellas se utilizan disipadores no viscosos en sus arriostres tratando de reducir el desplazamiento de estas estructuras (Drosos *et al*, 2005; V. Ciampi *et al*, 2004; Castellano *et al*, 2006).

1.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento son definidos como estructuras destinadas a guardar diferentes tipos de materiales, pudiendo ser líquidos o gaseosos, siendo

de gran importancia en el desarrollo de la vida humana. En un inicio fueron de gran utilidad con los sistemas de almacenamiento de agua y la distribución racionalizado a los pueblos; posteriormente sus usos se incrementaron al servir como almacenaje de hidrocarburos, elementos que han sido hasta ahora una de las mayores fuentes que generan energía. Son por estas razones que es necesario que estas estructuras no colapsen fácilmente. Se han creado diferentes tipos de ellos de acuerdo con las necesidades de cada lugar, de esta forma se tiene una gran variedad de tanques.

1.3.1 Clasificación de tanques

Los tanques pueden ser clasificados de diferentes maneras, de acuerdo al tipo de material, a la geometría o al uso. Asimismo, también se pueden clasificar por sus condiciones estructurales, así se podría tener para distintos tipo de anclaje y tipo de techos. Los diferentes tipos son mostrados en la Fig. 1.2.

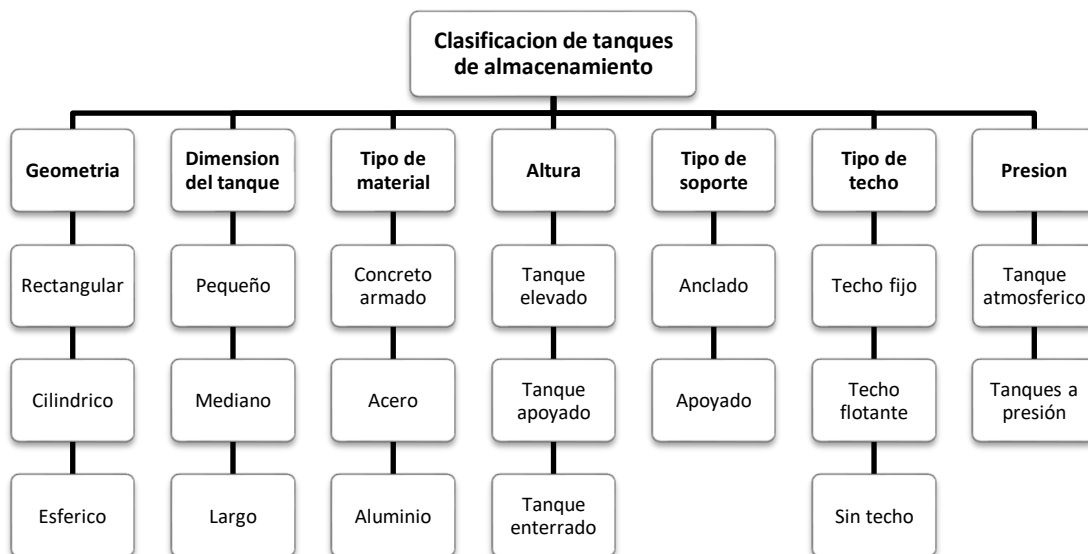


Figura 1.2. Clasificación de tanques de almacenamiento

De acuerdo con esta clasificación, podemos observar la gran diversidad de tanques existentes, y por ende la elección de uno para un determinado caso, conlleva a realizar un riguroso estudio tomando en cuenta aspectos sociales y económicos, por ejemplo para un tanque de almacenamiento de agua, se tendría que elegir el tipo de material, de acuerdo con las condiciones del lugar y teniendo en cuenta si existe la mano calificada para trabajar con un determinado

elemento, además se tendría que definir si el tanques será elevado o no, todo dependiendo de la ubicación del lugar a abastecer y del volumen necesario. De similar forma los tanques a presión tienen sus propias características. Éstos son utilizados mayormente por refinerías para el almacenaje de hidrocarburos, siendo las geometrías elegidas dependiendo de la presión a la que estarán sometidas, de esta forma los rectangulares y los cilíndricos son utilizados para bajas presiones, mientras que los esféricos soportan mayores. Otra característica importante en estos tanques son los tipos de techos: los de techos fijo están destinados a contener sustancias no volátiles, mientras que los de techo flotante si pueden, ya que al ser un techo que acompaña el nivel del líquido, ayuda a que no se produzcan escapes por evaporación, asimismo hay una tercera clase, que son los que no tiene techos, estos son para sustancias que al contacto con el aire no generan ningún riesgo, ejemplos de estos son los que se encuentran en las plantas de tratamiento de aguas.

1.3.2 Tanques esféricos

Según se ha visto los tanques esféricos pertenecen a la familia de los tanques de alta presión, esto se debe a que dicha geometría es la más estable, llegando a reducir un 50% del espesor en comparación con los cilíndricos y rectangulares. Sin embargo el costo de fabricación es mucho mayor, solo justificándose el uso de estos tanques cuando se trata de un volumen considerable a almacenar. A pesar de ser un tipo específico de tanques, entre ellos aún se pueden observar diferencias. Las variaciones son principalmente en la estructura de soporte, teniendo diferentes configuraciones de columnas y arriostres (Fig. 1.3), asimismo existen una nueva estructura en donde no se considera ninguna columna, sino que se tiene un soporte de forma cóncava, según estudios (Tecní System Institute, 2016) se han logrado controlar los efectos dinámicos satisfactoriamente. (Fig. 1.4).



Figura 1.3 Diferentes configuraciones de columnas en tanque esférico
(Fuente: www.cimtas.com, http://wikivisually.com/wiki/San_Juanico_Disaster)



Figura 1.4 Tanque esférico sin columnas. (Fuente: www.cimtas.com)

El proceso constructivo de estos tanques empieza en las fábricas, pues debido a su geometría curva, se necesita garantizar que las dimensiones sean exactas. Posteriormente es ensamblado en el lugar de instalación, mediante grúas, andamios y soldándolos por partes. En el caso de la cimentación, éstas pueden ser mediante un anillo rígido, y en casos en donde el terreno no ofrezca un buen comportamiento, se pueden optar por pilotes.

1.4 TIPOS DE MATERIALES

El tipo de material es un importante parámetro en la construcción de cualquier estructura. Para su elección como ya se ha dicho, están involucrados distintos aspectos. Al margen de esto, para los tanques a presión se tienen materiales típicos, no se usa el concreto armado por su baja resistencia, en lugar se trabaja con aceros, que además facilitan el proceso constructivo, reduciendo costos. Entre los aceros existen variaciones dependiendo de las aleaciones, en las normas de tanques a presión se observan estos tipos, clasificándolos de la siguiente manera:

Aceros al Carbono:

Estos aceros son los más comunes y utilizados, están compuestos principalmente por carbono y manganeso. Son clasificados de acuerdo a la cantidad de carbono que presentan, así se tienen: los aceros de bajo contenido de carbono (menos de 0.25%), los de acero dulce (0.15% a 0.29%), los de acero medio al carbono (0.30% a 0.59%) y por último los de más alto contenido de carbono (0.6% a 1.70%). Entre los principales aceros de estos tipos se encuentran los A36, A53, A500 y A529, según la clasificación ASTM.

Aceros de baja aleación y alta resistencia:

A diferencia de los aceros de carbono, estos aceros adquieren mayor resistencia, debido a que son combinados con otros elementos, tales como el cromo, níquel, cobre y níquel. Suelen ser utilizados en herramientas de maquinaria, en turbinas y en equipos de refinería. Entre los principales aceros de estos tipos se encuentran los A572, A618, A913 y A992, según la clasificación ASTM.

Aceros de baja aleación y alta resistencia, resistente a la corrosión:

Por último, se encuentran esta clasificación, en donde además de incluir materiales para aumentar su resistencia, se añaden pequeños porcentajes de cobre, los cuales aumentan en gran medida la resistencia a la corrosión. Suelen ser utilizados en estructuras, donde el proceso de mantenimiento y de pintado es dificultoso, como en puentes y torres de transmisión eléctrica. Entre los principales aceros de estos tipos se encuentran los A242, A588, A847, según la clasificación ASTM.

1.5 CODIGOS Y ESTANDARES RELACIONADOS

Debido a que los tanques esféricos son principalmente contenedores de hidrocarburos, las normativas que se aplican son generalmente las de recipientes a presión, tales como: ASME VIII y PD 5500; sin embargo los efectos del oleaje no son considerados. Estos efectos sí son tomados en cuenta para

otras geometrías en los códigos API650, AWWA D100, ASCE7-10, Eurocódigo 8 y el Indian Code. Se revisarán brevemente la organización de algunos de ellos:

1.5.1 Normativas de recipientes a presión

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII

El código ASME (American Society of Mechanical Engineers) fue fundado en 1880 por los ingenieros Alexander Lyman Holley, Rossiter Worthington y Edinson, con el fin de tener una norma que se enfoque en el diseño de recipientes a presión; a partir de entonces la norma ha tenido constantes actualizaciones, siendo la última la del 2010.

El código está formado por 12 secciones, cubriendo materiales, fabricación, construcción y pruebas de recipientes a presión, calderas, tanques de transporte y reactores nucleares. La sección VIII es la que se ocupa de las consideraciones de diseño para los recipientes a presión, la cual está dividida en tres, de acuerdo a la presión a la que estarán sometidas.

- ✓ Sección VIII División 1 "Reglas para construcción de recipientes a presión "

Esta división está limitada para recipientes con una presión de hasta 3000psi. Se organiza en tres sub-secciones: Requerimiento Generales, Métodos de Fabricación y Tipos de materiales.

- ✓ Sección VIII División. 2 "Reglas alternativas"

El uso de esta división no tiene límites, pero se diseña usualmente para recipientes que tiene una presión mayor a 600 psi. Está dividido en 9 partes, siendo el cuarto y el quinto los correspondientes al análisis y diseño; los resultados provenientes de ellos nos brindan mayor precisión en comparación a la primera división, que es más conservativa.

- ✓ Sección VIII División. 3 "Reglas alternativas para construcción de recipientes de alta presión"

Similar al anterior no tiene límites de presión, sin embargo se recomienda para recipientes con una presión promedio de 10000psi. Los requerimientos de materiales y de diseño son más restrictivos que en las anteriores.

Published Document 5500

El código PD 5500, conocido anteriormente como BS 5500, es publicado por la Institución de estándares Británicos, el cambio de nombre se debe a que no está en armonía con el código europeo de recipientes a presión EN 13445.

En concreto, el código comprende las especificaciones de materiales, diseño, fabricación, inspección y pruebas en recipientes a presión no expuestos al fuego con una presión mayor a 1 bar. Se divide en 5 secciones, siendo el capítulo 3 el que se encarga de definir los estándares de diseño. Asimismo, se tienen apéndices, en donde se encuentra recomendaciones y guías de diseño, además de especificar los puntos que no son cubiertos por el código.

1.5.2 Normativas de tanques de almacenamiento

Instituto Americano de Petróleo API650

El Instituto Americano de Petróleo (API) brinda especificaciones para los tanques de almacenamiento de productos líquidos derivados de petróleo. Cuentan para ello con los códigos: API 620, API 650 y API 653, los dos primeros están dirigidos al diseño de tanques, mientras que el tercero se aboca a su inspección, reparación y modificación.

El código API 650 es utilizado para tanques de acero soldados, cuya presión a la que está sometida es cerca a la atmosféricas, llegando hasta los 2.5 psi; mientras que el código API 620 abarca tanques de acero mucho más grandes que soportan una mayor presión, de hasta 15 psi.

Debido a que los criterios sísmicos en ambos son similares, se optará por describir el API 650. Este código se limita a los tanques empotrados al suelo,

estos pueden ser: verticales, cilíndricos, abiertos o cerrados; además la temperatura de diseño es menor a 90 ° C. Esta organizado en 17 apéndices, donde el diseño sísmico es desarrollado en el apéndice E.

American Water Works Association AWWA D100

La norma American Water Works Association (AWWA) fue fundada en 1881 en el campus de la Universidad de Washington, con la finalidad de establecer lineamientos que ayuden en el diseño y construcción de las estructuras relacionadas con el agua, tales como estanques, tuberías y .

Específicamente la norma orientada al diseño de tanques de almacenamiento de agua es el AWWA D100; en ella se cubre el diseño, construcción, inspección y pruebas de tanques soldados de acero, pudiendo estar empotrados en la base o ser tanques elevados, las geometrías mayormente son cilíndricas y rectangulares.

La norma está dividida en 15 capítulos, empezando con breves descripciones generales de diseño y con la especificación de los materiales. En relación al análisis sísmico, esta se encuentra en el capítulo 13. Asimismo se tienen consideraciones para el diseño de su cimentación y para las pruebas e inspecciones necesarias.

Eurocódigo 8

Los Eurocódigo son un conjunto de normas de carácter estructural que proveen estándares compatibles para toda Europa, siendo publicados por el Comité Europeo de Normalización (CEN). Los códigos están estructurados en 10 bloques desde los números 0 hasta el 9, abordando el diseño de estructuras de diferentes elementos, como hormigón, acero, mixtos, madera y aluminio; el Eurocódigo 8 es donde se encuentran los estándares en relación al diseño sísmico, este a su vez está dividida en las siguientes 6 partes:

- Eurocódigo 8 part1: "Reglas Generales, acciones sísmicas y reglas de edificación"

- Eurocódigo 8 part2: "Puentes"
- Eurocódigo 8 part3: "Evaluación y adecuación sísmica de edificios."
- Eurocódigo 8 part4: "Silos, tanques y tuberías"
- Eurocódigo 8 part5: "Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos"
- Eurocódigo 8 part6: "Torres, mástiles y chimeneas"

Las especificaciones para tanques están en el capítulo 4. El código es aplicable a tanques de almacenamiento de acero de geometría rectangular y cilíndrica, y que estén sometidas a presión atmosférica. Las indicaciones dadas son para tanques enterrados y elevados, no obstante estos últimos son revisados brevemente.

1.5.3 Normativa Nacional

La norma peruana encargada del análisis sísmico de estructuras es la norma E030, sin embargo en ella no se contempla el análisis para estructuras especiales como lo son los tanques elevados. Es debido a esto que usualmente se aplican las recomendaciones dadas en códigos internacionales, para ello se realiza una compatibilización de los parámetros sísmicos entre las normas nacionales e internacionales, para cubrir de la mejor manera los vacíos que se tengan.

A pesar de la poca existencia de normativa para este tipo de estructuras, en el artículo NTP 321.123 de la Norma Técnica Peruana se dan algunas consideraciones de construcción y seguridad para los tanques de almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP). En primer lugar recomienda que se utilice el código ASME Sección VIII para su diseño, fabricación y pruebas; además se indican los diferentes tipos de tanques existentes, los accesorios a utilizarse, y las separaciones mínimas que deben de tener entre ellas para evitar posibles accidentes.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las teorías básicas con las que se desarrolló el trabajo. En primer lugar se revisan las ecuaciones generales de dinámica de estructuras, observando las formas de cálculo de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento. Luego se presenta la teoría necesaria para definir la interacción estructura-liquido aplicados a recipientes de forma esférica. Asimismo, se revisa el efecto de segundo orden que podría producirse en estas estructuras por desplazamientos laterales elevados. Por último se describen los criterios de diseño de las diferentes normativas, con el fin de compararlos y poder definir las consideraciones más adecuadas a adoptar en el análisis sísmico de los tanques esféricos.

2.1 ANALISIS DINAMICO DE ESTRUCTURAS

El comportamiento dinámico de una estructura se presenta cuando es sometido a una fuerza transitoria; la cual puede variar en su magnitud, dirección y configuración durante el tiempo; ejemplos de éstas son las fuerzas sísmicas, de viento, explosivas, etc. Grandes desastres han sido provocados por ellos, por lo que la labor del ingeniero es el de predecir su comportamiento, cuantificarlo y prever posibles daños.

En el problema dinámico, a diferencia del estático, los esfuerzos de la estructura no solo dependen de la fuerza aplicada, sino además de las fuerzas inerciales originadas por el movimiento. Este problema se torna más complejo, debido a que las fuerzas inerciales depende de la masa de la estructura, y al encontrarse repartido uniformemente, generan infinitos puntos de fuerzas. Para abordar esto se han considerado varios procedimientos, siendo el de los elementos finitos el que ha tenido mayor relevancia, por su precisión y bajo esfuerzo computacional. En este método se subdivide al elemento estructural en un número finito de partes (Fig. 2.1), en donde para cada sub-elemento se calculan sus deformaciones, siguiendo funciones de forma característicos (Clough and Penzien, 1995).

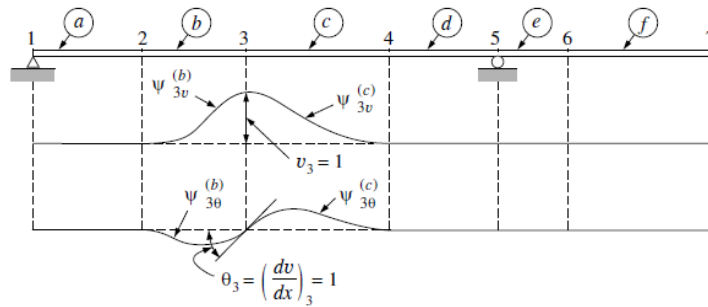


Figura. 2.1 Elementos finitos en una viga (Clough and Penzien, 1995)

Las ecuaciones que definen un análisis dinámico pueden ser formulados a partir de los principios de la mecánica clásica, teniendo diferente enfoques, de esta forma se pueden calcular mediante la segunda ley de Newton, el principio de Hamilton o según D'Alembert. En nuestro caso se utilizará el propuesto por D'Alembert por ser más directo, el cual menciona que: "Un sistema dinámico está en equilibrio cuando toda las fuerzas que actúen en el mismo, incluidas las de inercia y disipativas, cumplen las ecuaciones de equilibrio estático en cada instante de tiempo". Para un sistema de un grado de libertad (1GDL) sometido a una fuerza externa se tendrían como fuerzas internas: las restauradoras (f_s), de amortiguamiento (f_D), y las inerciales (f_i), como se muestran en la Fig. 2.2.

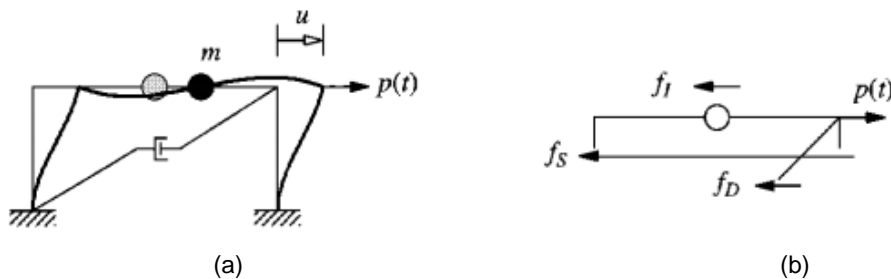


Figura 2.2 a) Sistema de 1GDL sometido a fuerza externa,
b) Fuerzas en internas del sistema (Chopra, 1995)

La ecuación del equilibrio dinámico sería el siguiente:

$$f_i + f_s + f_D = p(t) \quad (2.1)$$

O también,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.2)$$

Dónde:

m: masa del sistema

c: amortiguamiento del sistema

k: rigidez del sistema

Esta simplificación solo es posible en un número reducido de estructuras reales; para los otros casos, las respuestas obtenidas serian totalmente distorsionadas. Para simular el comportamiento de estas estructuras, es necesario incrementar el número de grados de libertad, a este nuevo sistema se le conoce como de múltiples grados de libertad (MGDL). Para entender este sistema se muestra de forma esquemática una viga, en donde se ha considerado discretizarlo en “n” partes (Fig. 2.3).

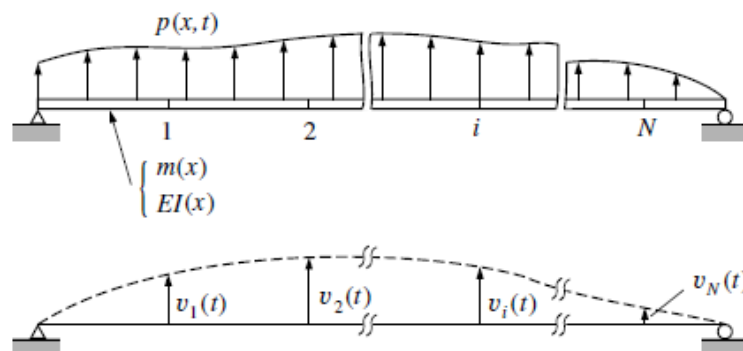


Figura 2.3 Discretización de una viga (Clough and Penzien, 1995).

El equilibrio dinámico es realizado de forma similar al de 1GDL, teniendo “n” ecuaciones, para cada punto discretizado:

$$\begin{aligned}
 f_{I1} + f_{S1} + f_{D1} &= p1(t) \\
 f_{I2} + f_{S2} + f_{D2} &= p2(t) \\
 &\dots\dots\dots \\
 f_{In} + f_{Sn} + f_{Dn} &= pn(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

De forma matricial, se expresa de la siguiente forma:

$$\mathbf{f}_I + \mathbf{f}_S + \mathbf{f}_D = \mathbf{p}(t)
 \tag{2.4}$$

Dónde:

\mathbf{f}_i es la matriz de fuerzas inerciales, la cual es asociado a la masa y la aceleración, siendo calculado según la Ec. (2.5).

$$\begin{Bmatrix} f_{I1} \\ f_{I2} \\ \vdots \\ f_{In} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_n \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

f_s es la matriz de fuerzas restauradoras, la cual es asociada a la rigidez y al desplazamiento, siendo calculado por la Ec. (2.6).

$$\begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \\ \vdots \\ f_{Sn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

f_D es la matriz de fuerzas de amortiguamiento, la cual es asociado a los coeficientes de amortiguamiento, siendo calculado por la Ec. (2.7).

$$\begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \\ \vdots \\ f_{Dn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_n \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Tal como se ha visto, para poder resolver la Ec. (2.5), es necesario definir previamente las matrices características de una estructura (matrices de rigidez, masa y amortiguamiento). A continuación se describen cada una de ellas:

Matriz de Rigidez:

La definición de la matriz de rigidez de una estructura, se logra luego de ensamblar las constantes de rigideces de los elementos que la conforman, de acuerdo a sus grados de libertad. Por ejemplo, para la viga presentada en la Fig. 2.1, se calcula la constante de rigidez k_{13} de un sub-elemento, la cual por definición es la fuerza que se origina en la dirección vertical al inicio de la barra por un giro unitario en dicho punto. Para su cálculo se usa el concepto de trabajo y el principio de desplazamiento virtuales, en donde se menciona que si el sistema se le impone un desplazamiento virtual, el trabajo interno y externo del elemento deben ser iguales (Clough and Penzien, 1995). Para este caso se impone el desplazamiento vertical en el punto inicial (Fig. 2.4), con lo cual el trabajo externo sería el dado por la Ec. (2.8).

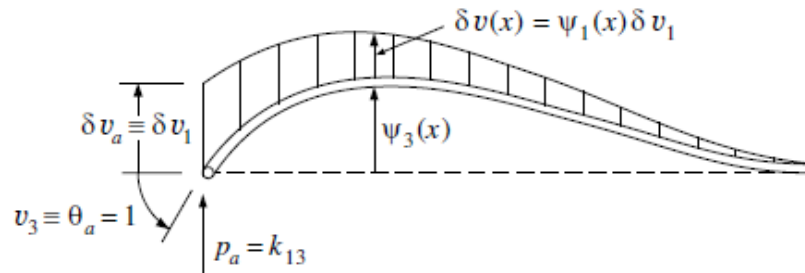


Figura 2.4 Viga sometida a una rotación unitaria y un desplazamiento virtual (Clough and Penzien, 1995).

$$W_E = \delta u_a \cdot p_a \quad (2.8)$$

Por otro lado, el trabajo interno es el generado por el momento producto de la rotación, sobre la curvatura asociada al desplazamiento virtual, con lo que se tiene:

$$W_I = \delta u_1 \int_0^L EI(x) \cdot \psi''_1(x) \cdot \psi''_3(x) \cdot dx \quad (2.9)$$

Igualando estos dos términos y despejando se puede obtener el coeficiente de rigidez k_{13} para un elemento tipo viga:

$$k_{13} = \int_0^L EI(x) \cdot \psi''_1(x) \cdot \psi''_3(x) \cdot dx \quad (2.10)$$

Y de forma más general los elementos de la matriz de rigidez quedan representados por la Ec. (2.11).

$$k_{ij} = \int_0^L EI(x) \cdot \psi''_i(x) \cdot \psi''_j(x) \cdot dx \quad (2.11)$$

Matriz de Masa:

La matriz de masa puede definirse de dos formas, siguiendo el criterio de masa concentradas o el de masas consistentes. En el primero se asume que las masas se encuentran concentradas en puntos específicos de los elementos, como ejemplo se puede observar el marco de la Fig. 2.5, en donde se tiene que las masas se encuentran reunidos en los puntos de intersección llamados nodos.

Esta simplificación ayuda a reducir en gran manera el tiempo de cálculo, debido a que se obtiene un matriz de diagonal (Ec. (2.12)).

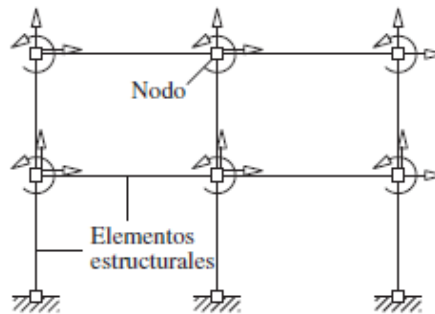


Figura 2.5. Sistema de masas concentradas (Chopra, 1995).

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En el segundo criterio se considera que la masa se encuentra repartida en toda su superficie, y de forma similar al cálculo de la rigidez, se puede calcular los coeficientes de la matriz. Considerando la viga de la Fig. 2.1, si se quiere saber el coeficiente de masa m_{13} , se la tendría que someter a una aceleración angular unitaria en el nodo inicial, y la fuerza p_a sería dicho coeficiente (Fig. 2.6).

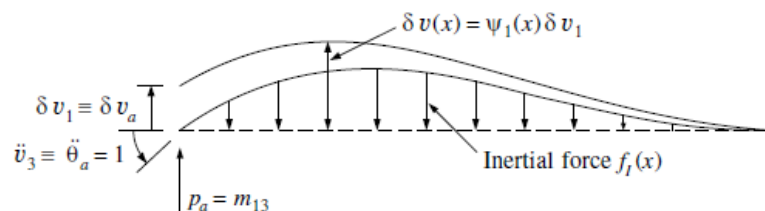


Figura 2.6 Viga sometida a una aceleración angular unitaria y un desplazamiento virtual (Clough and Penzien, 1995).

Aplicando un desplazamiento virtual en la dirección vertical en el primer nodo, y mediante el principio de desplazamiento virtuales, se igualan los trabajos internos y externo de forma análoga al proceso anterior, se llega a obtener el coeficiente m_{13} (Ec. (2.13)).

$$m_{13} = \int_0^L m(x) \cdot \psi_1(x) \cdot \psi_3(x) \cdot dx \quad (2.13)$$

Y de forma más general los elementos de la matriz de masa quedan representados por la Ec. (2.14).

$$m_{ij} = \int_0^L m(x) \cdot \psi_i(x) \cdot \psi_j(x) \cdot dx \quad (2.14)$$

Matriz de Amortiguamiento:

Los coeficientes de la matriz de amortiguamiento pueden ser definidos de forma similar al de rigidez y de masas, siguiendo el método de elementos finitos; sin embargo, debido a que en general son mucho factores los que afectan las propiedades de amortiguamiento de la estructura, se han optado por utilizar factores de amortiguamiento de acuerdo a resultados experimentales. Una matriz de amortiguamiento puede ser clasificado como clásico, si es que se utilizan estos factores para su construcción. Esta matriz se caracteriza por ser simétrica, lo que ayuda a resolver el problema dinámico mediante el análisis de superposición modal, como se verá más adelante. Los métodos que existen para su construcción son los de Rayleigh y el de Caughey; en el primero se considera que la matriz de amortiguamiento está en función de la masa y la rigidez mediante la Ec. (2.15).

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (2.15)$$

Para frecuencias bajas la fracción de amortiguamiento se aproxima a una función lineal de la masa, mientras que para frecuencias altas, tiende a ser una función de la rigidez, como se observa en la Fig. 2.7.

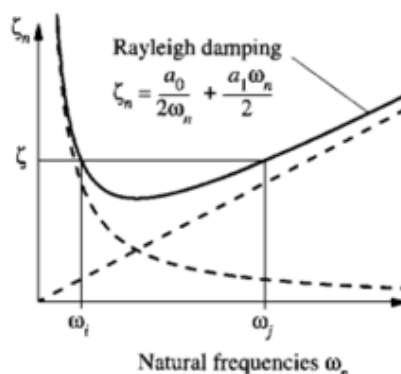


Figura 2.7 Amortiguamiento de Rayleigh. (Chopra, 1995).

El modelo propuesto por Caughey es mucho más general, no obstante es menos utilizada por requerir mayor esfuerzo computacional (Chopra, 1995).

Además existe la matriz de amortiguamiento no clásico, el cual se utiliza solo en casos en donde es necesario definir de forma completa la matriz, como es el caso si se tiene una fuerte variación entre los factores de amortiguamiento en el sistema, un ejemplo puede ser en la interacción del suelo con la estructura (Chopra, 1995).

2.1.1 Análisis Modal

La ecuación de equilibrio dinámico para un sistema con amortiguamiento de MGDL sometido a una fuerza arbitraria $p(t)$ es el dado en la Ec. (2.4), el cual también puede ser expresado como:

$$\mathbf{m} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2.16)$$

Dónde:

m: Matriz de masa

k: Matriz de rigidez

c: Matriz de amortiguamiento

Esta ecuación puede ser resuelta mediante varios métodos, para este caso se elige trabajar con el de vectores propios por ser el más conocido. Las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento han sido definidas en el apartado anterior, notándose que al no ser matrices diagonales, las ecuaciones están acopladas, dificultando su solución. El análisis modal establece un procedimiento para desacoplar las ecuaciones, apoyándose en la ortogonalidad de los modos. En primer lugar se asume que el desplazamiento es una función de los modos (Ec. (2.17)), donde Φ es una matriz de modos $n \times n$, y a $y(t)$ se le conoce como un vector en coordenadas modales.

$$\mathbf{u}(t) = \Phi \cdot \mathbf{y}(t) \quad (2.17)$$

Por la ortogonalidad de modos, se tienen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\Phi^T \cdot \mathbf{m} \cdot \Phi &= \mathbf{M} \\ \Phi^T \cdot \mathbf{k} \cdot \Phi &= \mathbf{K} \\ \Phi^T \cdot \mathbf{c} \cdot \Phi &= \mathbf{C}\end{aligned}\quad (2.18)$$

Las matrices resultantes se denominan masa generalizada, rigidez generalizada y amortiguamiento generalizado, respectivamente; todas estas matrices se caracterizan por ser diagonales. Si se sustituye la Ec. (2.17) en la Ec. (2.16), y se le multiplica por Φ^T , resulta:

$$\Phi^T \cdot \mathbf{m} \cdot \Phi \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \Phi^T \cdot \mathbf{c} \cdot \Phi \cdot \dot{\mathbf{y}} + \Phi^T \cdot \mathbf{k} \cdot \Phi \cdot \mathbf{y} = \Phi^T \cdot [\mathbf{p}(t)] \quad (2.19)$$

Reemplazando las relaciones de Ec. (2.18), la Ec. (2.19) se reduce a:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{P}(t) \quad (2.20)$$

A esta relación se le denomina ecuación modal, en donde al ser las matrices diagonales se tienen "n" ecuaciones desacopladas, pudiendo resolverse cada ecuación como un sistema de 1 GDL. Si se toma una ecuación asociado al modo "n", y se divide entre la masa M_n resulta lo siguiente:

$$\ddot{y}_n + 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \dot{y}_n + \omega_n^2 y_n = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (2.21)$$

A continuación se hallan los factores de contribución de cada modo. Se considera una aceleración unitaria en la base, por lo tanto la fuerza equivalente aplicada en el sistema está dado por:

$$\mathbf{p}(t) = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{i} \cdot \ddot{u}_g \quad (2.22)$$

Dónde:

\mathbf{i} : vector de influencia

Reemplazando la Ec. (2.17) en Ec. (2.22), y asumiendo que el $\mathbf{p}(t)$, puede ser expandirse como una sumatoria de fuerza modal inercial s_n , se obtienen:

$$\mathbf{m} \cdot \mathbf{i} = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N (\Gamma_n \cdot \mathbf{m} \cdot \Phi_n) \quad (2.23)$$

Dónde:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}, \quad L_n = \Phi_n^T \cdot m \cdot \iota \quad (2.24)$$

Con esta relación, la ecuación 2.21, resulta en:

$$\ddot{y}_n + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \dot{y}_n + \omega_n^2 y_n = \Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (2.25)$$

El coeficiente Γ_n es conocido como el factor de participación modal, dándonos idea de cuánto influye cada modo en las respuestas; sin embargo, esta medida varía dependiendo de la forma en cómo se normalizan los modos, por lo que no se utiliza con frecuencia. En su lugar, se usa el concepto de factor de masa participativa o masa efectiva participativa (MEP), el cual está asociado al cortante máximo de cada modo y es independiente de la forma de normalización (Ec. (2.26)).

$$MEP = \frac{L_n^2}{M_n} \quad (2.26)$$

Este parámetro tiene una gran relevancia cuando se plantean combinar las respuestas de los modos. En general los códigos de diseño establecen que los modos en estudio deben de representar un 90 % de la masa total.

2.1.2 Análisis de Superposición Modal Espectral

Luego de calcularse los modos y sus periodos mediante el análisis modal, se pueden realizar dos métodos para calcular las respuestas ante un evento sísmico. Uno de ellos es el análisis de Tiempo-Historia, en donde se utiliza un registro sísmico, y como resultado se tienen respuestas para cada instante de tiempo, sin embargo el tiempo de cálculo es mayor. Por otro lado se encuentra el análisis de superposición modal espectral, el cual utiliza espectros obtenidos por los máximos valores dados en distintos registros. Este análisis es el más usado en el diseño estructural, debido a que los resultados tienen una muy buena aproximación al de tiempo-historia, y su cálculo es más rápido. La respuesta modal máxima para un modo “n” está dado por:

$$r_{no} = r_n^{st} \cdot A_n \quad (2.27)$$

Donde A_n es la pseudo-aceleración, el cual depende del periodo y el factor de amortiguamiento. Calculados estas respuestas máximas, el método plantea formas de combinarlos. En total se tienen tres, el primero es la suma absoluta de las respuestas (ABSSUM), ésta regla presenta el inconveniente de ser muy conservadora, ya que se suman los máximos valores para cada periodo. Otra regla es la de la suma de los cuadrados (SRSS), formulado por Rosenblueth según la Ec. (2.28).

$$r_o = (\sum_{n=1}^N r_{no}^2)^{1/2} \quad (2.28)$$

Esta aproximación resulta más cercana al de tiempo-historia, sin embargo se ha visto que solo presenta un buen comportamiento cuando los periodos están muy separados. Por último esta la regla de combinación cuadrática completa (CQC), propuesta por Der Kiureghian, ésta es la más aceptada, siendo una generalización de la anterior regla, teniendo buenos resultados en estructura con periodos cercanos. Se calcula mediante la Ec. (2.29).

$$r_o = (\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} \cdot r_{io} \cdot r_{no})^{1/2} \quad (2.29)$$

2.2 INTERACCION ESTRUCTURA-LIQUIDO

El movimiento de un líquido almacenado producto de fuerzas dinámicas genera una fuerza adicional cuando impacta contra las paredes de la estructura, pudiendo desestabilizarla y provocar el colapso de ellas. A este fenómeno se le conoce como oleaje (*sloshing*), siendo ampliamente estudiado. En general se tienen dos teorías para analizar el oleaje. El primero es la del fluido laminar, el cual fue formulado por Housner (1957), en donde se asume que el agua se comportan como si fueran laminas delgadas, y se logran calcular expresiones simplificadas para distintos formas de recipientes; sin embargo, su alcance abarca solo a estructuras de paredes rectas. El segundo es el método de la velocidad potencial, el cual es más general ya que considera al fluido como un flujo potencial, e incluye el tipo de recipiente mediante condiciones de bordes

específicas. Para el presente trabajo se utilizó el segundo método debido a la geometría particular que presentan los tanques en estudio. Además, se presenta las formas de análisis usando modelos mecánicos equivalentes, es decir con modelos que usan masas discretas para representar el líquido.

2.2.1 Teoría de la velocidad potencial

En esta teoría como hipótesis se considera al líquido no viscoso, incomprensible y sin inercia rotacional, además se asume que el recipiente que lo contiene es infinitamente rígido produciendo que no haya un distanciamiento entre el líquido y las paredes, por lo tanto no habría cavitación.

A partir de estas consideraciones se tiene que el líquido cumple la ecuación de Laplace (Ec. (2.30)).

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.30)$$

Y está sujeto a las condiciones de contorno en las paredes (Ec. 2.31) y en la superficie libre del líquido (Ec. 2.32).

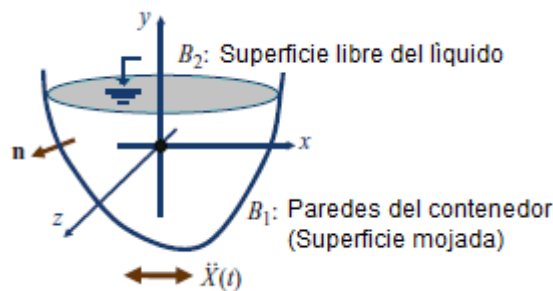


Figura 2.8 Esquema de recipiente con líquido bajo acción dinámica (Karamanos *et al*, 2011).

- La condición de igualdad entre la velocidad del fluido en las paredes y el contenedor (Ec. 2.31). Donde \dot{X} es la velocidad externa excitadora, e_x es el vector unitario en la dirección X y n es el vector unitario normal a las paredes del contenedor.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \dot{X}(e_x \cdot n) \quad \text{en } B1 \quad (2.31)$$

- La condición cinemática y dinámica del contorno, la cual representa la condición de equilibrio en la superficie, a partir de la igualdad de presiones en dicha interface liquido-atmosfera y de la condición de que la velocidad vertical se vuelve nula. En resumen esta condición es la que determina el oleaje del agua.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad \text{en B2} \quad (2.32)$$

La solución a las Ecs. (2.30-2.32) permite conocer las frecuencias y periodos del fluido. Para los de formas rectangulares y cilíndricas se han resuelto sin tener tantas complicaciones (Graham y Rodríguez ,1952; Housner ,1954). Por otro lado, los cálculos para recipientes esféricos no tienen la misma facilidad y se torna más complicado. Como ya se había comentado, Budiansky (1960) fue uno de los pioneros en el análisis en estos tipos de recipientes, apoyándose en métodos numéricos para poder simplificar el proceso. Los resultados fueron comparados con datos experimentales obtenidos en el laboratorio, obteniendo buenas aproximaciones como se muestra en la Fig. 2.9, correspondiente al caso de un tanque lleno hasta la mitad.

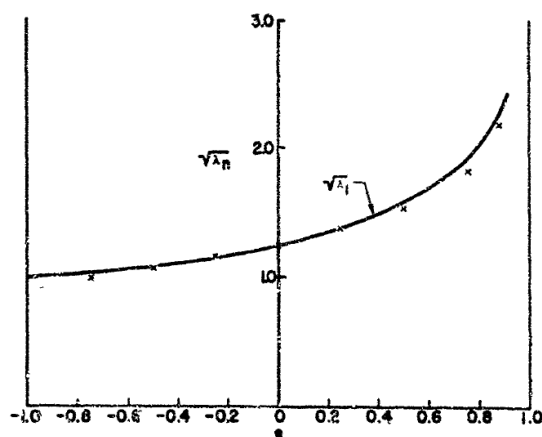


Figura 2.9 Gráfico comparativo entre frecuencias experimentales y teóricas (Budiansky, 1960)

En los posteriores años se han realizado otros estudios con métodos numéricos tratando de reducir el tiempo de cálculo (McIver ,1989; Karamanos *et al* ,2011). El presente estudio se basó en los resultados obtenidos por Karamanos *et al* (2011), quienes plantearon para la solución a la ecuación de Laplace que el flujo potencial podía ser descompuesto en dos: un potencial uniforme (Φ_U) y potencial

del oleaje (Φ_s), este último representaba el movimiento del líquido en la parte superior del contenedor. Asumiendo que el potencial uniforme (Φ_U) está directamente relacionado con la fuerza excitadora siendo igual a \dot{X}_x , se determina que el potencial del oleaje (Φ_s) cumplen las siguientes relaciones:

- $\nabla\phi_s = 0$ en Ω
- $\frac{\partial\phi_s}{\partial n} = 0$ en B1
- $\frac{\partial^2\phi_s}{\partial t^2} + g \cdot \frac{\partial\phi_s}{\partial y} = -\frac{\partial^2\phi_u}{\partial t^2}$ en B2

Usando la Formulación variacional de Galerkin es posible unificar estas tres relaciones en una sola ecuación (Ec. 2.33) para posteriormente darle la forma característica de una ecuación dinámica. Esta formulación es usada frecuentemente en problemas con elementos finitos y es semejante al Principio de Trabajos Virtuales. En lugar de darle un desplazamiento virtual e integrarlo para hallar el trabajo virtual, en este procedimiento se le multiplica por una función admisible φ^* que tenga la misma forma que el flujo potencial para finalmente integrarlo en todo su dominio.

$$\int_{\Omega} (\nabla\Phi_S) (\nabla\varphi^*) d\Omega + \frac{1}{g} \int_{B_2} \frac{\partial^2\Phi_S}{\partial t^2} \varphi^* dB_2 = -\frac{1}{g} \int_{B_2} \frac{\partial^2\Phi_U}{\partial t^2} \varphi^* dB_2 \quad (2.33)$$

A partir de la Ec. (2.33), considerando que el recipiente está lleno hasta la mitad y utilizando coordenadas esféricas, se logró simplificar y darle la forma de una ecuación de valores y vectores propios (Ec. (2.34)), el procedimiento de solución se puede ver en el anexo A.

$$([K] - \omega_n^2[M])\mathbf{v}_n = 0 \quad (2.34)$$

Dónde:

$$M_{ij} = \frac{\pi R^{i+j+2}}{g(i+j+2)} \cdot P_i^1(0) \cdot P_j^1(0) \quad i, j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.35)$$

$$K_{ij} = \frac{\pi R^{i+j+1}}{g(i+j+1)} \cdot (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) \quad i, j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.36)$$

$$a_{ij} = i. j. \int_0^1 P_i^1(\mu). P_j^1(\mu). d\mu \quad i, j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.37)$$

$$b_{ij} = \int_0^1 \frac{P_i^1(\mu). P_j^1(\mu)}{1-\mu^2}. d\mu \quad i, j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.38)$$

$$c_{ij} = \int_0^1 \frac{\partial P_i^1(\mu)}{\partial \mu}. \frac{\partial P_j^1(\mu)}{\partial \mu}. (1 - \mu^2) d\mu \quad i, j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.39)$$

$$f_j = \frac{\pi.R^{j+3}}{g(j+3)} P_j^1(0) \quad j=1,2,\dots,\tilde{N} \quad (2.40)$$

Los resultados en comparación con anteriores estudios muestran que la convergencia de periodos es muy rápida y su margen de error es mínimo (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Comparación de periodos experimentales y teóricos (Karamanos *et al*, 2011)

\tilde{N}	$\lambda_1=\omega_1^2R/g$		$\lambda_2=\omega_2^2R/g$		$\lambda_3=\omega_3^2R/g$	
	Refs.	Método Actual	Refs.	Método Actual	Refs.	Método Actual
2	1.3333	1.7292				
4	1.5810	1.5618	2.9741	13.9560		
6	1.5550	1.5602		5.8041		98.3340
8	1.5582	1.5602	4.3928	5.3063		13.6330
10	1.5590	1.5602		5.2764		9.1101
12	1.5595	1.5602	5.1566	5.2756		8.5725
14	1.5597	1.5602	5.2919	5.2756	6.7591	8.5094
16	1.5599	1.5602	5.2700	5.2756		8.5047
18	1.5599	1.5602	5.2742	5.2756	7.9737	8.5045
20	1.5600	1.5602	5.2744	5.2756		8.5045
22	1.5600	1.5602	5.2747	5.2756	8.4691	8.5045
24	1.5600	1.5602	5.2748	5.2756	8.5071	8.5045
26	1.5600	1.5602	5.2749	5.2756	8.5028	8.5045
30	1.5601	1.5602	5.2751	5.2756	8.5036	8.5045
40	1.5601	1.5602	5.2753	5.2756	8.5040	8.5045

Siguiendo con el mismo procedimiento para diferentes alturas de llenado del líquido, se obtuvo como resultado los valores de masas convectivas (M_c), impulsivas (M_i) y los valores normales del oleaje (λ) para distintas alturas de llenado (RH), el cual es definido como una relación entre la altura del agua con respecto al radio externo de la esfera (R).

Tabla 2.2: Relación de valores normales del oleaje ($\lambda_n = \omega_n^2 \cdot R/g$) según altura de llenado

RH	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
0.05	1.0170	6.7726	15.1315	30.020
0.10	1.0347	6.5638	13.9811	26.757
0.20	1.0723	6.2008	11.8764	17.032
0.40	1.1583	5.6742	9.8543	13.866
0.60	1.2625	5.3683	8.9418	12.421
0.80	1.3924	5.2406	8.5509	11.800
1.00	1.5602	5.2756	8.5045	11.684
1.20	1.7882	5.4930	8.7793	12.021
1.40	2.1232	5.9729	9.4763	12.938
1.60	2.6864	6.9574	10.9566	14.918
1.80	3.9595	9.4551	14.7598	20.033
1.90	5.7615	13.1776	20.4520	27.702
1.95	8.3121	18.5527	28.6891	38.816

Tabla 2.3: Relación de masas impulsivas y convectivas según altura de llenado

RH	M_{1c}/M_L	M_{2c}/M_L	M_{3c}/M_L	$\Sigma M_{Nc}/M_L$	M_i/M_L
0.05	0.98315	0.000102	0.0000005	0.98326	0.01674
0.10	0.96594	0.000387	0.0000064	0.96634	0.03366
0.20	0.93038	0.001374	0.0000667	0.93184	0.06816
0.40	0.85437	0.004341	0.0005155	0.85947	0.14053
0.60	0.77117	0.007850	0.0013969	0.78136	0.21864
0.80	0.67990	0.011396	0.0025337	0.69619	0.30381
1.00	0.57969	0.014576	0.0037169	0.60594	0.39406
1.20	0.46981	0.016874	0.0047195	0.49844	0.50156
1.40	0.35009	0.017526	0.0052523	0.38440	0.61560
1.60	0.22222	0.015419	0.0048997	0.26162	0.73838
1.80	0.09363	0.009185	0.0031036	0.12608	0.87392
1.90	0.03655	0.004387	0.0015438	0.05586	0.94414
1.95	0.01364	0.001851	0.0006696	0.01810	0.98190

2.2.2 Modelos mecánicos equivalentes

Otra forma de abordar el problema es con el uso de modelos mecánicos equivalentes, siendo principalmente de dos tipos. En ambos enfoques se representa el líquido en dos componentes: la impulsiva, se encuentra fijo a la estructura, y la representación de la convectiva varía entre ellos, ya que mientras

que en uno se le considera como un péndulo fijo en la parte superior de la estructura, en el otro se usa resortes que están fijos en las paredes del recipiente (Figs. 2.10 y 2.11).

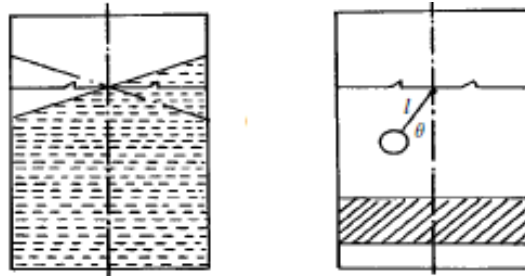


Figura 2.10 Modelo de Péndulo Simple

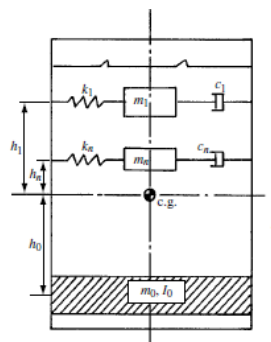


Figura 2.11 Modelo de masa - resorte – amortiguador

En el estudio realizado por Housner, se utilizó el modelo masa-resorte, aplicándose para geometrías rectangulares y cilíndricas. En un principio para modelar la componente convectiva del agua, se utilizaron varias masas convectivas con sus respectivos resortes, sin embargo luego de las comparaciones con los resultados analíticos se obtuvo que para una lograr aproximación aceptable se necesitaban solo dos masas. Más tarde Haroun (1981) siguiendo con esas hipótesis expandió las expresiones al incluir que los tanques presentaban las paredes elásticas.

Para tanques de forma esférica se tiene el estudio realizado por Drosos *et al* (2008) , en el cual consideran también el modelo de masa resorte ubicando la masa impulsiva en el centro del tanque y la masa convectiva, fija a esta mediante un resorte (Fig. 2.12).

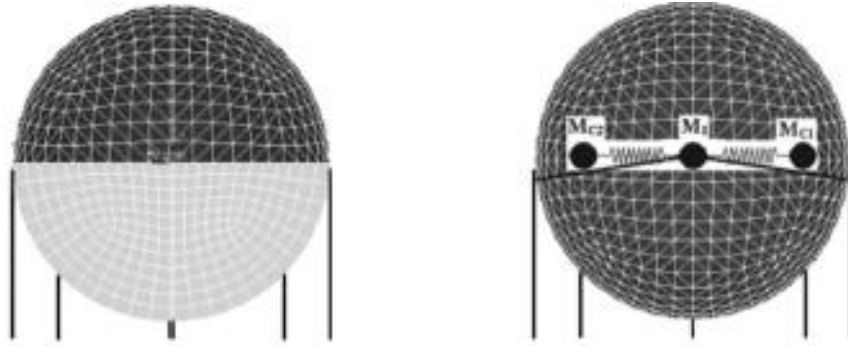


Figura 2.12 Modelo mecánico en tanque esférico (Drosos *et al* ,2008)

Tanto las masas como los periodos fueron considerados de acuerdo a estudios analíticos previos como los realizados por Karamanos *et al* y Budiansky. En las Figs. 2.13 a 2.15 se representan estos valores en gráficas que dependen de la relación H/D.

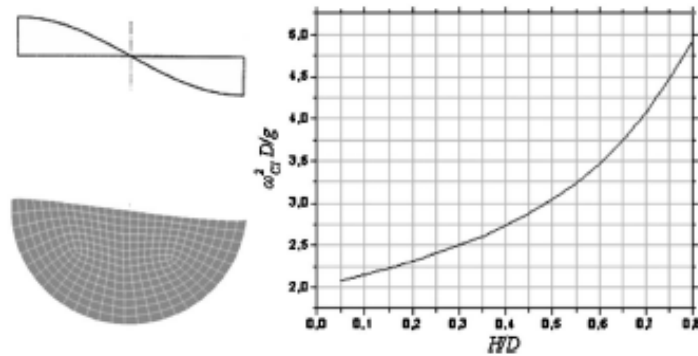


Figura 2.13 Variación de la frecuencia frente a la relación H/D para el primer modo de oleaje (Drosos *et al* ,2008)

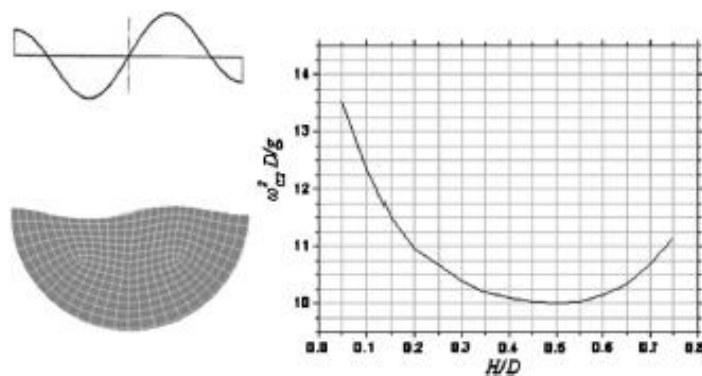


Figura 2.14 Variación de la frecuencia frente a la relación H/D para el segundo modo de oleaje (Drosos *et al* ,2008)

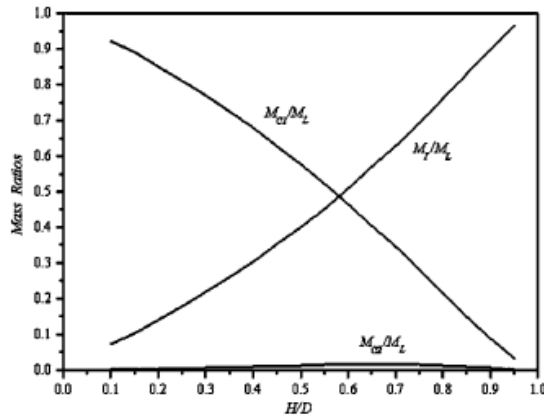


Figura 2.15 Variación de las masas convectivas e impulsivas frente a la relación H/D (Drosos *et al*, 2008)

Para poder corroborar los resultados obtenidos se utilizaron los datos analíticos y se utilizó programas que utilizaban métodos numéricos para su solución, llegando a la conclusión de que la variación de respuestas es mínima, pudiendo utilizarse el modelo para su análisis.

2.3 EFECTO 2° ORDEN P-DELTA

Las estructuras son analizadas generalmente sin considerar el efecto de la deformada que se genera; en varios casos, esta simplificación resulta aceptable. Sin embargo para estructura que tiene una gran masa en comparación con su rigidez lateral, este efecto cobra gran importancia. La influencia del efecto P-Delta en la estructura se da en forma global y local. El global afecta en conjunto a toda la estructura, ya que al tener un gran desplazamientos se producen momentos adicionales que genera el peso (Fig. 2.16); mientras el efecto local se refiere a los momentos adicionales que se dan en las columnas producto de un excesivo pandeo.

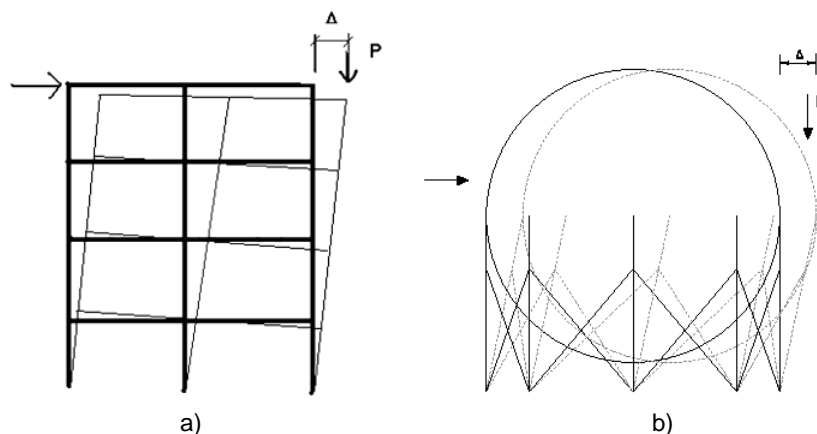


Figura 2.16 Efecto P-Delta en a) Edificios (R. Dobson, 2002) y b) Tanques Elevados

El efecto de segundo orden se incluye en la estructura en dos formas, en primer lugar al incrementar los esfuerzos en los elementos debido a la inclusión de los desplazamiento; y en segundo, al variar la definición de la rigidez, ya que se combina con la rigidez “geométrica”, la cual depende únicamente de los desplazamientos y de las fuerzas axiales del elemento (tracción y compresión). Existen varios métodos con el fin de incluir estos efecto en el análisis, algunos usan desplazamiento y fuerzas adicionales, sin embargo en estos no se considera el esfuerzo de la rigidez, por lo que no converge a una solución exacta. El método más exacto que se conoce es un análisis no-lineal iterativo, en donde se usa el método de Newton-Raphson (R. Dobson, 2002).

En los códigos se dan recomendaciones para ver casos en los cuales estos efectos pueden ser despreciados. El ASCE7-10 señala un factor de estabilidad global (Q) para determinar en qué casos es necesario un análisis de segundo orden, este factor es definido por la Ec. (2.41).

$$Q = \frac{P_i \cdot \Delta_i}{V \cdot h_{sx}} \quad (2.41)$$

Dónde P_i es el peso del piso, Δ_i es el desplazamiento de entrepiso, V es el cortante sísmico de entrepiso y h_{sx} es la altura de entrepiso

Si Q es menor a 0.10 es posible despreciar el efecto; mientras que si esta entre el valor de 0.1 y 0.2, se establece necesario un análisis de segundo orden. Si este valor es mayor a 0.2 se considera que la estructura es inestable, por lo que se debe de cambiar la estructuración. Para los tanques esféricos los desplazamientos no resultan excesivos debido a las restricciones que dan las normas en relación a los desplazamientos, por lo que estos efectos no son determinantes.

2.4 CRITERIOS DE DISEÑO ESTABLECIDOS POR NORMATIVIDADES

Como ya se ha visto en el capítulo I, los códigos en donde se considera el efecto del líquido durante un movimiento sísmico son los de tanques atmosféricos de almacenamiento, es por ello que estos serán tomados en cuenta para la revisión de criterios de diseño. Todos estos códigos están basadas en la hipótesis de

Housner (1957), en el cual consideran el líquido como dos masas: convectivas e impulsivas. A partir de ello cada uno tiene sus propias observaciones, lo que origina que cada uno presente diferentes parámetros en la elección de periodos, masas y alturas efectivas. En esta revisión de los códigos no se consideraran parámetros relacionados a éstos, ya que en ellas solo se especifica para geometrías diferentes a la esférica, estos parámetros serán tomados en cuenta de acuerdo a los estudios previos. La revisión de criterios se centrará en los coeficientes sísmicos para el cálculo de cortante y momento,

2.4.1 American Water Works Association AWWA D100

El código AWWA D100 comprende el diseño, construcción, inspección y pruebas de tanques apoyados y elevados de acero. Para tanques elevados no presentan consideraciones adicionales por efecto del oleaje, sin embargo es importante conocer los factores adoptados en el análisis sísmico.

2.4.1.1 Cortante Sísmico:

El cortante sísmico está representado por una expresión única (Ec. (2.42)). Donde el parámetro Z es el factor de zona sísmica, U es el factor de importancia, R es el factor de reducción, W es el peso de la estructura y el factor C es una función del factor del tipo de suelo (S) y del periodo natural de vibración.

$$V = \frac{ZUC}{R} W \quad (2.42)$$

$$C = \frac{1.25.S}{T^{2/3}}, \quad 0.75 \leq C \leq 2.75 \quad (2.43)$$

2.4.1.2 Coeficiente de Importancia:

Tabla 2.4: Factor de Importancia (AWWAD100)

Tipo de suministro	U
Suministro único, protección contra incendios, o suministro múltiple y con protección contra incendios	1.25
Suministro múltiple y sin protección contra incendios	1.00

2.4.1.3 Coeficiente de reducción:

Tabla 2.5: Factor de reducción (AWWAD100)

Estructura	R
Tanque elevado arriostrado	4
Tanque elevado tipo pedestal	3
Tanque apoyado y anclado	4.5
Tanque apoyado y no anclado	3.5

2.4.2 Eurocódigo 8

El Eurocódigo 8 parte 4 comprende el análisis, diseño y construcción de estructuras tipo silos y tanques, así como sus tuberías. En éste código si se toma en cuenta el efecto del oleaje en la estructura, a través de dos componente en el cortante, así como en los factores del amortiguamiento.

2.4.2.1 Cortante Sísmico:

El cortante sísmico está dividido en las componentes convectivas e impulsivas (Ecs. (2.45) y (2.46)), siendo combinados mediante el método SRSS:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (2.44)$$

Dónde:

$$V_i = U \cdot S_a(T_i) \cdot W_i \quad (2.45)$$

$$V_c = U \cdot S_a(T_c) \cdot W_c \quad (2.46)$$

El factor de reducción por ductilidad (q) es tomado en cuenta en la expresión que representa la pseudo-aceleración (S_a).

2.4.2.2 Coeficiente de Importancia (U):

El coeficiente de importancia depende del riesgo económico y social generado por el colapso de las estructuras, clasificándose en cuatro (Tabla 2.6).

Tabla 2.6: Factor de Importancia (Eurocodigo 8)

Clases de importancia	Coficiente de Importancia	Estructura
I	0.8	Situaciones de bajo riesgo de vida y consecuencias económicas y sociales pequeñas
II	1	Situaciones de mediano riesgo a la vida y consecuencia económicas y sociales considerables.
III	1.2	Situaciones de alto riesgo a la vida y con importante consecuencias económicas y sociales.
IV	1.6	Situaciones de riesgo excepcionales la vida, con pérdidas económicos y sociales extremas.

2.4.2.3 Coeficiente de ductilidad:

Tabla 2.7: Factor de ductilidad (Eurocódigo 8)

Tipo Estructural	Clase de ductilidad	
	DCM	DCH
a) Pórticos resistente a flexión	4	$5\alpha_0/\alpha_1$
b) Pórticos con triangulaciones centradas		
Triangulaciones diagonales	4	4
Triangulaciones en v	2	2.5
c) Pórticos con triangulaciones descentradas	4	$5\alpha_0/\alpha_1$
d) Estructuras de péndulo invertido	2	$2\alpha_0/\alpha_1$
e) Estructuras con núcleos de hormigón o muros de hormigón	Véase cap. 5. Eurocod.	
f).Pórticos de flexión combinados con arriostramiento concéntricos	4	$4\alpha_0/\alpha_1$
g) Pórticos resistentes a flexión combinados con rellenos	2	2
Rellenos de hormigón o de fábrica no conectados, en contacto con la estructura	Véase cap. 7 Eurocod.	
Relleno de hormigón armado conectados		
Relleno aislados del pórtico resistente a flexión	4	$5\alpha_0/\alpha_1$

2.4.2.4 Amortiguamiento:

Se tiene en cuenta valores de amortiguamiento (ϵ) del 5% y 0.5% para las masas impulsivas e convectivas respectivamente. Para convertir los valores del espectro del 5% al 0.5% se multiplica por un factor de corrección (η), expresado según la Ec. (2.47). Para $\epsilon=0.5\%$: se tiene un factor igual a $\eta = 1.673$.

$$\eta = \left(\frac{7}{2+\varepsilon}\right)^{0.5} \quad (2.47)$$

2.4.3 American Society of Civil Engineers ASCE 7-10

El código ASCE7-10 presenta recomendaciones para el análisis y diseño de estructuras convencionales y no convencionales. En el caso de tanques de almacenamiento, éste código es uno de los más completos, ya que brinda especificaciones para tanques apoyados y elevados con diversas configuraciones. Además en ambos tipologías se incluyen el efecto del oleaje.

2.4.3.1 Cortante en la Base:

El cortante está regido por las fuerzas que generen las componentes convectivas e impulsivas (Ecs. (2.48) y (2.49)), y son combinadas con el método SRSS según la Ec. (2.44). De forma similar a los anteriores códigos en cada expresión se incluyen los factores de importancia, de reducción y en este caso el de sitio está dado implícitamente en la pseudo-aceleración (S_a).

$$V_i = \frac{U \cdot S_a(T_i) W_i}{R_i} \quad (2.48)$$

$$V_c = \frac{1.5 \cdot U \cdot S_a(T_c) W_c}{R_c} \quad (2.49)$$

2.4.3.2 Factor de Importancia:

Tabla 2.8: Factor de importancia (ASCE 7-10)

Tipo de Ocupación	U
I	1.0
II, III	1.25
IV	1.5

2.4.3.3 Factor de Reducción:

Se presenta en la Tabla 2.9 el factor de reducción para la componente impulsiva de acuerdo a la configuración del tanque. El valor del coeficiente de reducción

convectivo R_c es determinado como 1.5, debido a la poca capacidad que tiene el líquido de disipar la energía.

Tabla 2.9: Factor de reducción (ASCE 7-10)

Tipo de Estructura	R_i
Tanques elevados con arriostres simétricos	3
Tanques elevados sin arriostres o con arriostres asimétricos	2
Tipo pedestal o apoyado en estructura tipo falda	2
Tipo pedestal o apoyado en estructura tipo falda con det. especial	3
Tanque apoyado y anclado	3
Tanque apoyado y no anclado	2.5

2.4.3.4 Amortiguamiento:

Se considera un amortiguamiento de 5% para la componente impulsiva y 0.5% para la convectiva; no obstante, con el propósito de utilizar un solo espectro se multiplica por un factor de 1.5 al espectro con amortiguamiento de 5% para llevarlo aproximadamente al de 0.5%, como se observa en las Ec. (2.49).

2.4.4 Indian Institute of Technology Kanpur (IITK)

El IITK presenta lineamientos para el análisis y diseño de tanques apoyados y elevados. Al igual que el ASCE 7-10, este código es bastante completo y brindan recomendaciones para ambos tipos de tanques incluyendo el efecto del oleaje,

2.4.4.1 Cortante en la Base:

De similar forma a los anteriores códigos para su cálculo se usa la Ec. (2.44), y los valores de los cortante impulsivo y convectivos están descritos por las Ecs. (2.50) y (2.51).

$$V_i = (A_h)_i (M_i + M_s)g \quad (2.50)$$

$$V_c = (A_h)_c (M_c)g \quad (2.51)$$

Dónde:
$$A_h = \frac{Z \cdot U \cdot S_a}{2 \cdot R} \quad (2.52)$$

2.4.4.2 Factor de Importancia (U):

Tabla 2.10: Factor de importancia (IITK)

Tipo de tanque de almacenamiento de líquidos	U
Los tanques utilizados para el almacenamiento de agua potable, material no volátil, etc., y destinados a los servicios de emergencia tales como servicios de extinción de incendios. Tanques de importancia post-terremoto.	1.5
Todos los otros tanques con ningún riesgo para la vida y con consecuencias insignificantes para el medio ambiente, la sociedad y la economía.	1.0

2.4.4.3 Factor de Reducción (R):

Tabla 2.11: Factor de reducción (IITK)

Tipo de tanques: Tanque elevado	R
Tanque apoyado en el eje de mampostería	
a) Eje de Albañilería reforzada con barras horizontales	1.3
b) Eje de Albañilería reforzada con barras horizontales y verticales en las esquinas y jambas de aberturas	1.5
Tanque apoyada con eje de CA	
Eje de CA con doble malla de refuerzo	1.8
Tanque apoyado en armazón de RC	
a) Marco ordinario resistente de momento (OMRF)	1.8
b) Marco especial resistente de momento (SMRF)	2.5
Tanque soportado en armazón de acero	2.5

2.4.4.4 Amortiguamiento:

Se considera en la generación del espectro un amortiguamiento de 5% para la componente impulsiva y 0.5% para la convectiva. Para lograr ello se utiliza un factor de transformación igual a 1.75 para la componente convectiva.

2.4.5 Análisis comparativo

La mayoría de las normas consideran dos espectros para las dos componente del líquido; utilizando el criterio de la SRSS para hallar la resultante. Las

recomendaciones dadas por el AWWA D-100, son las menos conservativas ya que incluyen una mayor capacidad de disipación por parte de las estructuras arriostradas ($R_w=4$), además que no incluye el efecto de la masa convectiva. Con respecto a las otras normas, se observan muchas mayores similitudes; como es el caso del factor de importancia; para los tanques esféricos debido a que usualmente almacenan líquidos inflamables deben de mantenerse operativas luego de un movimiento, por lo que considerando el máximo factor de importancia, se tiene en promedio un valor cercano a 1.5, el cual es similar a la norma peruana.

Otro aspecto que es importante para definir el espectro es el factor de ductilidad o reducción que se pueda tener en estas estructuras. Este factor varía de acuerdo al comportamiento del líquido. Para la componente impulsiva, se asume que toda la estructura más una parte del líquido es la que disipa energía. En el Eurocódigo, si se asume que estas estructuras son de tipo péndulo invertido, se tienen un valor de reducción (q) igual a 2; el cual es menor en comparación al del ASCE7-10, el cual considera $R_i=3$ para tanques elevados con arriostres. Por otro lado, para la componente convectiva los que consideran un factor de ductilidad son el Eurocódigo, el ASCE7-10 y el IITK. Los dos primeros asumen que el líquido tiene una baja capacidad de disipación, por lo que toman valores de 1, y 1.5 respectivamente; mientras que el Código IITK considera un valor de reducción igual al de la componente impulsiva, siendo igual a 2.5.

Por último, se observa un especial cuidado en el efecto de amortiguamiento del líquido, ya que en todas se considera un valor de aproximadamente de 0.2% a 0.5%, lo cual generan factores de transformación alrededor del 1.5. En la Tabla 2.12, se muestran los valores de los parámetros sísmicos para un tanque esférico típico.

Tabla 2.12: Parámetros sísmicos de códigos Internacionales

Códigos Internacionales	Coeficiente de Importancia (U)	Factor de reducción		Amortiguamiento	
		R_i	R_c	Masa Convectiva	Factor
AWWA D-100	1.25	4	-	-	-
Eurocódigo 8	1.2	2	1	0.50%	1.673
ASCE 7-10	1.5	3	1.5	0.50%	1.5
IITK	1.5	2.5	2.5	0.50%	1.75

Teniendo estos factores se presentan gráficas con espectros generados por cada norma con valores similares. Se consideró que el suelo era roca y el factor sísmico igual a un valor máximo de 0.4g (Figs 2.17 y 2.18).

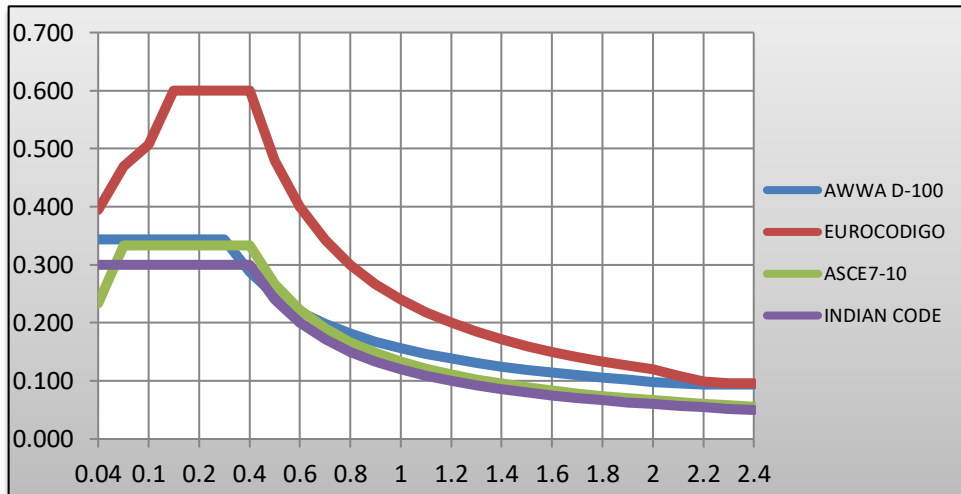


Figura 2.17. Gráfica comparativa de espectros por códigos internacionales – Componente Impulsiva

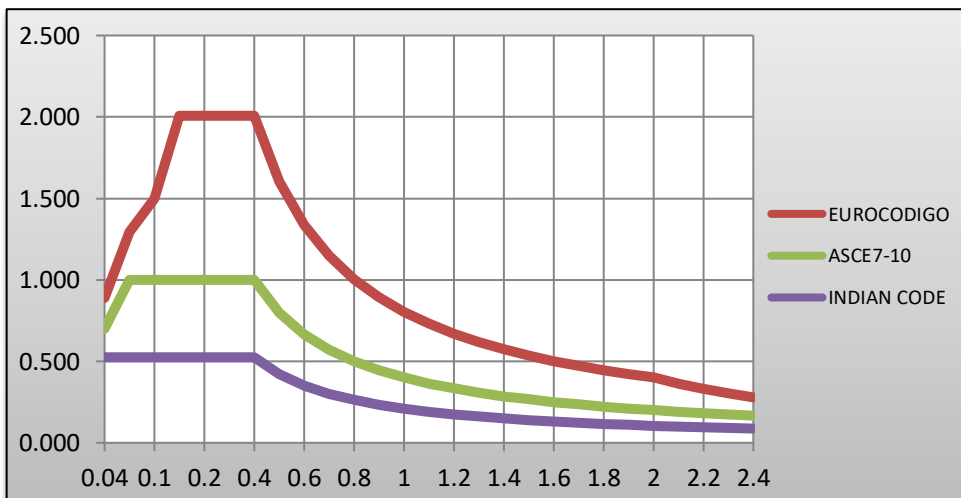


Figura 2.18. Gráfica comparativa de espectros por códigos internacionales – Componente Convectiva

De la gráfica 2.17 se nota que el Eurocódigo es la que tienen los valores más grandes, esto se debe principalmente al valor del coeficiente de reducción; sin embargo cabe mencionar que en su clasificación no se especifica claramente si las estructuras tipo péndulo invertido están o no arriostradas, por lo que puede resultar demasiado conservador. De forma similar para la componente convectiva, el Eurocódigo asume un factor de reducción de 1, resultando el doble del dado por el ASCE7-10.

CAPÍTULO III: RESPUESTAS DINÁMICAS EN TANQUES ESFÉRICOS

El comportamiento de los tanques elevados ante un movimiento dinámico se asemeja al de un péndulo invertido, por tener la mayor masa en la parte superior. Sin embargo, como se ha revisado en las normas, hay diferencias entre ellos dependiendo del tipo de material, o por la distribución espacial de sus soportes. Para el caso de tanques esféricos, la mayoría utiliza un sistema de columnas arriostradas, siendo ésta la principal resistencia ante una fuerza horizontal. En las siguientes secciones, se describirá con mayor profundidad el comportamiento estructural de las partes más importantes que conforman esta estructura.

3.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE CUBA ESFERICA

Los tanques esféricos en condiciones estáticas están regidos por la presión que ejerce el líquido en la superficie de contacto, siendo usada la teoría de membranas por la mayoría de códigos para su diseño.

Los elementos tipo lámina son utilizados en para modelar una gran diversidad de estructuras. Para el caso de estructuras axisimétricas como los tanques de almacenamiento, el espesor de las láminas son delgadas en comparación con las áreas, por lo que los esfuerzos relacionados a la flexión pueden ser despreciados, y se tendrían solo esfuerzo normal en su plano. Para entender mejor estos esfuerzos generados, se presenta un elemento discretizado de una lámina de revolución generada alrededor de un eje vertical (Fig. 3.1).

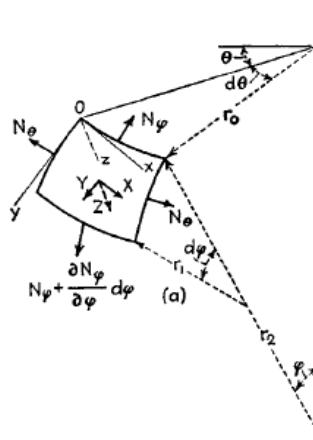


Figura. 3.1. Diferencial de un elemento tipo lamina y fuerzas internas existentes (Timoshenko, 1959)

Donde los valores de N_θ y N_φ son fuerzas normales por unidad de longitud. A partir del gráfico 3.1 se pueden obtener dos condiciones de equilibrio que permiten encontrar estas fuerzas normales. Uno es el correspondiente a las fuerzas en las direcciones Y (Ec. (3.1)), mientras que el otro depende de fuerzas perpendiculares al plano (Ec. (3.3)).

$$\frac{d}{d\varphi}(N_\varphi \cdot r_0) - N_\theta \cdot r_1 \cdot \cos \varphi + Y \cdot r_1 \cdot r_0 = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{N_\varphi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -G \quad (3.2)$$

Presiones hidrostáticas:

Este caso corresponde a la situación estática del tanque, es decir cuando solo soportan su propio peso. Para el caso de tanques esféricos, se presenta como ejemplo uno que esta sostenido mediante un anillo rígido en el eje A-A (Fig. 3.2). Las ecuaciones anteriores pueden ser simplificadas, ya que r_2 es igual a r_1 , además se tendría que el caso más desfavorable sería cuando esté lleno de agua, por lo que la presión interior sería una fuerza perpendicular a la esfera y estaría en función del radio y del ángulo φ (Ec. (3.3)).

$$p = -G = \gamma a(1 - \cos \varphi)G \quad (3.3)$$

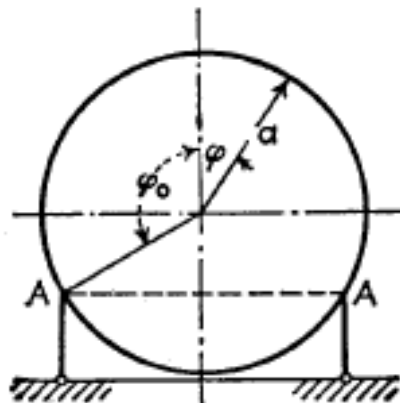


Figura 3.2. Tanque esférico sostenido por anillo rígido en el eje A-A (Timoshenko, 1959)

Para la parte superior, reemplazando estas fuerzas, se obtienen las fuerzas meridional (N_φ) y tangencial (N_θ) (Ec. (3.4) y (3.5)).

$$N_\varphi = \frac{\gamma \cdot a^2}{6} \left(1 - \frac{2 \cdot \cos^2(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)} \right) \quad (3.4)$$

$$N_\theta = \frac{\gamma \cdot a^2}{6} \left(5 - 6 \cos(\varphi) + \frac{2 \cdot \cos^2(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)} \right) \quad (3.5)$$

Para la parte inferior, no solo se toman en cuenta la presión del líquido, sino que además se incluye la reacción generada por el anillo A-A, por lo que se tendría:

$$N_\varphi = \frac{\gamma \cdot a^2}{6} \left(5 + \frac{2 \cdot \cos^2(\varphi)}{1 - \cos(\varphi)} \right) \quad (3.6)$$

$$N_\theta = \frac{\gamma \cdot a^2}{6} \left(1 - 6 \cos(\varphi) - \frac{2 \cdot \cos^2(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)} \right) \quad (3.7)$$

Presiones hidrodinámicas:

Cuando se presenta un movimiento dinámico, se generan presiones adicionales del líquido sobre la esfera. Para su cálculo se necesita resolver la ecuación de la velocidad potencial presentada en el Capítulo II. En el estudio de Drosos et al (2008) se han utilizado elementos numéricos para encontrar estas presiones, siendo calculados para distintas alturas de llenado. Las expresiones que representan las presiones para las dos componentes están dadas por las Ecs. (3.8) y (3.9). En donde se tiene coeficientes que varían de acuerdo a la altura, como se muestra en las Fig. 3.3 y Fig. 3.4.

$$p_I(\theta, \varphi, t) = C_I(\theta) \rho \cdot R(\theta) \cdot \cos(\varphi) \ddot{x}(t) \quad (3.8)$$

$$p_C(\theta, \varphi, t) = C_{cn}(\theta) \cdot \omega_n^2 \cdot \rho \cdot R(\theta) \cdot \cos(\varphi) u_n(t) \quad (3.9)$$

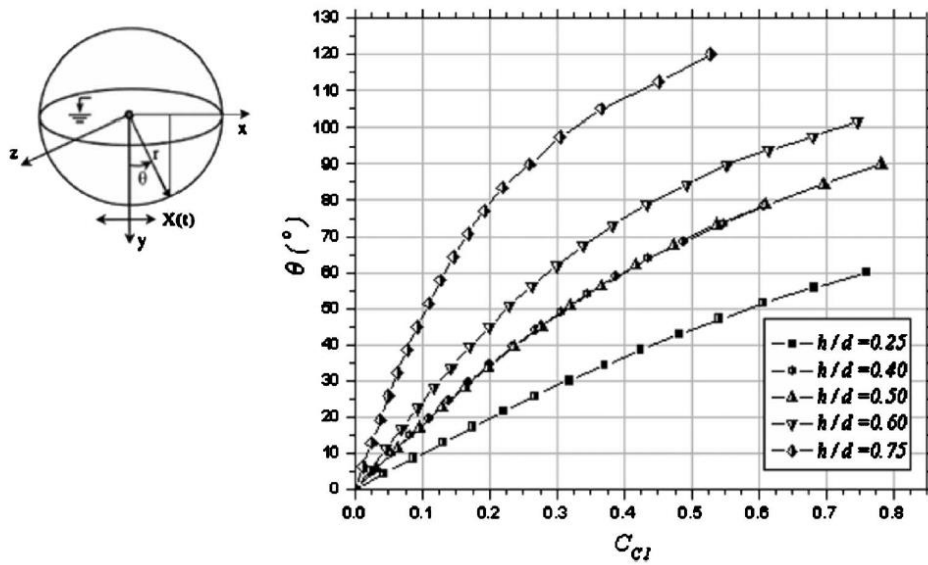


Figura 3.3 Distribución de presiones de componente convectiva para diferentes niveles de llenado (Drosos *et al*, 2008)

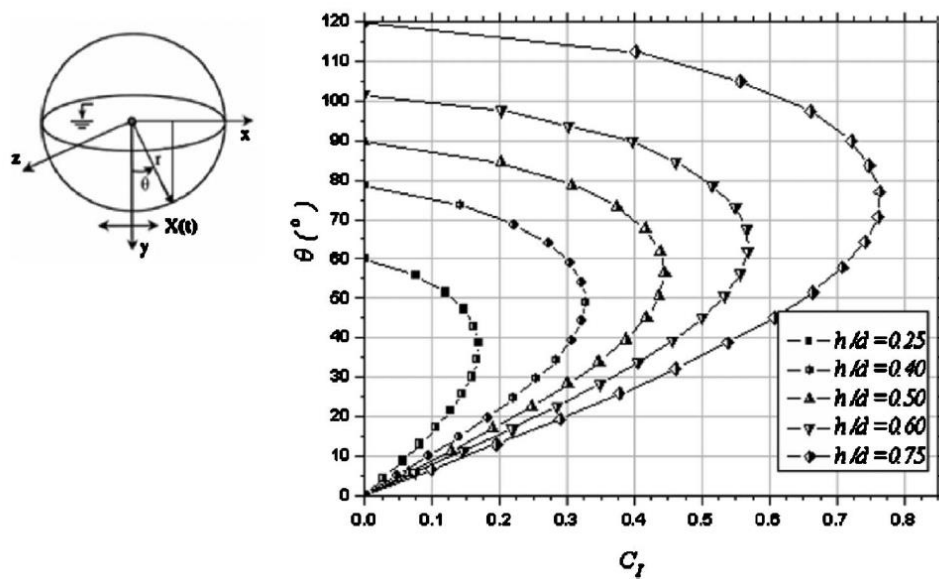


Figura 3.4 Distribución de presiones de componente impulsiva para diferentes niveles de llenado (Drosos *et al*, 2008)

De estas gráficas se observa que la máxima presión impulsiva se genera aproximadamente en la mitad de la altura de llenado, y que el coeficiente se hace más grande a medida que se tiene más líquido. Por otro parte, la convectiva siempre alcanza la máxima presión en la parte superior, sin embargo el coeficiente va disminuyendo.

3.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE SOPORTE

La estructura de soporte del tanque esférico es la parte más importante del sistema, ya que de ella depende el adecuado comportamiento sísmico. Está compuesto por columnas con arriostres concéntricos en forma de cruz entre ellos, como se muestra en la Fig. 3.5. Las secciones de las columnas que usualmente se usan son del tipo tubular, mientras que los arriostres pueden ser tubulares o rectangulares. Además, cabe mencionar que el arriostramiento empieza a cierta distancia de la conexión que tiene la columna y el tanque, debido al proceso constructivo de las uniones y para reducir la longitud libre de las columnas.

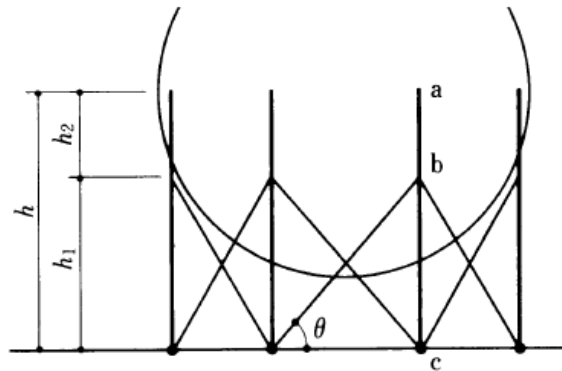


Figura 3.5 Sistema de soporte de tanques esféricos

En condiciones estáticas, el peso de la esfera y el líquido se reparte equitativamente entre todas las columnas. Los esfuerzos que se generan en las columnas serán de flexo-compresión, por lo que su principal forma de falla es el pandeo por flexión, torsión y flexo-torsional. Sin embargo, como las secciones de las columnas son tubulares, estos tienen gran resistencia torsional, y solo presentan el pandeo a flexión. De la Fig. 3.5 se observa que la columna está dividida en dos partes, la parte que comprende desde el punto "a" al "b" no tendría ningún problema por su pequeña longitud; mientras que la siguiente si presenta una longitud considerable, por lo que es necesario verificarlo. De ello dependerá la adecuada elección de la sección y del tipo de material. Otra consideración importante es el comportamiento de la unión entre la columna y la esfera. Según recomendaciones del Instituto de Arquitectura de Japón (AIJ), la unión puede considerarse resistente al giro para los pórticos paralelos a la fuerza

de acción, mientras que para los otros casos se asume que puedan presentar giro. En el presente trabajo se uniformiza el comportamiento de la unión considerando que todas presenten giro por ser más conservador.

Por otro parte, los arriostres tomarán también una parte del peso, y estarán sometidos a compresión; sin embargo comparado a las columnas sus esfuerzos son pequeños, siendo improbable que fallen por gravedad. En cambio, estos elementos cobran gran importancia ante fuerzas dinámicas, lo cual se verá más adelante.

Cuando se presentan las fuerzas sísmicas, las columnas y los arriostres son los elementos encargados de proveer la resistencia lateral. Si bien el comportamiento para tanques elevados es tomado mayormente como péndulo invertido, hay algunos autores que opinan que puede considerarse como un sistema de pórticos, ya que el tanque tiende a comportarse como un diafragma rígido (Wieschollek, 2011). Sin embargo se debe de tener en cuenta que al considerar ello se tendría un sistema con mayor capacidad para disipar energía, lo cual reduciría las fuerzas sísmicas.

Teniendo en cuenta ello, se considera que la estructura presente un comportamiento del tipo péndulo invertido, donde se hará uso de modelos equivalentes de masas-resorte para reemplazar el fluido. Siguiendo esta idea la estructura puede ser representada con el siguiente sistema:

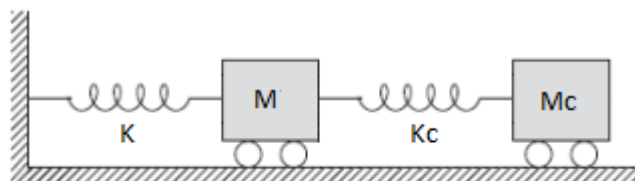


Figura 3.6 Sistema simplificado estructura-liquido

Dónde:

K: Rigidez de la estructura

M: masa del tanque más masa impulsiva

Kc: rigidez de masa convectiva

Mc: masa convectiva

Considerando este sistema se tendría la ecuación del movimiento dinámico (Ec. (3.10)), la cual permite realizar el análisis modal con el procedimiento descrito en el Capítulo II.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \cdot \ddot{x} + \begin{bmatrix} K & -K_c \\ -K_c & K_c \end{bmatrix} \cdot x = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La rigidez de la estructura esta principalmente ligada a las columnas y arriostres, para obtenerlo se podría calcular a partir de la configuración geométrica del sistema de soporte y las características de los materiales con métodos matriciales.

3.3 CIMENTACION

En la definición del tipo de cimentación se tienen que tener en cuenta varios factores como el tamaño del tanque, la estratigrafía del suelo, la capacidad de carga, el nivel freático y la zona sísmica. La más usada es el cimiento tipo anillo, debido a la facilidad en el proceso constructivo, puesto que además genera una superficie alineada para la construcción del tanque (Fig. 3.7). Otra ventaja importante es la posibilidad de evitar los asentamientos diferenciales, ya que este fenómeno ha originado graves fallas en diversos tanques, como desventaja se menciona que el costo es mayor.

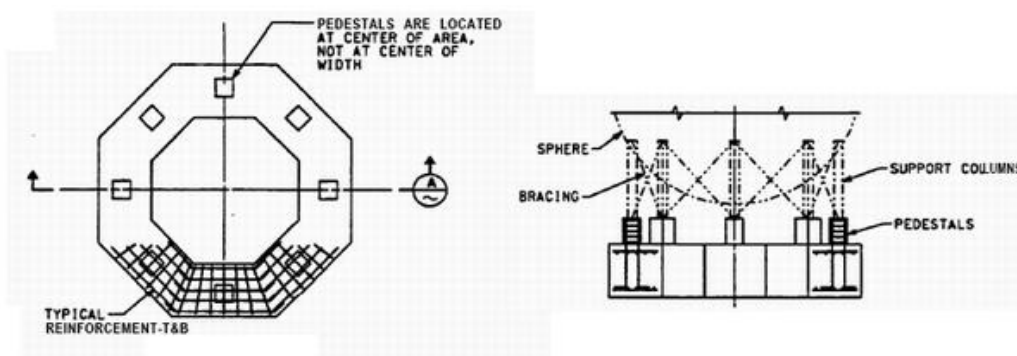


Figura 3.7 Cimentación tipo anillo en tanques esféricos

La verificaciones que se realizan a la cimentación, es similar al de una zapata; en primer lugar se tienen que asegurar la estabilidad del cimiento, tanto por deslizamiento como por volteo. En la mayoría de códigos el factor de seguridad de ambos es 1.2. También se tiene que asegurar que el cimiento no falle por

flexión ni por corte, esto se verificará de acuerdo a las presiones generadas en la zapata por las fuerzas sísmicas de diseño (Fig. 3.8). Además, cabe señalar que en estos tipos de cimiento los esfuerzos radiales resultan importantes, por lo que es necesaria su verificación.

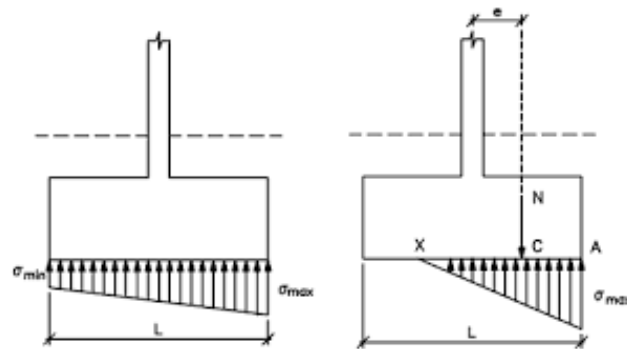


Figura 3.8 Esfuerzos transversales típicos en zapatas

Por último, para suelos con una baja capacidad portante, se utiliza la cimentación de pilotes. Para la elección del tipo de pilote a utilizar, se tiene que tener en cuenta las características locales del suelo, así como la disponibilidad de materiales y mano de obra calificada. De esta forma pueden usarse pilotes por fuste, si la capacidad del suelo va creciendo gradualmente o pilotes por punta, si se encuentra un estrato claramente más resistente. Una vista general de la cimentación por pilotes se muestra en la Fig. 3.9, en donde además se observan vigas de cimentación, para controlar desplazamientos diferenciales.

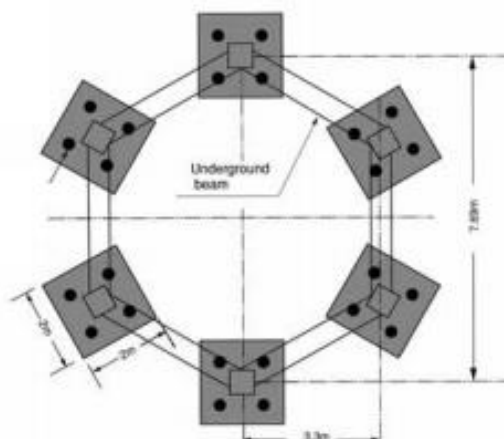


Figura 3.9 Cimentación típica por pilotes en tanques esféricos (Ishibara, 2005)

3.4 UNIONES ENTRE ELEMENTOS

Las uniones son parte fundamental en cualquier estructura, ya que de ella depende la buena interacción entre los distintos elementos. Para el caso específico de los tanques esféricos elevados, las uniones se dan entre la esfera, la columna y los arriostres. Como ya se verán, las uniones que se dan son principalmente por soldadura, ya que se necesita continuidad entre los elementos sin que exista abertura alguna. Los requerimientos para el diseño de uniones por soldadura o pernos están establecidas por las norma AISC-LRFD.

3.4.1 Unión esfera-columna

En los lugares donde se unen la esfera con la columna se presentan esfuerzos puntuales, es por ello que es usual utilizar un espesor de placa ligeramente mayor en la parte central de la esfera. La unión que se realiza es por medio de soldaduras a tope, la cual rodea gran parte del borde de las columnas (Fig. 3.10). Debido al proceso constructivo esta unión se realiza en el taller, dejando una parte de la columna que será ensamblado en obra con pernos o soldadura.

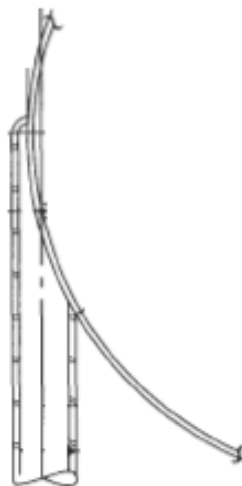


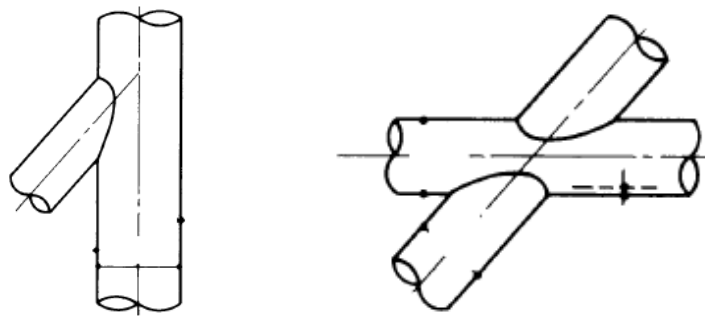
Figura 3.10 Unión típica esfera – columna

Existen otros sistemas en donde se prefiere utilizar un anillo rígido que une todos los extremos superiores de las columnas, y la esfera se suelda al anillo, todo esto para garantizar un buen comportamiento en dicha zona. También se suele

colocar una placa de soporte entre la parte superior de la columna y la esfera, para evitar movimientos durante el montaje.

3.4.2 Unión columna – arriostre

Las uniones entre columnas y arriostres son más comunes en el medio. Los arriostres están sometidos principalmente a esfuerzos de tensión, por lo que para su unión se utiliza usualmente soldaduras. Si los arriostres son de sección tubular, se puede utilizar la unión directa por la soldadura, tanto en la conexión con la columna como entre ellas (Fig. 3.11). Otra configuración que se utiliza, es por medio de cartelas, las cuales están soldadas en un costado de la columna y después es soldado por el medio de la sección tubular del arriostre.



a) Columna - Arriostre

b) Arriostre - Arriostre

Figura 3.11 Unión típica entre elementos tubulares (AIJ, 2010)

3.4.3 Unión columna – cimiento

La unión entre la columna con la zapata se realiza a través de una plancha base metálica. Esta plancha estará soldada a la columna en su contorno, y a su vez estará conectada a la cimentación por pernos de anclaje (Fig.3.12).

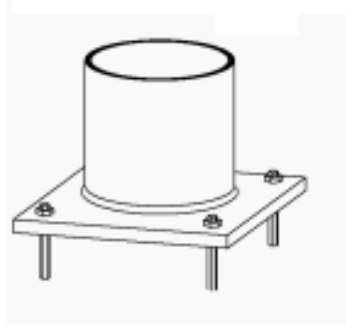


Figura 3.12 Unión típica de columnas tubulares con plancha base

Para su diseño se observan dos casos: el primero es cuando se tienen pequeños momentos, donde no se necesitan diseñar los pernos a tracción, solo a corte. En el segundo caso ocurre lo contrario pues los momentos son grandes y para garantizar su estabilidad se necesitan que actúen los pernos de anclaje. En total la conexión se diseña verificando el aplastamiento del concreto, la resistencia a fluencia de la plancha, la resistencia al corte de la soldadura y por último la resistencia a tracción y corte de los pernos. Un esquema general con los esfuerzos que se generan en la plancha y los pernos se muestra en la Fig. 3.13.

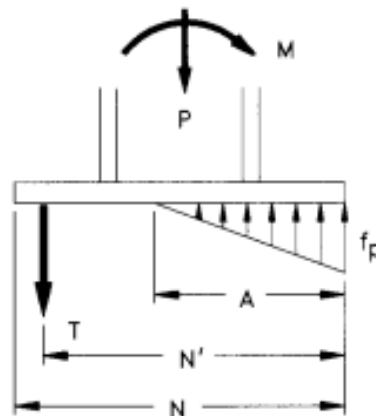


Figura 3.13 Esfuerzos típicos en plancha base por axial y momento

CAPÍTULO IV: MODELO ESTRUCTURAL DE TANQUES ESFERICOS

4.1 CARACTERISTICAS DE TANQUES

Como se ha visto hasta ahora, el comportamiento del tanque esférico depende principalmente de la estructura de soporte y del movimiento del fluido. Ahora se plantea modelar con la mayor precisión tanto la estructura, como la interacción con el fluido. Para este fin se presenta las dimensiones de un pequeño conjunto de tanques (Tabla 4.1) que han sido extraídos de diversos estudios anteriores (Curadelli, 2011; Yang *et al*, 2014; Zhang *et al*, 2015; Li *et al*, 2010), entre ellos se encuentran tanques existentes que han sido evaluados, como tanques en etapas de análisis y diseño. En la Fig. 4.1, se observa un esquema representativo de las características geométricas consideradas.

Tabla 4.1: Dimensiones de tanques esféricos reales

N°	Vol.(m ³)	D(m)	t _{esf} (m)	H _i (m)	h _{ar} (m)	D _{col} (m)	t _{col} (m)	A _{ar} (m ²)	N° _{col}
1	1400	13.9	0.047	16.9	6.64	0.457	0.012	0.002845	8
2	1400	13.8	0.065	16.3	7.0	0.508	0.011	0.008232	10
3	1000	12.4	0.0254	15.42	6.45	0.786	0.012	0.007620	6
4	2000	15.7	0.044	18.2	6.42	0.560	0.01	0.001963	10
5	1000	12.4	0.045	14.4	5.41	0.250	0.01	0.002880	8
6	1000	12.3	0.034	14.15	5.5	0.426	0.01	0.002463	10
7	3000	18	0.038	19.6	7.2	0.63	0.014	0.003217	10

Dónde:

- D: Diámetro externo de la esfera
- t_{esf}: Espesor de la esfera
- H_i: Altura total de la esfera
- h_{ar}: Altura vertical proyectada del arriostre
- D_{col}: Diámetro de columna
- t_{col}: Espesor de la columna
- A_{ar}: Área de la sección del arriostre

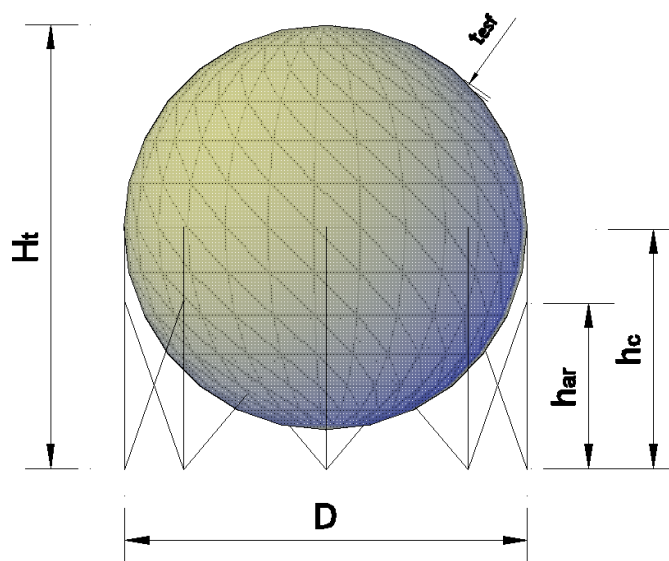


Figura 4.1 Dimensiones geométricas de tanque esférico

4.2 MODELO MATEMATICO SIMPLIFICADO

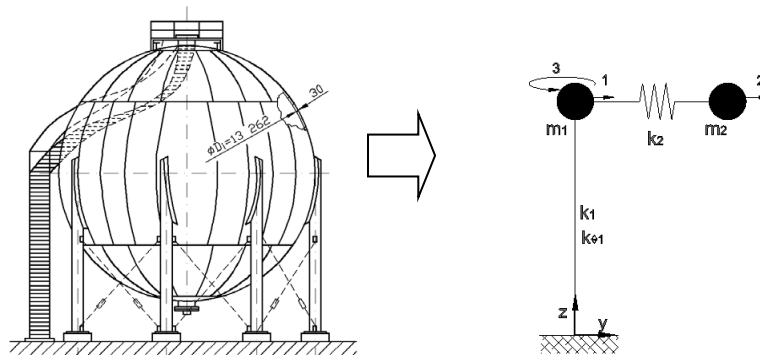
Los tanques esféricos son analizados considerando que son tipo péndulo invertido; es decir, el 50% o más de su peso están concentrados en la parte superior de la estructura. Para corroborar esta condición, se analizaron los tanques reales dados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.2: Análisis de condición de péndulo invertido

N°	$W_{liquido}(t)$	$W_{esfera}(t)$	$W_{soporte}(t)$	$W_{total}(t)$	$(W_{liq}+W_{esfera})/W_{total}$
1	1378	213.490	13.52	1605.01	0.991576
2	1338	292.400	23.26	1653.66	0.985934
3	986	90.900	19.10	1096.00	0.982573
4	1992	256.180	16.52	2264.70	0.992705
5	978	162.670	4.14	1144.81	0.996384
6	960	121.500	10.79	1092.29	0.990122
7	3015	290.820	27.14	3332.96	0.991857

Estas estructuras son simétricas, por lo que aparentemente no debieran tener grandes efectos torsionales, sin embargo estos si pueden estar presentes debido a las variaciones presente en el proceso constructivo o por la no homogeneidad en los materiales, además del desfase que se puede tener del centro de masa (CM) por un movimiento del líquido. Los códigos establecen que la excentricidad debe ser un 5% de la longitud mayor, por lo que se trabajó con ello.

En la Fig. 4.2 se presenta un esquema simplificado del tanque esférico elevado con estas características:



(a) Estructura real (b) Modelo simplificado
Figura 4.2 Modelo simplificado tipo Péndulo Invertido.

Siendo m_1 la masa de la estructura más la masa impulsiva del agua, m_2 es la masa convectiva del agua, k_1 es la rigidez lateral del soporte, k_2 es la rigidez del resorte equivalente (Ec. (4.1)) y $k_{\theta 1}$ es la rigidez torsional del soporte.

$$k_2 = \frac{\lambda \cdot g}{R} \cdot m_2 \quad (4.1)$$

El efecto que genera un comportamiento torsionalmente acoplado, ha sido estudiado en edificaciones por diversos autores (Kan and Chopra, 1977). A partir de la formulación descrita en dichos estudios, se realizaron adaptaciones a este tipo particular de estructura. A modo de ejemplo, al considerar que la masa m_1 es la única que presenta rotación, se tendría solo tres grados de libertad y la ecuación de movimiento quedaría definida por la Ec. (4.2).

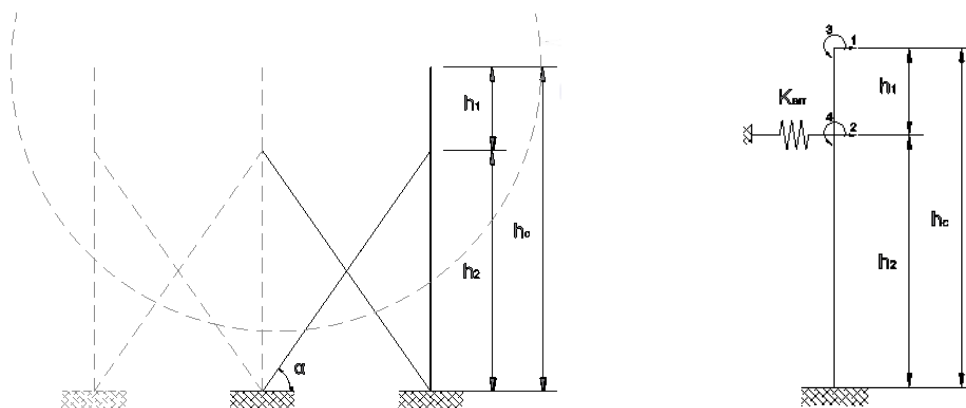
$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ r_{g1} \cdot \ddot{u}_{\theta 1} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} & 0 & \left(\frac{1}{r_{g1}}\right)^2 (k_{\theta 1}) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ r_{g1} \cdot u_{\theta 1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{g1} \\ \ddot{u}_{g2} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

Dónde u_i es el desplazamiento lateral traslacional del gdl i , $u_{\theta 1}$ es el desplazamiento rotacional de la masa m_1 alrededor del eje Z , u_g es el desplazamiento horizontal del suelo, r_{g1} es el radio de giro del soporte, y e_1 es la excentricidad accidental asociada a la masa m_1 .

La Ec. (4.2) puede ser resuelta empleando métodos numéricos (Chopra, 1995). Sin embargo es necesario conocer previamente los valores de las rigideces laterales y torsionales, por lo cual se describen expresiones aproximadas para su cálculo. Esto permitirá conocer la manera en que se relacionan con sus características geométricas.

4.2.1 Rigidez Lateral

La rigidez lateral se calcula considerando cada columna de manera aislada, de esta forma se representa cada arriostre como un resorte (Fig. 4.3). Cabe mencionar que se considera la contribución de solo un arriostre, ya que ante un movimiento dinámico los arriostres que principalmente trabajan son los que están en tensión, mientras que los que están en compresión tienden a pandearse. Además, como se comentó en la sección 3.2, se considera que las columnas presente giro en la parte superior.



(a) Estructura real. (b) Modelo simplificado.
Figura 4.3. Modelo simplificado de una columna con arriostre.

Despreciando los efectos de carga axial, y considerando 2 grados de libertad por nodo, se tiene que la matriz de rigidez ensamblado (Ec. (4.3)).

$$K = EI \begin{pmatrix} \frac{12}{h_1^3} & -\frac{12}{h_1^3} & -\frac{6}{h_1^2} & -\frac{6}{h_1^2} \\ -\frac{12}{h_1^3} & \frac{12}{h_1^3} + \frac{12}{h_2^3} + \frac{K_{arr}}{EI} & \frac{6}{h_1^2} & \frac{6}{h_1^2} - \frac{6}{h_2^2} \\ -\frac{6}{h_1^2} & \frac{6}{h_1^2} & \frac{4}{h_1} & \frac{2}{h_1} \\ -\frac{6}{h_1^2} & \frac{6}{h_1^2} - \frac{6}{h_2^2} & \frac{2}{h_1} & \frac{4}{h_1} + \frac{4}{h_2} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Realizando una condensación estática para eliminar los gdl asociados al giro, y asumiendo $\gamma=h_1/h_2$, se obtiene:

$$K = \frac{9EI}{h_1^3} \left(\begin{pmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{4}{3} \\ -\frac{4}{3} & \frac{4}{3}(1 + \gamma^3) + K_{arr} \cdot \frac{h_1^3}{9EI} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 + \frac{1}{3+4\gamma} & -1 + \frac{2\gamma^2-1}{3+4\gamma} \\ -1 + \frac{2\gamma^2-1}{3+4\gamma} & 1 + \frac{\gamma^2(4\gamma^2-4)+1}{3+4\gamma} \end{pmatrix} \right) \quad (4.4)$$

Para calcular la rigidez lateral, se consideró que solo el grado de libertad traslacional 1 de la columna tiene un desplazamiento lateral unitario (Fig. 4.3 b). A partir de esto se podría hallar una expresión única que involucraría h_1 , E , I , γ y K_{arr} . Sin embargo, se ha revisado que el valor de γ en los tanques varía aproximadamente de 0.6 a 0.75, por lo que se consideró trabajar con un valor fijo de 0.70, con lo cual la rigidez lateral de la columna y el arriostre (Kl), queda representado según la Ec. (4.5).

$$Kl = \frac{9EI}{h_1^3} \left(0.1212 - \frac{0.03965}{0.3534 + K_{arr} \cdot \frac{h_1^3}{9EI}} \right) \quad (4.5)$$

Dónde el K_{arr} se calcula de acuerdo al ángulo de elevación (α), y al ángulo que se genera con respecto a la dirección de la fuerza aplicada (β).

$$K_{arr} = \frac{EA_{arr}}{l_{arr}} \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \cos^2(\beta) \quad (4.6)$$

La rigidez lateral total, será la suma de las rigideces laterales calculadas según la Ec. (4.5) para cada columna.

4.2.2 Rigidez Torsional

La rigidez torsional se determinó a partir de las fuerzas laterales resistentes que presentan los elementos estructurales ante un giro. De acuerdo a la Fig. 4.4, se observó que el brazo de resistencia es R y que las fuerzas laterales en cada columna son iguales, ya que los valor del K_{arr} en todas las columnas tienen el mismo ángulo β . El valor de la rigidez torsional del sistema está dado según la Ec. (4.7), donde N es el número de columnas.

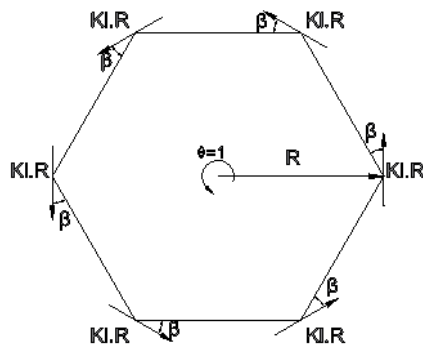


Figura 4.4. Fuerzas laterales resistentes al giro

$$K_{\theta} = N. K_I. R^2 \quad (4.7)$$

4.3 MODELO TRIDIMENSIONAL

En la actualidad hay varios programas estructurales que ofrecen ayuda en el análisis sísmico, en nuestro país el software de mayor uso son los de la empresa CSI, contando con varios programas de acuerdo a las diferentes demandas que se tengan. De esta forma existen programas para el análisis y diseño de puentes, edificaciones, losas, cimentaciones y estructuras en general. Para el caso de este tipo particular de estructuras se utilizó el programa SAP2000 (CSI, 2008) en la modelación, no obstante en este programa no es posible representar el movimiento de un líquido. En el mercado existen software especiales de elementos finitos en donde es posible modelar este fenómeno, además de otros relacionados con la termodinámica y la electromecánica, ejemplos de estos son: ANSYS, FLUENT y ABAQUS.

Por esta razón se considera modelar adicionalmente la estructura en el programa ANSYS (ANSYS, 2015), con el propósito de poder comparar y validar con mayor precisión los resultados obtenidos en el SAP2000. Los modelos planteados tiene las siguientes propiedades del acero: peso específico (γ) igual a 7.85 Ton/m³, módulo de elasticidad de Young (E) igual a 2.1x10⁶ kgf/cm², y módulo de Poisson (ν) igual a 0.3. Las consideraciones adoptadas en el modelamiento de las estructura para cada programa serán comentadas en las siguientes secciones.

4.3.1 Modelo en ANSYS

El modelamiento en cualquier software requiere conocer en primer lugar los tipos de elementos existentes en dicho entorno. Es por ello que se presentan los elementos que fueron utilizados en el modelamiento de la estructura, mostrando las consideraciones y alcances de cada uno. Posteriormente se mencionan las consideraciones específicas que se tomaron en cuenta en el modelamiento.

4.3.1.1 Tipos de elementos

Elemento Cáscara:

Los elementos tipo cáscara puede ser modelados de acuerdo al análisis de interés, así se tienen elemento con comportamiento lineal y no lineal, o elementos bidimensionales y tridimensionales. Para el presente caso, se eligió trabajar con el elemento *Shell63*, el cual presenta seis grados de libertad por nodo (desplazamiento y giros) e incluye el comportamiento como membrana y por flexión (Fig. 4.5). Además, permite ser discretizado en formas cuadrangulares o triangulares. Los datos de entrada son las características del material (γ , E , ν) y el espesor.

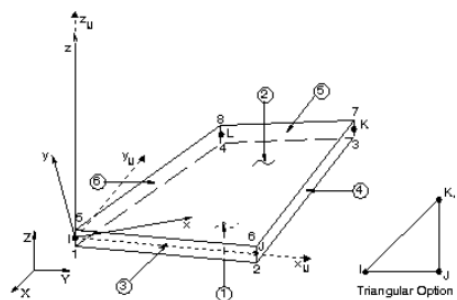


Figura 4.5. Elemento *Shell63* (ANSYS)

Elemento Barra:

De forma similar al elemento anterior, en este también se encuentran una variedad de elementos. El elemento que se ajusta mejor al análisis de esta estructura es el *Beam4*, el cual presenta seis grados de libertad por nodo (desplazamiento y giros) y se usa para elementos uniaxiales con esfuerzos de

tensión, compresión, torsión y flexión. Los datos de entrada son las características del material (γ , E , ν), el área de la sección y su respectiva inercia para cada eje.

Elemento Fluido:

En el entorno ANSYS existen distintos elementos que representa un fluido para distintos propósitos. De esta forma se tiene para flujos en movimiento y para flujos estáticos en recipientes. Para el caso de tanques elevados se utiliza el segundo, el cual se subdivide dependiendo de si el análisis es en 2D o 3D. Para el análisis tridimensional se tiene el elemento *Fluid80*, el cual es de forma hexaédrica, con 3 grados de libertad traslacional por cada nodo (Fig. 4.6).

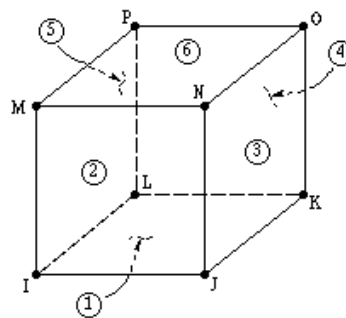


Figura 4.6. Elemento *Fluid80* (ANSYS)

Este elemento es una variación de un elemento sólido, en donde para simular el fluido se redujo la cortante. Las propiedades necesarias para su definición son el módulo de compresión (*bulk*), la densidad y la viscosidad, que en el caso del agua es mínimo. El valor del módulo de compresión utilizado es de 2.242×10^3 Ton/m². Los efectos del oleaje son incluidos mediante pequeños resortes ubicados en la dirección normal de cada nodo correspondiente a la superficie libre. Además, en la dirección normal a las paredes del recipiente se considera un desplazamiento relativo igual a cero, para simular la no viscosidad del líquido.

4.3.1.2 Modelación

Habiendo revisado y visto los tipos de elementos con los que se trabaja usualmente, se procede al modelado teniendo algunas consideraciones adicionales, que son principalmente en la elección del tipo de malla:

- Para el manto debido a que la curvatura genera que las divisiones cuadrangulares tengan un porcentaje de error significativo, se eligió trabajar con elementos triangulares.
- No se consideró división alguna en los elementos tipo barra, ya que resultaría innecesario y se obtendrían resultados similares.
- Tanto en el manto como en los elementos tridimensionales del fluido fue considerado un mallado equivalente a ocho divisiones del radio, obteniéndose resultados cercanos a los teóricos.
- Se modeló solo la mitad de la estructura por su simetría, lo cual ayuda a reducir el esfuerzo de cálculo.

Siguiendo estas consideraciones, se presenta una vista del modelo final (Fig. 4.7).

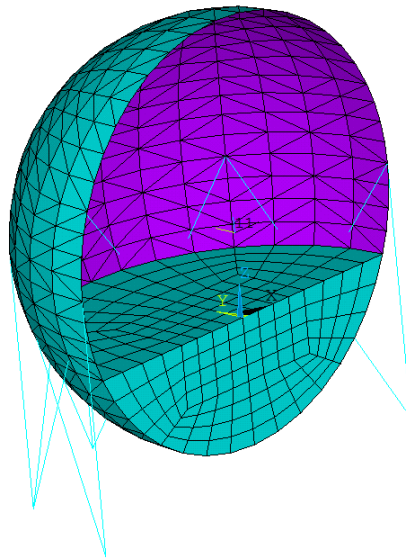


Figura 4.7 Modelo tridimensional - ANSYS

4.3.2 Modelo en SAP2000

De manera análoga al apartado anterior, se presentan los elementos que fueron utilizados en el modelamiento de la estructura, mostrando las consideraciones y alcances de cada uno. También se mencionan las consideraciones que se realizaron para el modelamiento del líquido con sistemas masa-resorte.

4.3.2.1 Tipos de elementos

Elementos barra

Los elementos barra o *Frame* son elementos unidimensionales que tienen 6 grados de libertad en cada nodo (desplazamiento y giros). Son usados generalmente para modelar elementos tipo viga, columna o cable. Consideran los efectos de flexión, torsión, deformación axial y la deformación por corte.

Elementos Cáscara

Los elementos tipo Cáscara o *Shell* son elementos bidimensionales, los cuales tienen 6 grados de libertad por cada nodo (desplazamiento y giros). Se pueden definir para que incluyan los efectos de flexión y corte, o que solo actúen como láminas, en cuyo caso se ignoran los esfuerzos por corte.

Elementos link:

Los elemento *link* sirven para conectar dos puntos. El comportamiento de esta conexión varía de acuerdo al análisis requerido. Para este caso, se usaron estos elementos en la unión de la masa del líquido con el tanque esférico y para ello se considera un comportamiento lineal. Los datos de entrada serán solo el valor de la rigidez global.

4.3.2.2 Modelación

La modelación del tanque fue realizada con los elementos presentados anteriormente. Se modelaron las columnas y los arriostres con elementos tipo *Frame*; además, se consideró que el arriostre aporta rigidez solo por tensión para el ensamblaje de la matriz de rigidez global de la estructura, y para ello se asumió que el área de su sección transversal es equivalente a la mitad del área real. La esfera fue modelada con elementos tipo *Shell-Thin*, resultando un total de 32,768 elementos.

La interacción del fluido-estructura fue modelado mediante dos masas; la masa convectiva fue ubicada en el centro de la esfera, debido a que la resultante de

las presiones siempre pasa por el centro geométrico de ella, y su rigidez equivalente k_2 (Ec. (4.1)) fue modelado con elementos tipo *link* que unieron la masa convectiva con las columnas, cabe señalar que la rigidez de estos elementos fue definido de tal forma que la rigidez global sea igual a la rigidez equivalente k_2 (Fig. 4.8).

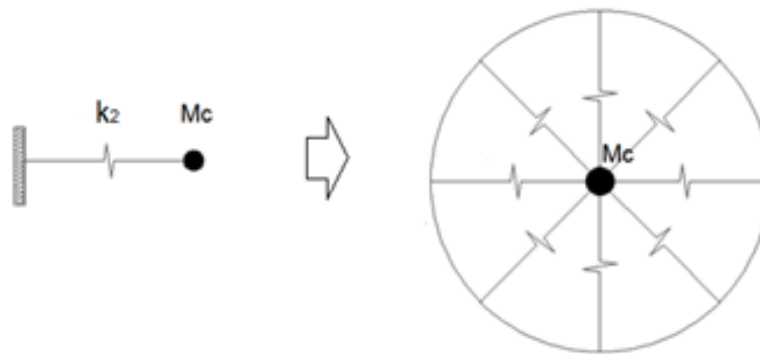


Figura.4.8 Modelo equivalente de masa convectiva

Para el cálculo de la rigidez de dichos resortes, se tuvo en cuenta solo la masa convectiva del primer modo, por ser el predominante, de acuerdo a la Ec. (4.1). En la Tabla 4.3 se presenta estos valores para los siete tanques.

Tabla 4.3: Rigideces equivalentes de masas convectivas

Tanques	Porcentaje de Llenado		
	21.6%	50%	78.4%
1	417.41	897.47	1056.39
2	411.43	884.60	1041.24
3	332.18	714.22	840.69
4	532.52	1144.95	1347.70
5	332.18	714.22	840.69
6	326.85	702.75	827.19
7	699.97	1504.99	1771.49

Por otro parte, se consideró incluir la masa impulsiva directamente en la parte media de la esfera de manera uniforme. Una vista del modelo general es mostrada en la Fig. 4.9.

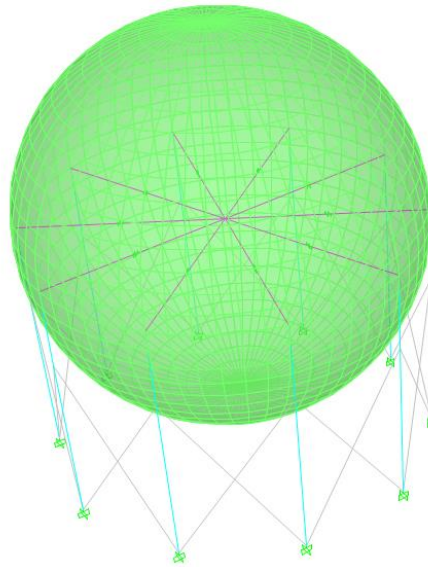


Figura 4.9 Modelo tridimensional - SAP2000

4.4 VALIDACION DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

En esta sección se presentan los análisis comparativos que se realizaron entre los modelos de SAP200 y ANSYS, con el objetivo de verificar que el modelo del tanque con sistemas masa-resorte fuera válida.

4.4.1 Análisis de Vibración libre

En primer lugar se verificó que la modelación del líquido en ANSYS sea concordante con los resultados teóricos, para ello se planteó analizar los tanques esféricos 1, 2 y 3 (Tabla 4.1). Se consideró un análisis modal, en donde los modelos están restringidos al giro y desplazamiento en la parte media del tanque, de tal forma que el líquido se mueva libremente (Fig. 4.10).

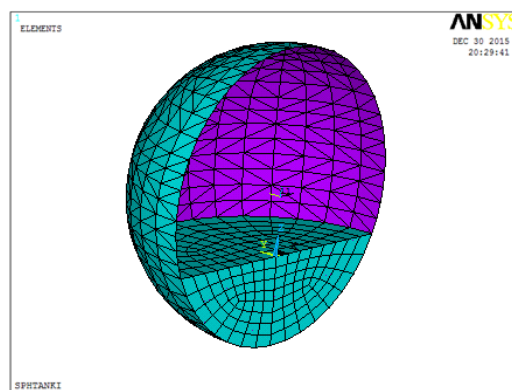


Figura 4.10. Modelo de vibración libre – ANSYS

Los resultados principales del análisis modal son las frecuencias y las masas participativas (MEP) asociadas a cada modo, por lo que estos valores fueron comparados con los dados en la literatura. Cabe mencionar que en el modelo de elementos finitos se obtuvieron varias formas modales, sin embargo son solo los de frecuencia asociada a los de mayor masa participante los que se tomaron en cuenta, ya que éstas son las que aportan presiones adicionales en el tanque. Los tres modos principales son mostrados en la Fig. 4.11.

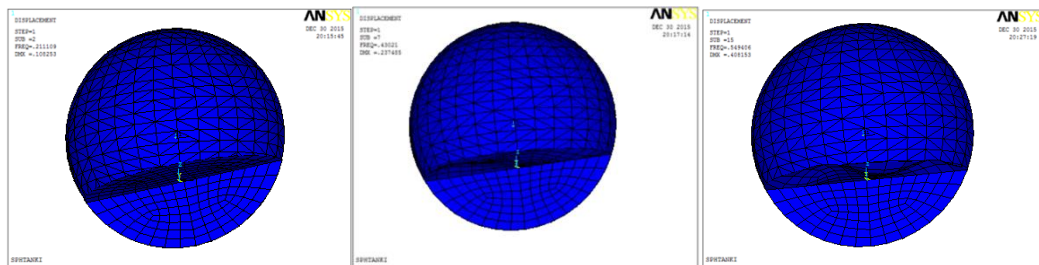


Figura. 4.11. Formas modales convectivas de un tanque esférico

En las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran las frecuencias y masa participativas resultantes del programa, así como los valores teóricos. Todos los análisis se realizaron para tres diferentes alturas de llenado.

Tabla 4.4: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=0.6).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa (MEP)		
		ANSYS	Teórico	%Error	ANSYS	Teórico	%Error
1	1	0.213	0.212	0.438	230.706	234.232	-1.505
	2	0.438	0.438	0.005	2.272	2.384	-4.720
	3	0.562	0.565	-0.694	0.301	0.424	-28.964
2	1	0.205	0.213	-3.812	225.736	229.213	-1.517
	2	0.421	0.440	-4.206	2.224	2.333	-4.682
	3	0.540	0.567	-4.876	0.295	0.415	-28.901
3	1	0.226	0.225	0.292	164.607	166.291	-1.013
	2	0.464	0.464	-0.004	1.634	1.693	-3.469
	3	0.595	0.599	-0.573	0.237	0.301	-21.436

Tabla 4.5: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=1).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa (MEP)		
		ANSYS	Teórico	%Error	ANSYS	Teórico	%Error
1	1	0.237	0.236	0.224	401.768	407.576	-1.425
	2	0.436	0.434	0.379	9.674	5.519	75.284
	3	0.558	0.551	1.123	2.167	0.982	120.601
2	1	0.238	0.237	0.201	393.078	398.843	-1.445
	2	0.438	0.436	0.368	9.466	5.401	75.263
	3	0.560	0.553	1.138	2.120	0.961	120.579
3	1	0.250	0.250	0.128	286.664	289.354	-0.930
	2	0.461	0.460	0.271	7.001	3.918	78.680
	3	0.588	0.584	0.745	1.639	0.697	135.101

Tabla 4.6: Frecuencias y MEP de tanques 1,2 y 3 (RH=1.4).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa (MEP)		
		ANSYS	Teórico	%Error	ANSYS	Teórico	%Error
1	1	0.276	0.276	0.028	380.166	352.491	7.851
	2	0.462	0.462	-0.026	18.030	7.904	128.123
	3	0.584	0.582	0.399	4.491	1.406	219.345
2	1	0.277	0.277	0.029	371.868	344.938	7.807
	2	0.464	0.464	-0.020	17.636	7.734	128.025
	3	0.587	0.584	0.414	4.392	1.376	219.116
3	1	0.292	0.292	-0.003	271.422	250.247	8.462
	2	0.489	0.489	0.005	13.130	5.611	134.000
	3	0.618	0.616	0.249	3.511	0.998	251.678

Para el cálculo de los valores teóricos se utilizaron las expresiones y tablas presentadas en el Capítulo II. Además, se presenta una cuantificación del error del modelo, el cual es calculado según la Ec. (4.8).

$$\%Error = \left[\frac{T_{Modelo}}{T_{Teorico}} - 1 \right] \times 100 \quad (4.8)$$

De las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se puede verificar que las frecuencias de las formas modales están muy cercanas a los teóricos, para todos los tanques y sus diferentes cantidades de llenado, alcanzando un máximo valor de 4.8% de error. Por otro lado los valores de masa efectiva participativa (MEP), si bien no presentan la misma congruencia que en las frecuencias, se observó que el error es mínimo en los primeros modos, los cuales tienen la mayor MEP e influencia, por ejemplo: para un nivel de llenado del 50% (RH=1) del tanque 1, la suma de

MEP de los modos 2 y 3 es de 6.5, el cual es el 1.6% de la MEP del primer modo. Con esto se dedujo que el modelo brindará respuestas cercanas al teórico, ya que el máximo error para los primeros modos fueron de alrededor del +7.8%, con lo que las respuestas serán conservadoramente más grandes.

4.4.2 Análisis modal

Con los resultados obtenidos para las diferentes configuraciones y niveles de llenado, se procedió a comparar las frecuencias (f) y los factores de masa efectiva participativa (MEP), para verificar que las discrepancias entre los modelos no sean excesivas (Tabla 4.7, 4.8 y 4.9). La cuantificación del error fue dada en porcentaje y para su cálculo se utiliza la Ec. (4.8).

Tabla 4.7: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=0.6).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa		
		SAP2000	ANSYS	%Error	SAP2000	ANSYS	%Error
1	1	0.188	0.189	-0.772	0.828	0.822	0.725
	2	0.757	0.775	-2.441	0.999	0.983	1.609
2	1	0.204	0.205	-0.396	0.743	0.738	0.683
	2	1.171	1.168	0.276	0.999	0.996	0.271
3	1	0.218	0.220	-0.786	0.763	0.755	1.040
	2	1.615	1.676	-3.615	0.998	0.998	0.029
4	1	0.172	0.173	-0.591	0.853	0.849	0.456
	2	0.667	0.679	-1.856	0.999	0.965	3.537
5	1	0.189	0.190	-0.563	0.860	0.856	0.433
	2	0.694	0.715	-2.900	0.999	0.996	0.295
6	1	0.210	0.211	-0.488	0.793	0.789	0.565
	2	1.042	1.049	-0.734	0.999	0.993	0.583
7	1	0.168	0.169	-0.773	0.827	0.822	0.574
	2	0.744	0.758	-1.786	0.999	0.993	0.680

Tabla 4.8: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=1).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa		
		SAP200	ANSYS	%Error	SAP200	ANSYS	%Error
1	1	0.179	0.181	-0.879	0.870	0.866	0.509
	2	0.474	0.498	-4.696	0.990	0.991	-0.124
2	1	0.216	0.216	-0.129	0.698	0.698	0.046
	2	0.686	0.704	-2.489	0.999	0.990	0.941
3	1	0.233	0.236	-1.217	0.668	0.659	1.402
	2	0.869	0.920	-5.530	0.999	0.987	1.266
4	1	0.159	0.159	-0.502	0.902	0.901	0.177
	2	0.425	0.453	-6.276	1.000	0.996	0.320
5	1	0.172	0.172	-0.170	0.918	0.917	0.114
	2	0.462	0.501	-7.677	1.000	0.998	0.184
6	1	0.214	0.214	-0.307	0.781	0.781	0.033
	2	0.603	0.632	-4.580	1.000	0.994	0.591
7	1	0.163	0.165	-0.866	0.846	0.844	0.195
	2	0.441	0.453	-2.557	0.998	0.979	1.978

Tabla 4.9: Comparación de frecuencia y porcentaje de masa participativa (RH=1.4).

Tanque	Modo	Frecuencia cíclica (Hz)			Masa Efectiva Participativa		
		SAP200	ANSYS	%Error	SAP200	ANSYS	%Error
1	1	0.179	0.175	2.476	0.927	0.935	-0.927
	2	0.380	0.371	2.413	0.997	0.995	0.195
2	1	0.242	0.238	1.716	0.650	0.683	-4.923
	2	0.494	0.505	-2.214	1.000	0.991	0.905
3	1	0.265	0.267	-0.564	0.559	0.564	-0.922
	2	0.606	0.642	-5.679	0.999	0.992	0.718
4	1	0.154	0.149	3.392	0.953	0.960	-0.697
	2	0.349	0.341	2.081	1.000	0.997	0.231
5	1	0.165	0.158	3.899	0.964	0.969	-0.501
	2	0.387	0.380	1.849	0.968	0.998	-3.045
6	1	0.229	0.223	2.518	0.807	0.835	-3.350
	2	0.449	0.426	5.603	0.947	0.974	-2.844
7	1	0.167	0.163	2.485	0.898	0.914	-1.746
	2	0.343	0.332	3.235	0.999	0.993	0.637

Revisando los resultados, se apreció que el modelamiento del agua mediante modelos mecánicos equivalentes es aceptable, teniendo mayor porcentaje de error a medida que se incrementa el porcentaje de llenado. Para las frecuencias

se alcanzó un valor máximo igual a -7.86% de error en el primer modo del quinto tanque, mientras que en el porcentaje de masa participativa, se tuvo un valor máximo de -4.92 % de error en el segundo tanque. En las Figs 4.12, 4.13 y 4.14 se presentan estos valores de manera gráfica, observándose una mínima diferencia entre los modelos con el uso de ambos programas.

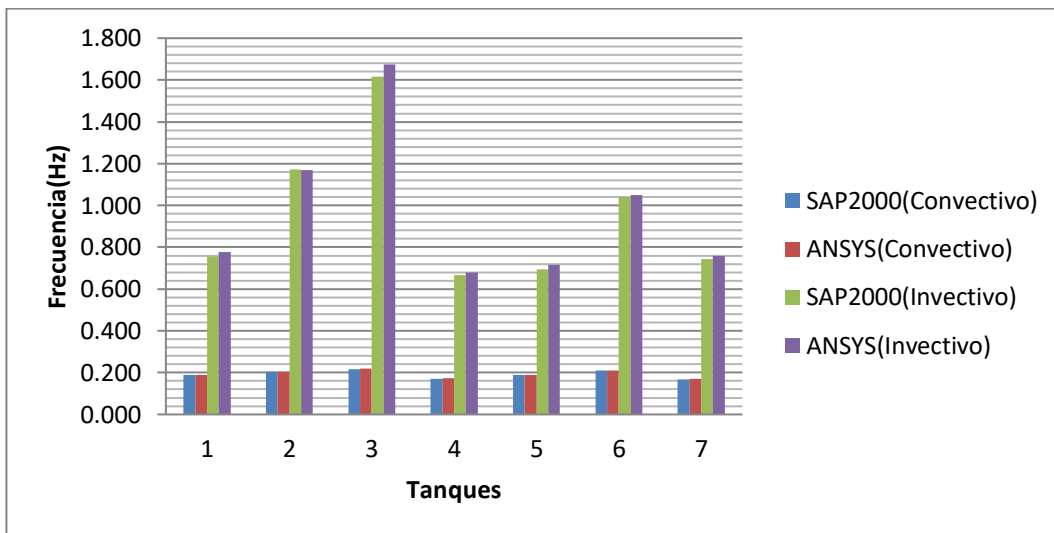


Figura 4.12 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=0.6).

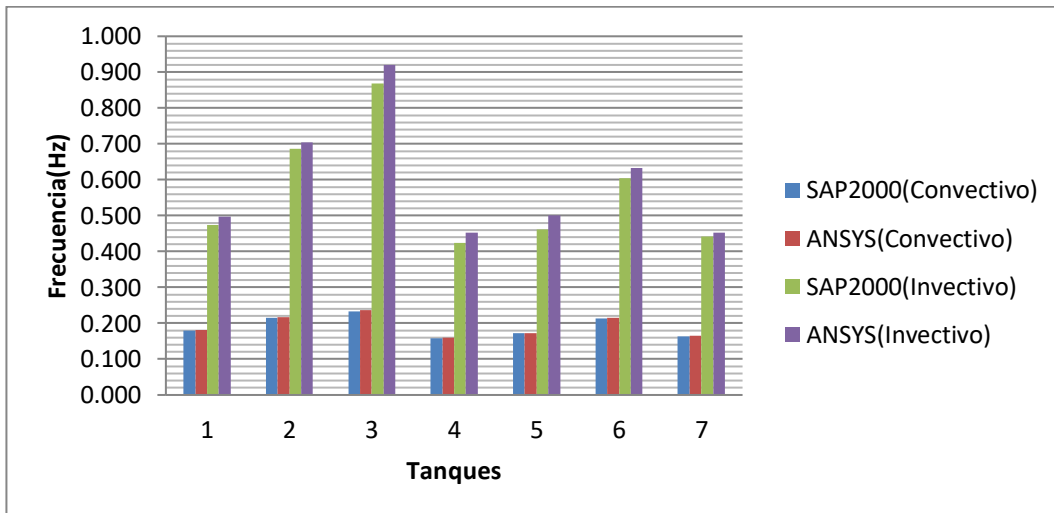


Figura 4.13 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=1).

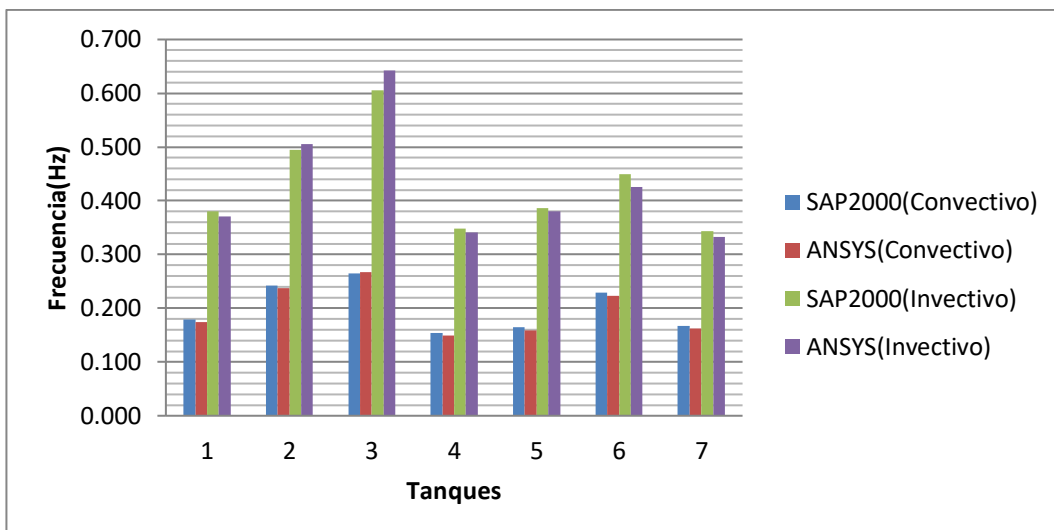


Figura 4.14 Grafico de frecuencias convectivas e impulsivas en los siete tanques (RH=1.4).

4.5 ESTUDIO DE RESPUESTAS DINAMICAS EN TANQUES REALES

Con el modelo en SAP2000 definido, se realizó un análisis sísmico modal espectral entre los siete tanques presentados (Tabla 4.1), y así estudiar las variaciones de las respuestas de cortante basales y desplazamientos.

4.5.1 Definición Del Espectro Sísmico

La norma peruana E.030 cuantifica el valor de la fuerza sísmica mediante parámetros que están relacionados con la ubicación, importancia y tipo de la estructura, además se tiene en cuenta el tipo de suelo y su relación con el periodo fundamental de la estructura. Para estructuras especiales como los tanques elevados, la norma no especifica claramente algunos parámetros. Según se ha revisado en el Capítulo II, la mayoría de normas internacionales asumen dos espectros para cada componente. Los parámetros considerados en cada norma varían ligeramente, por lo que se podría utilizar cualquiera de ellas. Se eligió la norma ASCE7-10 como complemento, debido a que se tienen una mayor clasificación en el factor de reducción. Según ello, los espectros generados se están representados por las Ecs. (4.9) y (4.10).

$$S_{ai} = \frac{ZUCS}{R_i} \cdot g \quad (4.9)$$

$$S_{ac} = \frac{1.5xZUCS}{R_c} \cdot g \quad (4.10)$$

Factor de zona (Z)

La norma divide el territorio peruano en cuatro regiones, de acuerdo al grado de vulnerabilidad sísmica como se observa:



Figura 4.15 Zonas Sísmicas

Tabla 4.10: Factores de Zona

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Parámetro de suelo (S)

El tipo de suelo es definido, de acuerdo a sus propiedades mecánica, espesores, periodos fundamentales de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte, obteniéndose la clasificación siguiente:

Tabla 4.11: Factor de suelo

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

Tabla 4.12: Períodos T_P y T_L

	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
T_P (s)	0.30	0.40	0.60	1.0
T_L (s)	3.00	2.50	2.0	1.60

Factor de importancia (U) y de reducción de respuesta (R)

El factor de importancia esta dado de acuerdo al uso y las potenciales pérdidas humanas y materiales que conllevaría la falla de estas estructuras. En el caso de tanques de almacenamiento, debido al riesgo por contener posibles materiales inflamables, se considera el máximo factor, siendo este de 1.5.

En relación al factor de reducción de respuesta (R), según la norma ASCE7-10 se tienen dos valores para cada componente. Para la impulsiva que el estanque es una estructura arriostrado, por lo que se tienen un valor de 3, mientras que para la componente convectiva se considera de forma general 1.5.

Espectro de diseño elástico reducido de pseudo-aceleraciones

De acuerdo a lo anterior, si se considera un factor de zona Z₄ y un suelo tipo S₁, se obtienen los parámetros sísmicos presentados en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Parámetros sísmicos

Factor de Zona (Z) :	0.45
Factor de Importancia (U) :	1.5
Factor de Suelo (S) :	1
T_p(s):	0.4
T_L(s):	2.5
Factor de Reducción Impulsiva (R_i):	3
Factor de Reducción Convectiva (R_c):	1.5

Debido a que se tienen dos coeficientes de reducción y amortiguamiento, se tendrán dos espectros, sin embargo ya que lo periodos de la componente convectiva siempre son largos (regularmente mayor de 3 seg) y los periodos del impulsivos son cortos (regularmente menor al 1.5 seg), se planteó combinarlos, como se aprecia en la Fig. 4.5.

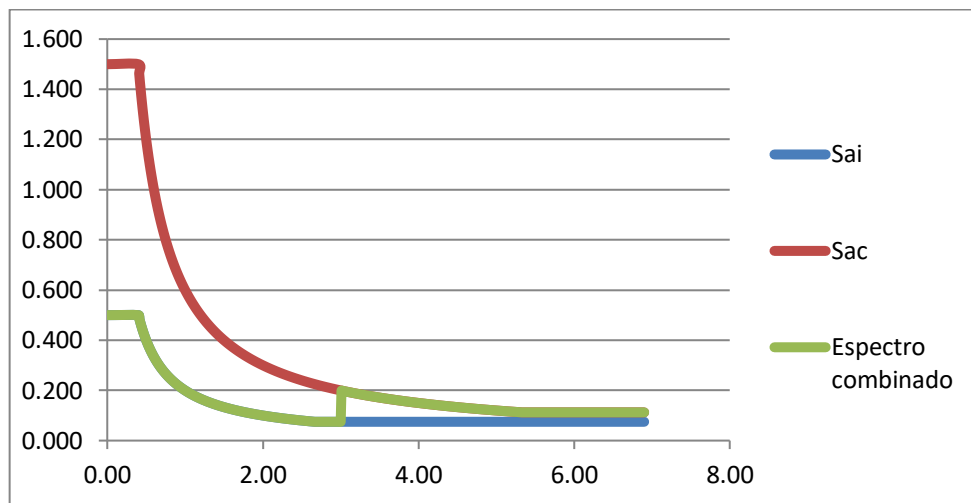


Figura 4.16 Espectro elástico reducido

Este procedimiento fue generado para zonas que tienen una aceleración de 0.45-g (Z4); sin embargo los tanques en estudio, están ubicados en distintos lugares, teniendo cada uno su respectivo valor de dicha aceleración. En la Tabla 4.14 se presentan los valores aproximados de los factores de zona para cada tanque, mediante el cual se generaron siete espectros siguiendo el mismo procedimiento (Ecs. (4.9) y (4.10)).

Tabla 4.14: Factores de Zona de los siete tanques

Tanques	1	2	3	4	5	6	7
Factor de Zona (Z)	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2

4.5.2 Expresión de Resultados

A partir de los espectros generados, se realizó el análisis espectral de los siete tanques en estudio (Tabla 4.1). Se consideró la regla CQC para la combinación de los modos, obteniendo las fuerzas cortantes sísmicas globales y los desplazamientos laterales máximos (Tablas 4.15, 4.16 y 4.17)

Tabla 4.15: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=0.6).

Tanque	V(Ton)			Desplazamiento máximo(m)		
	SAP2000	ANSYS	%Error	SAP2000	ANSYS	%Error
1	77.9775	79.5	1.915	0.0510	0.0485	-5.315
2	176.295	173.65	-1.523	0.0381	0.0371	-2.699
3	278.63	280.64	0.716	0.0472	0.0463	-1.944
4	111.885	111.535	-0.314	0.0723	0.0683	-5.783
5	56.955	58.1425	2.042	0.0638	0.0654	2.484
6	119.605	118.19	-1.197	0.0527	0.0534	1.404
7	327.64	323.925	-1.147	0.1008	0.1009	0.099

Tabla 4.16: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=1).

Tanque	V(Ton)			Desplazamiento máximo(m)		
	SAP2000	ANSYS	%Error	SAP2000	ANSYS	%Error
1	175.845	178	1.211	0.1153	0.1075	-7.209
2	351.38	338.66	-3.756	0.0765	0.0720	-6.250
3	549.22	536.64	-2.344	0.0925	0.0885	-4.520
4	260.19	257.95	-0.868	0.1575	0.1579	0.269
5	131.2675	131.685	0.317	0.1458	0.1481	1.587
6	254.3	249.43	-1.952	0.1121	0.1126	0.488
7	735.265	726.45	-1.213	0.2263	0.2262	-0.044

Tabla 4.17: Comparación de fuerza cortante y máximo desplazamiento (RH=1.4).

Tanque	V(Ton)			Desplazamiento máximo(m)		
	SAP2000	ANSYS	%Error	SAP2000	ANSYS	%Error
1	263.875	292.54	9.799	0.1623	0.1790	9.344
2	501.130	541.18	7.400	0.1030	0.1156	10.861
3	739.180	754.5	2.030	0.1252	0.1247	-0.401
4	389.115	426.105	8.681	0.2360	0.2610	9.579
5	194.900	212.9575	8.479	0.2166	0.2397	9.618
6	391.025	426.565	8.332	0.1725	0.1928	10.529
7	1103.365	1220.86	9.624	0.3401	0.3805	10.631

Los mismos resultados también son presentados de forma gráfica en las Figs. 4.17 y 4.18 para una mejor visualización.

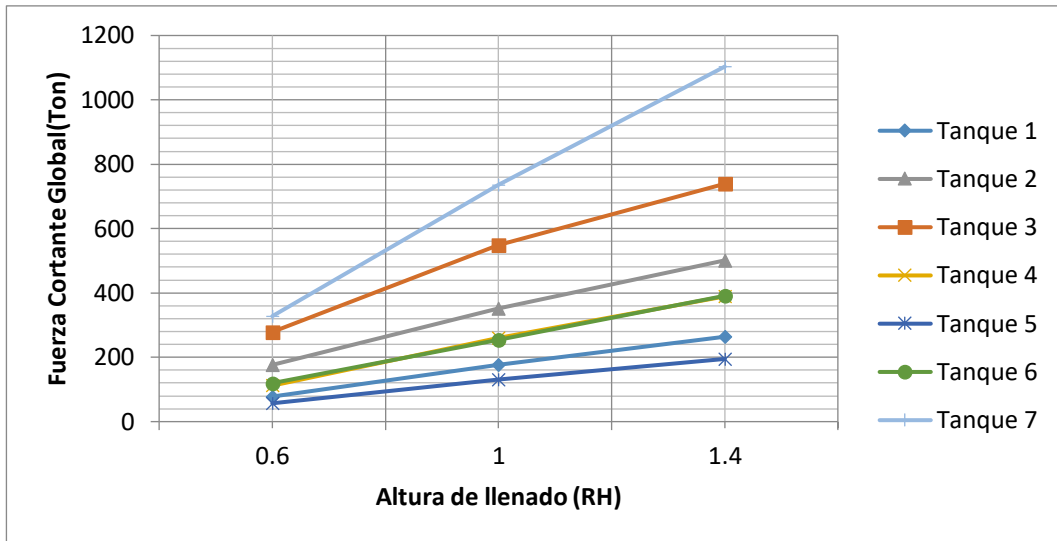


Figura 4.17 Fuerza cortante de los siete tanques

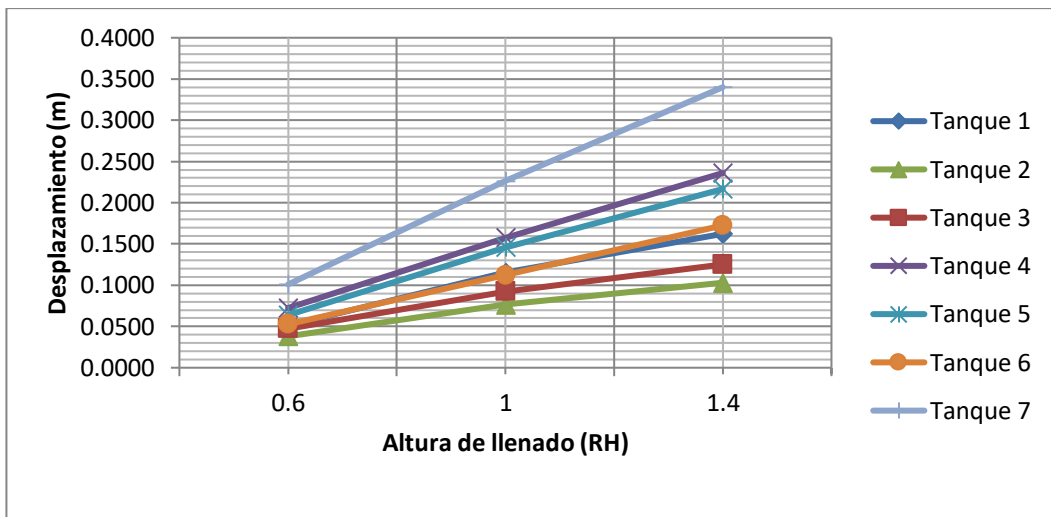


Figura 4.18 Desplazamiento lateral máximo de los siete tanques

4.5.3 Conclusiones

Los tanques de 1000 m³ (Tanques 3, 5 y 6) que son los de menor volumen, son los que aparentemente deberían tener las menores respuestas; sin embargo, se tienen diferencia entre ellos, debido principalmente a los distintos factores de zona y en menor medida a la rigidez del soporte. De la Fig. 4.17, se aprecia que el tanque 5 con un factor de zona de 0.1, tiene la menor fuerza cortante igual a 131.26 Ton a la altura llenado (RH) de 1; mientras que el tanque 3 con el mismo volumen y altura de llenado, pero con un factor de zona cuatro veces mayor, tiene un fuerza cortante igual a 549.22 Ton. La diferencia de zonas se evidencia de nuevo con los tanques de 1400 m³ (Tanques 1 y 2), en donde se tiene una

diferencia igual a 175.5 Ton para una altura de llenado de 1. Por otra parte, los tanques 4 y 6 presentaron prácticamente las mismas fuerzas sísmicas, esto debido a que mientras que el factor sísmico del tanque 6 es el doble que el otro, su volumen es la mitad, de tal forma que las sollicitaciones son compensadas. Aun así, se apreció pequeñas variaciones causados por las diferencias en la rigidez del soporte.

Finalmente, está el tanque 7, que es el de mayor volumen y tienen el máximo fuerza cortante sísmico con 735.265 Ton para una altura de llenado igual a 1. Además, es importante señalar la influencia de la altura de llenado en la fuerza cortante. En la Fig. 4.17 se observó que las fuerza cortantes aumentan en cada tanque con distintas pendientes, esto debido en primer lugar al volumen del líquido, ya que se tendría más masa y por consiguiente más fuerza. Otro factor es la rigidez del soporte, puesto que la pseudo-aceleración relacionada al periodo impulsivo tiene un mayor dominio a medida que los tanques aumentan su porcentaje de llenado.

Por otro lado, en los desplazamientos, la rigidez del soporte cobra mucha mayor importancia (Fig. 4.18). Si bien se tiene una tendencia similar al dado por el cortante, hay algunas diferencias, como es el caso del tanque 3, el cual es el que presenta el menor desplazamiento, a pesar de que la fuerza sísmica es el segundo más grande. Otro caso es el tanque 5, el cual pese a tener la más baja sollicitación sísmica, tiene uno de los desplazamientos más grandes llegando a 21.7 cm para una altura de llenado (RH) de 1.4.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUES ESFÉRICOS

En el Capítulo V se logró definir un modelo en SAP2000 que permite representar la interacción del fluido-estructura y se estudió las respuestas en un grupo reducido de tanques esféricos (Tabla 4.1). En este Capítulo se busca ampliar el análisis dinámico de tanques esféricos, para ello se estudiaron parámetros característicos de estas estructuras, de tal forma de que las variaciones de éstos generaron casos más generales.

5.1 ANALISIS DE PARAMETROS DE LA ESTRUCTURA

5.1.1 Propiedades inerciales del sistema:

Para resolver el problema dinámico de cualquier estructura, es esencial conocer sus propiedades inerciales, ya que estas definen la masa del sistema. En los tanques esféricos, la masa total la compone la masa de la estructura (esfera y estructura de soporte) y la masa del líquido almacenado.

Es posible despreciar la masa de la estructura de soporte debido a que es mucho menor que la masa de la esfera. Por tal razón, se realizó un análisis de sensibilidad de los siete tanques de la Tabla 4.1. En la Tabla 5.1 se aprecia la influencia de la masa en el periodo natural de vibración de la estructura.

Tabla 5.1: Análisis de Sensibilidad de masas de la estructura

ID	Periodo Fundamental de Vibración (s)		
	M_T (Masa Esfera + Soporte)	M_e (Masa Esfera)	%Error = $(M_e)/(M_T) - 1$
1	0.769	0.7655	-0.455
2	0.500	0.4978	-0.437
3	0.265	0.2607	-1.498
4	0.812	0.8064	-0.651
5	0.934	0.9319	-0.234
6	0.477	0.4732	-0.756
7	0.620	0.6144	-0.902

Según la Tabla 5.1 es factible despreciar el aporte de la masa de la estructura de soporte en la masa total, debido a que el error cometido es menor a 2%. De este modo, la masa total dependerá únicamente de la masa de la esfera, por lo que

se contempló un parámetro adimensional que relacione el diámetro externo y espesor de la esfera ($DE = D/t_{esf}$). El valor de este parámetro, indica que mientras sea más bajo, el espesor irá aumentando, por ende, la estructura superior será más rígida generando una especie de diafragma.

Por otra parte, la masa del líquido se dividió en dos masas. Según la Tabla 2.3, se observó que estas masas solo dependen de la altura de llenado, o también llamado parámetro RH (Fig. 5.1 c).

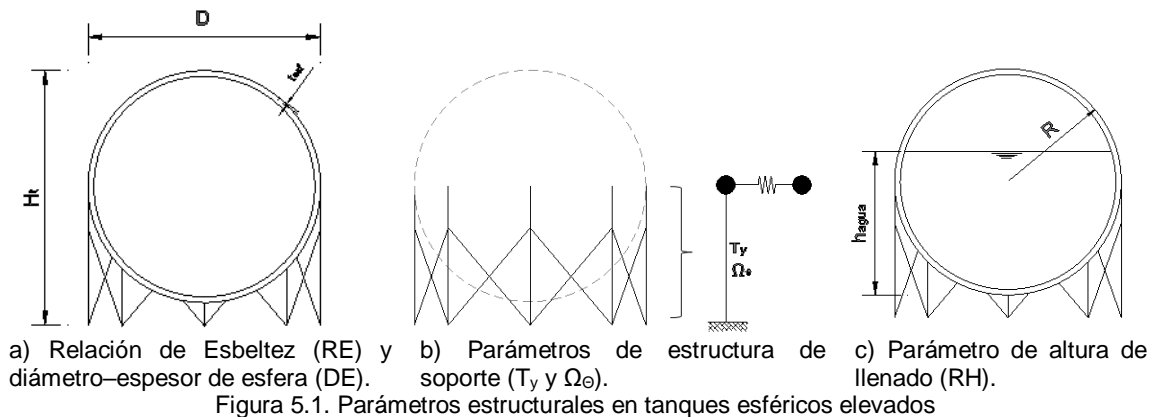
5.1.2 Parámetros relacionados al comportamiento dinámico estructural:

En estas estructuras, las dimensiones preliminares más generales son tanto el diámetro de la esfera, como la altura total (Fig. 5.1 a). Si se tuvieran dos tanques de mismo volumen de almacenamiento, la altura total de la estructura definiría su rigidez, por lo que se propuso relacionar estos dos valores, denominándola parámetro de esbeltez ($RE = Ht/D$). Para los siete tanques en estudio se observó que este valor varía entre 1.08 a 1.25.

En relación a la estructura de soporte del sistema, de acuerdo con las Ecs. (4.5) y (4.7) las rigideces lateral y torsional se determinan a través del número de columnas, el área del arriostre y la inercia de la columna. A partir de estas características se pueden generar una gran cantidad de configuraciones de tanques, para poder estudiarlos de manera general y observando la Ec. (4.2), se planteó considerar directamente las rigideces globales del sistema como parámetros dinámicos. Como primer parámetro se consideró el periodo natural de vibración en la dirección Y (T_y), en donde está incluida la rigidez lateral. De forma similar, para considerar la rigidez torsional se consideró el grado de acoplamiento torsional (Ω_θ), el cual es una relación entre la frecuencia rotacional (ω_θ) y la frecuencia lateral (ω_y). Con estas consideraciones queda definida la influencia del soporte en el sistema (Fig. 5.1 b). Revisando estos parámetros en los tanques reales, se notó que el periodo T_y varía entre 0.26 s a 0.94 s, mientras que el grado de acoplamiento varía entre 1.47 y 1.54.

La rigidez equivalente para la masa convectiva del agua está determinada por su respectiva masa y frecuencia natural de vibración (Ec. (4.1)). A partir esto, se

observó que la rigidez equivalente puede definirse mediante el parámetro de la altura de llenado (RH).



5.1.3 Radio de giro

El radio de giro relaciona la distribución de masas de la estructura con respecto a su eje centroidal, siendo es un valor característico que define su comportamiento torsional. En busca de definir todos los valores de la ecuación dinámica del tanque (Ec. (4.2)), faltarían precisar los valores referentes al comportamiento torsional. La excentricidad accidental para el presente caso es el 5% del diámetro externo y el valor del radio de giro de la estructura está definido por la distribución de las masas de la esfera y del soporte. De forma análoga al análisis de sensibilidad de la Tabla 11, se realizó otro análisis para asegurar que el radio de giro de la esfera puede representar a toda la estructura (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Análisis de Sensibilidad del radio de giro de la estructura

ID	$R_{Esf. + Sop.}$	$R_{Esf.}$	%Error = $(R_{Esf.}) / (R_{Esf. + Sop.}) - 1$
1	5.759	5.675	-1.456
2	5.737	5.634	-1.793
3	5.277	5.062	-4.077
4	6.506	6.409	-1.481
5	5.094	5.062	-0.615
6	5.123	5.021	-1.979
7	7.504	7.348	-2.068

De la Tabla 5.2, se concluye que al tener un porcentaje de error menor a 5%, efectivamente el radio de giro de la estructura puede ser descrito considerando solo la esfera, el cual depende del espesor y el radio. Con el parámetro DE, el

radio de giro queda definido. En resumen se presentan estos cinco parámetros en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Parámetros de tanques esféricos elevados

RE	DE	T_y	Ω_θ	RH
$\frac{H_t}{D}$	$\frac{D}{t_{\text{esf}}}$	T_y	$\frac{\omega_\theta}{\omega_y}$	$\frac{H_{\text{agua}}}{R}$

Dónde RE es la relación de esbeltez, DE es la relación diámetro-espesor de la esfera, T_y el periodo de la estructura en el eje Y, Ω_θ es el grado de acoplamiento torsional, y RH es la relación de altura de llenado.

5.2 GENERACIÓN DE TANQUES A ANALIZAR

5.2.1 Variación de parámetros

Con los parámetros definidos en la Tabla 5.3, se presentan los valores correspondientes para los tanques reales mostrados en la Tabla 4.1 (Tabla 5.4).

Tabla 5.4: Tanques esféricos parametrizados

ID	RE	DE _e	T_y	Ω_θ	RH
1	1.216	295.74	0.769	1.474	Var.
2	1.181	212.31	0.500	1.538	Var.
3	1.244	488.19	0.265	1.451	Var.
4	1.159	356.82	0.812	1.521	Var.
5	1.161	275.56	0.934	1.428	Var.
6	1.150	361.76	0.477	1.537	Var.
7	1.089	473.68	0.620	1.535	Var.

El parámetro de esbeltez (RE) oscila entre 1.08 y 1.25, mostrando que estas estructuras no necesitan una gran altura en las columnas, ya que generarían una mayor esbeltez y desplazamiento elevados. En relación al espesor de la esfera, esta varía entre 0.0254m y 0.065m (Tabla 4.1), siendo pequeños en comparación con su diámetro. La relación DE se encuentra entre 212.31 y 488.19.

En los parámetros asociadas a la rigidez del soporte, el periodo de vibración de la estructura (T_y) tiene un mayor grado de variación, teniendo un valor mínimo de

0.26s y alcanzando un valor máximo de 0.94s. A medida que el periodo T_y aumenta la fuerza sísmica correspondiente disminuye; sin embargo, la rigidez lateral también disminuye. Realizando un balance, los tanques con mayor periodo T_y tienden a desplazarse más, a pesar de tener una menor fuerza sísmica, por ello son utilizados en zonas con bajo riesgo sísmico. Por otro lado el grado de acoplamiento torsional (Ω_θ) presenta menor cambio, oscilando entre 1.474 y 1.537.

Otro aspecto a tener en cuenta, es el factor sísmico Z asociado a la aceleración del sitio; como ya se había comentado, estos tanques fueron extraídos de lugares donde cada uno tiene aceleraciones características, estos varían de 0.1g a 0.4g. Si se realiza una comparación con la norma peruana E0.30, se nota que estas aceleraciones abarcan las 4 zonas sísmicas definidas (SENCICO,2016).

5.2.2 Número de casos generados

De la Tabla 5.4, se extrajeron en un principio tres valores para cada parámetro, de forma que abarque la familia reducida de tanques reales; sin embargo, se consideró trabajar con 4 valores para los periodos de vibración característicos (T_y) de cada tanque, esto debido a la importancia de este parámetro en el comportamiento sísmico de la estructura y por la variabilidad existente de la sollicitación sísmica que se tiene en el país (4 zonas sísmicas). El valor máximo considerado fue de 0.6s para asegurar un buen comportamiento de los tanques con menor sollicitación sísmica, mientras que el valor mínimo en un inicio fue planteado que sea de 0.2s; no obstante, se obtuvieron desplazamientos relativamente altos para las zona sísmica 4, por lo que al final se optó por utilizar el periodo 0.1s como el límite inferior. Para los valores del parámetro RH se consideró que los tanques tengan porcentajes de volumen de 21.6%, 50% y 90%. Los valores de los parámetros elegidos son presentados en la Tabla 5.5

Tabla 5.5: Parámetros variables del tanque

N°	RE	DE _{esf}	T_y	Ω_θ	RH
1	1.10	200	0.1	1.40	0.6
2	1.15	300	0.2	1.45	1.0
3	1.2	400	0.4	1.55	1.6
4	-	-	0.6	-	-

(-) No hay dato.

A partir de estos valores se puede analizar una serie de modelos, que involucren cada uno de ellos a partir de una combinatoria. En total se generarían 324 casos; sin embargo, debido a la diversidad geográfica y sísmica que presenta el territorio nacional, se consideró utilizar los 4 factores sísmicos Z dados en la norma E.030. Reforzando esta consideración, es importante comentar que las refinerías se encuentran en distintas partes del país, como en los departamentos de Piura, Ica y Loreto. Con esto los casos se cuadruplicarían alcanzando un total de 1296. Además, es necesario verificar que cada una de estas combinaciones estén asociados con modelos que representen dimensiones de elementos físicamente reales. Como ejemplo, se podría encontrar que para una determinada combinación se tenga una columna que tenga una dimensión menor que los arriostres, lo cual es poco común en la práctica.

La importancia de este análisis reside en el estudio de las respuestas de interés al variar cada parámetro, a partir del cual se genera una gran base de datos que posibilita la obtención de las respuestas de interés para una gran cantidad de tanques que estén dentro de estos márgenes, de una manera rápida y confiable.

5.3 DEFINICION DE MODELOS PARAMÉTRICOS

En los análisis sísmicos de los modelos paramétricos, se utilizaron modelos patrones, con la finalidad de poder variar algunas dimensiones logrando la rigidez global necesaria, tanto lateral como rotacional. Para ello, se consideró generar estos modelos con las tres configuraciones observadas en los tanques reales; es decir, se utilizaron modelos de seis, ocho y diez columnas.

5.3.1 Propiedades Inerciales

Las características geométricas que definieron el modelo paramétrico de los tanques están presentadas en la Fig. 5.2. Se consideró que los modelos tengan una altura total (H_t) de 15 m y que la altura vertical proyectada del arriostre (h_{ar}) sea 0.7 veces la altura de la columna (h_c), ya que esta es la relación aproximada que se tiene para los tanques reales.

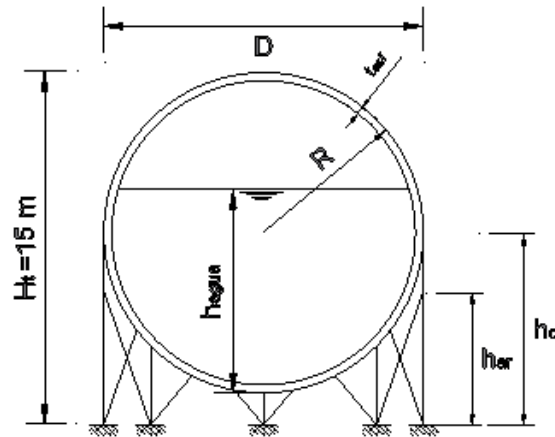


Figura 5.2. Parámetros estructurales en tanques esféricos elevados

Todos estos valores geométricos pueden ser expresados en función de los parámetros definidos y de la altura total del tanque (Ec. (5.1) a Ec. (5.4)).

$$D_{\text{esf}} = \frac{H_t}{RE} \quad (5.1)$$

$$e_{\text{esf}} = \frac{H_t}{RE \cdot DE_{\text{esf}}} \quad (5.2)$$

$$H_{\text{col}} = H_t \left(1 - \frac{1}{2 \cdot RE}\right) \quad (5.3)$$

$$h_{\text{ar}} = 0.7 H_t \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot RE}\right) \quad (5.4)$$

Para definir las componentes convectivas e impulsivas del líquido, y su correspondiente rigidez equivalente, se necesita conocer la masa total del líquido. A partir de la relación de la altura de llenado (RH), es posible obtenerlo con las Ecs. (5.5) y (5.6).

$$H_{\text{agua}} = \frac{H_t}{RE} \cdot RH \quad (5.5)$$

$$M_L = \gamma_{\text{ag}} \cdot (H_{\text{agua}})^3 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot RH} - \frac{1}{3}\right) \quad (5.6)$$

5.3.2 Propiedades de soportes

Para lograr las dimensiones de las columnas y arriostres es imprescindible conocer las rigideces lateral y torsional de la estructura de soporte. Estos valores están determinados por la masa traslacional y rotacional de la estructura; y además por los parámetros T_y y Ω_θ (Ec. (5.7) a Ec. (5.10)).

$$M_T = \gamma_{ac} \cdot \left(\frac{H_t}{RE}\right)^3 \cdot \frac{\pi}{DE} \quad (5.7)$$

$$I_o = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{H_t}{RE \cdot 2}\right)^2 \cdot \left(\gamma_{ac} \cdot \left(\frac{H_t}{RE}\right)^3 \cdot \frac{\pi}{DE}\right) \quad (5.8)$$

$$K = \left(\frac{2\pi}{T_y}\right)^2 \cdot M_T \quad (5.9)$$

$$K_\theta = \left(\frac{2\pi}{T_y} \cdot \Omega_\theta\right)^2 \cdot I_o \quad (5.10)$$

De esta manera, para cada combinación, se tienen rigideces laterales y rotacionales características. Por otra parte, con las Ecs (4.5) y (4.7) se pueden obtener los valores de estas rigideces, a partir de las dimensiones de la columna y el arriostre. De esta forma se realizan iteraciones de la inercia de la columna y el área del arriostre hasta lograr igualar estas expresiones. Este procedimiento se realizó mediante una hoja Excel, en donde para verificar estas dimensiones se cuantificó un porcentaje de error (Ec. (5.11)) entre las rigideces laterales “teóricas” o los dados por los parámetros y las rigideces generadas a partir de las dimensiones del soporte (columnas y arriostres). Todos los resultados obtenidos para las tres configuraciones propuestas son mostrados en el Anexo C. Sin embargo, a modo de ejemplo se muestran en las Tablas 5.6 a 5.8 los correspondientes al modelo de 6 soportes.

$$\%Error = \left[\frac{K_{lat(p)}}{K_{lat(ex)}} - 1 \right] \times 100 \quad (5.11)$$

Dónde $K_{lat(p)}$ es la rigidez lateral del soporte según parámetros y $K_{lat(ex)}$ es la rigidez lateral del soporte según expresiones teóricas.

Tabla 5.6: Inercia de columna (m^4) – Modelo 6 soportes

T_y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω_θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.0235	0.0174	0.0131	0.0225	0.0168	0.0126	0.0225	0.0161	0.012
	1.45	0.0235	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195
	1.55	0.0235	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195
0.2	1.40	0.0065	0.008	0.008	0.0063	0.008	0.008	0.006	0.008	0.008
	1.45	0.008	0.0079	0.0059	0.008	0.0077	0.0057	0.008	0.0074	0.0055
	1.55	0.008	0.008	0.0063	0.008	0.008	0.0061	0.008	0.0078	0.0059
0.4	1.40	0.0016	0.0011	0.0008	0.0016	0.001	0.0008	0.0015	0.001	0.0008
	1.45	0.003	0.002	0.0015	0.0029	0.0019	0.0014	0.0028	0.0018	0.0014
	1.55	0.0031	0.0021	0.0016	0.003	0.002	0.0015	0.0029	0.002	0.0015
0.6	1.40	0.0007	0.0005	0.0004	0.0007	0.0005	0.0003	0.0007	0.0004	0.0003
	1.45	0.0013	0.0008	0.0005	0.0013	0.0007	0.0004	0.0012	0.0007	0.0004
	1.55	0.0014	0.0009	0.0005	0.0014	0.0008	0.0005	0.0013	0.0007	0.0004

Tabla 5.7: Área de arriostres (m^2) – Modelo 6 soportes

T_y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω_θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.1222	0.0646	0.0485	0.1176	0.0611	0.0458	0.1012	0.0583	0.0437
	1.45	0.1346	0.058	0.0301	0.1299	0.0515	0.0271	0.1114	0.0458	0.0245
	1.55	0.141	0.0659	0.0338	0.135	0.0584	0.0304	0.1295	0.0519	0.0275
0.2	1.40	0.0242	0.0077	0.0045	0.0229	0.007	0.0041	0.0219	0.0063	0.0037
	1.45	0.0191	0.0083	0.0062	0.017	0.0077	0.0058	0.0153	0.0073	0.0055
	1.55	0.0215	0.0092	0.0066	0.0192	0.0083	0.0061	0.0172	0.0077	0.0058
0.4	1.40	0.0061	0.004	0.003	0.0057	0.0038	0.0029	0.0055	0.0036	0.0027
	1.45	0.0031	0.0021	0.0016	0.0029	0.0019	0.0014	0.0027	0.0018	0.0014
	1.55	0.0033	0.0022	0.0016	0.0031	0.002	0.0015	0.0029	0.0019	0.0014
0.6	1.40	0.0027	0.0018	0.0013	0.0025	0.0017	0.0013	0.0024	0.0016	0.0012
	1.45	0.0014	0.001	0.001	0.0013	0.001	0.001	0.0012	0.001	0.001
	1.55	0.0015	0.001	0.001	0.0014	0.001	0.001	0.0013	0.001	0.001

Tabla 5.8: Diferencia de rigideces laterales (%) – Modelo 6 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	-0.98	0.00	0.00	-1.03	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.00
	1.45	-4.05	-2.54	-1.41	-4.09	-2.33	-1.31	-3.74	-2.09	-1.22
	1.55	-5.50	-7.92	-7.25	-5.26	-7.79	-7.19	-8.55	-7.65	-7.13
0.2	1.40	0.00	2.33	1.74	0.00	2.35	1.65	0.00	2.35	1.52
	1.45	-2.08	-1.21	-1.21	-1.90	-1.18	-1.18	-1.71	-1.15	-1.15
	1.55	-7.65	-7.18	-7.21	-7.54	-7.17	-7.19	-7.42	-7.16	-7.16
0.4	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	-1.21	-1.21	-1.21	-1.18	-1.18	-1.18	-1.15	-1.15	-1.15
	1.55	-7.21	-7.21	-7.21	-7.19	-7.19	-7.19	-7.16	-7.16	-7.16
0.6	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	-1.21	-1.27	-2.07	-1.18	-1.35	-2.30	-1.15	-1.47	-2.52
	1.55	-7.21	-7.25	-8.00	-7.19	-7.34	-8.22	-7.16	-7.45	-8.41

De estos resultados se observa que para las configuraciones de seis y ocho columnas, a medida que se aumenta el grado de acoplamiento, el porcentaje de error se hace mayor, alcanzando valores cercanos a 8%. Por el contrario, para la configuración de 10 columnas, se aprecia que el máximo porcentaje de error se da cuando el periodo de vibración lateral (T_y) es bajo y se tiene un grado de acoplamiento bajo. Estas diferencias están directamente relacionadas con la configuración, puesto que los que tienen una menor cantidad de columnas, tendrán una menor fuerza resistente al giro y por ende menor grado de acoplamiento (Ω_θ); por el contrario, el de 10 columnas alcanzara valores de rigidez torsional más altos sin necesidad de considerar secciones elevadas. A pesar de estas diferencias, estos porcentajes son menores a 10%, por lo que todos los casos son estudiados.

Asimismo, se realizó una verificación de los valores de I_{col} y A_{ar} calculados con los correspondientes a los tanques reales (Tabla 5.15). Para el primero, los valores “reales” varían entre 0.0001 y 0.0044, mientras que para el segundo la variación esta entre 0.0003 y 0.008. De las Tablas 5.6 ~ 5.8, se notó que una gran cantidad de valores se encuentran en dicho rango, mientras que los demás son más grandes, pero no llegan a ser excesivos y por tanto pueden ser representados con dimensiones usadas normalmente.

Tabla 5.9: Inercia de columna y área de arriostre-Tanques reales

ID	Icol(m4)	Aar(m2)
1	0.0004	0.0028
2	0.0005	0.0082
3	0.0022	0.0076
4	0.0007	0.0020
5	0.0001	0.0003
6	0.0003	0.0025
7	0.0013	0.0032
8	0.0044	0.0010

Se utilizaron secciones tubulares para las columnas y secciones rectangulares para los arriostres. Para definir las dimensiones exactas de la columna, se consideró trabajar con radio de giro fijos, de esta forma junto con la inercia se puede obtener el diámetro y espesor. El radio de giro elegido para cada columna fue de 0.20, tomando este valor como uno intermedio entre los tanques reales. Para los arriostres se utilizó un espesor fijo de 0.025 para todas las configuraciones.

5.4 ANÁLISIS SÍSMICO DE FAMILIA DE TANQUES

En primer lugar se realizó el análisis modal de los modelos sin considerar la influencia del líquido, esto para verificar que las dimensiones calculadas de las columnas y arriostres nos den los valores de correctos de periodos. Se muestran las tablas con los periodos lateral y torsional para cada modelo y para cada tipo de configuración (Tabla 5.16, 5.17 y 5.18). En la representación gráfica de estos datos, se muestran con líneas de tendencia los valores paramétricos teóricos para cada grado de acoplamiento, de esta forma se observa con más claridad que tan cercanos se encuentran los valores (Figs. 5.3, 5.4 y 5.5).

Tabla 5.16: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos
para la configuración de 6 soportes

T_y Ω_θ	0.1			0.2			0.4			0.6		
	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ
1.4	11110	0.106	0.079	11210	0.205	0.150	11310	0.402	0.295	11410	0.601	0.440
	12110	0.108	0.080	12210	0.211	0.153	12310	0.402	0.294	12410	0.601	0.440
	13110	0.108	0.080	13210	0.214	0.157	13310	0.402	0.294	13410	0.601	0.440
	21110	0.107	0.080	21210	0.205	0.151	21310	0.402	0.295	21410	0.601	0.440
	22110	0.109	0.080	22210	0.212	0.154	22310	0.402	0.295	22410	0.601	0.440
	23110	0.109	0.081	23210	0.216	0.159	23310	0.402	0.295	23410	0.601	0.440
	31110	0.108	0.080	31210	0.205	0.151	31310	0.403	0.295	31410	0.601	0.440
	32110	0.109	0.081	32210	0.214	0.156	32310	0.403	0.295	32410	0.601	0.440
	33110	0.110	0.081	33210	0.218	0.161	33310	0.403	0.295	33410	0.601	0.440
1.45	11120	0.105	0.078	11220	0.203	0.148	11320	0.402	0.288	11420	0.599	0.429
	12120	0.107	0.079	12220	0.207	0.150	12320	0.402	0.288	12420	0.599	0.429
	13120	0.111	0.081	13220	0.207	0.150	13320	0.402	0.288	13420	0.595	0.430
	21120	0.105	0.079	21220	0.204	0.148	21320	0.403	0.289	21420	0.600	0.429
	22120	0.109	0.080	22220	0.208	0.151	22320	0.403	0.289	22420	0.598	0.429
	23120	0.113	0.083	23220	0.208	0.151	23320	0.403	0.289	23420	0.595	0.430
	31120	0.106	0.079	31220	0.206	0.149	31320	0.403	0.289	31420	0.600	0.430
	32120	0.110	0.081	32220	0.209	0.152	32320	0.403	0.290	32420	0.598	0.429
	33120	0.115	0.085	33220	0.210	0.152	33320	0.403	0.290	33420	0.594	0.431
1.55	11130	0.104	0.078	11230	0.198	0.144	11330	0.391	0.280	11430	0.582	0.417
	12130	0.104	0.077	12230	0.201	0.146	12330	0.391	0.280	12430	0.582	0.417
	13130	0.108	0.079	13230	0.202	0.146	13330	0.391	0.281	13430	0.579	0.417
	21130	0.105	0.078	21230	0.199	0.145	21330	0.391	0.281	21430	0.583	0.417
	22130	0.106	0.078	22230	0.203	0.147	22330	0.391	0.281	22430	0.582	0.417
	23130	0.109	0.081	23230	0.203	0.147	23330	0.391	0.281	23430	0.579	0.418
	31130	0.104	0.078	31230	0.200	0.145	31330	0.392	0.282	31430	0.583	0.418
	32130	0.107	0.079	32230	0.204	0.148	32330	0.392	0.282	32430	0.582	0.417
	33130	0.111	0.082	33230	0.204	0.148	33330	0.392	0.282	33430	0.578	0.418

Tabla 5.17: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 8 soportes

T_y Ω_θ	0.1			0.2			0.4			0.6		
	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ
1.4	11110	0.110	0.076	11210	0.205	0.145	11310	0.402	0.287	11410	0.601	0.429
	12110	0.110	0.077	12210	0.216	0.149	12310	0.402	0.287	12410	0.601	0.429
	13110	0.109	0.077	13210	0.217	0.154	13310	0.402	0.287	13410	0.601	0.429
	21110	0.111	0.077	21210	0.205	0.146	21310	0.402	0.287	21410	0.601	0.429
	22110	0.111	0.078	22210	0.217	0.151	22310	0.402	0.287	22410	0.601	0.429
	23110	0.110	0.078	23210	0.220	0.157	23310	0.402	0.287	23410	0.601	0.429
	31110	0.112	0.078	31210	0.206	0.146	31310	0.402	0.287	31410	0.601	0.429
	32110	0.112	0.079	32210	0.219	0.153	32310	0.402	0.287	32410	0.601	0.429
	33110	0.111	0.079	33210	0.222	0.160	33310	0.402	0.287	33410	0.601	0.429
1.45	11120	0.110	0.076	11220	0.205	0.142	11320	0.403	0.277	11420	0.601	0.414
	12120	0.109	0.076	12220	0.205	0.142	12320	0.402	0.277	12420	0.601	0.414
	13120	0.108	0.076	13220	0.205	0.142	13320	0.402	0.277	13420	0.601	0.414
	21120	0.109	0.076	21220	0.206	0.142	21320	0.403	0.278	21420	0.602	0.414
	22120	0.109	0.077	22220	0.206	0.142	22320	0.403	0.278	22420	0.602	0.414
	23120	0.109	0.077	23220	0.215	0.152	23320	0.403	0.278	23420	0.602	0.414
	31120	0.111	0.077	31220	0.206	0.142	31320	0.403	0.278	31420	0.602	0.415
	32120	0.110	0.077	32220	0.206	0.142	32320	0.403	0.278	32420	0.602	0.415
	33120	0.109	0.077	33220	0.217	0.153	33320	0.403	0.278	33420	0.602	0.414
1.55	11130	0.110	0.076	11230	0.202	0.138	11330	0.395	0.268	11430	0.589	0.399
	12130	0.108	0.076	12230	0.204	0.139	12330	0.395	0.268	12430	0.589	0.399
	13130	0.109	0.075	13230	0.204	0.139	13330	0.395	0.268	13430	0.589	0.399
	21130	0.109	0.076	21230	0.203	0.138	21330	0.396	0.268	21430	0.589	0.399
	22130	0.108	0.075	22230	0.205	0.140	22330	0.396	0.268	22430	0.589	0.399
	23130	0.111	0.076	23230	0.205	0.140	23330	0.396	0.269	23430	0.589	0.399
	31130	0.109	0.075	31230	0.204	0.139	31330	0.396	0.269	31430	0.590	0.400
	32130	0.108	0.076	32230	0.206	0.141	32330	0.396	0.269	32430	0.590	0.400
	33130	0.113	0.078	33230	0.206	0.141	33330	0.396	0.269	33430	0.590	0.400

Tabla 5.18: Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 10 soportes

T_y Ω_θ	0.1			0.2			0.4			0.6		
	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ	Modelo	T_{Lat}	T_θ
1.4	11110	0.112	0.074	11210	0.218	0.145	11310	0.405	0.285	11410	0.602	0.428
	12110	0.112	0.074	12210	0.220	0.152	12310	0.403	0.286	12410	0.603	0.429
	13110	0.111	0.074	13210	0.221	0.159	13310	0.403	0.286	13410	0.602	0.428
	21110	0.113	0.075	21210	0.220	0.147	21310	0.406	0.285	21410	0.604	0.428
	22110	0.113	0.075	22210	0.222	0.154	22310	0.405	0.285	22410	0.604	0.429
	23110	0.112	0.075	23210	0.224	0.162	23310	0.405	0.286	23410	0.603	0.428
	31110	0.114	0.076	31210	0.221	0.148	31310	0.407	0.284	31410	0.606	0.427
	32110	0.114	0.076	32210	0.224	0.157	32310	0.407	0.285	32410	0.607	0.428
	33110	0.113	0.076	33210	0.227	0.166	33310	0.406	0.285	33410	0.606	0.427
1.45	11120	0.111	0.074	11220	0.207	0.140	11320	0.402	0.277	11420	0.601	0.414
	12120	0.111	0.073	12220	0.216	0.148	12320	0.402	0.277	12420	0.601	0.414
	13120	0.109	0.073	13220	0.217	0.154	13320	0.402	0.277	13420	0.602	0.414
	21120	0.112	0.074	21220	0.208	0.140	21320	0.403	0.277	21420	0.602	0.414
	22120	0.111	0.074	22220	0.218	0.151	22320	0.403	0.277	22420	0.602	0.414
	23120	0.110	0.074	23220	0.219	0.156	23320	0.403	0.277	23420	0.602	0.414
	31120	0.113	0.074	31220	0.217	0.145	31320	0.403	0.277	31420	0.603	0.414
	32120	0.113	0.075	32220	0.220	0.153	32320	0.403	0.277	32420	0.602	0.414
	33120	0.112	0.074	33220	0.222	0.158	33320	0.403	0.277	33420	0.602	0.414
1.55	11130	0.111	0.073	11230	0.206	0.136	11330	0.400	0.263	11430	0.597	0.392
	12130	0.111	0.073	12230	0.206	0.136	12330	0.400	0.263	12430	0.597	0.392
	13130	0.110	0.073	13230	0.206	0.136	13330	0.400	0.263	13430	0.597	0.392
	21130	0.111	0.073	21230	0.207	0.136	21330	0.401	0.263	21430	0.597	0.392
	22130	0.111	0.073	22230	0.207	0.136	22330	0.401	0.263	22430	0.597	0.392
	23130	0.112	0.074	23230	0.207	0.137	23330	0.401	0.263	23430	0.597	0.392
	31130	0.111	0.073	31230	0.208	0.137	31330	0.401	0.264	31430	0.598	0.392
	32130	0.111	0.073	32230	0.208	0.137	32330	0.401	0.264	32430	0.598	0.392
	33130	0.114	0.076	33230	0.208	0.137	33330	0.401	0.264	33430	0.598	0.392

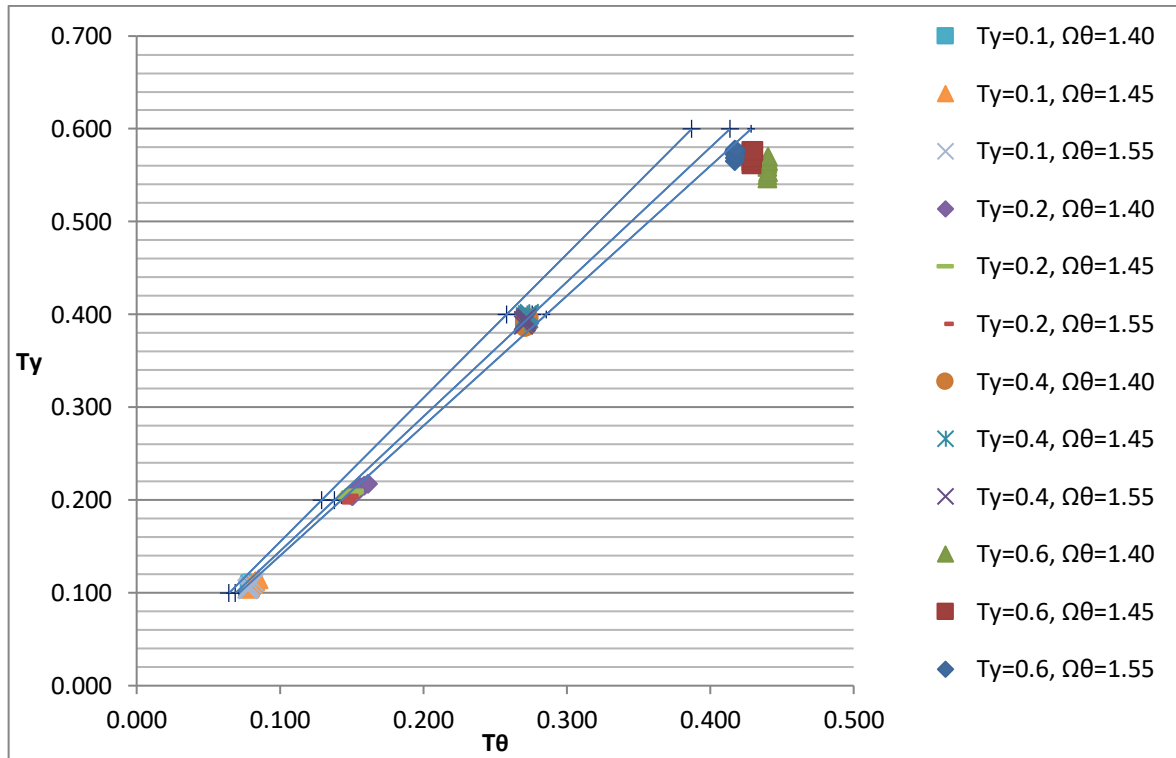


Figura 5.3. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 6 soportes

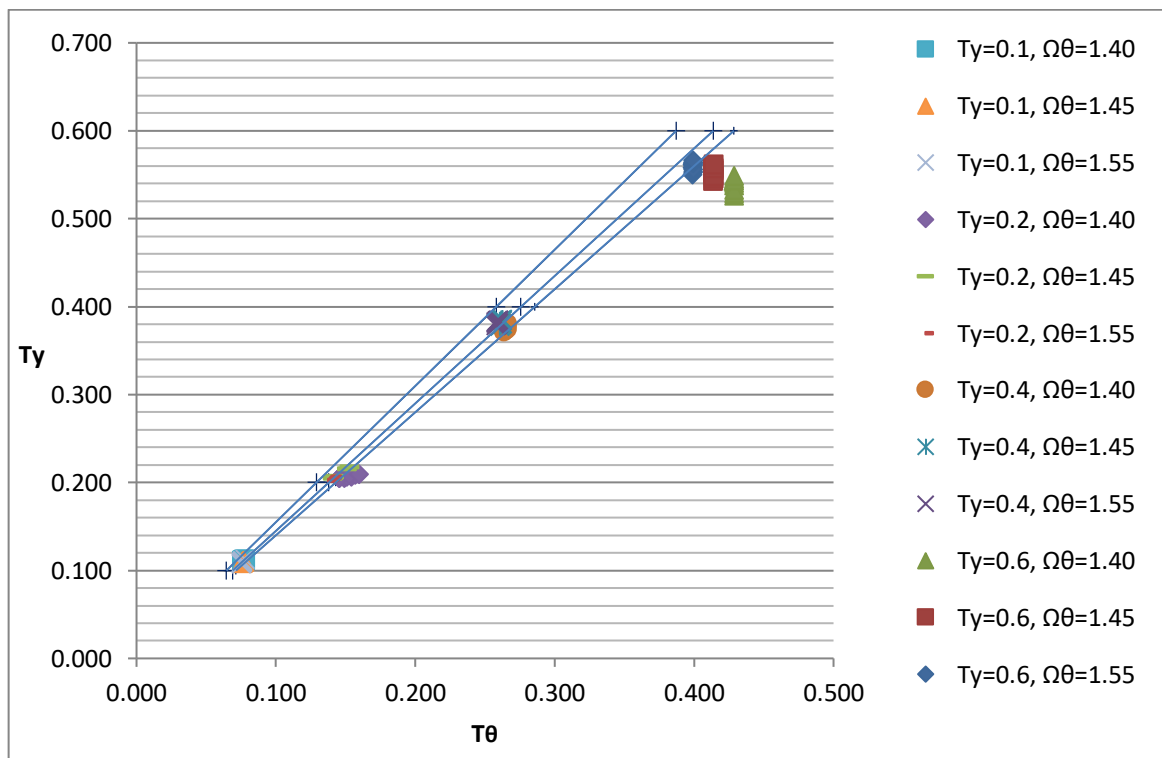


Figura 5.4. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 8 soportes

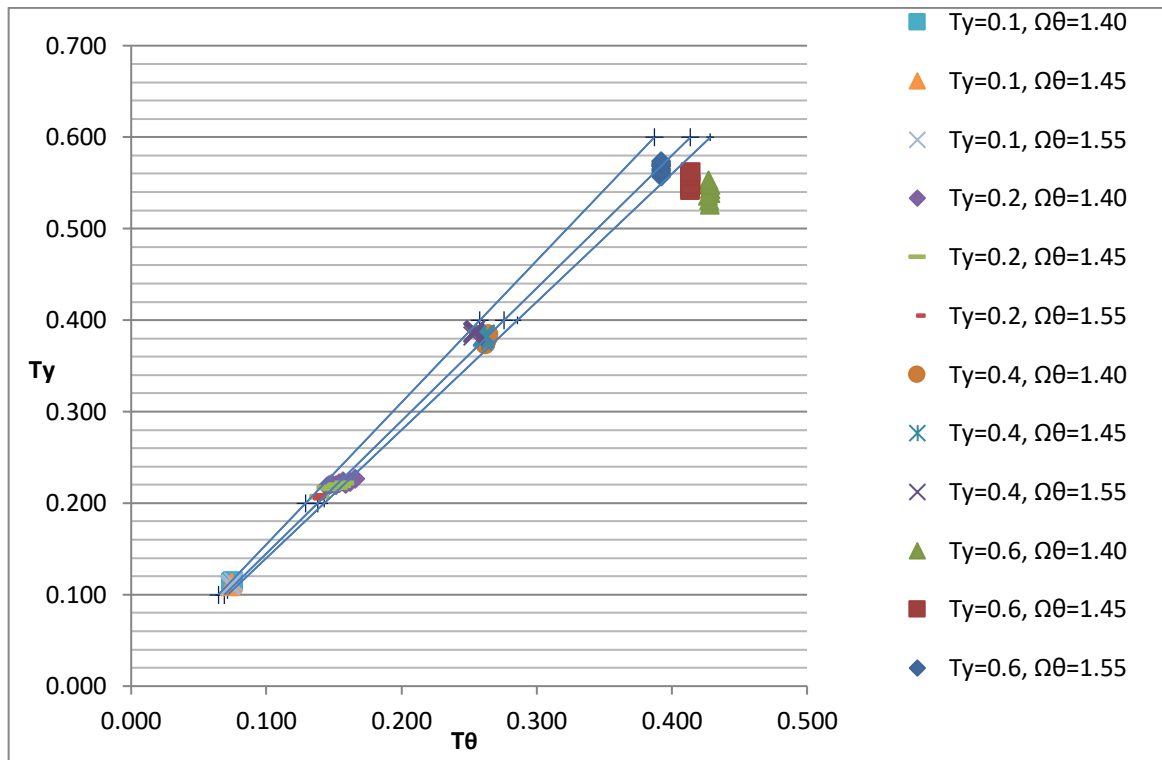


Figura 5.5. Periodos traslacionales y rotacionales de modelos paramétricos para la configuración de 10 soportes

De las Figs. 5.3, 5.4 y 5.5, se aprecia que para los modelos con periodos laterales T_y de 0.1s y 0.2s, se obtienen buenas aproximaciones con las dimensiones calculadas. Las diferencias crecen a medida que el periodo lateral aumenta. Sin embargo, estas diferencias no llegan a ser excesivas, alcanzando diferencias menores al 15%, por lo que se consideró apropiados para continuar con los análisis.

Teniendo definidos los casos paramétricos, se procedió a realizar el análisis sísmico modal espectral con los 4 espectros generados para cada zona. Se utilizó el método CQC para la combinación de los modos. Los principales resultados son discutidos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos del análisis sísmico espectral de todos los modelos paramétricos definidos en el Capítulo V. Para los análisis se utilizaron modelos de elementos finitos, incluyendo sistemas masa–resorte para simular la interacción fluido-estructura. Los principales resultados a comparar fueron los periodos de vibración, los resultados globales y locales. Para los resultados globales se revisó las cortantes basales, los momentos volcantes y los desplazamientos máximos; mientras que los resultados locales observados fueron los momentos flectores y esfuerzo cortante para las columnas y la fuerza axial para los arriostres. Cabe mencionar que los esfuerzos locales fueron calculados considerando que los arriostres trabajan en compresión y tracción; ya que un análisis que considere el efecto de pandeo, requeriría de un análisis no lineal, el cual no es factible cuando se está realizando un análisis modal espectral.

6.1 ANALISIS COMPARATIVO DE PERIODOS Y MODOS DE VIBRACIÓN

Los periodos y modos de la estructura son parte fundamental del análisis dinámico, ya que de ello dependen todas las otras respuestas. En este tipo de estructuras se ha observado que el comportamiento dinámico está representado prácticamente por los dos primeros modos, los cuales corresponden a la componente convectiva e impulsiva. Las Figs. 6.1 y 6.2 proporcionan una visión general de la variación de los periodos convectivos e impulsivos con relación a los parámetros descritos. Éstas gráficas fueron elaboradas con los datos correspondientes a la configuración de 8 columnas, ya que este valor en principio debería de ser igual en las tres configuraciones por tener toda la misma rigidez. Además, es importante señalar que en estas gráficas solo se consideró mostrar los resultados correspondientes al grado de acoplamiento menor, ya que su variación no resultó muy influyente. El resto de resultados pueden ser observados en los anexos.

Periodo Impulsivo:

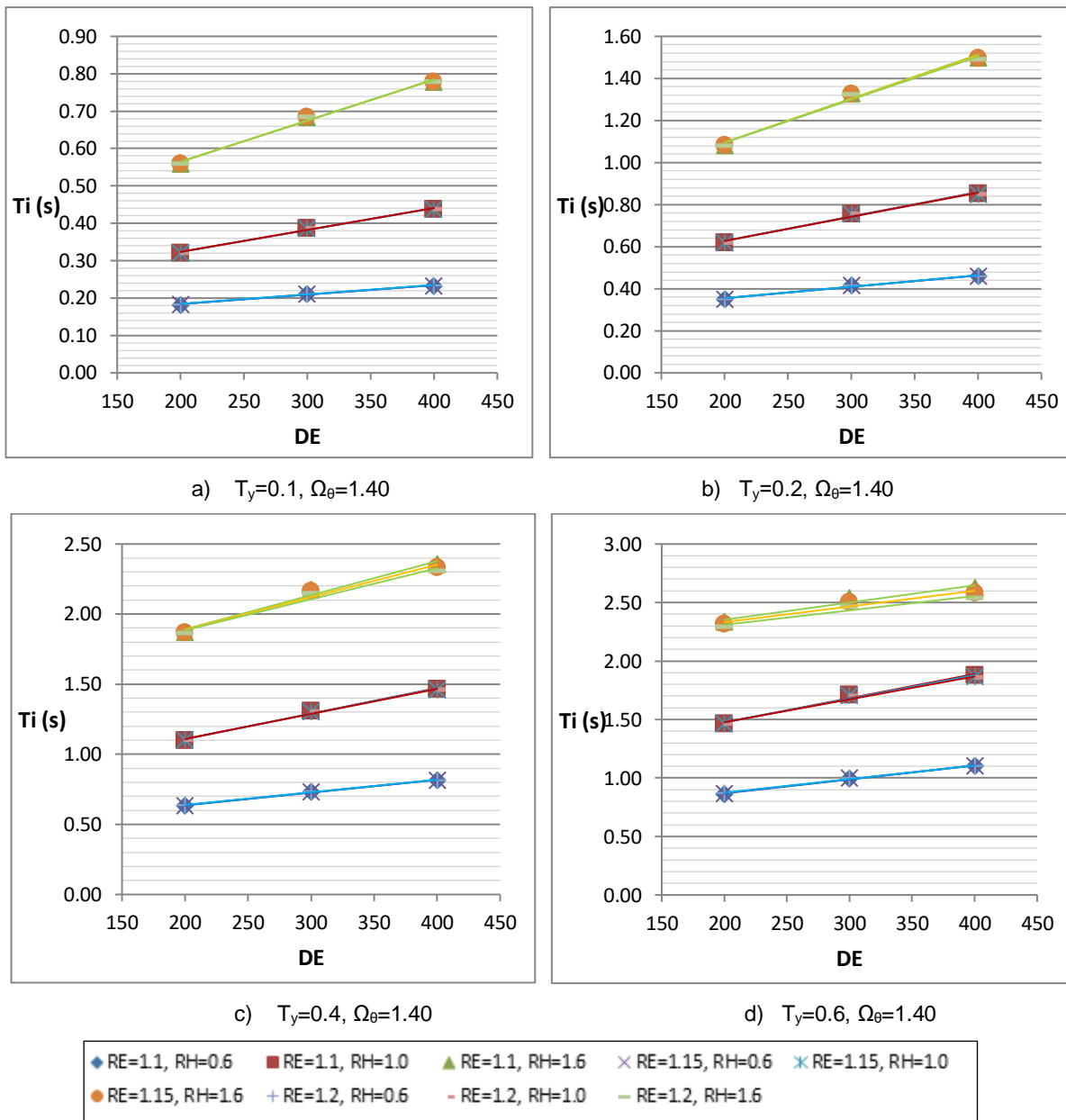


Figura 6.1. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros.

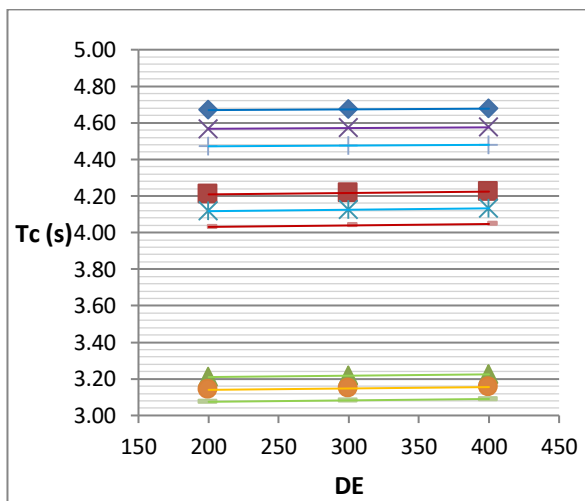
En las cuatro graficas se observaron las diversas tendencias generadas a partir de las distintas combinaciones de los parámetros. Se observó una relación directamente proporcional entre el periodo convectivo y el parámetro DE, el cual se reduce con el valor del periodo de vibración lateral T_y . Este resultado es comprensible, ya que la rigidez lateral de la estructura depende de la masa de la estructura y de cada determinado periodo ($K_{lat}=m/T_y^2$). Habiendo establecido anteriormente que la masa de la estructura depende prácticamente de la masa

de la esfera, resulta claro deducir que un aumento del parámetro DE, genera un menor espesor de la esfera, una menor masa y una baja rigidez lateral. En contraparte, se apreció que el parámetro que tiene menor influencia es el de esbeltez RE, si bien este parámetro refleja la dimensión del tanque en relación a la altura, la poca variación que tiene resulta en un mínimo aumento en la masa, sin embargo este parámetro cobra importancia en otros resultados.

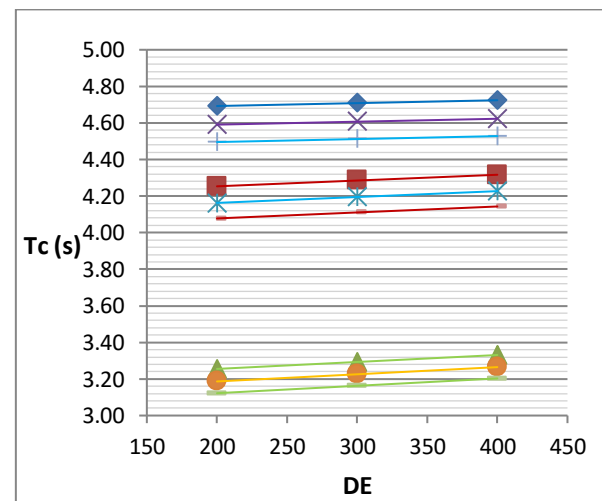
Los resultados correspondientes al parámetro de la altura de llenado (RH), definen mayores periodos a medida que este aumenta; lo cual resulta claro, ya que se tiene mayor masa, el cual depende de la altura a partir de estudios previos (Tabla 2.3).

En relación al parámetro del periodo de vibración lateral T_y , se puede señalar que su aumento generó un incremento del periodo inercial, ya que tiene una relación directa con la rigidez global del sistema. Además, es importante apreciar la diferencia en las tendencias que se generó con el aumento del parámetro, esto se debió a que a mayor periodo el sistema no presenta un comportamiento desacoplado entre el fluido y la estructura, esto se verá más adelante a mayor detalle.

Periodo Convectivo:



a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



Figura 6.2. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros.

En el caso del periodo convectivo (T_c), los resultados demostraron claramente dos comportamientos. Esto se debió a que cuando la estructura es rígida, es decir presenta periodos cortos, presenta dos movimientos desacoplados, uno del agua y el otro de la estructura. Es por esto que en las dos primeras gráficas se obtuvieron valores prácticamente constantes para cada altura de llenado, sin importar mucho los valores de los otros parámetros, ya que solo depende de la dimensión del tanque y su altura de llenado; sin embargo el parámetro de esbeltez (RE) si generó una variación apreciable, el cual fue de aproximadamente 0.1s entre cada valor.

Por otro lado, cuando la estructura presentó periodos más largos ocurrió lo contrario, se observó un comportamiento acoplado, en donde el periodo convectivo correspondió al líquido más una parte de la estructura. Esto se observó en las Figs. 6.2c y 6.2d, en donde se tienen tendencias en aumento de los periodos, simulando de cierta forma el periodo inercial, cabe señalar que la mayor tendencia se originó cuando se aumenta la altura de llenado. Además, se observó que en general el aumento del parámetro RE genera un menor periodo convectivo. Para el caso de periodos cortos se tuvo un periodo T_c mínimo de 3.07s, mientras que el máximo fue 4.67s. Para el caso de periodos largos se tuvo un periodo T_c mínimo de 3.40s, mientras que el máximo fue 4.96s.

Análisis de periodos y modos:

Para entender mejor el comportamiento observado en las gráficas, se debe de revisar el planteamiento matemático de la estructura ya visto en el Capítulo IV. Volviendo a formular la ecuación que describe el comportamiento dinámico se tiene.

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ r_{g1} \cdot \ddot{u}_{\theta 1} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} & 0 & \left(\frac{1}{r_{g1}}\right)^2 (k_{\theta 1}) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ r_{g1} \cdot u_{\theta 1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{g1} \\ \ddot{u}_{g2} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

Dónde u_i es el desplazamiento lateral traslacional del gdl i , $u_{\theta 1}$ es el desplazamiento rotacional de la masa m_1 al rededor del eje Z, u_g es el desplazamiento horizontal del suelo, r_{g1} es el radio de giro del soporte, y e_1 es la excentricidad accidental asociada a la masa m_1 .

De forma simplificada, para entender el comportamiento de los dos modos principales (impulsivo y convectivo) se determinó los valores normales y los periodos de cada modo sin considerar el giro de la estructura mediante la solución de la Ec. (6.2).

$$\Delta = \left| \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} + \omega^2 \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \right| = 0 \quad (6.2)$$

De la Ec (6.2) se obtiene:

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1 + k_2}{m_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1 + k_2}{m_1} \right)^2 - \frac{4 \cdot k_1 \cdot k_2}{m_1 \cdot m_2}} \right] \quad (6.3)$$

De esta expresión se puede deducir cual es el periodo o frecuencia para el caso en que la estructura es más rígida o flexible.

Para el caso en que la estructura sea rígida, se tendrá que la rigidez del soporte k_1 es mucho mayor a k_2 , por lo que la Ec. (6.3) podría ser simplificada de la siguiente forma:

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right)^2 - \frac{4 \cdot k_1 \cdot k_2}{m_1 \cdot m_2}} \right] \quad (6.4)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_2}{m_2} - \frac{k_1}{m_1} \right)^2} \right] \quad (6.5)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right) \pm \left(\frac{k_2}{m_2} - \frac{k_1}{m_1} \right) \right] \quad (6.6)$$

$$\omega_1^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad \omega_2^2 = \frac{k_1}{m_1} \quad (6.7)$$

Se observa que el comportamiento es desacoplado, es decir, tanto el fluido como la estructura tienen periodos independientes. En caso que la estructura sea más flexible, estas expresiones no son válidas y para hallar los periodos del sistema se tendría que solucionar directamente la Ec. (6.3). En esta parte surge una incertidumbre al no saber en qué momento la estructura cambia este comportamiento. Para conocerlo se necesita saber los valores de las rigideces k_1 y k_2 , los cuales son mostrados en las Ecs. (6.8) y (6.9).

$$k_1 = M_T \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_y} \right)^2 \quad (6.8)$$

$$k_2 = m_2 \cdot \frac{\lambda \cdot g}{R} \quad (6.9)$$

De estas expresiones, se apreció que la rigidez lateral k_1 depende de las masas y del periodo de vibración T_y , mientras que la rigidez k_2 relacionado al líquido depende prácticamente de las dimensiones de la esfera. Para determinar qué tan influyente es la rigidez k_2 en relación al k_1 , se presenta la comparación entre ellas en la Tabla 6.1. Para su elaboración se consideró los siguientes valores de

los parámetros: RE=1.1, DE=200, RH=1.6, mientras que el valor del periodo de vibración T_y fue variable por ser el más influyente.

Tabla 6.1: Comparación entre rigideces k_1 y k_2

T_y (s)	k_1 (Ton/m)	k_2 (Ton/m)	$(k_1/k_2) \times 100$
0.1	125811.59	1021.75	0.81
0.2	31452.90	1021.75	3.25
0.3	13979.07	1021.75	7.31
0.4	7863.22	1021.75	12.99
0.5	5032.46	1021.75	20.30
0.6	3494.77	1021.75	29.24

De la Tabla 6.1 se observó que para estructuras con periodos menores a 0.3s es posible considerar el comportamiento desacoplado del sistema, debido al bajo porcentaje de influencia de la rigidez k_2 . Caso contrario, se genera un comportamiento acoplado y los periodos convectivos en impulsivos cambian de tendencias, como fue observado en las Fig. 6.1 y 6.2.

En relación a los modos, estos se obtuvieron de la Ec. (6.1) una vez tenido los periodos (Ec.(6.10)).

$$\{\phi_i\} = \begin{Bmatrix} k_2 - \omega_i^2 \cdot m_2 \\ k_2 \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

Si la Ec. (6.10) se normaliza respecto al grado de libertad 2, se obtiene la Ec. (6.11).

$$\{\phi_i\} = \begin{Bmatrix} 1 - \omega_i^2 / \omega_1^2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (6.11)$$

Dónde:

$$\omega_1^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (6.12)$$

De esta relación se observó una vez más la influencia de la rigidez del soporte. Si la estructura es rígida, los periodos estarían desacoplados, y para el modo correspondiente al fluido se tendría que ω_2 es igual a ω_1 , con esto se deduce que en este modo solo participa el gdl 2. De similar forma se determinó que en el modo 1 solo participa el gdl 1.

6.2 RESPUESTAS GLOBALES

6.2.1 Cortante basal

Los resultados del cortante basal son mostrados en la Fig. 6.3 para cada uno de los cuatro periodos, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas:

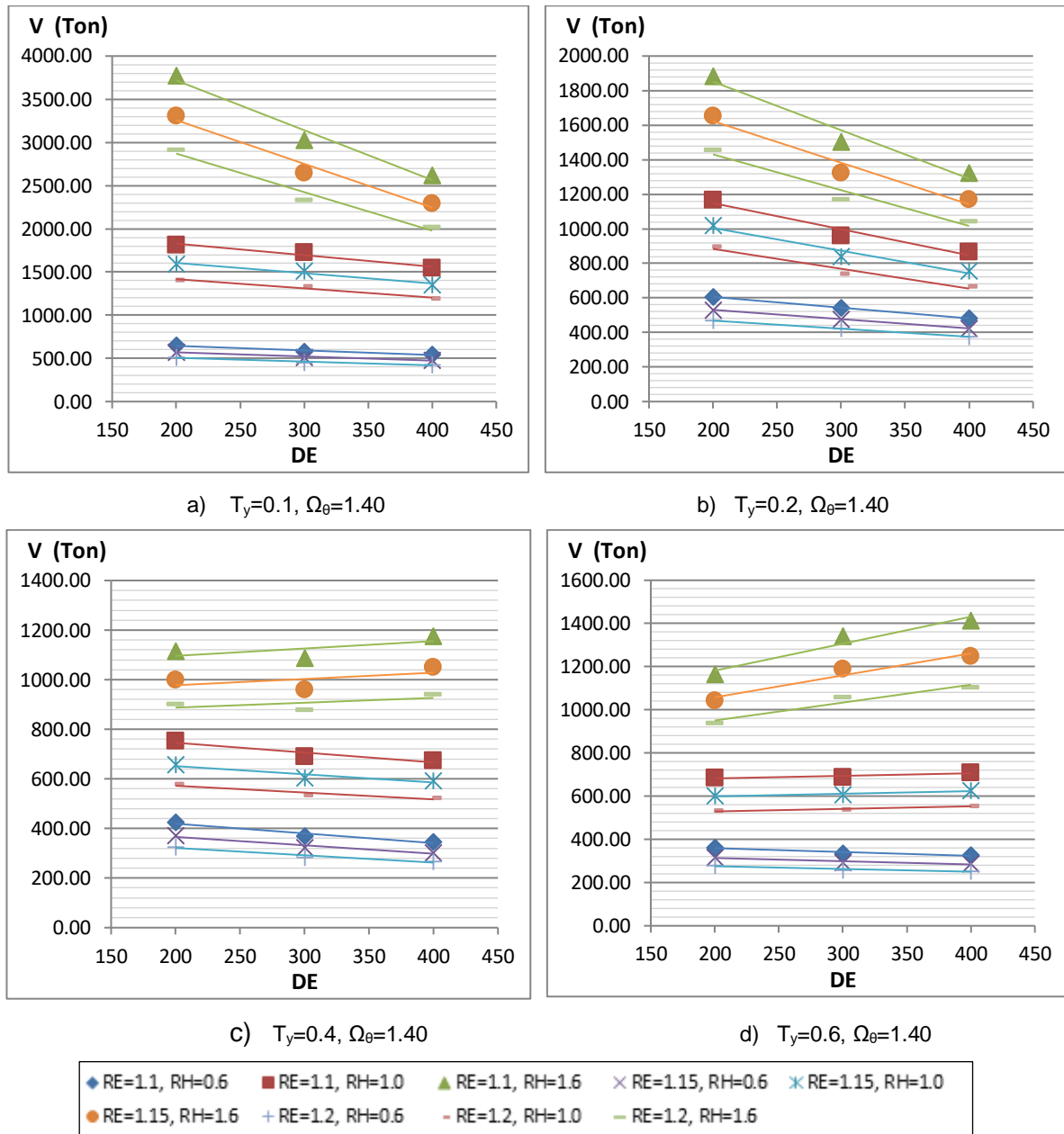


Figura 6.3. Relación del Cortante basal frente a los parámetros.

De la Fig. 6.3 se observó las diferentes variaciones relacionadas con cada uno de los parámetros. Se apreció la misma situación que en los periodos convectivos e impulsivos, los resultados están divididos por los casos de periodo corto y los de periodo largo. Las respuestas en general fueron mayores para los casos de periodo de vibración corto ($T_y=0.1s \sim 0.3s$) y disminuyen a medida que el T_y aumenta, ya que la estructura es más flexible y tienen una menor valor de pseudo-aceleración. Sin embargo, en el caso de $T_y=0.6s$ se presentó un ligero aumento en relación al $T_y=0.4s$, lo cual se debió al acoplamiento de los modos del líquido y la estructura.

En relación al parámetro de esbeltez RE, éste produjo una disminución del cortante para todos los casos, lo cual se debió a la reducción en la dimensión del tanque; además se notó que la influencia del parámetro RE disminuye con la altura de llenado (RH). En total el porcentaje de variación de las respuestas en relación al parámetro RE alcanzó un valor cercano a -22%, este valor fue calculado considerando los valores extremos del parámetro RE (1.1 y 1.2).

Por otro lado, el parámetro DE influyó de distinta forma, ya que está más relacionado con el periodo de vibración T_y y con la rigidez del sistema, como ya se ha visto en el ítem anterior. Para estructuras rígidas, el parámetro DE disminuyó el valor de la cortante, teniéndose una tendencia más abrupta cuando el tanque aumenta la altura de llenado (RH), por ejemplo para el caso del periodo $T_y=0.1s$, $RE=1.1$ y $RH=1.6$ el cortante disminuyó de 3775Ton a 2620Ton, lo cual es una reducción de aproximadamente -30.6%; mientras que para un $RH=0.6$ el cortante disminuyó de 650Ton a 545Ton, lo cual equivale a una reducción de aproximadamente -16.15%. Para estructuras más flexibles, como el caso de periodos de vibración T_y de 0.4s o 0.6s, la tendencia cambia indicando un mayor cortante, a medida que aumenta el parámetro DE, esto debido al comportamiento acoplado del sistema.

Asimismo, es importante observar la variación de los máximos cortante para cada periodo: para los periodos de vibración T_y igual a 0.1s, 0.2s, 0.4s y 0.6s se tiene cortantes máximos de 3775Ton, 1900Ton, 1175Ton y 1410Ton. A continuación se observa la influencia del grado de acoplamiento en las cortantes (Fig. 6.4).

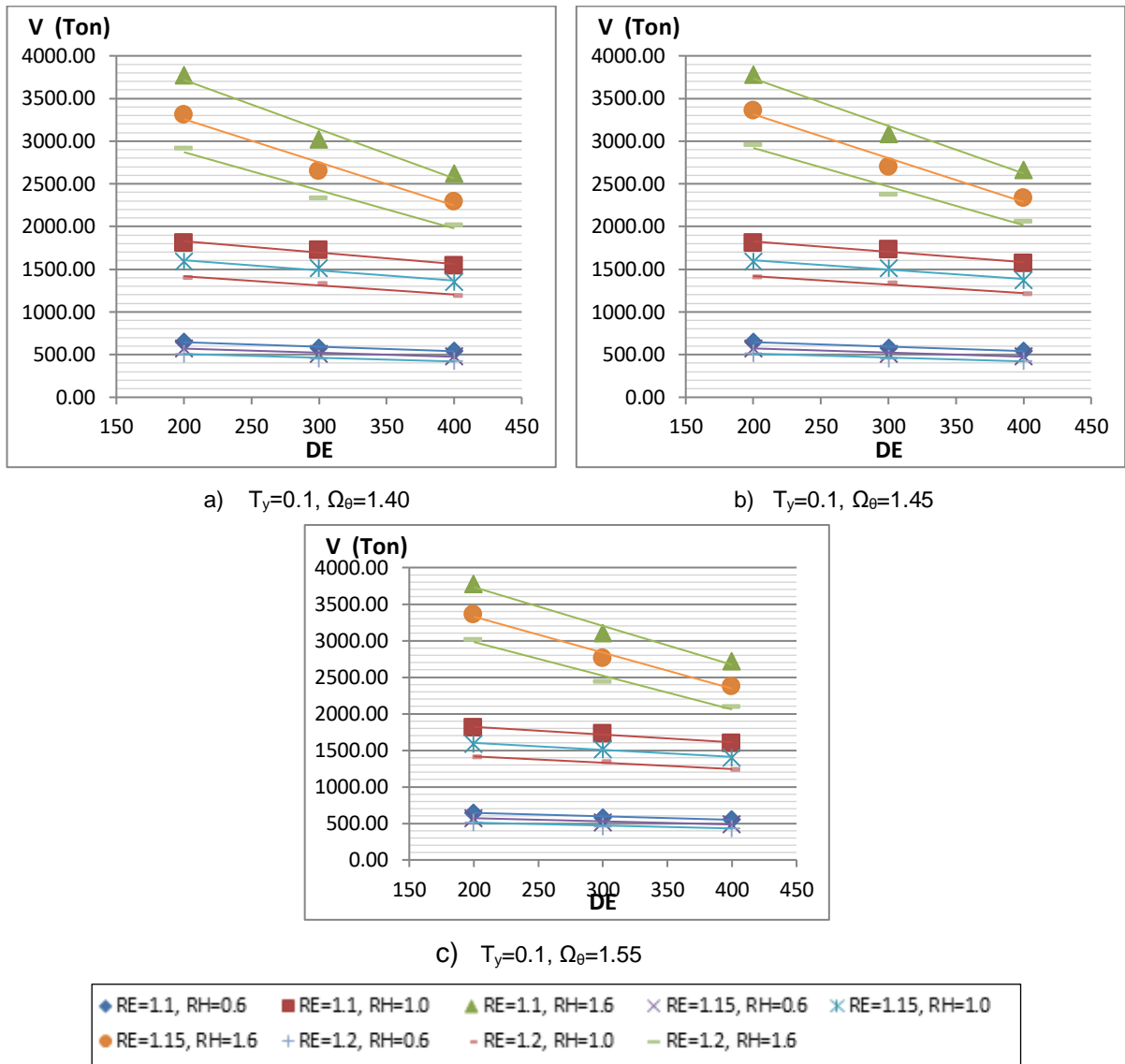


Figura 6.4. Comportamiento del cortante basal según grado de acoplamiento

Se puede ver que el grado de acoplamiento tiende a aumentar el cortante, sin embargo no fue un factor determinante, ya que la variación fue mínima.

Los resultados para las otras zonas sísmicas son mostrados en el anexo. Los valores para la cortante son menores de forma proporcional al factor de zona (Z), por lo que se observaron las mismas tendencias frente a los parámetros.

6.2.2 Momento volcante

Los resultados del momento volcante son mostrados en la Fig. 6.5 para cada uno de los cuatro periodos, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas:

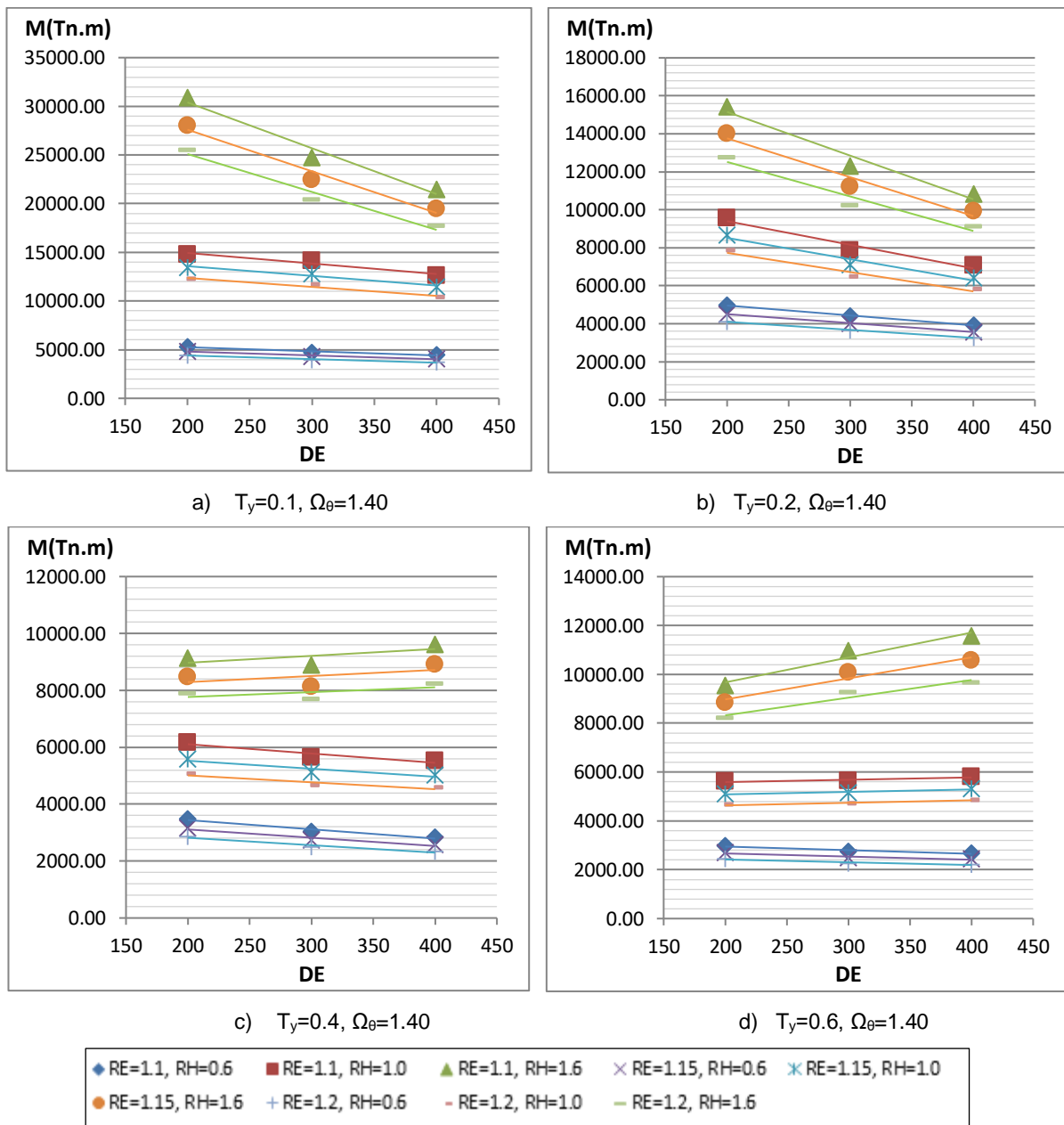


Figura 6.5. Relación del Momento volcante frente a los parámetros.

De la Fig. 6.5 se observó las diferentes variaciones relacionadas con cada uno de los parámetros. De similar forma al cortante basal, se observó que el aumento

del parámetro de esbeltez RE, conduce a una disminución del momento para todos los casos, disminuyendo la diferencia conforme se tenga menor altura de llenado (RH). En total el porcentaje de variación de estas respuestas en relación al parámetro RE alcanzó un valor cercano a -18%, este valor fue calculado considerando los valores extremos del parámetro RE (1.1 y 1.2).

También se notó que el parámetro DE influyó de igual forma que en el caso anterior. Para estructuras rígidas ($T_y = 0.1s \sim 0.3s$), el parámetro disminuyó el valor del momento, teniéndose una mayor tendencia cuando el tanques aumenta la altura de llenado (RH), por ejemplo para el caso del periodo $T_y=0.1s$, $RE=1.1$ y $RH=1.6$ el momento disminuyó de 30872Ton.m a 21450Ton.m, lo cual es un reducción de aproximadamente -30.6%; mientras que para un $RH=0.6$ el momento presentó una reducción de aproximadamente -16.65%. Para estructuras más flexibles ($T_y = 0.4s \sim 0.6s$), la tendencia es descendente, debido al comportamiento acoplado del sistema.

Asimismo, se presentan los máximos momentos para los periodos de vibración T_y igual a 0.1s, 0.2s, 0.4s y 0.6 , que son iguales a 30800Ton.m, 15400 Ton.m, 8900 Ton.m y 11500Ton.m, respectivamente.

No se muestran los resultados para la variación del grado de acoplamiento, ya que estos no influyen de gran manera en estos resultados. De similar forma no se muestran los valores para las otras zonas sísmicas, ya que presentan las mismas tendencias para las variaciones de los parámetros.

6.2.3 Desplazamiento máximo

Los resultados de desplazamientos máximos son mostrados en la Fig. 6.6 para cada uno de los cuatro periodos, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas:

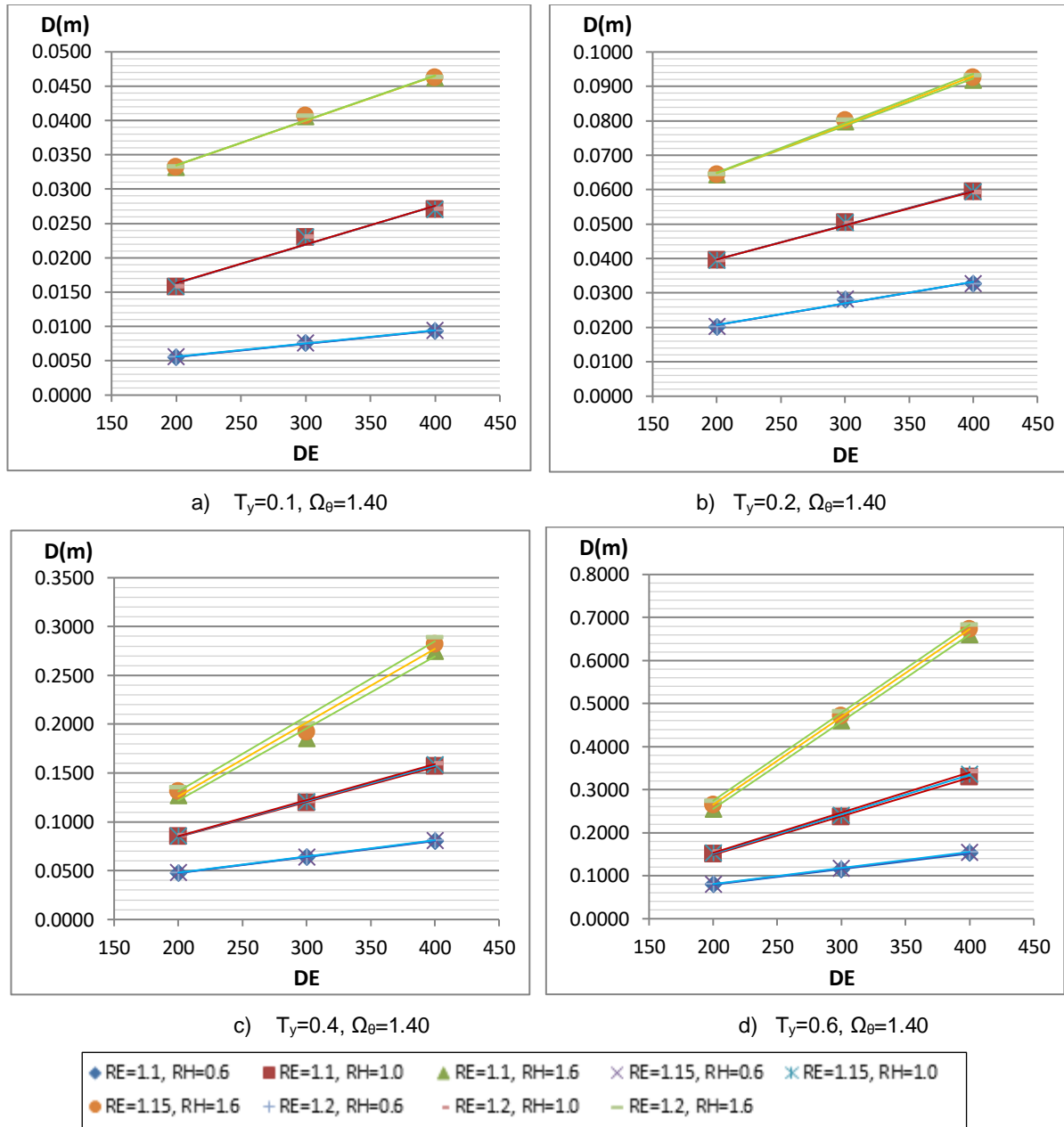


Figura 6.6. Relación del desplazamiento máximo frente a los parámetros.

De la Fig. 6.6 se observó las diferentes variaciones relacionadas con cada uno de los parámetros. El parámetro de esbeltez RE no resultó muy influyente en este resultado, ya que a pesar de que genera una reducción en el cortante,

también produjo el mismo efecto en la rigidez, generando una compensación y al final conduce a similares resultados de desplazamiento.

Por el contrario, el parámetros DE fue más determinante en esta respuesta ya que generó diferencias apreciables. Este parámetro tiene una relación directamente proporcional con el desplazamiento y produjo un aumento cuya tendencia se hace más pronunciada a medida que aumentan el periodo de vibración T_y o la altura de llenado (RH). El aumento máximo observado en estos casos es de 150% considerando los valores extremos del parámetro DE (200 y 400), este valor tan grande se da para el caso de $T_y=0.6s$, observando que un aumento de DE produce una estructura mucho más flexible. En cambio para el caso de $T_y=0.1s$, el aumento máximo que se obtuvo fue de 39.36%, lo que indica que el parámetro DE flexibiliza la estructura en menor medida.

Por otro lado, es importante observar el valor máximo de los desplazamientos. El desplazamiento máximo para el periodo $T_y=0.1s$ fue aproximadamente 0.045m y conforme la estructura se va haciendo más flexible se generaron desplazamiento elevados llegando al valor máximo de 0.68m para el periodo $T_y=0.6s$. Estos grandes desplazamientos resultan peligrosos en el comportamiento de las estructuras, por lo que los códigos establecen ciertos límites. La norma ASCE7-10 establece límites para las derivas (*drift*) en estructuras que son distintas a las edificaciones, las cuales son clasificadas de acuerdo con la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Derivas permitidas (ASCE7-10)

Categoría Sísmica	IV	III	I y II
Otras estructuras	0.010 h_x	0.015 h_x	0.020 h_x

Donde h_x es el valor de la altura de entrepiso. El cálculo de las derivas se realizó considerando esta norma, el cual establece que el desplazamiento que se utiliza en el cálculo de la misma está dado por la Ec. (6.13).

$$\delta = \frac{C_d \cdot \delta_{\max}}{I} \quad (6.13)$$

Dónde C_d es el factor de ampliación de desplazamiento, I es el factor de importancia y δ_{\max} es el desplazamiento máximo del análisis elástico

Para el caso de tanques elevados, el factor C_d es igual a 2.5. A partir de ello se calcularon las derivas para todos los casos paramétricos. En la Fig. 6.7 se observan las derivas para los 4 periodos y el grado de acoplamiento igual a 1.40.

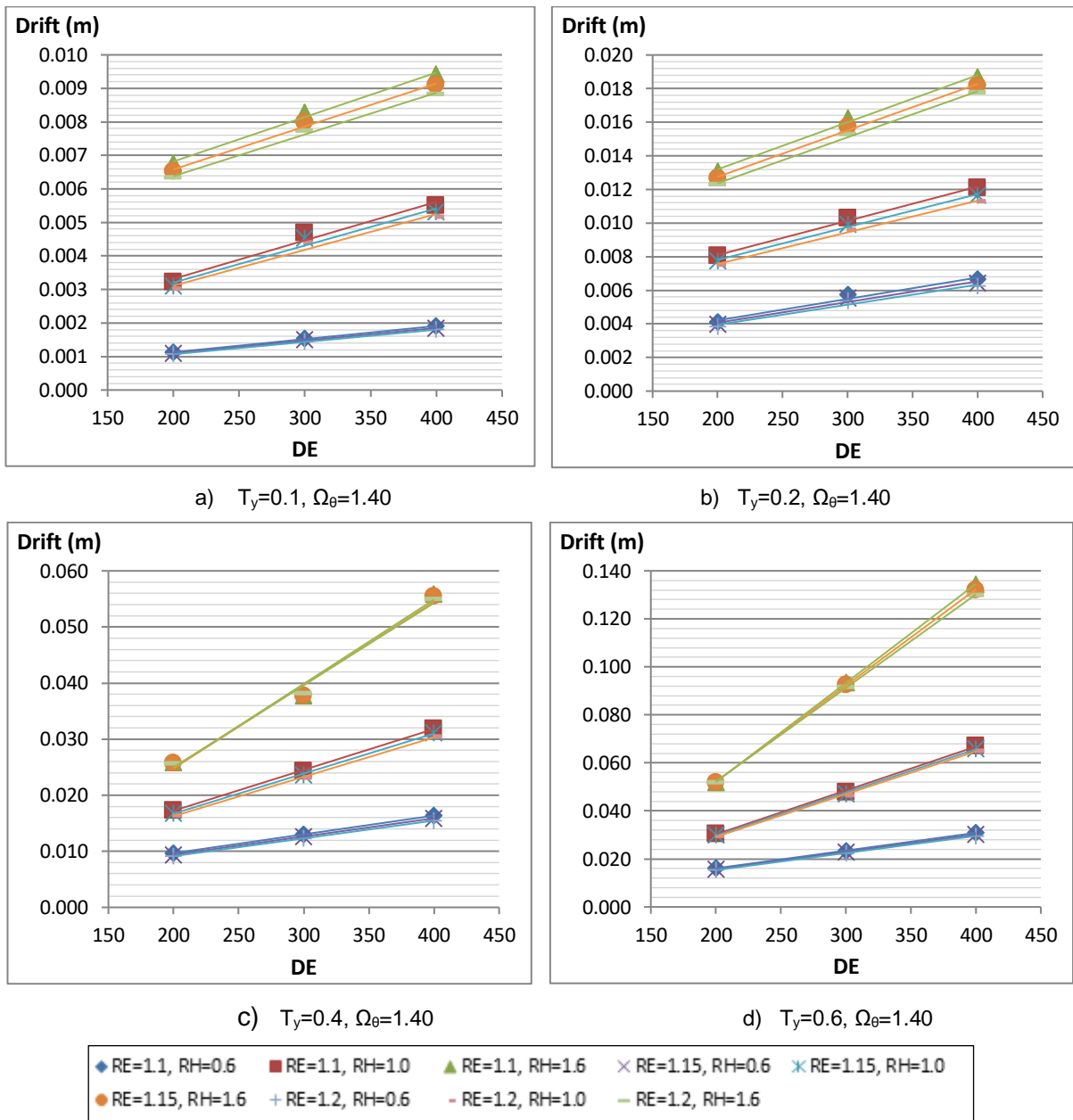


Figura 6.7. Relación de derivas frente a los parámetros.

El límites establecidos por la norma ASCE7-10, al considerar que los tanques se encuentran en la zona Z4 sería equivalente a $0.010h_x$ por ser la zona más vulnerable sísmicamente. De la Fig. 6.7 se pudo notar que solo los tanques con periodos de 0.1s cumplen totalmente, ya que en los otros solo cumplen cuando

presentan un bajo porcentaje de llenado (RH). Estos tanques más flexibles pueden ser más adecuados en otras zonas sísmicas. Esto se verifica en la Fig. 6.8 donde se observó que los tanques de periodo de vibración $T_y=0.2s$ cumplen con el límite de $0.015h_x$, correspondiente a zonas sísmicas intermedias; mientras que los tanques con periodo de vibración $T_y=0.4s$ y $T_y=0.6s$ con el parámetro DE igual a 200 cumplen con el límite de $0.020h_x$, para zonas sísmicas bajas.

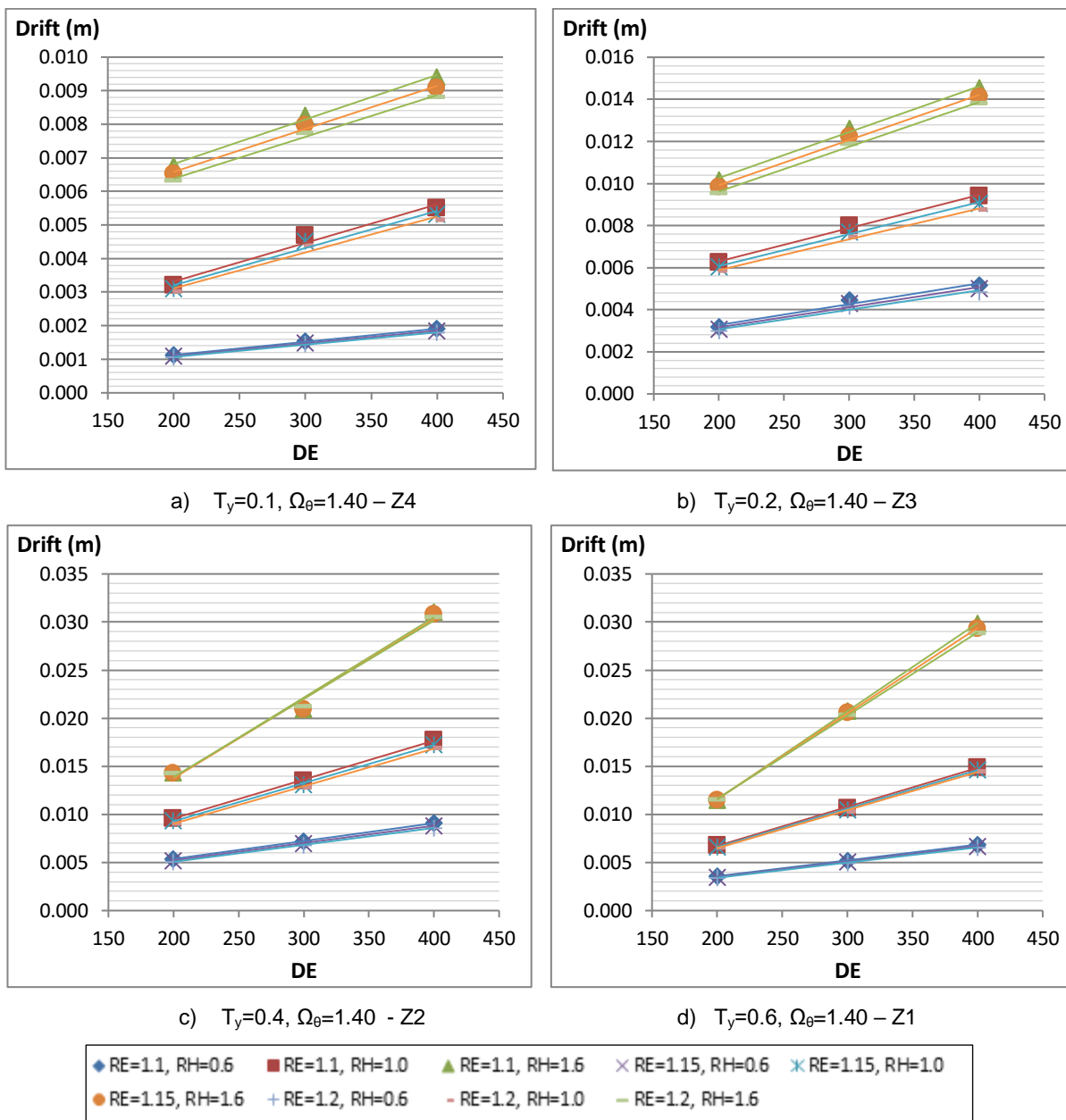


Figura 6.8. Comportamiento de Derivas por zonas y períodos

6.2.4 Momento torsor y giro

El momento torsor se presentó debido a las pequeñas excentricidades en la construcción, para el análisis de los casos paramétricos se consideró que la excentricidad sea de 5%. Para considerar este efecto, se asumió que la fuerza sísmica total se encuentra desfasado un 5% de la longitud de la estructura en la dirección en análisis. Es por ello que la tendencia de los valores del momento torsor resultan muy similares a los del cortante (Fig. 6.3).

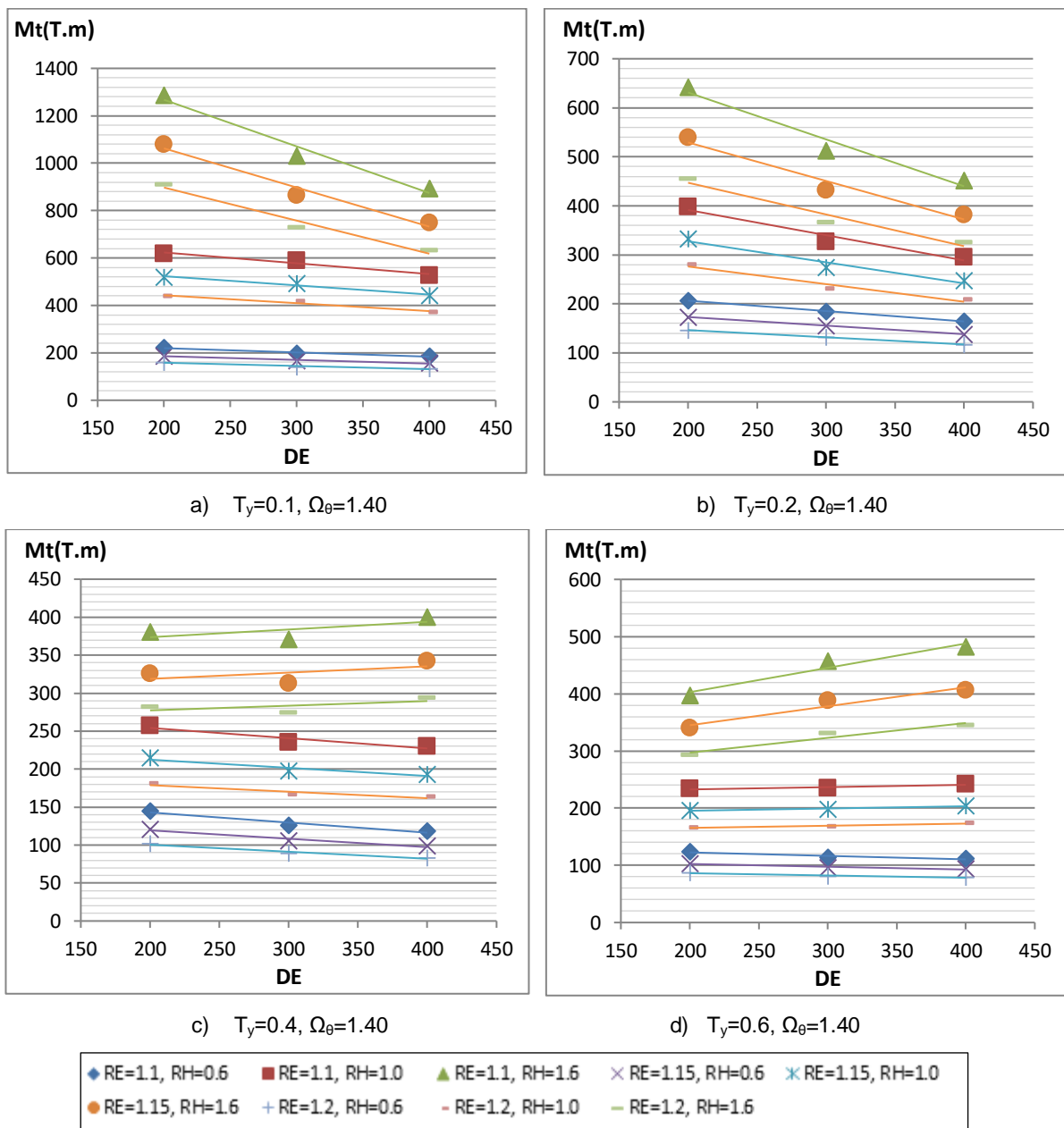


Figura 6.9. Relación del momento torsor frente a los parámetros.

En estos resultados el valor del grado de acoplamiento (Ω_θ) tampoco fue influyente, ya que el momento torsor solo depende de la excentricidad y de las fuerzas sísmicas (Fig. 6.9); sin embargo, si cobra mayor importancia en el giro de la estructura. Para apreciar esto, se presenta los valores de los giros correspondientes a los modelos paramétricos con $T_y=0.1s$ en la Fig. 6.10. La máxima diferencia entre los valores extremos de Ω_θ (1.40 y 1.55) se da en la combinación de $T_y=0.1$, $RH=1.6$, $RE=1.2$ y $DE=400$, existiendo una reducción en el giro de -15% aproximadamente.

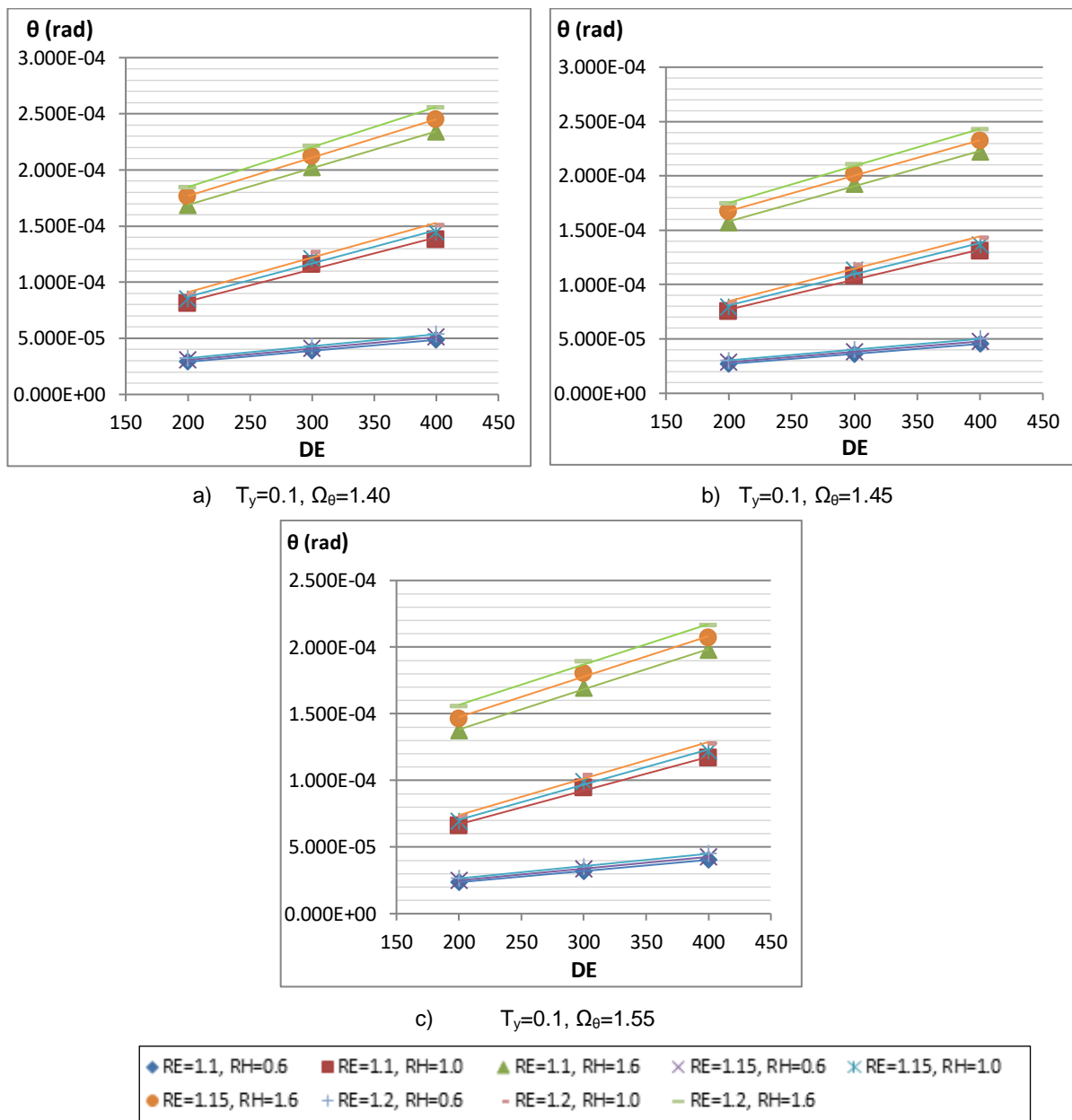


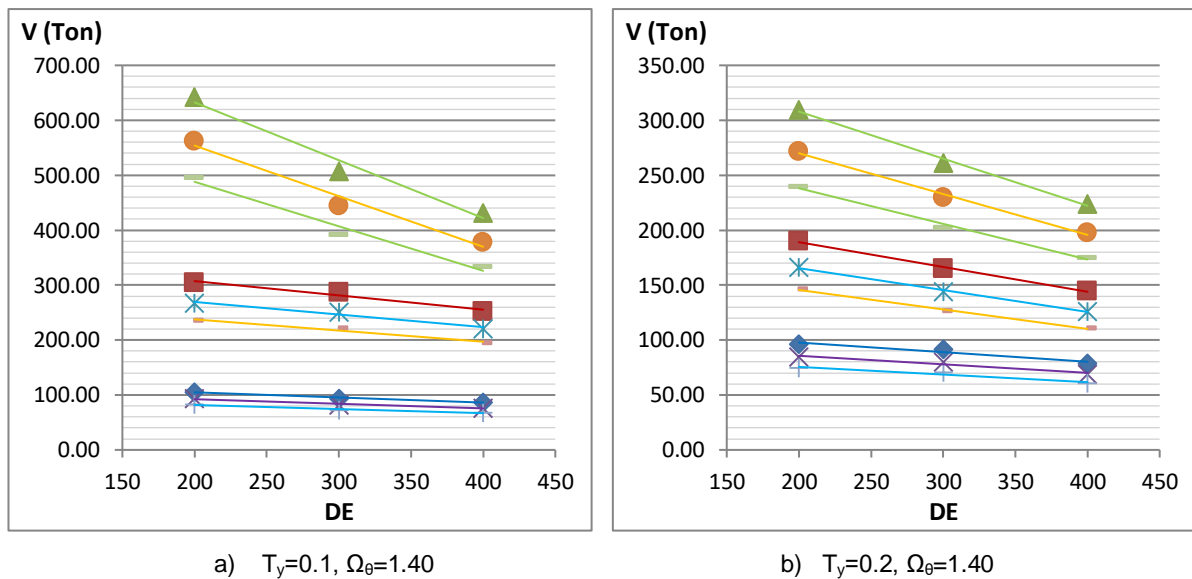
Figura 6.10. Comportamiento del giro según grado de acoplamiento

6.3 RESPUESTAS LOCALES

Los modelos paramétricos fueron analizados considerando que los arriostres trabajan en tracción y compresión, lo cual no es del todo cierto, ya que si la carga de compresión es grande el arriostre se pandea y deja de funcionar. Esta consideración fue realizada debido a la incompatibilidad de realiza una análisis sísmico espectral con la inclusión del pandeo. Sin embargo, es importante observar estas respuestas, ya que las tendencias no varían de gran manera en relación a los tanques con consideración del pandeo.

6.3.1 Esfuerzo cortante de columnas

Los resultados del esfuerzo cortante para los cuatro periodos son mostrados en la Fig. 6.11, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas, más adelante se observara las diferencias entre las 3 configuraciones elegidas.



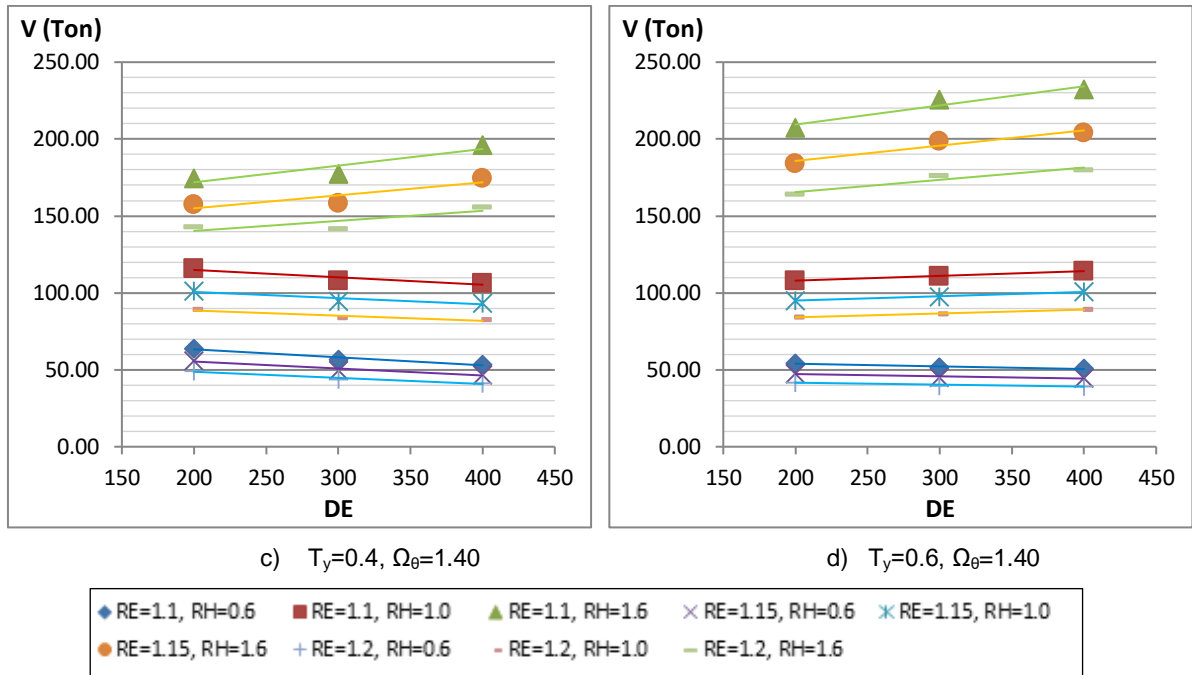


Figura 6.11. Relación del cortante en columnas frente a los parámetros.

Las tendencias que se generaron por los diferentes parámetros coinciden con los del cortante sísmico global, lo cual es lógico, ya que el máximo cortante en las columnas está relacionado directamente con este a partir de la configuración de las columnas sin importar los arriostres, ya que el máximo esfuerzo se ubica en la porción comprendida entre la esfera de acero y el inicio de los arriostres. (Fig. 6.12)

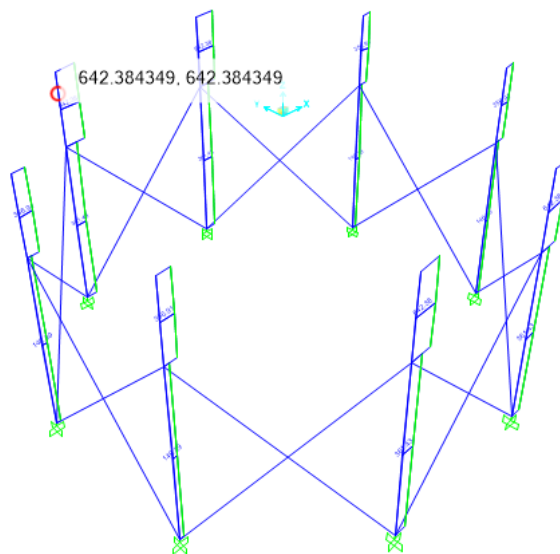
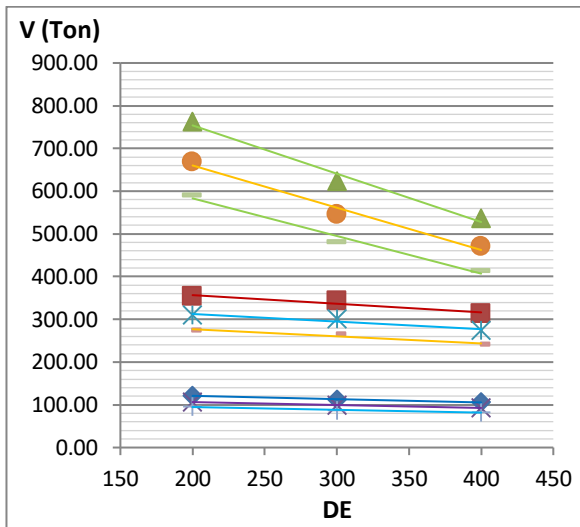


Figura 6.12. Esfuerzos cortantes- Modelo 11113

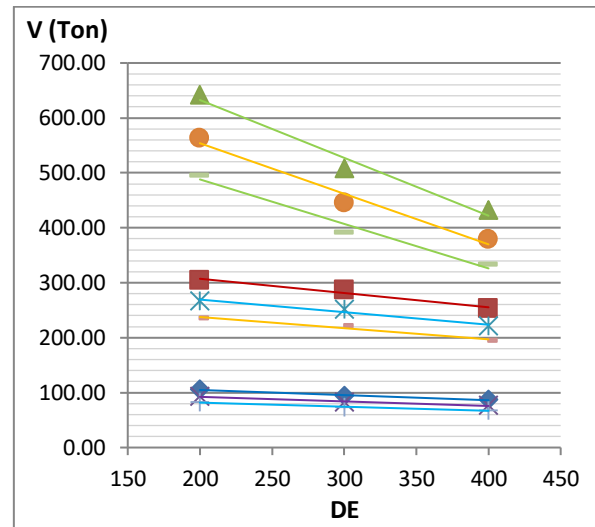
De la Fig. 6.11 se observó que existen mayores respuestas para los casos de periodo corto que los de periodo largo. También se notó que el parámetro de esbeltez RE tiende a reducir el cortante para todos los casos. Por otro lado, el parámetro DE influyó de distintas formas, ya que está relacionado con la rigidez lateral del sistema. Para los tanques rígidos se tuvo tendencias decrecientes alcanzando un porcentaje de variación máximo de -32%, mientras que para los flexibles esta tendencia fue creciente con un porcentaje de variación máximo igual a 18%. Para los casos en que el tanque tiene el mayor parámetro RH, se obtuvo un momento máximo de 642.38 Ton para el caso con periodo $T_y=0.1s$, mientras que el mínimo fue de 174.7 Ton, correspondiente al periodo $T_y=0.4s$.

En relación al grado de acoplamiento, este no tendría mucha influencia, debido a que los resultados dependen prácticamente del cortante.

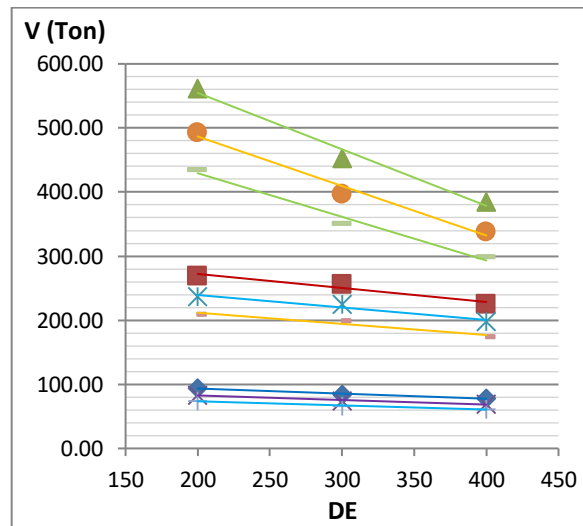
Además del estudio del cortante con respecto a los parámetros escogidos, se presenta la variación que se originan con el uso de las tres configuraciones propuestas (Fig. 6.13). En primer lugar se apreció que en todas ellos las tendencias son similares. Además, se pudo notar que las cortantes máximas son 762.82 Ton, 642.38 Ton y 561.70 Ton para las configuraciones de 6, 8 y 10 columnas, respectivamente. Es importante conocer estos valores, ya que a partir de ello se puede conocer en cuanto disminuye el cortante para cada uno de estos casos. Entre las configuraciones de 6 y 8 columnas existe una diferencia de 120 Ton, mientras que entre el de 8 y 10 columnas esta diferencia es de 80.68 Ton.



a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (6 col.)



b) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (8 col.)



c) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (10 col.)

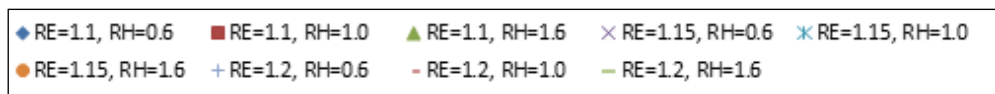


Figura 6.13. Comportamiento de cortante en columnas según configuración

6.3.2 Momento flector de columnas

Los resultados del momento flector para los cuatro periodos son mostrados en la Fig. 6.14, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas, más adelante se observara las diferencias entre las 3 configuraciones elegidas.

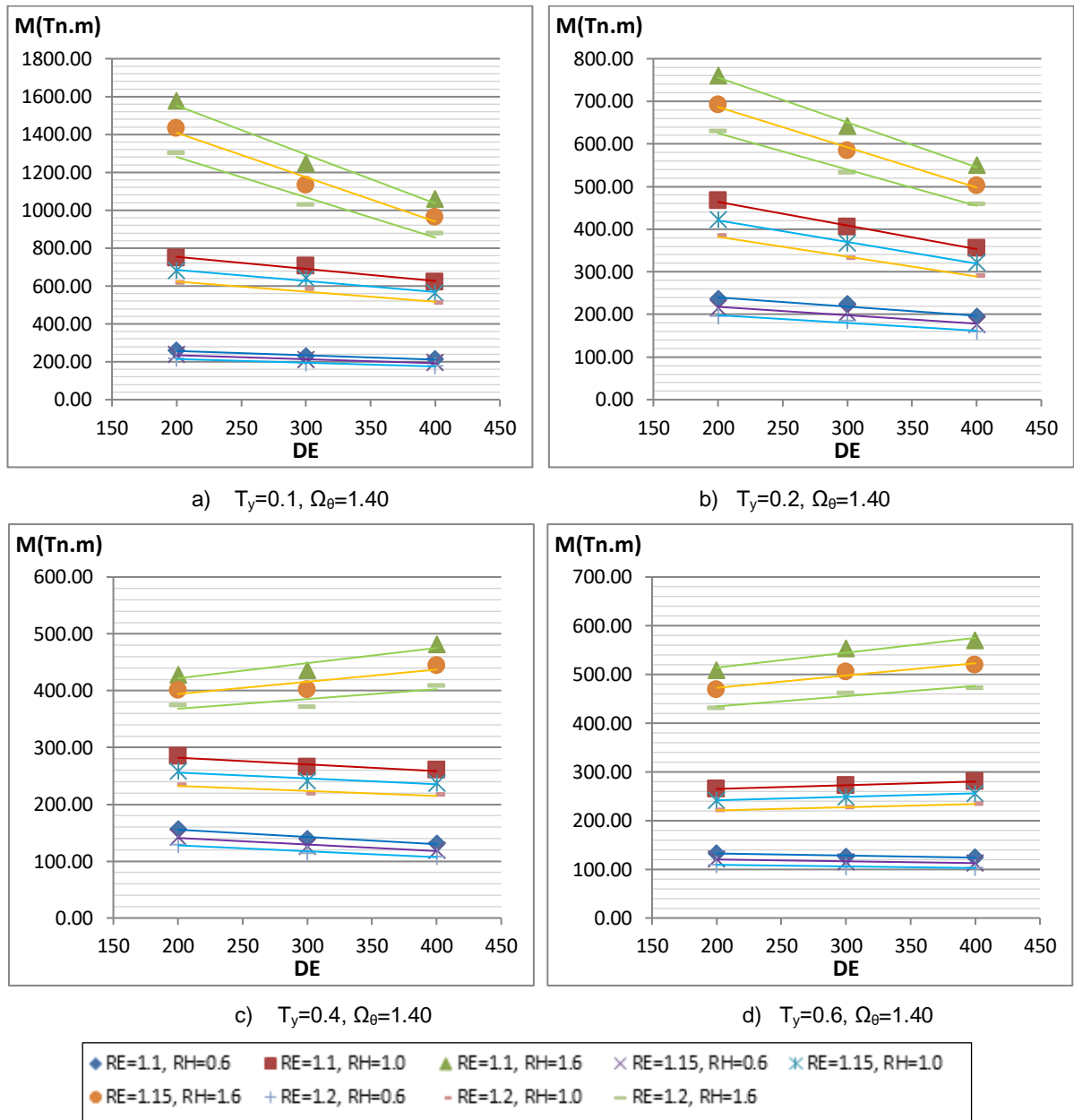


Figura 6.14. Relación del momento en columnas frente a los parámetros

Las tendencias que se generaron por los diferentes parámetros coinciden con los de los cortantes sísmicos globales, debido a estos esfuerzos dependen de ellos.

El máximo momento que se origina en las columnas están ubicados en las intersecciones con los arriostres (Fig. 6.15).

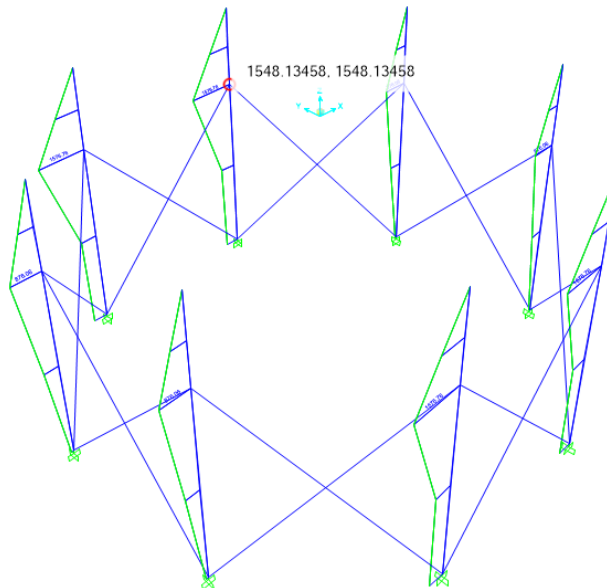
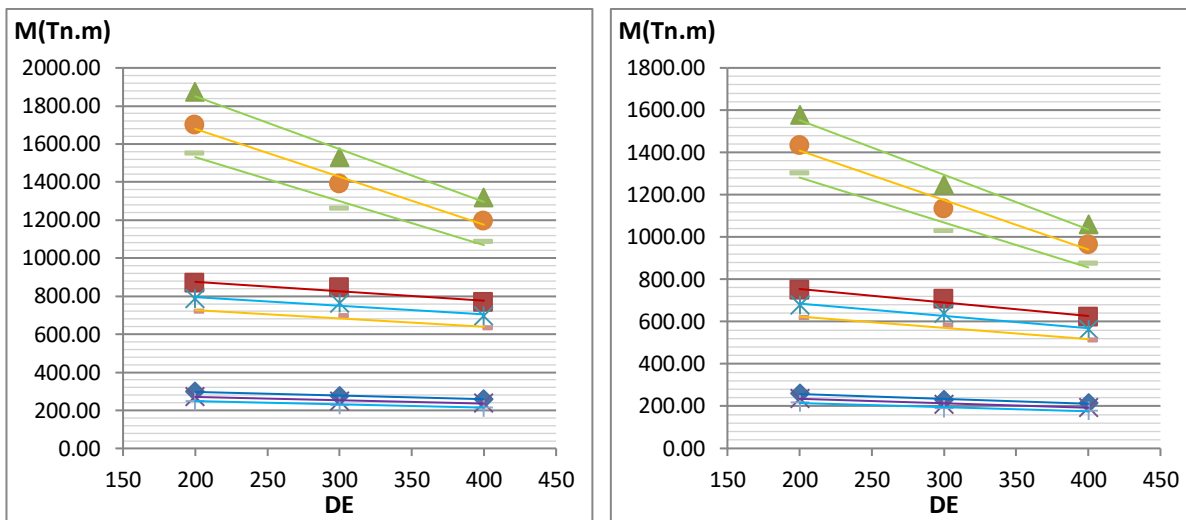


Figura 6.15. Momentos Flectores - Modelo 11113

Del gráfico 6.1 se observó que los parámetros generaron similares tendencias que, para el cortante, notando una vez más el distinto comportamiento entre los tanques rígidos y flexibles. En relación al parámetro DE, generó distintas tendencias para tanque rígidos y flexibles. Para los tanques rígidos se tuvieron tendencias decrecientes alcanzando un porcentaje de variación máximo de -35%, mientras que para los flexibles esta tendencia fue creciente con un porcentaje de variación máximo igual a 16.6%. Para los casos en que el tanque tiene el mayor parámetro RH, se obtuvo un momento máximo de 1576.76 Ton.m para el caso con periodo de vibración $T_y=0.1s$, mientras que el mínimo fue de 428.25 Ton.m, correspondiente al periodo de vibración $T_y=0.4s$. Asimismo, no se muestra los resultados para distintos grado de acoplamiento por no tener mucha influencia

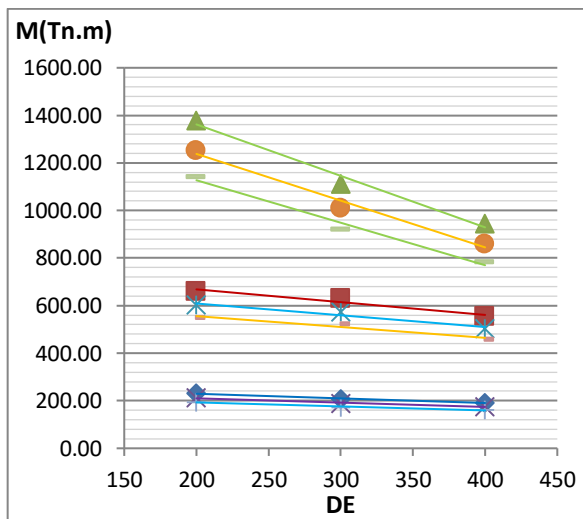
De forma análoga a la respuesta anterior, se presenta la variación que se originan con el uso de las tres configuraciones propuestas (Fig. 6.16). Se pudo notar que los momento máximos son 1872.38 Ton.m, 1576.76 Ton.m y 1378.74 Ton.m para las configuraciones de 6, 8 y 10 columnas, respectivamente. Es importante ver en cuanto disminuye el cortante para cada uno de estos casos,

entre las configuraciones de 6 y 8 columnas existe una diferencia de 295.62 Ton, mientras que entre el de 8 y 10 columnas esta diferencia es de 198.02 Ton.



a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (6 col.)

b) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (8 col.)



c) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$ (10 col.)

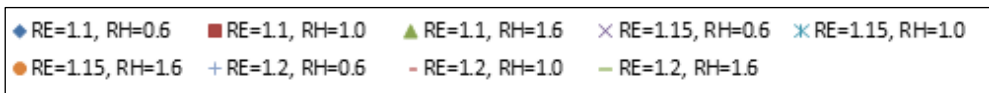


Figura 6.16. Comportamiento del momento en columnas según configuración

6.3.3 Esfuerzo axial de arriostres

Los resultados del esfuerzo axial para los cuatro periodos son mostrados en la Fig. 6.17, cabe mencionar que estos resultados son los correspondientes a la configuración de 8 columnas, más adelante se observara las diferencias entre las 3 configuraciones elegidas.

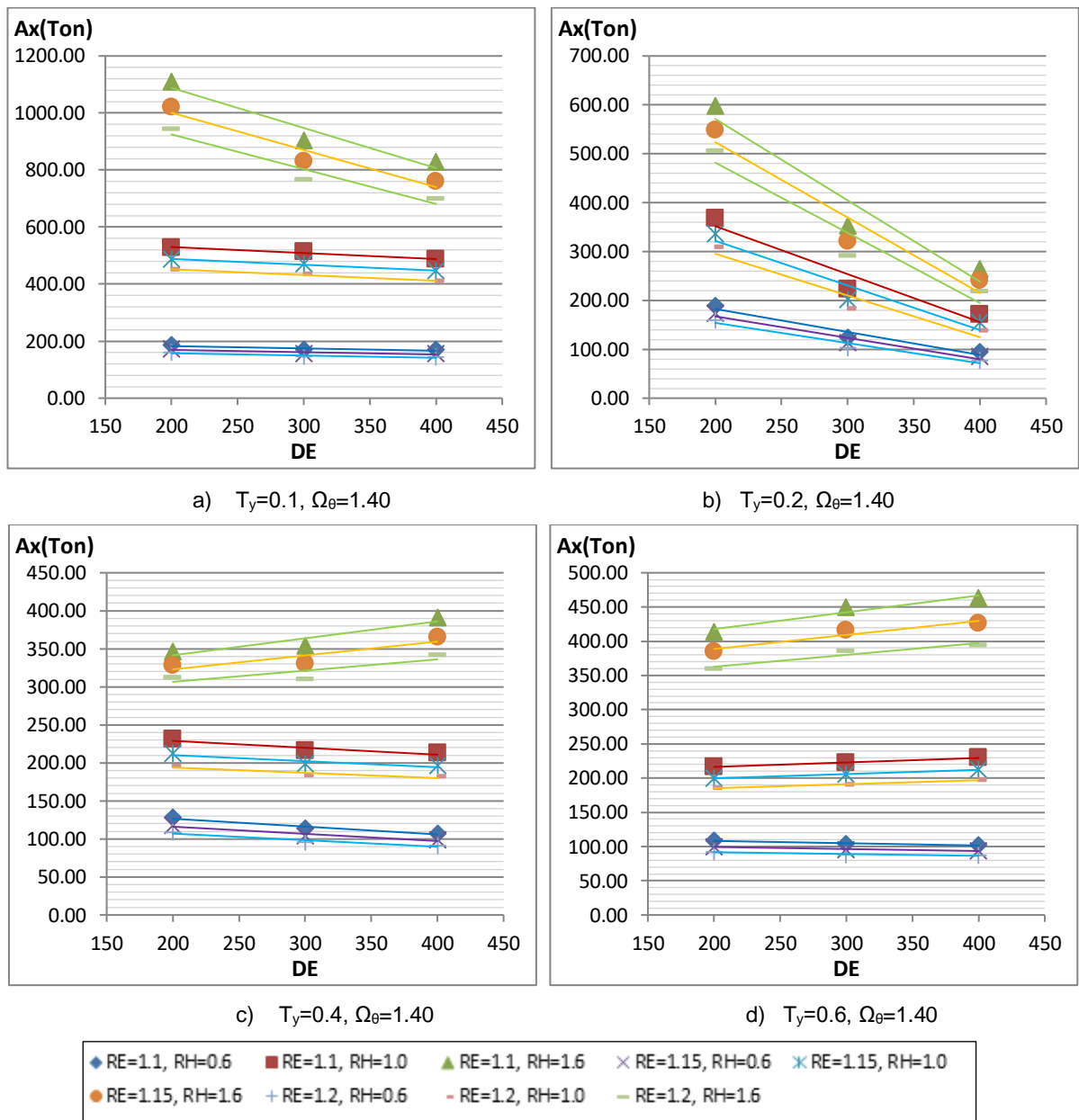


Figura 6.17. Relación del axial en arriostres frente a los parámetros

Las tendencias que se generaron por los diferentes parámetros son similares a las respuestas anteriores; sin embargo, se observó que en las respuestas

correspondientes al periodo de vibración $T_y=0.2s$ se tuvieron tendencias más pronunciadas a medida que se incrementó el parámetro DE en comparación con las otras respuestas. En relación a los otros parámetros, se encontró que las variaciones si siguen un patrón similar a los anteriores, como es la disminución del esfuerzo cuando aumento el parámetro RE y el aumento esperado del axial cuando el tanque se encuentra más lleno. Asimismo, no se muestra los resultados para distintos grado de acoplamiento por no tener mucha influencia

Los esfuerzos axiales como ya se había comentado representan la tracción y compresión de los miembros. Los máximos axiales se ubican en los arriostres que tienen una dirección más paralela a la dirección de la fuerza (Fig. 6.18). Para los casos en que el tanque tiene el mayor parámetro RH, se obtuvo un esfuerzo axial de 1109.91 Ton para el caso con periodo de vibración $T_y=0.1s$, mientras que el mínimo fue de 346.533 Ton, correspondiente al periodo de vibración $T_y=0.4s$.

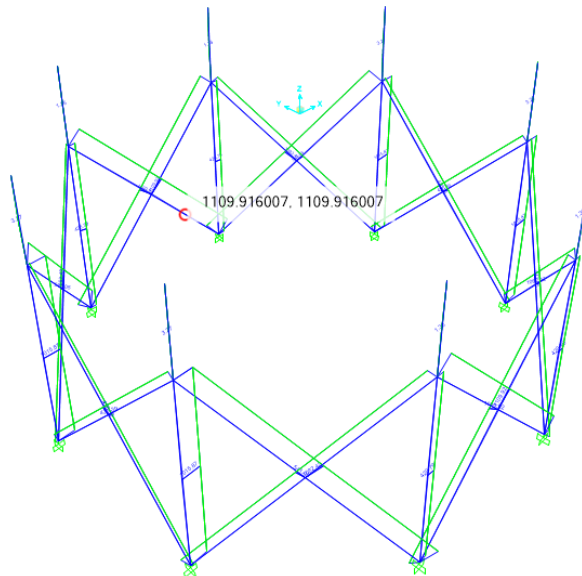


Figura 6.18. Esfuerzos Axiales - Modelo 11113

De forma análoga a la respuesta anterior, se presenta la variación que se originaron con el uso de las tres configuraciones propuestas (Fig. 6.19). Se pudo notar que los esfuerzos axiales máximos son 1360.15 Ton, 1109.91 Ton y 994.84 Ton para las configuraciones de 6, 8 y 10 columnas, respectivamente. Es importante ver en cuanto disminuye el axial para cada uno de estos casos, entre

las configuraciones de 6 y 8 columnas existe una diferencia de 250.24 Ton, mientras que entre el de 8 y 10 columnas esta diferencia es de 115.07 Ton.

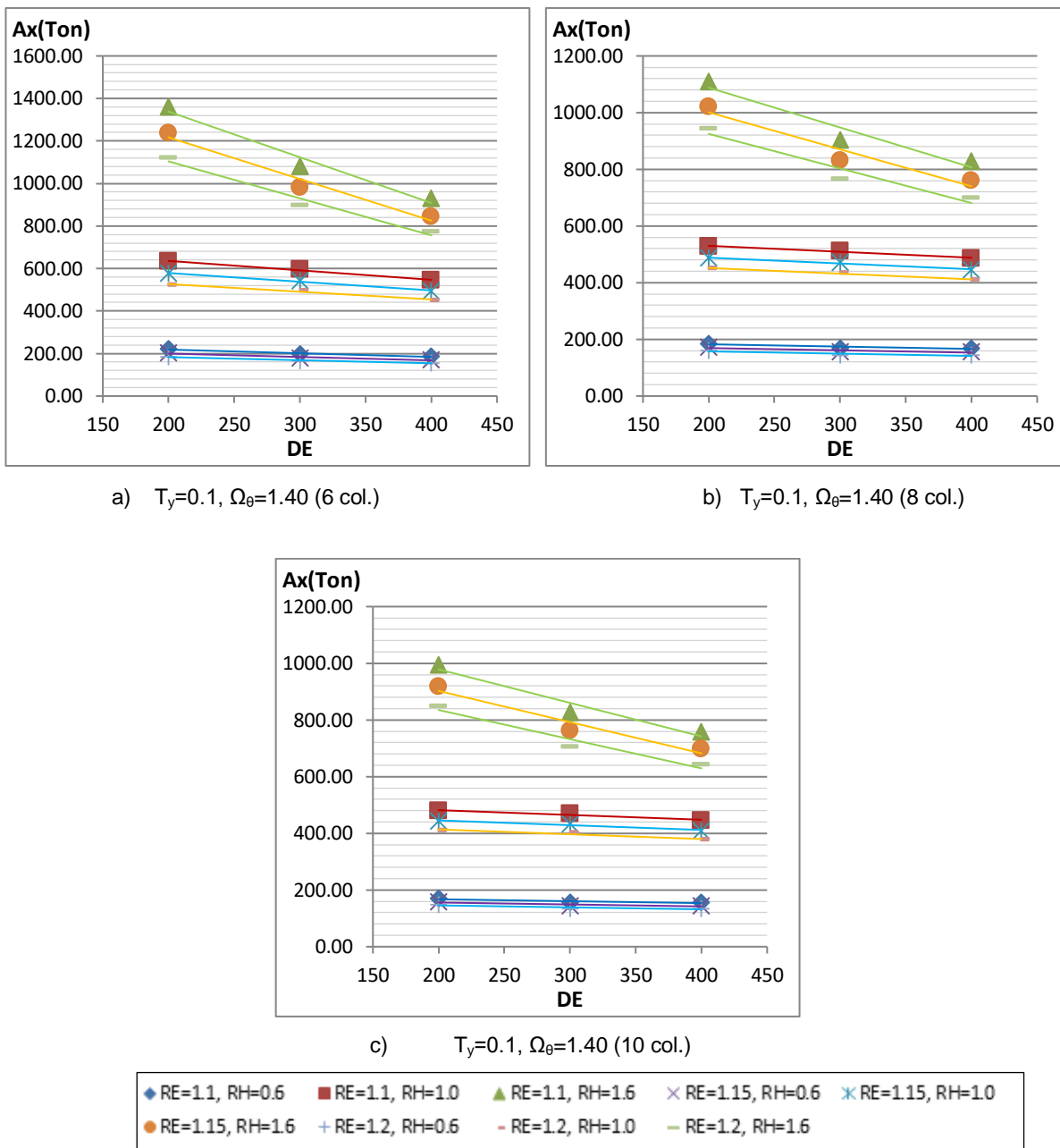


Figura 6.19. Comportamiento del axial en arriostres según configuración

6.3.4 Comparación de configuraciones de soporte

Se ha observado que para cada configuración, las variaciones en cada una de las respuestas tienden a ser similares. Sin embargo, si se quiere conocer que configuración es más adecuada para una combinación de parámetros en concreto es necesario realizar un análisis comparativo. Para este fin, se eligió comparar la máxima cortante sísmica global (RH=1.6), con el volumen total de acero de la estructura de soporte (volumen de columnas y arriostres).

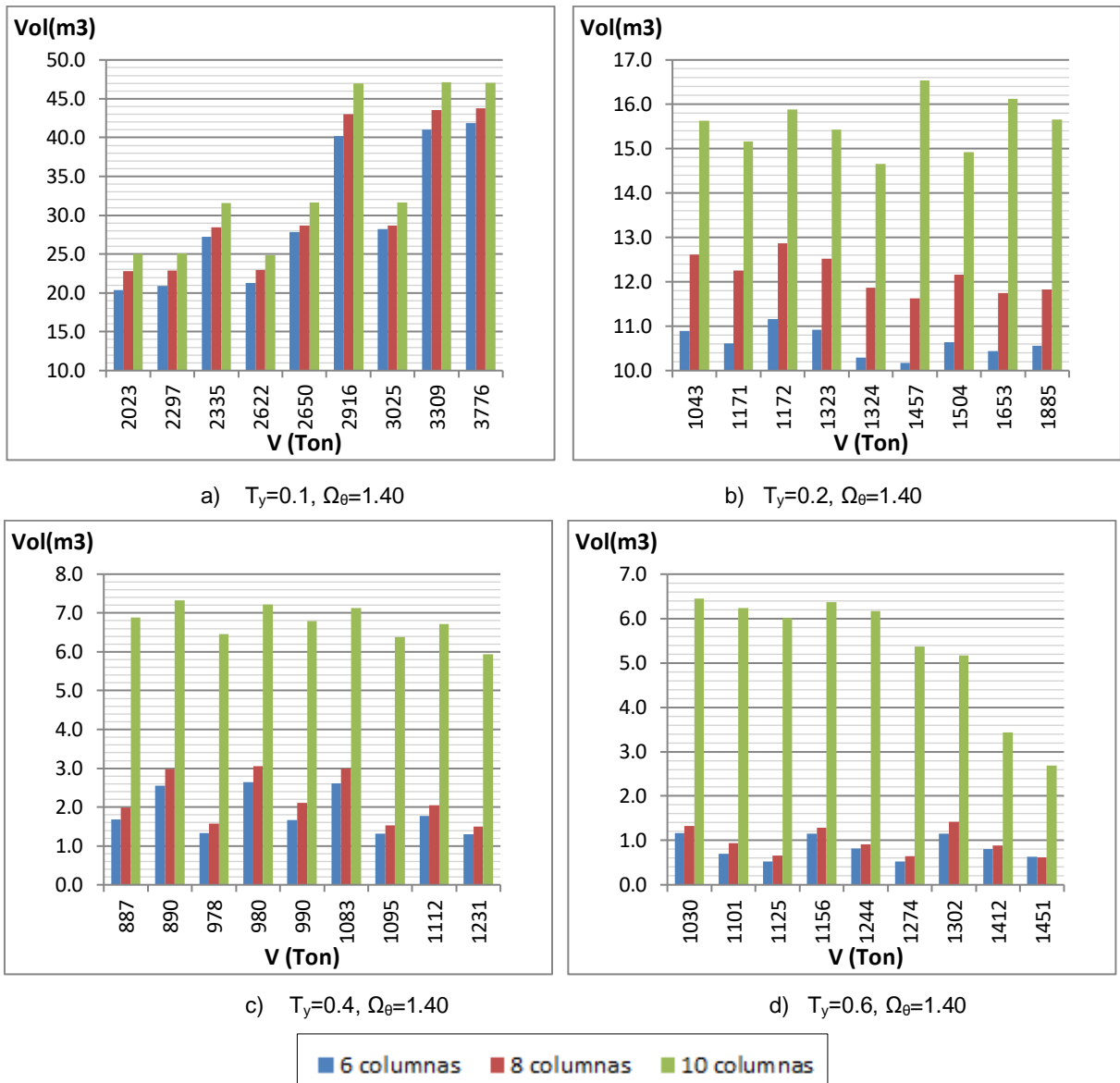


Figura 6.20. Comparación del volumen total de acero según configuración

De esta forma en la Fig. 6.20 se percibió que en general se obtienen mayores volúmenes a medida que aumenta el número de columnas. Para períodos de vibración $T_y=0.1s$ esta diferencia no fue tan marcado, por ejemplo el máximo valor que se obtuvo para la configuración de 10 columnas es $47.05 m^3$ y el máximo para el de 6 columnas fue $43.77 m^3$. Por otro lado, para periodos más grandes, en específico para los de 0.4s y 0.6s se observó que los volúmenes para los casos de 6 y 8 columnas son muy similares, mientras que para el de 10 estuvo más alejado; sin embargo, la diferencias fueron de aproximadamente $4 m^3$. Como conclusión, se puede señalar que para tanques más rígidos, es preferible utilizar un mayor número de columnas, para de esta manera disminuir las áreas de las secciones que son usualmente grandes. En cambio para tanques más flexibles, no es tan conveniente utilizar tanques con 10 columnas ya que se genera un aumento en el volumen de acero en comparación con las otras alternativas.

6.4 MODELO SIMPLIFICADO

Luego de haber estudiado la influencia de cada uno de los parámetros en las respuestas de interés, se consideró realizar un modelo simplificado a partir de los parámetros escogidos. Para ello se muestra otra vez el modelo de dos masas (Fig. 6.21), y con ello se formularon cada respuesta en relación con los parámetros.

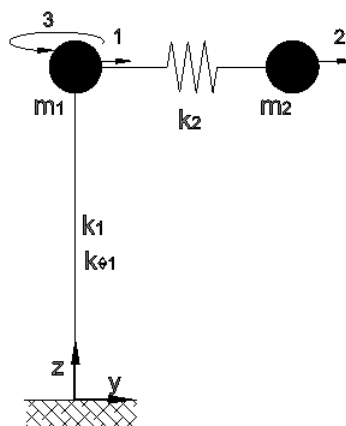


Figura 6.21 Modelo simplificado tipo Péndulo Invertido.

Ecuación dinámica

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ r_{g1} \cdot \ddot{u}_{\theta 1} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ \frac{(e_1 \cdot k_1)}{r_{g1}} & 0 & \left(\frac{1}{r_{g1}}\right)^2 (k_{\theta 1}) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ r_{g1} \cdot u_{\theta 1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{g1} \\ \ddot{u}_{g2} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.14)$$

Dónde u_i es el desplazamiento lateral traslacional del gdl i , $u_{\theta 1}$ es el desplazamiento rotacional de la masa m_1 al rededor del eje Z, u_g es el desplazamiento horizontal del suelo, r_{g1} es el radio de giro del soporte, y e_1 es la excentricidad accidental asociada a la masa m_1 .

Periodos y modos

Habiendo visto que el efecto de la excentricidad no es determinante, se consideró trabajar un modelo sin esta componente. De esta forma se tendría calculado los valores de periodos de acuerdo con el Ítem 6.1, sin embargo se reformularon considerando los parámetros propuestos (Ecs. (6.15) a (6.19)).

$$\omega_i^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1 + k_2}{m_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1 + k_2}{m_1} \right)^2 - \frac{4 \cdot k_1 \cdot k_2}{m_1 \cdot m_2}} \right] \quad (6.15)$$

Dónde:

$$m_1 = \left(\frac{Ht}{RE \cdot DE} \cdot \left(\frac{P_{esp.a}}{9.81} \right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{Ht}{RE} \right)^2 \right) + \left(P_{esp.w} \cdot \pi \cdot \left(\frac{Ht \cdot RH}{2 \cdot RE} \right)^3 \cdot \left(\frac{1}{RH} - \frac{1}{3} \right) \right) \cdot (1 - f_{(RH)}) \quad (6.16)$$

$$m_2 = \left(P_{esp.w} \cdot \pi \cdot \left(\frac{Ht \cdot RH}{2 \cdot RE} \right)^3 \cdot \left(\frac{1}{RH} - \frac{1}{3} \right) \right) \cdot f_{(RH)} \quad (6.17)$$

$$k_1 = \left(\frac{2\pi}{T_y} \right)^2 \cdot \left(\frac{Ht}{RE \cdot DE} \cdot \left(\frac{P_{esp.a}}{9.81} \right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{Ht}{RE} \right)^2 \right) \quad (6.18)$$

$$k_2 = \frac{2 \cdot RE \cdot 9.81}{Ht} \cdot \left(P_{\text{esp.w}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{Ht \cdot RH}{2 \cdot RE} \right)^3 \cdot \left(\frac{1}{RH} - \frac{1}{3} \right) \right) \cdot \lambda_{(RH)} \cdot f_{(RH)} \quad (6.19)$$

Donde $f_{(RH)}$ es la relación de masa convectiva con la masa total (Tabla 2.3), $\lambda_{(RH)}$ es valor normal del oleaje (Tabla 2.2), $P_{\text{esp.a}}$ es el peso específico del acero y $P_{\text{esp.w}}$ es el peso específico del agua.

Conocido las frecuencias angulares (ω), los modos se calculan con la expresión ya dada en el Ítem 6.1 sin embargo para normalizarlo respecto a la masa es necesario multiplicarlo por un factor b (Ec. (21)).

$$\{\phi_i\} = \left\{ \frac{1 - \omega_i^2 / \omega_1^2}{1} \right\} \quad (6.20)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega_i^2 / \omega_1^2)^2 \cdot m_1 + m_2}} \quad (6.21)$$

Desplazamiento

Los desplazamientos de cada modo se calculan con la Ec. (6.21). Sin embargo, es importante señalar que para utilizar estas ecuaciones los modos deben estar normalizados respecto a la masa.

$$u_i = \phi_i \cdot S_d \cdot \alpha_i, \quad \text{Donde } \alpha_i = \phi_i^T \cdot M \cdot I \quad (6.21)$$

Cortante y momento

El cálculo de estas respuestas se realizó a partir de los desplazamientos obtenidos y con la matriz de rigidez del sistema, así se tendría las Ecs. (6.22) y (6.23).

$$V_i = k_1 \cdot u_i \quad (6.22)$$

$$M_i = V_i \cdot Ht \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot RE} \right) \quad (6.22)$$

Por último se combinan los resultados de cada modo utilizando el criterio de los métodos cuadrados SRSS.

6.4.1 Calibración del modelo

La simplificación del cálculo de periodo de vibración T_y de la estructura considerando solo la rigidez del soporte es válida, ya que la rigidez que aporta la esfera es mínima en comparación al del soporte. En la Fig. 6.22 se presenta la diferencia de los periodos de vibración lateral obtenidos en los modelos paramétricos y los valores fijos del parámetro T_y , verificando que estas diferencias no son muy grandes, pero cabe señalar que la rigidez de la esfera empieza a ser más influyente en el valor de T_y a medida que se tiene una estructura de soporte más flexible. Si bien los errores en los casos en estudio son menores al 13%, esta simplificación genera que el modelo simplificado sea menos rígido que la estructura real y por ende se obtendrían valores de cortantes menores a los reales, resultando menos conservador.

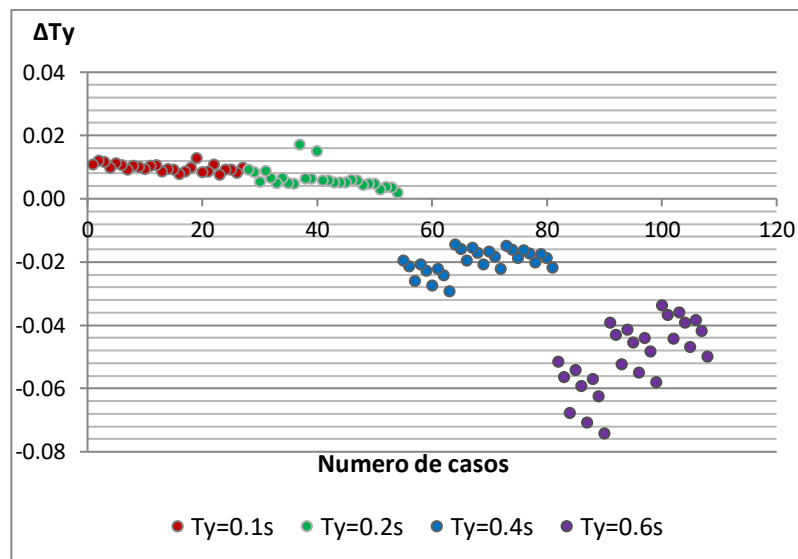


Figura 6.22. Variación de T_y para los casos paramétricos

Lo que se propone es aplicar un factor de calibración (j) a los casos con periodo largo, el cual depende del periodo T_y . En la Fig. 6.23 se compara el ratio entre el valor del periodo real con el periodo T_y (T_{re}/T_y) vs el periodo T_y . Se consideró los valores desde el T_y de 0.2s ya que es a partir de este periodo en que empieza a disminuir el ratio.

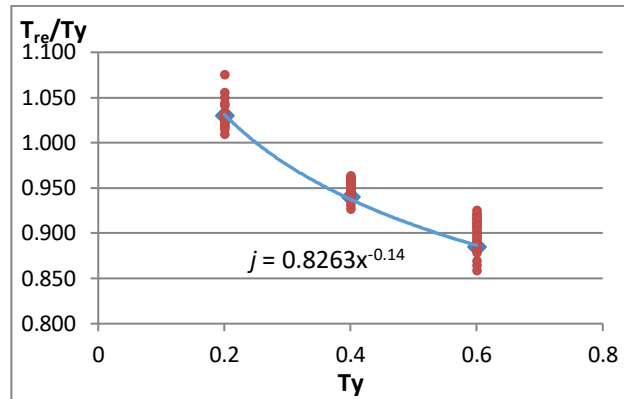


Figura 6.23. Relación entre ratio T_{re}/T_y vs T_y

Si bien los valores del ratio T_{re}/T_y están relativamente disperso, se observa que para los casos de $T_y = 0.2s$ este valor es cercano a la unidad. Para los otros periodos si se observa una disminución de estos ratios, para el periodo de vibración T_y de 0.4s se tienen una variación de 0.927 a 0.96, mientras que para el periodo de vibración T_y de 0.6s se tiene una variación de 0.86 a 0.92. Debido a que estas diferencias no son tan excesivas, se planteó una relación exponencial que relacionen las medias de los ratios con el periodo T_y . El factor de calibración j que se aplicara a los modelos con el parámetro T_y mayor a 0.2s esta descrito por dicha relación. Por lo tanto el T_y^* corregido esta dado por la Ec. (6.23).

$$T_y^* = (0.5263 * T_y^{-0.14})T_y = 0.5263 * T_y^{0.86} \quad (6.23)$$

6.4.2 Validación

Los resultados de los casos utilizando el modelo simplificado fueron comparados con los obtenidos mediante los modelos tridimensionales. En la Fig. 6.24 se presenta los porcentajes de error obtenidos para los periodos convectivos e impulsivos, así como los principales resultados globales (Cortante, momento y desplazamiento).

En los periodos convectivos e impulsivos se obtuvo errores promedio de 0.35% y 1.55%, comprobando una buena aproximación de resultados. Los casos donde se presenta los mayores errores son puntuales alcanzado un valor de 5% y son principalmente los relacionados a los periodos de vibración T_y de 0.1s y 0.2s. Esto se debe por la dificultad que se tuvo al encontrar una combinación de las

secciones de soporte para lograr alcanzar exactamente el valor de T_y propuesto. Si bien se obtuvo valores de periodos cercanos al propuesto (Fig. 6.24), esta variación genera un porcentaje de error mínimo. Por otro lado, para los casos con periodo T_y largo, los resultados en promedio tienen un menor porcentaje de error, no obstante llegan a tener un máximo valor de 4.7 %.

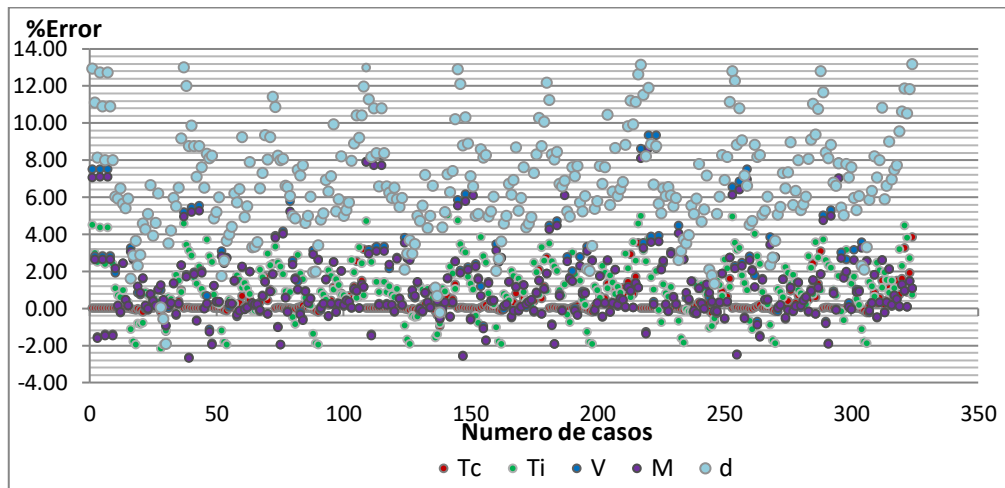


Figura 6.24. Porcentaje de error entre modelo simplificado y modelo tridimensional

Para los cortantes y momentos los errores promedio resultaron 1.65% y 1.55%, respectivamente. Además, ningún porcentaje de error superó el 9%. Los valores máximos fueron los correspondientes a los casos donde se obtuvo los mayores errores de los periodos. Por último, en los desplazamientos si se presentan mayores porcentajes de error, en promedio se obtuvo 6.80%. A pesar de tener los más grandes porcentajes de errores, estos no superan el 14% y además un 75% de resultados no supera el 9%. En resumen, el modelo simplificado da muy buenos resultados para los periodos convectivos, impulsivos, cortantes, momentos y desplazamiento, con porcentajes de errores en promedio menor a 9%. Sin embargo, es importante señalar que existen algunos casos en donde los errores son mayores al 10% para los valores del desplazamiento, lo cual se atribuye a la diferencia de periodo de vibración T_y utilizado en los modelos tridimensionales (Fig. 6.24).

6.4.3 Influencia de la altura total en las respuestas

Las respuestas calculadas de los modelos tridimensionales fueron calculados considerando una altura fija de 15m, Para saber que tanto afecta la diferencia de

altura en las respuestas globales, se utilizó el método simplificado. De las formulaciones de las características de la estructura (Ecs. (6.16) a (6.19)), queda claro que la variación de altura no influye de manera lineal. La variación de las respuestas globales depende en gran medida con el periodo de vibración lateral T_y . En las Figs.6.25 y 6.26 se presentan los periodos impulsivos y convectivos que se obtienen conforme se va variando la altura total de los tanques. Estos resultados fueron calculados con valores paramétricos de RE, DE y Ω_θ iguales a 1.1, 200 y 1.4, respectivamente. Además se incluyeron resultados de los periodos suponiendo un comportamiento desacoplado, es decir los periodos impulsivos y convectivos fueron calculados mediante la Ec. (6.7).

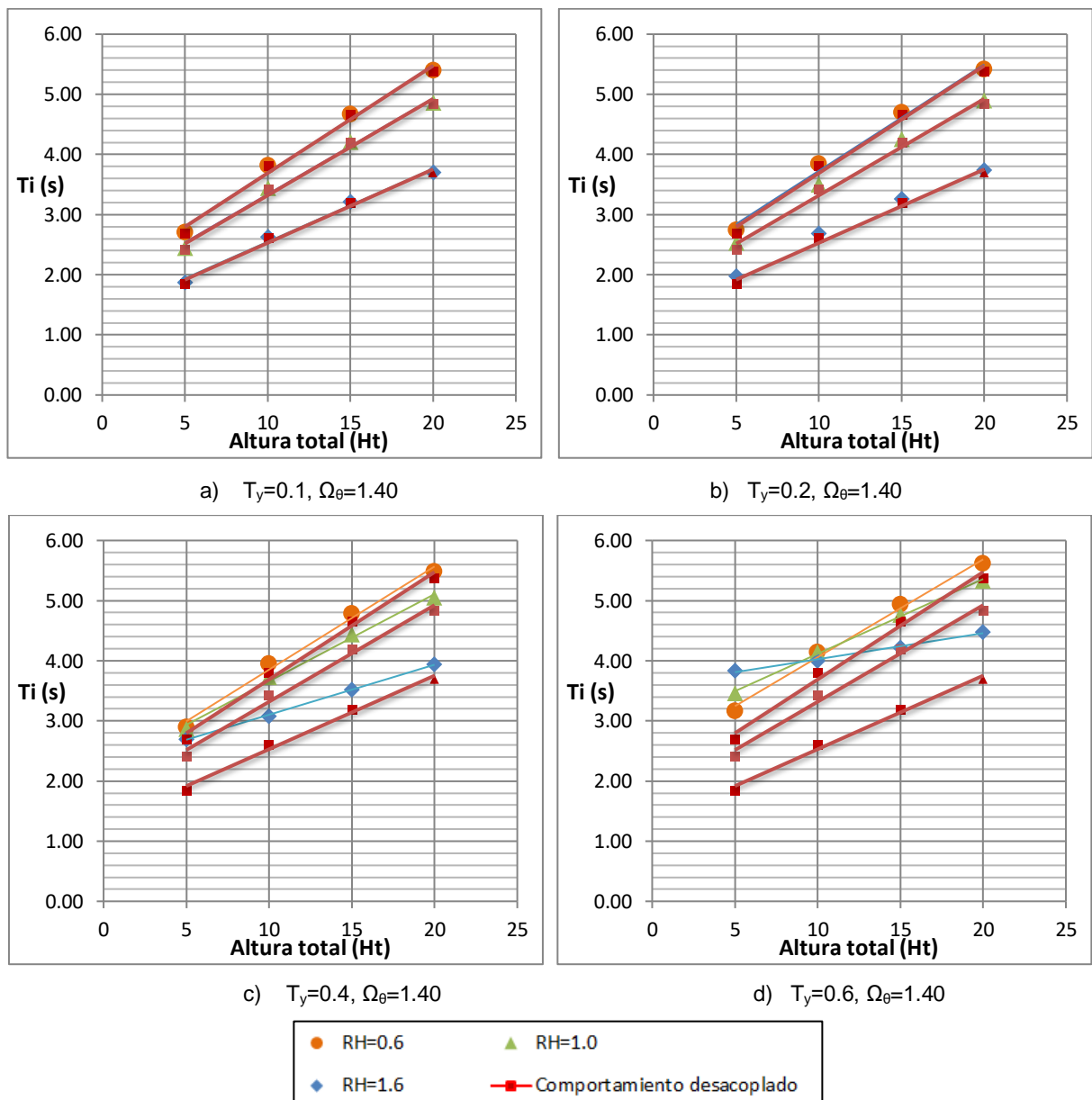


Figura 6.25. Periodo Impulsivo vs Altura total

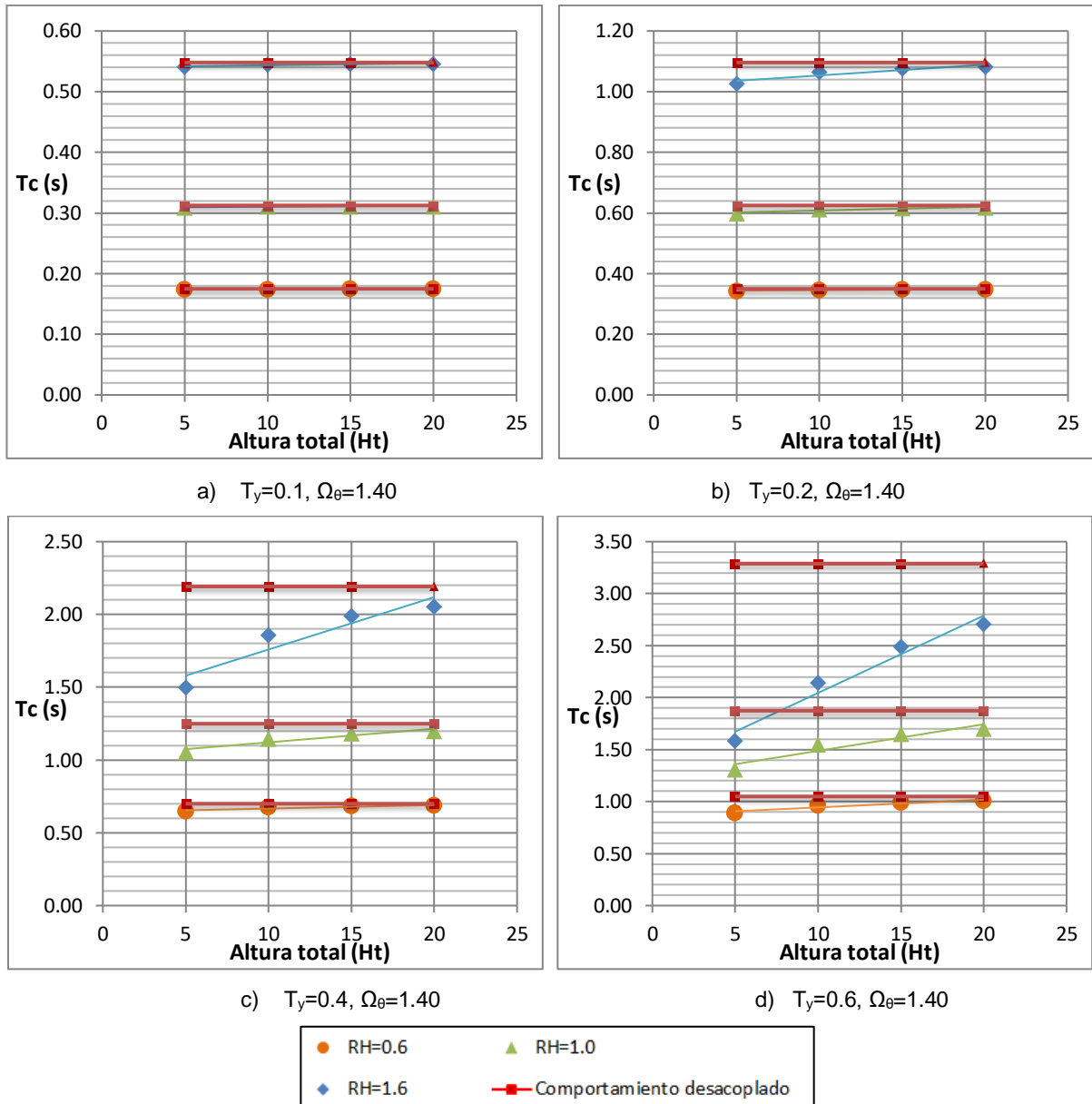


Figura 6.26. Periodo Convectivo vs Altura total

Estas gráficas proporcionan una mayor visión del comportamiento de tanques con distintas alturas, pero con semejantes valores paramétricos. En la Fig. 6.25 se observó un comportamiento prácticamente lineal para los casos con periodos de vibración T_y cortos; además, los valores del periodo impulsivo fueron muy cercanos a los valores desacoplados por lo que se podría utilizar la Ec. (6.7) sin problema. Por otro lado, para los casos con periodos de vibración T_y largos, si se tiene una mayor diferencia. En general los periodos impulsivos son mayores que los valores desacoplados y aumenta de forma proporcional al parámetro RH. En relación a la altura total, se observó que a menor altura total se tiene una mayor

diferencia en relación a los valores desacoplados. Para cuantificar las variaciones existentes se realizó un cuadro comparativo entre los periodos obtenidos y los desacoplados para el caso $T_y=0.6$, $\Omega_\theta=1.4$ y $RH=1.6$ (Tabla 6.3). Se observó que la variación aumenta con la altura total obteniendo un máximo valor de 107.8% para $H_t=5m$.

Tabla 6.3: Relación de Periodos impulsivos y convectivos con la altura total de la estructura para $T_y=0.6$, $\Omega_\theta=1.4$ y $RH=1.6$

Altura Total(Ht)	Comp. Impulsiva			Comp. Convectiva		
	Ti	Ti _{acpl}	%Variación $=\left(\frac{T_i}{T_{i_{acpl}}} - 1\right)$	Tc	Tc _{acpl}	%Variación $=\left(\frac{T_c}{T_{c_{acpl}}} - 1\right)$
5	3.834	1.845	107.80	1.583	3.288	-51.855
10	4.12	2.609	57.91	2.144	3.288	-34.793
15	4.2	3.196	31.41	2.49	3.288	-24.270
20	4.48	3.7	21.08	2.707	3.288	-17.670

En la Fig. 6.26, se observa un comportamiento similar en los periodos convectivos, ya que para periodos bajos, los valores prácticamente coinciden con los valores desacoplados. En estos casos no importa a altura de la estructura ya que se tiene un valor constante para cada parámetro RH. A medida que aumentan los periodos de vibración T_y los valores del periodo convectivo son menores al de los valores desacoplados. Asimismo, se observa una mayor disminución cuando se tiene una menor altura obteniendo una máxima variación de -51.85% para $H_t=5m$.(Tabla 6.3)

La influencia de la altura en las otras respuestas, está ligado prácticamente al comportamiento del desplazamiento. De la Ec. (6.21) se tiene que el desplazamiento depende del modo y el factor de Pseudo-desplazamiento (Sd), Para el estudio del desplazamiento no se considerará el factor Sd, ya que es una constante que depende del periodo. Las Figs. 6.27 y 6.28 indican la variación del factor de desplazamiento ($\Phi_i \alpha_i$) vs la altura total, correspondientes al primer y segundo modo.

De las Figs. 6.27 y 6.28, se observó otra vez una clara diferencia entre los casos con periodos de vibración T_y cortos y largos. Para los periodos de vibración T_y iguales a 0.1s y 0.2s se apreció que el modo predominante es el segundo, no obstante se debe señalar que existe un comportamiento conjunto cuando el

parámetro RH aumenta. Esta diferencia crece para los casos con periodo más grandes. En general la altura aumenta la influencia del segundo modo en el desplazamiento, mientras que el parámetro RH aumenta la influencia del primer modo, esto se debe a que el primero empieza a presentar un movimiento acoplado de la estructura y el líquido. En efecto, para la altura de 5m se observa que el desplazamiento del tanque con RH=1.6 está regido casi totalmente por el primer modo.

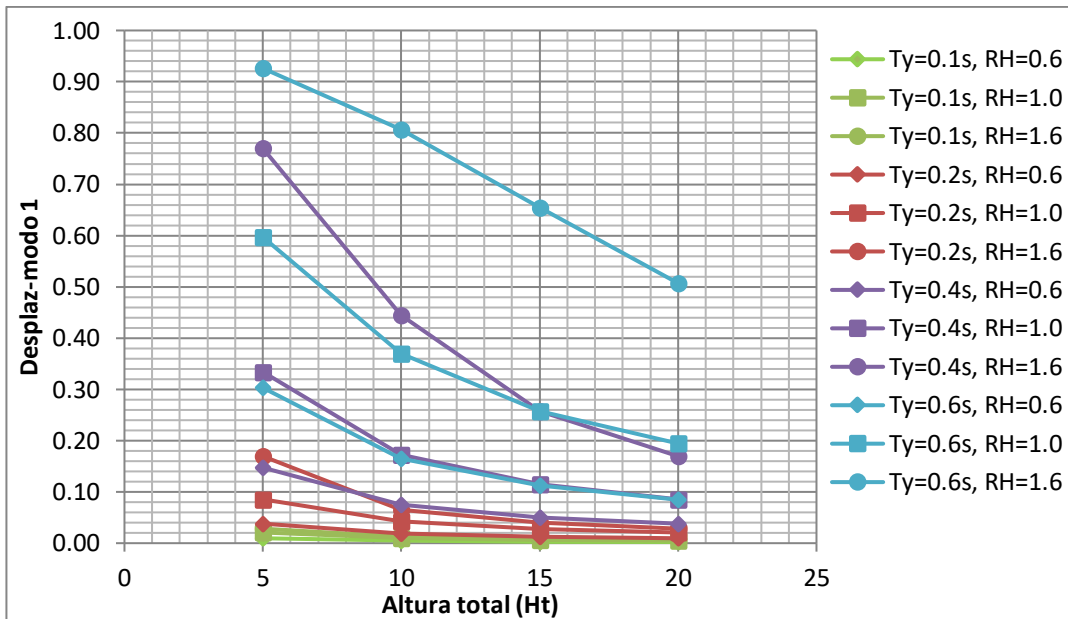


Figura 6.27. Variación del factor de desplazamiento vs Altura total para el modo 1

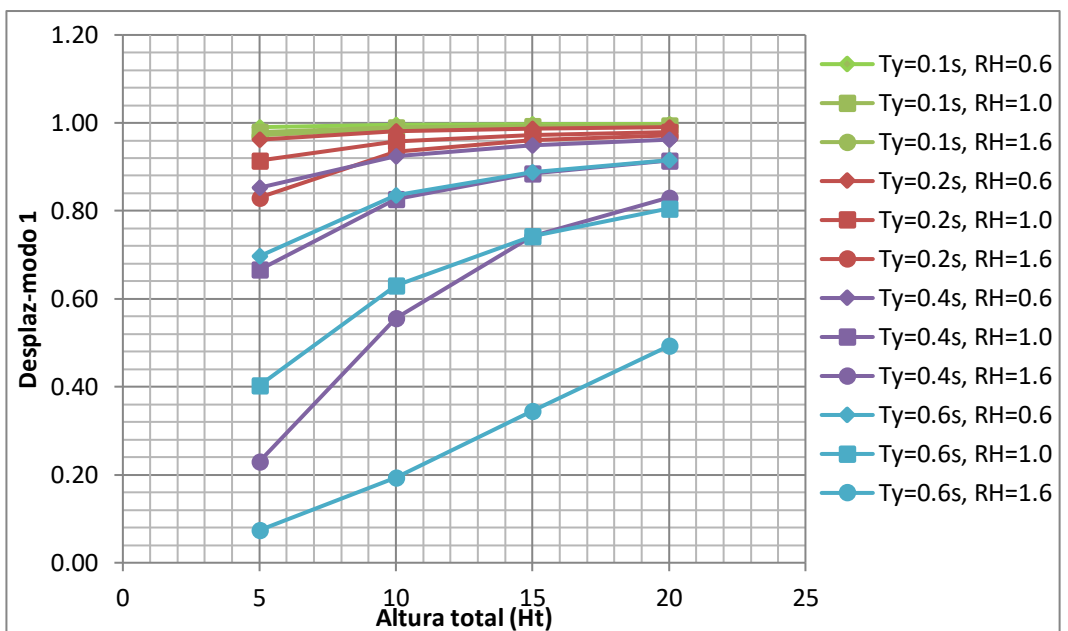


Figura 6.28. Variación del factor de desplazamiento vs Altura total para el modo

CONCLUSIONES

Del comportamiento general de la estructura y de los códigos de diseño se obtuvo las siguientes conclusiones:

1. El Eurocódigo es el código que presenta los factores más conservadores para el cálculo de la fuerza sísmica (Tabla 2.10), debido principalmente al valor del coeficiente de reducción. En contraparte el menos conservador resulto el AWWA D100,
2. El código ASCE 7-10 proporciona una mayor claridad en la clasificación del factor de reducción, por lo que fue utilizado como complemento de la norma E.030 en la elaboración del espectro sísmico.
3. Se generaron expresiones simplificadas para calcular las rigideces lateral y torsional de la estructura de soporte. De estas expresiones se pudo observar la influencia de las características geométricas en ellas, principalmente las propiedades de secciones de columnas y arriostres.

Del estudio realizado para la familia reducida de casos se obtuvo las siguientes conclusiones:

1. Se comprobó que el modelo tridimensional utilizado no superó el 8% de error con relación al modelo de elementos finitos (Tablas 4.7, 4.8 y 4.9) para tres distintos porcentajes de llenado ($RH= 0.6, 1, 1.4$).
2. Se analizó el comportamiento sísmico de los siete tanques, apreciando distintas tendencias. Éstas fueron generadas prácticamente por la variación del factor de zona, el volumen de la esfera, el nivel de llenado y las rigideces del sistema de soporte (Figs. 4.17 y 4.18).
3. Se verificó que la masa de la estructura depende del parámetro DE a partir de un análisis de sensibilidad. Se concluyó que la masa de soporte influye en menos de 2% al periodo de vibración de la estructura (Tabla 5.1). De similar manera el radio de giro fue analizado, observando que también queda definido por el parámetro DE (Tabla 5.2).

Del estudio paramétrico realizado se obtuvo las siguientes conclusiones:

1. Se observó dos comportamientos de los periodos impulsivos (T_i) y convectivos (T_c) definidos por el parámetro T_y . Para periodos de vibración cortos ($T_y = 0.1s \sim 0.3s$) se presentó un comportamiento desacoplado entre el líquido y la estructura, mientras que para periodos largos ($T_y = 0.4s \sim 0.6s$), los modos tuvieron un comportamiento acoplado generando distintas respuestas.
2. El parámetro más influyente en el periodo impulsivo (T_i) fue el DE, el cual tiene una relación directamente proporcional con el periodo, reduciendo su tendencia a medida que el periodo de vibración T_y aumenta.
3. El valor del periodo convectivo (T_c) fue constante para los periodos cortos, con una ligera variación para distintos valores del parámetro RE; mientras que para los periodos largos se tuvo una tendencia creciente con relación al parámetro DE, esta tendencia se hizo más grande con el parámetro RH.
4. La cortante basal y el momento volcante tuvieron un comportamiento semejante, el cual estuvo claramente diferenciado entre los de periodos cortos y largos. Para periodos cortos los valores de las respuestas disminuyeron a medida que aumenta el parámetro DE con un máximo porcentaje de variación de -30.6%, mientras que para periodos largos esta tendencia se invirtió progresivamente, alcanzando un porcentaje de variación de 17.6%.
5. Se estudió el comportamiento de las derivas para distintas zonas sísmicas, verificando los casos paramétricos que cumplen con el límite establecido por el código ASCE 7-10. Los casos con periodo de vibración $T_y=0.1s$ cumplen para todas las zonas sísmicas, los de $T_y = 0.2s$ son más apropiados para zonas sísmicas intermedias y los tanques con periodo $T_y=0.4s$ y $T_y=0.6s$ cumplen para zonas sísmicas bajas.
6. El grado de acoplamiento (Ω_θ) no resultó muy influyente en la mayoría de las respuestas, excepto en los giros; en donde sí se observó una clara disminución a medida que aumentaba este parámetro. No obstante, los giros no resultaron muy grandes, esto debido a la gran rigidez torsional que presentan estas estructuras.

7. Los valores de los esfuerzo locales, como el cortante y el momento en las columnas, variaron de igual manera que el cortante basal en relación a los parámetros considerados. Asimismo, se observó que los máximos cortantes se dan en la parte superior de las columnas, mientras que los máximos momentos se dan en la intersección de la columna con los arriostres.
8. Se observó que para tanques más rígidos, es conveniente utilizar un mayor número de columnas, con el fin de disminuir las áreas de las secciones que son usualmente grandes. En cambio para tanques más flexibles, no resulta tan conveniente utilizar tanques con 10 columnas ya que se genera un ligero mayor volumen de acero en comparación con las otras alternativas.

Del estudio con el modelo simplificado se obtuvo las siguientes conclusiones:

1. Se generó expresiones analíticas del movimiento dinámico con un modelo simplificado del tipo péndulo invertido, el cual estuvo compuesto por una masa que representaba la estructura y la componente impulsiva del líquido; y la otra masa que representaba la componente convectiva. Los valores de la ecuación dinámica de la estructura fueron calculados a partir de los parámetros propuestos (Ecs. (6.16) a (6.19)).
2. El método simplificado permite la obtención de los principales respuestas globales con errores en promedio menor de 5% para los periodos, cortantes y momentos; mientras que para los desplazamientos los errores en promedio son cercanos al 7%. Además, los errores máximos no superan el 14%.
3. Se observó que la influencia de la altura total de la estructura (H_t) en los periodos impulsivos y convectivos para los casos periodos de vibración T_y cortos, son similares a los obtenidos considerando un desacoplamiento total entre las dos componentes. Por otro lado para los casos con periodos de vibración largos si se observó mayores variaciones. Para el periodo impulsivo se observó que la variación con los valores desacoplados aumenta con la disminución de la altura total obteniendo un máximo valor de 107.8% y para el periodo convectivo se observa una mayor disminución con los valores desacoplados cuando se tiene una menor altura obteniendo una máxima variación de -51.85% (Tabla 6.3).

RECOMENDACIONES

Del estudio realizado se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda que se genere una normativa peruana específica para el análisis y diseño sísmico de tanques de almacenamiento, debido a la poca información que se tiene y a su gran importancia en distintos ámbitos.
2. Se recomienda analizar los tanques de almacenamiento incluyendo siempre la componente dinámica del líquido, ya sea con el uso de modelos equivalentes o por medio de elementos finitos.
3. Es importante señalar que en el presente estudio se utilizó agua como líquido almacenado. El agua presenta una mayor densidad en comparación con los gases líquidos que son usualmente usados en los recipientes a presión, por lo que se obtendrían mayores fuerzas sísmicas. En consecuencia, se recomienda estudiar la estructura con diferentes líquidos almacenados, a fin de observar la variación entre ellos.
4. Se recomienda una mayor investigación en estos tipos de estructuras, los cuales pueden abarcar el uso de distintos tipos de suelos; así como el uso de diferentes elementos que ayuden a reducir los esfuerzos sísmicos (aisladores y disipadores). También se recomienda realizar análisis tiempo-historia usando los principales registros sísmicos locales para observar su comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abramson, H. N., Chu, W.-H., and Garza, L. R., "*Liquid Sloshing in Spherical Tanks*", AIAA J., 1, p. 384–389. (1963)
2. Akatsuka H., Kobayashi H., "*Fire of Petroleum Tank, etc by Niigata Earthquake*" Failure knowledge database. Japan science and technology agency. (2008)
3. ANSYS, ANSYS Mechanical. ANSYS Inc. UNI-FIM License. (2015)
4. API 650, "Welded storage tanks for oil storage", American Petroleum Institute Standard, Washington, DC. (2007)
5. Architectural Institute of Japan (AIJ). "*Design Recommendation for Storage Tanks and Their Supports*". AIJ, Tokyo, Japan.(2010)
6. ASCE, "*Minimum Design Loads for Building and Other Structures*". ASCE/SEI 7-10. (2010)
7. ASME, "*Boiler and pressure vessel code*". Section VIII, pressure vessels. (2010)
8. AWWA D-100, "Welded steel tanks for water storage", American Water Works Association, Colorado. (1996)
9. Budiansky, B., "*Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks*". J. Aerosp. Sci., v. 27, p. 161–173. (1960)
10. Castellano, M.G., Poggianti, A., Summers, P., "*Seismic retrofit of spheres using energy-dissipating braces*", First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, Switzerland. (2006)
11. Ciampi V., De Angelis M., Di Cave S., Luccone L. , Ciucci M., "*Passive Control For Seismic Protection Of Critical Components In Industrial Process Plants*", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper N° 1836. (2004)
12. Curadelli O. "*Seismic reliability of spherical containers retrofitted by means of energy dissipation devices*". Engineering Structures, vol. 33, p. 2662 - 2667 (2011)
13. Curadelli O., Ambrosini D., Mirasso A., Amani M., "*Resonant Frequencies in A Spherical Elevated Container Partially Filled With Water: FEM And Measurement*", Mecánica Computacional Vol XXVII, p. 1907-1920. (2008)
14. Chopra, A.K., "*Dynamics of structures*". Prentice Hall Inc, USA. (1995)

15. Clough Ray, Penzien Joseph, *"Dynamics of structures"*. Computers and structures Inc. USA. (2003)
16. CSI. Sap2000. Structural Analysis Program, Computers and Structures, Inc. Berkeley, CA. UNI License. (2008)
17. Drosos J., Tsinopoulos S., Karabalis D., *"Seismic Response Of Spherical Liquid Storage Tanks With A Dissipative Bracing System"*, 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics, p. 31-319. (2005)
18. Drosos G. C., Dimas A. A. and Karabalis D. L., *"Discrete Models for Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks of Arbitrary Shape and Fill Height"*, Journal of Pressure Vessel Technology (2008).
19. Durukal E., Erdik M. *"Physical and economic losses sustained by the industry in the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake"*. Natural Hazards Vol. 46, Issue 2, p. 153–178. (2008)
20. Eurocode 8, *"Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1- General rules and Part 4 – Silos, tanks and pipelines"*, European committee for Standardization, Brussels. (2006)
21. Evans D.V., Linton C.M. *"Sloshing Frequencies"*. Quart. J. Mech. Appl. Math., v.46, p. 71–87. (1993)
22. Faltinsen, O. M., Timokha, A. N., *"Analytically approximate natural sloshing modes for a spherical tank shape"*, Journal of Fluid Mechanics, 703, p. 391-402. (2012)
23. García L.E., *"Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico"*, Universidad de los Andes, Bogotá, CO. (1998)
24. Graham, E. W., and Rodriguez, A. M., *"The Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics"*, ASME J. Appl. Mech., 19, p. 381–388. (1952)
25. Housner G.W. *"Dynamic pressures on accelerated fluid containers"*. Bull. Seismol. Soc. Am., v. 47,p. 15–35. (1957)
26. Haroun M.A., Housner G.W. *"Earthquake response of deformable liquid storage tanks"*. J. Appl. Mech. ASME .v. 48, p. 411–417. (1981)
27. IITK-GSDMA: *"Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks, Provisions with Commentary on the Indian seismic code"*, Indian Standard IS 1893 (Part 1): 2002, Indian Institute of Technology Kanpur, Gujarat State Disaster Management Authority. (2005)

28. Ishihara K. and Cubrinovski M., "A case-history of damaged piles due to lateral spreading: evaluation by a simplified analysis". UC Research Repository (2005)
29. Jacobsen, L. S., "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and fluid surrounding a cylindrical pier", Bulletin of the Seismological Society of America. (1949)
30. Jing Lü, Shimin Wang and Tianshu Wang, "Coupling dynamic analysis of a liquid-filled spherical container subject to arbitrary excitation", Acta Mechanica Sinica (2012).
31. Kan C. L. and Chopra A. K. "Elastic Earthquake Analysis of Torsionally Coupled Multistorey Buildings". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 5, p. 395-412. (1977)
32. Karamanos, S.A., Patkas, L.A., Platyrrachos, M.A. "Sloshing Effects on the Seismic Design of Horizontal-Cylindrical and Spherical Industrial Vessels". Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, v. 128, Issue 3, p. 328-340. (2006)
33. Karamanos S.A., Papaprokopiou D., Platyrrachos M.A., "Numerical Analysis of Externally-Induced Sloshing in Spherical Liquid Container". Computational Methods in Earthquake Engineering, v.21, p. 489-513.(2011)
34. Karavasilis T., Rizos D., Karabalis D., "Seismic Analysis Of Spherical Tanks Including Fluid-Structure-Soil Interaction", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper N° 1814. (2004)
35. Li Xiao-long, Weng Da-gen, Ni Wei-bo, Zhang Rui-fu. "Performance-based Seismic Design of Spherical Natural Gas Tank". Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting. (2010)
36. Moiseev, N. N., and Petrov, A. A., "The Calculation of Free Oscillations of a Liquid in a Motionless Container", AIAA J., 9, pp. 91–154. (1966)
37. McIver, P., "Sloshing Frequencies for Cylindrical and Spherical Containers Filled to an Arbitrary Depth". J. Fluid Mech., v. 201, p. 243–257. (1989)
38. NTP 321.123:2012 Gas Licuado De Petróleo. Instalaciones para Consumidores Directos y Redes de Distribución
39. Oakeshott, Gordon B., "Earthquakes in Kern County, California, during 1952", San Francisco, Calif.: Ferry Building. (1955)
40. PD 5500, Published Document 5500. "Specification for unfired fusion welded pressure vessels". (2012)

41. Richard Dobson - Technical Director for FASTRAK, 3D+ and TEDDS, CSC (UK) Ltd and Kenny Arnott – Product Manager for S-Frame, CSC (UK) Ltd, ,
“*A Brief Overview of 2nd Order (or P-Delta) Analysis*”. (2002)
42. Rixon K. L, S. Balamurugan, “*Seismic Analysis of Spherical Vessel Containing Liquefied Petroleum Gas*”, International Journal of Science and Research (IJSR). (2012)
43. SENCICO, “*Reglamento Nacional de Edificaciones*”. Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente. (2016)
44. Tecni System Institute, "Central Base for Spherical Tanks of Large Capacity Tecni Systeme Institute". Consulta: 25 de octubre de 2016.
<http://tecnisysteminstitute.com/comparison.asp>
45. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. “*Theory of plates and shells*” (2nd Edition). McGraw-Hill, New York, New York, USA (1959).
46. Veletsos A.S., “*Seismic effects in flexible liquid storage tanks*”. Proceedings of the fifth world conference on earthquake engineering, Rome, Italy, v. 1, p. 630–639. (1974)
47. Westergaard, H.M. “*Water pressure on dams during earthquakes*”, American society of civil engineers. 98, p. 418-433. (1938)
48. Wieschollek M., Kopp M., Hoffmeister B. and Feldmann M., “*Seismic Design of Spherical Liquid Storage Tanks*”. III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering , Greece, May. (2011)
49. Wilson, Edward, “*Static and Dynamic Analysis of Structures*”. California: Computers and Structures, Inc. (2004).
50. Yang Z., Zhang D., Guo L., Yang B. and Wang G. “*Seismic Performance Analysis of the Large Spherical Tank*”. ASME Pressure Vessels and Piping Conference California, USA, July. (2014)
51. Zama S , Nishi H., Yamada M., Hatayama K., “*Damage of Oil Storage Tanks Caused by Liquid Sloshing in the 2003 Tokachi Oki Earthquake and Revision of Design Spectra in the Long-Period Range*”, Proceedings of the 14th world Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. (2008)
52. Zhang B.Y., Li H.H., Wang W., “*Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading*”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 34. (2015)

ANEXOS

ANEXO A: SOLUCION SEMI-ANALITICA DEL OLEAJE EN TANQUES ESFERICOS (KARAMANOS ET AL.)	164
ANEXO B: SCRIPT DE MODELACION DE TANQUES (ANSYS)	167
ANEXO C: CARACTERISTICAS DE LAS SECCIONES DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LOS MODELOS PARAMETRICOS	172
ANEXO D: RESULTADOS DEL ANALISIS PARAMETRICO	177
Periodos Impulsivos	177
Periodos Convectivos	186
Cortante Basal	195
Momento Volcante	231
Desplazamientos Máximos	267
Cortante Máximo de Columnas	303
Momento Máximo de Columnas	339
Esfuerzo Axial máximo de Arriostres	375

ANEXO A

SOLUCION SEMI-ANALITICA DEL OLEAJE EN TANQUES ESFERICOS (KARAMANOS ET AL.)

Se analizó un tanque esférico bajo una aceleración horizontal paralelo al eje X. Para su solución se consideró trabajar con coordenadas esféricas, en donde r es el radio asociado y los ángulos θ , φ son los generados por el punto en estudio y los ejes x e y, respectivamente (Fig. A.1).

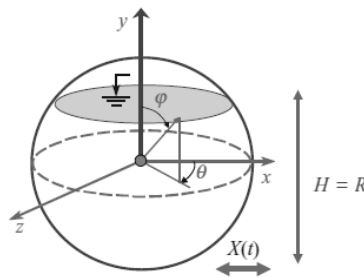


Figura A.1. Geometría del tanque esférico

Según se ha observado en la sección 2.2, el flujo potencial puede ser descompuesto en dos: un potencial uniforme (Φ_U) y potencial del oleaje (Φ_s). Además se especificó que el potencial del oleaje presenta tres condiciones de borde, y a partir de ello se generó la Ec. 2.22, la cual relacionaba todos ellos. Para resolver esta ecuación se consideró utilizar la discretización de Galerkin como solución del flujo potencial del oleaje (Φ_s) y de la función admisible φ^* (Ecs. A.1 y A.2).

$$\Phi_s = \sum_{n=1}^{\tilde{N}} s_n(t) \cdot N_n(r, \varphi, \theta) = [N] \cdot \dot{s} \quad (A.1)$$

$$\varphi^* = \sum_{n=1}^{\tilde{N}} s_n^* \cdot N_n(r, \varphi, \theta) = [N] \cdot \mathbf{s}^* \quad (A.2)$$

Donde, $N_n(r, \varphi, \theta)$ son las funciones espaciales conocidas, $[N]$ es una matriz fila con las funciones $N_n(r, \varphi, \theta)$, \dot{s} es un vector con funciones no conocidas $\dot{s}_n(t)$ y \mathbf{s}^* es un vector arbitrario. La diferenciación del flujo potencial del oleaje (Φ_s) y de la función admisible φ^* resultan las Ecs. A.3 y A.4.

$$\nabla\phi_s = [B] \cdot \dot{\mathbf{s}} \quad (A.3)$$

$$\nabla\phi^* = [B] \cdot \mathbf{s}^* \quad (A.4)$$

Sustituyendo las Ecs. A.1, A.2, A.3 y A.4 en la Ec. 2.22 se obtiene una ecuación de segundo orden (Ec. A.5).

$$[M]\ddot{\mathbf{s}} + [K] \cdot \mathbf{s} = -\mathbf{f} \cdot \ddot{X} \quad (A.5)$$

Dónde:

$$[M] = \frac{1}{g} \int [N]^T [N] dB_2 \quad (A.6)$$

$$[K] = \int [B]^T [B] d\Omega \quad (A.7)$$

$$\mathbf{f} = \frac{1}{g} \int \mathbf{x} [N]^T dB_2 \quad (A.8)$$

En el presente caso, se ha empleado funciones esféricas armónica para definir el potencial de oleaje (Ec. A.9)

$$N_n(r, \varphi, \theta) = r^n P_n^1(\mu) \cos(\theta), \quad n = 1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (A.9)$$

Donde $\mu = \cos(\varphi)$ y $P_n^1(\mu)$ es el polinomio de Legendre asociado. Los elementos de la matriz [B] de $3 \times \tilde{N}$ están definidos por las Ecs. A.10, A.11 y A.12.

$$B_{1n} = \frac{\partial N_n}{\partial r} = n \cdot r^{n-1} P_n^1(\mu) \cos(\theta), \quad n = 1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (A.10)$$

$$B_{2n} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial N_n}{\partial \varphi} = -r^{n-1} \frac{\partial P_n^1(\mu)}{\partial \varphi} \cos(\theta), \quad n = 1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (A.11)$$

$$B_{3n} = \frac{1}{r \cdot \sin(\varphi)} \cdot \frac{\partial N_n}{\partial \theta} = -r^{n-1} P_n^1(\mu) \frac{1}{\sin(\varphi)} \sin(\theta), \quad n = 1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.12})$$

Sustituyendo las Ecs. A.10, A.11 y A.12 en las Ecs. A.6, A.7 y A.8, se obtienen los siguientes valores:

$$M_{ij} = \frac{\pi R^{i+j+2}}{g(i+j+2)} \cdot P_i^1(0) \cdot P_j^1(0) \quad i, j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.13})$$

$$K_{ij} = \frac{\pi R^{i+j+1}}{g(i+j+1)} \cdot (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) \quad i, j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.14})$$

Y

$$a_{ij} = i \cdot j \cdot \int_0^1 P_i^1(\mu) \cdot P_j^1(\mu) \cdot d\mu \quad i, j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.15})$$

$$b_{ij} = \int_0^1 \frac{P_i^1(\mu) \cdot P_j^1(\mu)}{1-\mu^2} \cdot d\mu \quad i, j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.16})$$

$$c_{ij} = \int_0^1 \frac{\partial P_i^1(\mu)}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial P_j^1(\mu)}{\partial \mu} \cdot (1 - \mu^2) d\mu \quad i, j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.17})$$

$$f_j = \frac{\pi \cdot R^{j+3}}{g(j+3)} P_j^1(0) \quad j=1, 2, \dots, \tilde{N} \quad (\text{A.18})$$

Teniendo definidos las matrices de masa y rigidez, es posible obtener los periodos y modos del oleaje con la Ec. A.6 mediante métodos conocidos.

$$([K] - \omega_n^2 [M])v_n = 0 \quad (\text{A.20})$$

ANEXO B

SCRIPT DE MODELACION DE TANQUES INGRESADO EN ANSYS

```
/FILNAME,SPHERICALTANK,1
/TITLE,SPHTANKI
/PREP7
CSYS,0      !COORDENADAS CARTESIANAS
*AFUN,DEG   !UNIDADES ANGULARES EN GRADOS
!-----
!UNIDADES
!-----
!Longitud m
!Tiempo sg
!Aceleración m/sg2
!Masa Kgf*sg2/m
!Fuerza Kg
!Esfuerzo Kg/m2
!Densidad T/m3
!-----
!GEOMETRIA DEL ESTANQUE
!-----
!Altura total:16.9m
!Diámetro del depósito : 13.9 m
!Altura de columna : 9.95 m
!Espesor de Pared : 47 mm
!Altura del Líquido : 6.95 m
!Tipo de Fluido : AGUA
!-----
!CONSTANTES O VARIABLES
!-----
G = 9.81      !Aceleración de gravedad
Ht = 16.9     !Altura total
Har = 6.64    !Altura de arriostre
DIAM = 13.9   !Diámetro del tanque
R = DIAM/2    !Radio del tanque
Icol=0.000415563 !Inercia de columna
Acol=0.016776105 !Area de columna
Aarr=0.00285  !Area de arriostre
NDIV = 8      !Número de divisiones en un radio del liquido
ESP = 0.047   !Espesor del manto del estanque
PW = 9.81     !Peso específico de masa del agua
PS = 7.849    !Peso específico de masa del acero
DW = PW/G     !Densidad de masa del agua
DS = PS/G     !Densidad de masa del acero
EW = 224.26e3 !Modulo de Bulk del agua (Tf/m2)
```

```
ES = 21414040      !Modulo de elasticidad del acero (Tf/m2)
PER_R=0.4*R
!-----
!DEFINICION DE TIPOS DE ELEMENTOS
!-----
/pnum, kp, 1
/pnum, line, 1
/pnum, area, 1
!
ET,1,FLUID80,,1
MP,EX,1,EW
MP,PRXY,1,0
MP,DENS,1,DW
!
ET,2,SHELL63
MP,EX,2,ES
MP,PRXY,2,0.3
MP,DENS,2,DS
!
ET,3,BEAM4
!
R,1,ESP !CONSTANTE REAL 1 (CASCARON ESTANQUE)
R,2,Acol,Icol,Icol,0.457, 0.457,0.00
R,3,Aarr
!-----
!GENERACION DE CUBA ESFERICA
!-----
sphere, 0, R, 0, 90
vsbw,1
wpoffs,0,0,0.4*R
vsbw,all
wpoffs,0,0,-0.4*R
vsel,s,loc,z,0,-R
vdel,all,,1
allsel
vsymm, x, all, , , , 0, 0
vsymm, z, all, , , , 0, 0
vglue,all
csys,2
asel,s,loc,x,R
agen,2,all
csys,0
aslv
asel,invert
aglua,all
allsel
```

vatt,1,,1

aslv

asel,invert

aatt,2,1,2

!-----

!GENERACION DE COLUMNAS Y ARRIOSTRES

!-----

allsel

aslv

asel,invert

lsla

lsel,r,loc,z,0

lgen,2,all

allsel

lsla

lsel,invert

ldiv,all,,2

ksll

kplot

kgen,2,all,,0,0,-(Ht-Har-R)

ksel,r,loc,z,-(Ht-Har-R)

kgen,2,all,,0,0,-Har

allsel

l,36,31

l,31,24

l,39,34

l,34,29

l,37,32

l,32,23

l,40,35

l,35,30

l,38,33

l,33,25

l,36,34

l,39,31

l,39,32

l,37,34

l,37,35

l,40,32

l,40,33

l,38,35

ldele,36,39,1

allsel

lsel,s,,40,48,1

lsel,a,,63

lplot


```
latt,2,2,3  
lsel,s,,64,71,1  
latt,2,3,3  
allsel  
vsel,s,loc,z,0,2*R  
vdele,all,,1  
allsel
```

```
!-----
```

```
!MALLADO GENERAL
```

```
!-----
```

```
aslv  
asel,invert  
lsla  
lesize,all,,NDIV  
mshkey,1  
mshape,1,2d  
mshape,0,3d  
amesh,all  
allsel  
aslv  
lsla  
lesize,all,,NDIV  
vmesh,all  
allsel  
lsla  
lsel,invert  
lesize,all,,1  
lmesh,all  
allsel  
eslv  
esel,invert  
nsle  
nummrg  
allsel
```

```
!-----
```

```
!RESTRICCIONES
```

```
!-----
```

```
nsl,s,loc,z,-(Ht-R)  
nplot  
d,all,all  
allsel  
nsl,s,loc,y,0  
dsym,symm,y,0  
allsel  
csys,2  
nsl,s,loc,x,R
```

```
nrotat,all
/psymb,ndir,1
csys,0
nselect,r,loc,z,0,-R
cpintf,ux
csys,0
allselect
aslv
asselect,invert
esla
nsle
!m,all,ux
m,all,uy
m,all,uz
allselect
lsla
lselect,invert
esll
nsle
m,all,ux
m,all,uy
m,all,uz
allselect
eslv
nsle
nselect,r,loc,z,0
m,all,uz
allselect
epplot
```

ANEXO C

CARACTERISTICAS DE LAS SECCIONES DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LOS MODELOS PARAMETRICOS

Tabla C.1: Inercia de columna (m⁴) – Modelo 6 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.0235	0.0174	0.0131	0.0225	0.0168	0.0126	0.0225	0.0161	0.012
	1.45	0.0235	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195
	1.55	0.0235	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195	0.0225	0.0195	0.0195
0.2	1.40	0.0065	0.008	0.008	0.0063	0.008	0.008	0.006	0.008	0.008
	1.45	0.008	0.0079	0.0059	0.008	0.0077	0.0057	0.008	0.0074	0.0055
	1.55	0.008	0.008	0.0063	0.008	0.008	0.0061	0.008	0.0078	0.0059
0.4	1.40	0.0016	0.0011	0.0008	0.0016	0.001	0.0008	0.0015	0.001	0.0008
	1.45	0.003	0.002	0.0015	0.0029	0.0019	0.0014	0.0028	0.0018	0.0014
	1.55	0.0031	0.0021	0.0016	0.003	0.002	0.0015	0.0029	0.002	0.0015
0.6	1.40	0.0007	0.0005	0.0004	0.0007	0.0005	0.0003	0.0007	0.0004	0.0003
	1.45	0.0013	0.0008	0.0005	0.0013	0.0007	0.0004	0.0012	0.0007	0.0004
	1.55	0.0014	0.0009	0.0005	0.0014	0.0008	0.0005	0.0013	0.0007	0.0004

Tabla C.2: Área de arriostres (m²) – Modelo 6 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.1222	0.0646	0.0485	0.1176	0.0611	0.0458	0.1012	0.0583	0.0437
	1.45	0.1346	0.058	0.0301	0.1299	0.0515	0.0271	0.1114	0.0458	0.0245
	1.55	0.141	0.0659	0.0338	0.135	0.0584	0.0304	0.1295	0.0519	0.0275
0.2	1.40	0.0242	0.0077	0.0045	0.0229	0.007	0.0041	0.0219	0.0063	0.0037
	1.45	0.0191	0.0083	0.0062	0.017	0.0077	0.0058	0.0153	0.0073	0.0055
	1.55	0.0215	0.0092	0.0066	0.0192	0.0083	0.0061	0.0172	0.0077	0.0058
0.4	1.40	0.0061	0.004	0.003	0.0057	0.0038	0.0029	0.0055	0.0036	0.0027
	1.45	0.0031	0.0021	0.0016	0.0029	0.0019	0.0014	0.0027	0.0018	0.0014
	1.55	0.0033	0.0022	0.0016	0.0031	0.002	0.0015	0.0029	0.0019	0.0014
0.6	1.40	0.0027	0.0018	0.0013	0.0025	0.0017	0.0013	0.0024	0.0016	0.0012
	1.45	0.0014	0.001	0.001	0.0013	0.001	0.001	0.0012	0.001	0.001
	1.55	0.0015	0.001	0.001	0.0014	0.001	0.001	0.0013	0.001	0.001

Tabla C.3: Diferencia de rigideces laterales (%) – Modelo 6 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	-0.98	0.00	0.00	-1.03	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.00
	1.45	-4.05	-2.54	-1.41	-4.09	-2.33	-1.31	-3.74	-2.09	-1.22
	1.55	-5.50	-7.92	-7.25	-5.26	-7.79	-7.19	-8.55	-7.65	-7.13
0.2	1.40	0.00	2.33	1.74	0.00	2.35	1.65	0.00	2.35	1.52
	1.45	-2.08	-1.21	-1.21	-1.90	-1.18	-1.18	-1.71	-1.15	-1.15
	1.55	-7.65	-7.18	-7.21	-7.54	-7.17	-7.19	-7.42	-7.16	-7.16
0.4	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	-1.21	-1.21	-1.21	-1.18	-1.18	-1.18	-1.15	-1.15	-1.15
	1.55	-7.21	-7.21	-7.21	-7.19	-7.19	-7.19	-7.16	-7.16	-7.16
0.6	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	-1.21	-1.27	-2.07	-1.18	-1.35	-2.30	-1.15	-1.47	-2.52
	1.55	-7.21	-7.25	-8.00	-7.19	-7.34	-8.22	-7.16	-7.45	-8.41

Tabla C.4: Inercia de columna (m⁴) – Modelo 8 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.0194	0.0116	0.0081	0.0186	0.0112	0.0078	0.0177	0.0107	0.0075
	1.45	0.0195	0.0123	0.0086	0.0195	0.0118	0.0083	0.0195	0.0112	0.0079
	1.55	0.0195	0.0125	0.0125	0.0195	0.0125	0.0125	0.0195	0.0125	0.0125
0.2	1.40	0.0042	0.007	0.007	0.004	0.007	0.007	0.0038	0.007	0.007
	1.45	0.0054	0.0036	0.0027	0.0051	0.0034	0.0064	0.0049	0.0033	0.0062
	1.55	0.007	0.0057	0.0043	0.007	0.0055	0.0041	0.007	0.0053	0.004
0.4	1.40	0.001	0.0007	0.0005	0.001	0.0007	0.0005	0.0009	0.0006	0.0005
	1.45	0.0013	0.0009	0.0007	0.0013	0.0009	0.0006	0.0012	0.0008	0.0006
	1.55	0.0021	0.0014	0.0011	0.0021	0.0014	0.001	0.002	0.0013	0.001
0.6	1.40	0.0005	0.0003	0.0002	0.0004	0.0003	0.0002	0.0004	0.0003	0.0002
	1.45	0.0006	0.0004	0.0003	0.0006	0.0004	0.0003	0.0005	0.0004	0.0003
	1.55	0.001	0.0006	0.0005	0.0009	0.0006	0.0005	0.0009	0.0006	0.0004

Tabla C.5: Área de arriostres (m²) – Modelo 8 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.097	0.078	0.078	0.097	0.078	0.078	0.097	0.078	0.078
	1.45	0.097	0.078	0.0725	0.097	0.078	0.0725	0.0868	0.078	0.0732
	1.55	0.097	0.078	0.0366	0.097	0.078	0.0336	0.097	0.0713	0.0307
0.2	1.40	0.04	0.0057	0.0033	0.04	0.0053	0.0031	0.04	0.005	0.0029
	1.45	0.022	0.0147	0.011	0.0217	0.0144	0.0036	0.0215	0.0143	0.0035
	1.55	0.0163	0.0085	0.0064	0.015	0.0082	0.0062	0.0139	0.008	0.006
0.4	1.40	0.0109	0.0073	0.0055	0.011	0.0074	0.0055	0.0113	0.0075	0.0056
	1.45	0.0055	0.0037	0.0028	0.0054	0.0036	0.0027	0.0054	0.0036	0.0027
	1.55	0.0032	0.0021	0.0016	0.0031	0.0021	0.0015	0.003	0.002	0.0015
0.6	1.40	0.0049	0.0032	0.0024	0.0049	0.0033	0.0025	0.005	0.0033	0.0025
	1.45	0.0024	0.0016	0.0012	0.0024	0.0016	0.0012	0.0024	0.0016	0.0012
	1.55	0.0014	0.0009	0.0007	0.0014	0.0009	0.0007	0.0013	0.0009	0.0007

Tabla C.6: Diferencia de rigideces laterales (%) – Modelo 8 soportes

T _y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω _θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	3.09	4.76	3.19	3.02	4.72	3.21	2.99	4.72	3.28
	1.45	2.85	1.13	0.00	-0.29	1.09	0.00	-0.04	1.09	0.00
	1.55	2.85	-0.15	-2.90	-0.29	-3.30	-2.72	-3.74	-4.04	-2.54
0.2	1.40	0.44	4.90	3.07	0.46	4.80	2.84	0.53	4.66	2.54
	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.55	-4.82	-4.71	-4.71	-4.72	-4.67	-4.67	-4.63	-4.63	-4.63
0.4	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.55	-4.71	-4.71	-4.71	-4.67	-4.67	-4.67	-4.63	-4.63	-4.63
0.6	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.55	-4.71	-4.71	-4.71	-4.67	-4.67	-4.67	-4.63	-4.63	-4.63

Tabla C.7: Inercia de columna (m^4) – Modelo 10 soportes

T_y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω_θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.0164	0.0106	0.0073	0.0158	0.0102	0.0071	0.0152	0.0098	0.0068
	1.45	0.0168	0.011	0.0078	0.0167	0.0108	0.0074	0.0161	0.0103	0.0071
	1.55	0.017	0.011	0.011	0.017	0.011	0.011	0.017	0.011	0.011
0.2	1.40	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
	1.45	0.0036	0.007	0.0066	0.0035	0.007	0.0064	0.007	0.007	0.0062
	1.55	0.0062	0.0041	0.0031	0.006	0.004	0.003	0.0057	0.0038	0.0029
0.4	1.40	0.0007	0.0005	0.0004	0.0007	0.0005	0.0003	0.0007	0.0005	0.0003
	1.45	0.0008	0.0006	0.0004	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0005	0.0004
	1.55	0.0015	0.001	0.0008	0.0015	0.001	0.0007	0.0014	0.001	0.0007
0.6	1.40	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0001
	1.45	0.0004	0.0002	0.0002	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002
	1.55	0.0007	0.0005	0.0003	0.0007	0.0004	0.0003	0.0006	0.0004	0.0003

Tabla C.8: Área de arriostres (m^2) – Modelo 10 soportes

T_y	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω_θ	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	0.095	0.07	0.07	0.095	0.07	0.07	0.095	0.07	0.07
	1.45	0.095	0.0695	0.0661	0.095	0.07	0.0688	0.095	0.07	0.07
	1.55	0.094	0.069	0.0351	0.094	0.069	0.0329	0.094	0.069	0.0307
0.2	1.40	0.0094	0.0043	0.0024	0.009	0.0041	0.0023	0.0085	0.0039	0.0022
	1.45	0.04	0.0046	0.0028	0.04	0.0045	0.0028	0.0093	0.0043	0.0027
	1.55	0.0139	0.0093	0.007	0.0138	0.0092	0.0069	0.0138	0.0092	0.0069
0.4	1.40	0.04	0.04	0.036	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	1.45	0.0155	0.0103	0.0077	0.017	0.0113	0.0085	0.0192	0.0128	0.0096
	1.55	0.0035	0.0023	0.0017	0.0035	0.0023	0.0017	0.0034	0.0023	0.0017
0.6	1.40	0.032	0.0213	0.016	0.04	0.04	0.0345	0.04	0.04	0.04
	1.45	0.0069	0.0046	0.0034	0.0076	0.005	0.0038	0.0085	0.0057	0.0043
	1.55	0.0015	0.001	0.0008	0.0015	0.001	0.0008	0.0015	0.001	0.0008

Tabla C.9: Diferencia de rigideces laterales (%) – Modelo 10 soportes

Ty	RE	1.1			1.15			1.2		
	DE Ω_{θ}	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0.1	1.40	4.92	4.53	3.35	5.01	4.65	3.53	5.12	4.78	3.72
	1.45	2.57	1.76	0.00	1.34	0.99	0.00	1.44	1.12	0.11
	1.55	2.57	1.76	-4.17	0.20	-0.62	-4.07	-2.55	-3.41	-4.00
0.2	1.40	8.64	6.05	2.69	8.59	5.80	2.30	8.49	5.47	1.81
	1.45	1.69	2.41	0.00	1.89	2.18	0.00	4.67	1.88	0.00
	1.55	-1.85	-1.85	-1.85	-1.79	-1.79	-1.79	-1.73	-1.73	-1.73
0.4	1.40	0.90	0.23	0.00	1.43	0.81	0.49	1.95	1.38	1.08
	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.55	-1.85	-1.85	-1.85	-1.79	-1.79	-1.79	-1.73	-1.73	-1.73
0.6	1.40	0.00	0.00	0.00	0.38	0.08	0.00	0.98	0.70	0.57
	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.55	-1.85	-1.85	-1.85	-1.79	-1.79	-1.79	-1.73	-1.73	-1.73

ANEXO D

RESULTADOS DEL ANALISIS PARAMETRICO

Periodos Impulsivos:

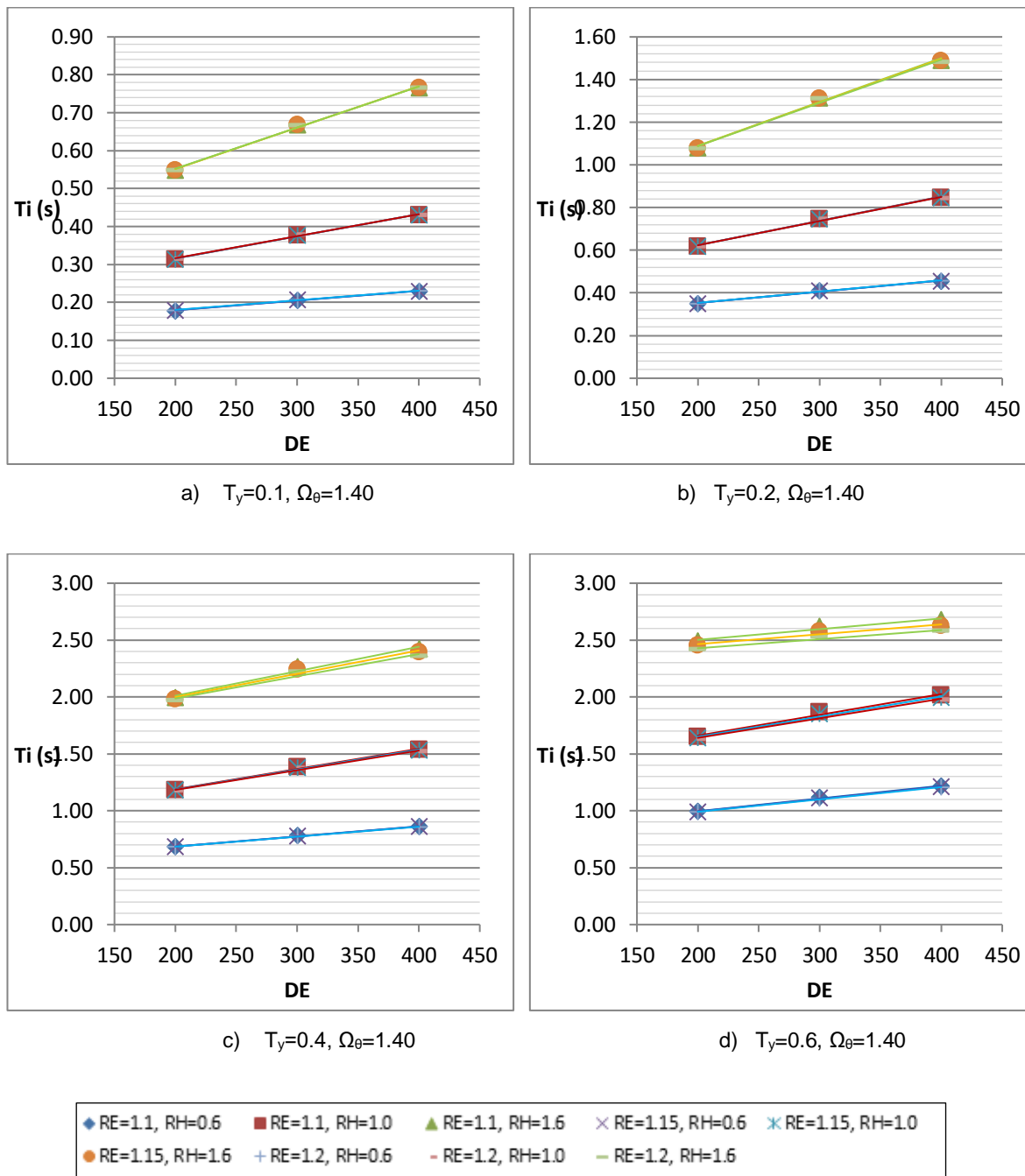


Figura D.1. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 6 columnas.

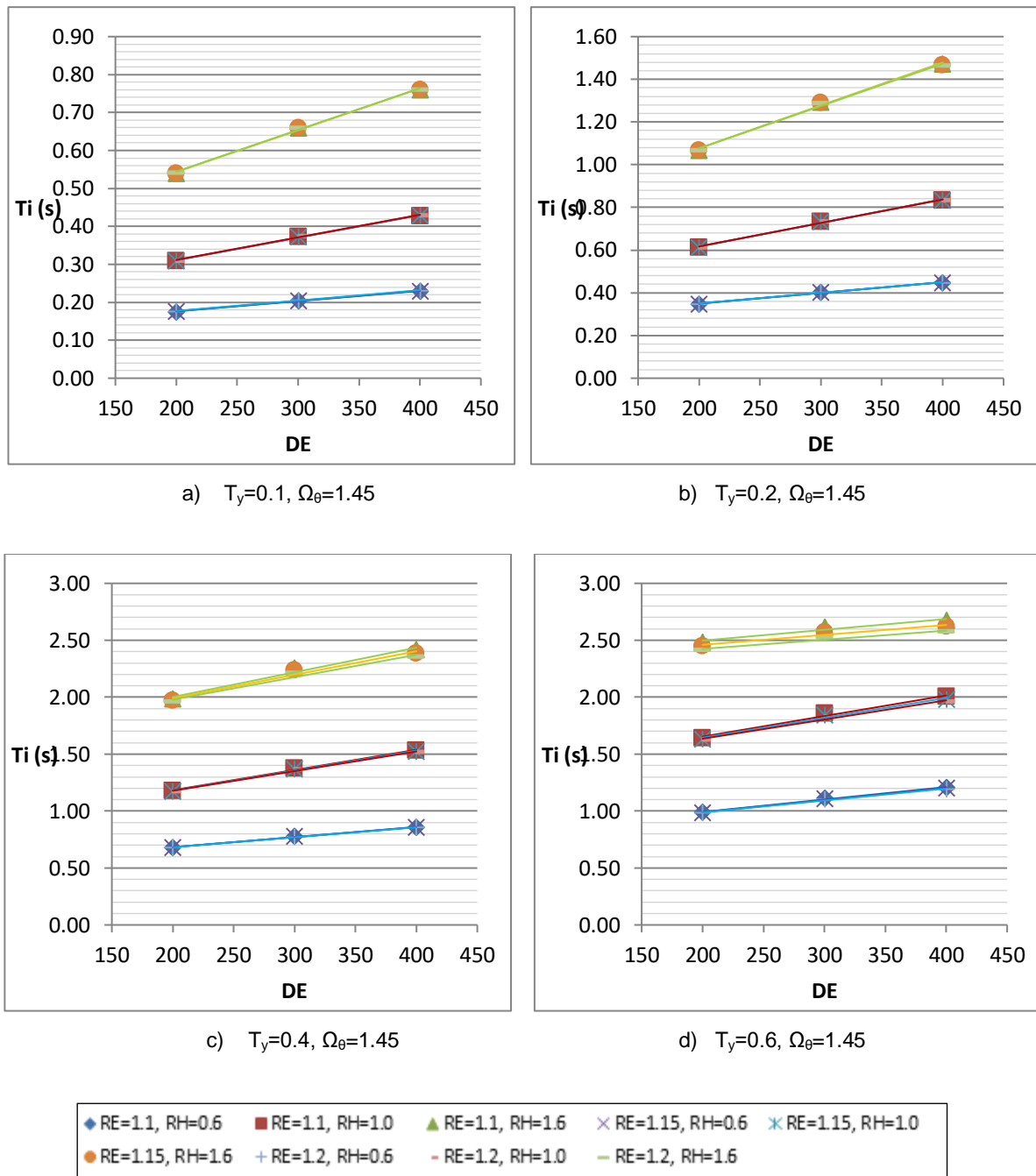


Figura D.2. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 6 columnas.

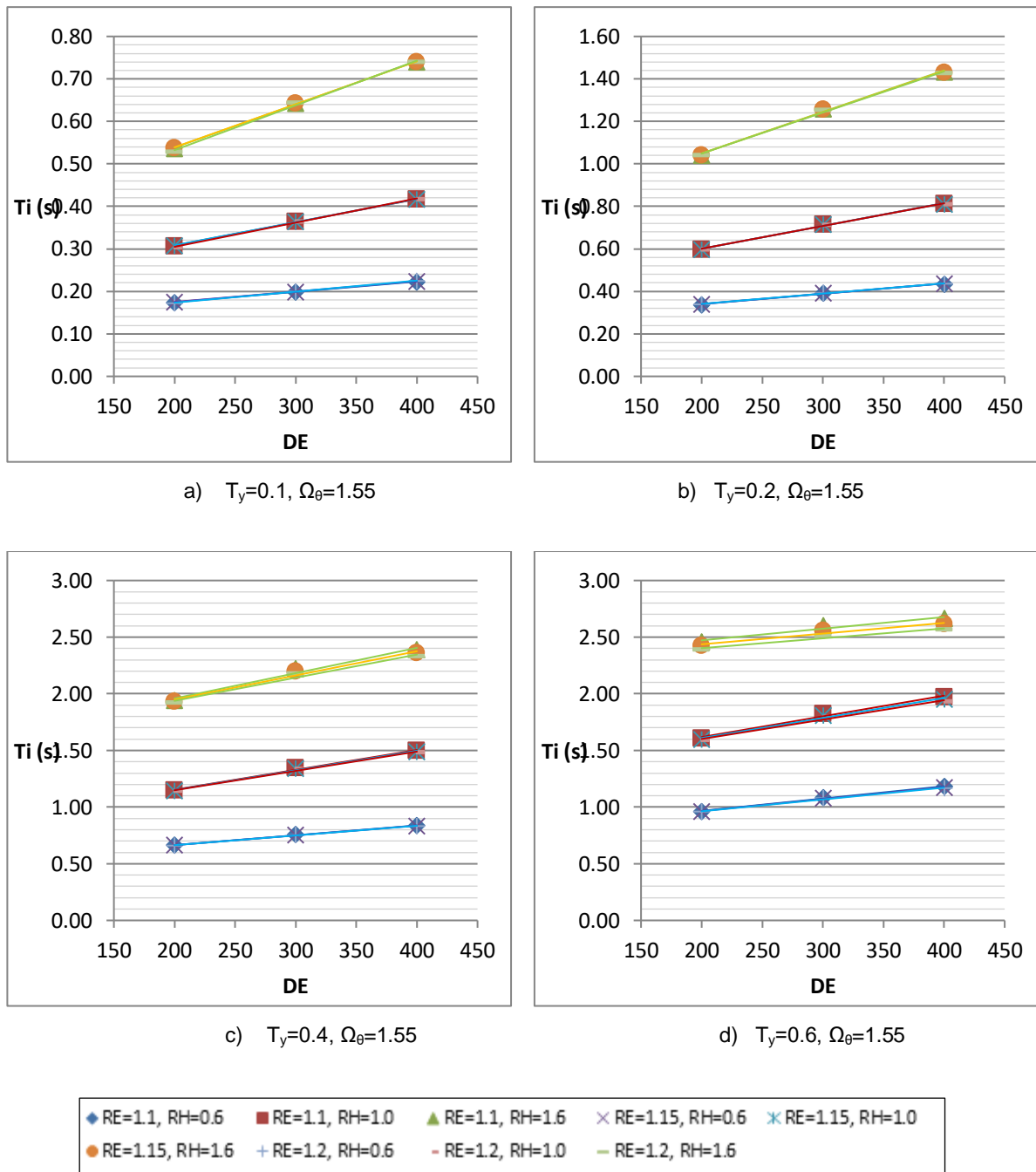


Figura D.3. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 6 columnas.

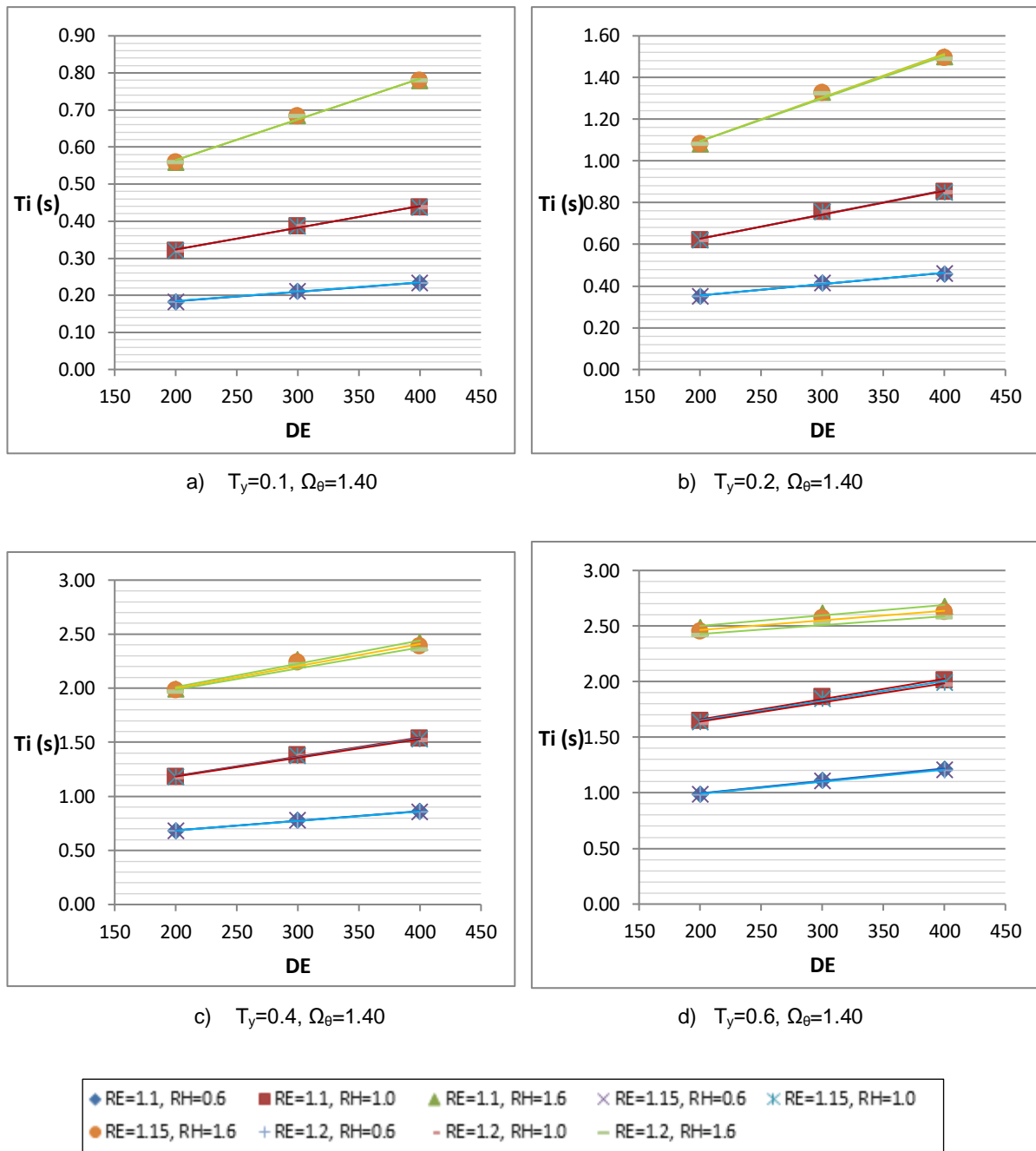


Figura D.4. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 8 columnas.

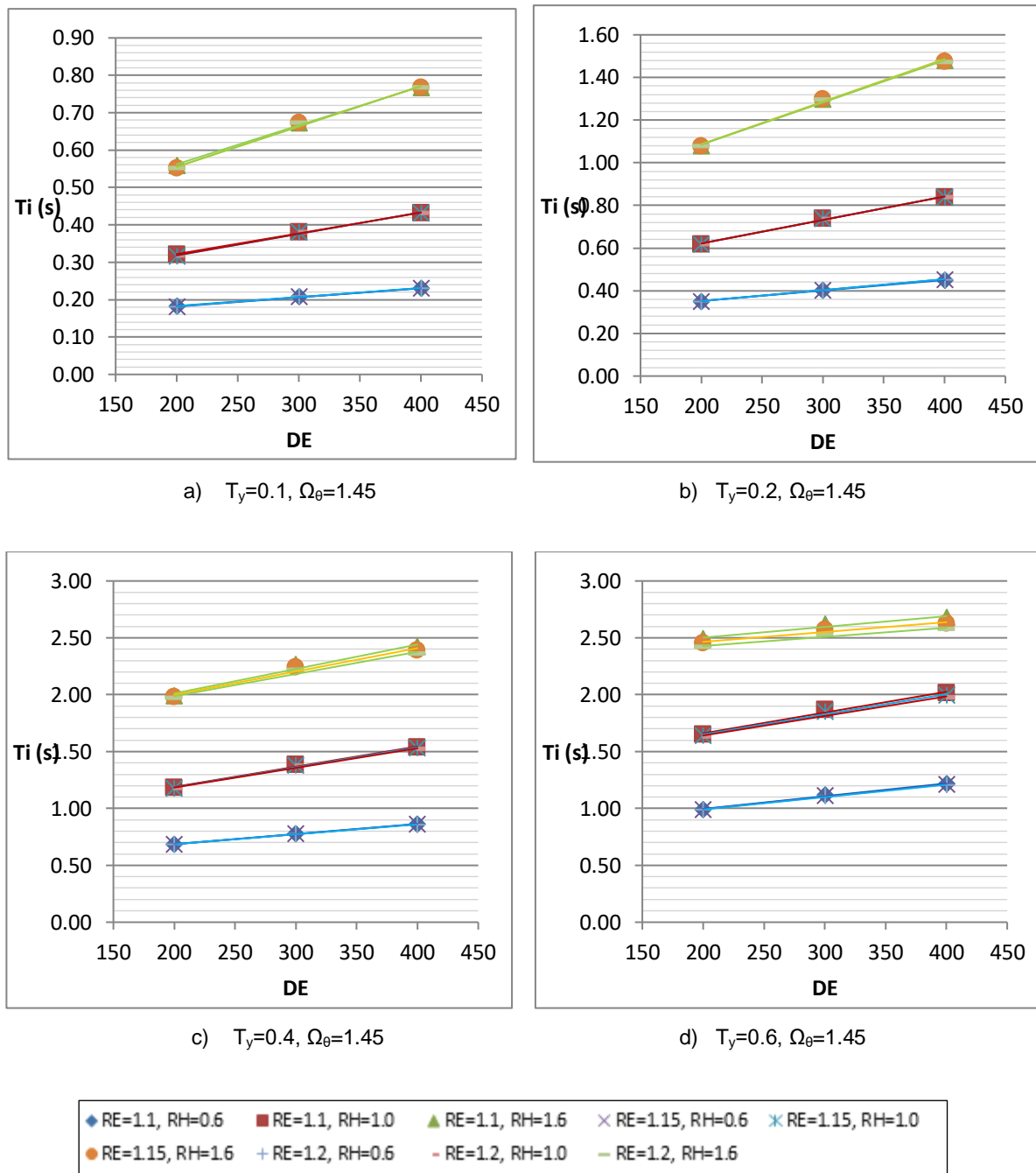


Figura D.5. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 8 columnas.

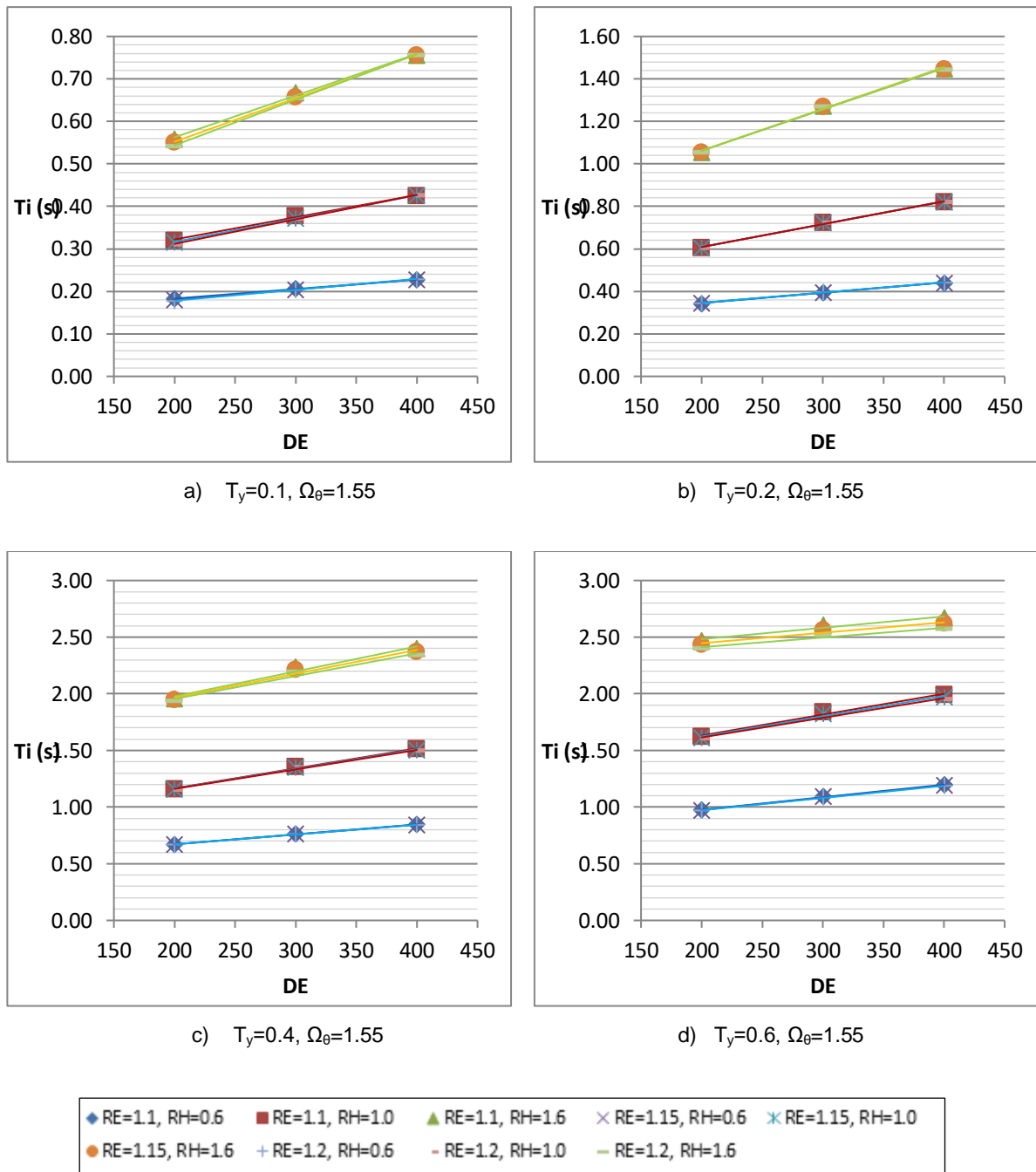


Figura D.6. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 8 columnas.

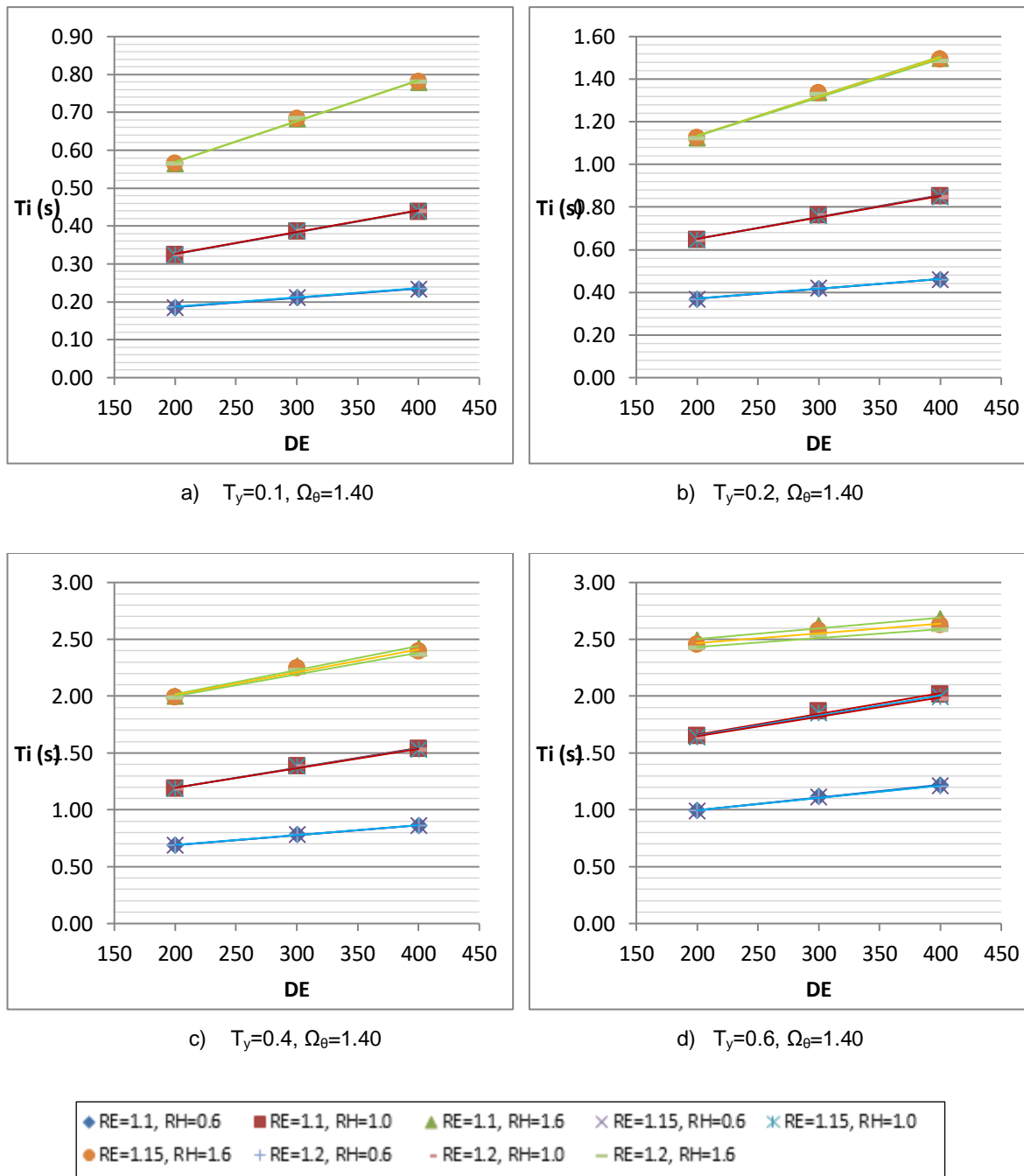


Figura D.7. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 10 columnas.

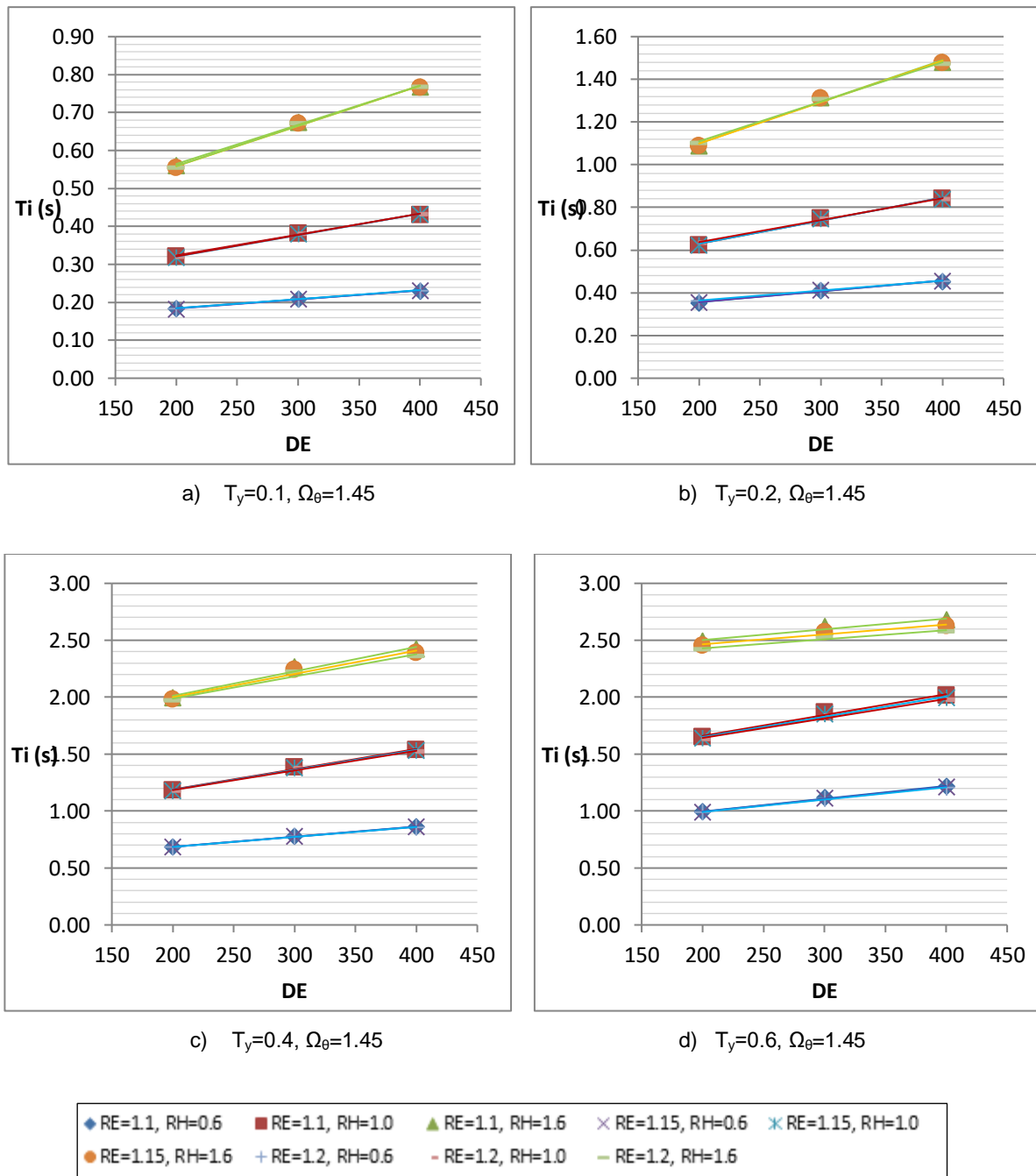


Figura D.8. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 10 columnas.

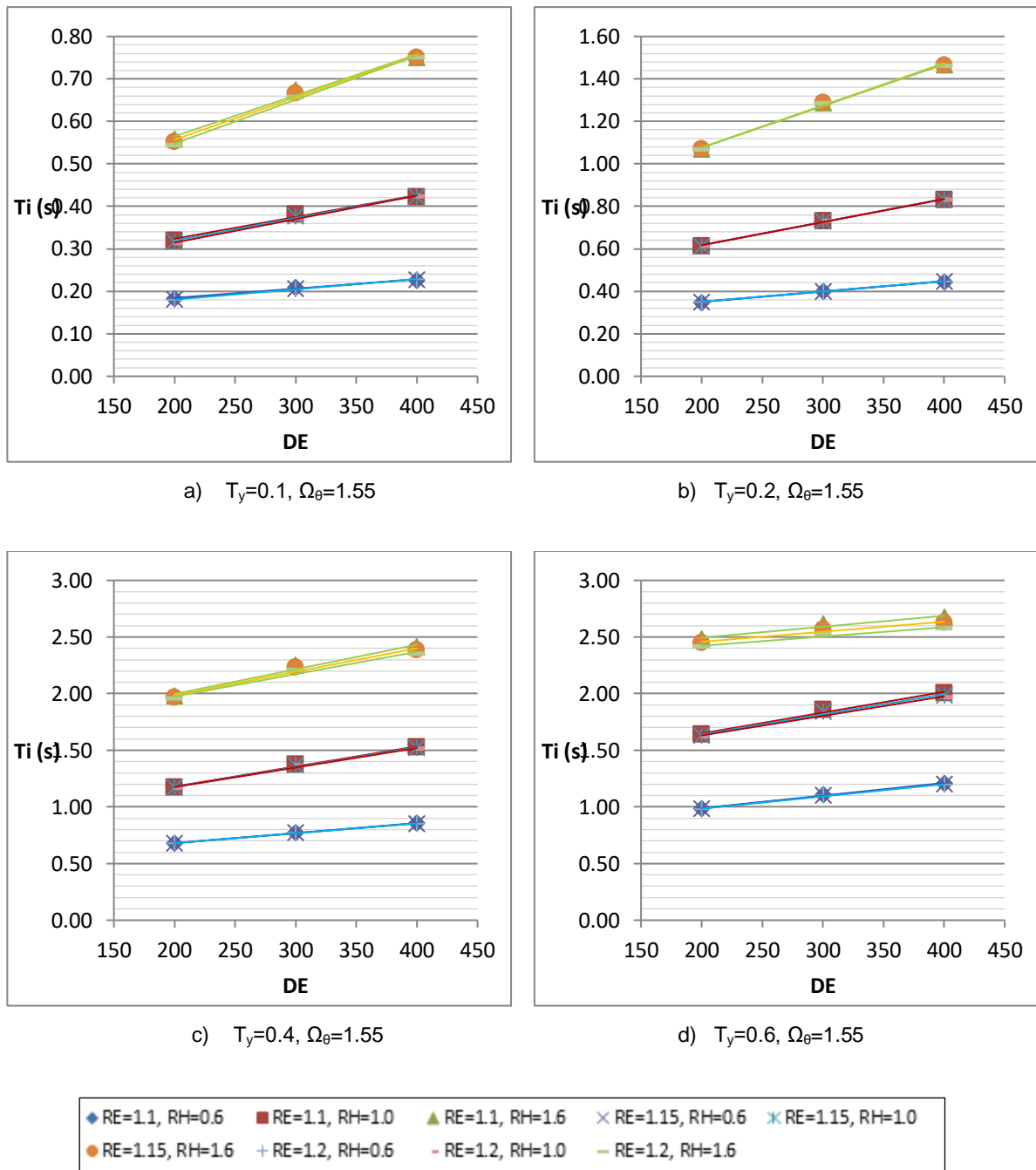


Figura D.9. Relación del Período Impulsivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 10 columnas.

Periodos Convectivos:

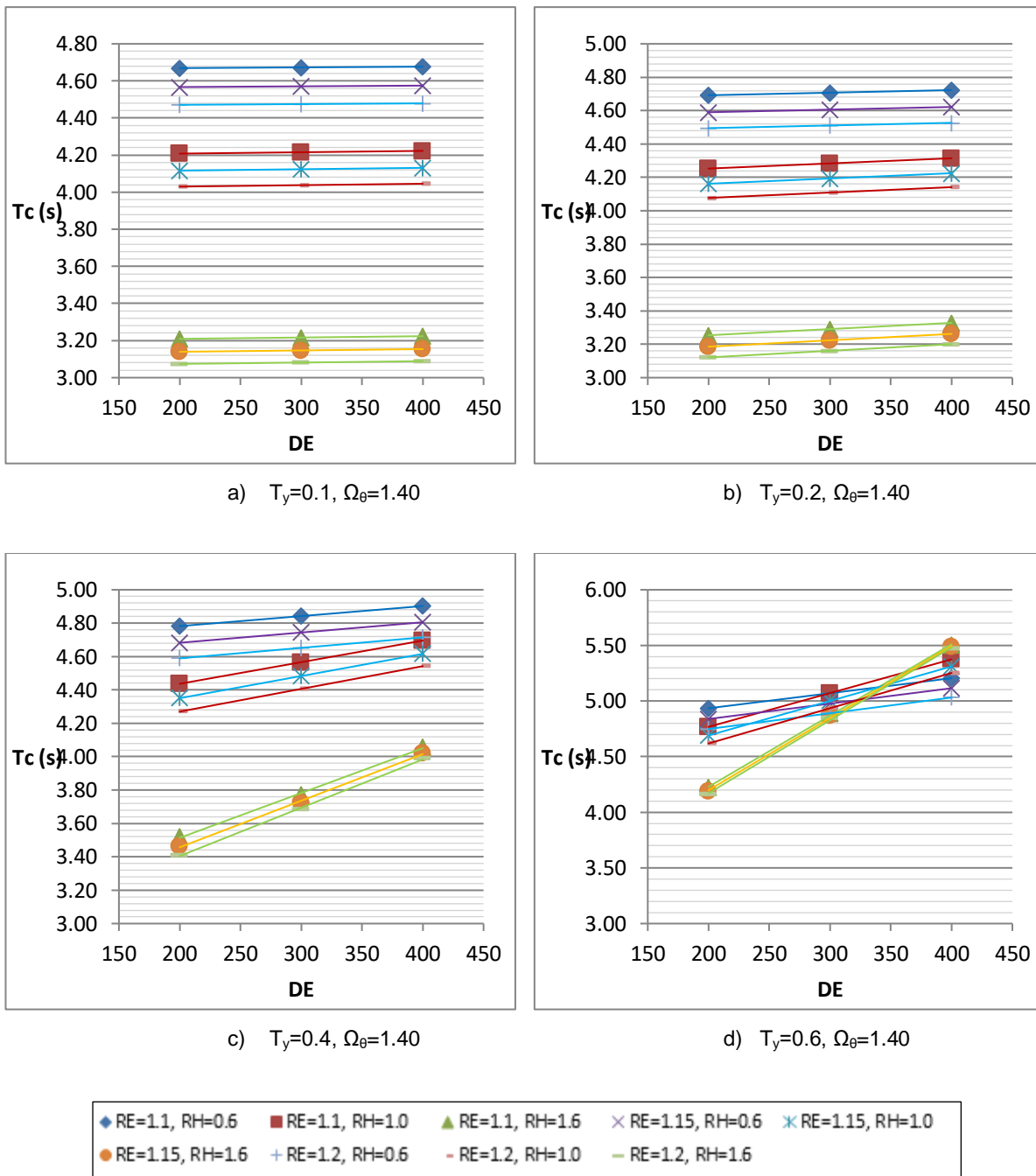


Figura D.10. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 6 columnas.

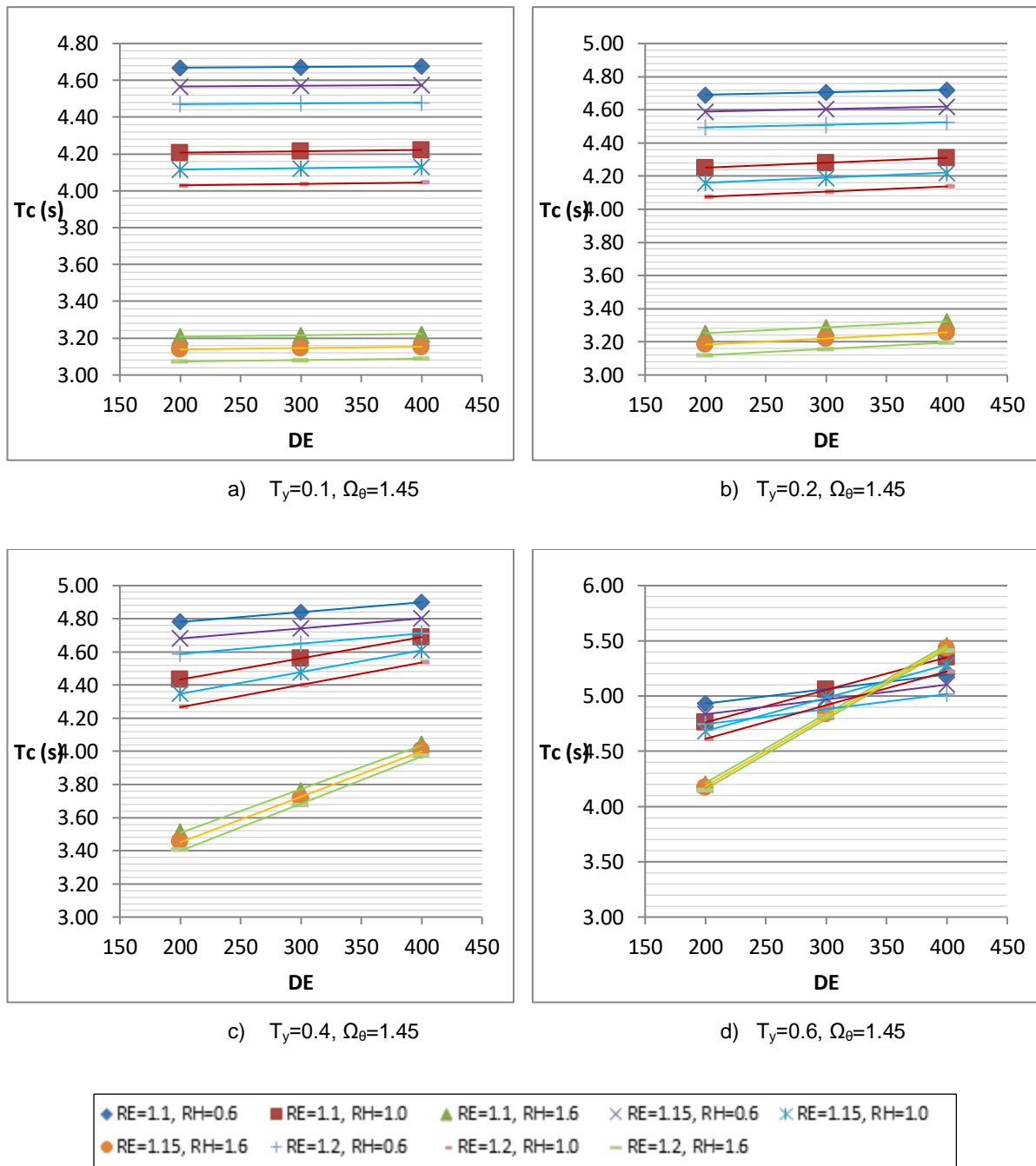


Figura D.11. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 6 columnas.

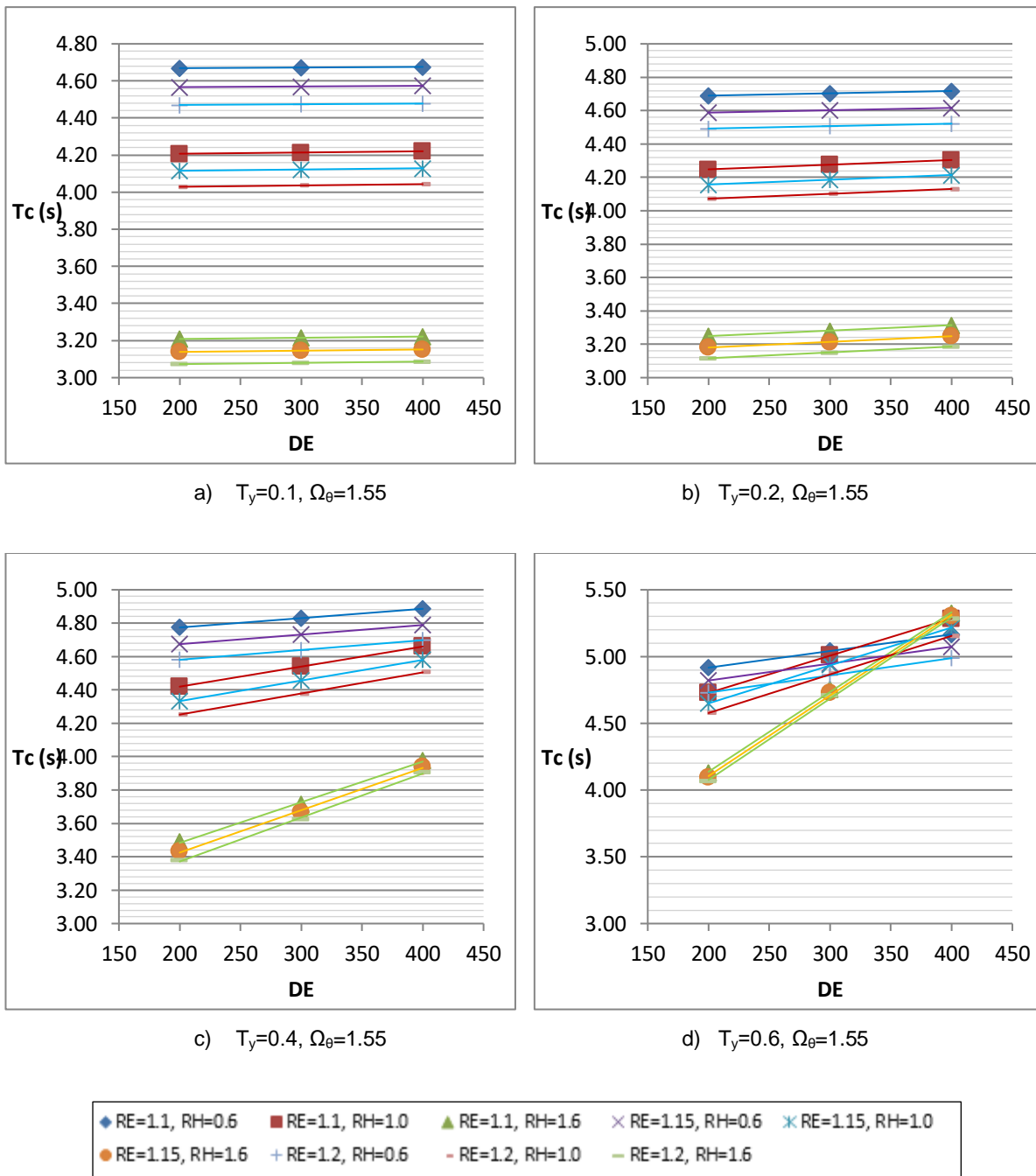


Figura D.12. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 6 columnas.

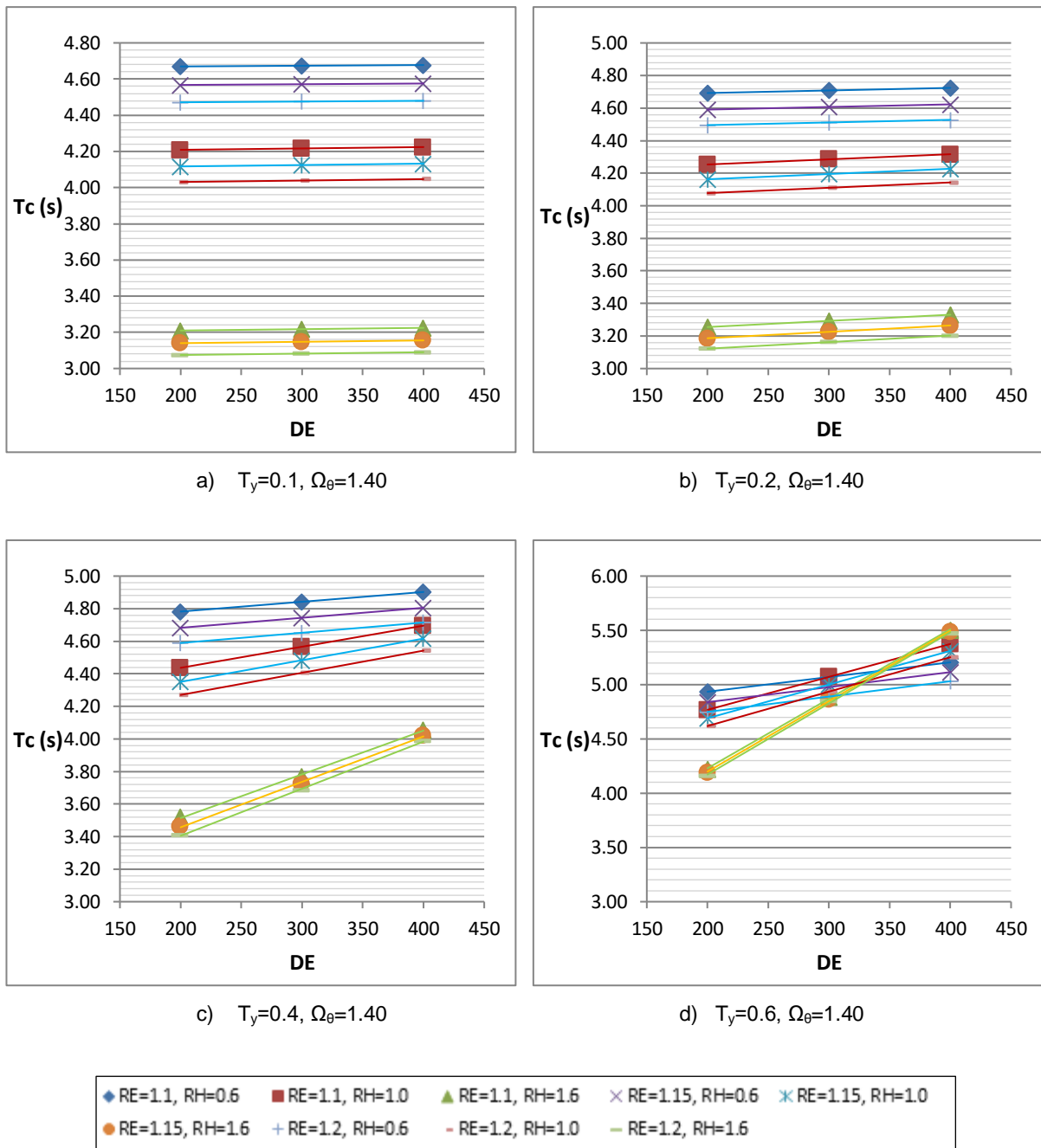


Figura D.13. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 8 columnas.

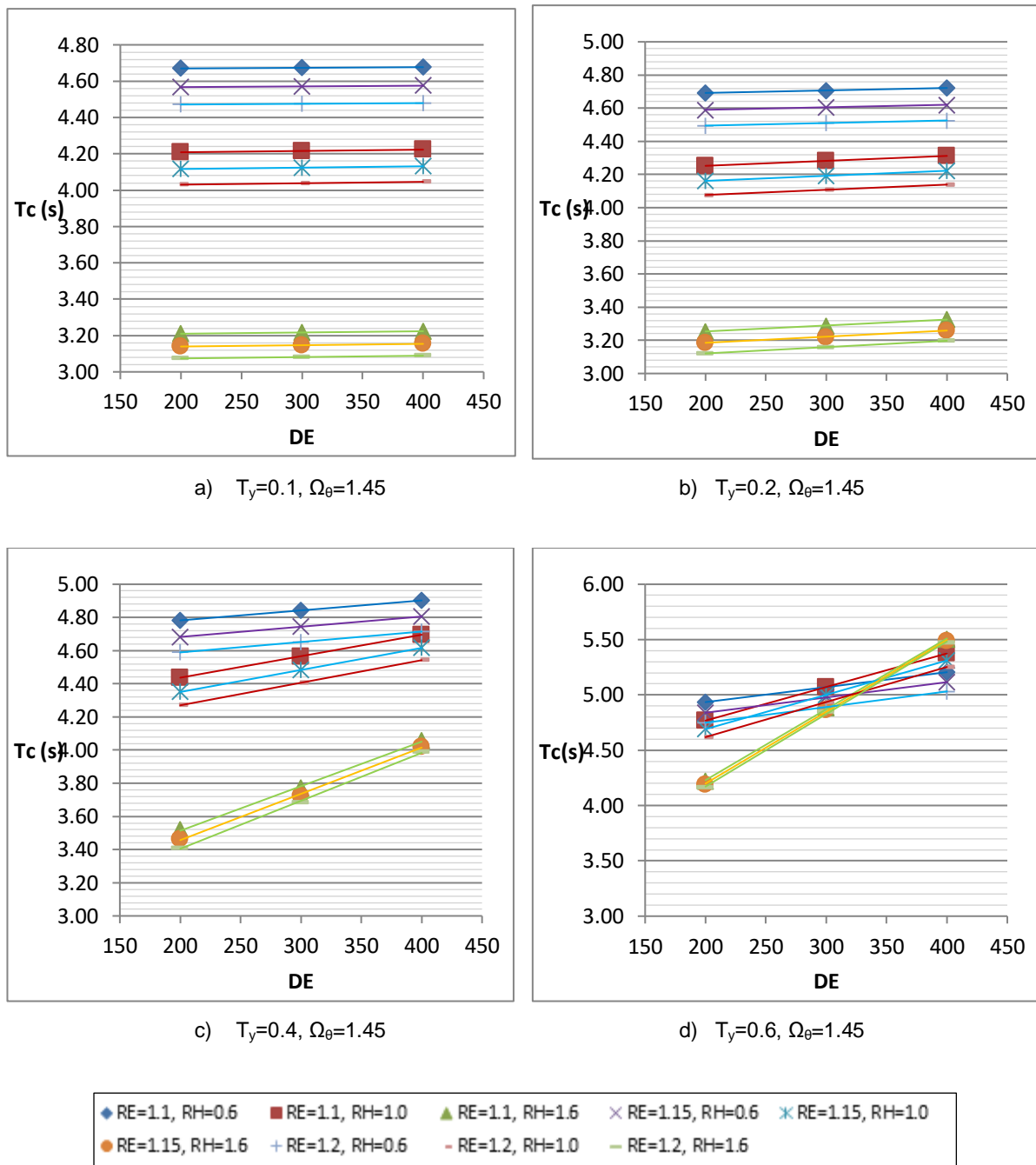


Figura D.14. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 8 columnas.

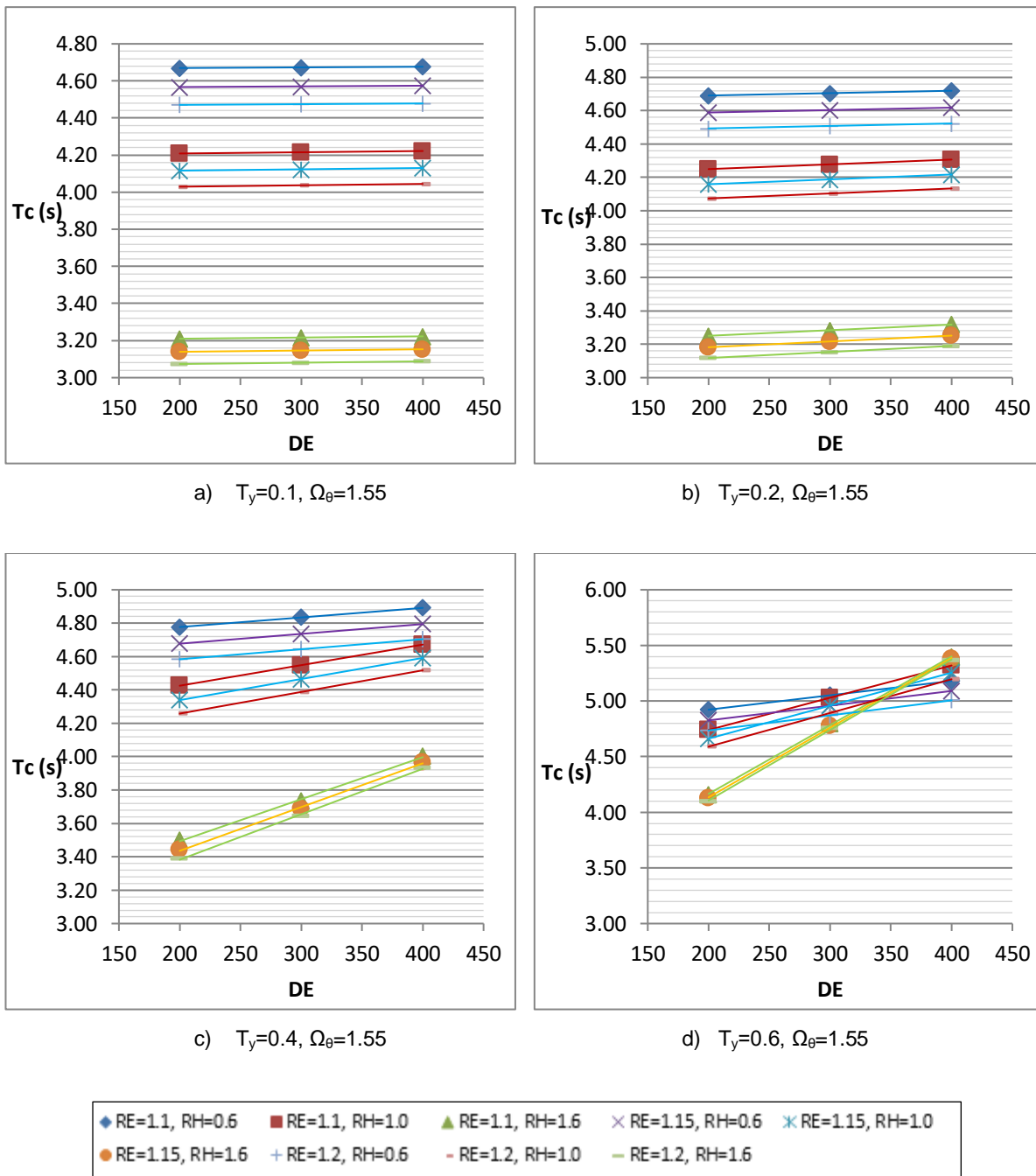


Figura D.15. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 8 columnas.

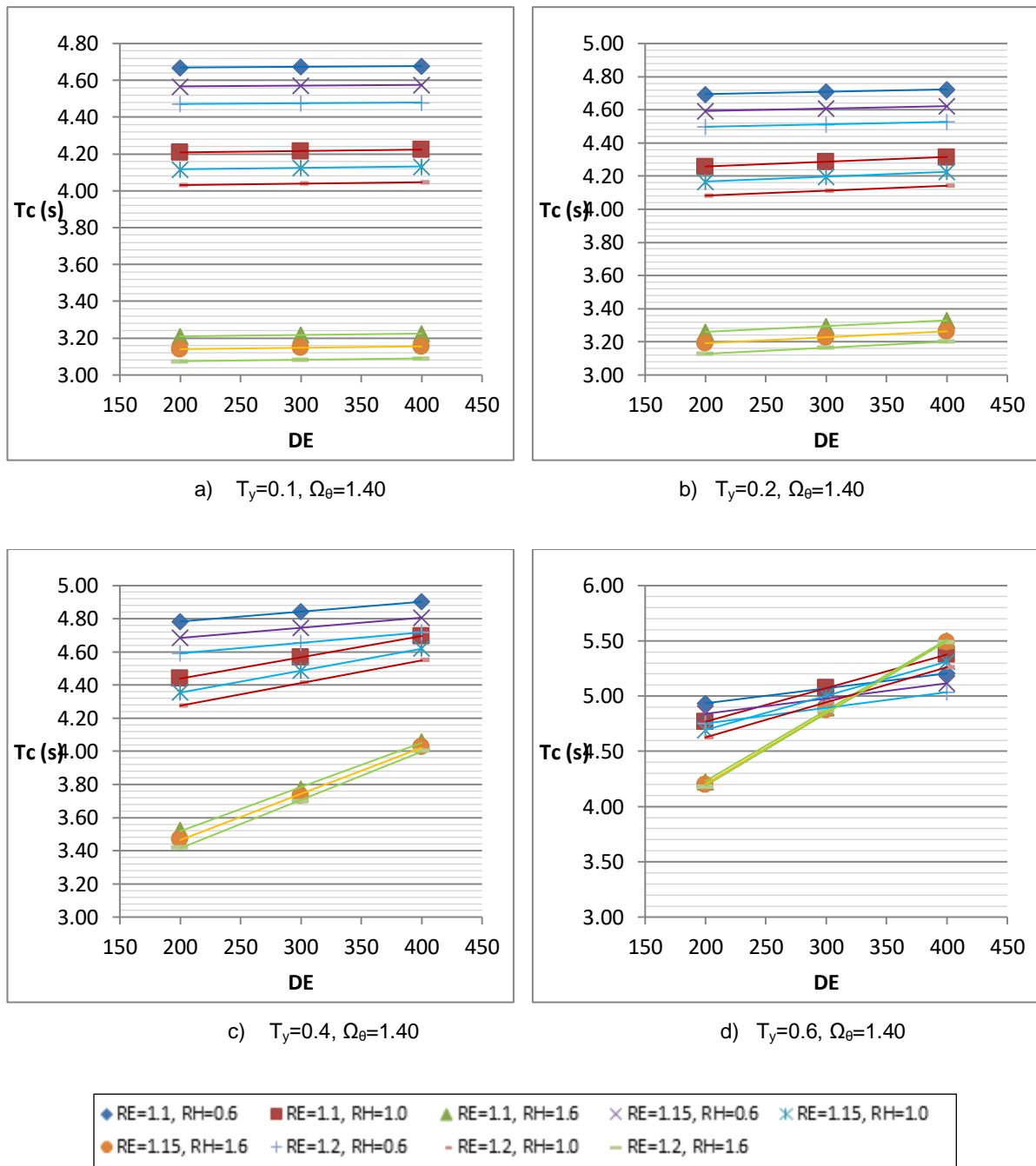


Figura D.16. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 - configuración de 10 columnas.

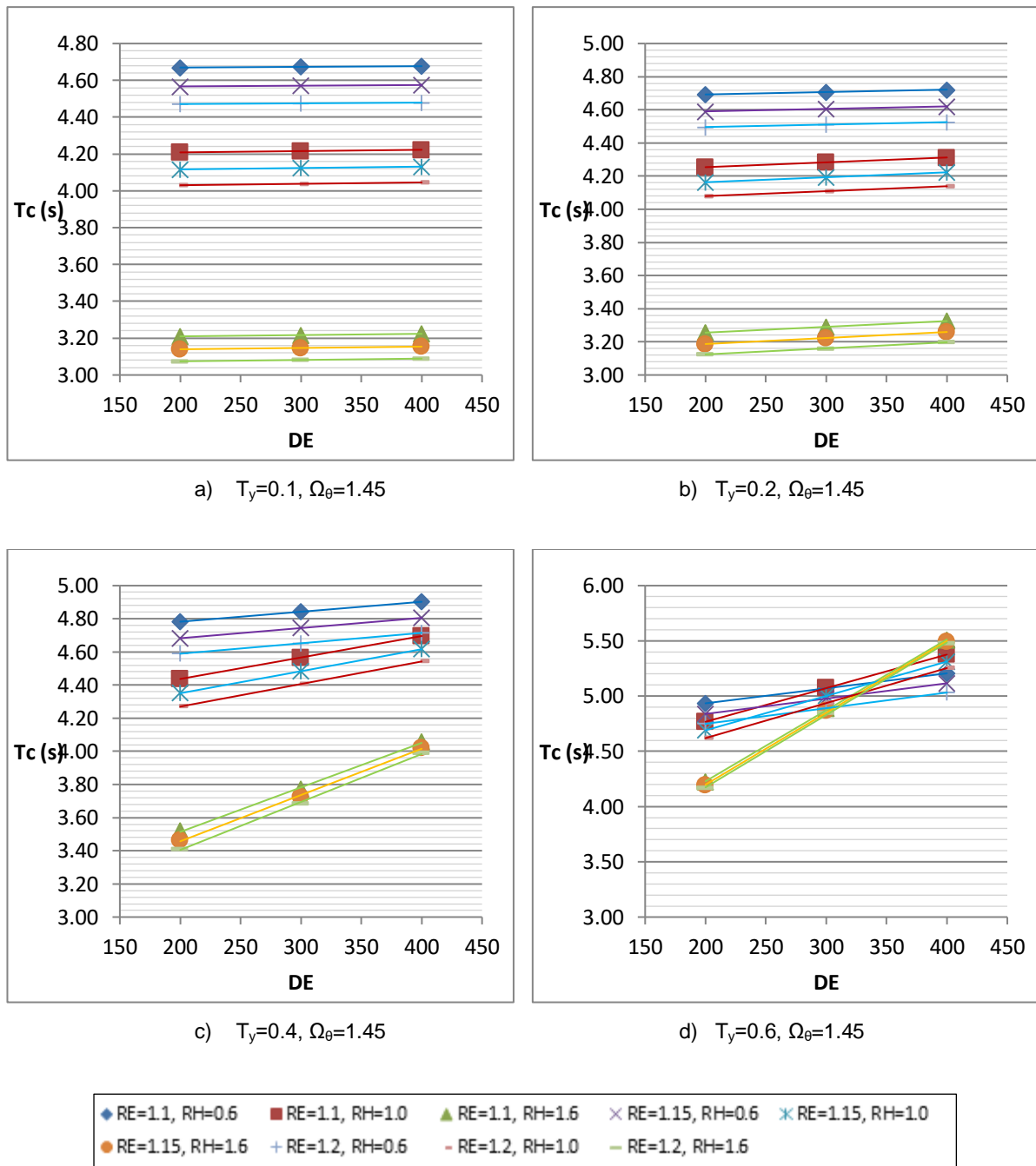


Figura D.17. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 - configuración de 10 columnas.

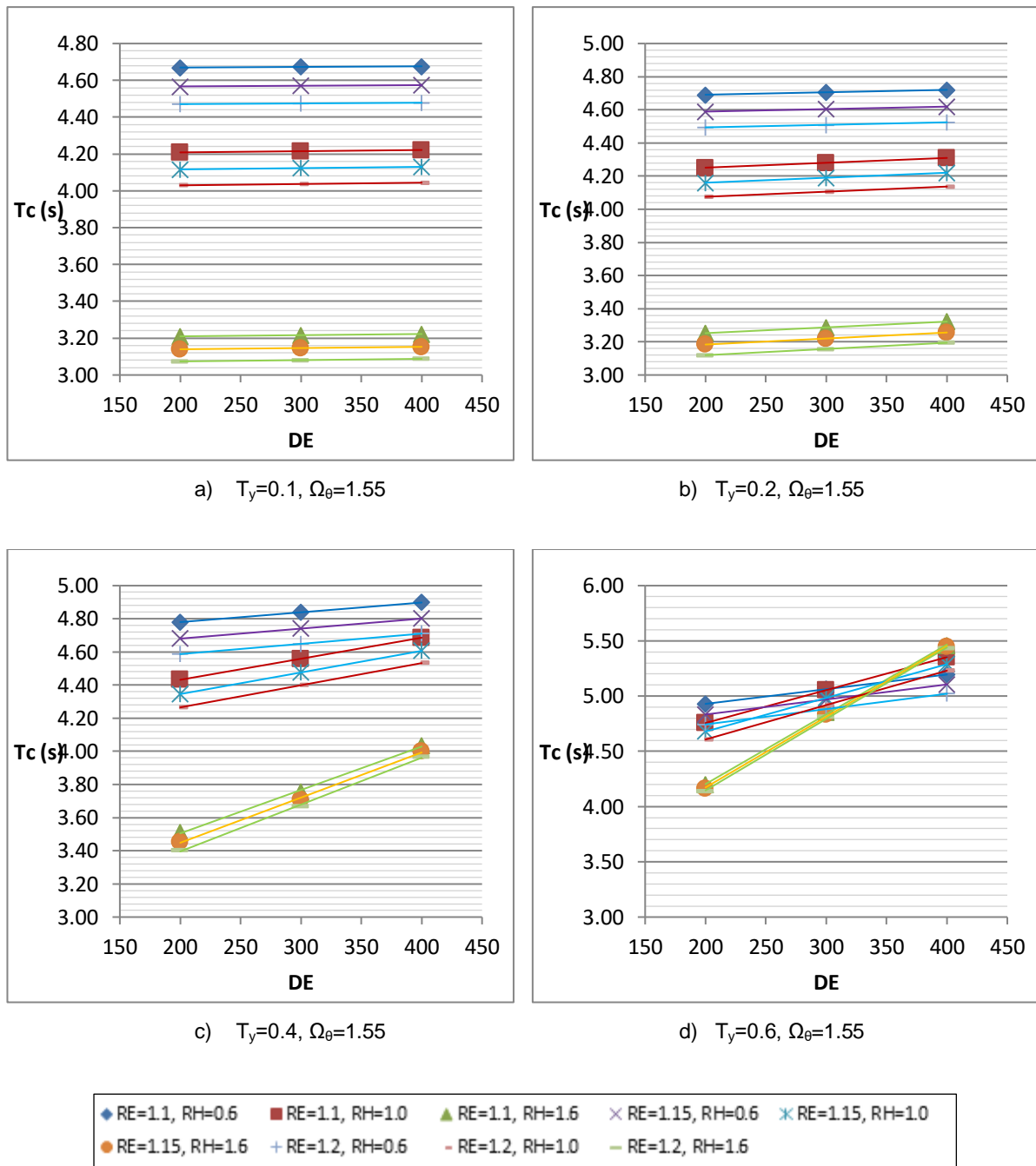
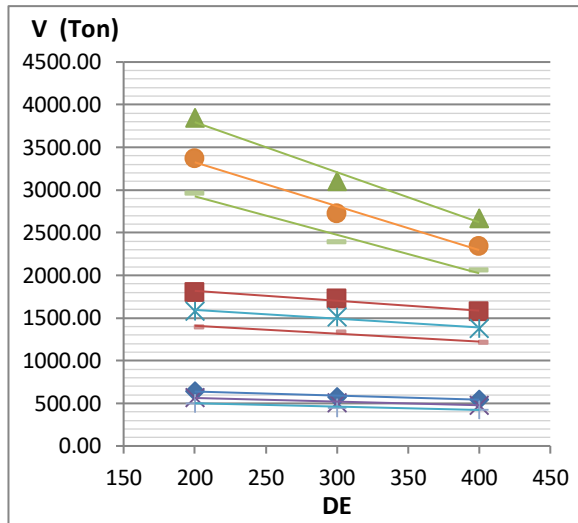
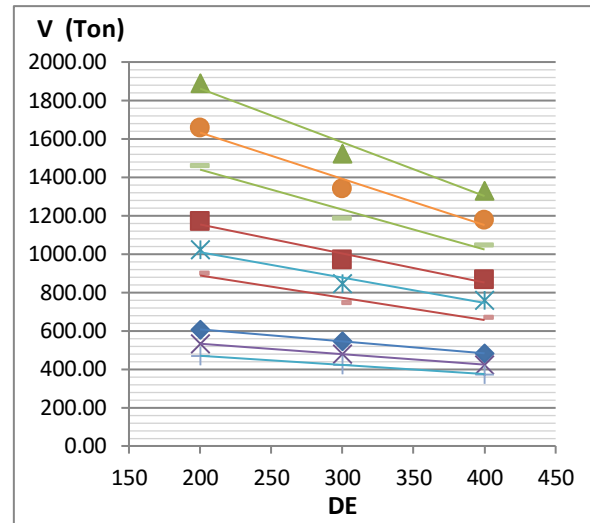


Figura D.18. Relación del Período Convectivo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 - configuración de 10 columnas

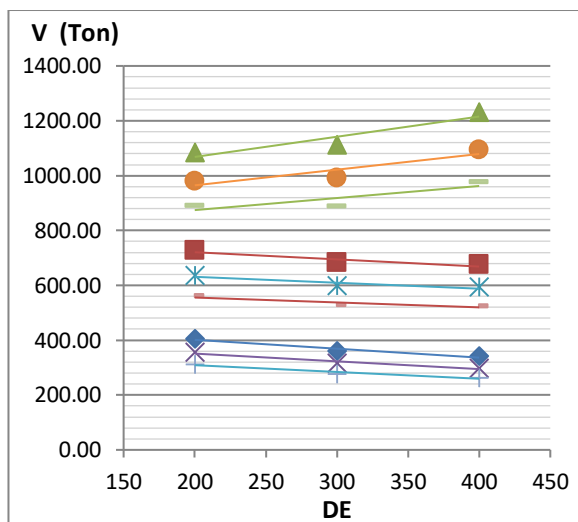
Cortante basal:



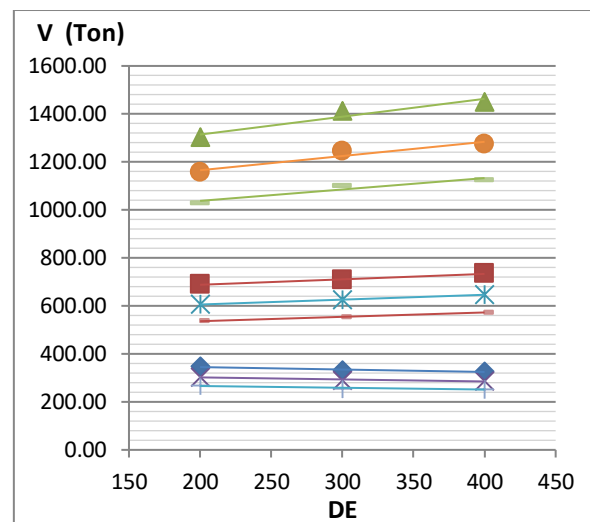
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

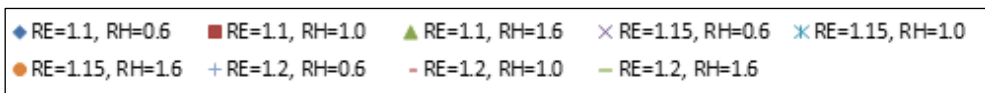
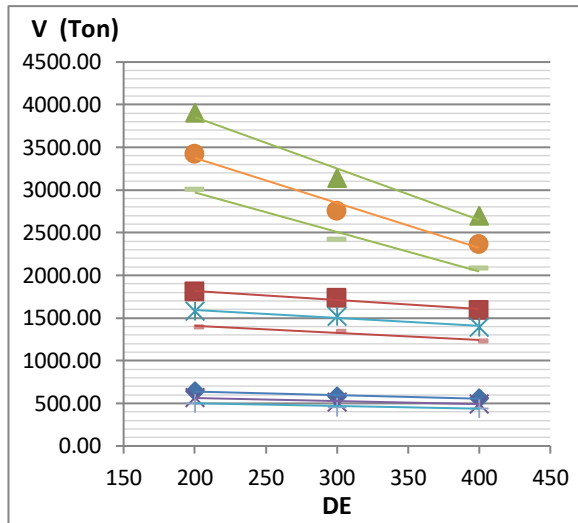
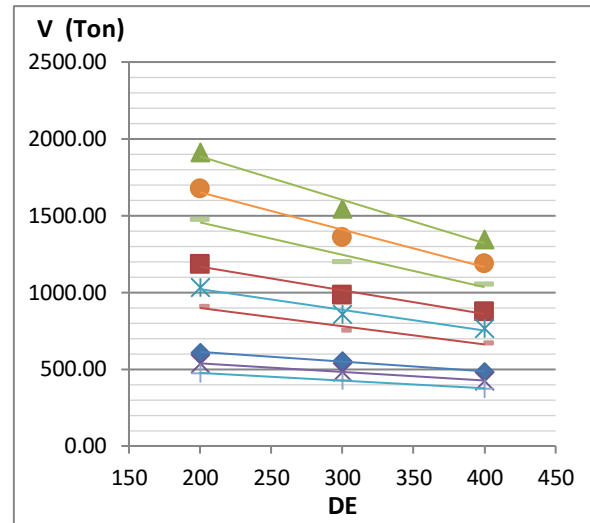


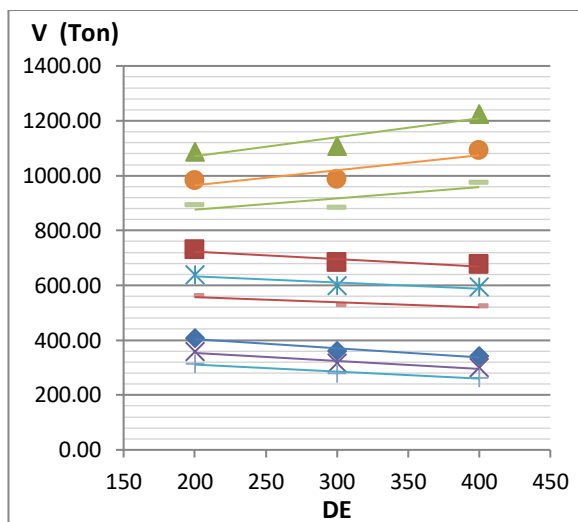
Figura D.19. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



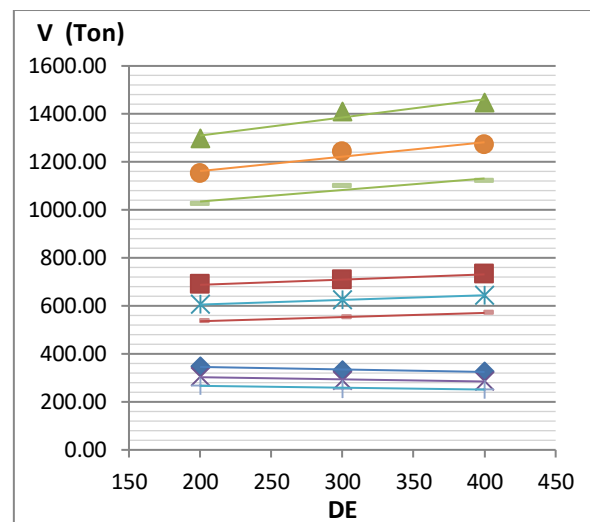
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

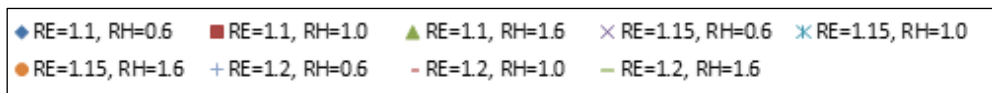
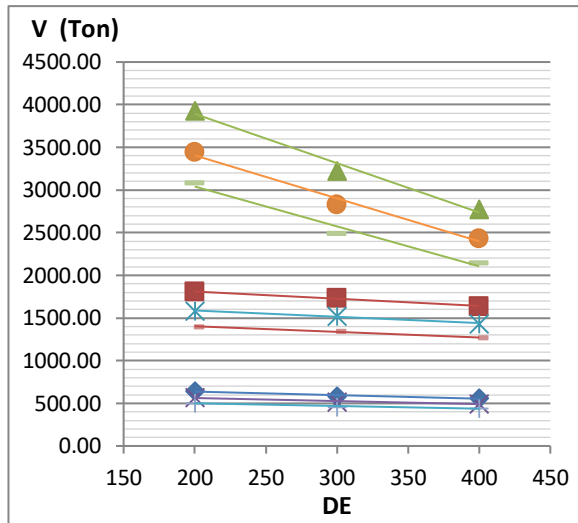
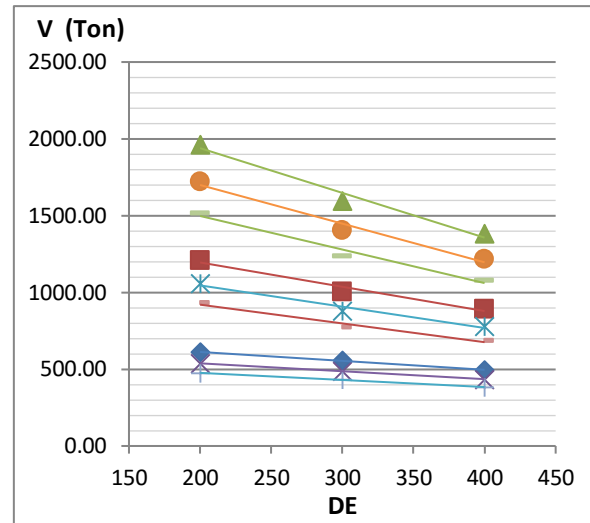


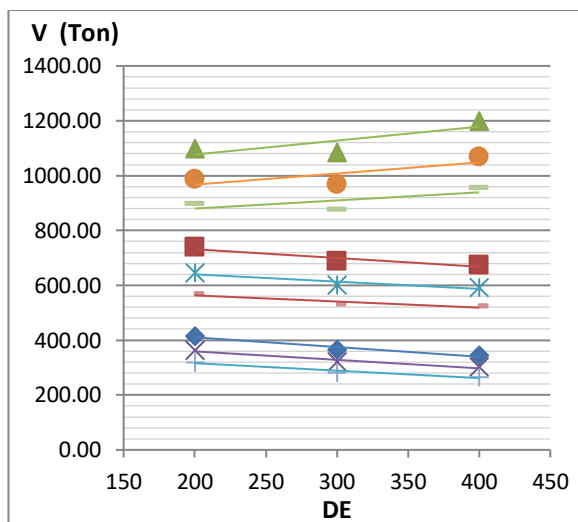
Figura D.20. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



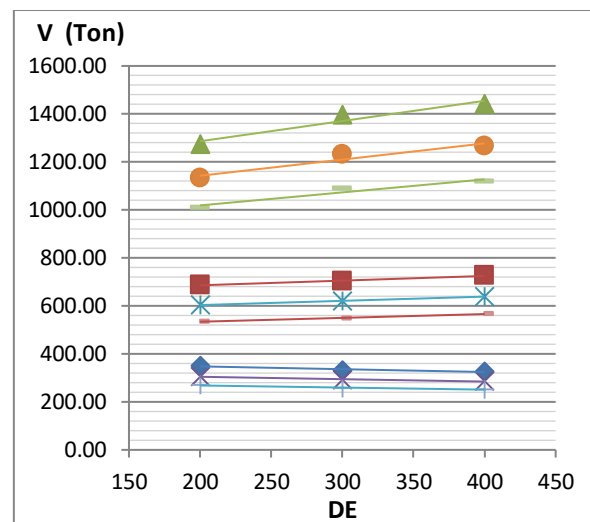
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.55$

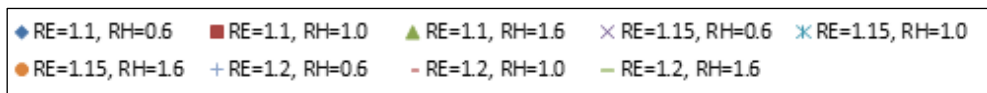
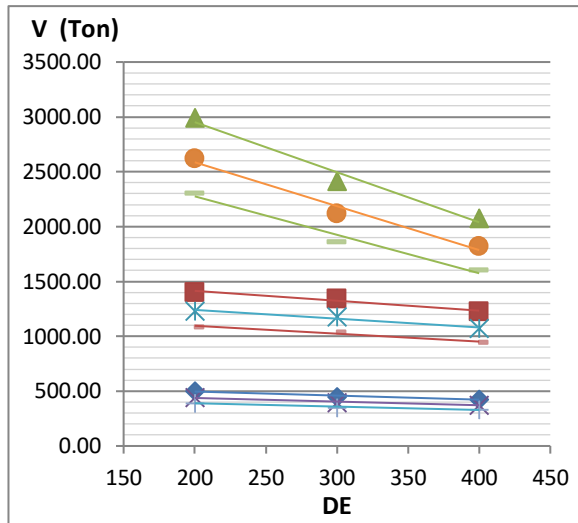
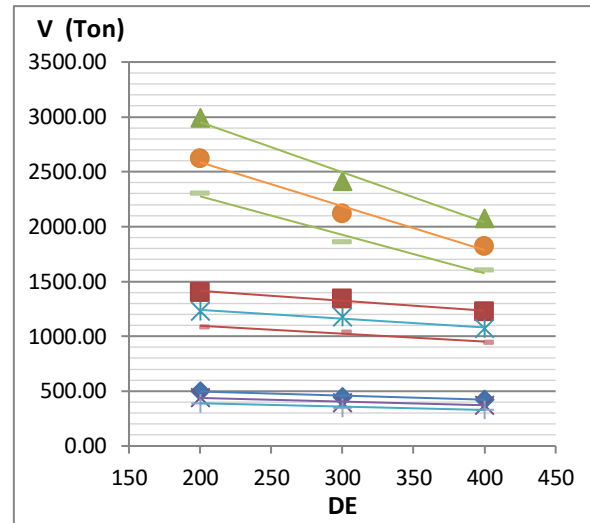


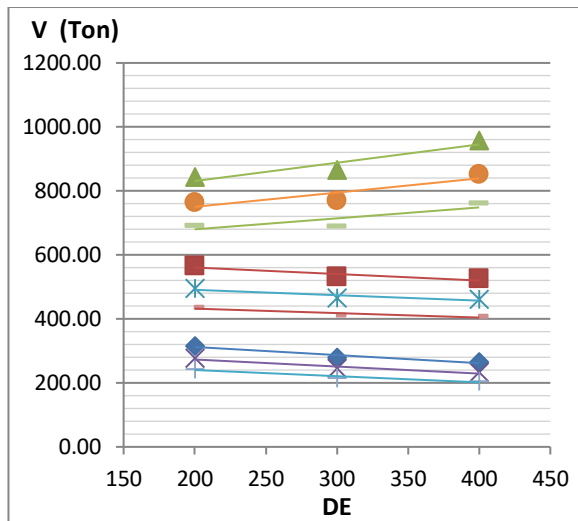
Figura D.21. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



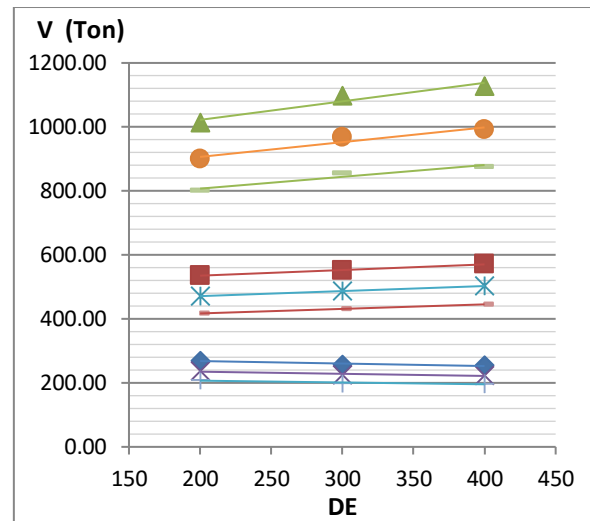
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

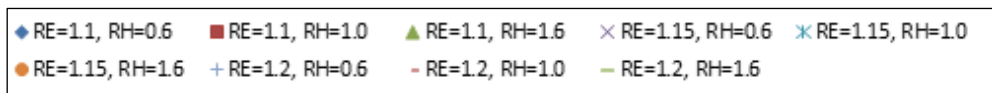
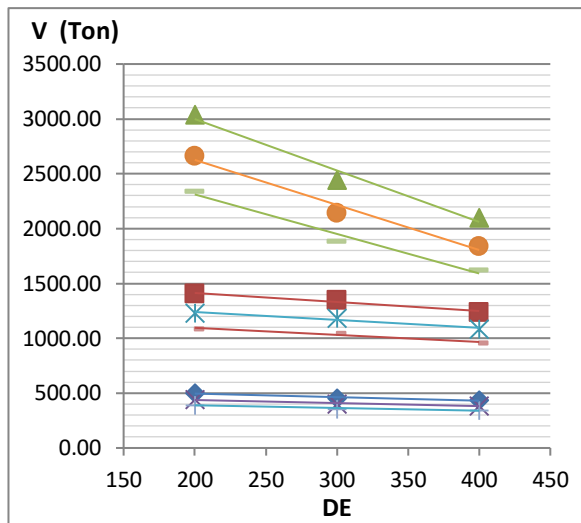
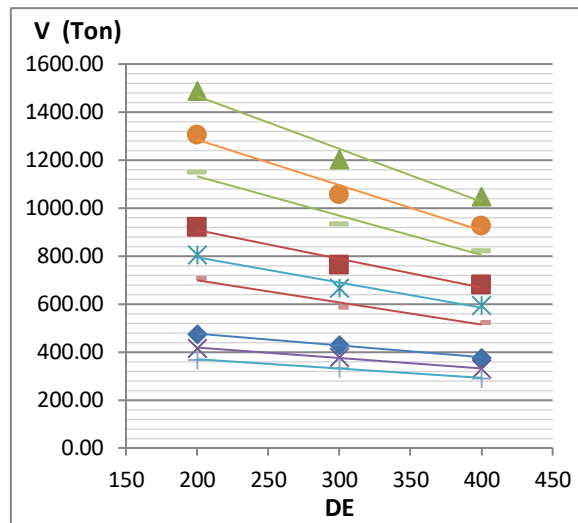


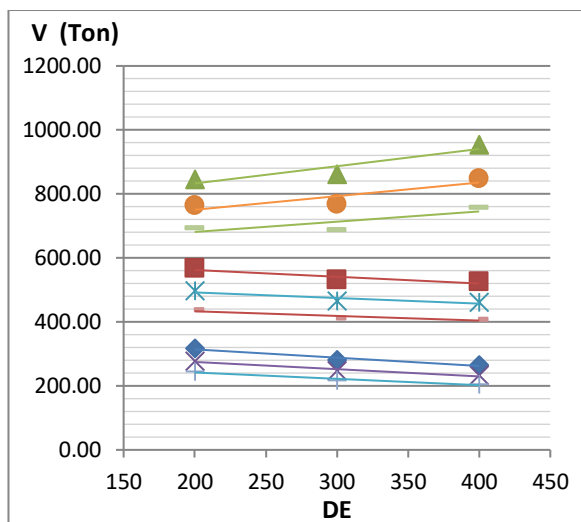
Figura D.22. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



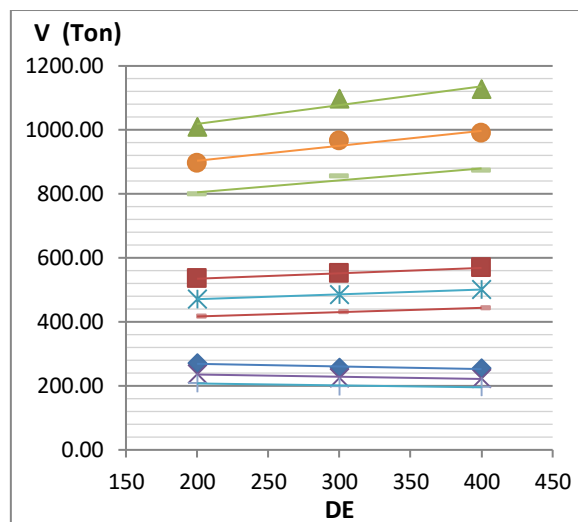
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

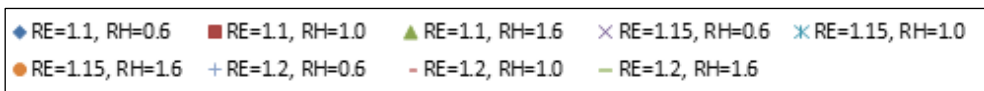
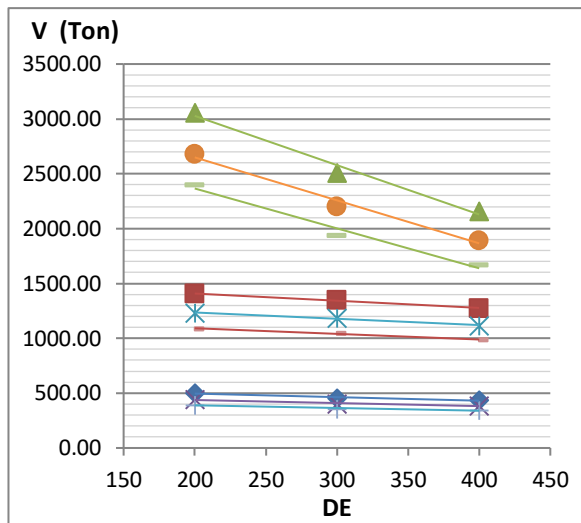
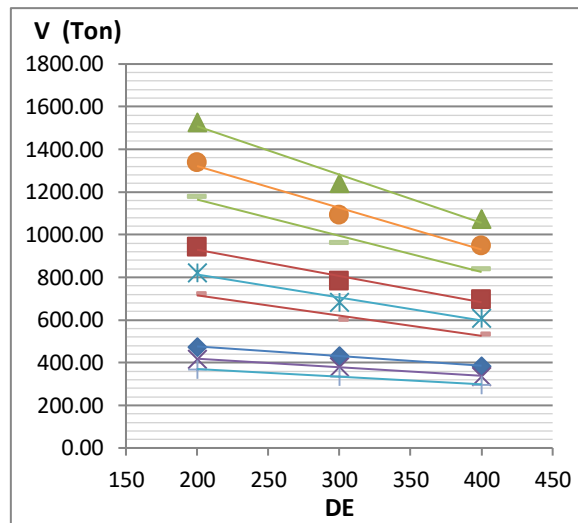


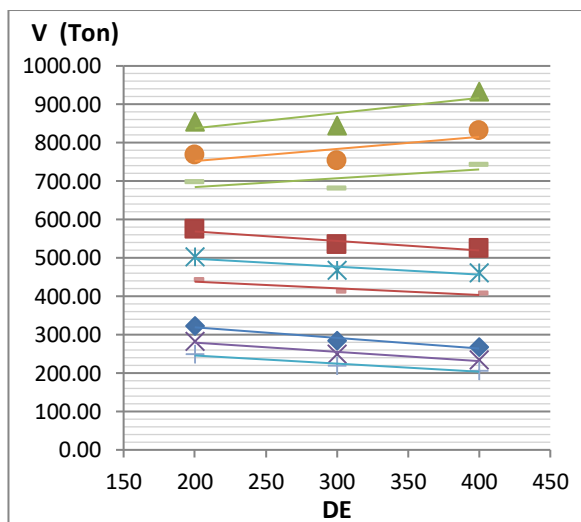
Figura D.23. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



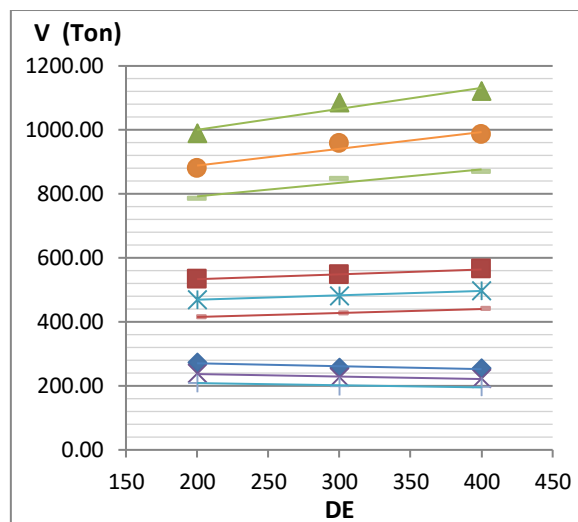
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

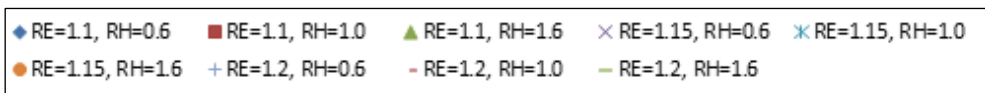
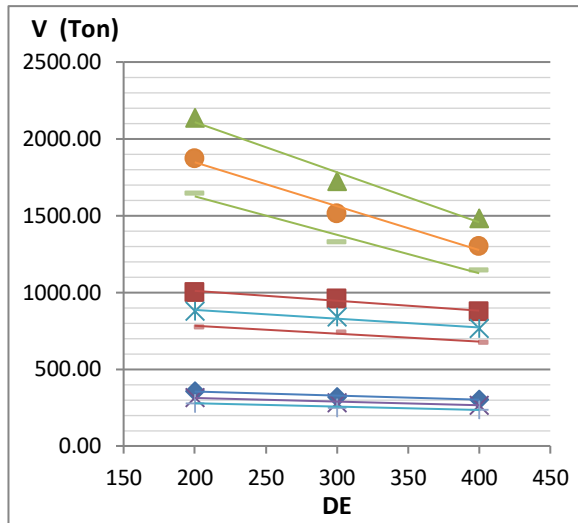
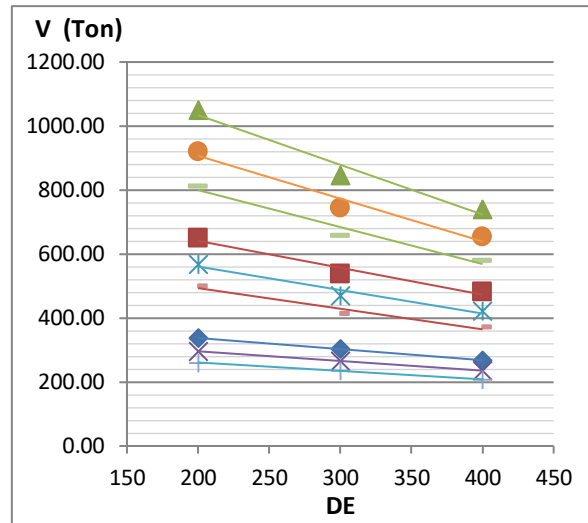


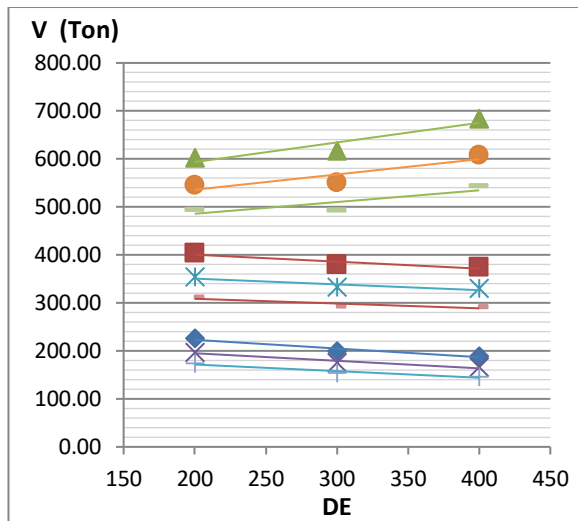
Figura D.24. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



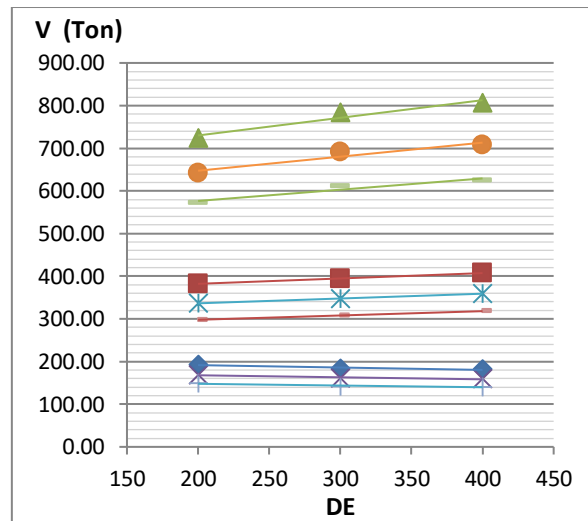
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

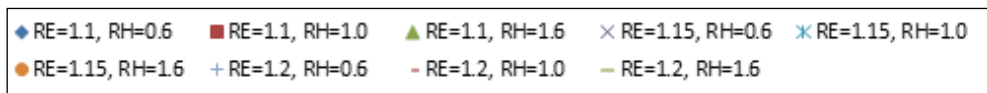
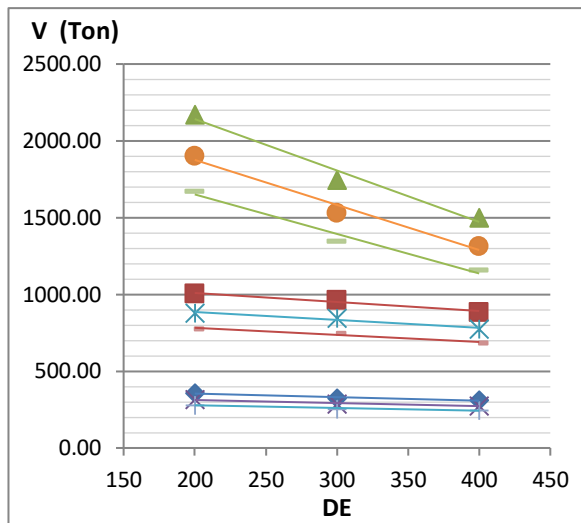
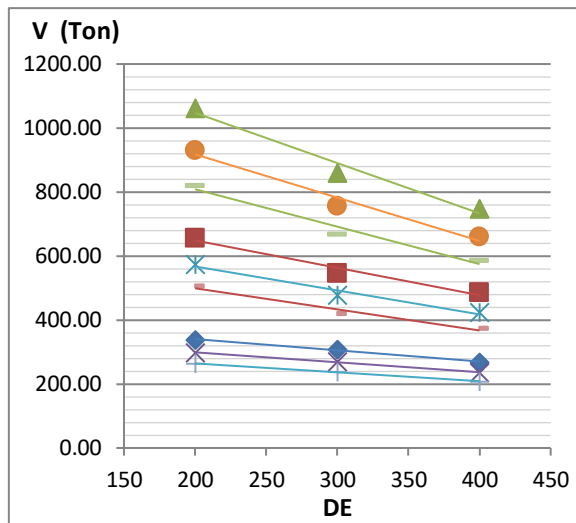


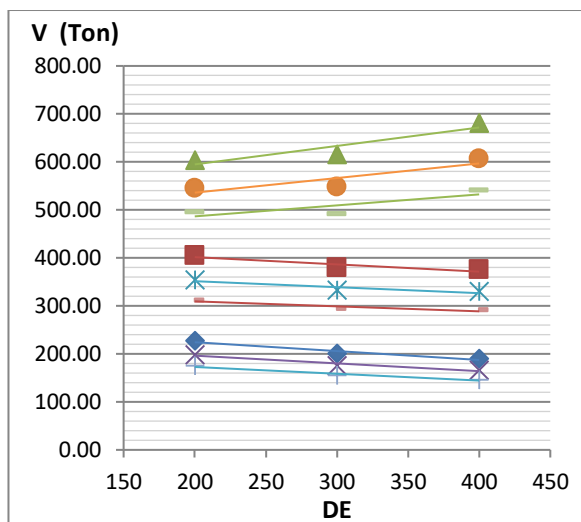
Figura D.25. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



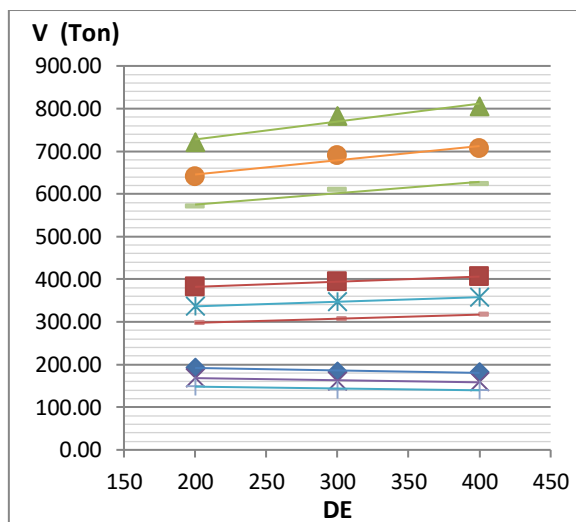
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

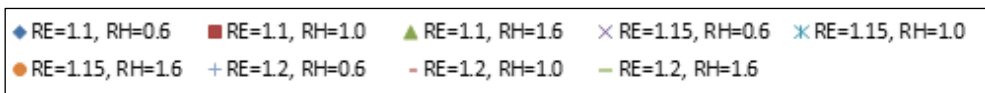
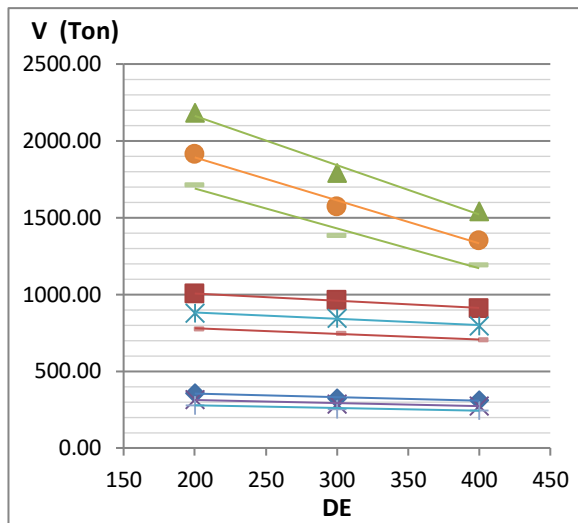
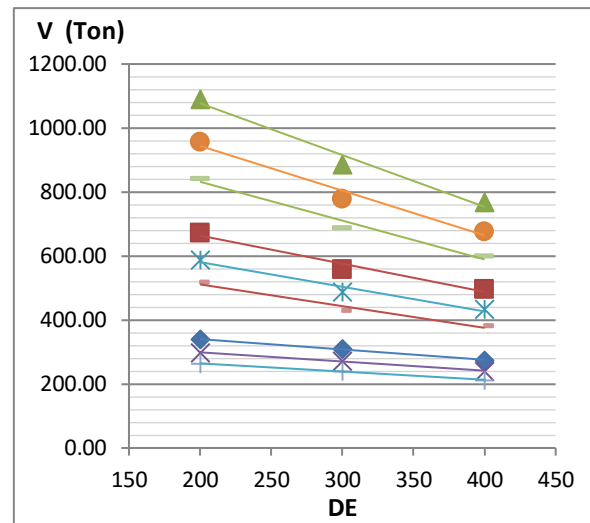


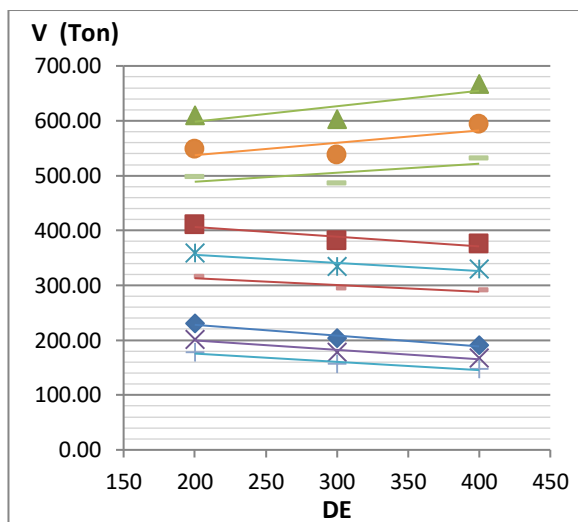
Figura D.26. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



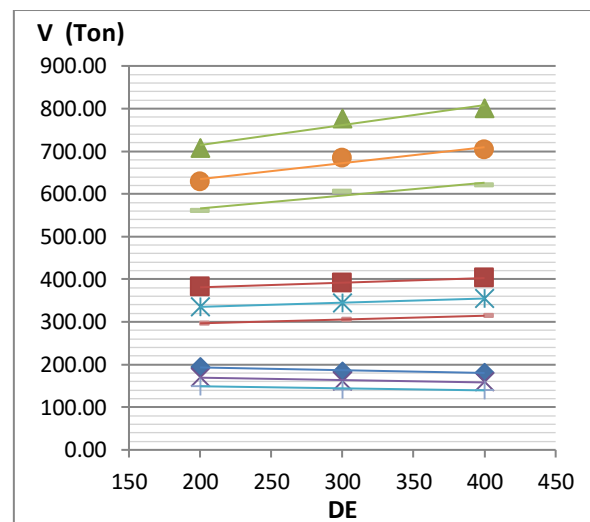
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

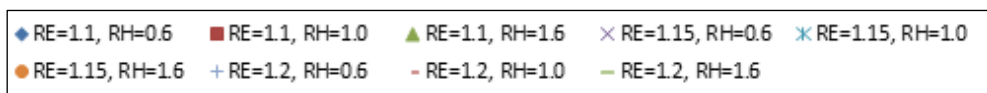


Figura D.27. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

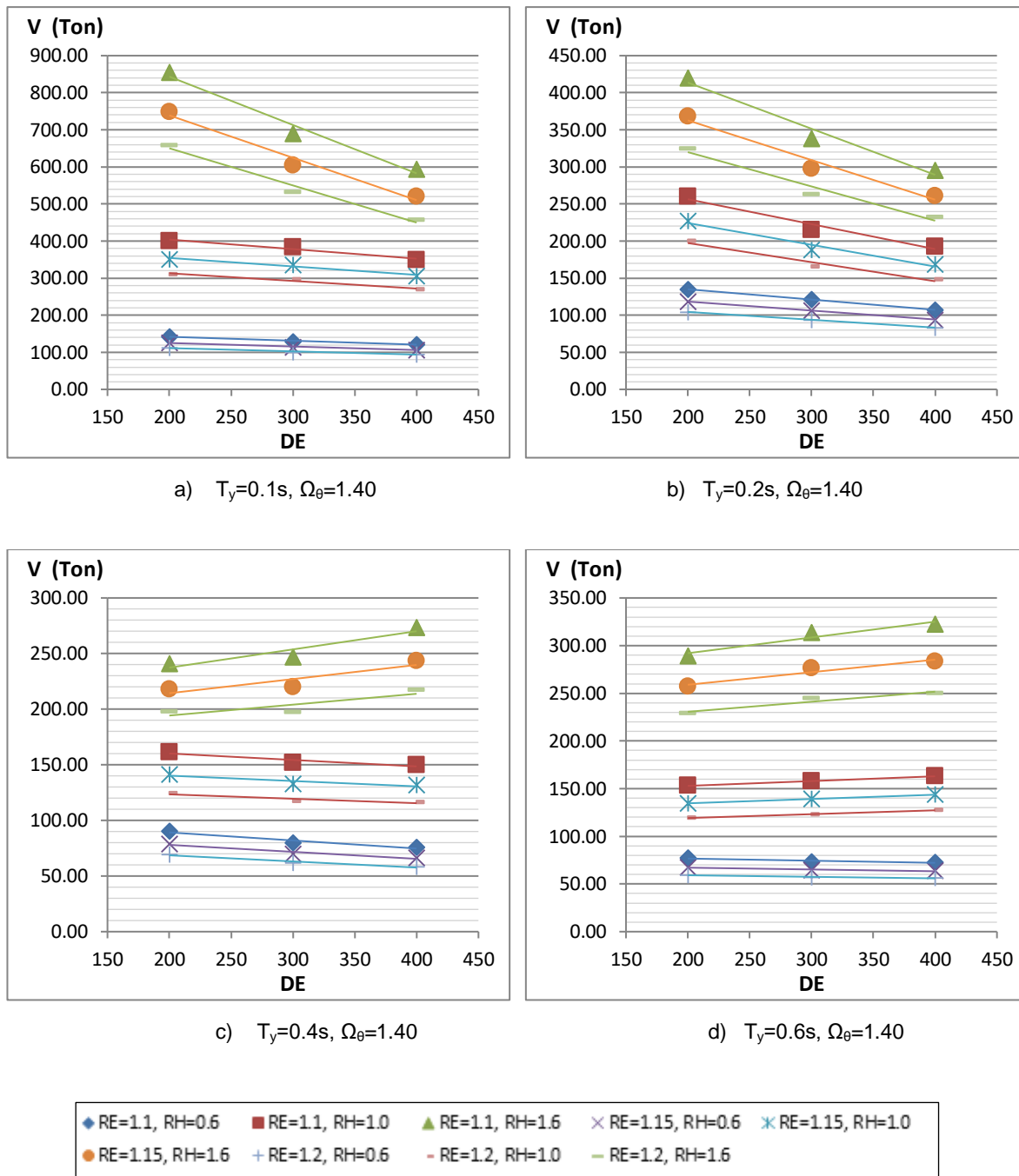
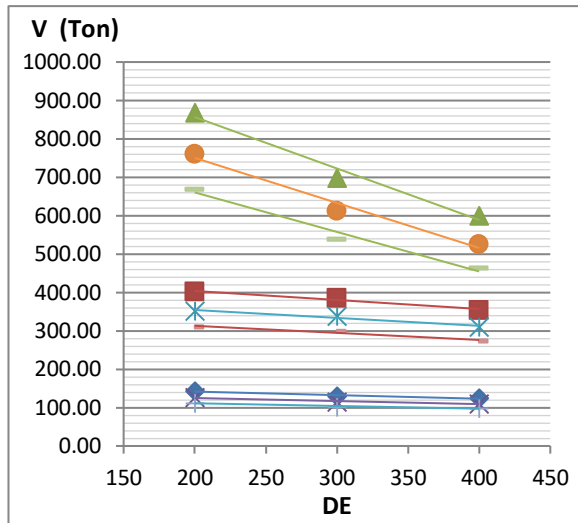
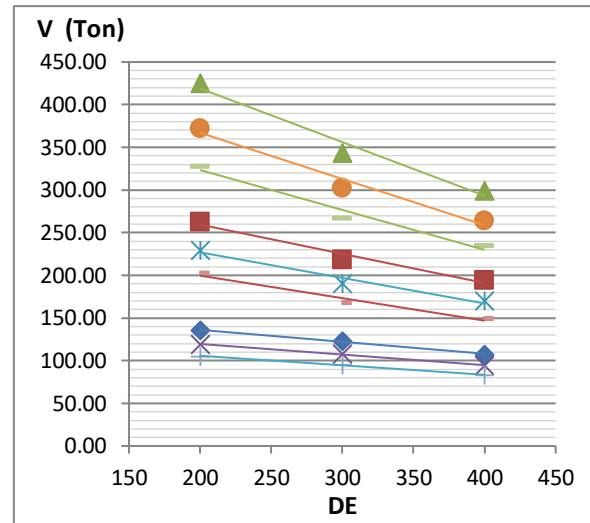


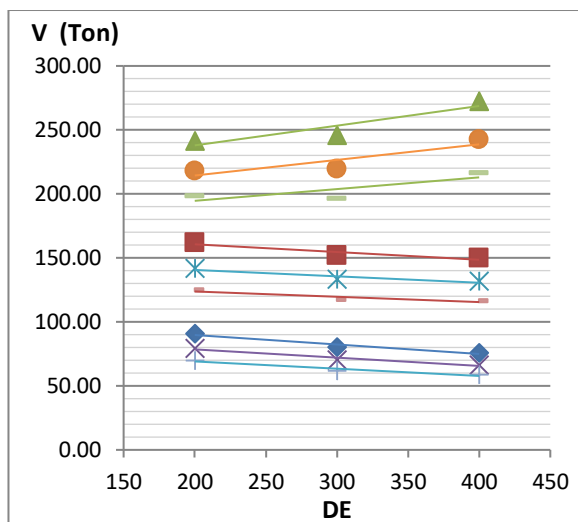
Figura D.28. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



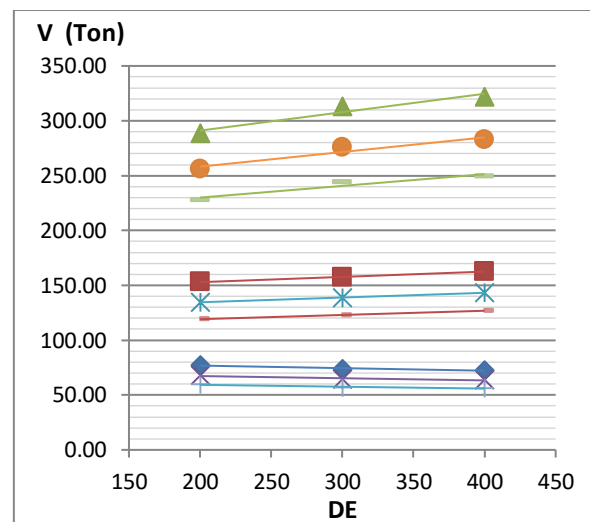
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

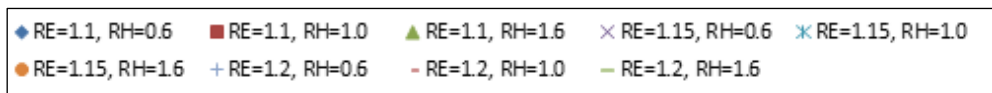


Figura D.29. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

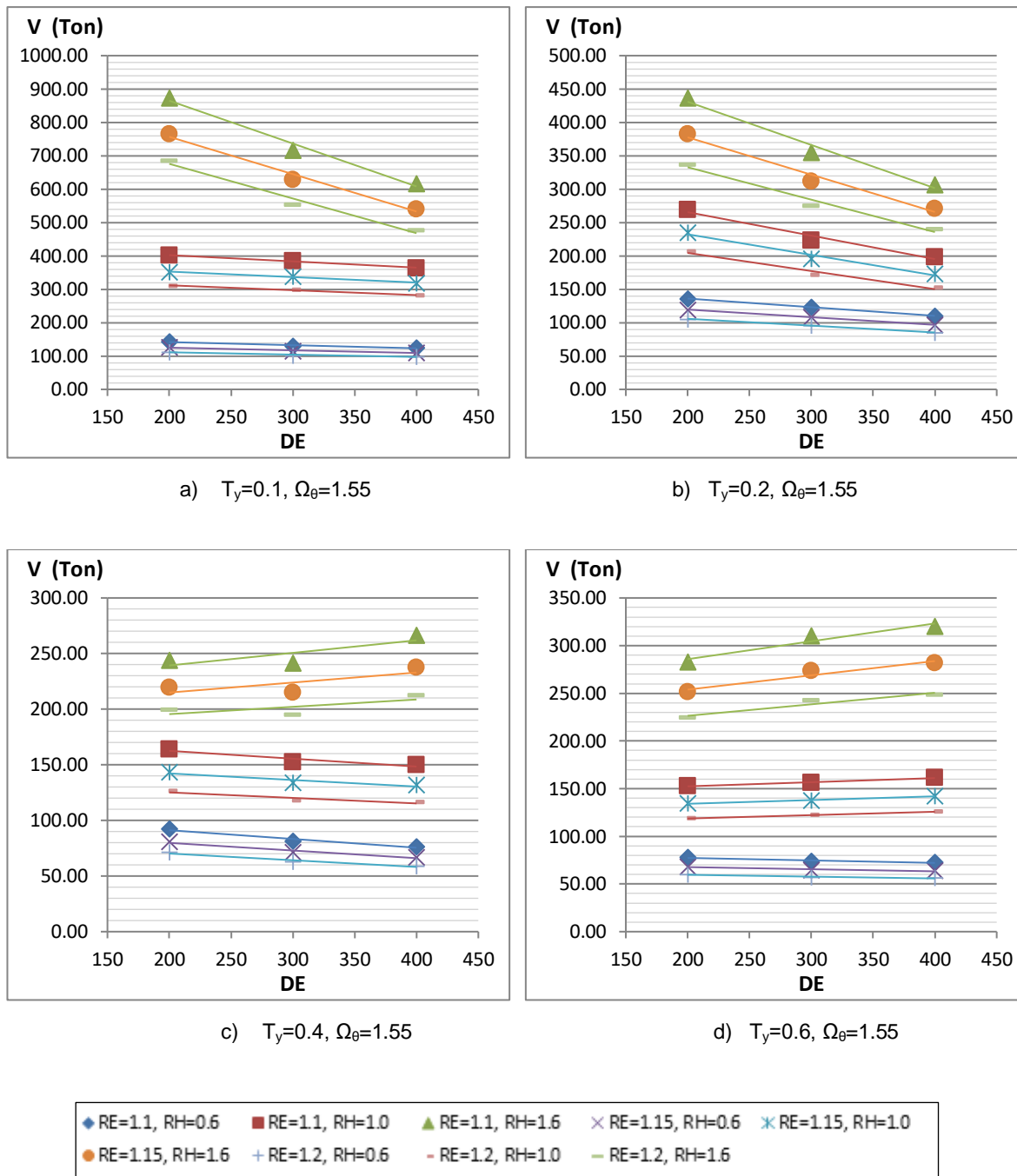


Figura D.30. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

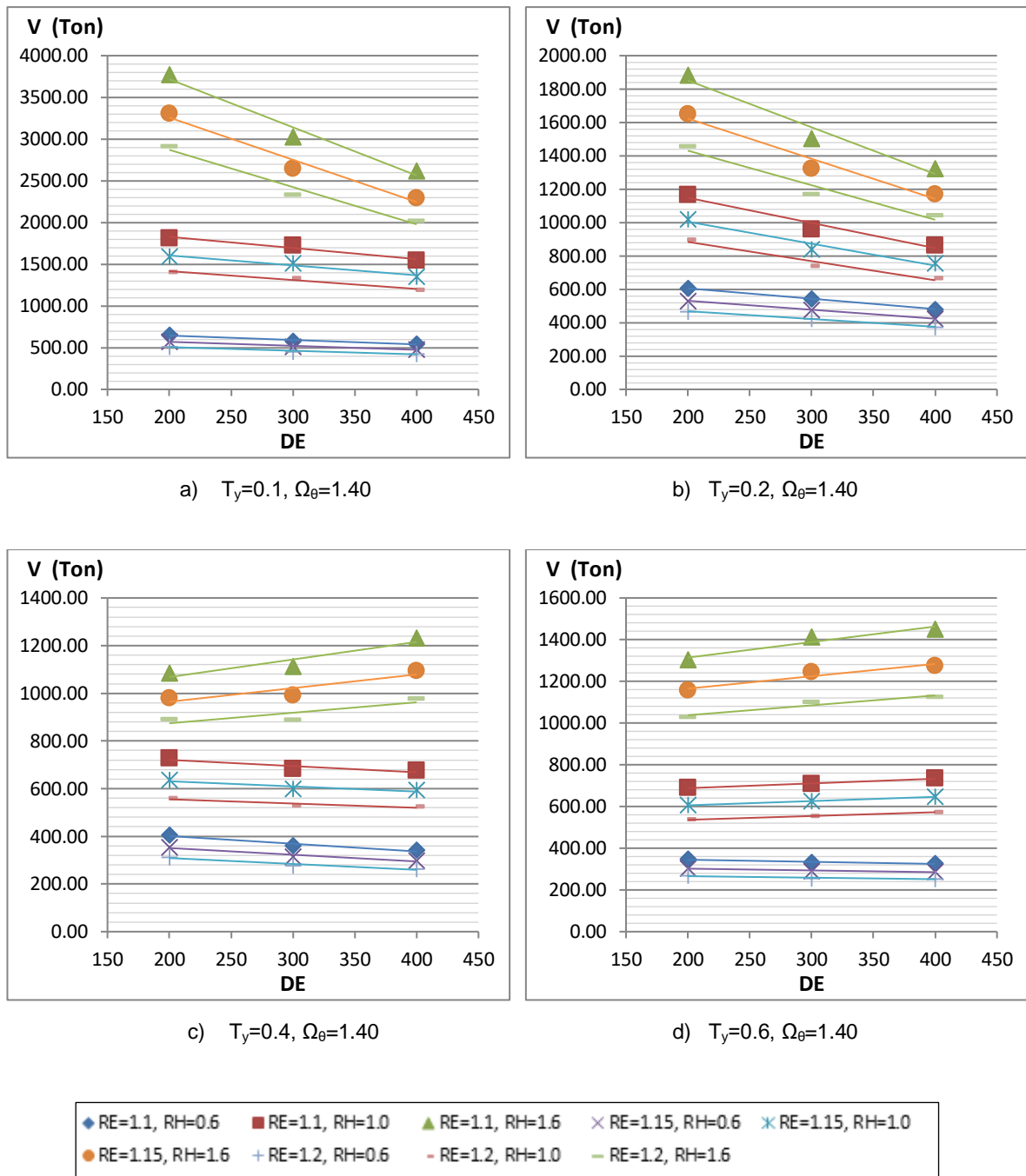
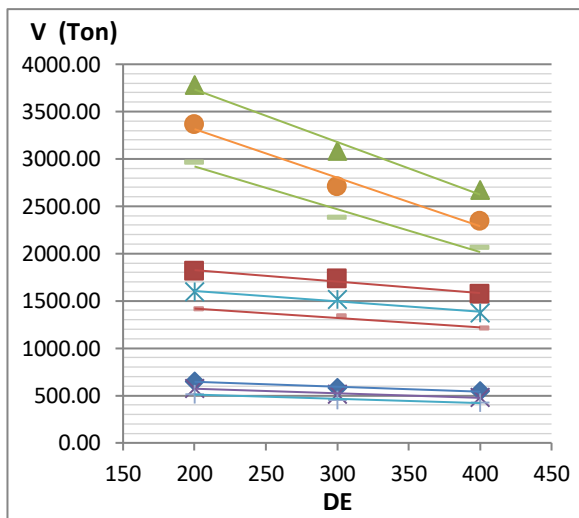
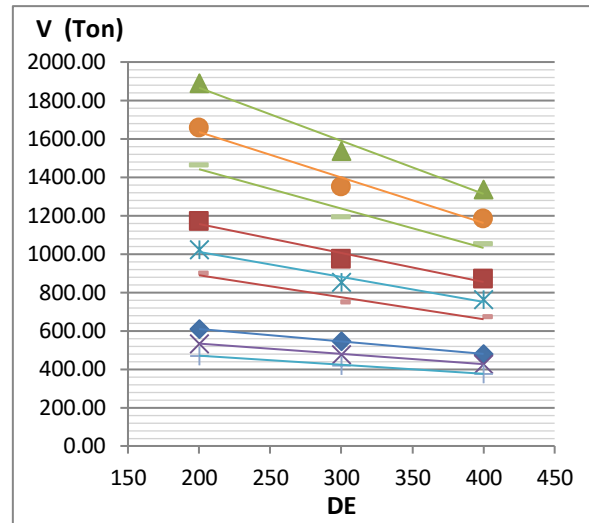


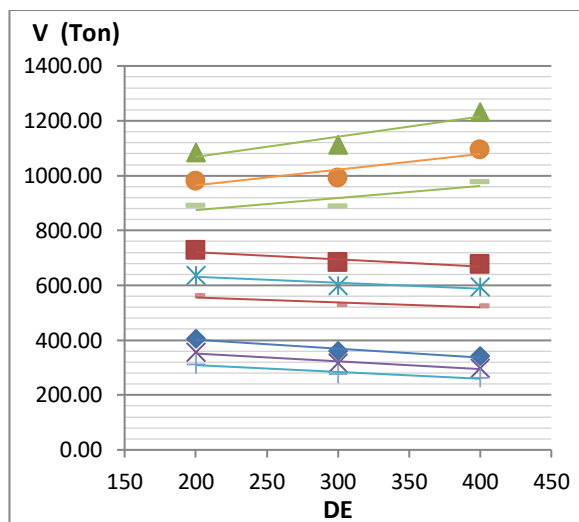
Figura D.31. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



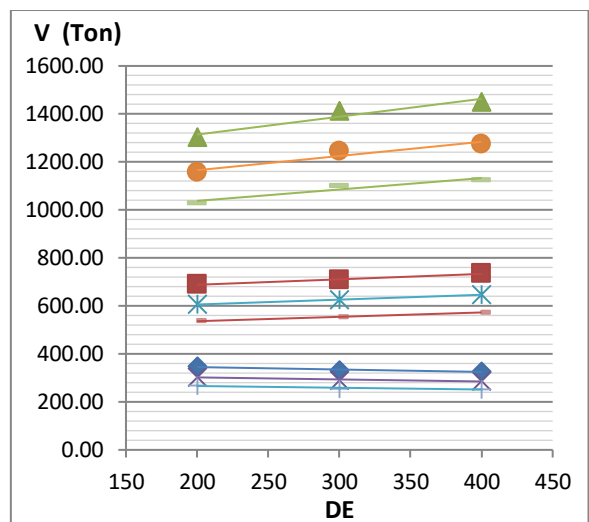
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

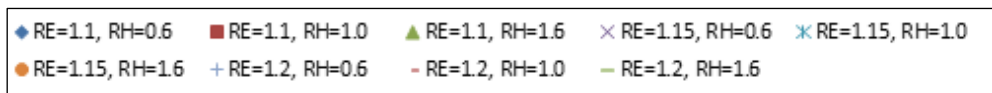


Figura D.32. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

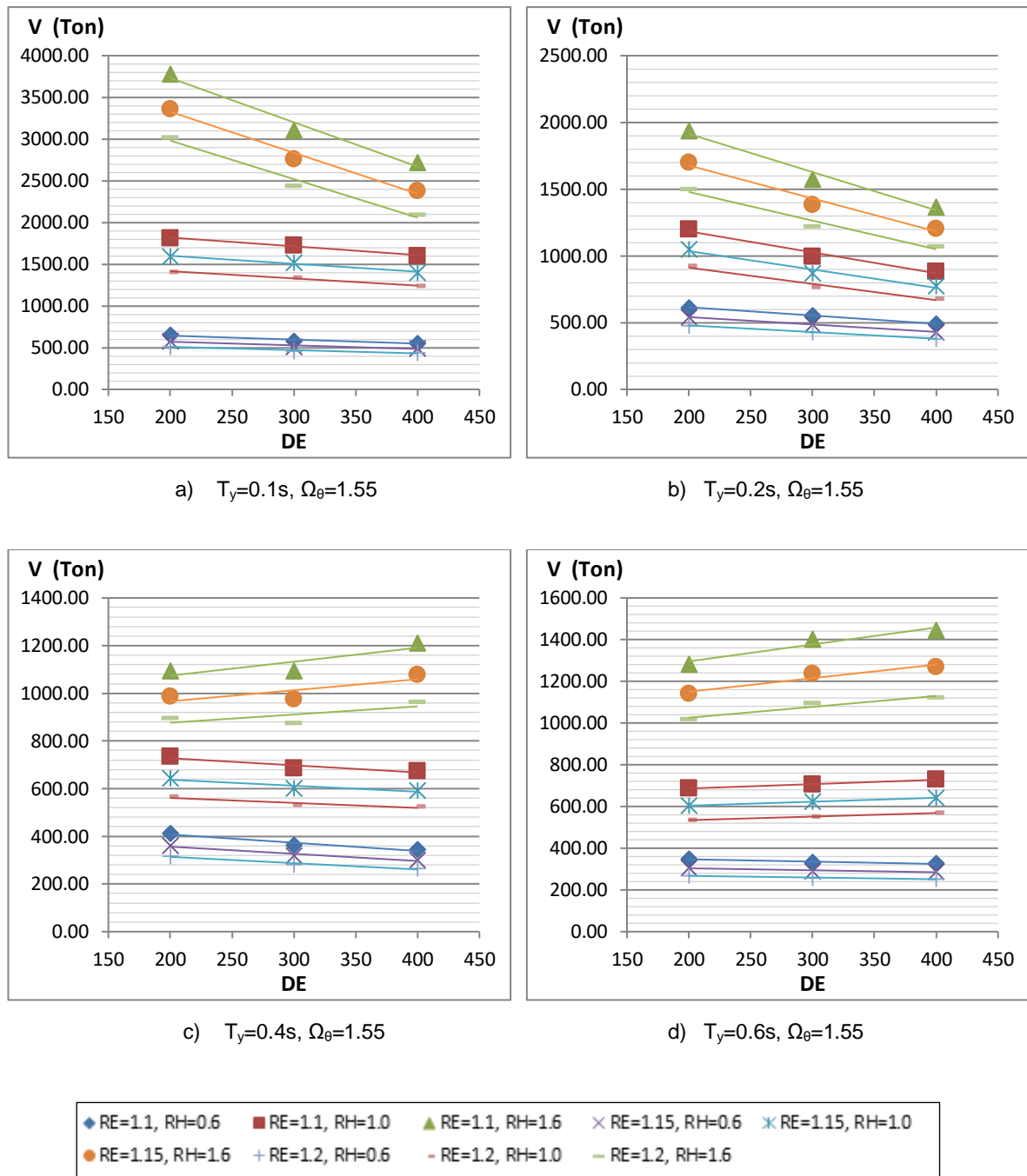
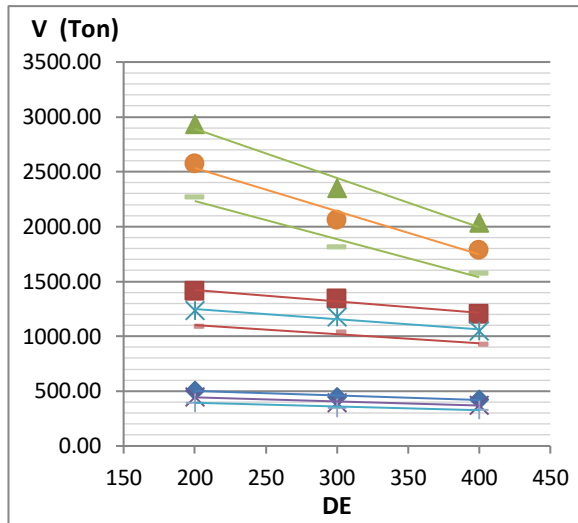
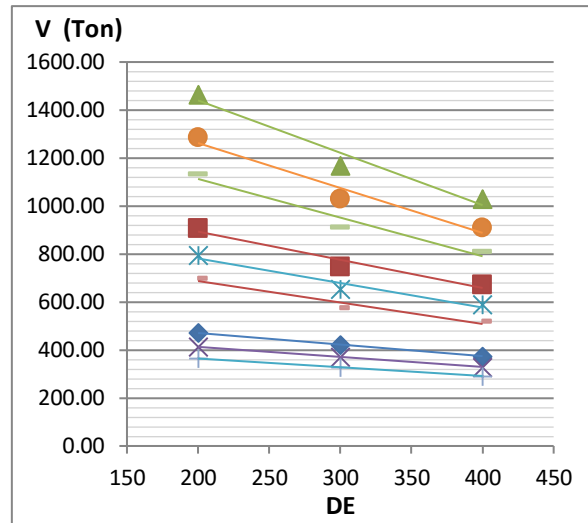


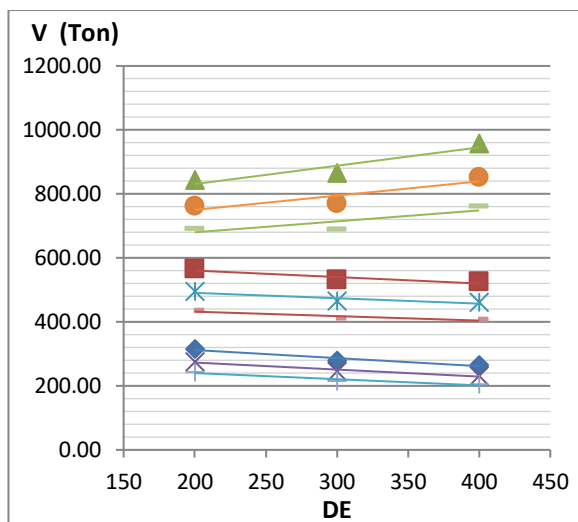
Figura D.33. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



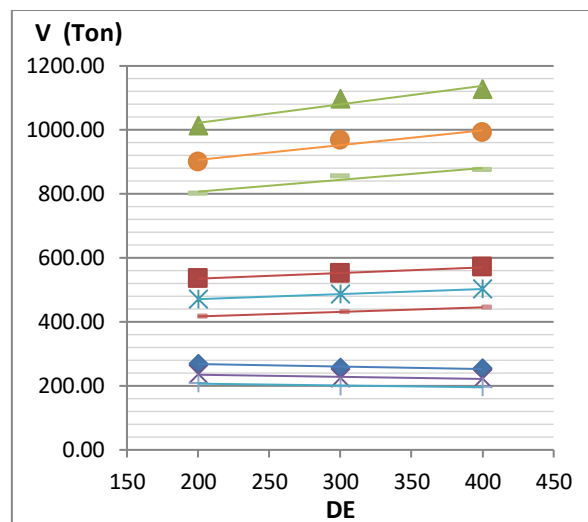
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

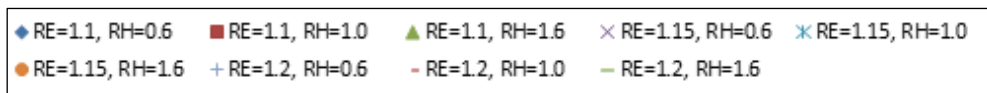
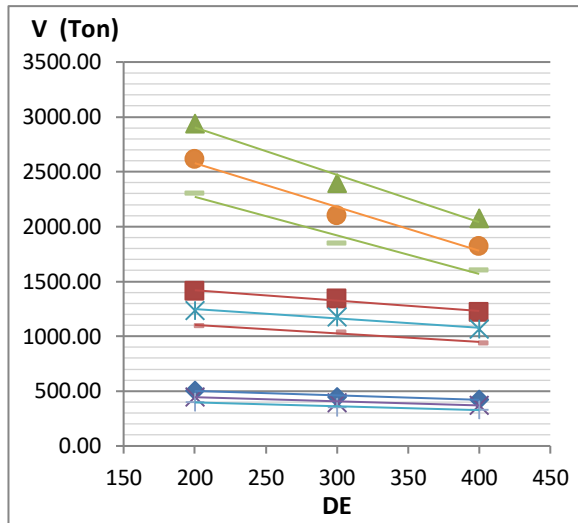
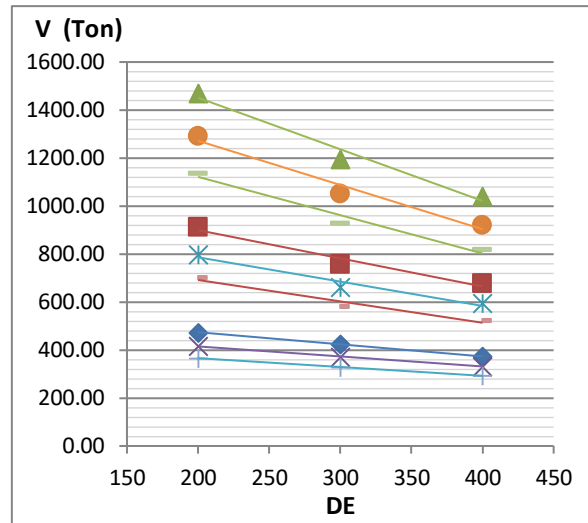


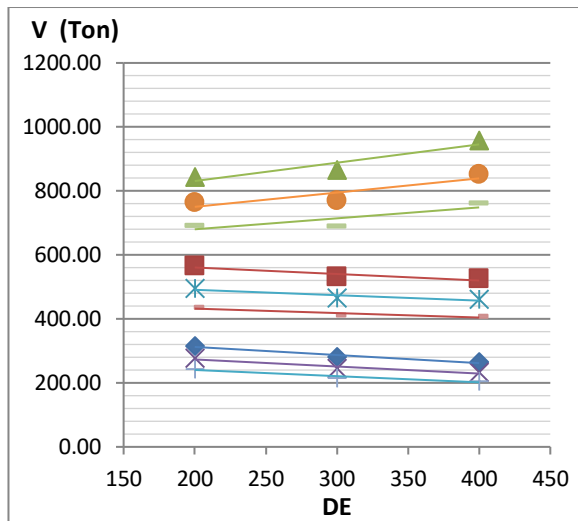
Figura D.34. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



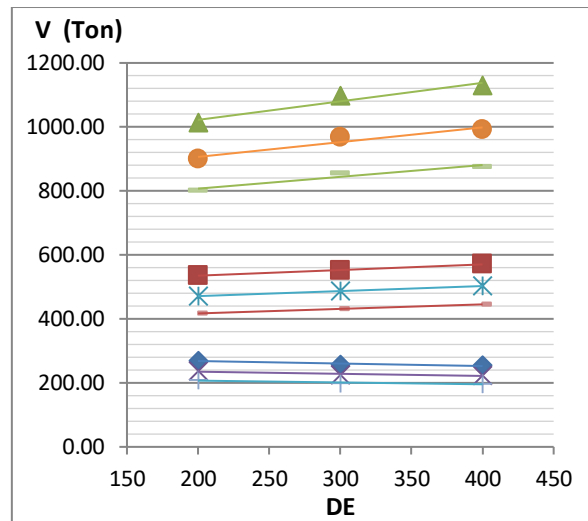
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

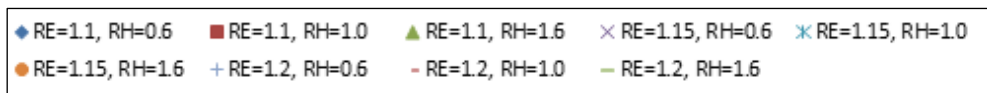
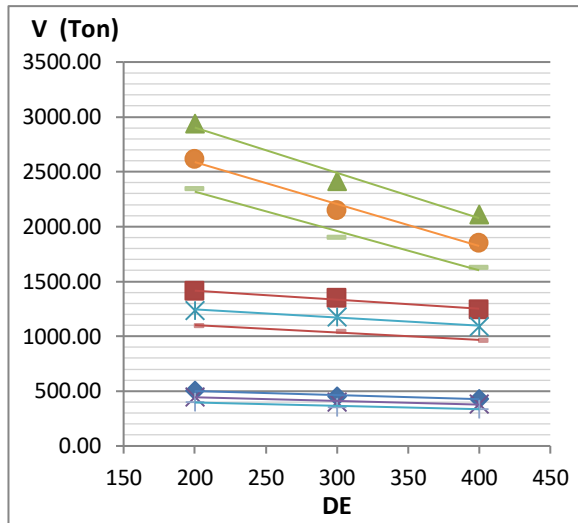
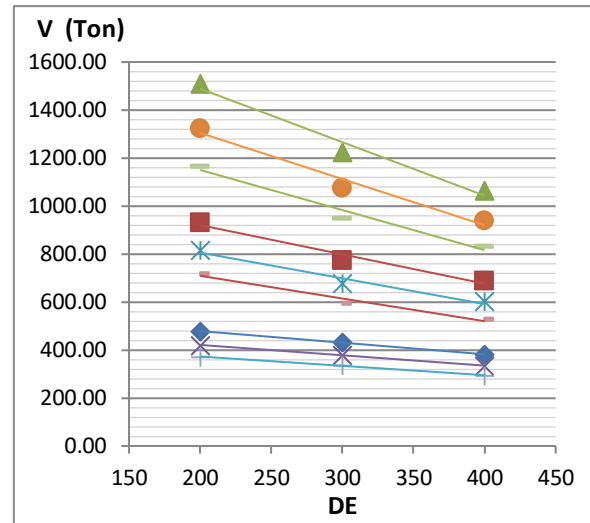


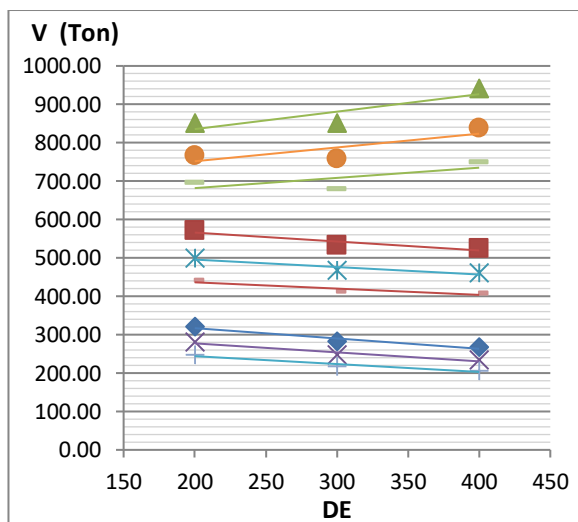
Figura D.35. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



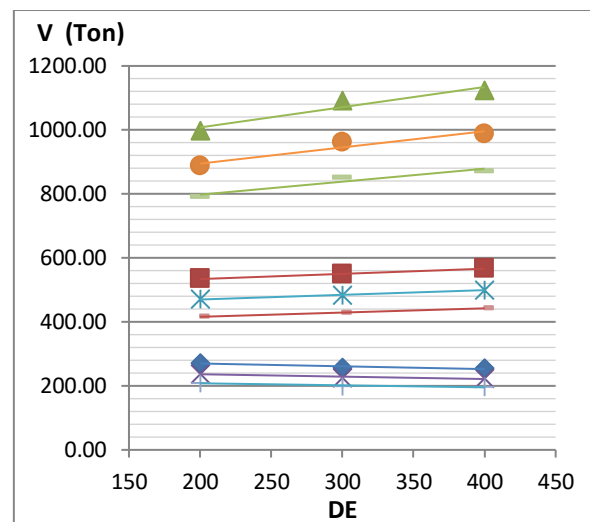
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

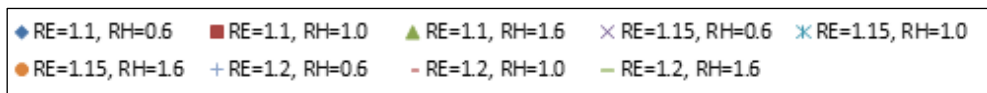
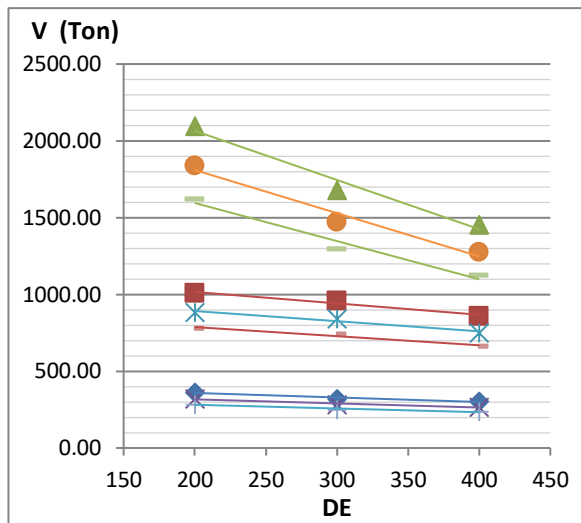
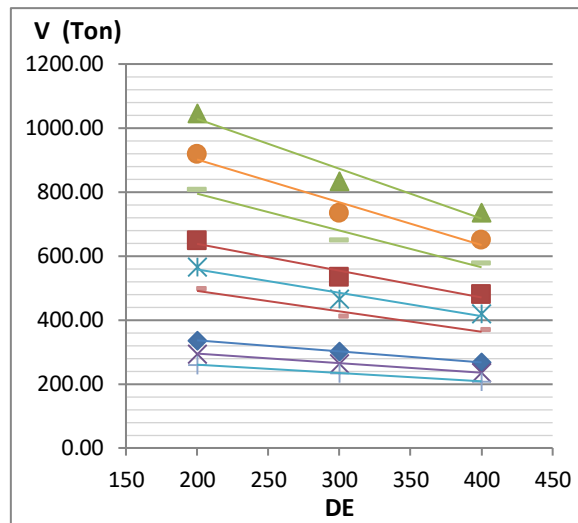


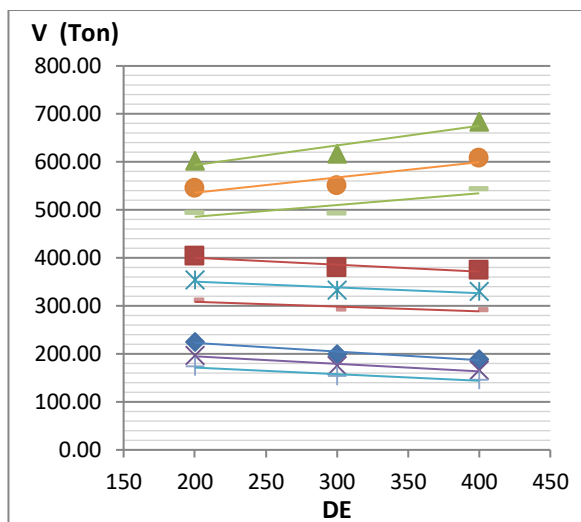
Figura D.36. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



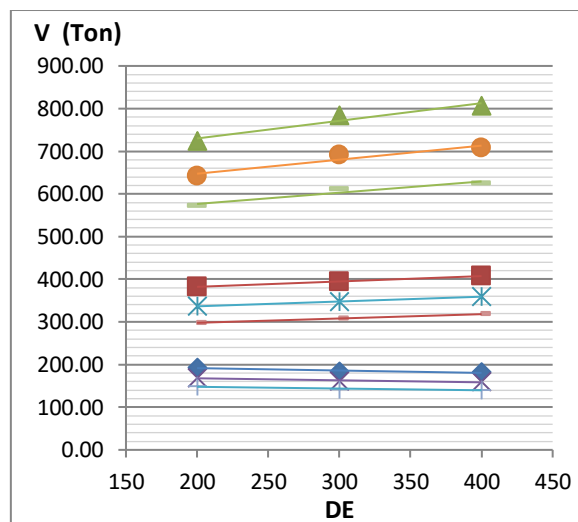
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

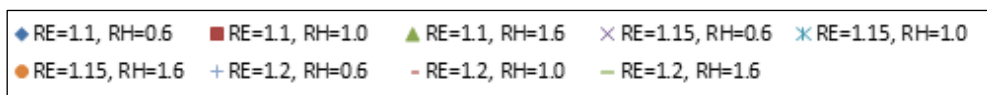


Figura D.37. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.

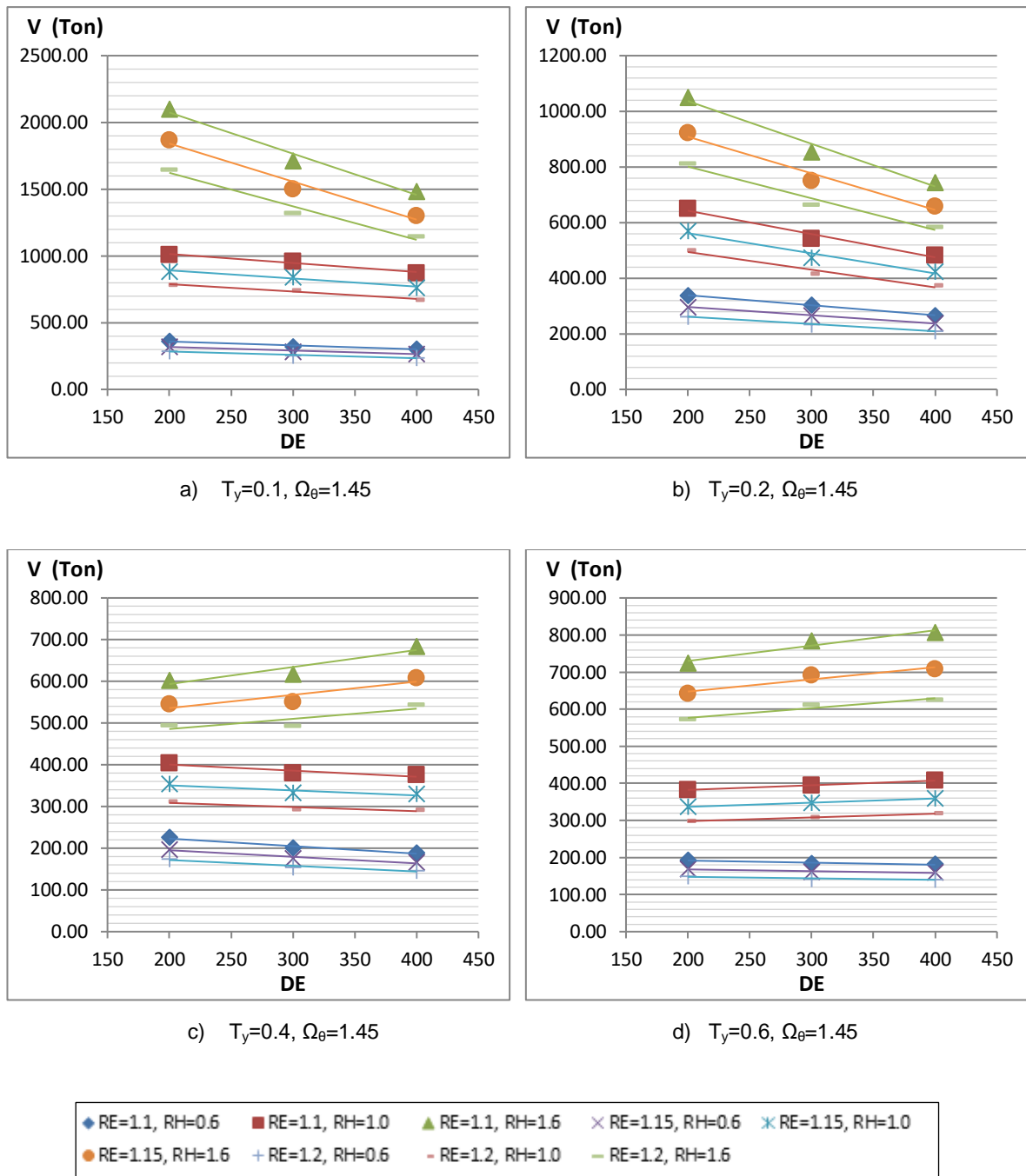
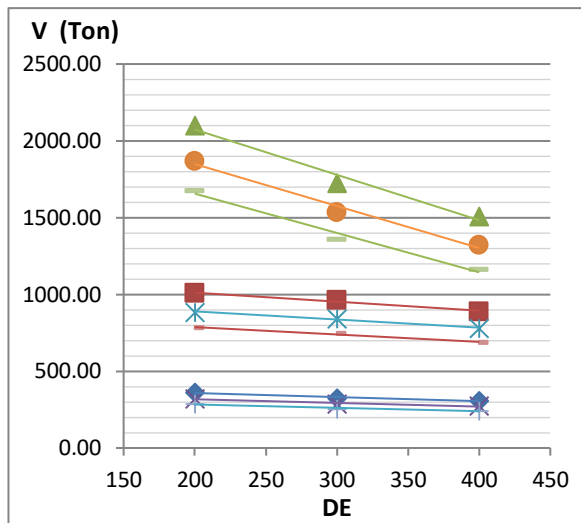
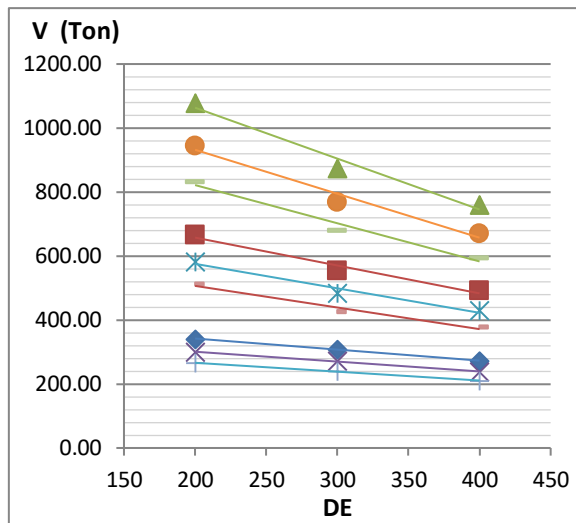


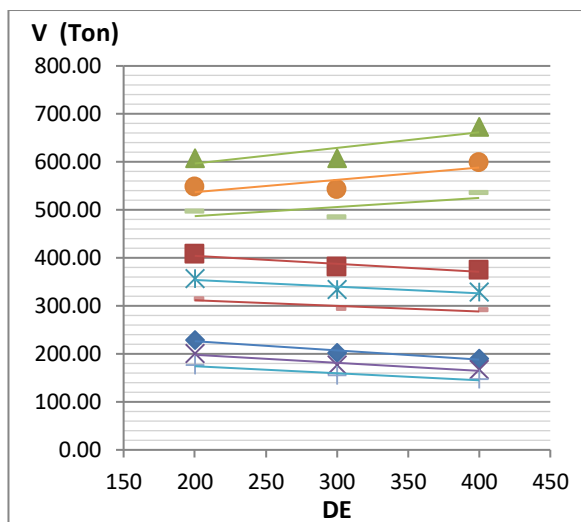
Figura D.38. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



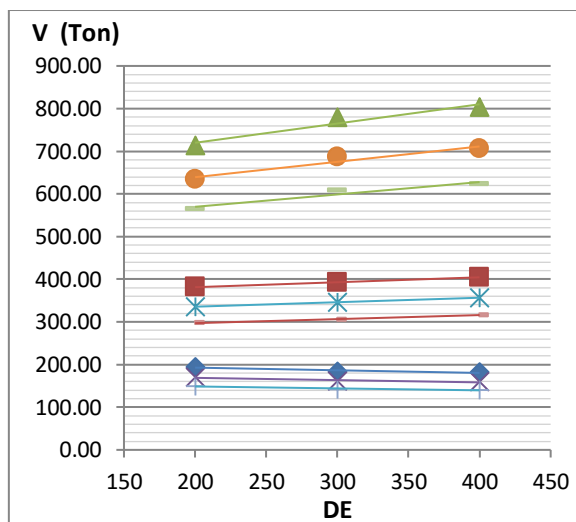
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

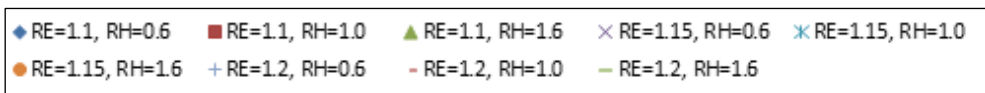
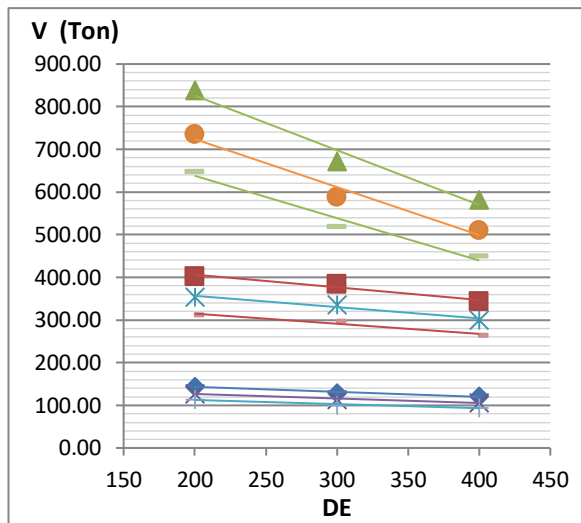
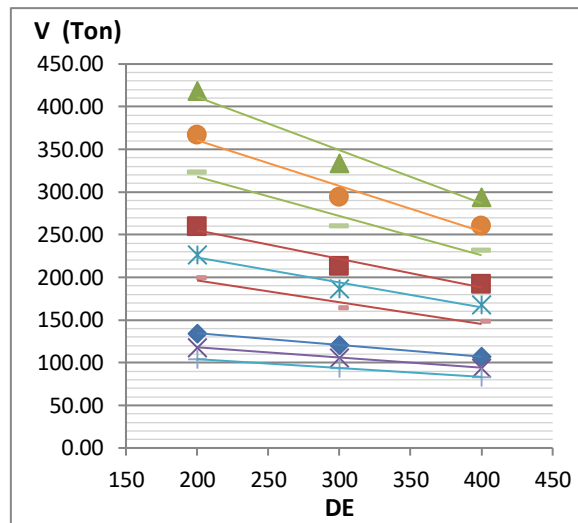


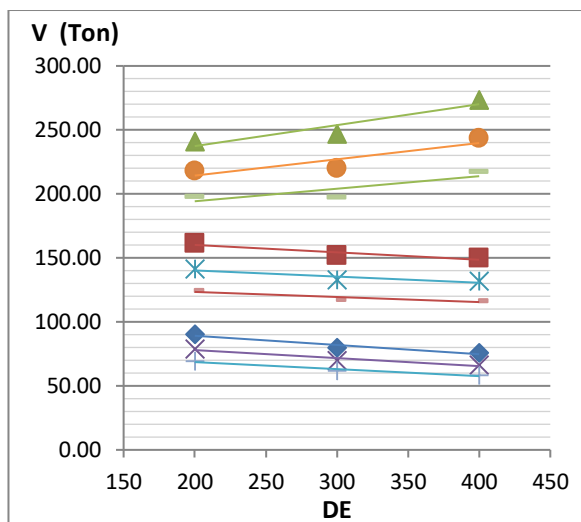
Figura D.39. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



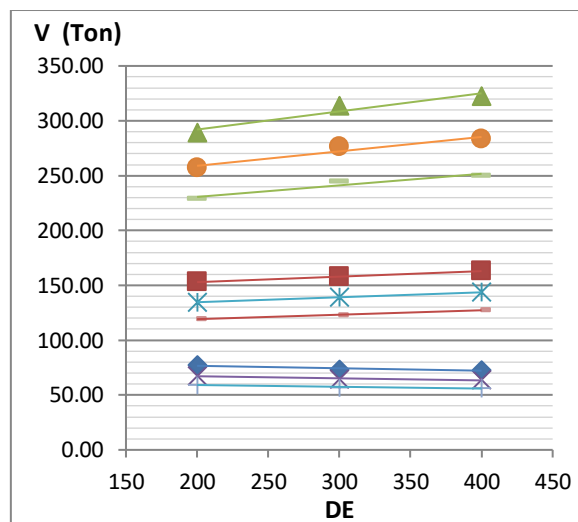
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

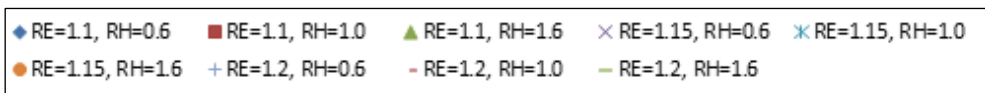
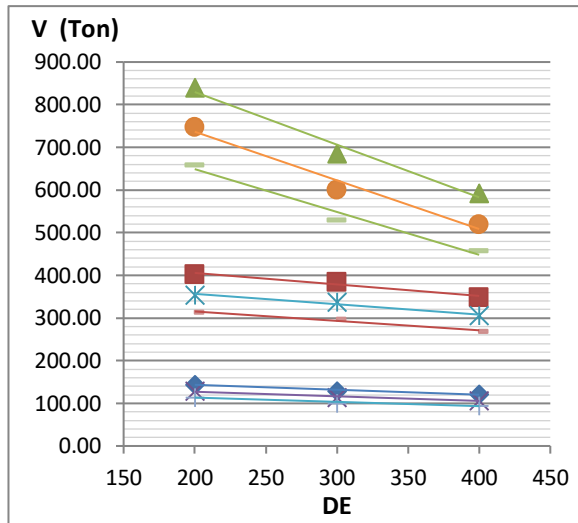
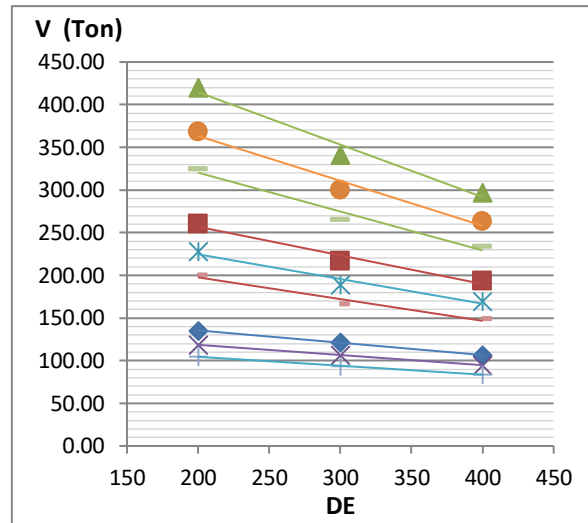


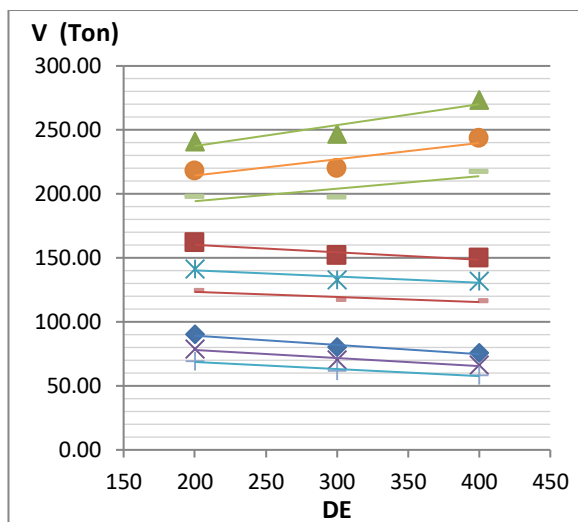
Figura D.40. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



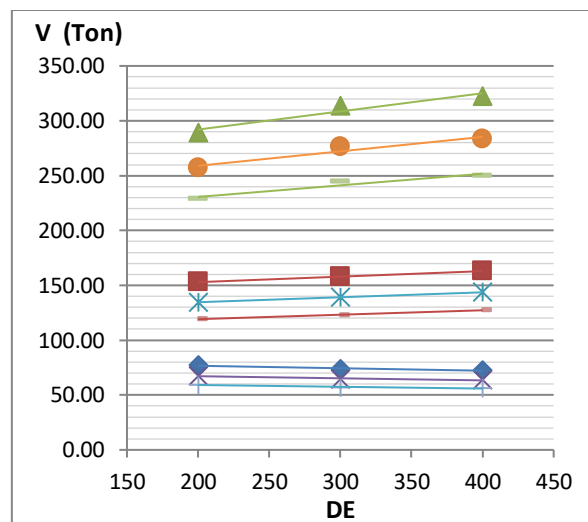
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

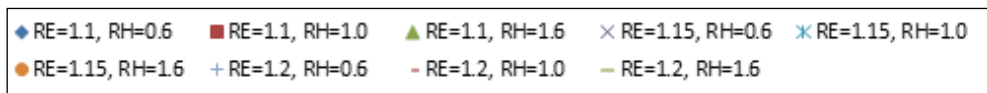
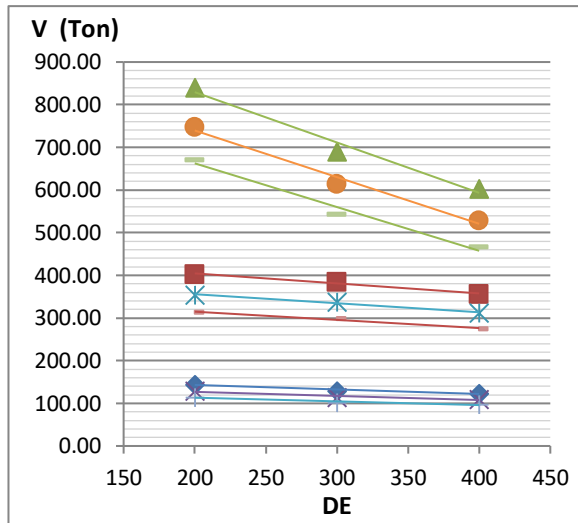
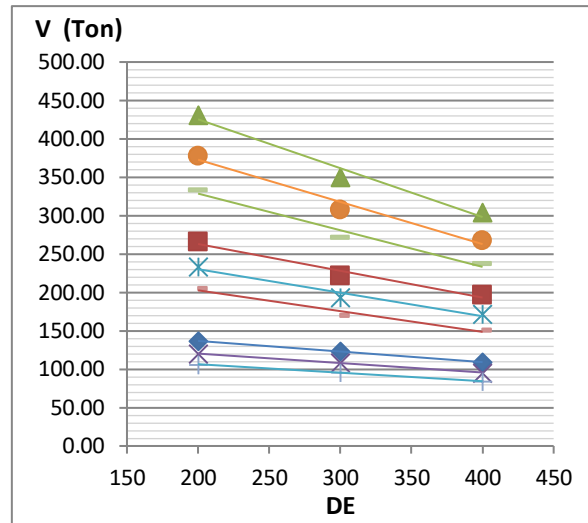


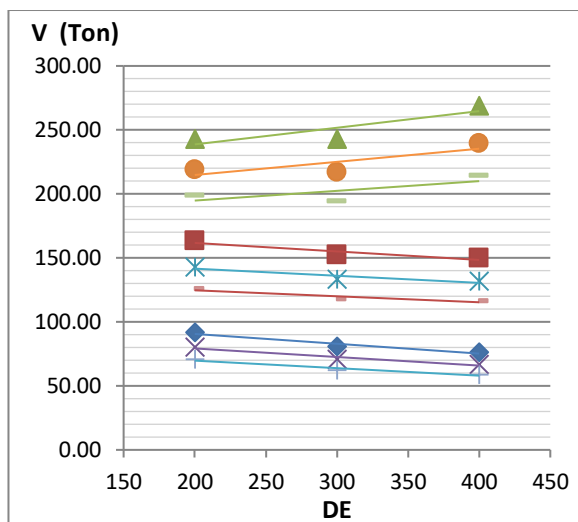
Figura D.41. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



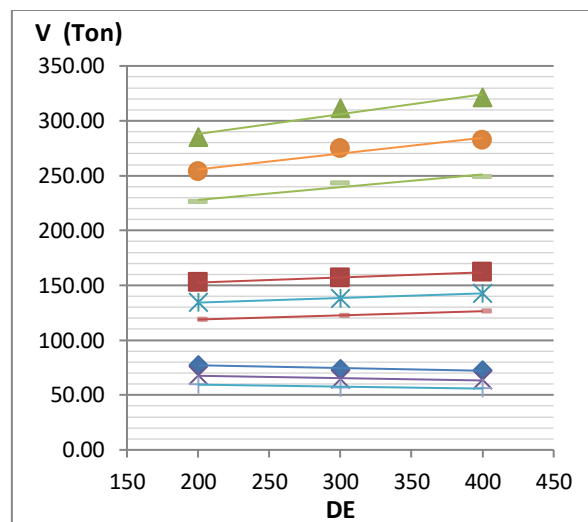
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

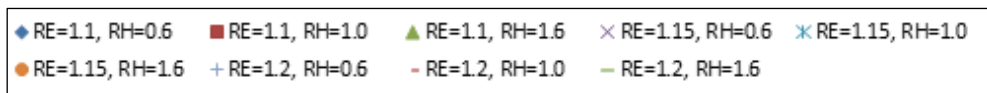


Figura D.42. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

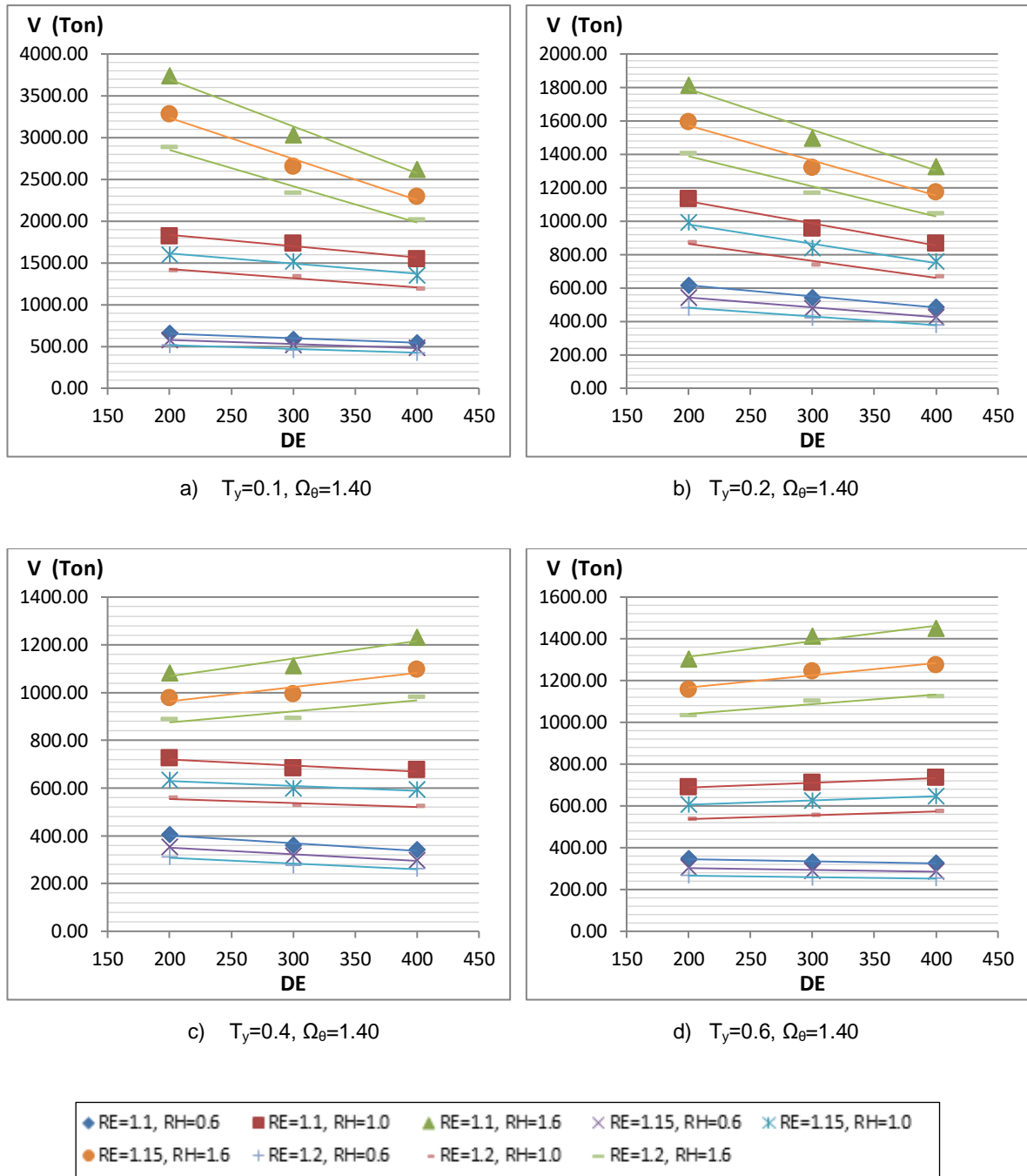
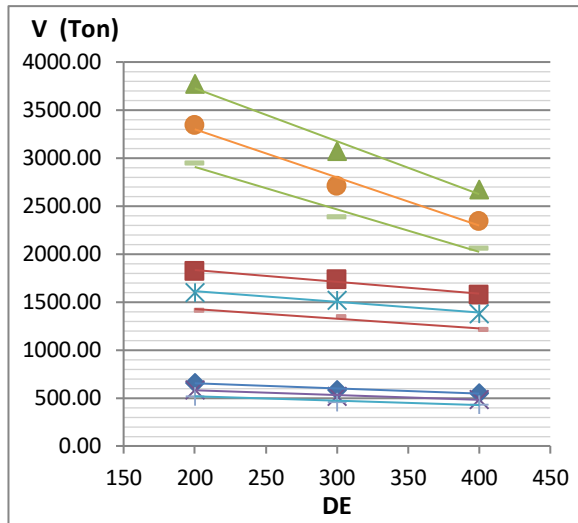
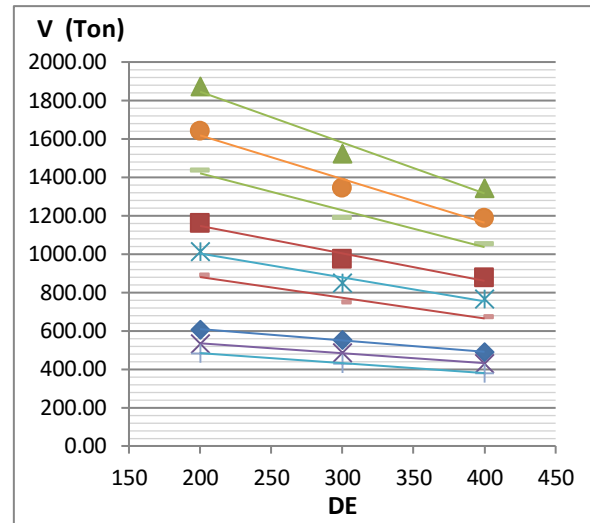


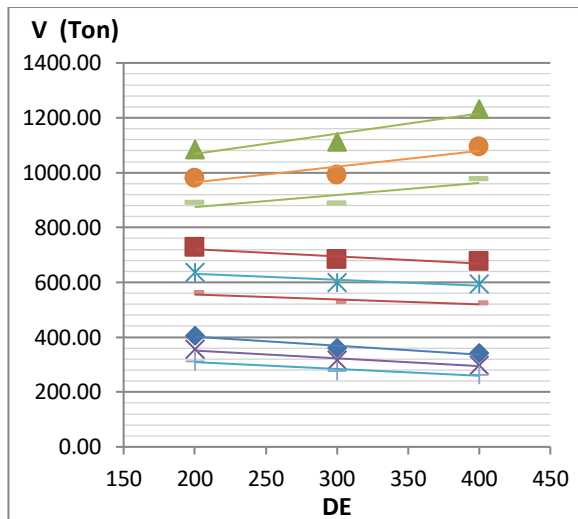
Figura D.43. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



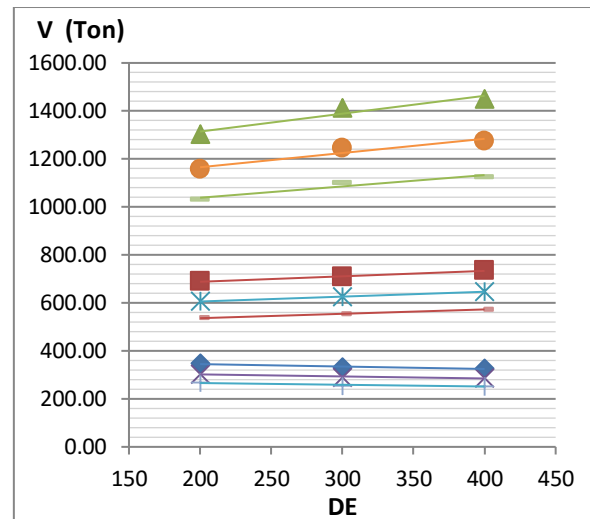
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

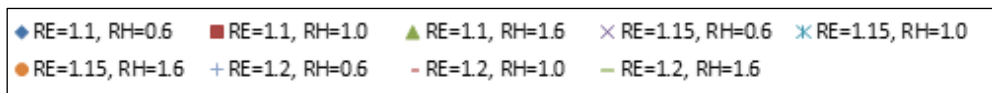
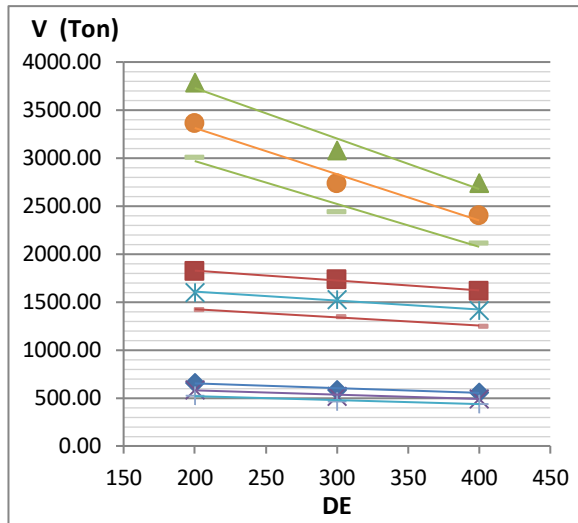
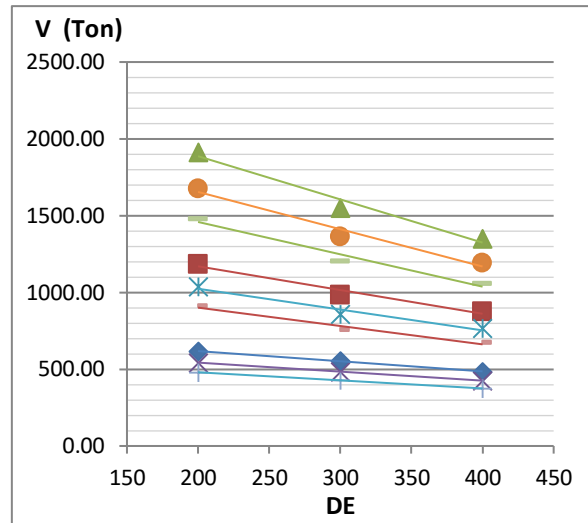


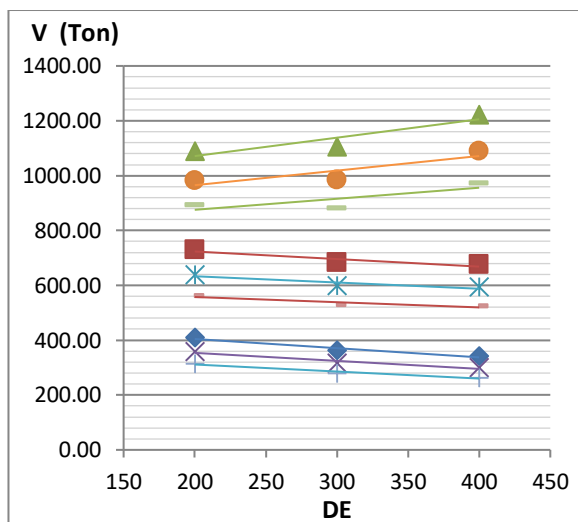
Figura D.44. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



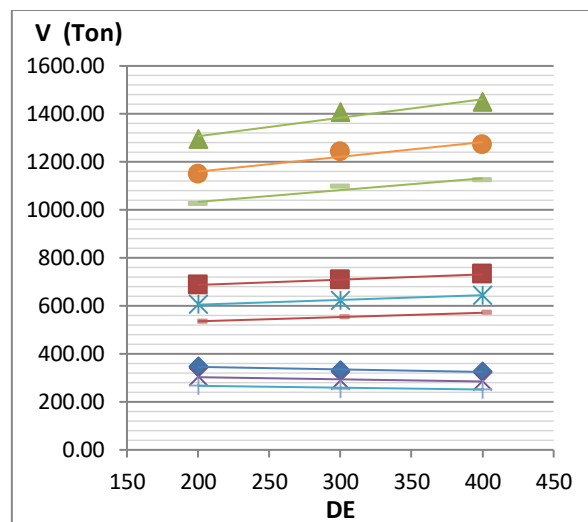
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.55$

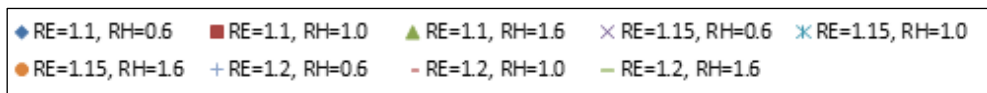
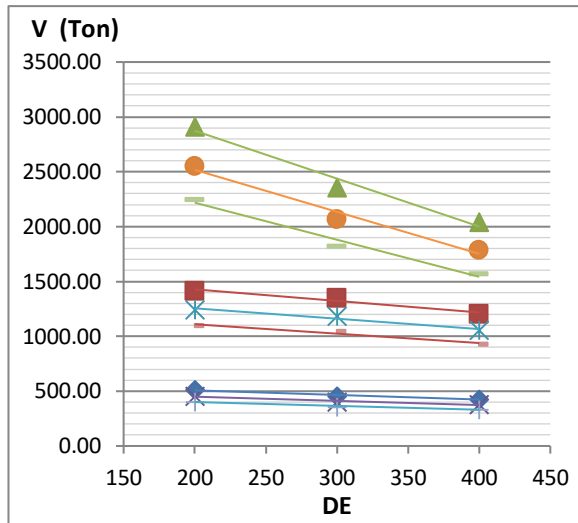
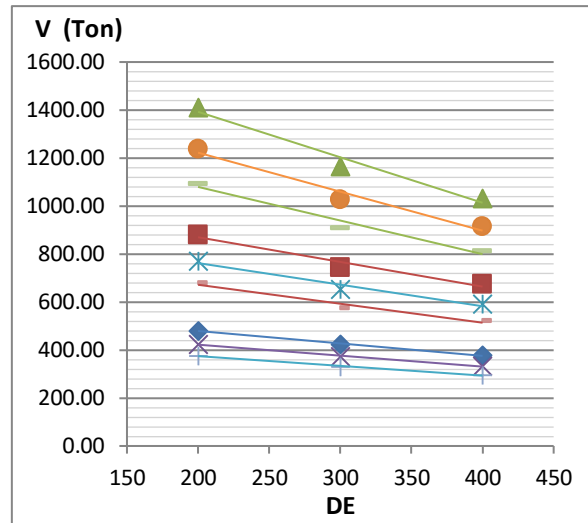


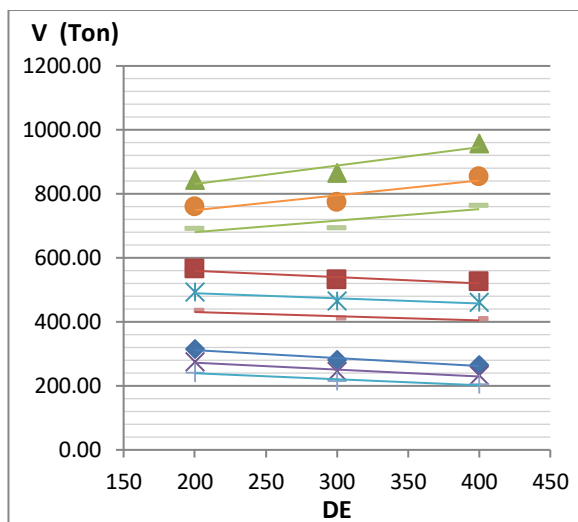
Figura D.45. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



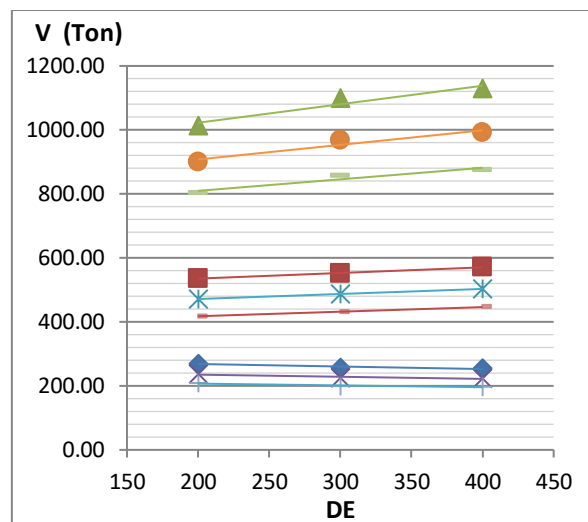
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

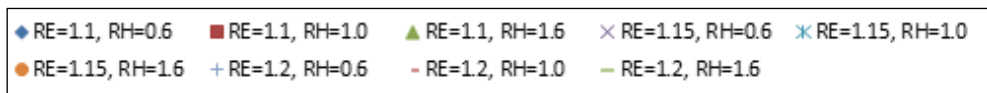
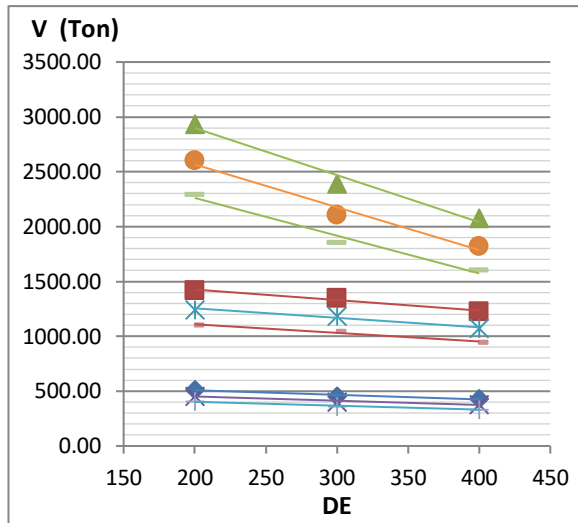
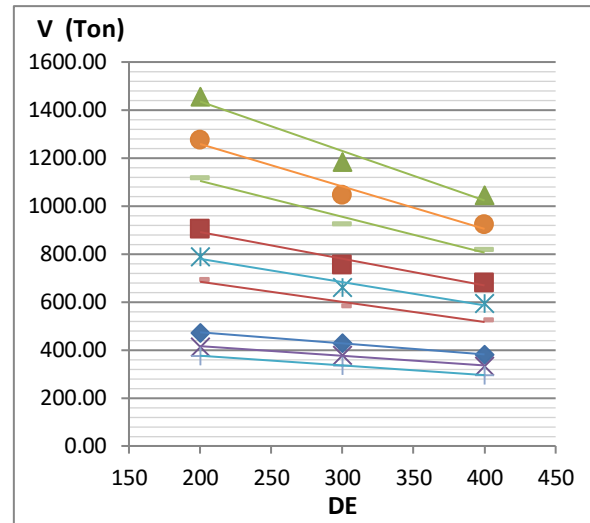


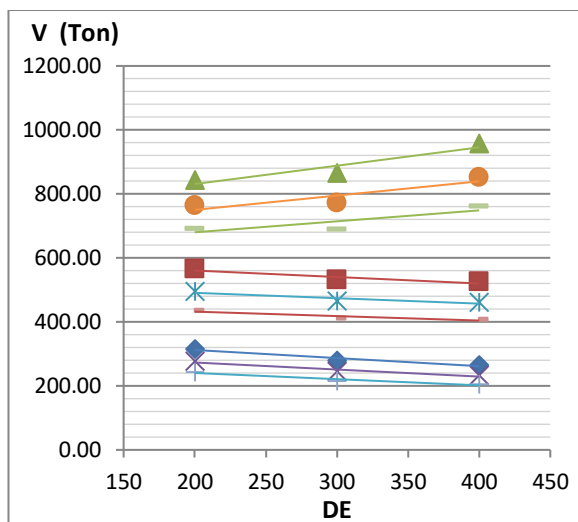
Figura D.46. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



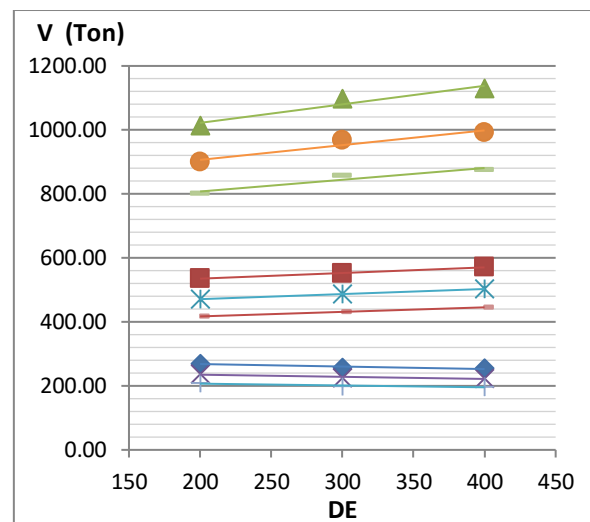
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

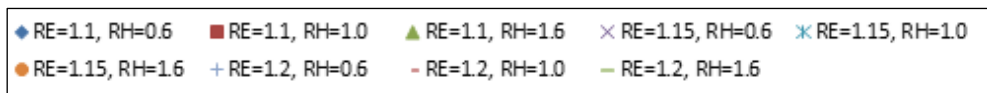
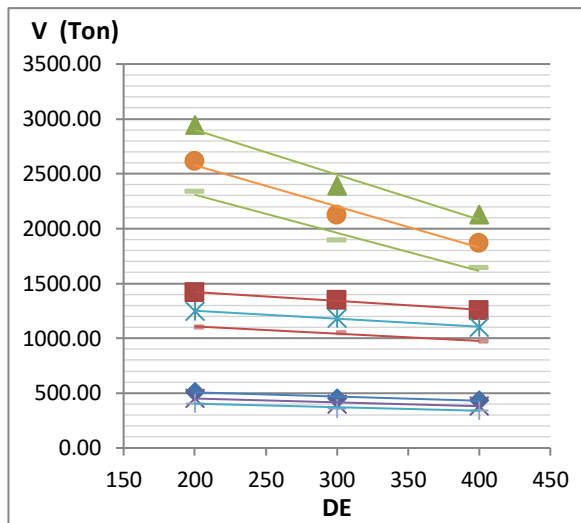
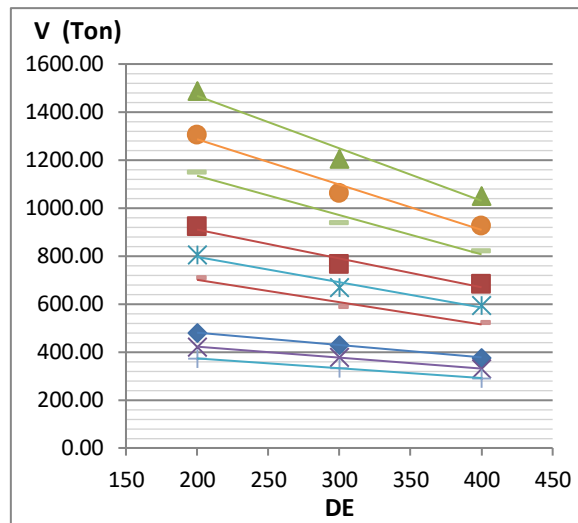


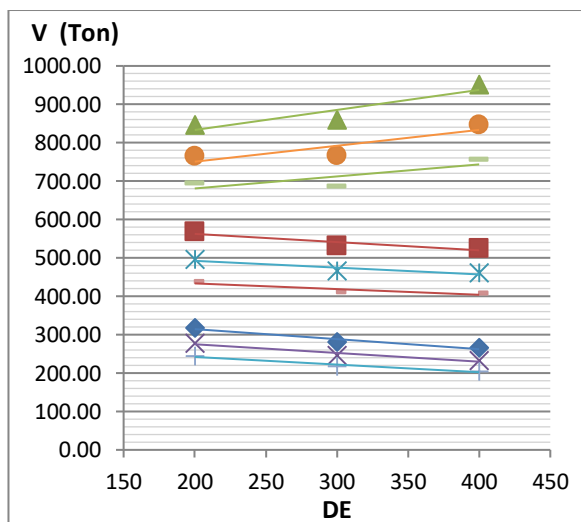
Figura D.47. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



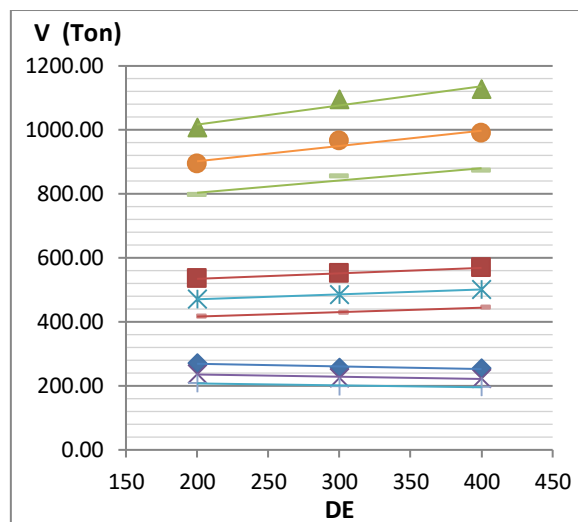
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

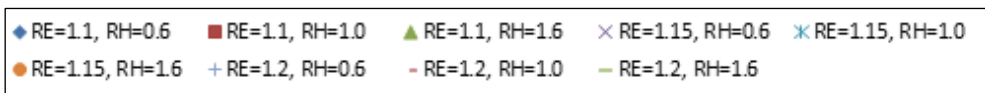
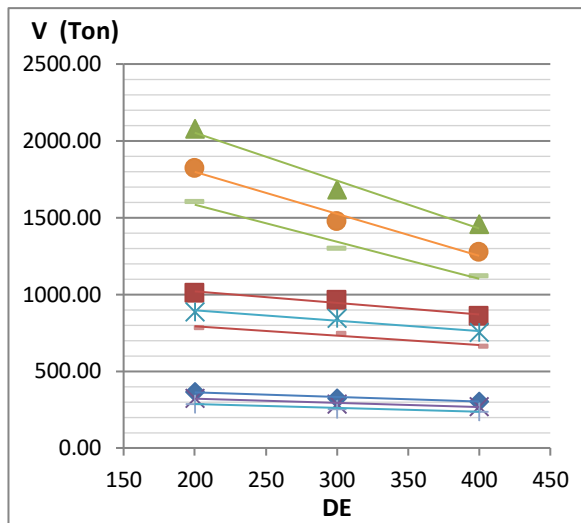
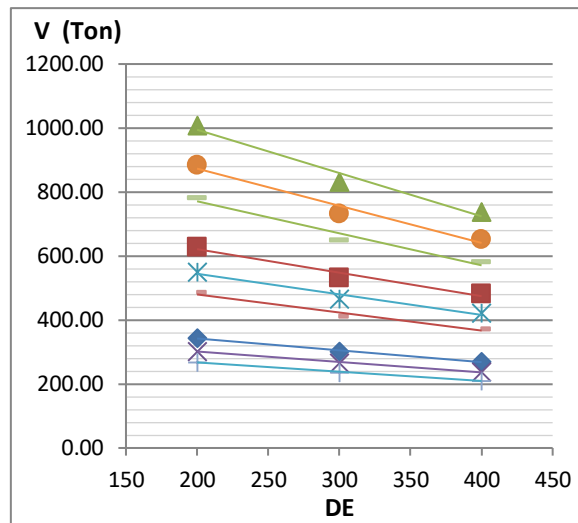


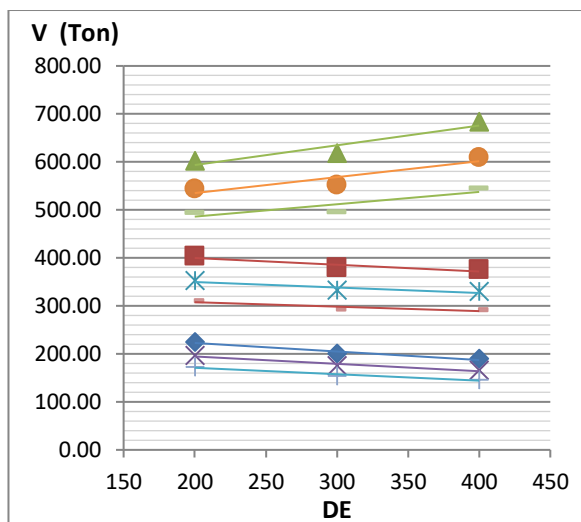
Figura D.48. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



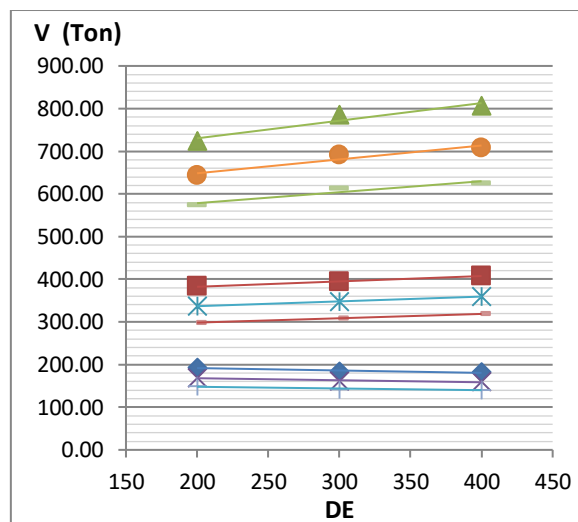
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

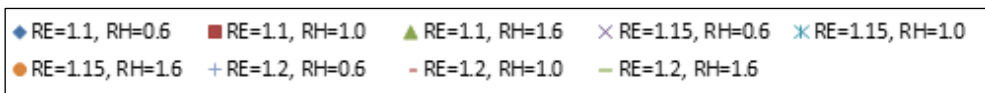
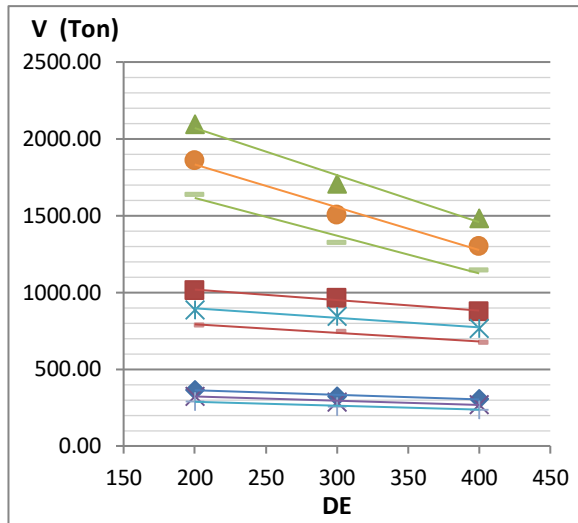
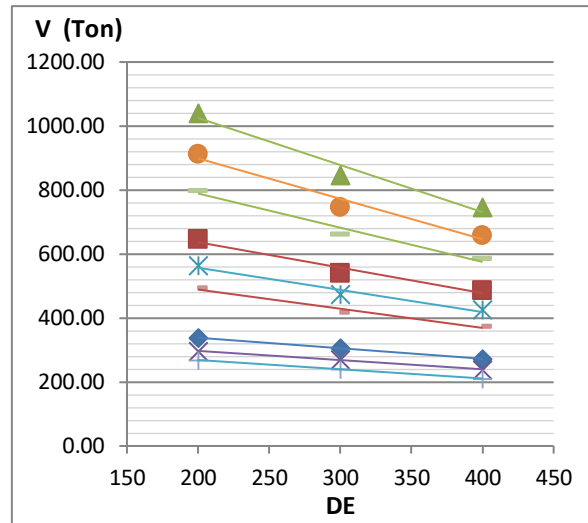


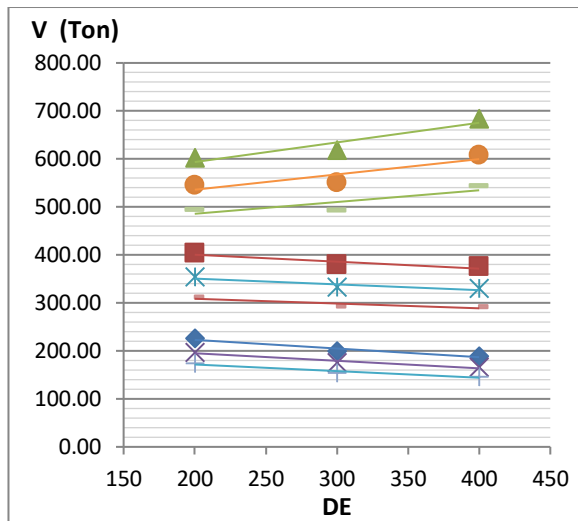
Figura D.49. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



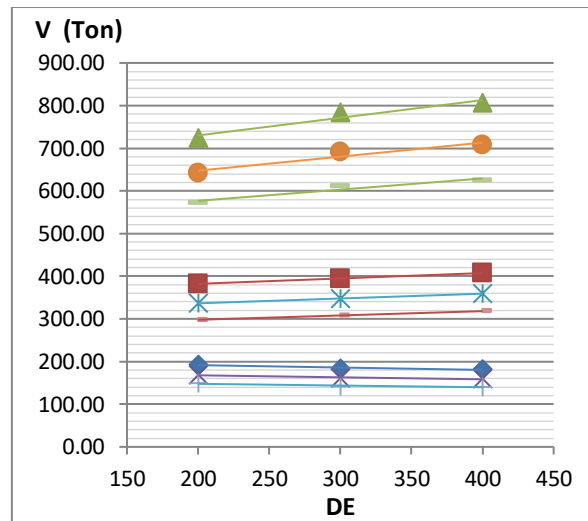
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

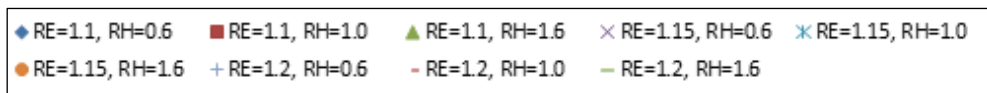
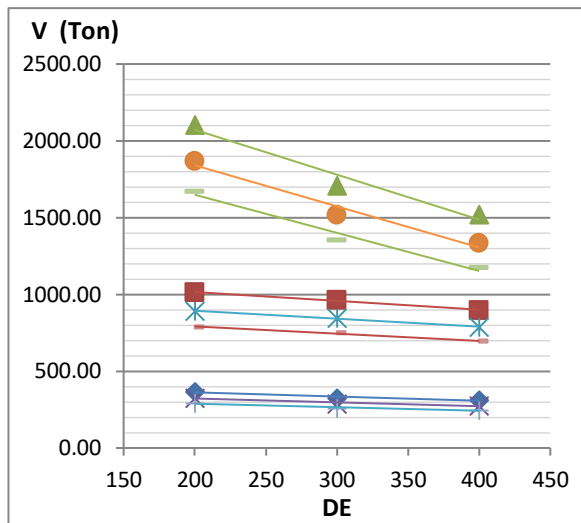
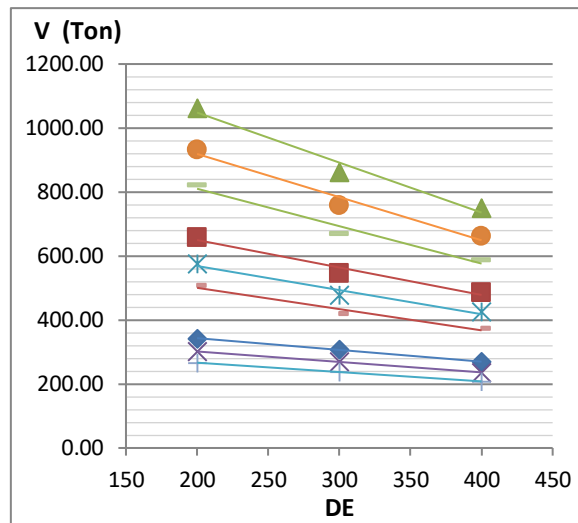


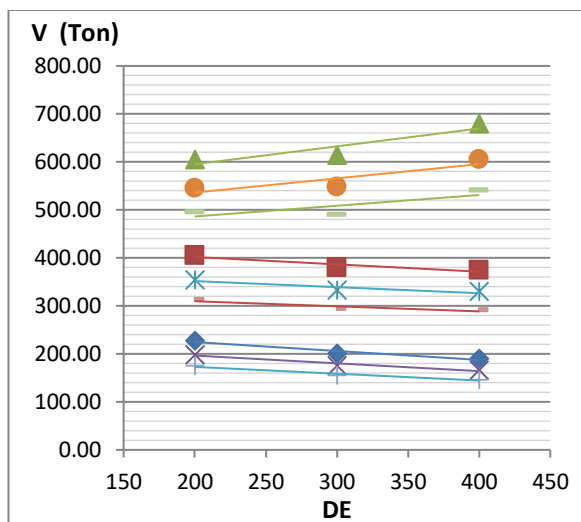
Figura D.50. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



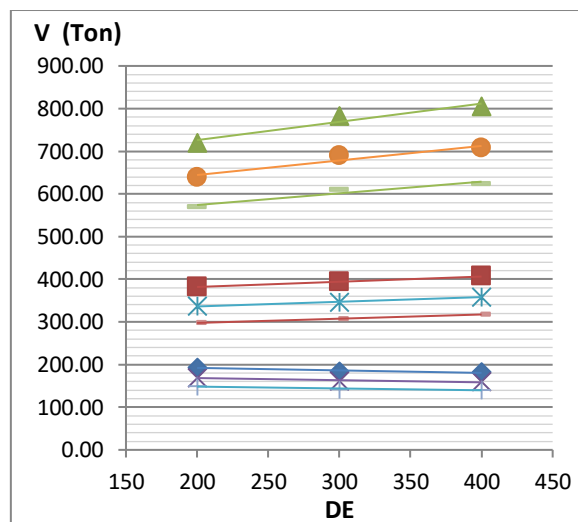
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

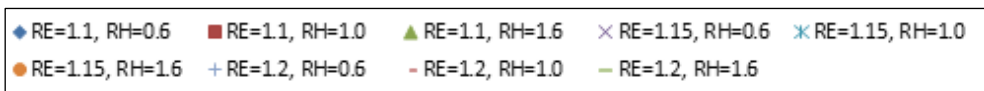
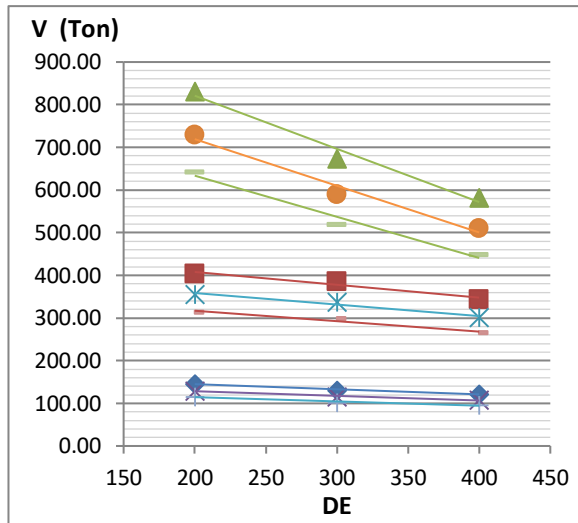
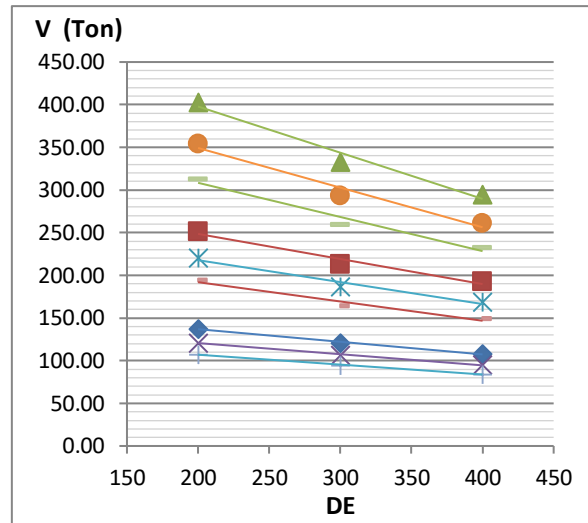


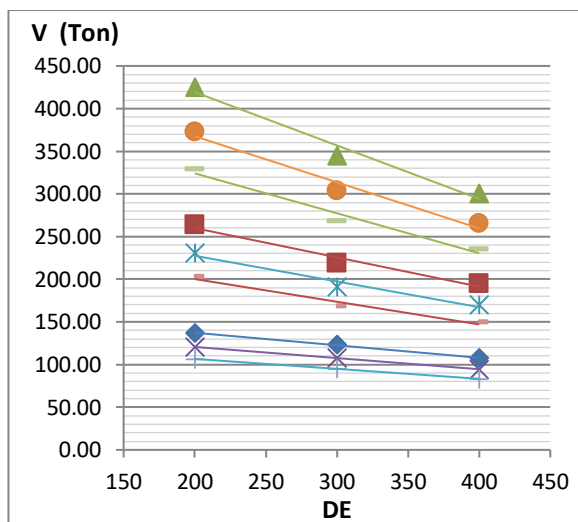
Figura D.51. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



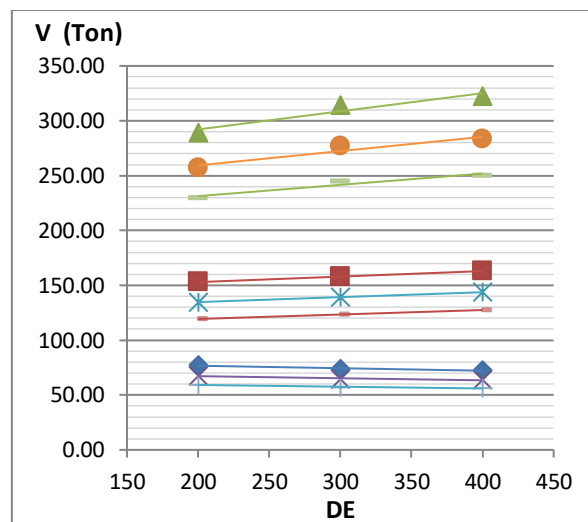
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

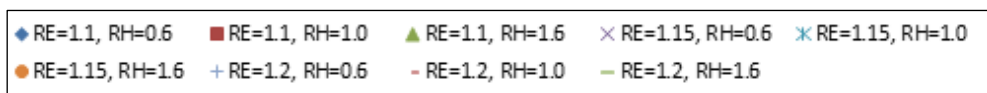


Figura D.52. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

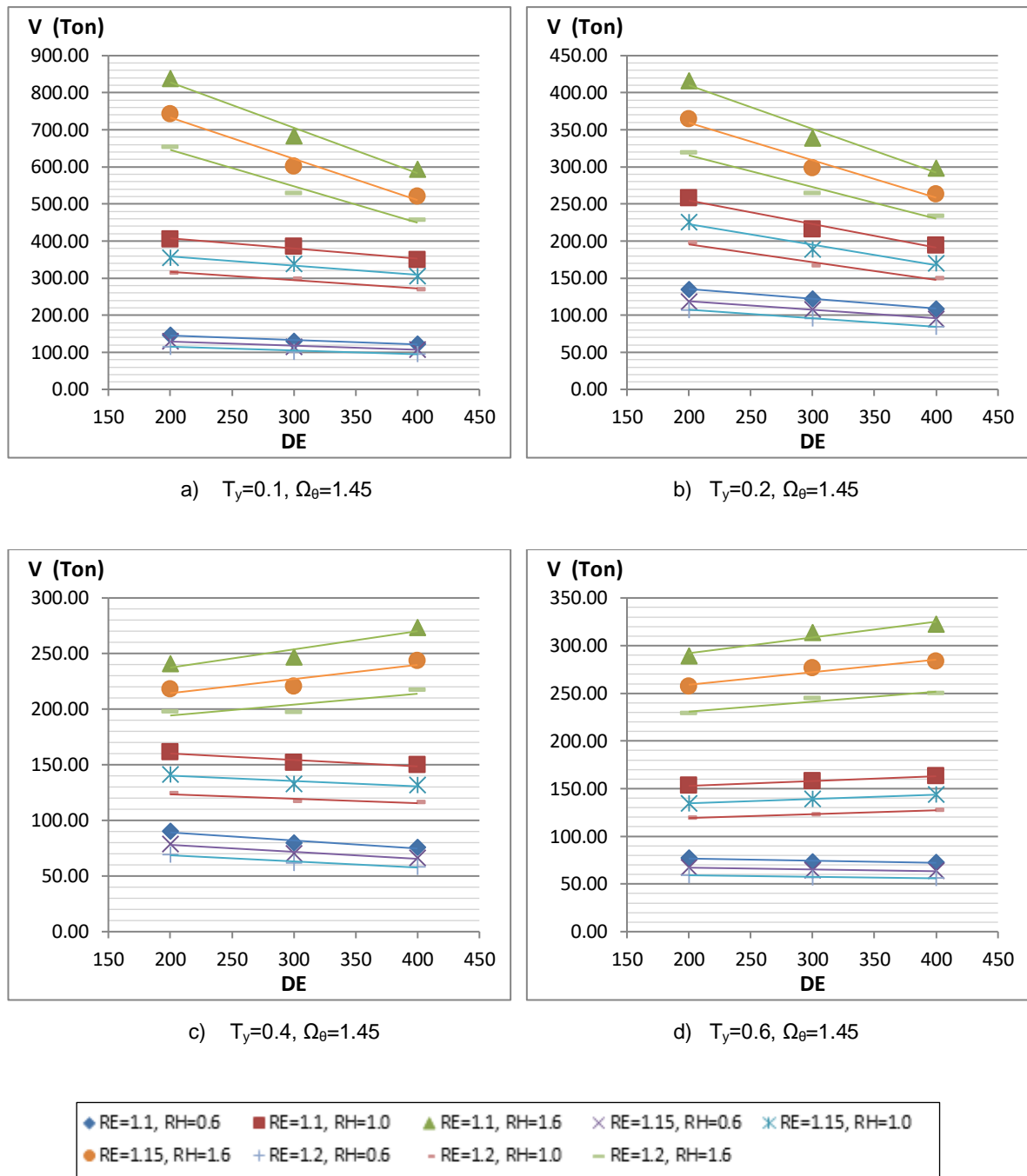
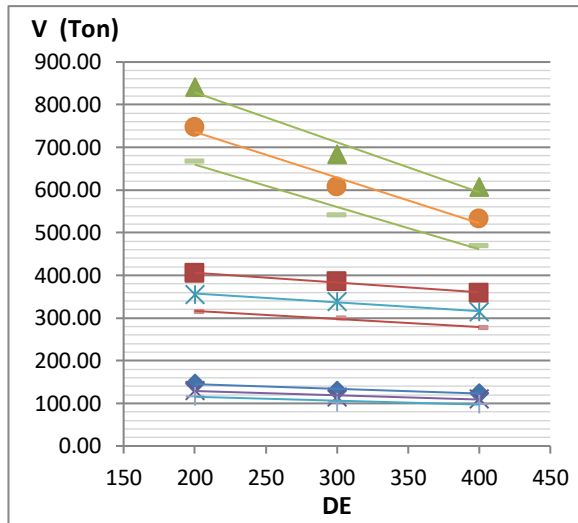
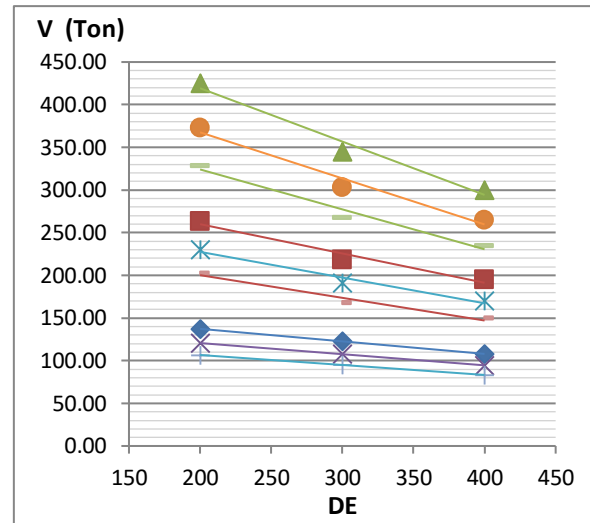


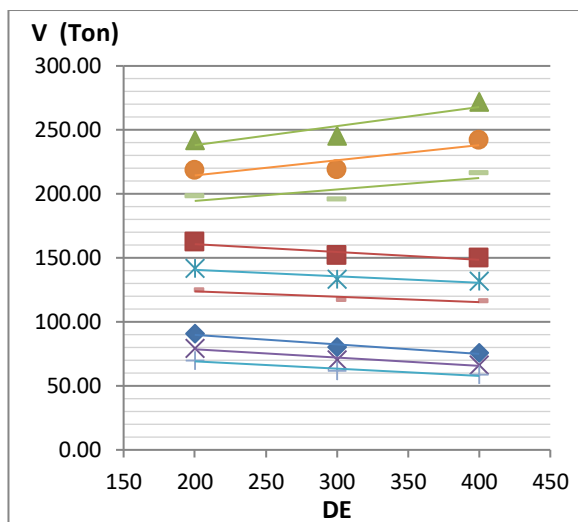
Figura D.53. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



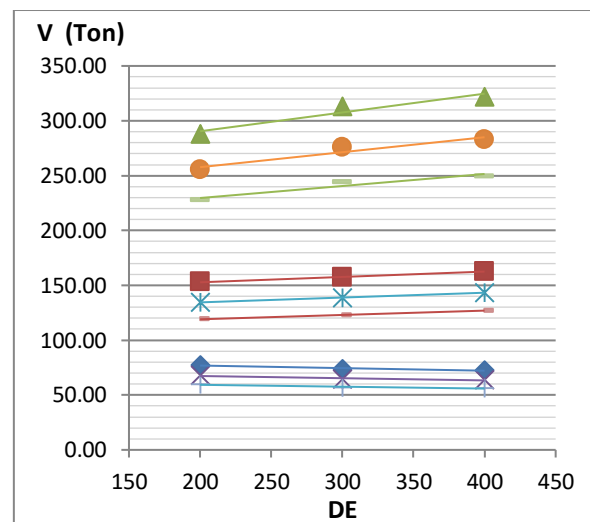
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

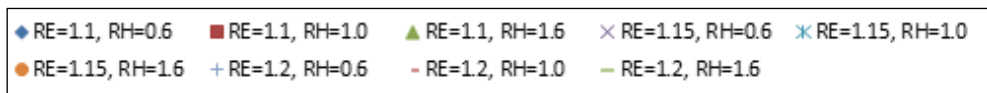


Figura D.54. Relación del Cortante basal frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

Momento volcante:

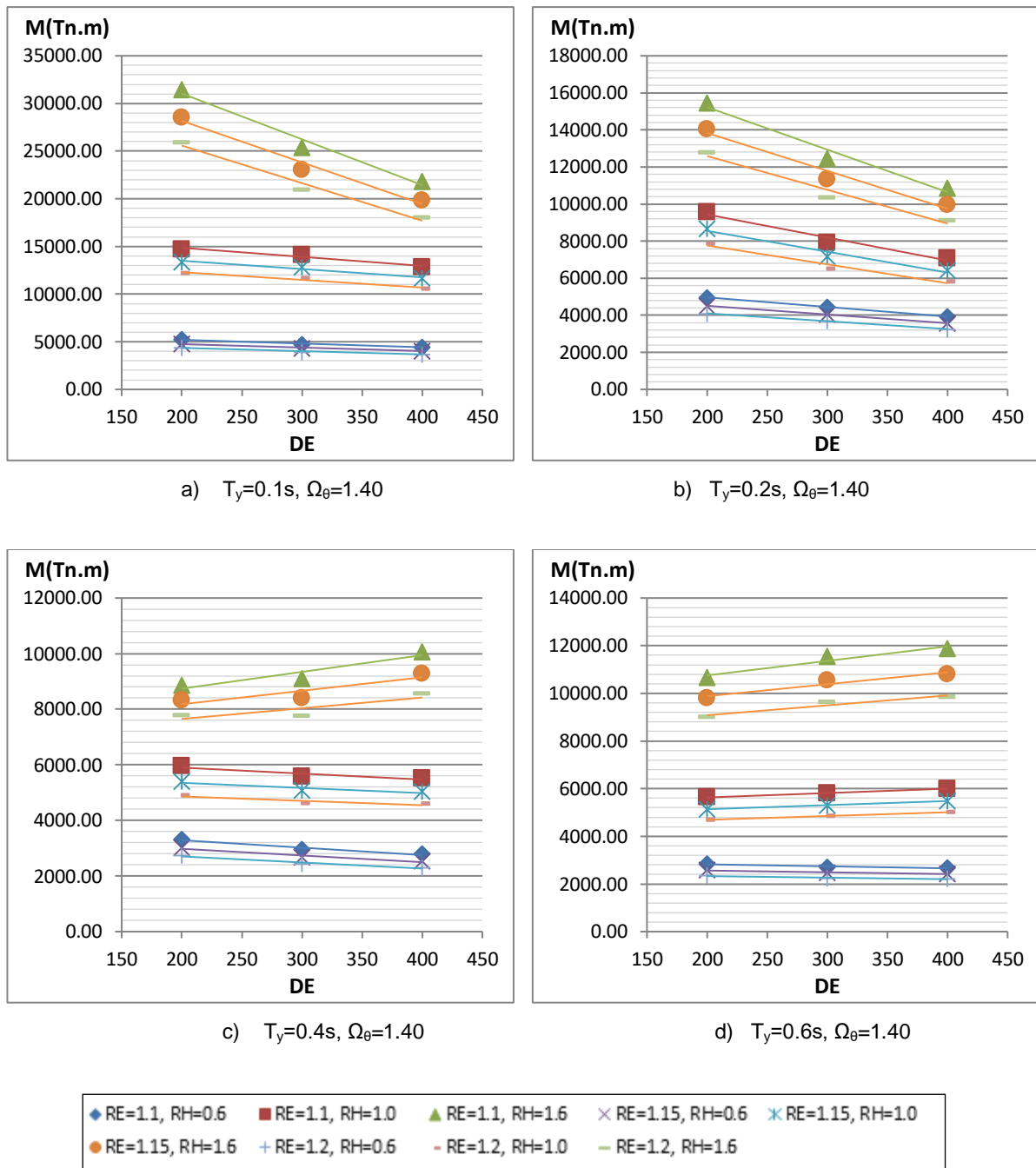


Figura D.55. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

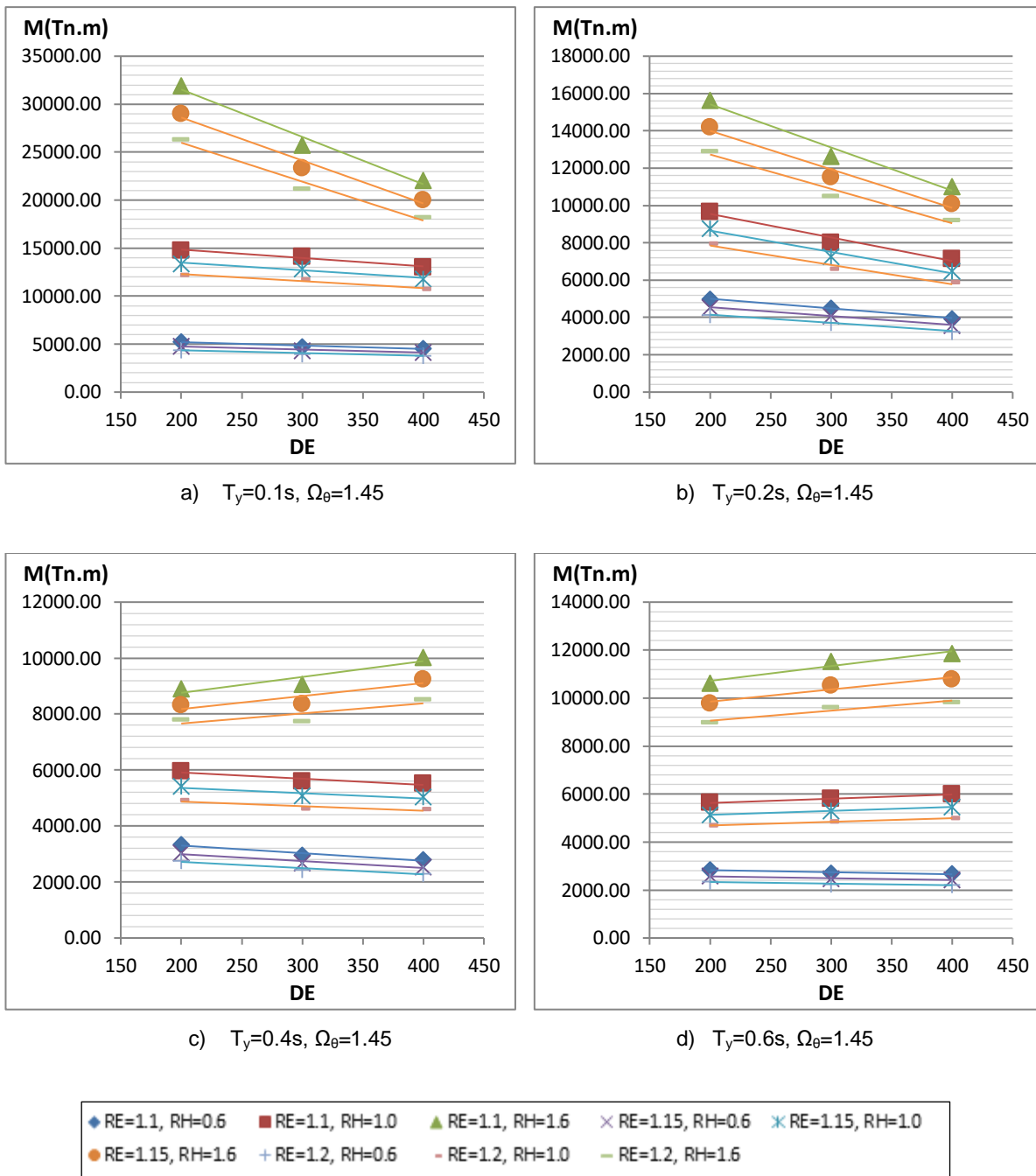
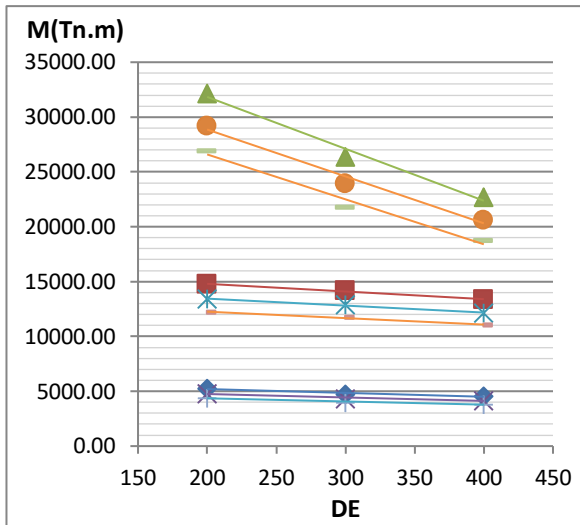
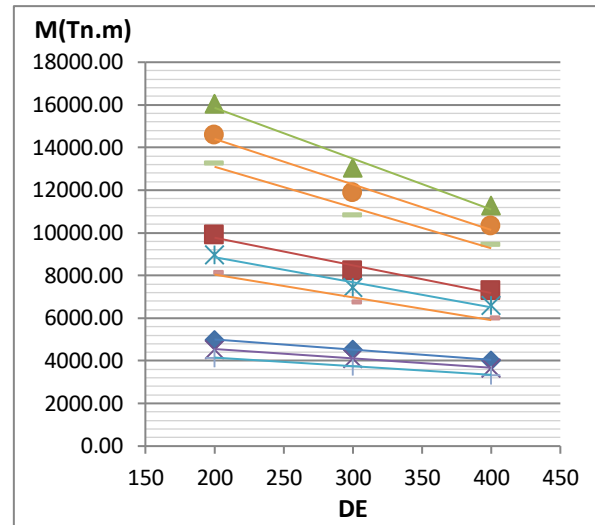


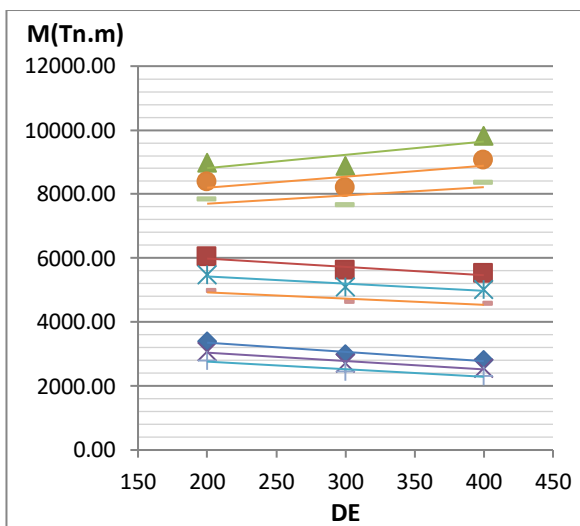
Figura D.56. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



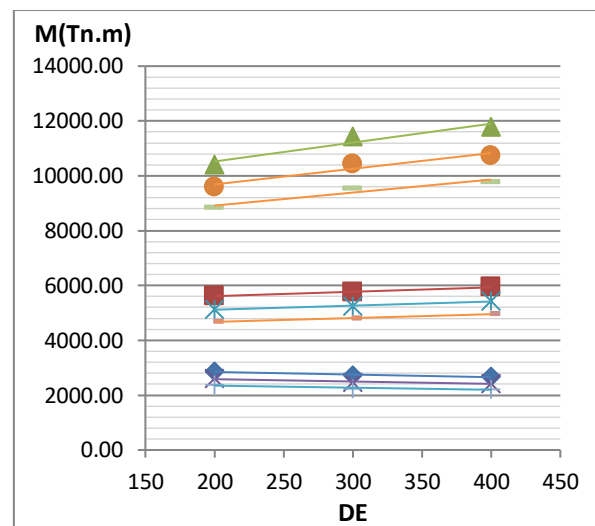
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

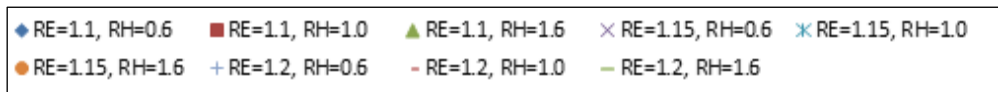
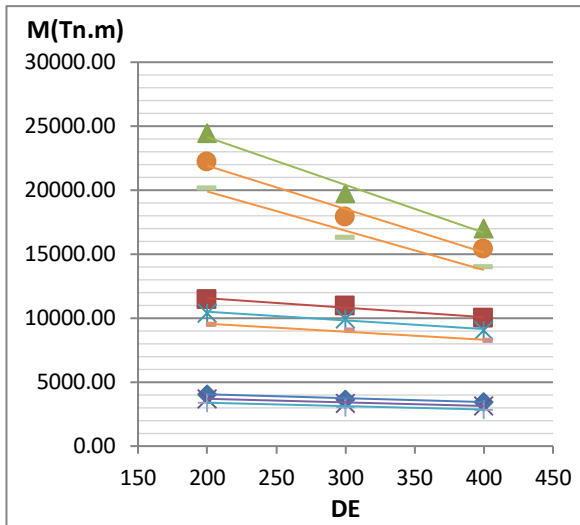
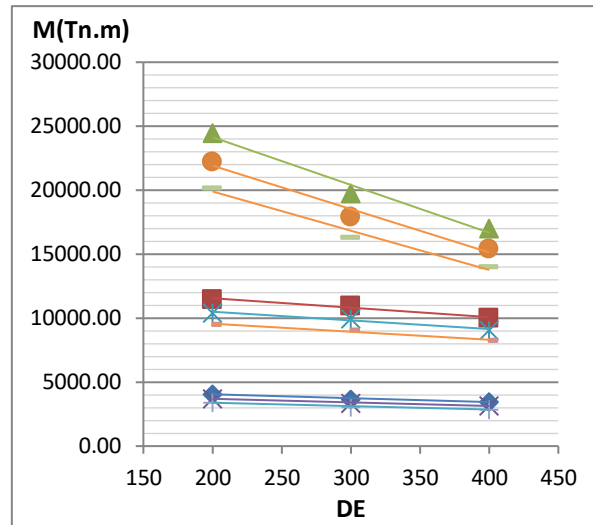


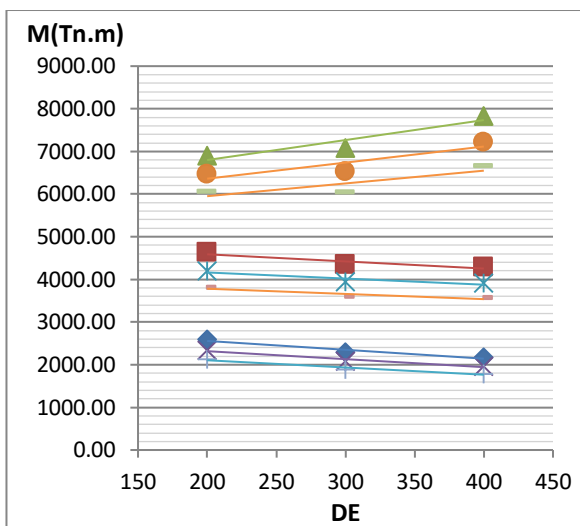
Figura D.57. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



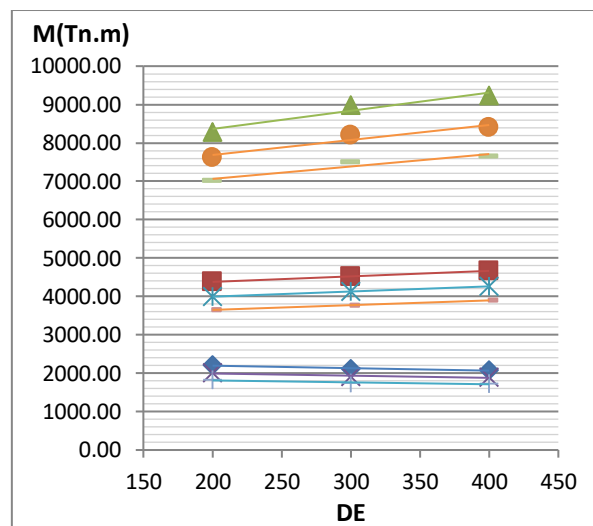
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

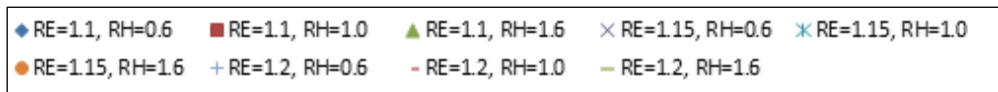


Figura D.58. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

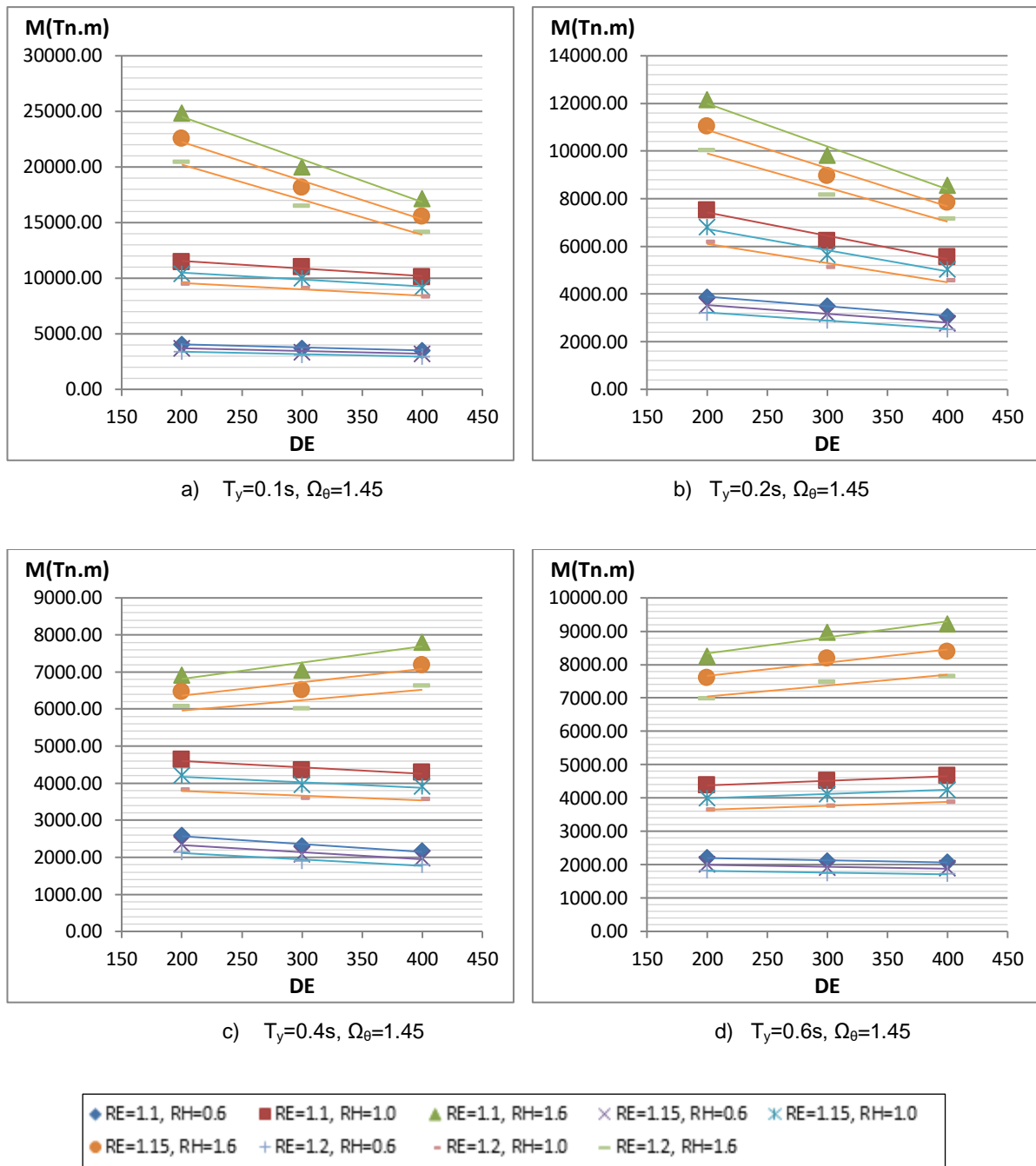
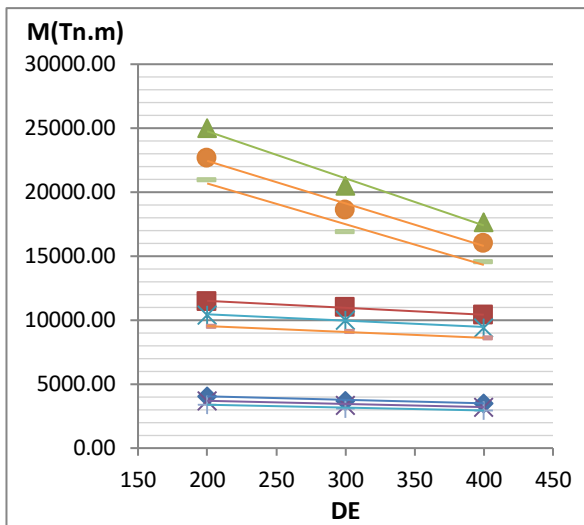
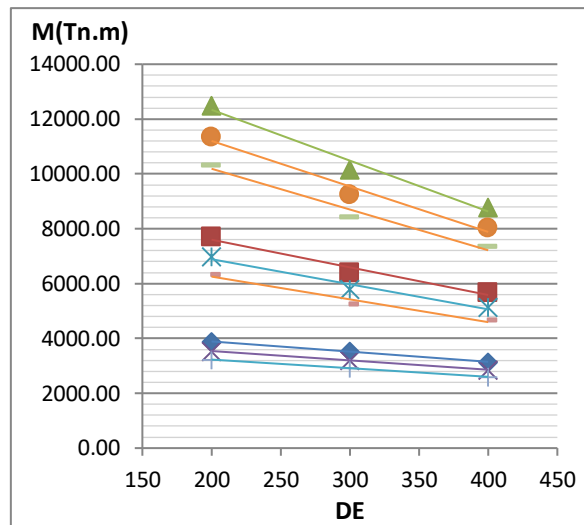


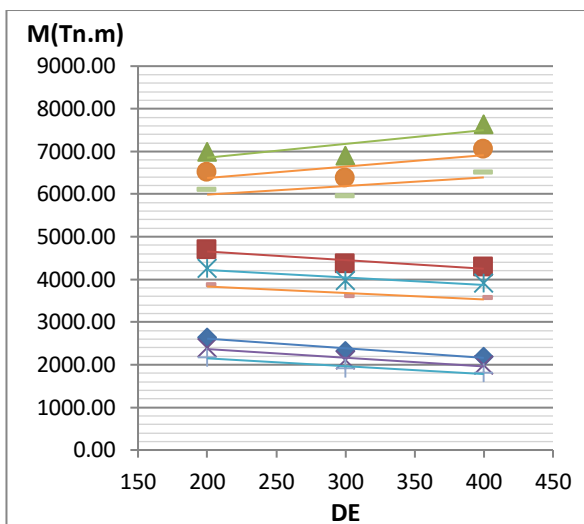
Figura D.59. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



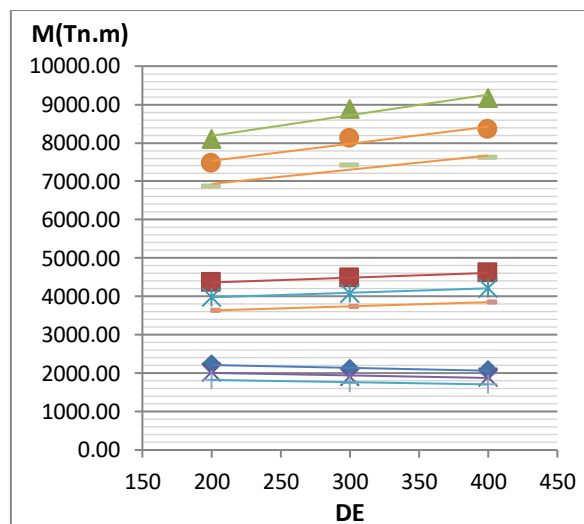
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

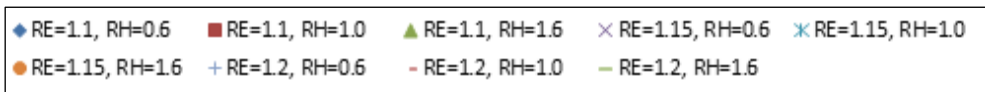
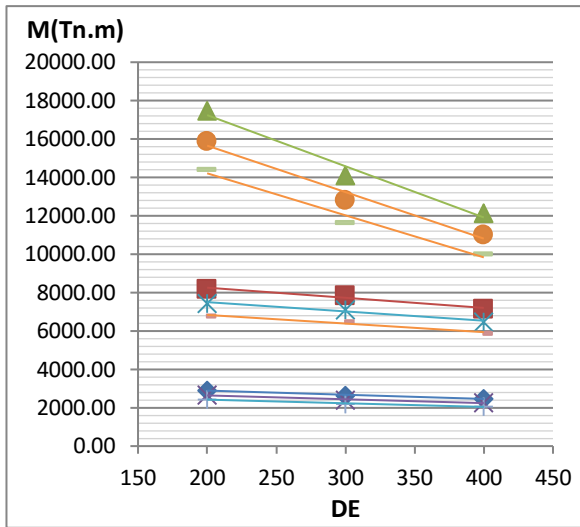
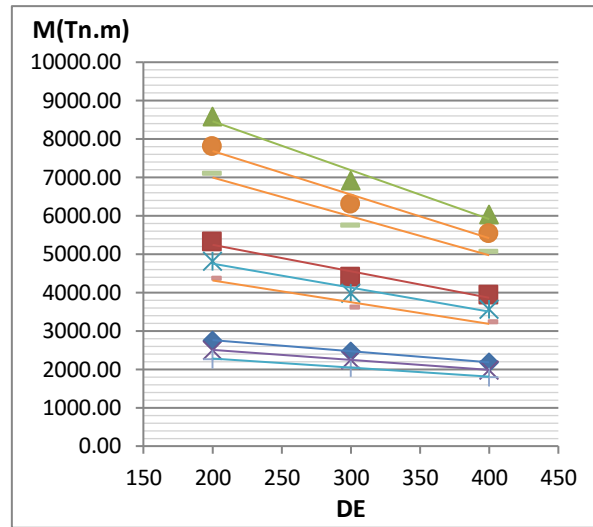


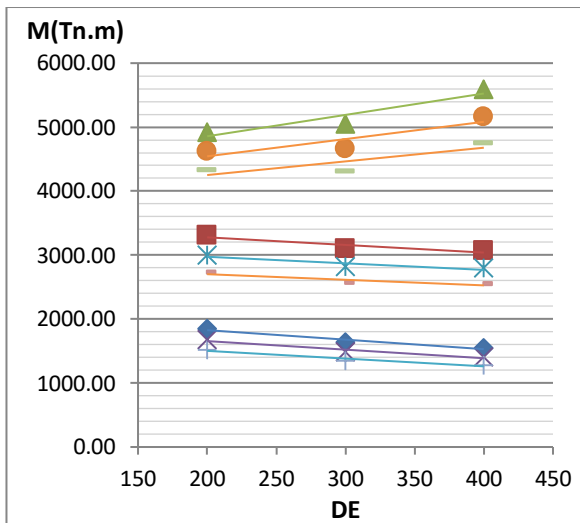
Figura D.60. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



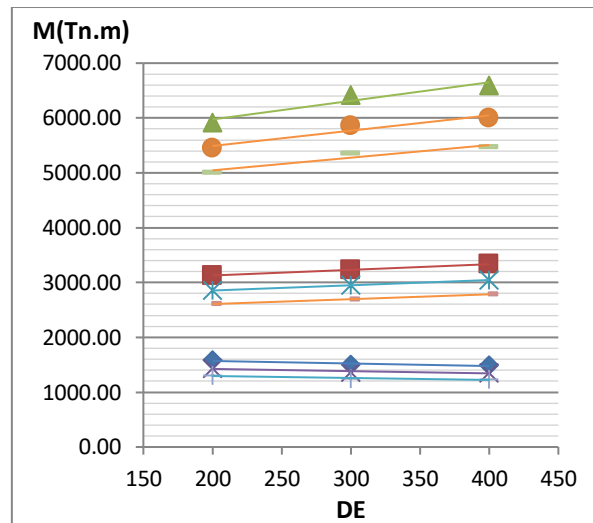
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

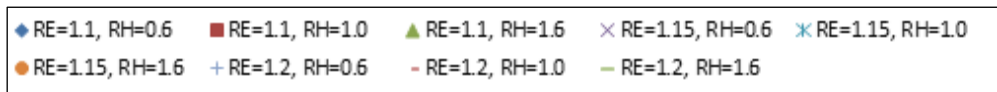


Figura D.61. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

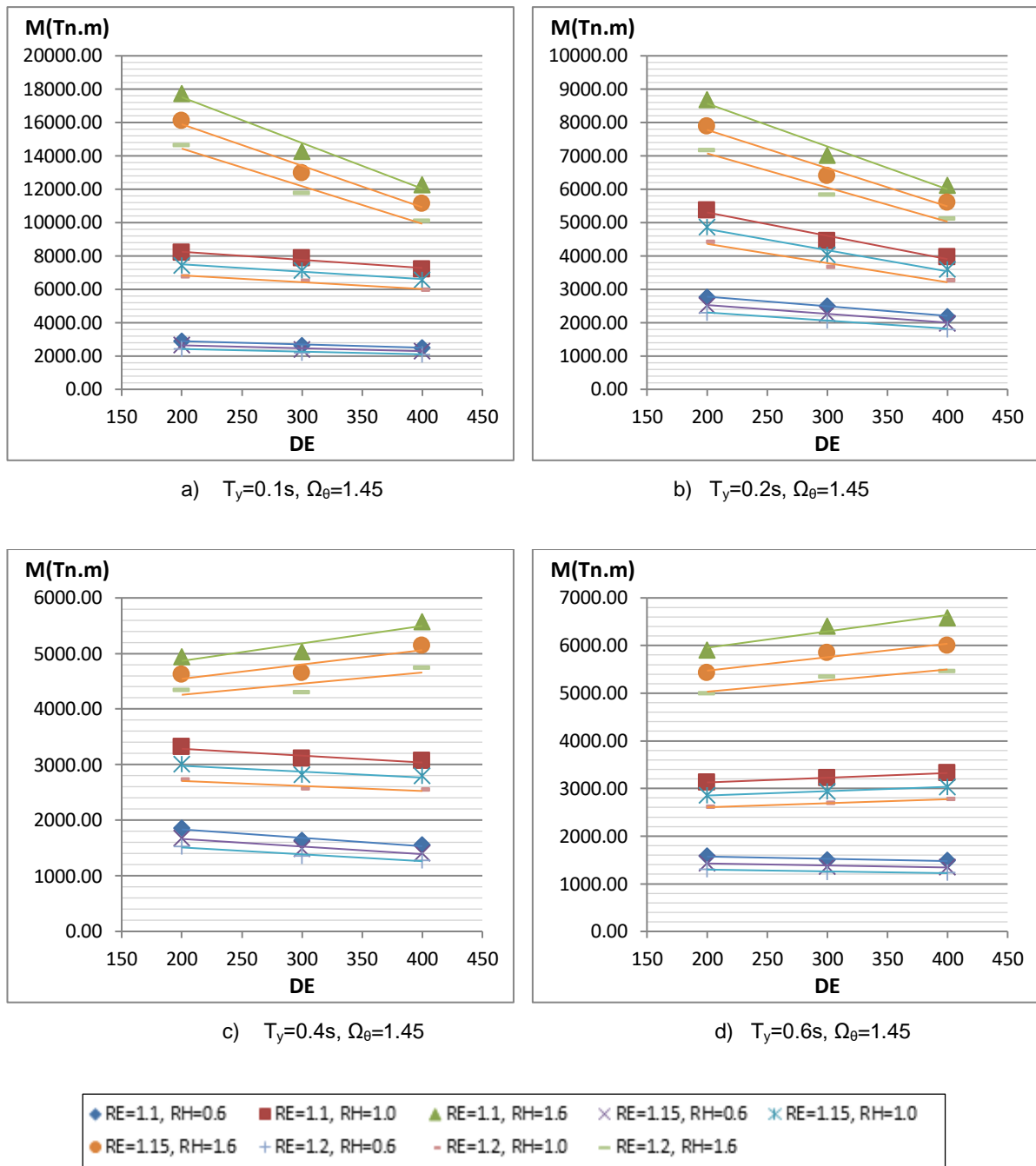
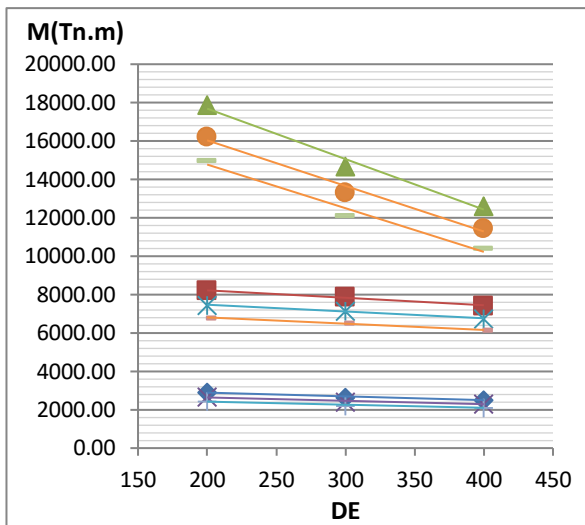
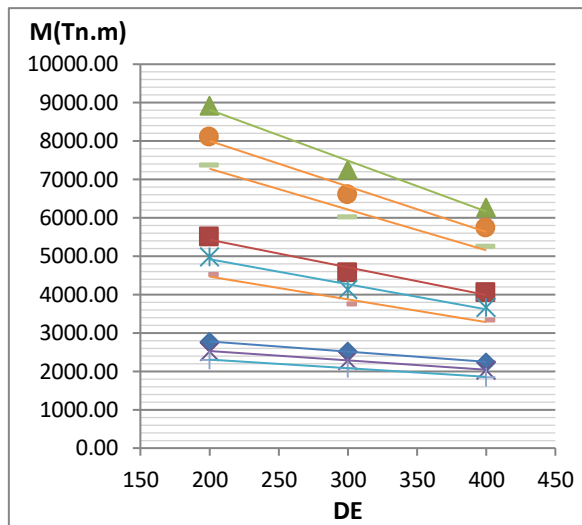


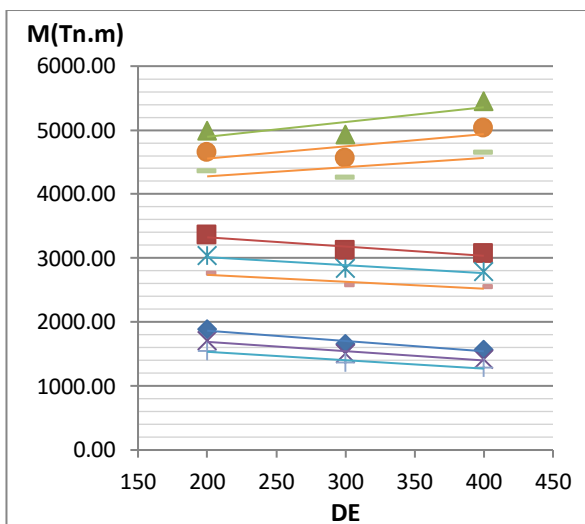
Figura D.62. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



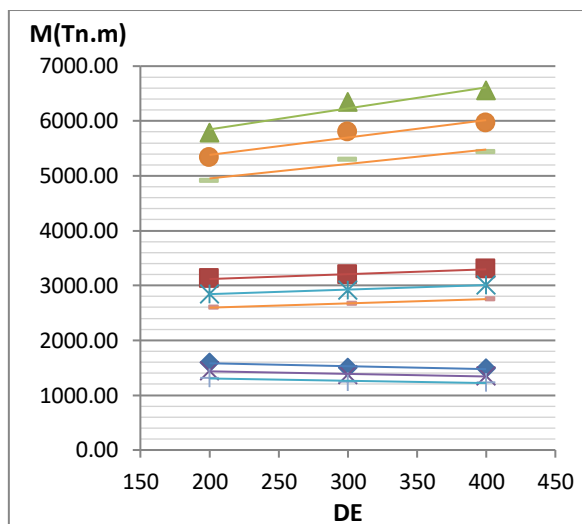
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

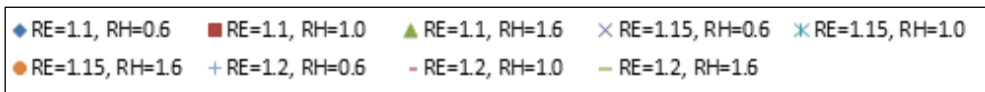


Figura D.63. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

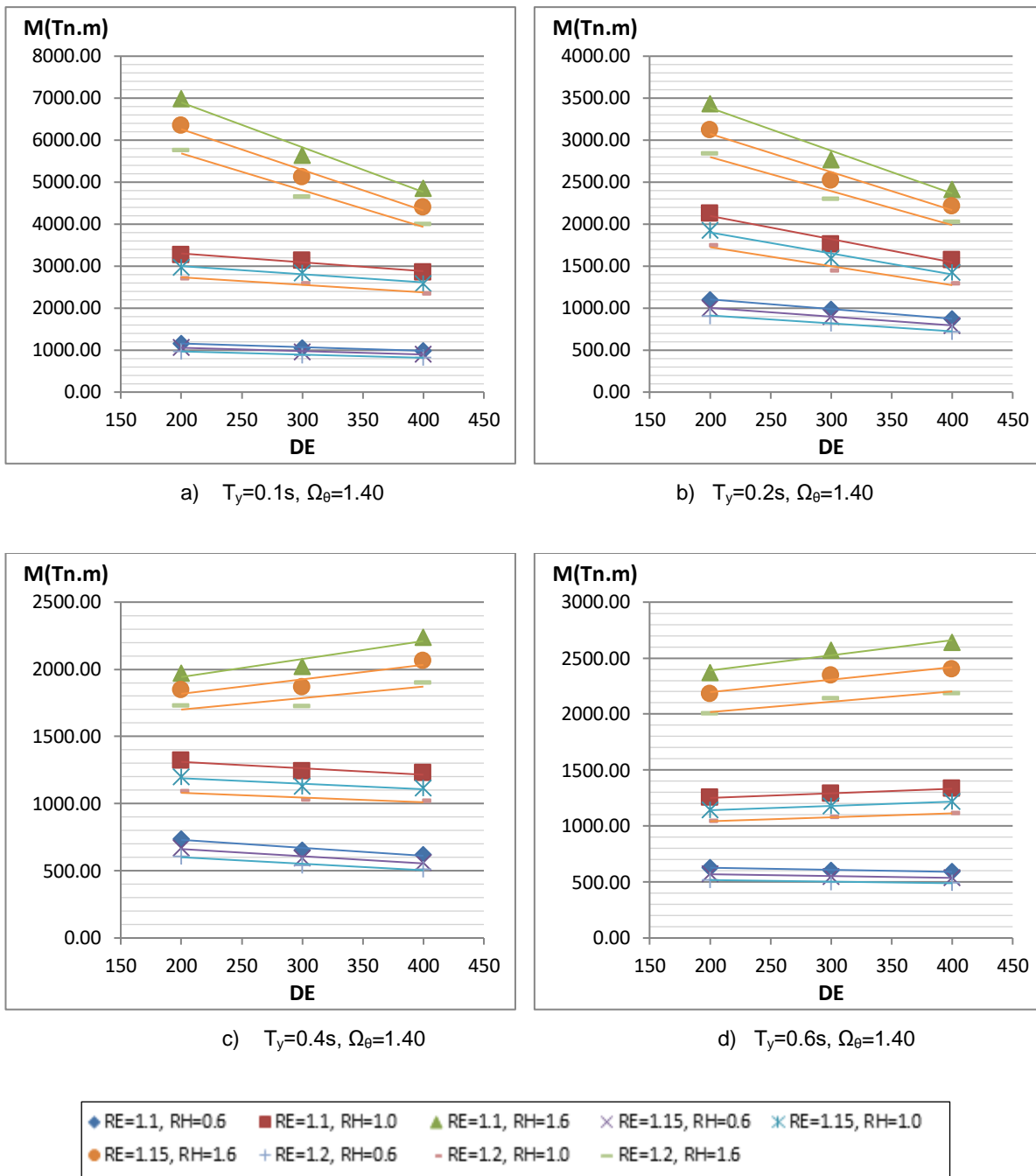


Figura D.64. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

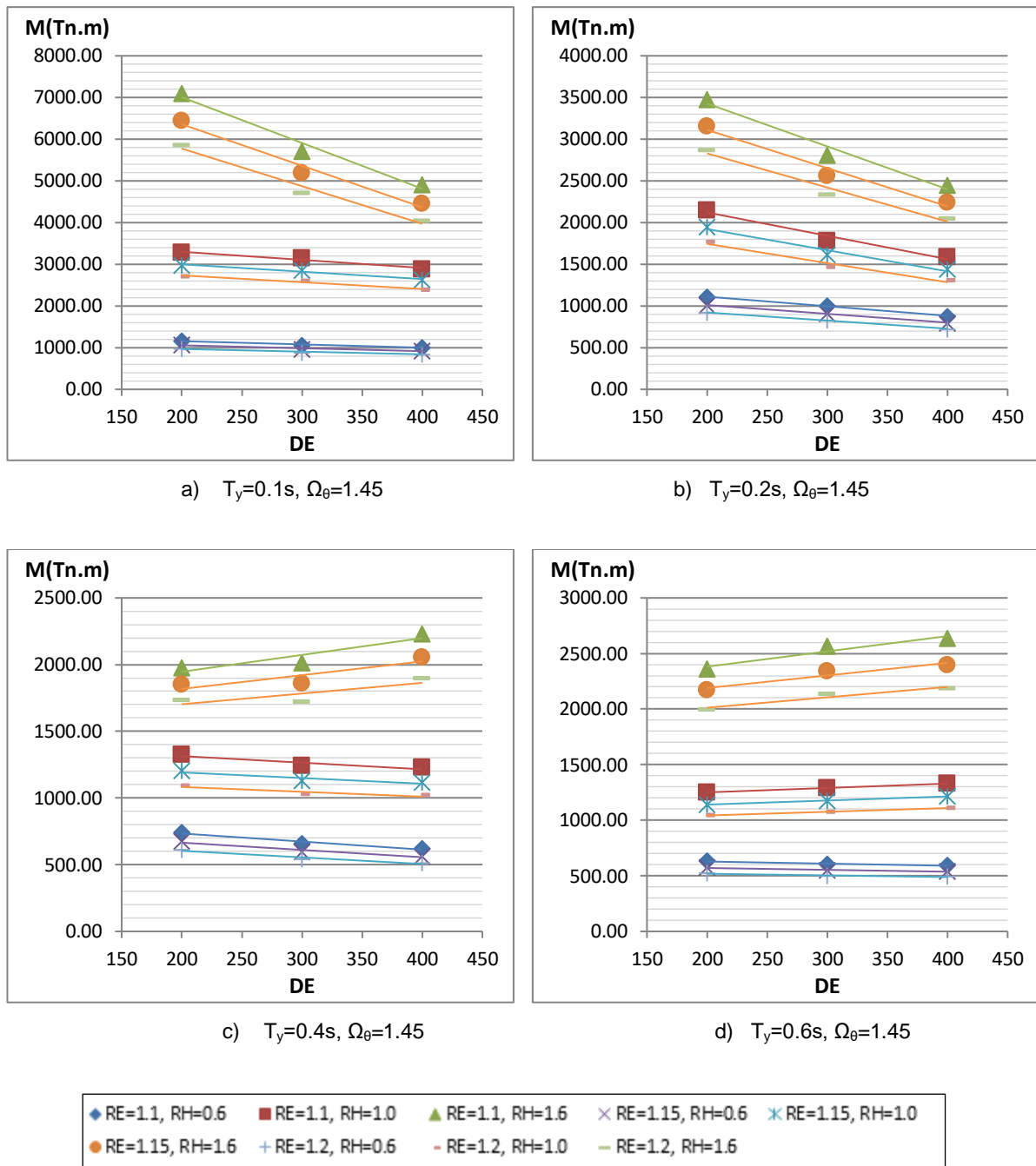


Figura D.65. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

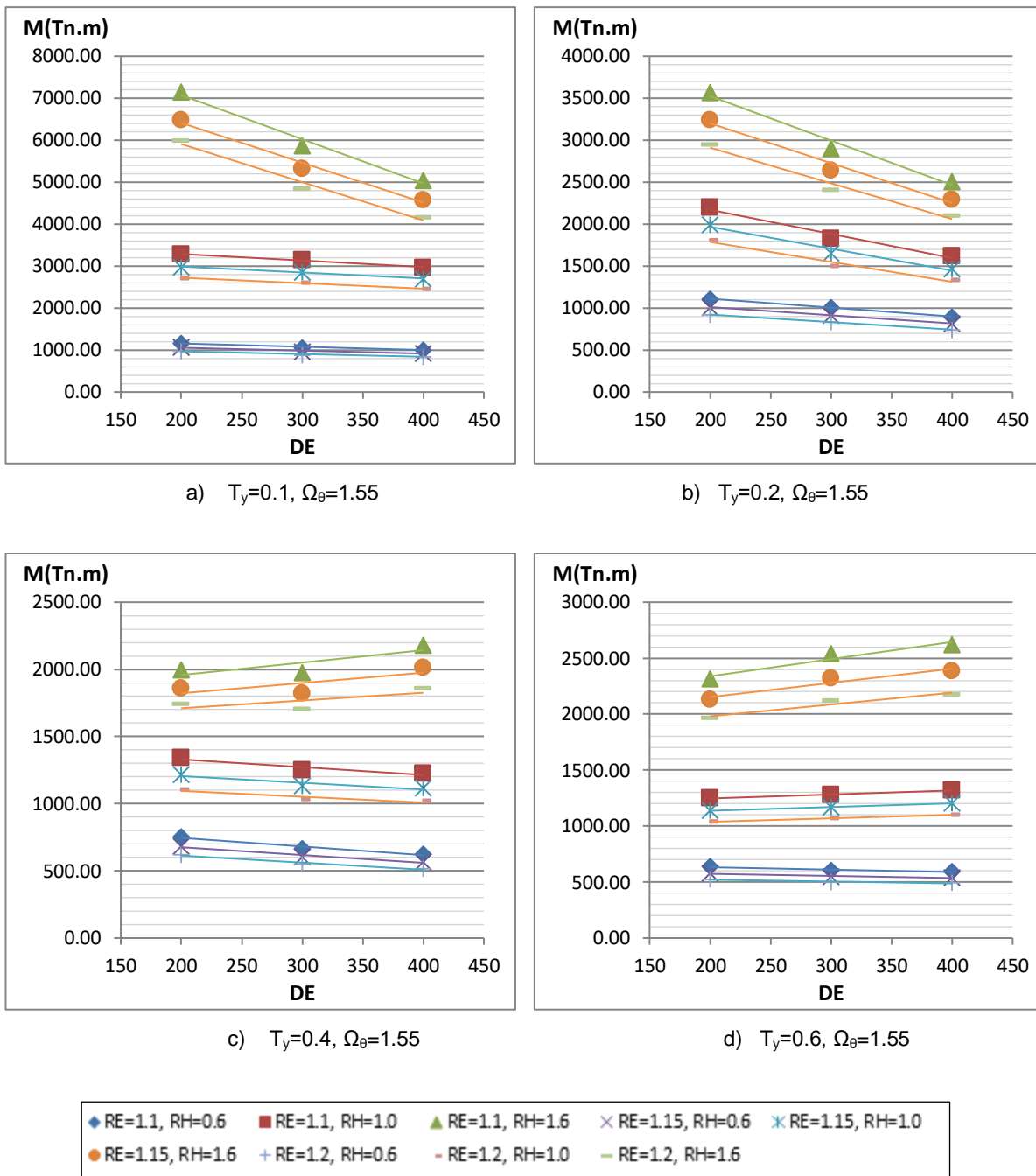
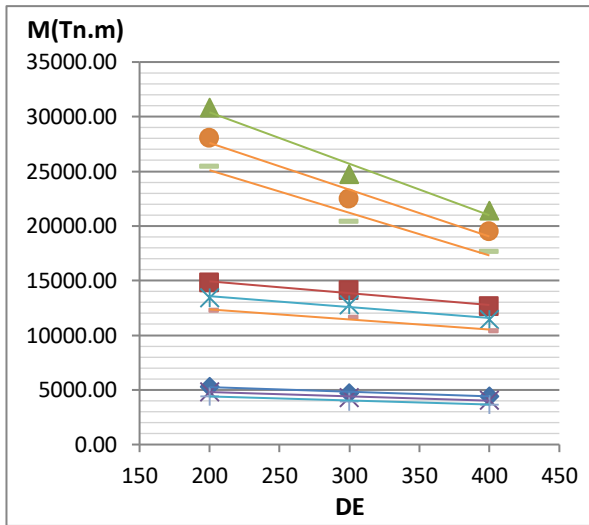
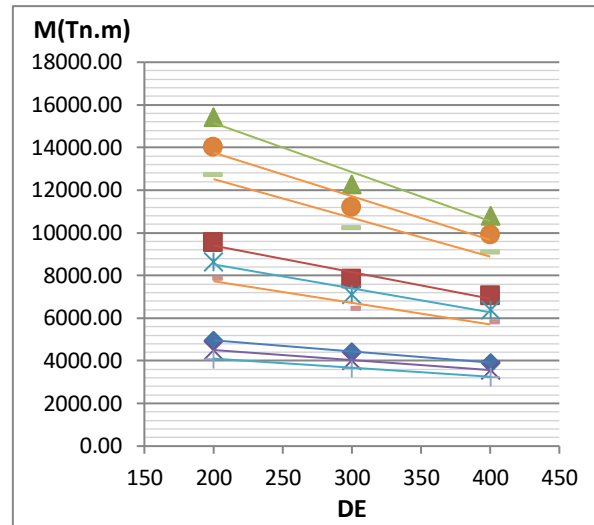


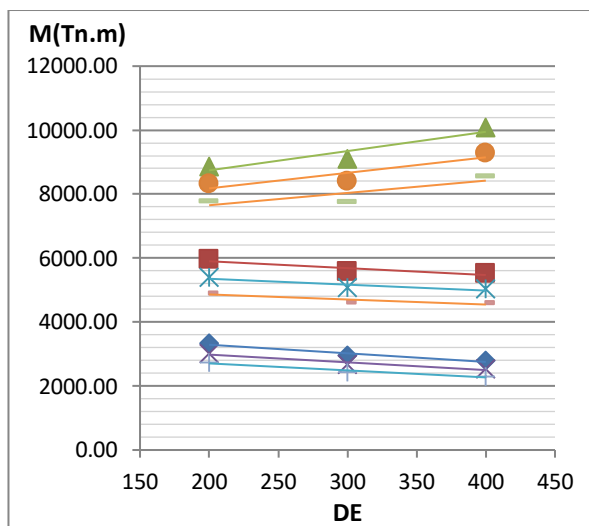
Figura D.66. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



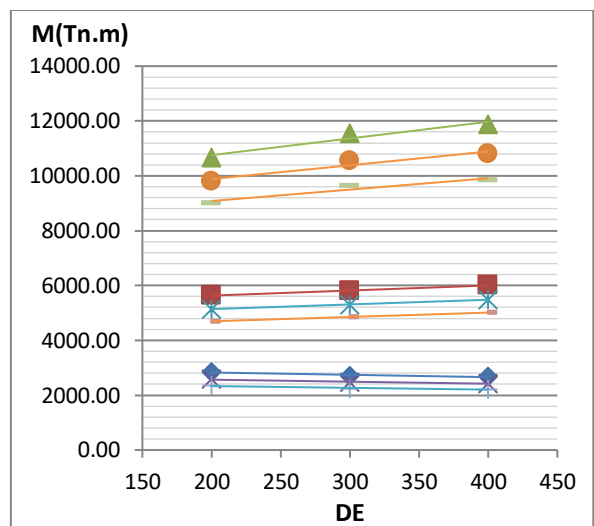
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

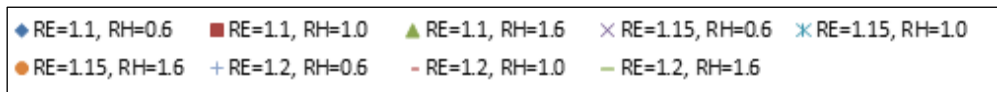


Figura D.67. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

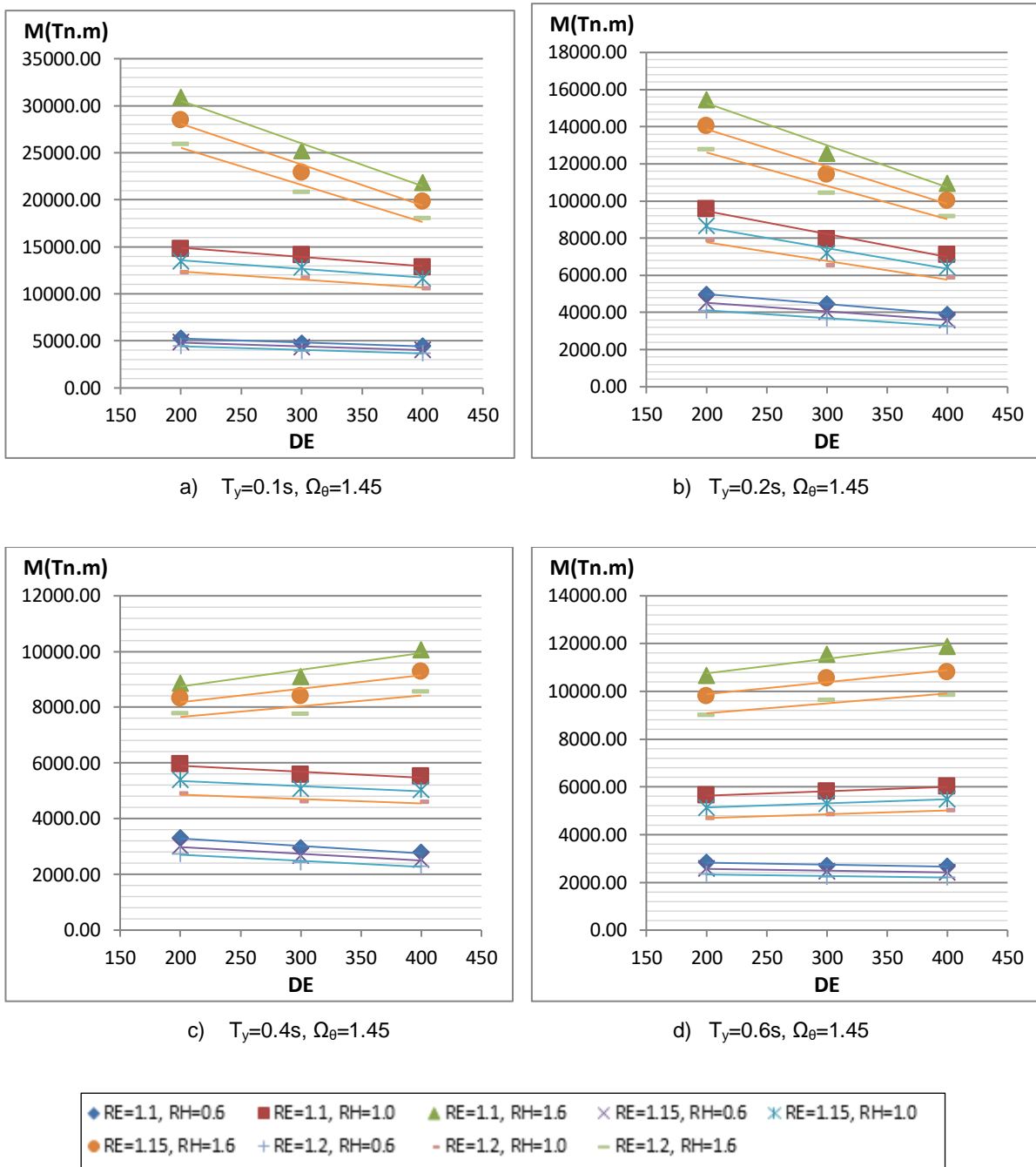


Figura D.68. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

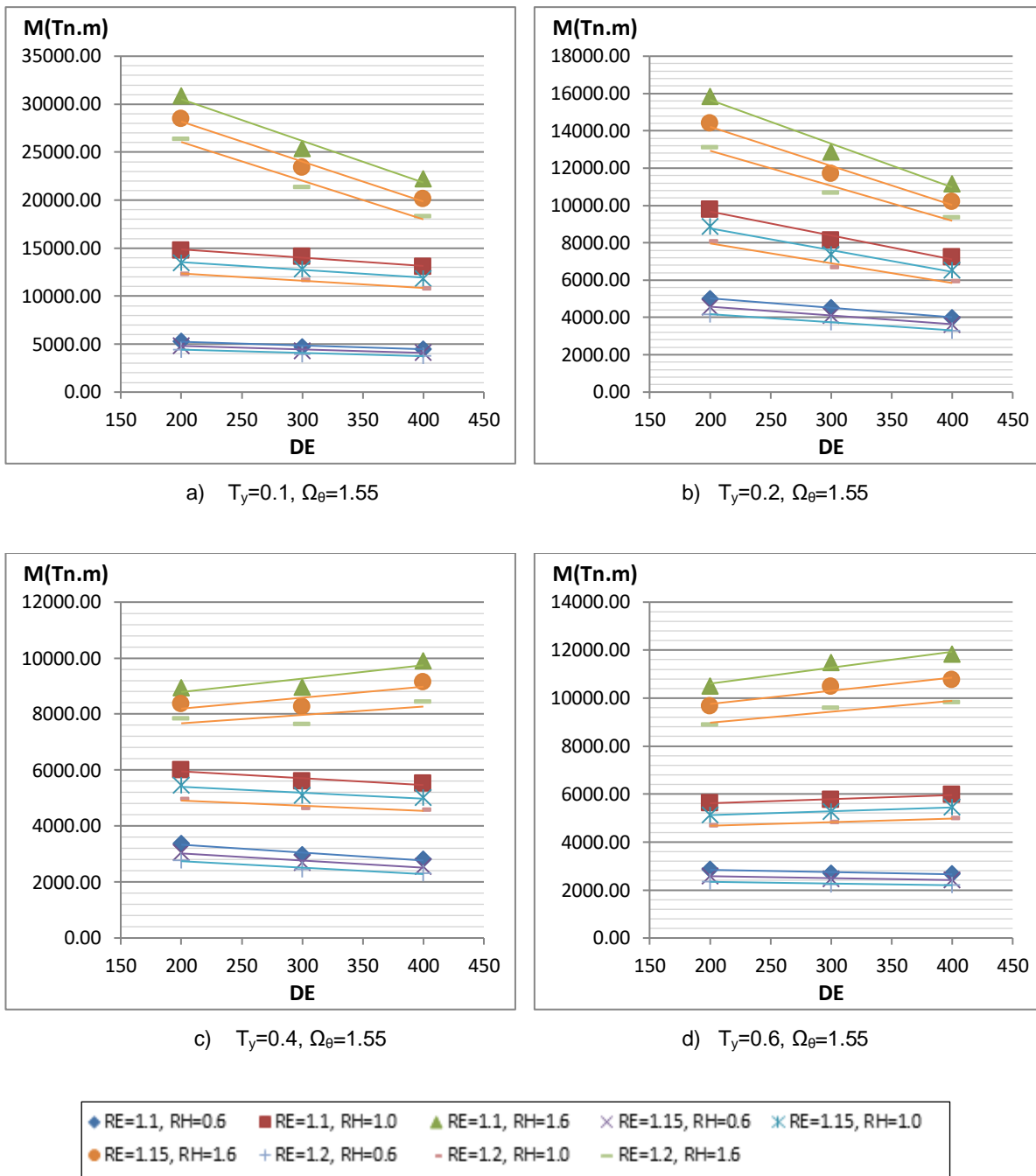
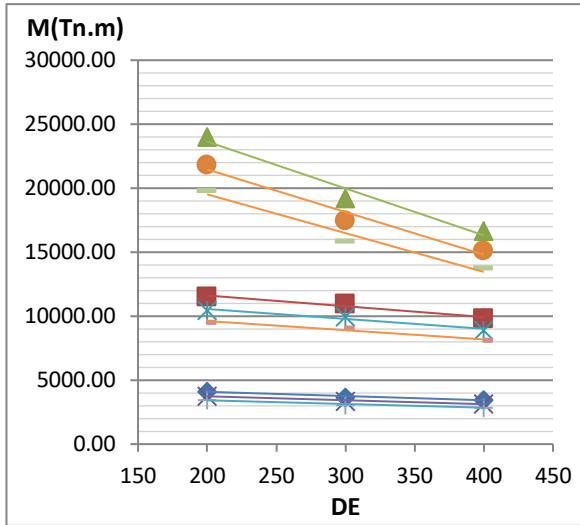
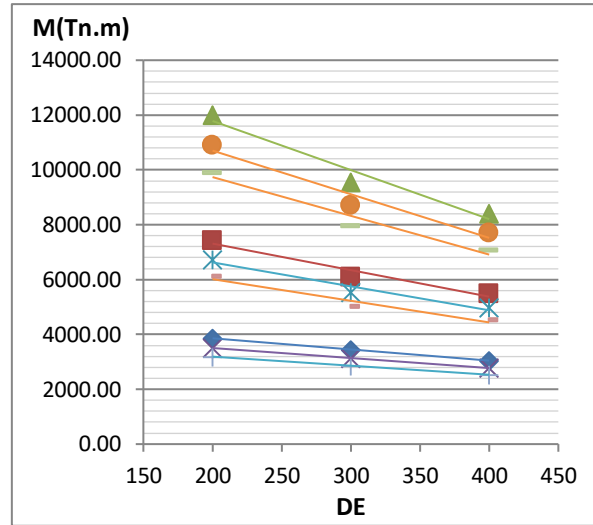


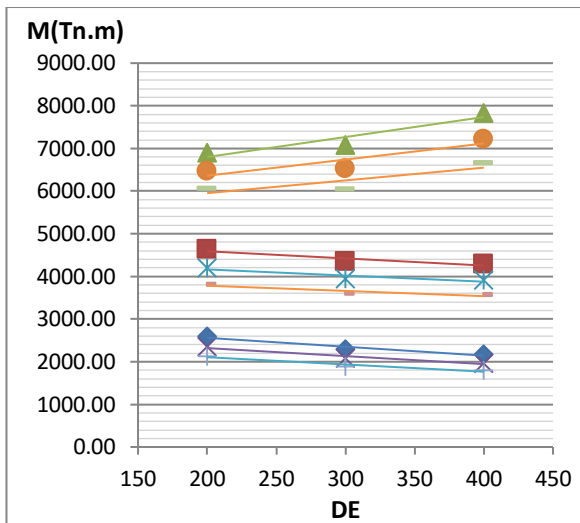
Figura D.69. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



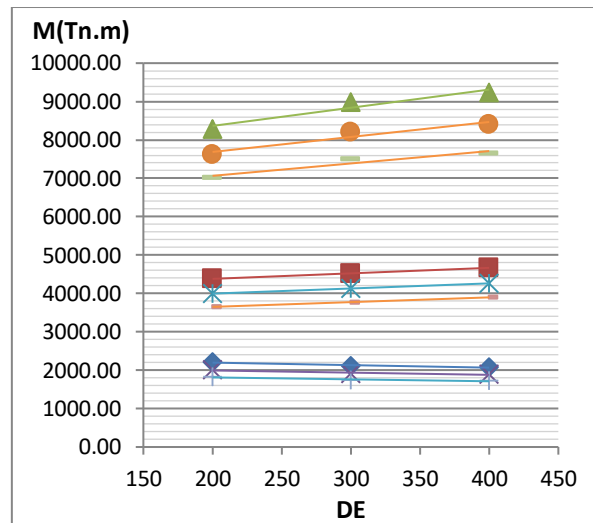
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

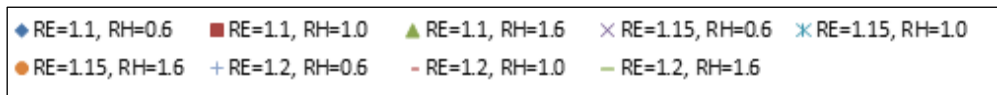
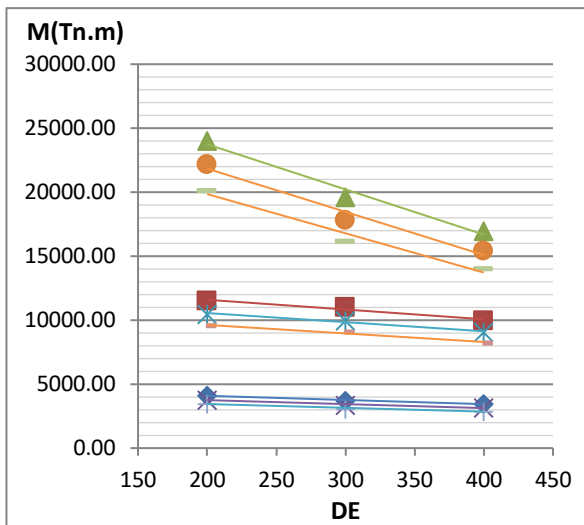
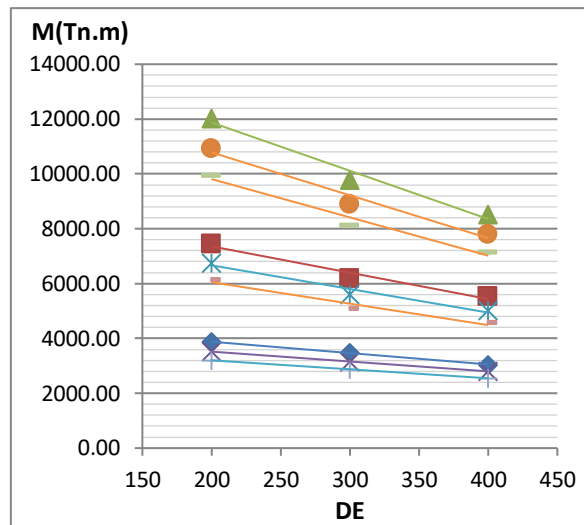


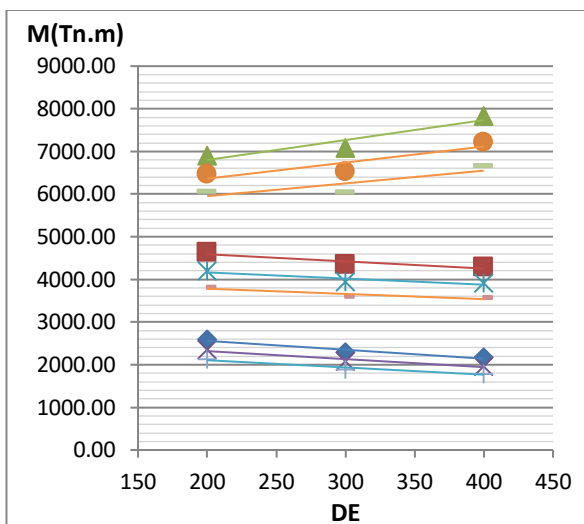
Figura D.70. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



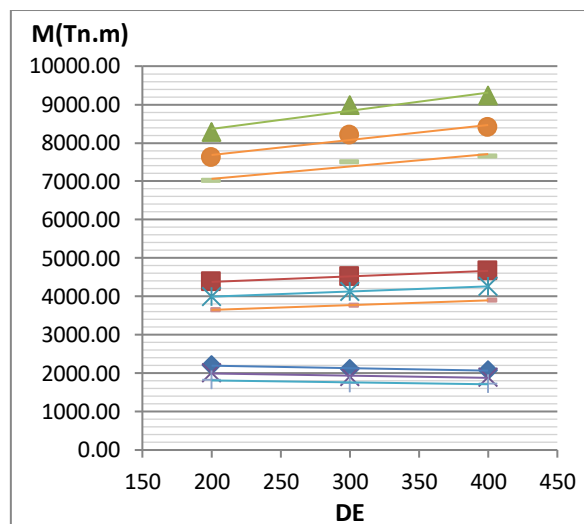
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.45$

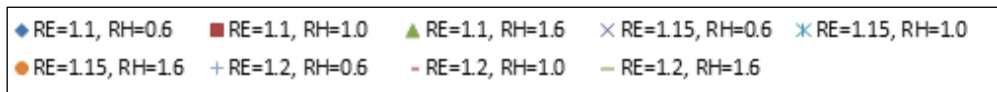
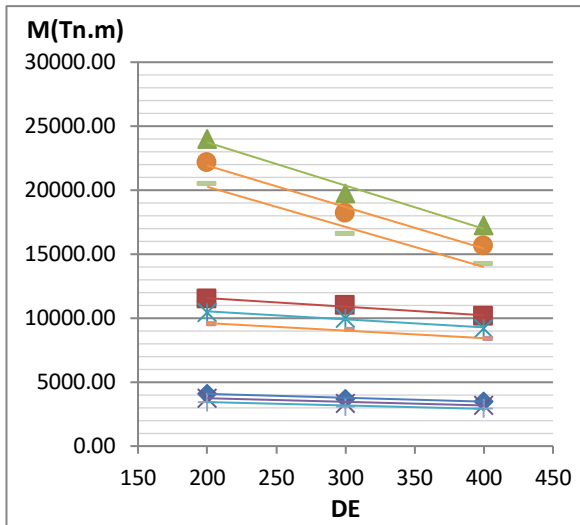
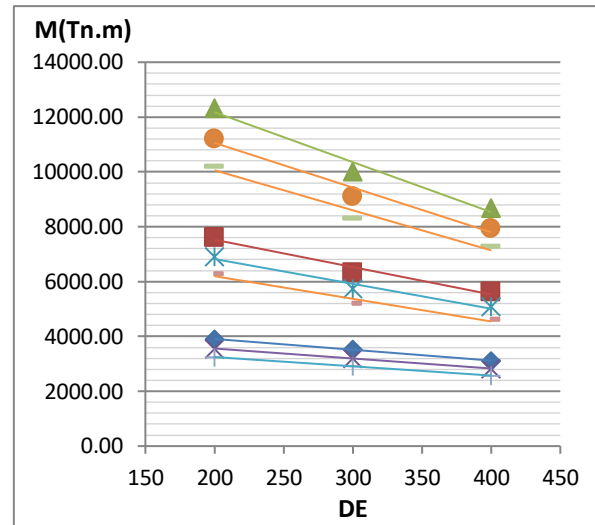


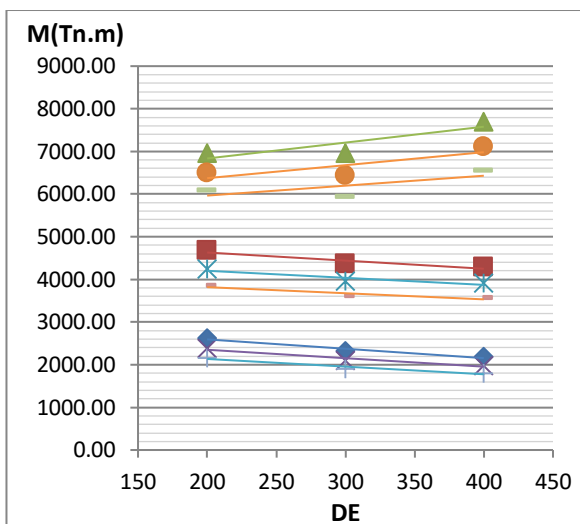
Figura D.71. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



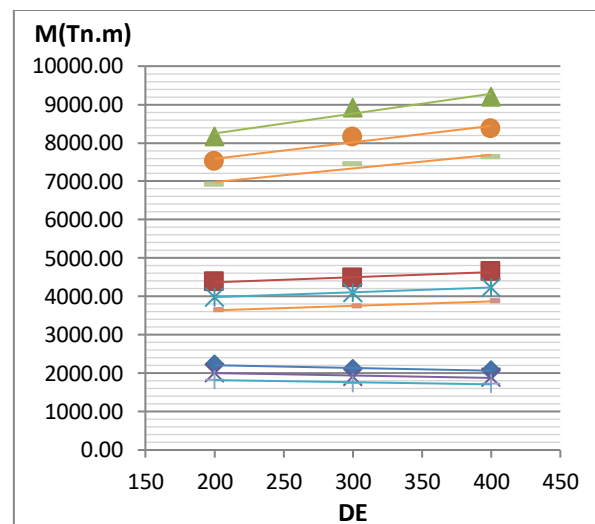
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

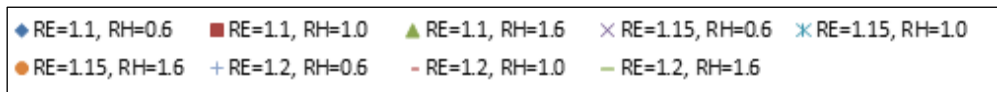
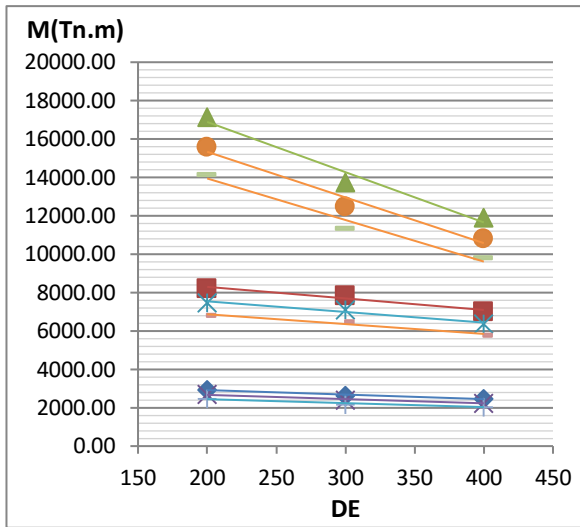
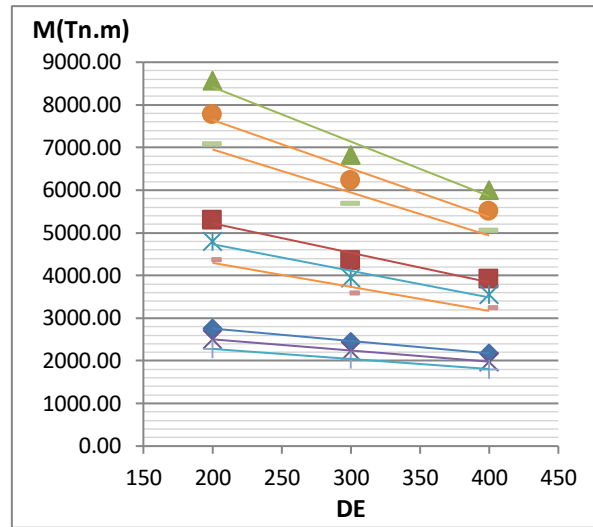


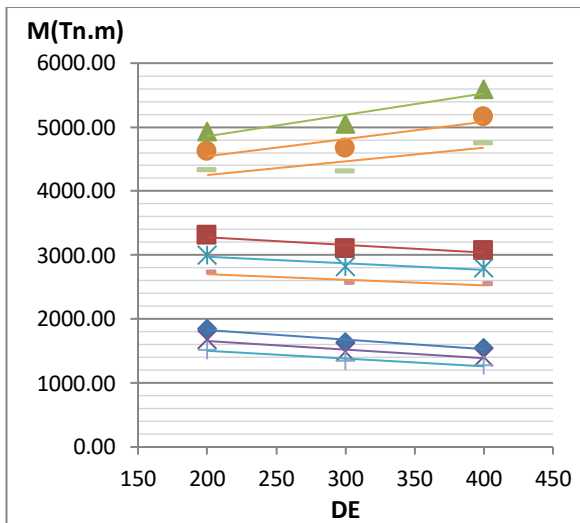
Figura D.72. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



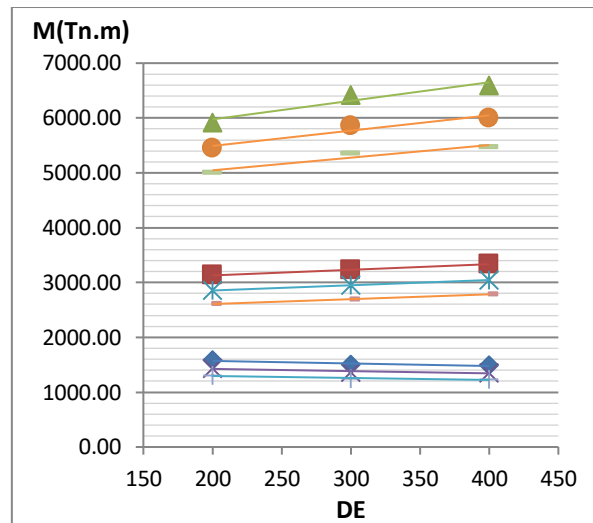
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

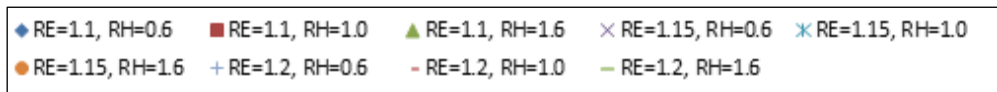
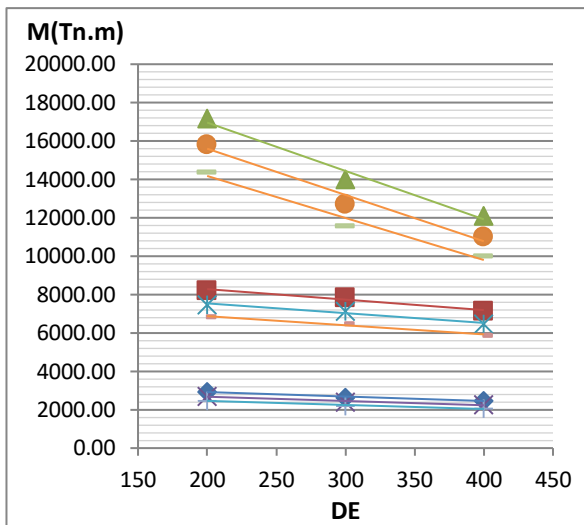
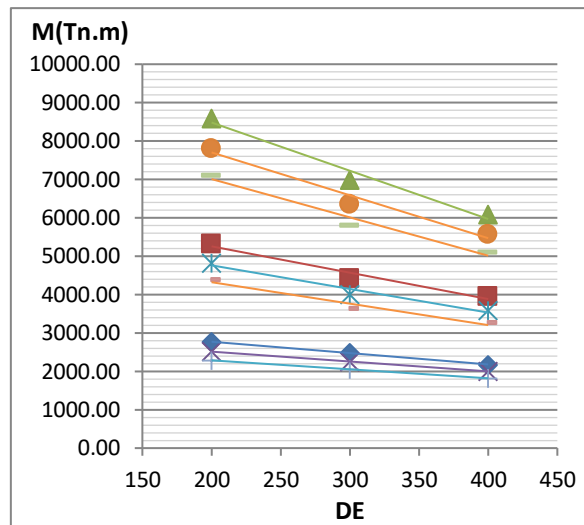


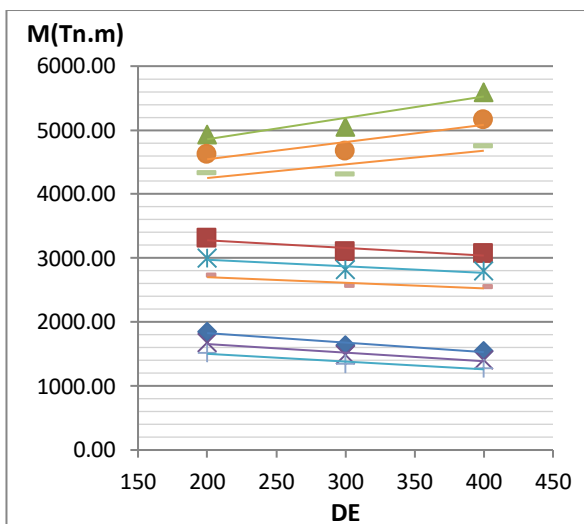
Figura D.73. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



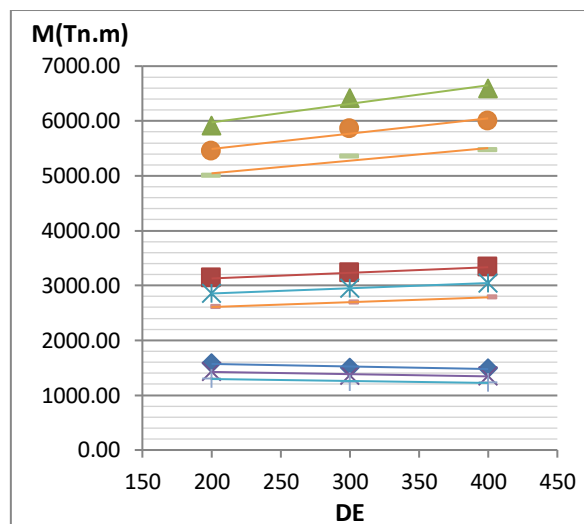
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.45$

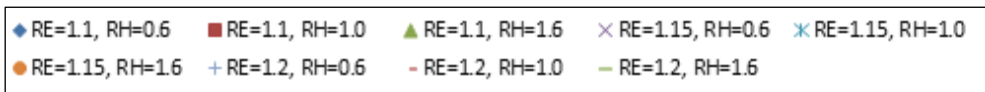
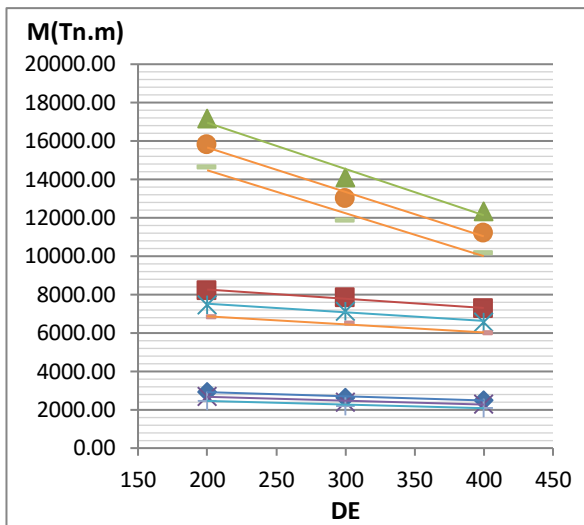
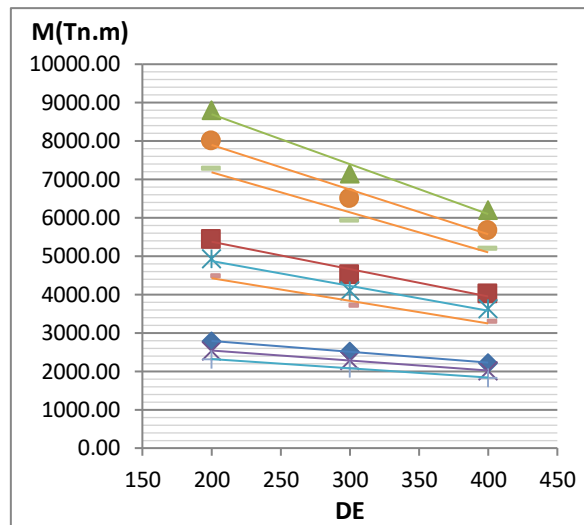


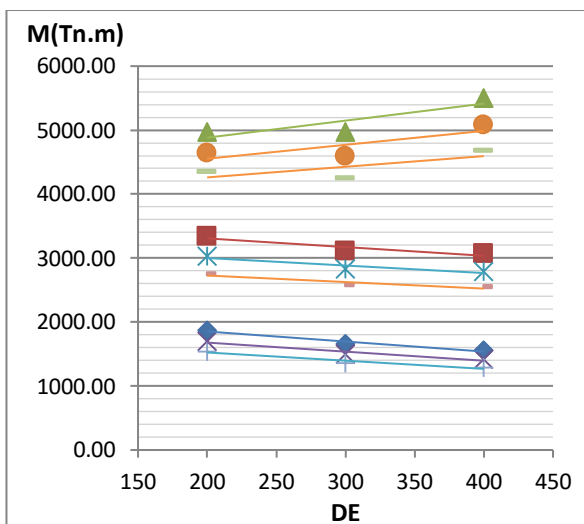
Figura D.74. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



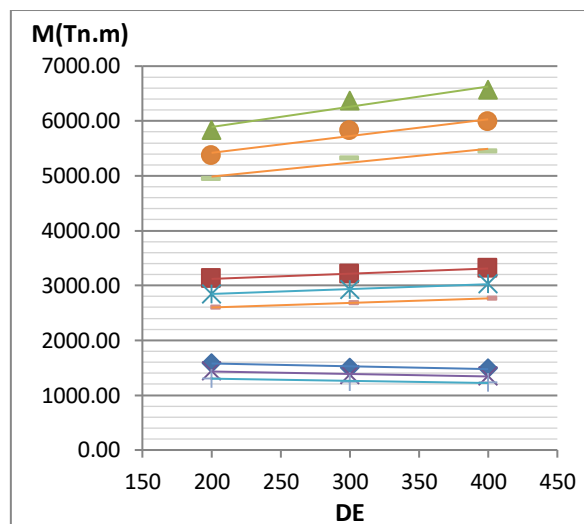
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

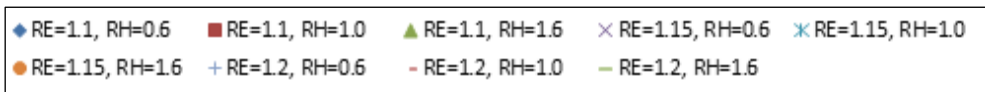


Figura D.75. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.

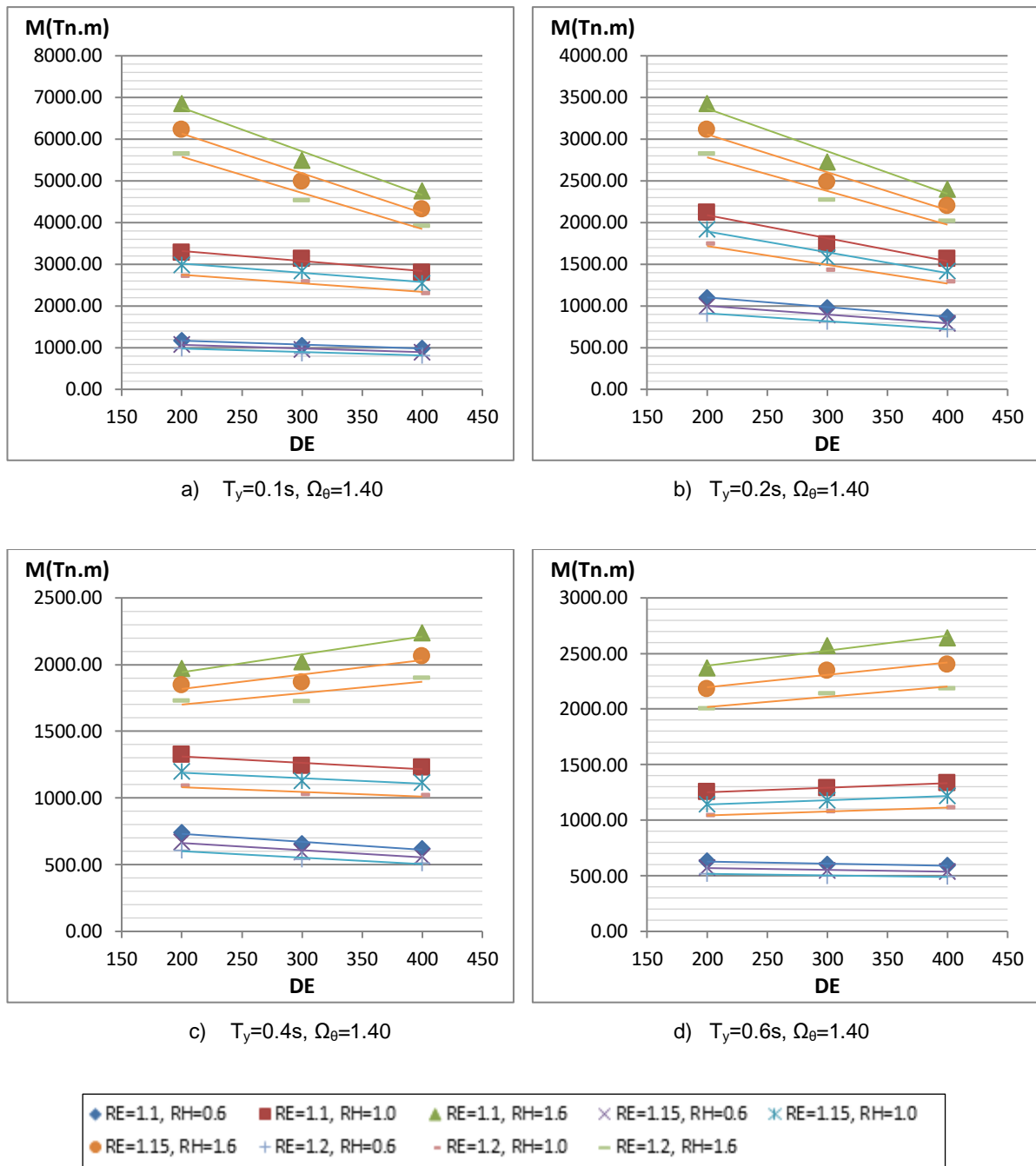


Figura D.76. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

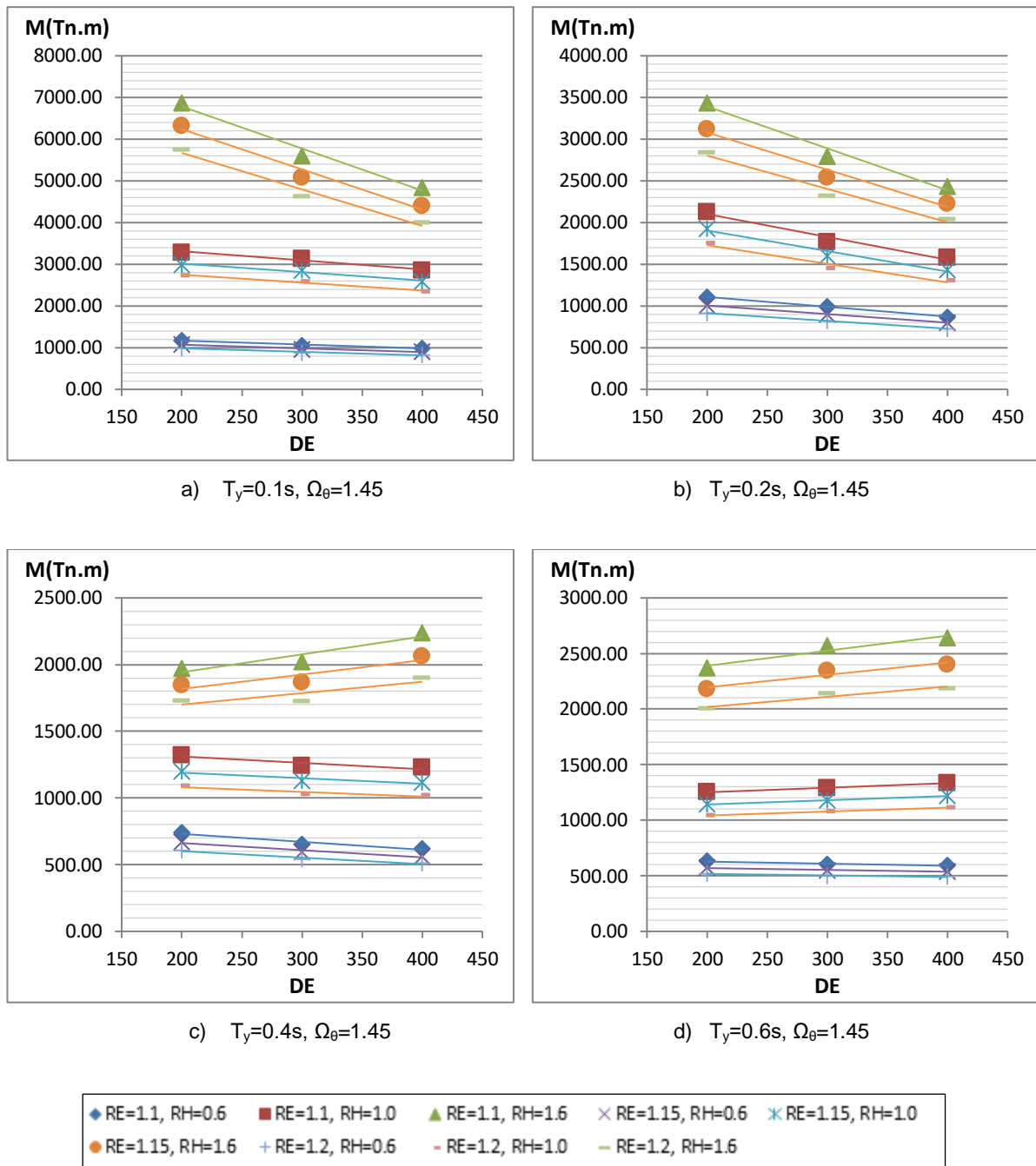


Figura D.77. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

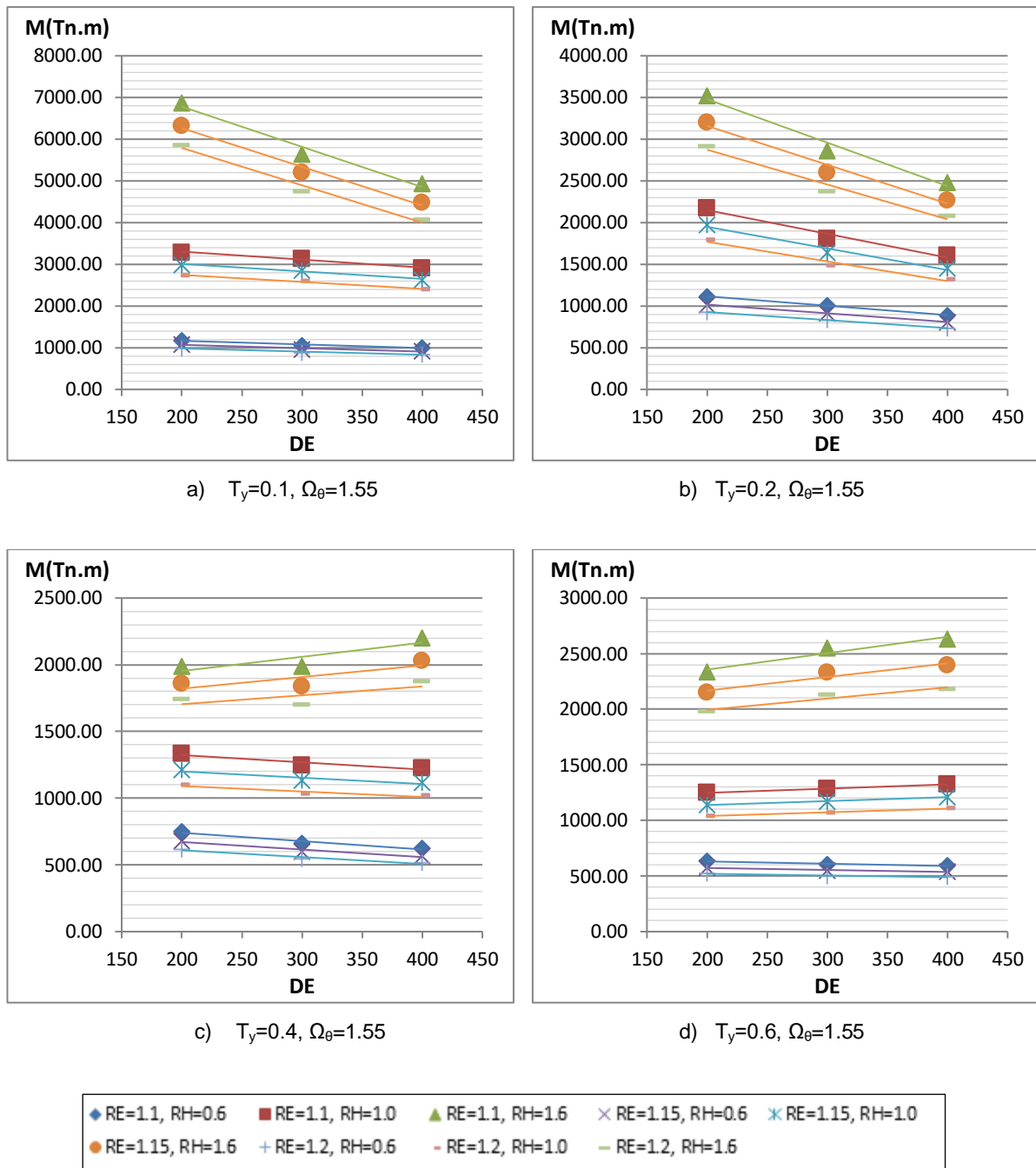


Figura D.78. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

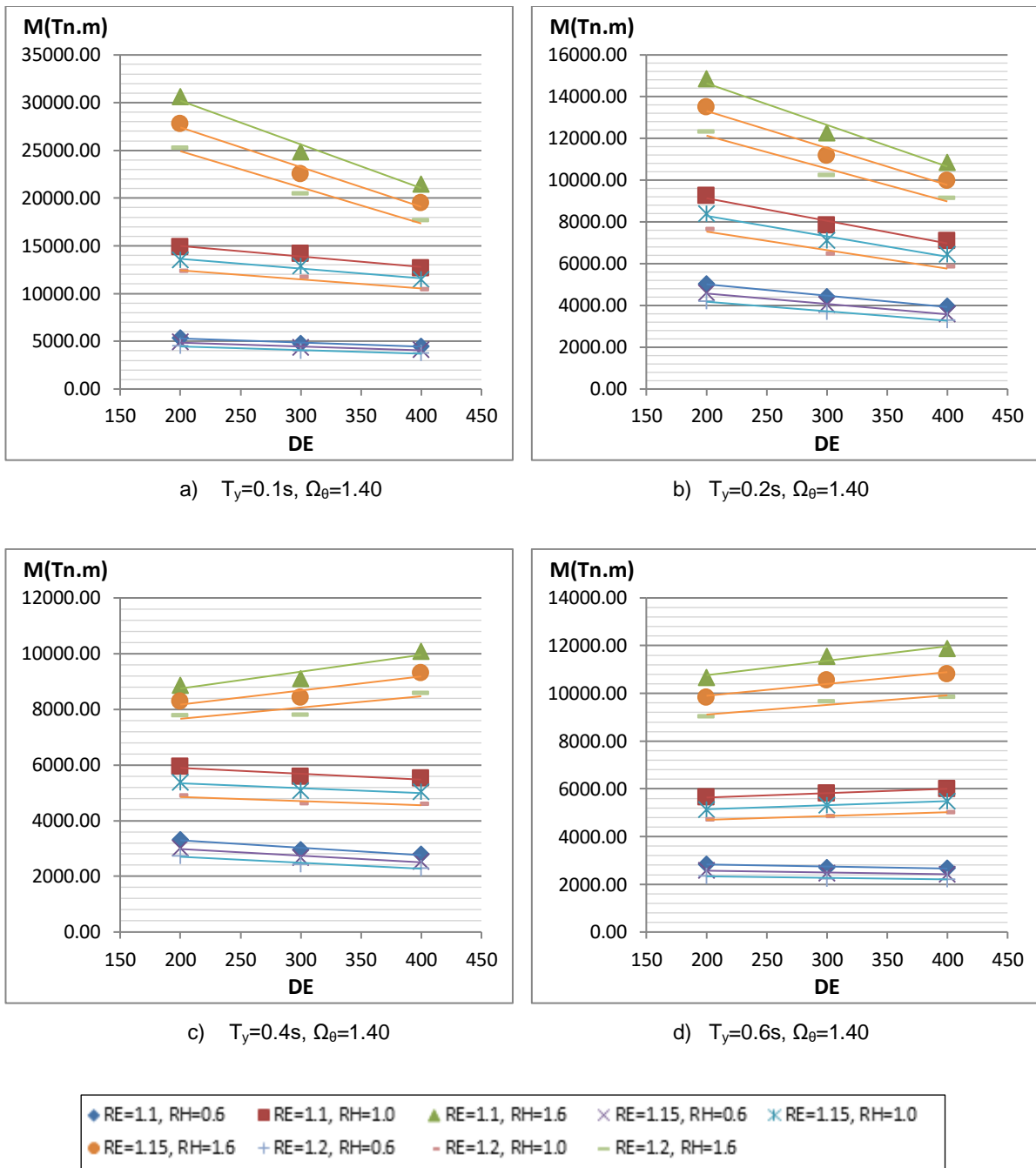
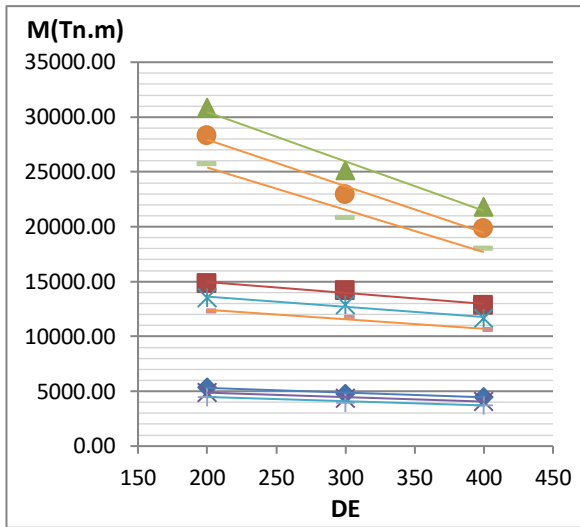
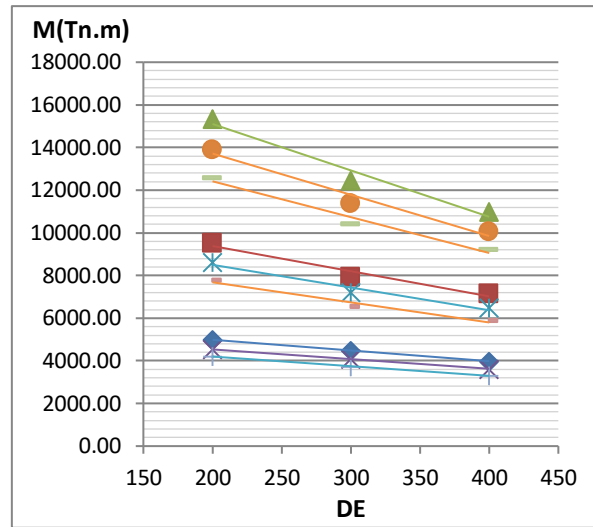


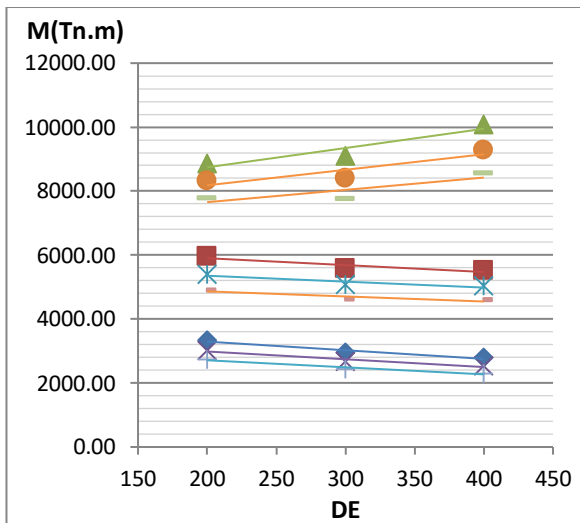
Figura D.79. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



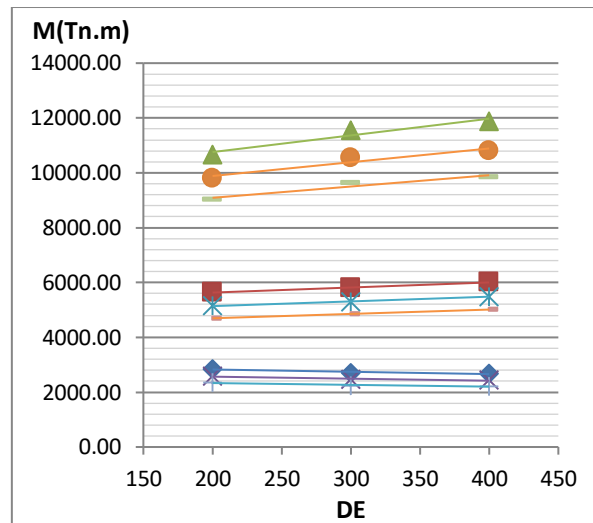
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.45$

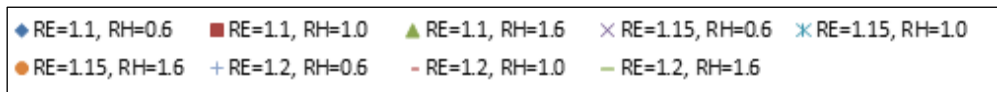
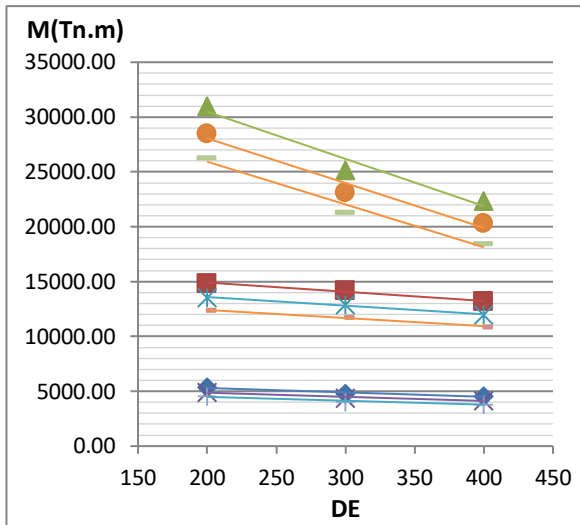
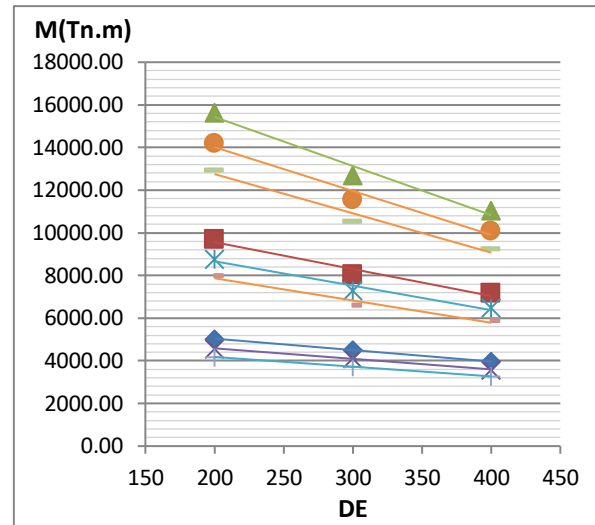


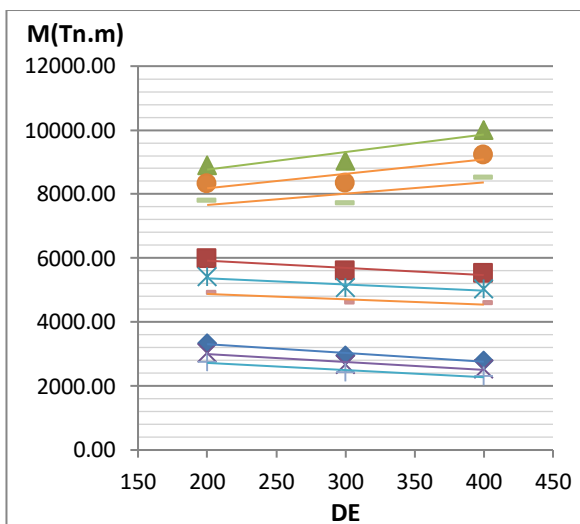
Figura D.80. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



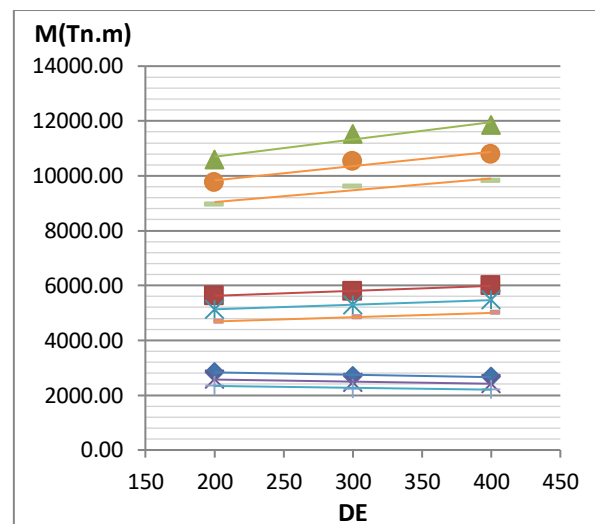
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

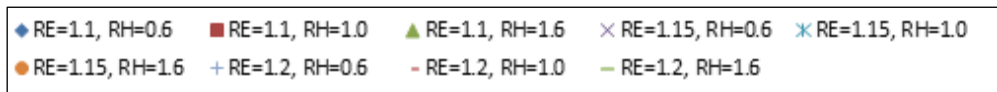
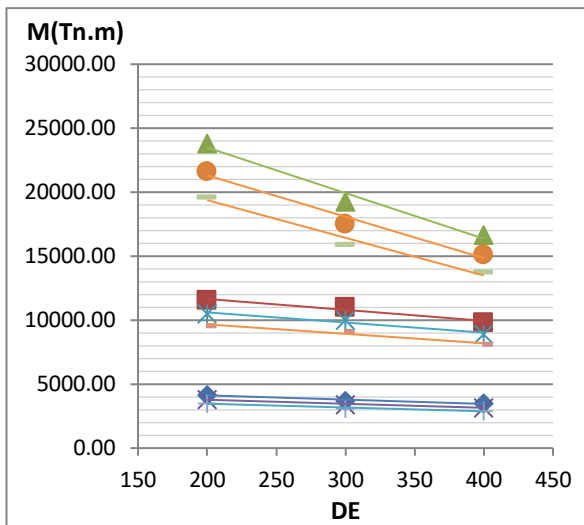
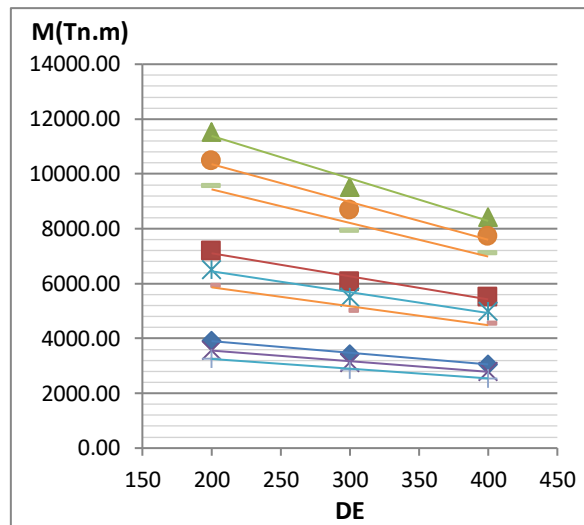


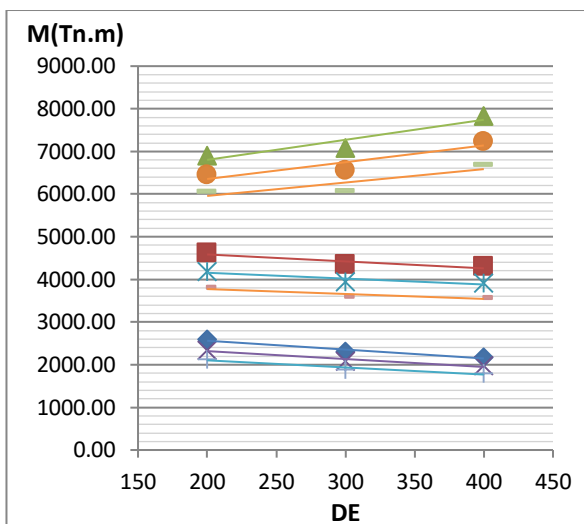
Figura D.81. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



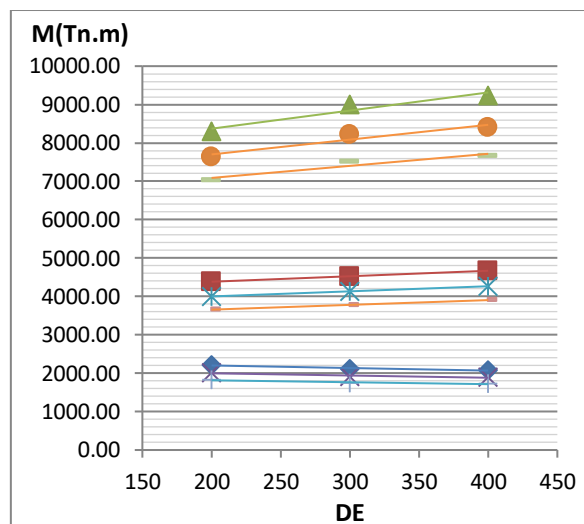
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.40$

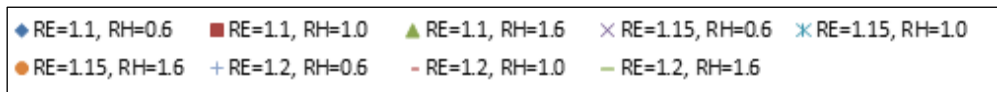
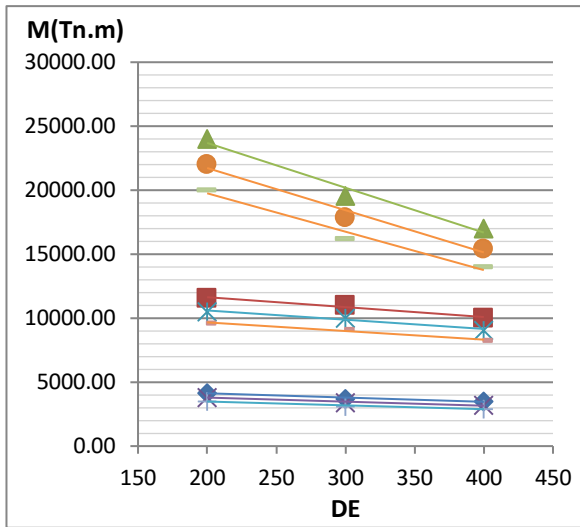
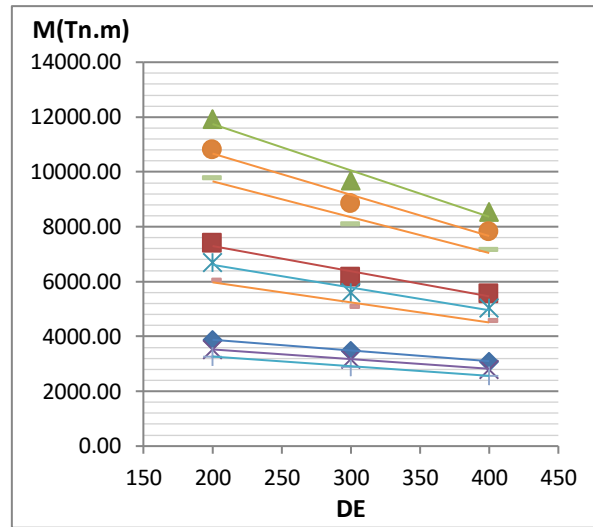


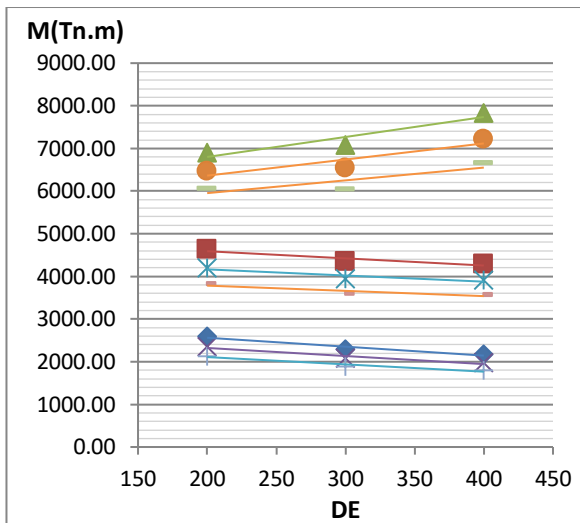
Figura D.82. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



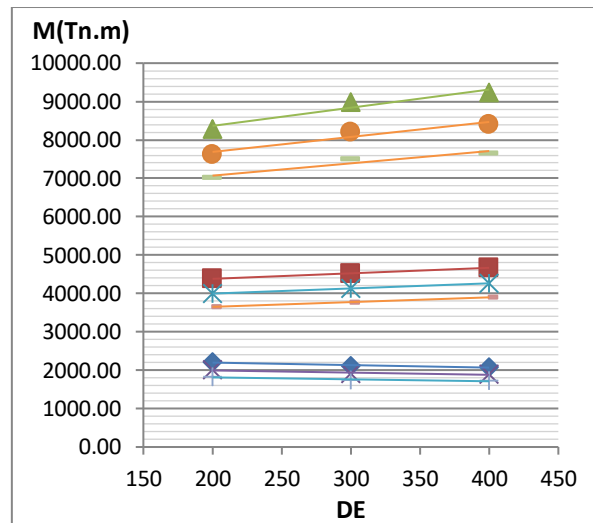
a) $T_y=0.1s, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2s, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4s, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6s, \Omega_\theta=1.45$

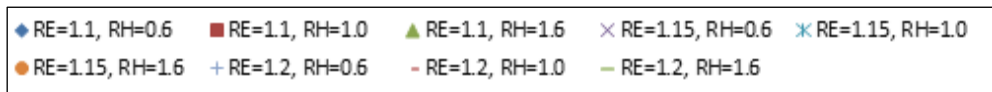
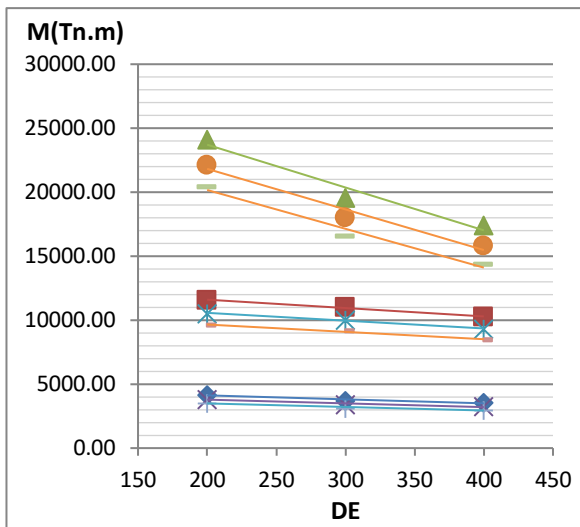
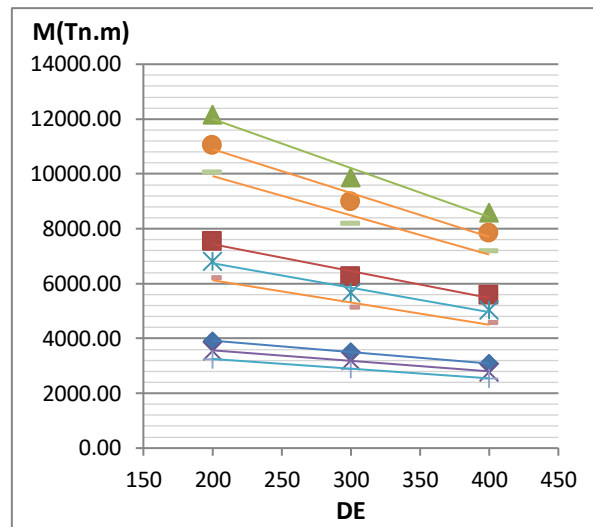


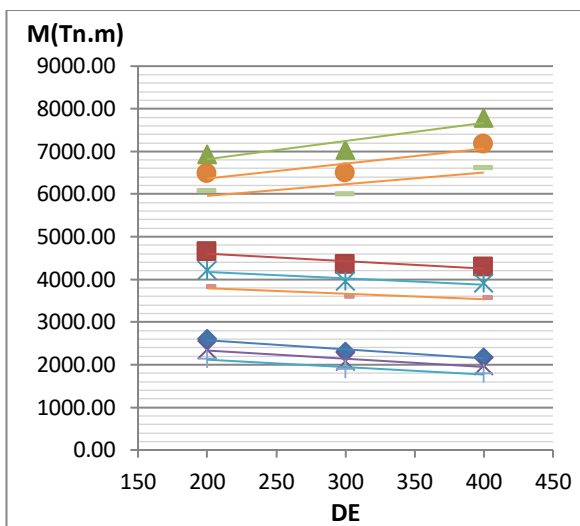
Figura D.83. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



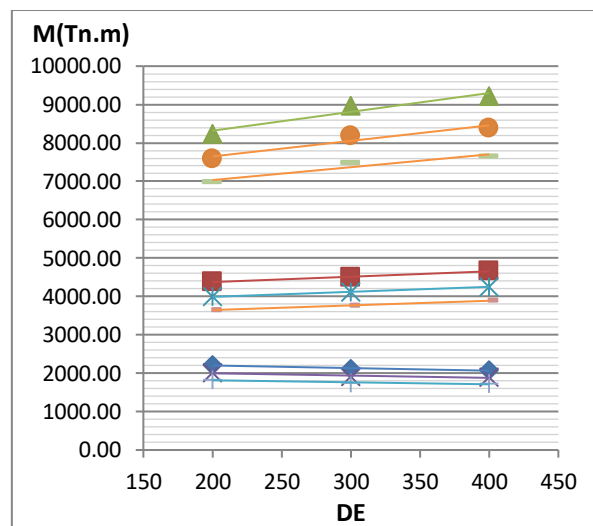
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

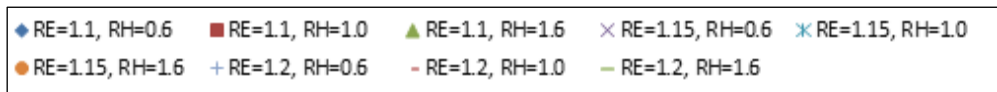


Figura D.84. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.

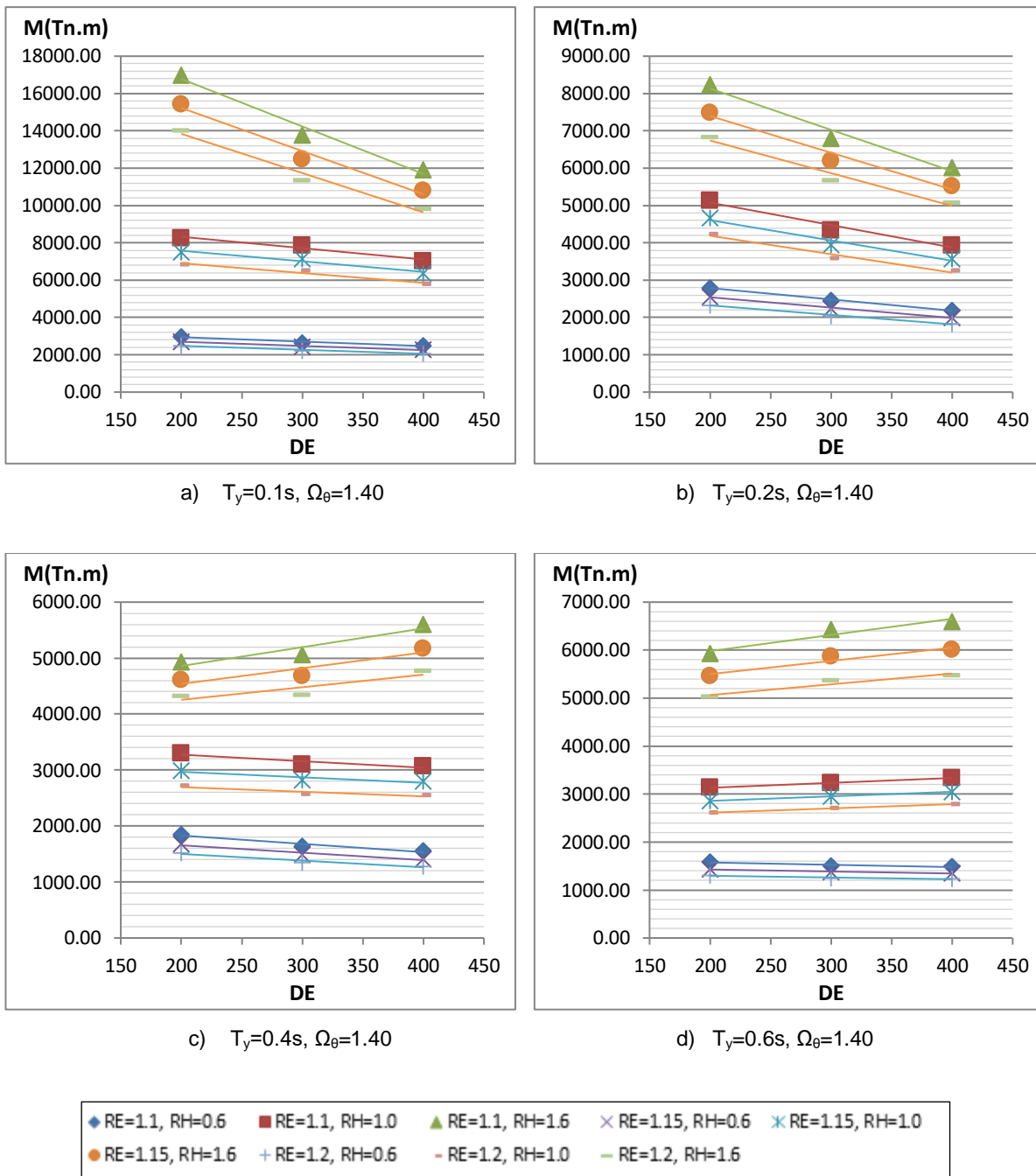


Figura D.85. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.

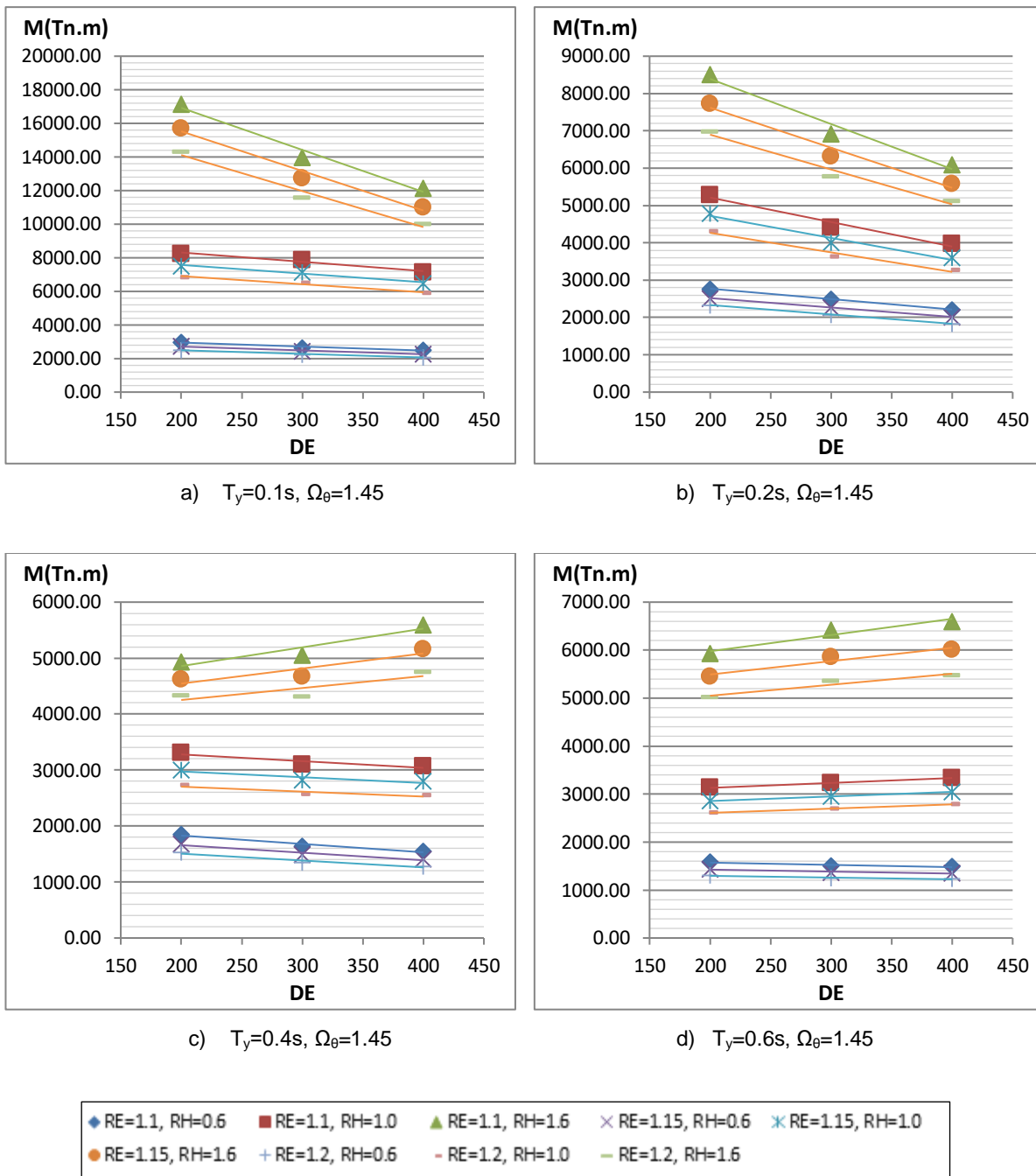
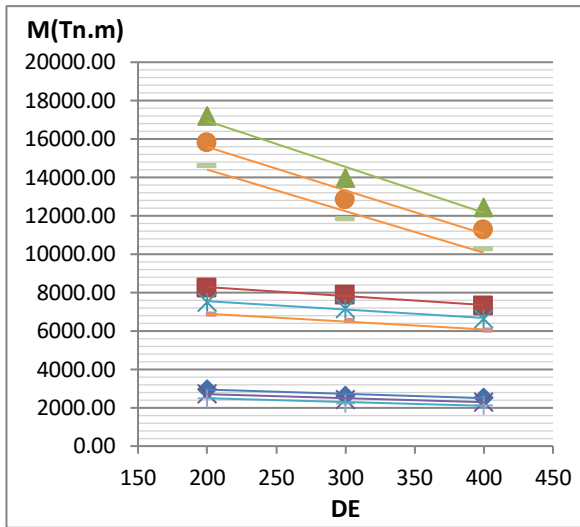
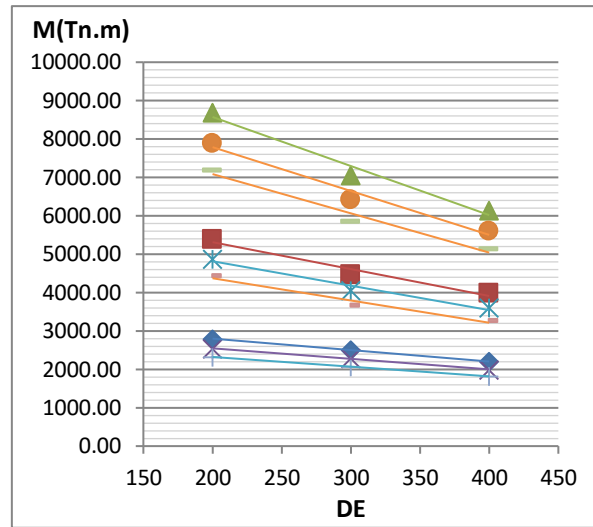


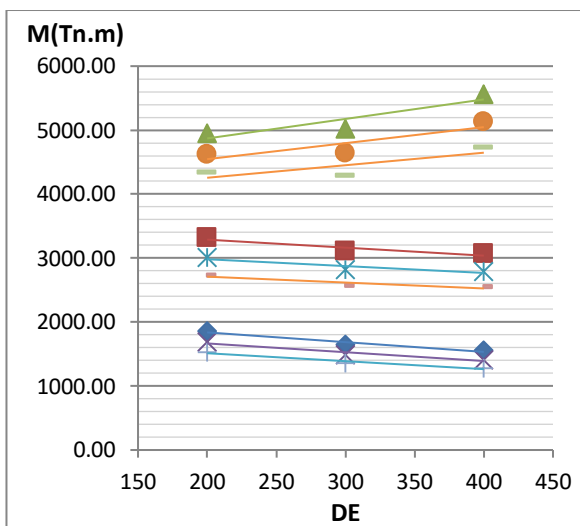
Figura D.86. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



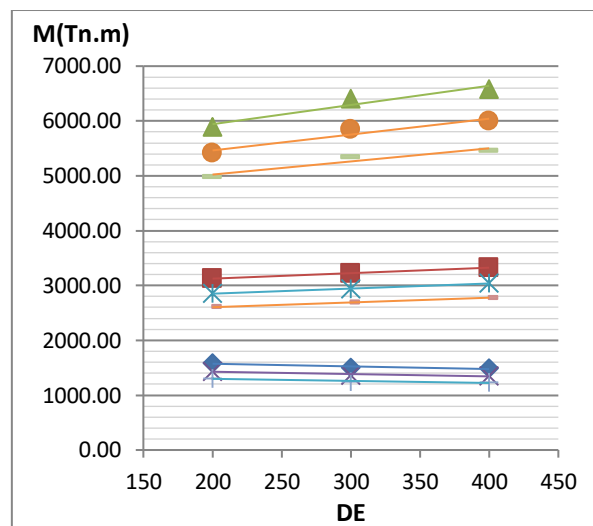
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

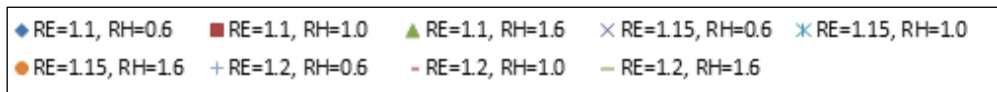


Figura D.87. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.

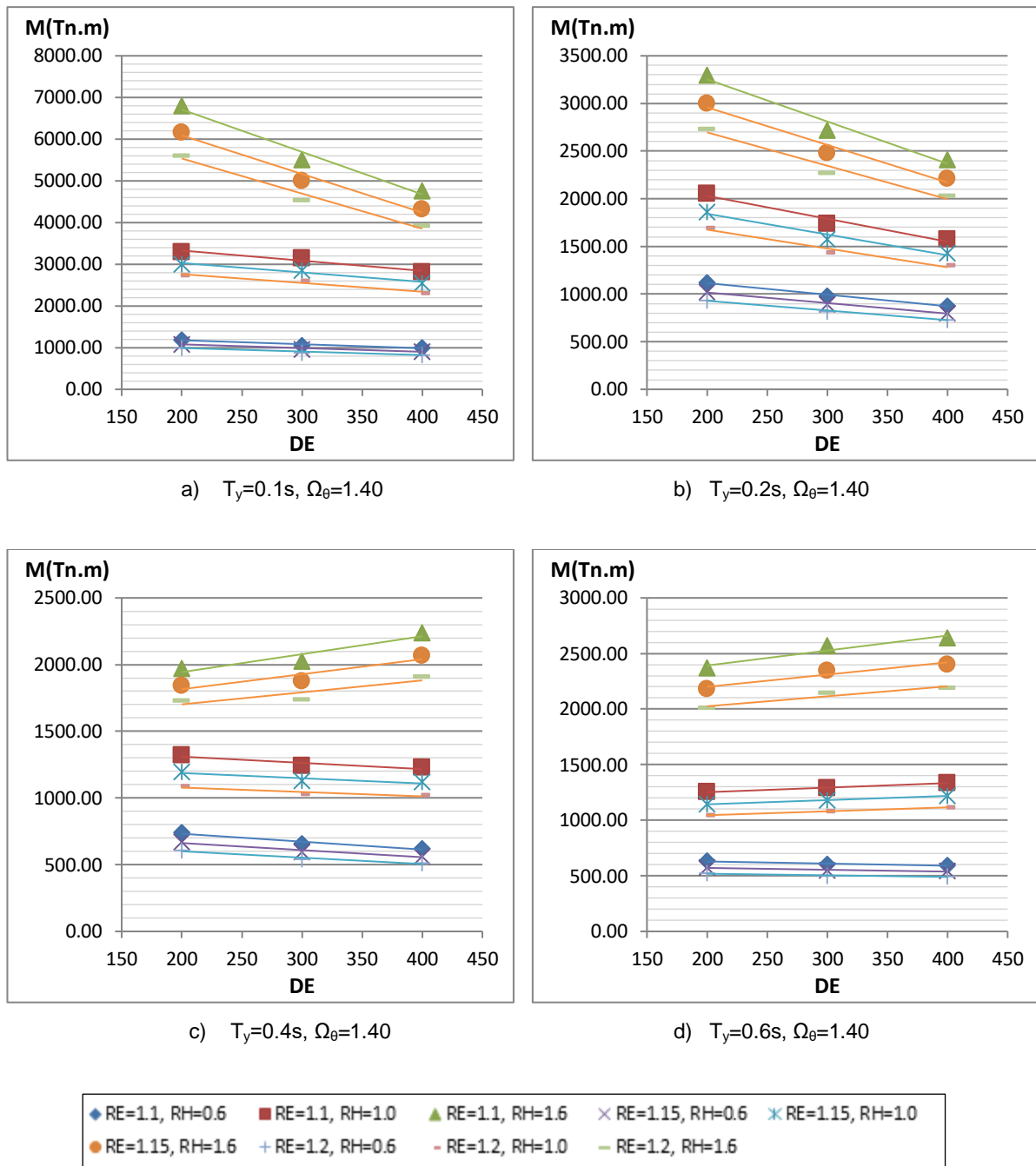


Figura D.88. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

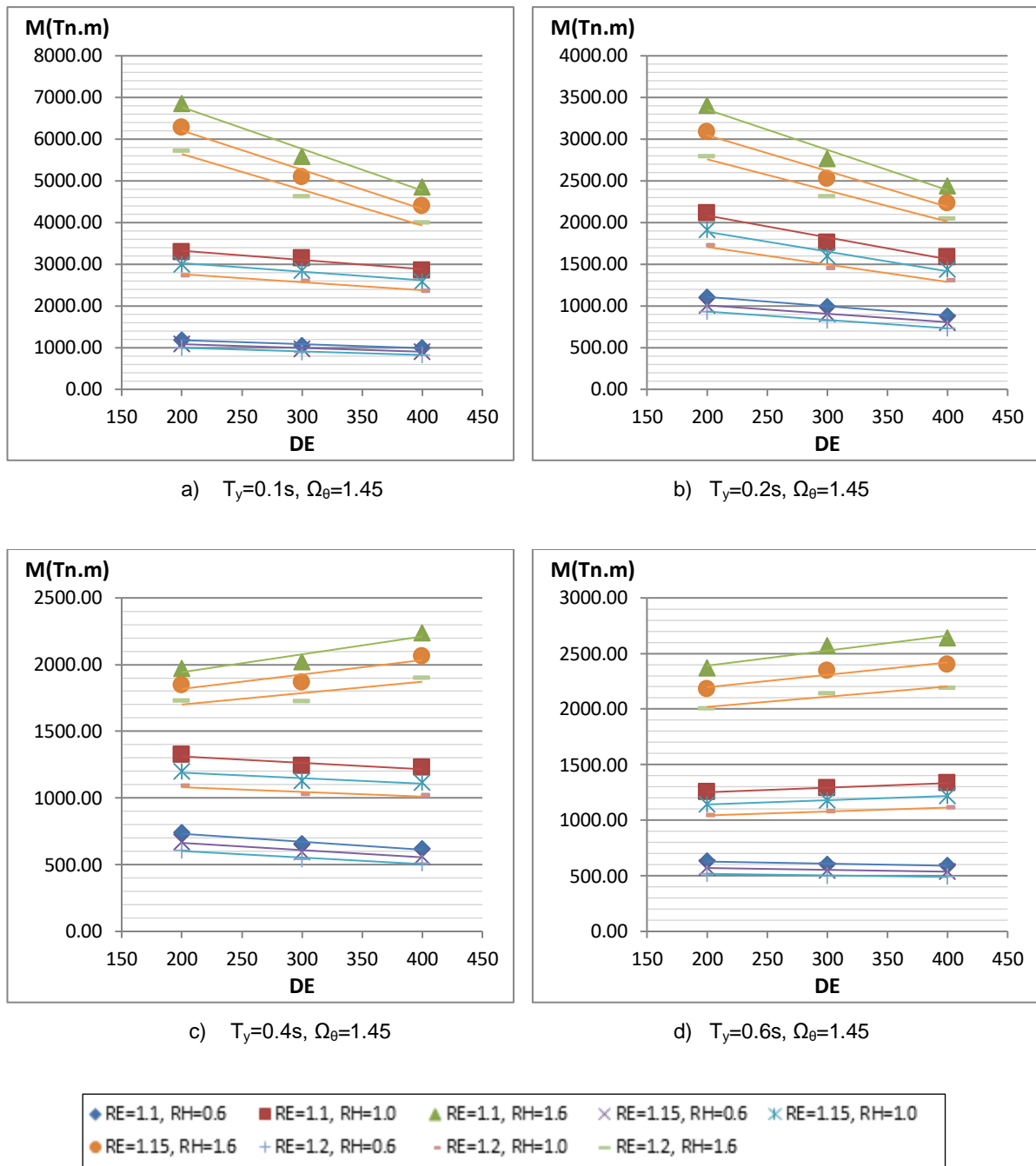
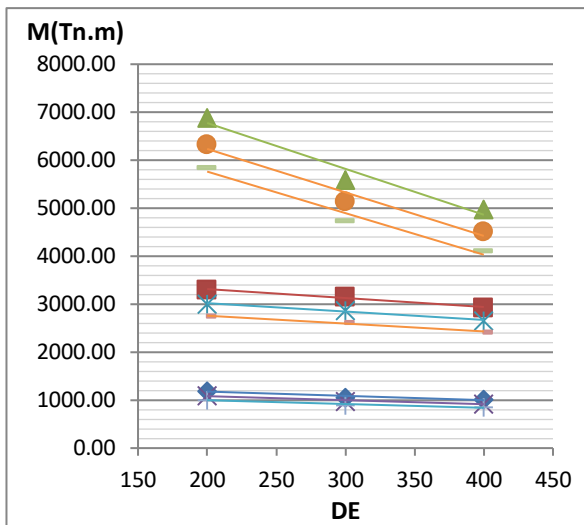
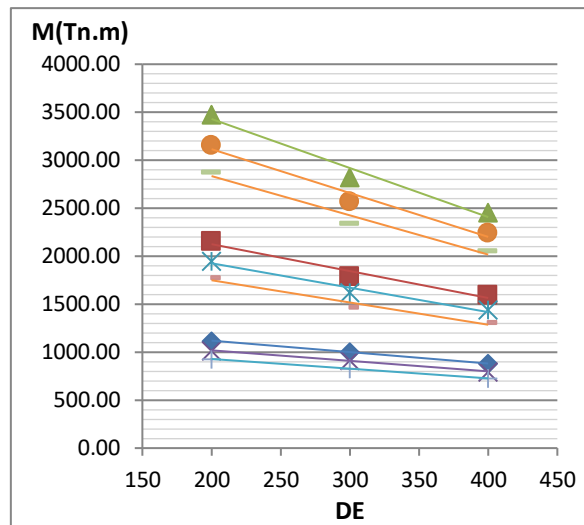


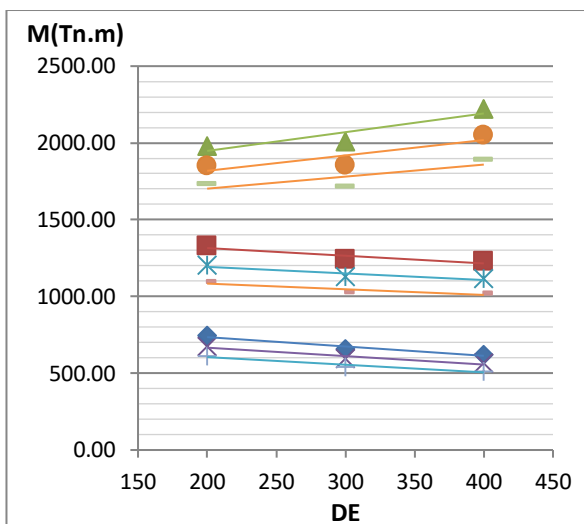
Figura D.89. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



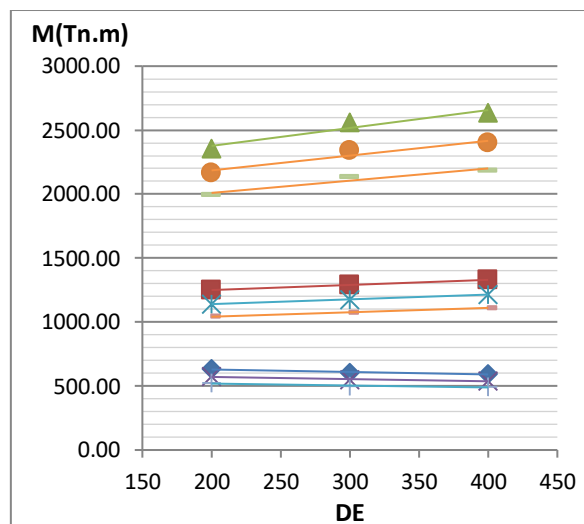
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

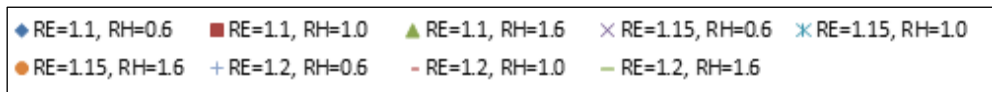


Figura D.90. Relación del Momento volcante frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

Desplazamientos máximos:

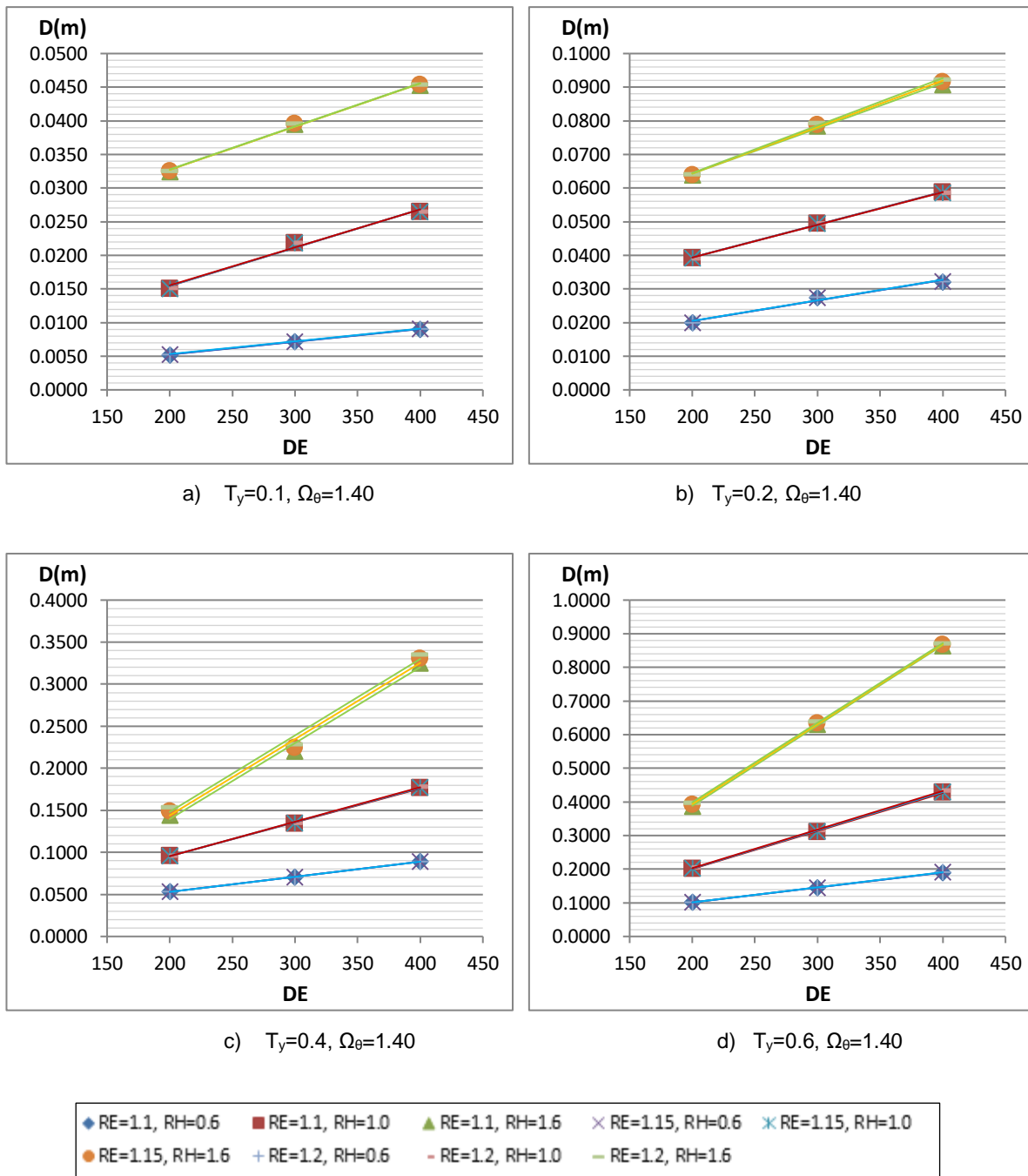


Figura D.91. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

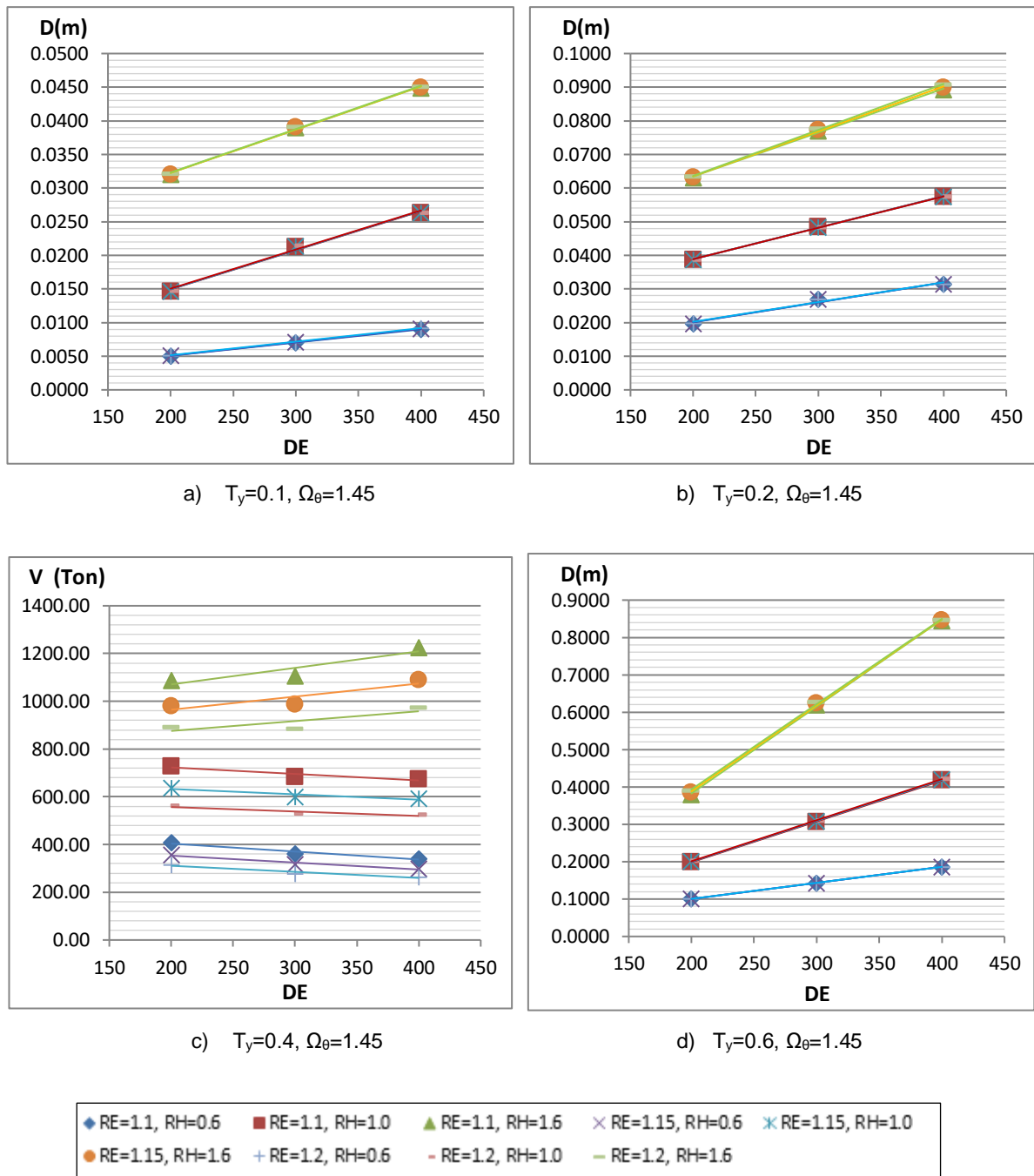
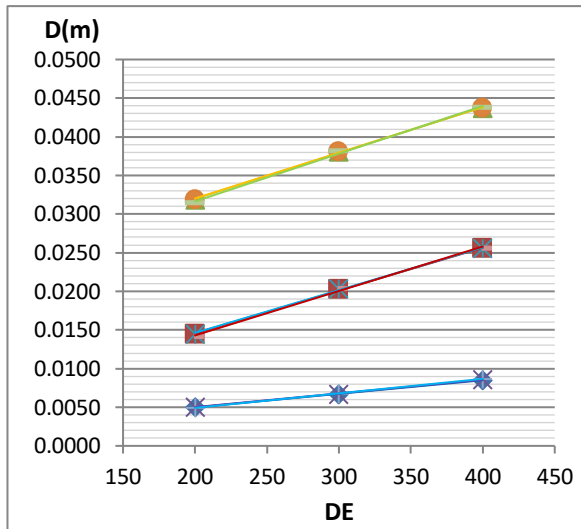
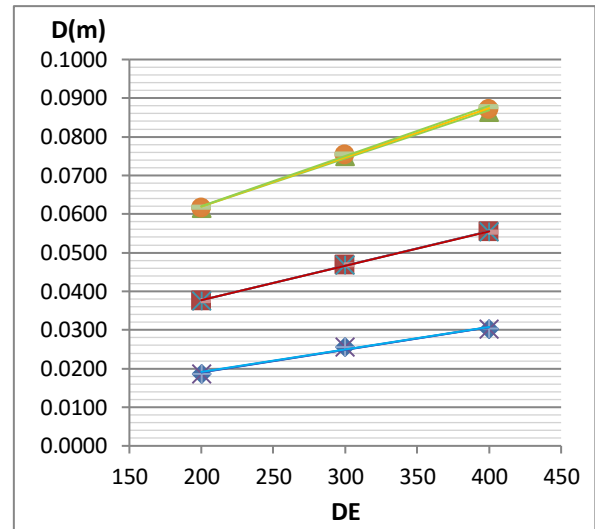


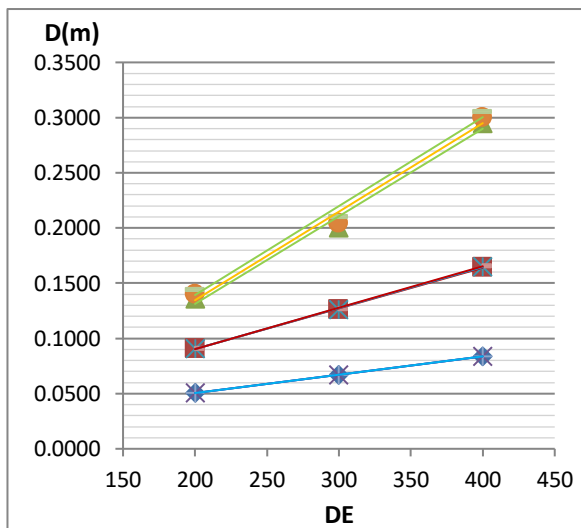
Figura D.92. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



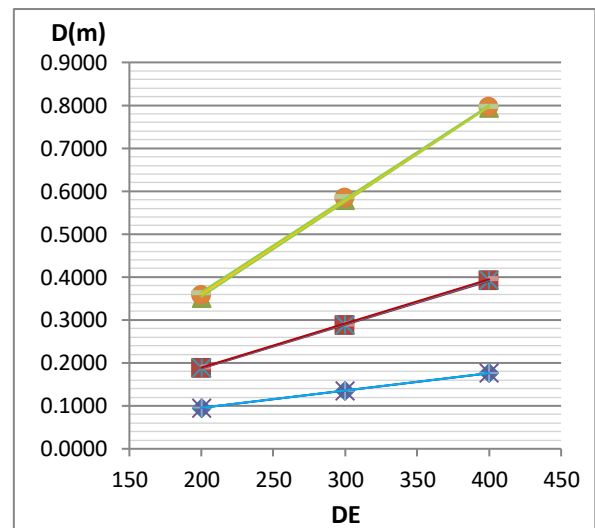
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

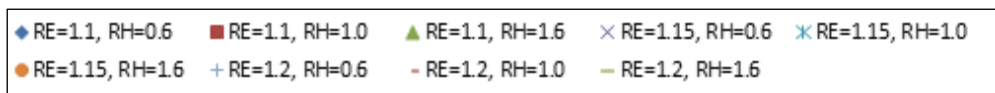
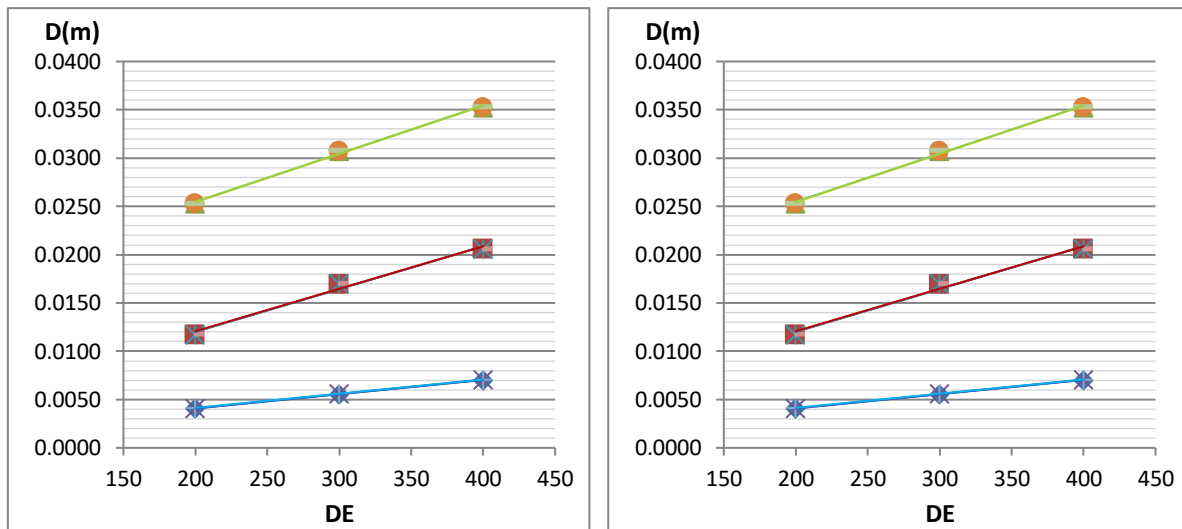
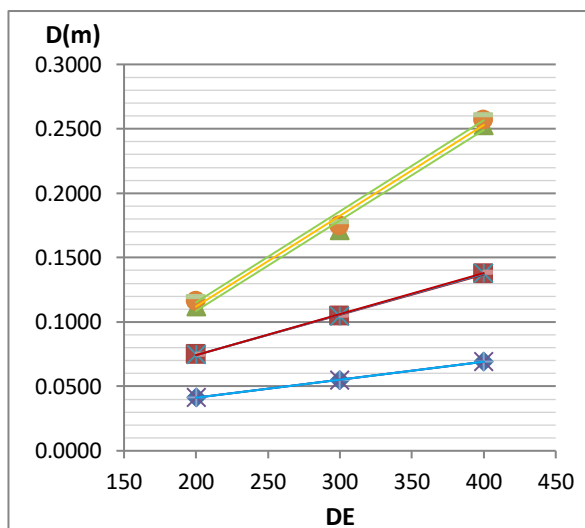


Figura D.93. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

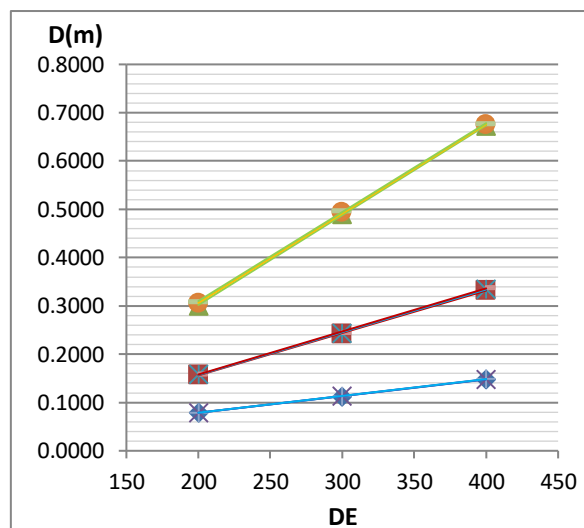


a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$

b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

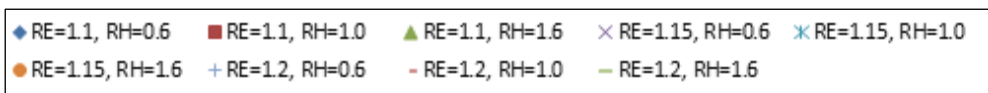


Figura D.94. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

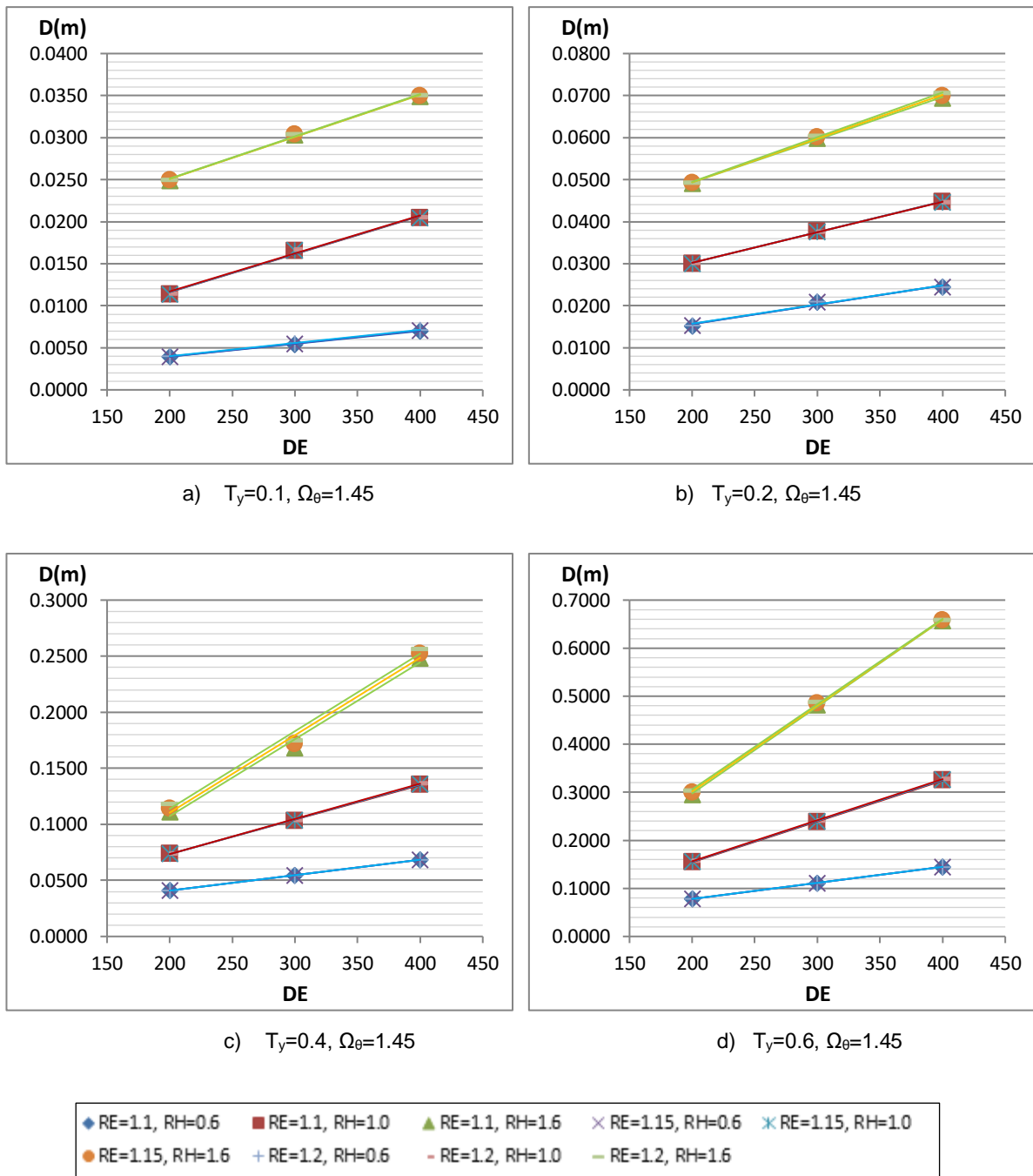
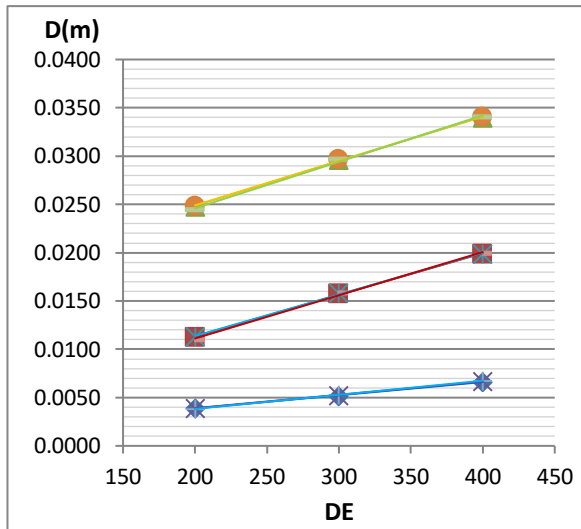
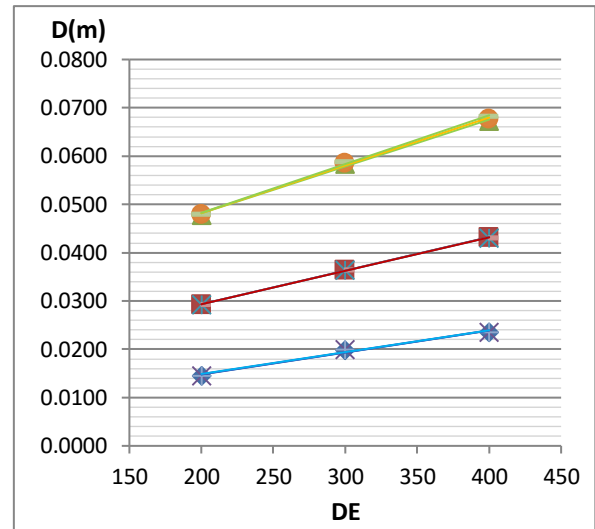


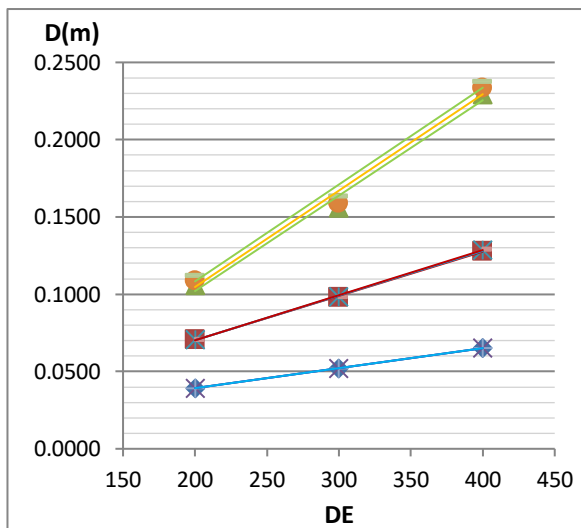
Figura D.95. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



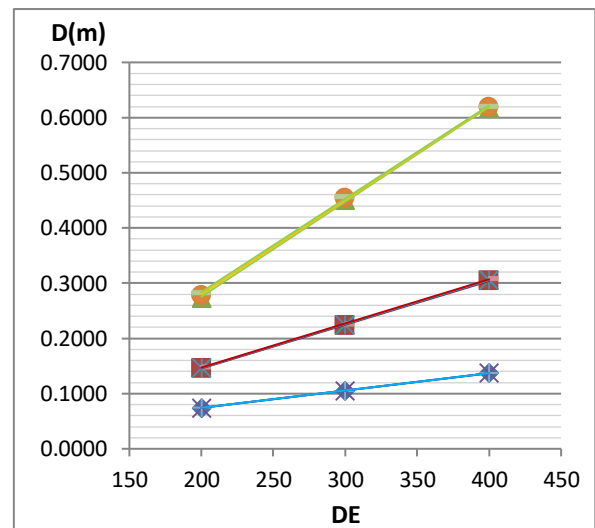
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

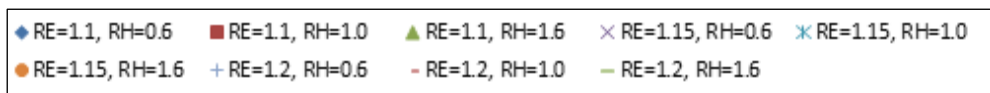


Figura D.96. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

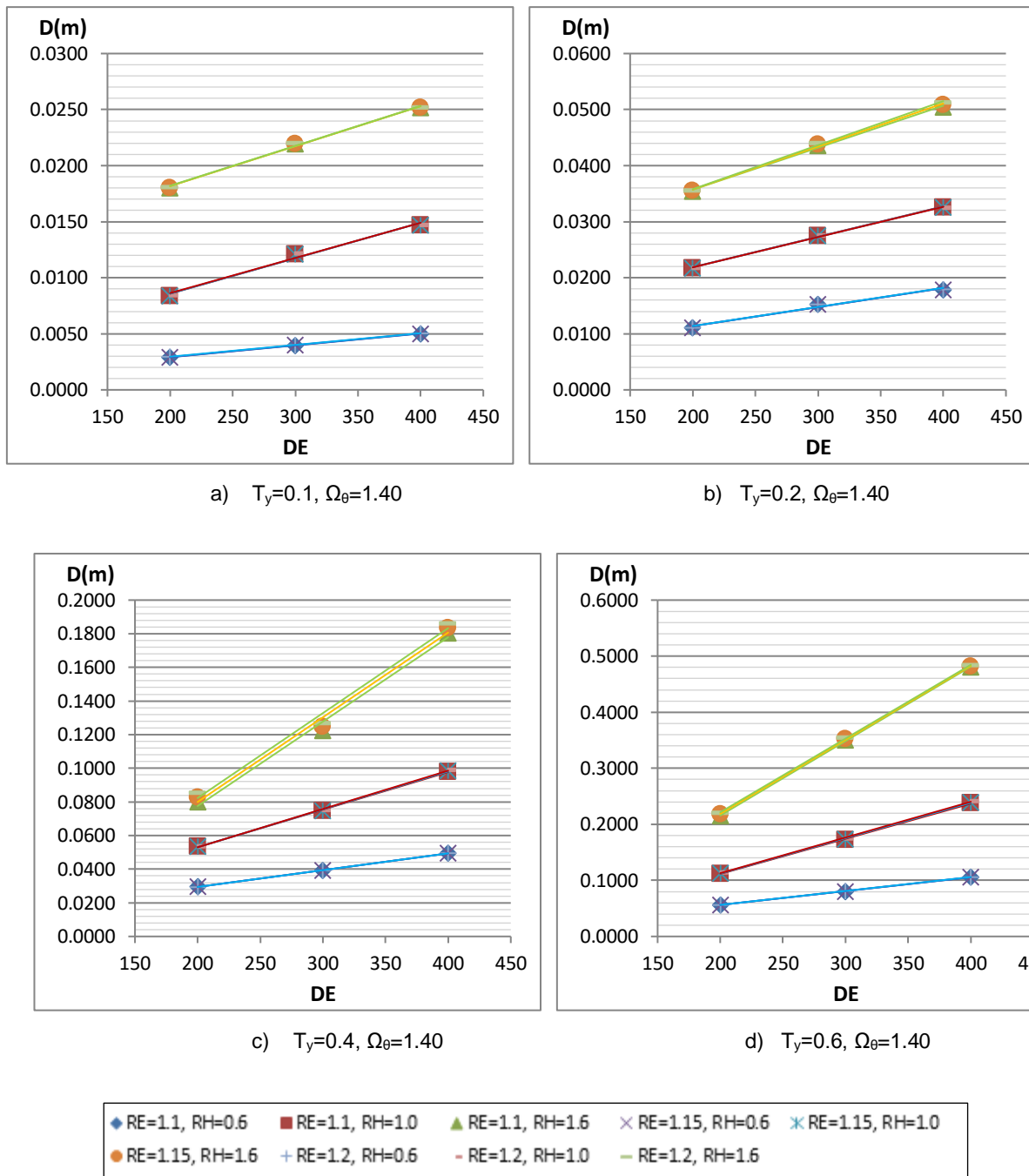


Figura D.97. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

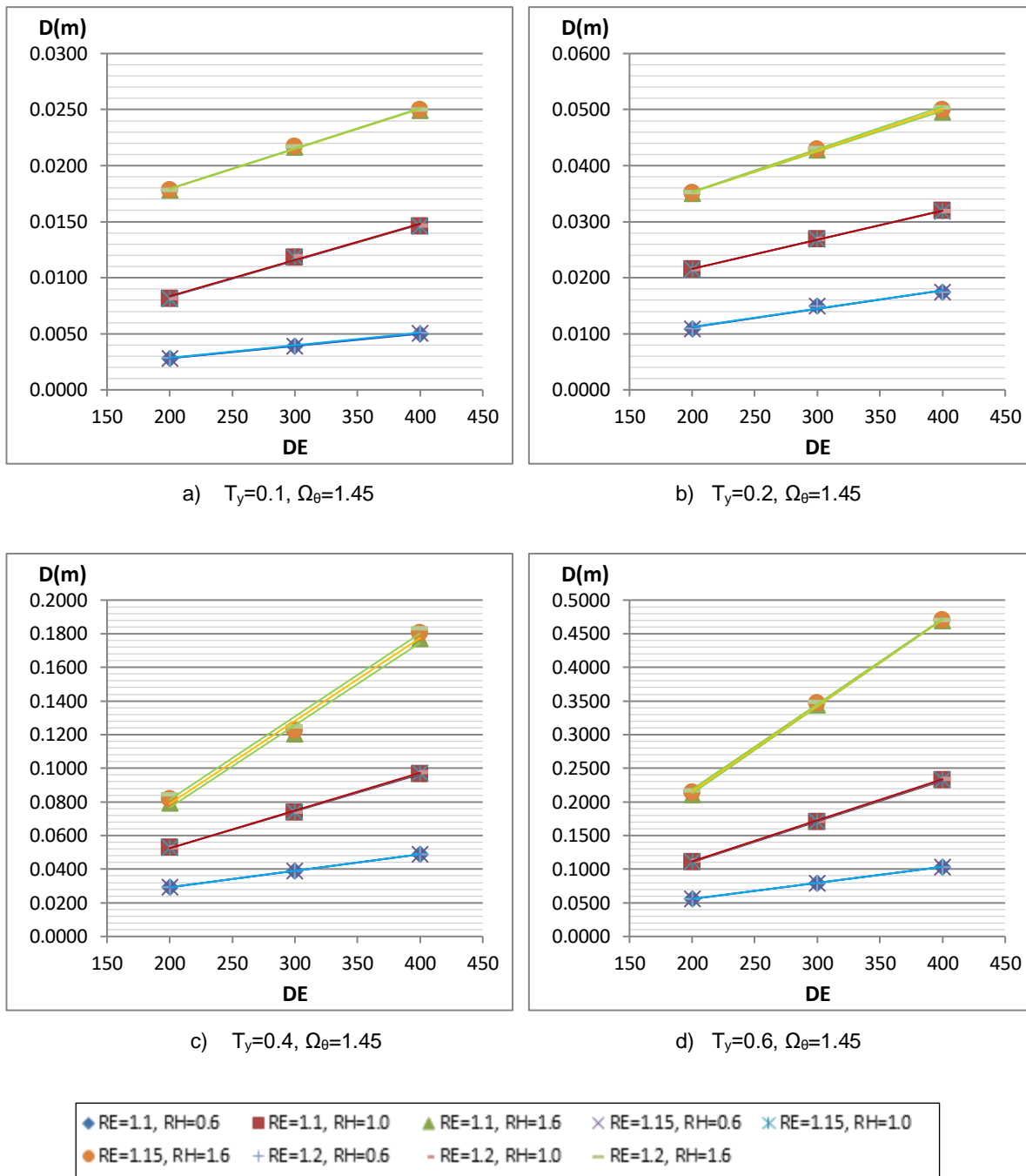
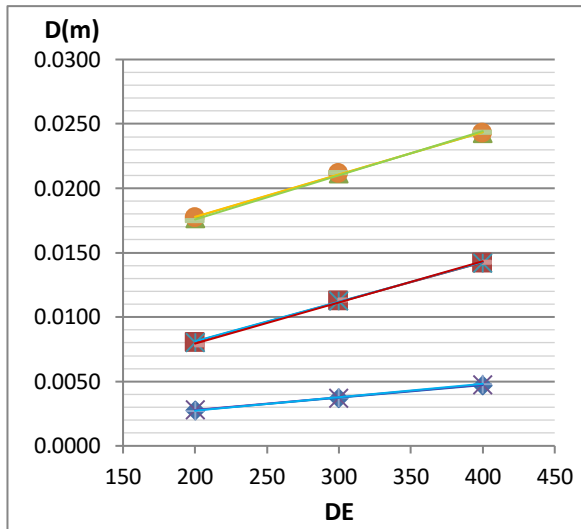
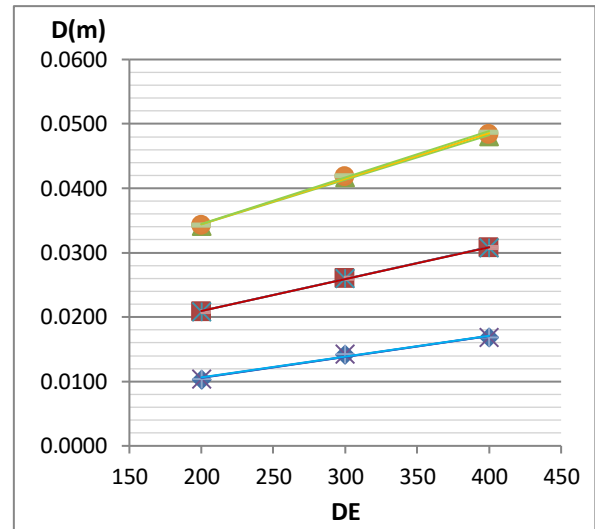


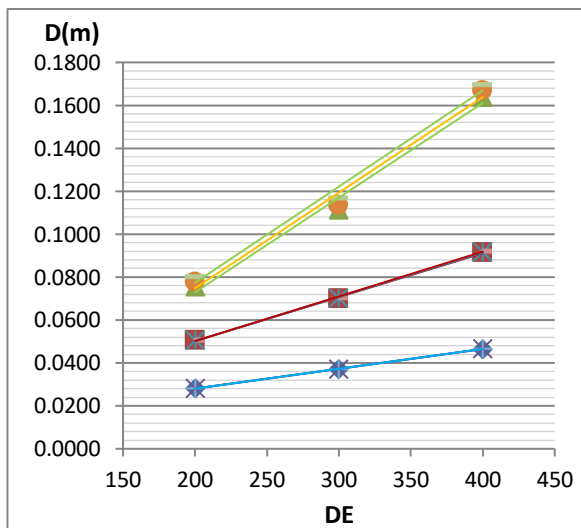
Figura D.98. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



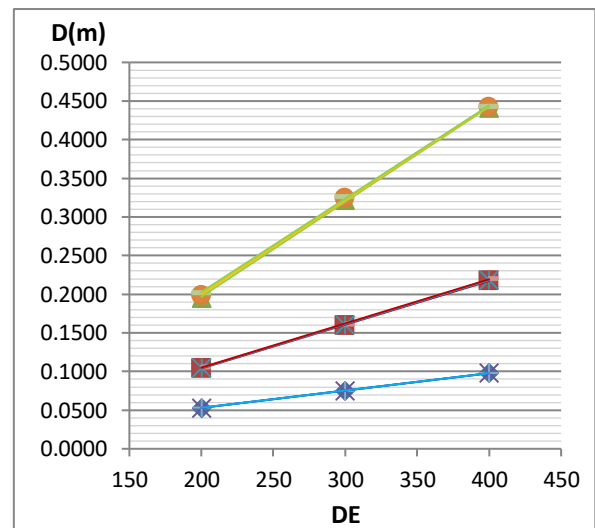
a) $T_y=0.1, \Omega_0=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_0=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_0=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_0=1.55$

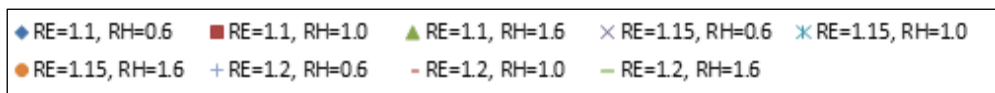


Figura D.99. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_0 igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

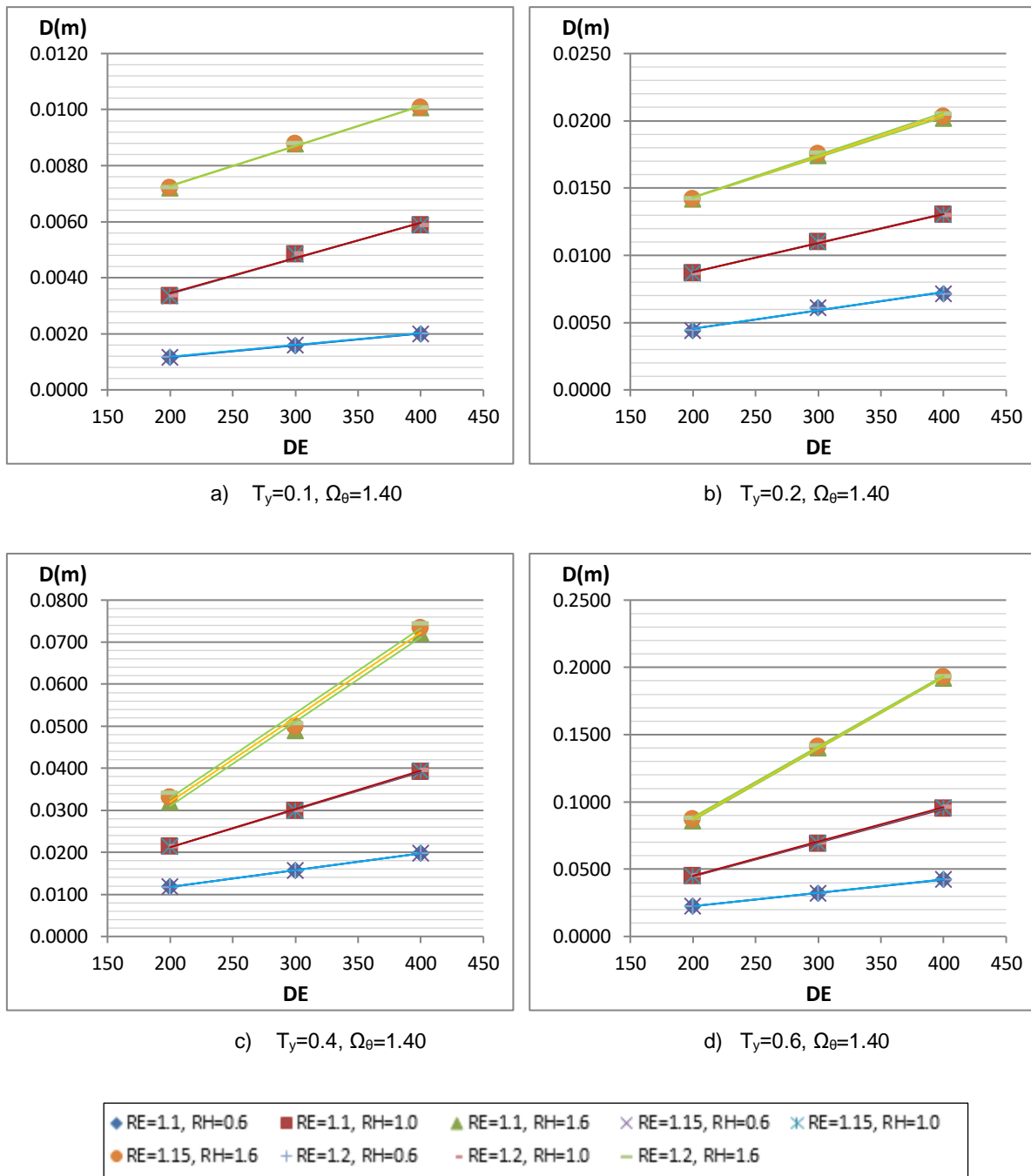
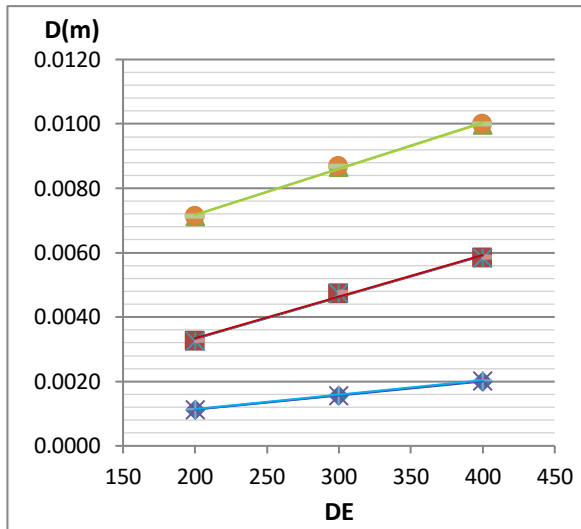
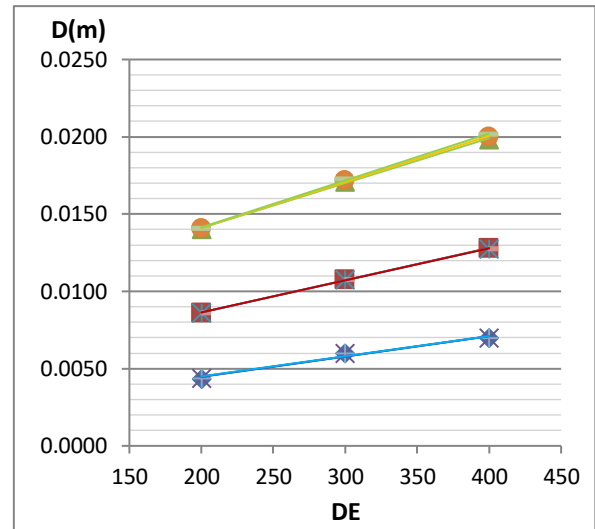


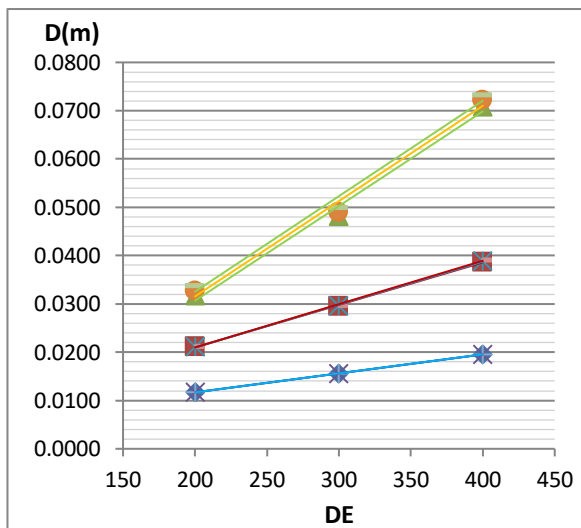
Figura D.100. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



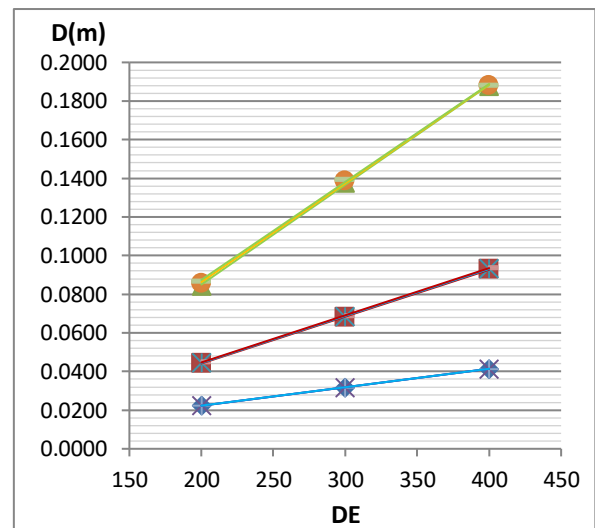
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

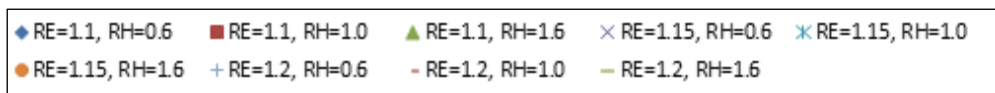


Figura D.101. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

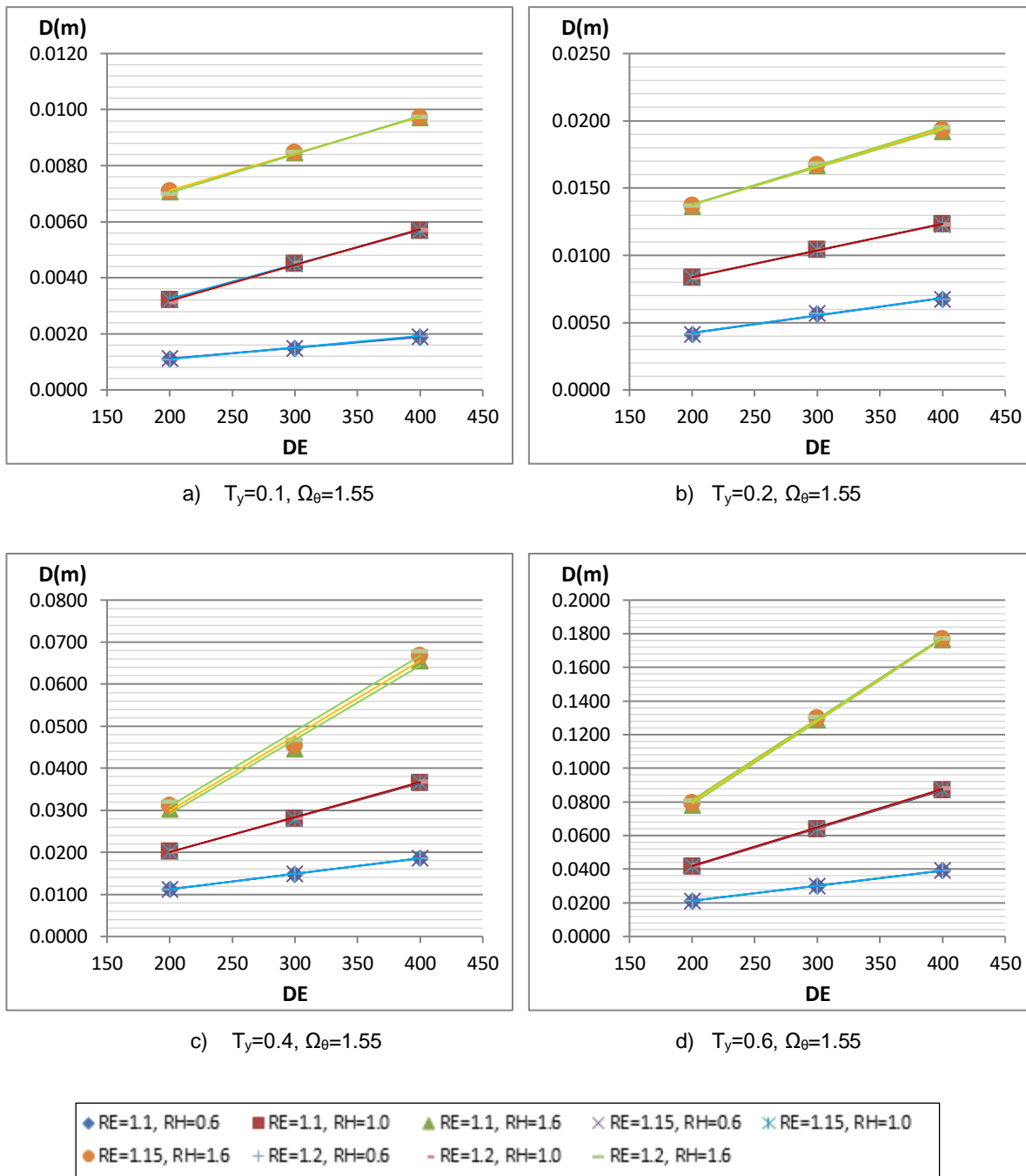


Figura D.102. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

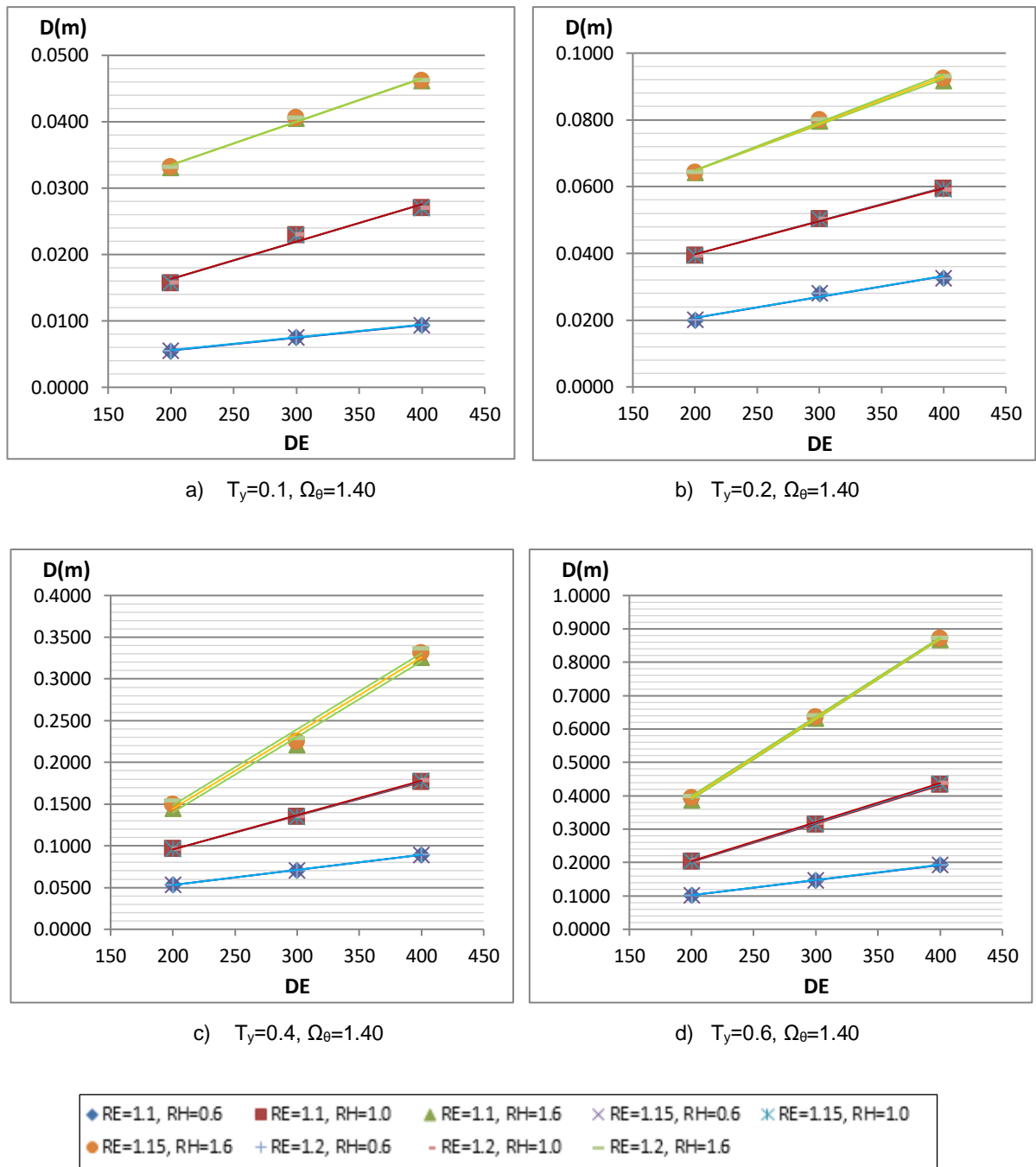


Figura D.103. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

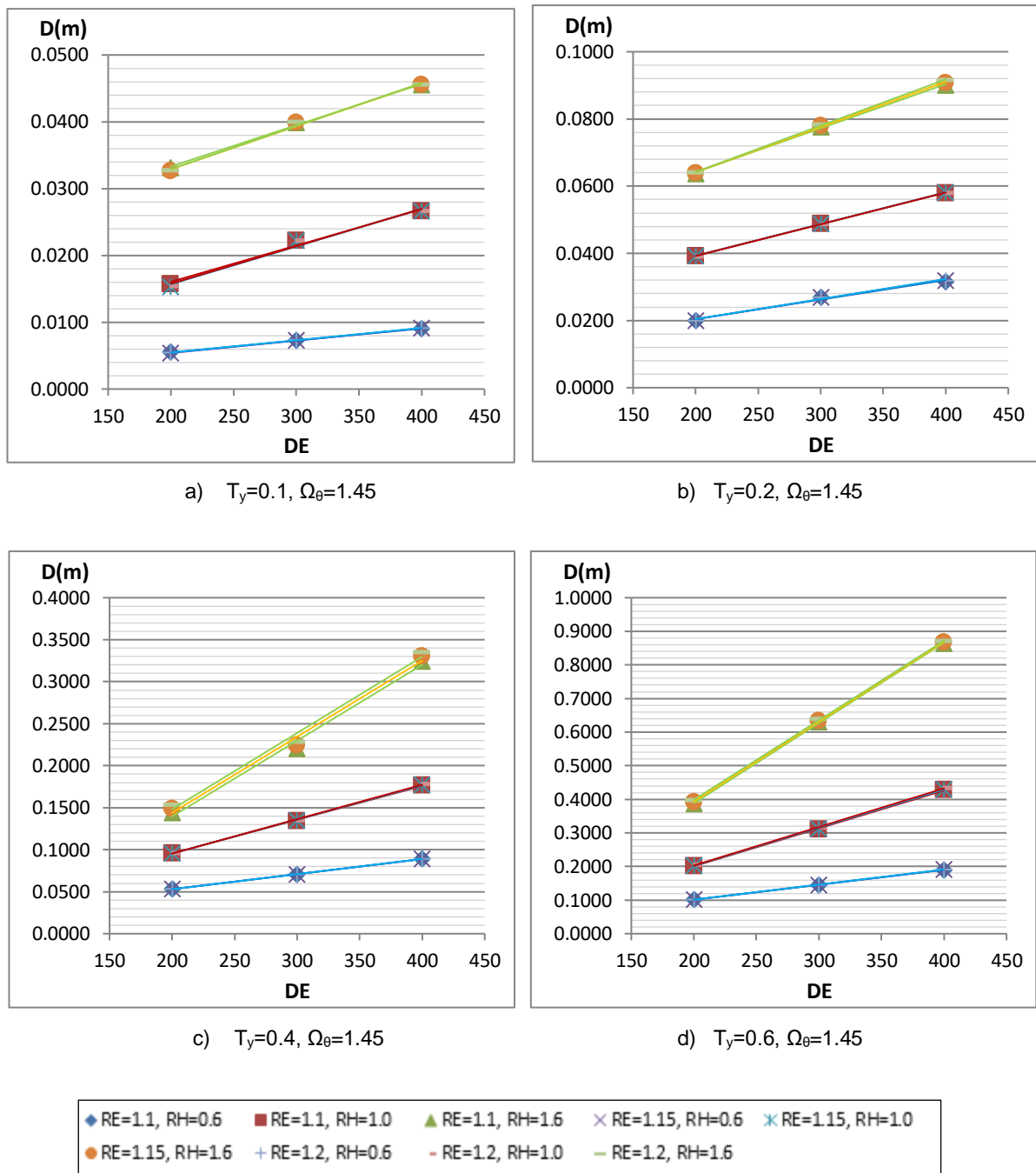
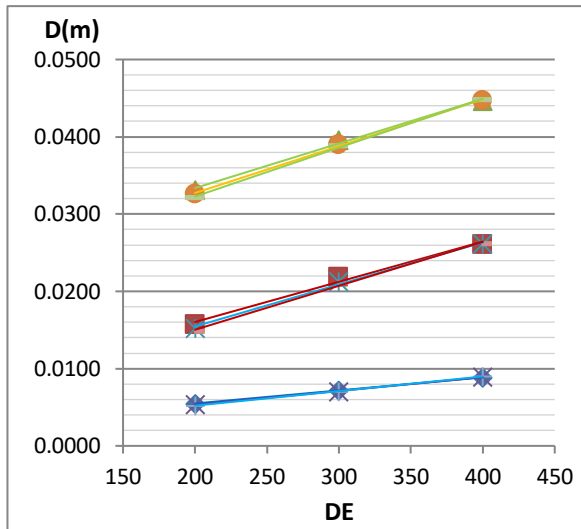
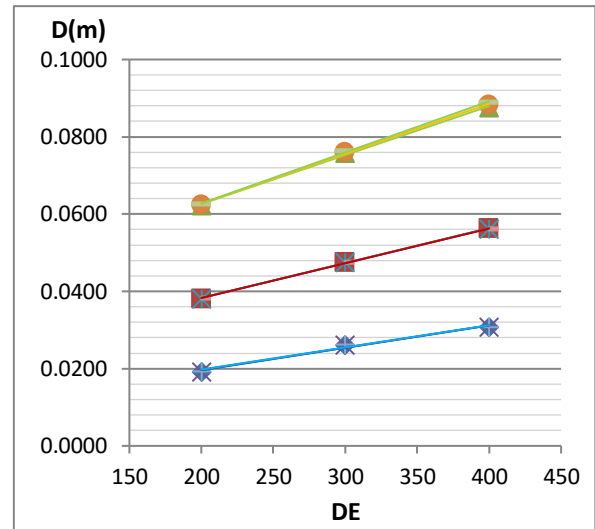


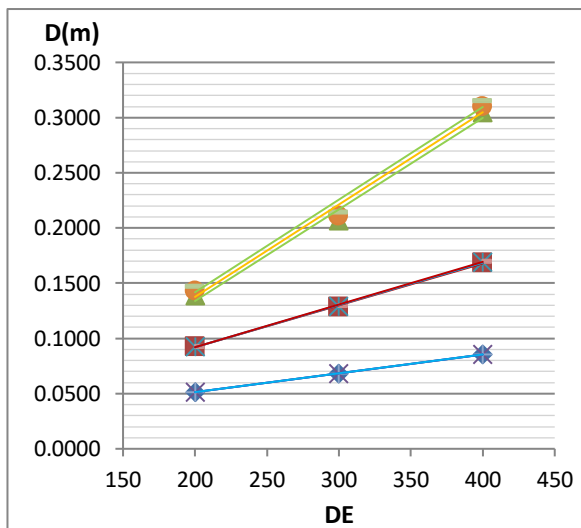
Figura D.104. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



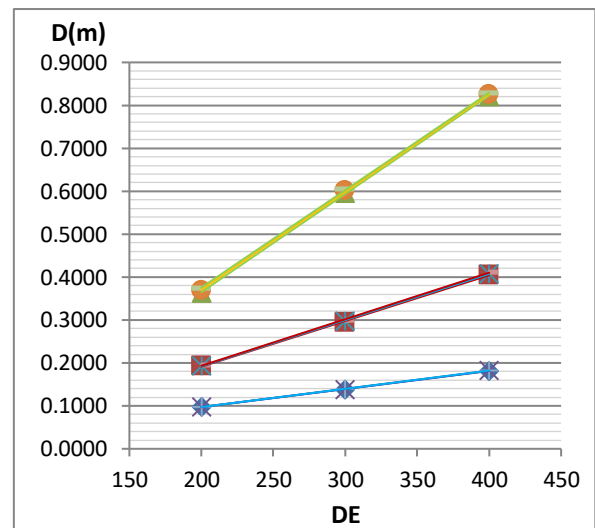
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

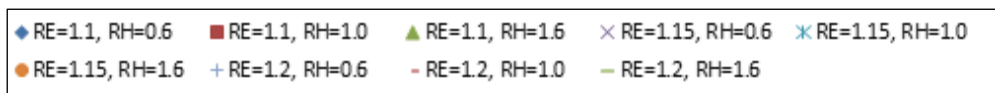


Figura D.105. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

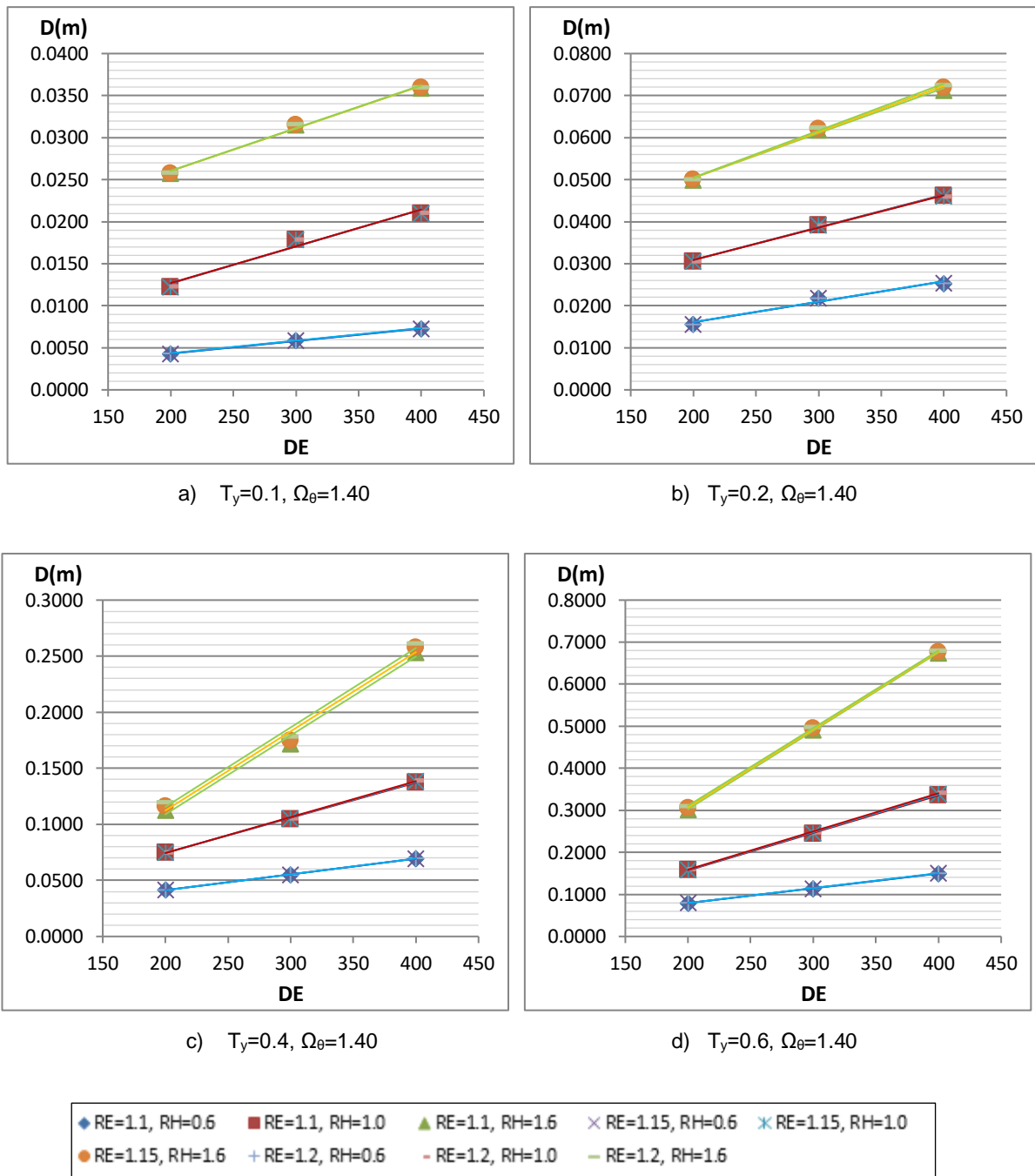
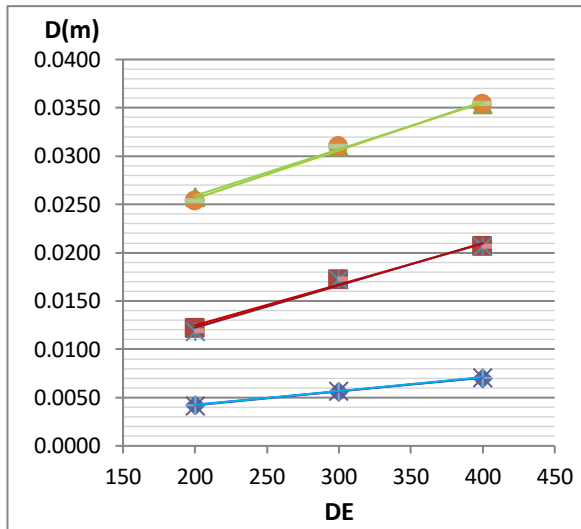
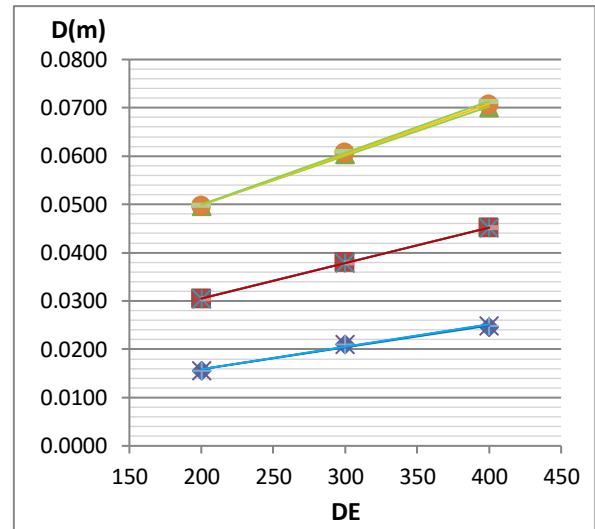


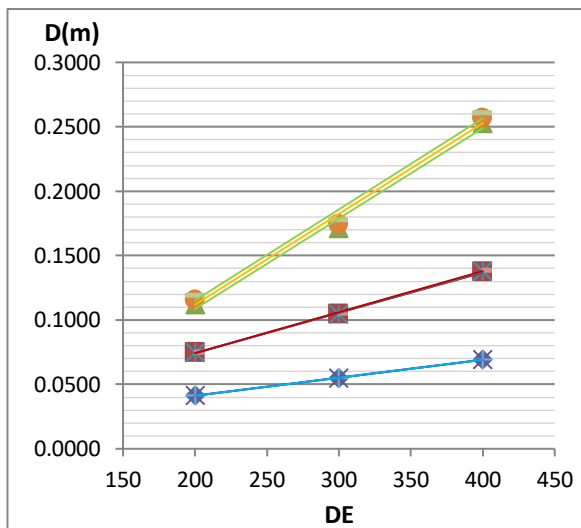
Figura D.106. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



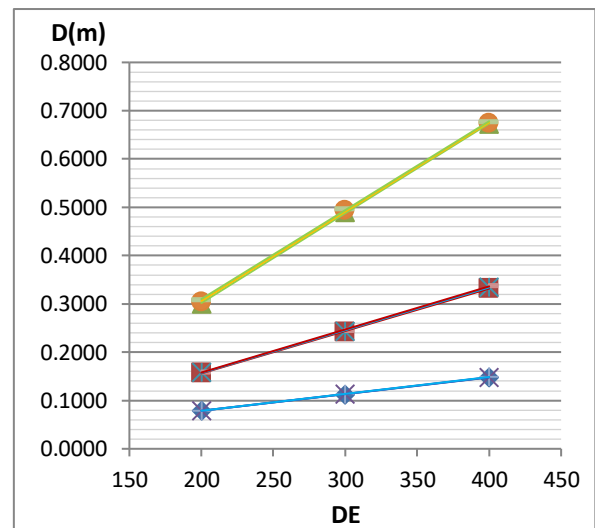
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

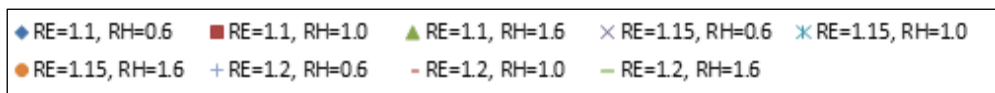
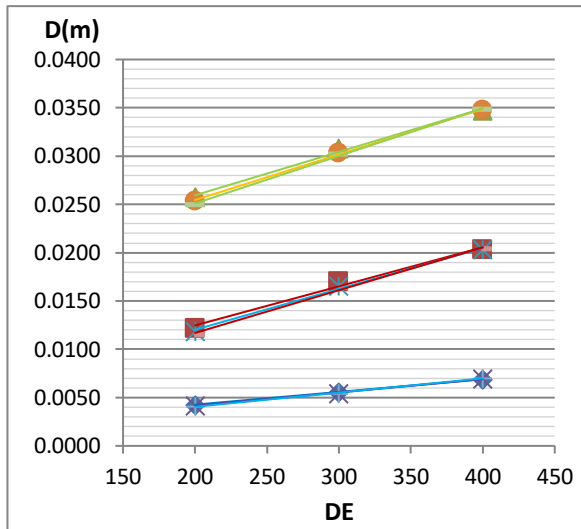
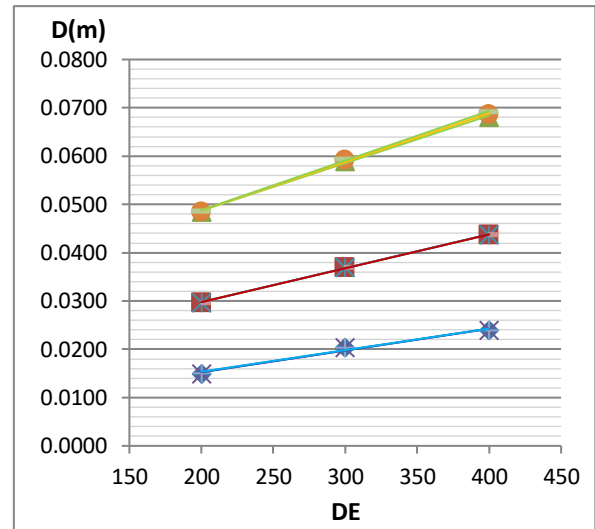


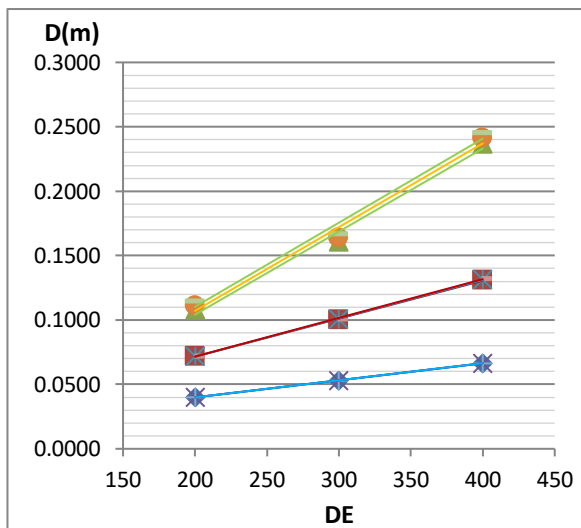
Figura D.107. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



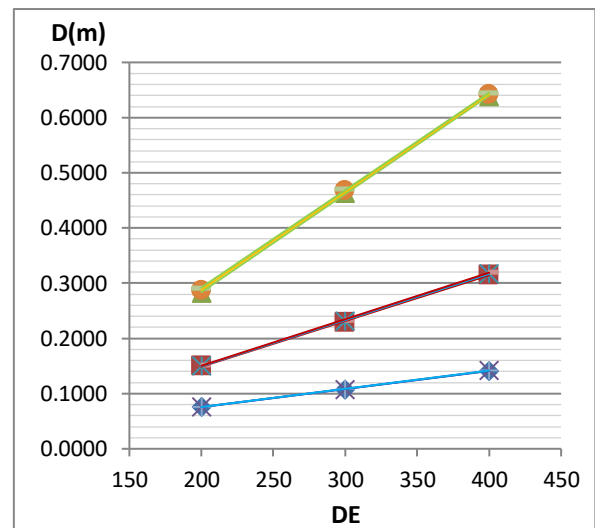
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

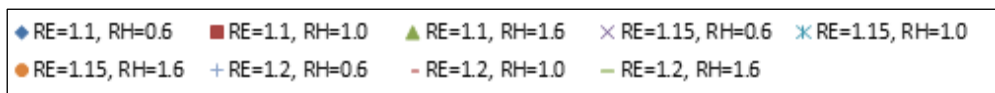


Figura D.108. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.

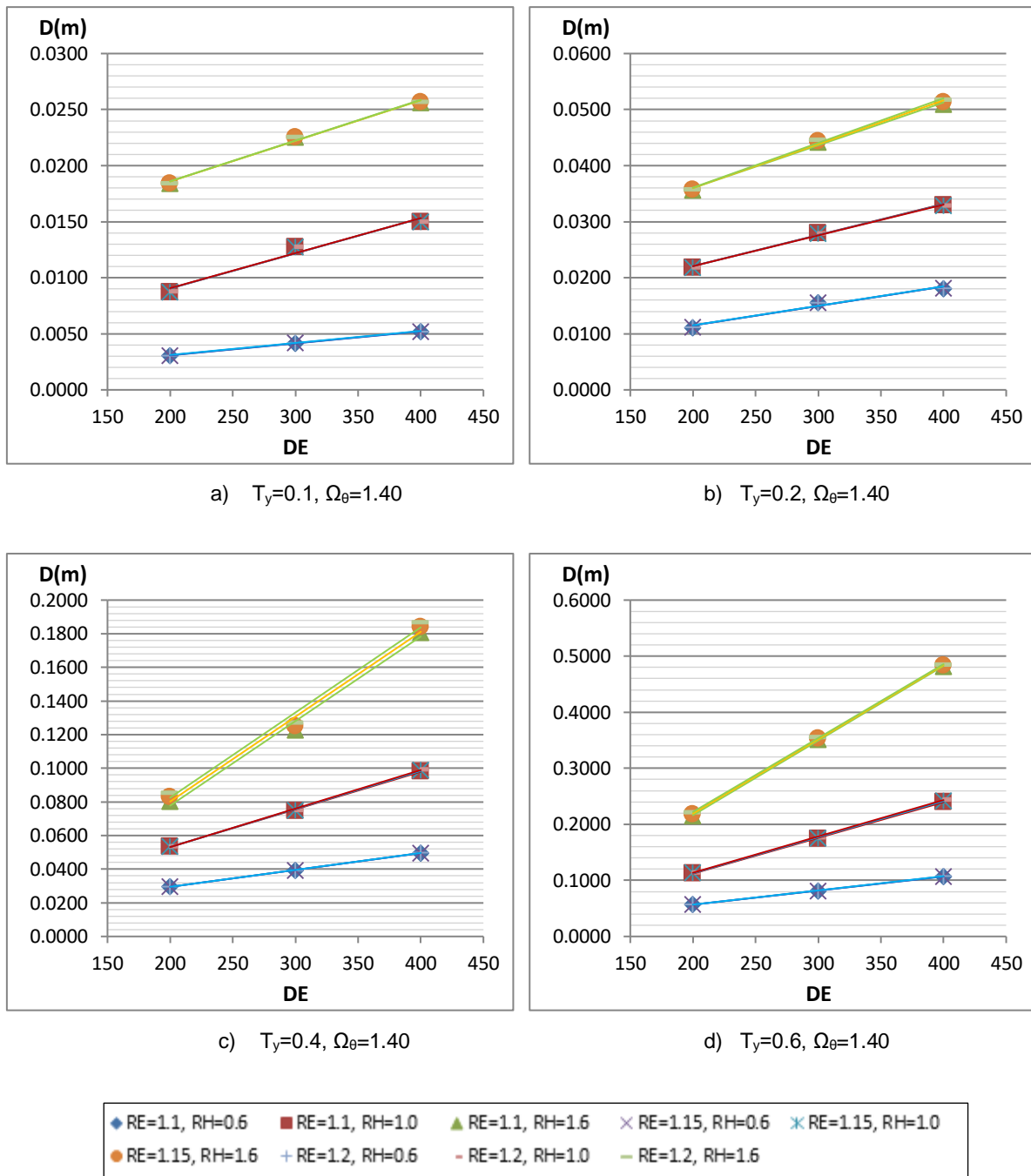
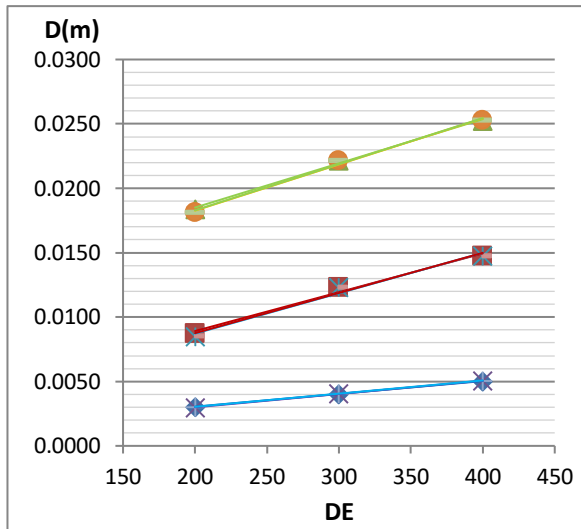
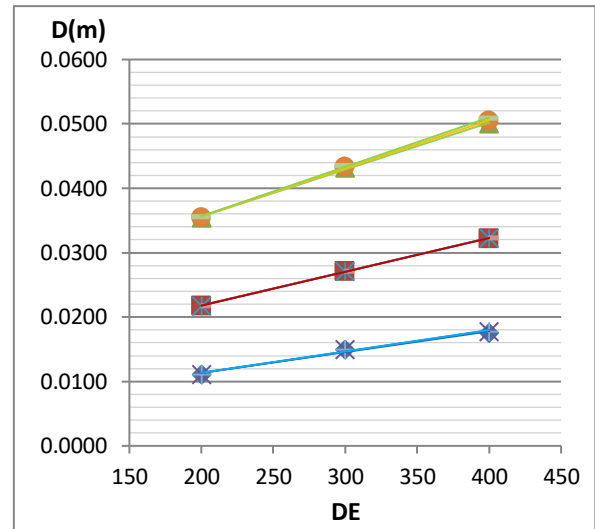


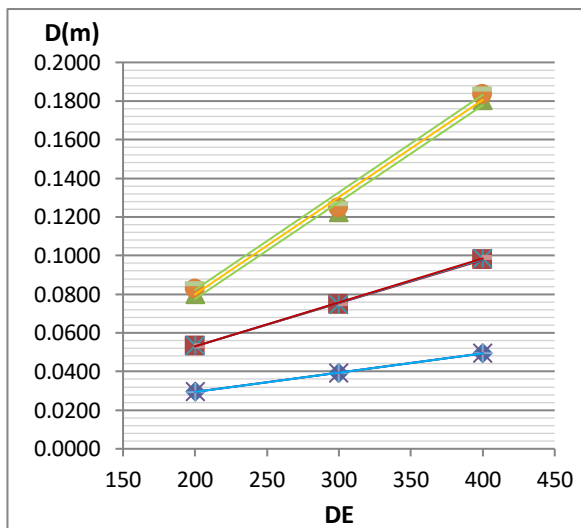
Figura D.109. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_0 igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



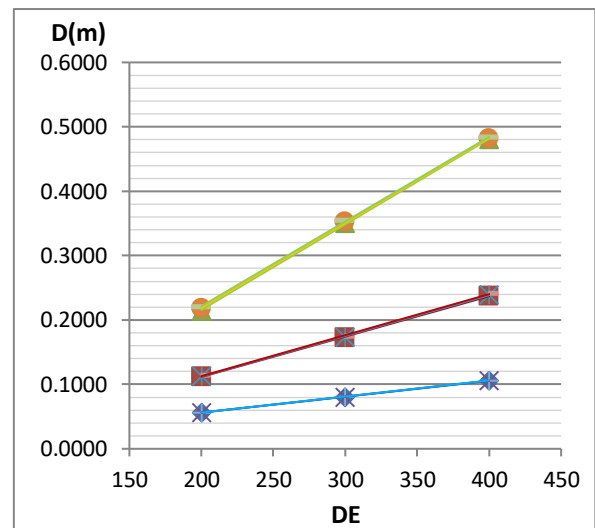
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

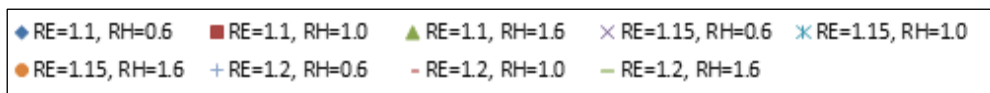
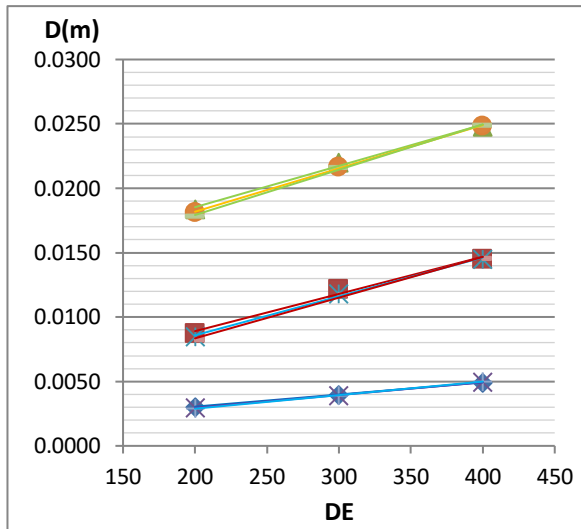
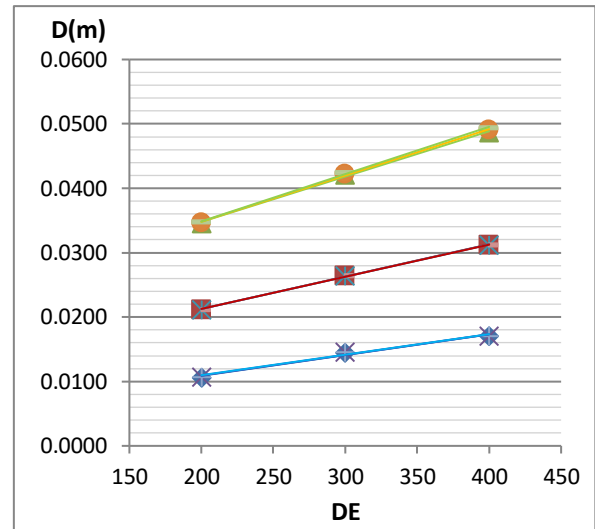


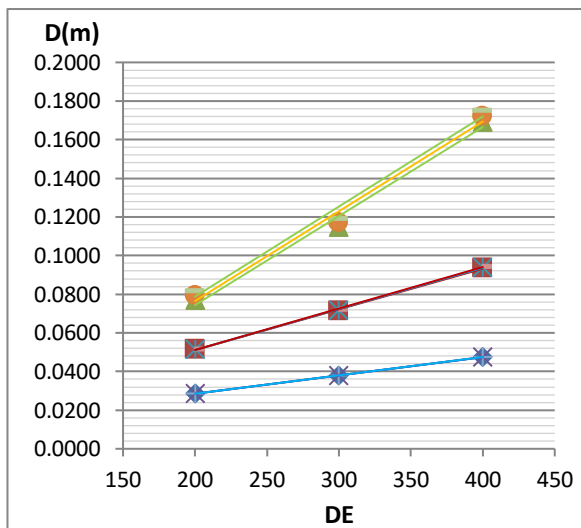
Figura D.110. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



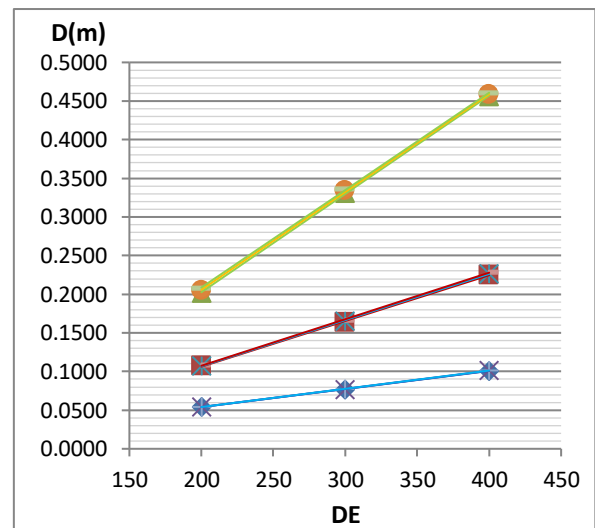
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

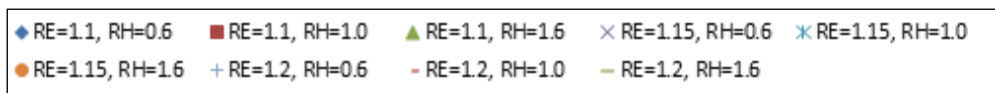


Figura D.111. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.

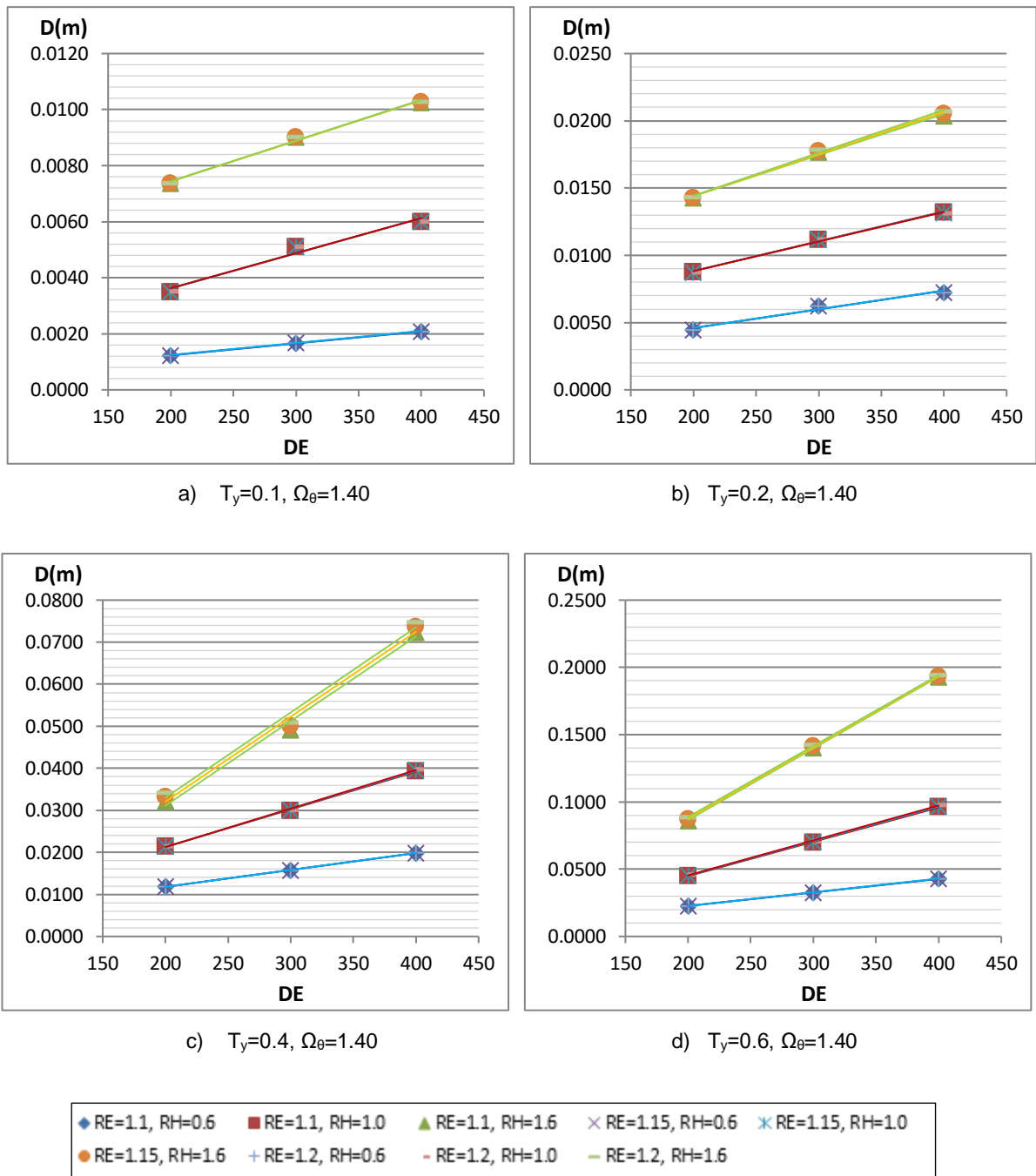


Figura D.112. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

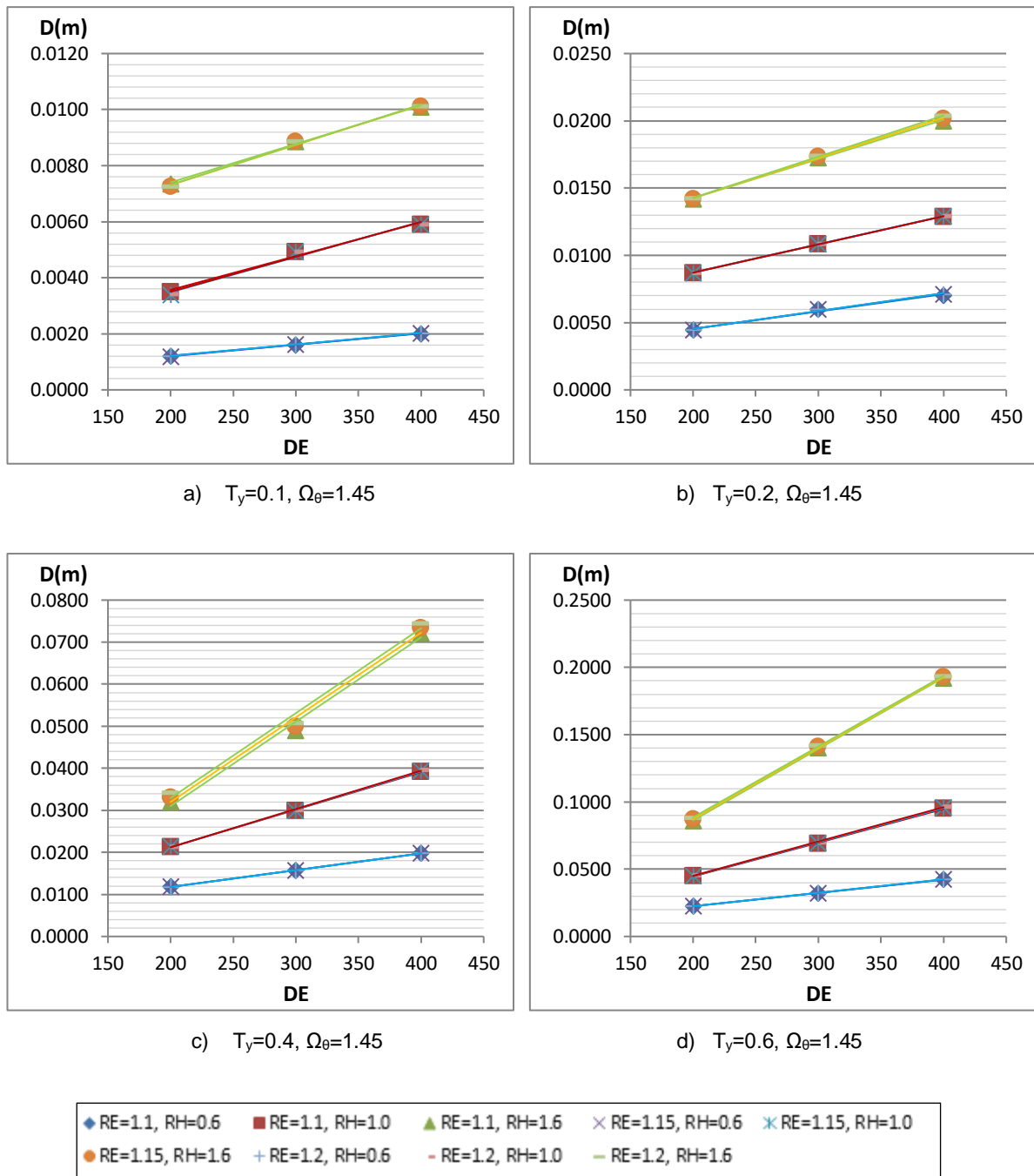
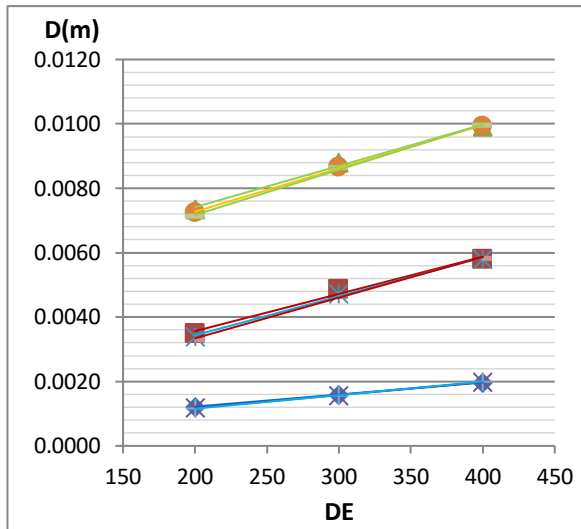
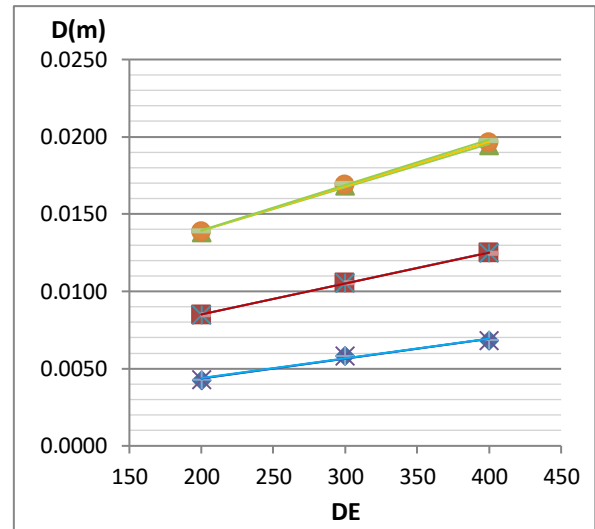


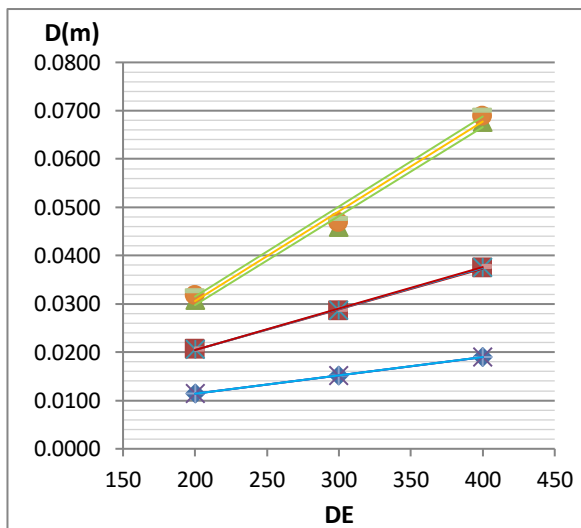
Figura D.113. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



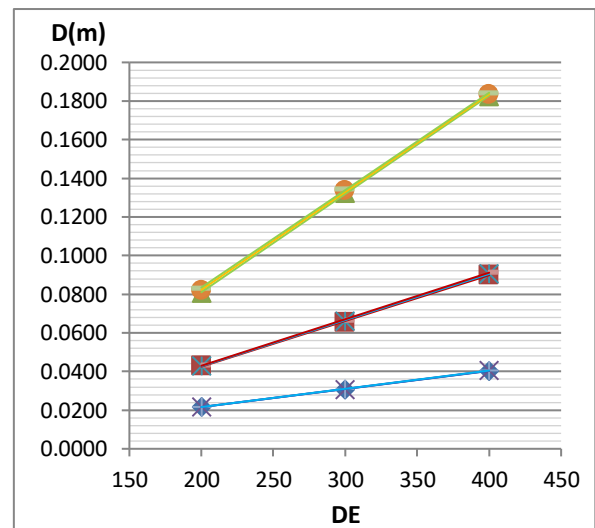
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

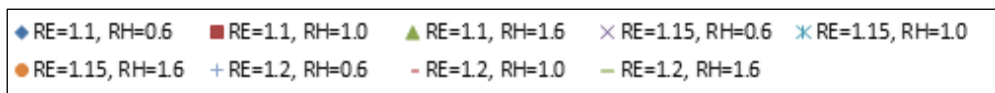


Figura D.114. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

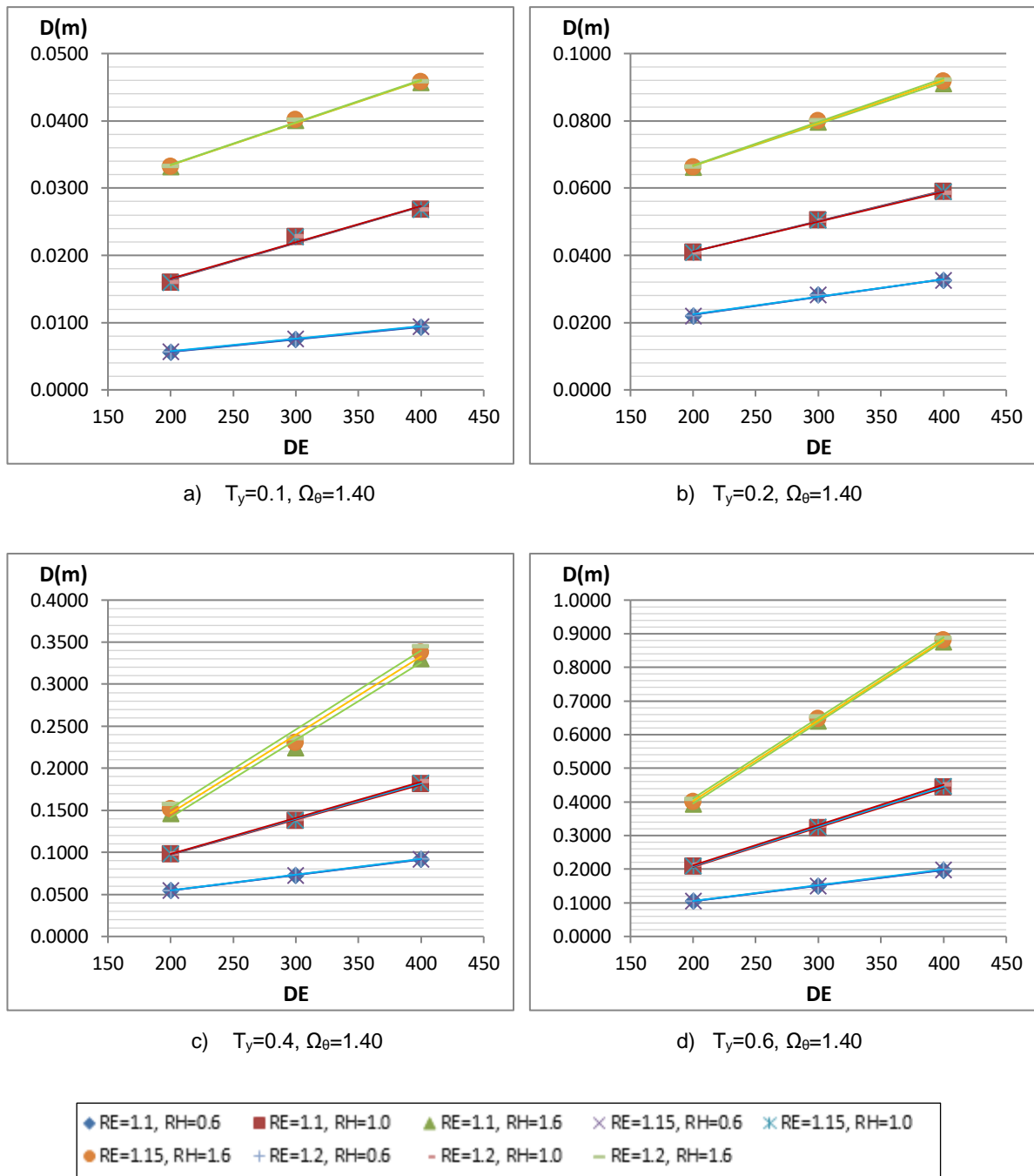


Figura D.115. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.

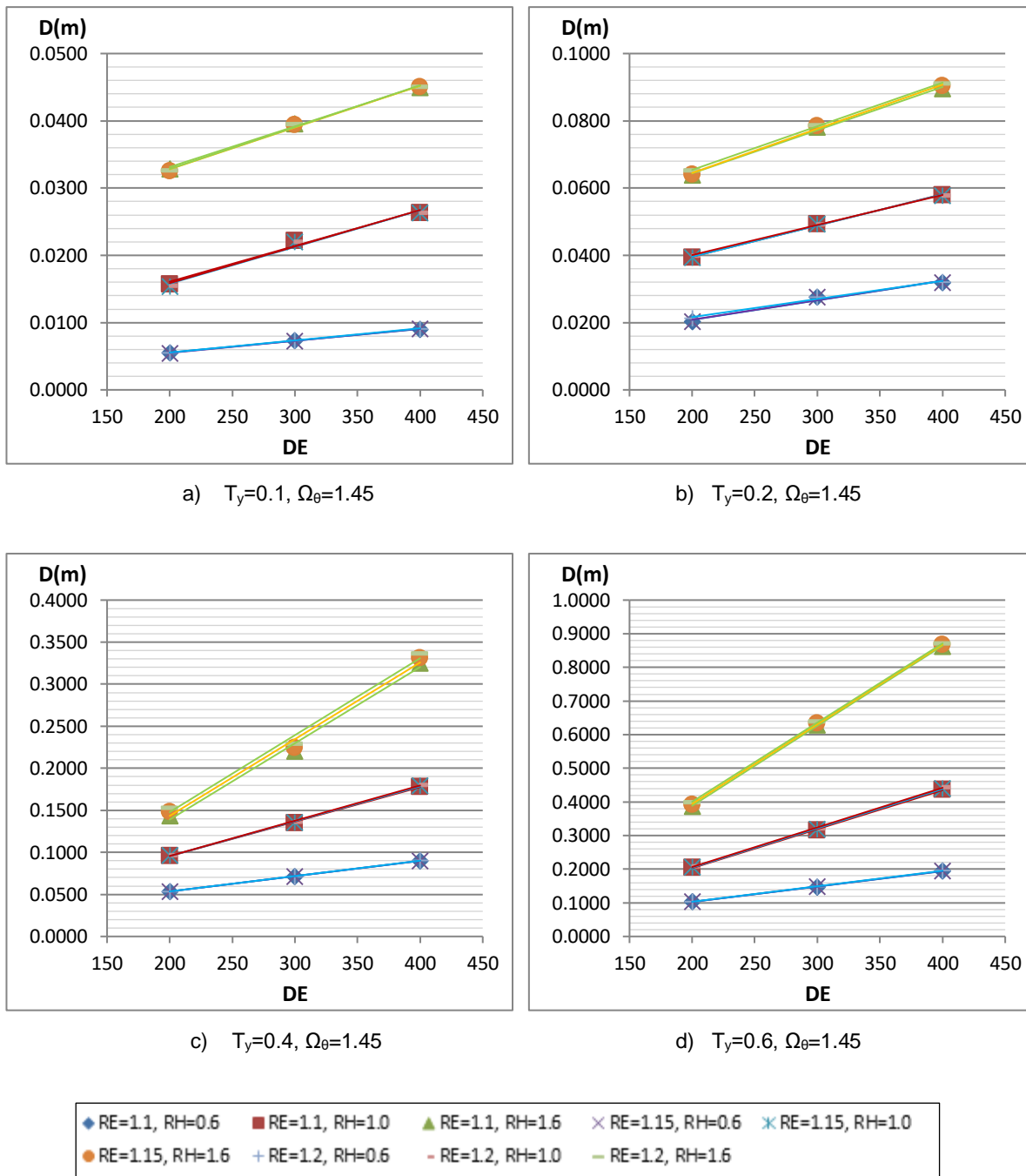


Figura D.116. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.

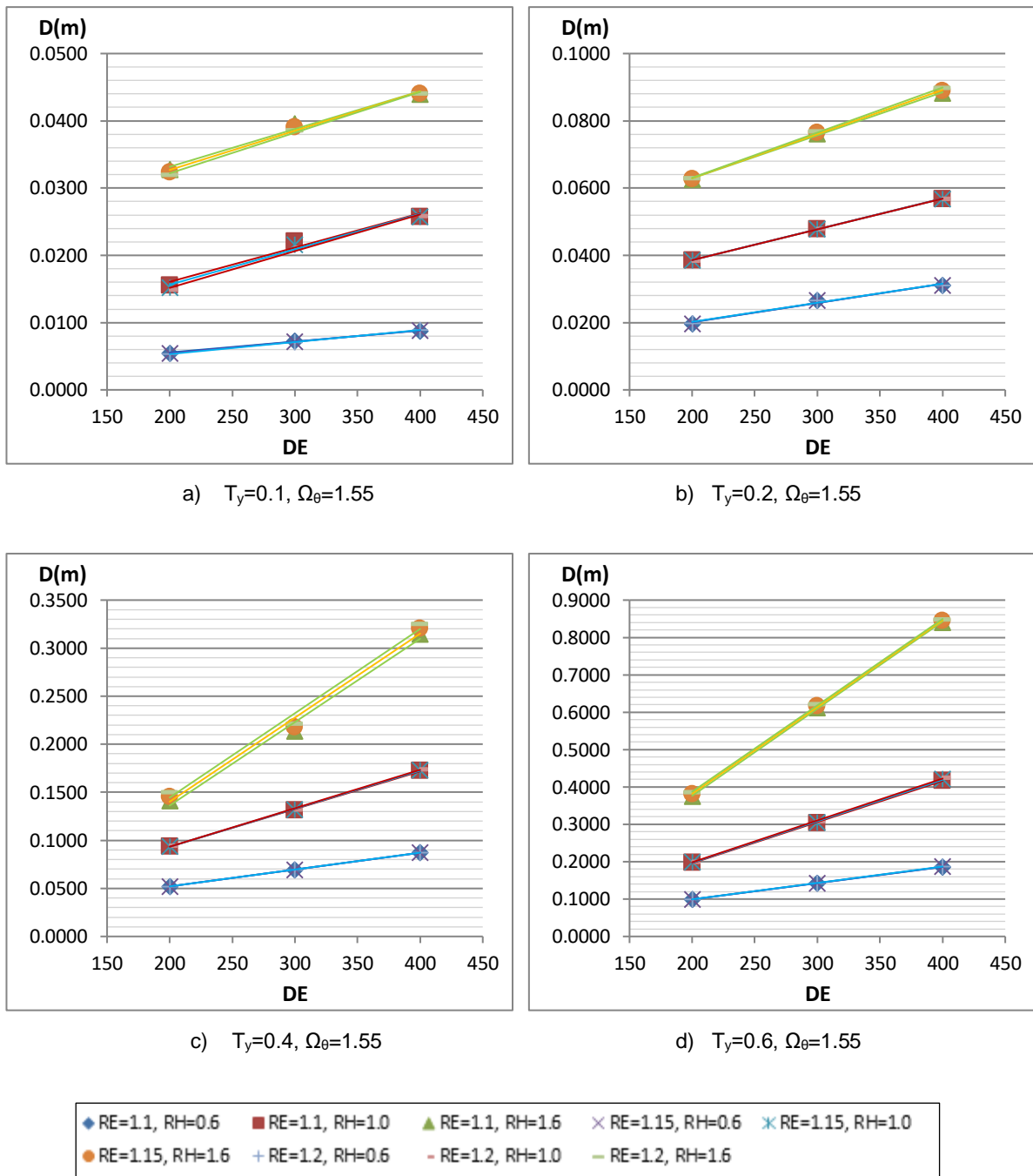
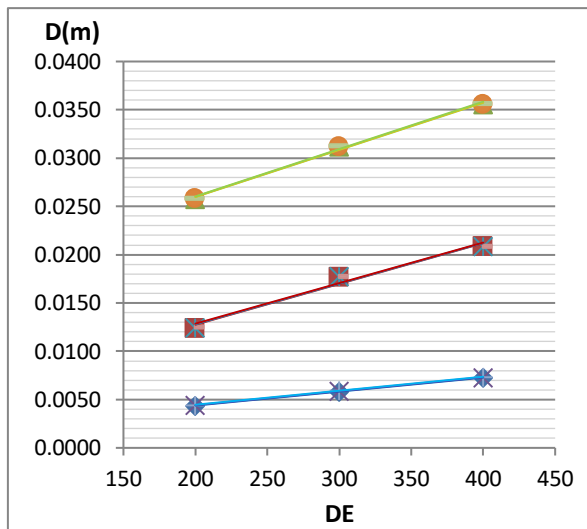
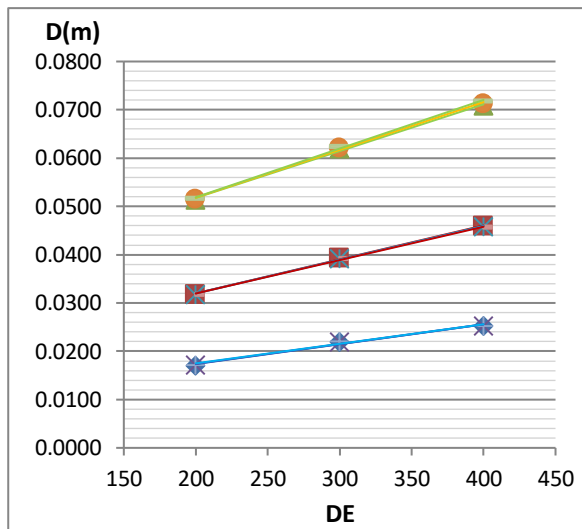


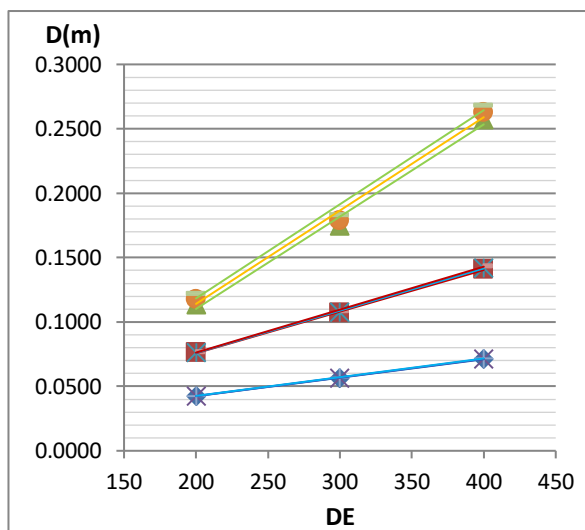
Figura D.117. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



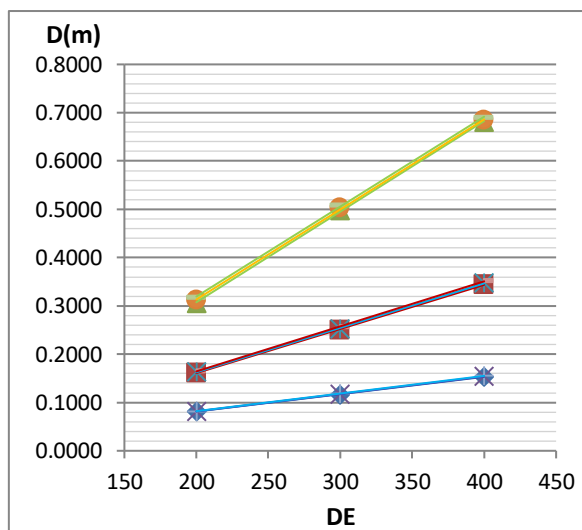
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

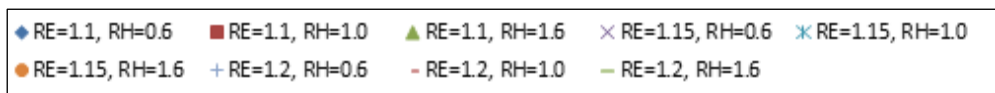


Figura D.118. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.

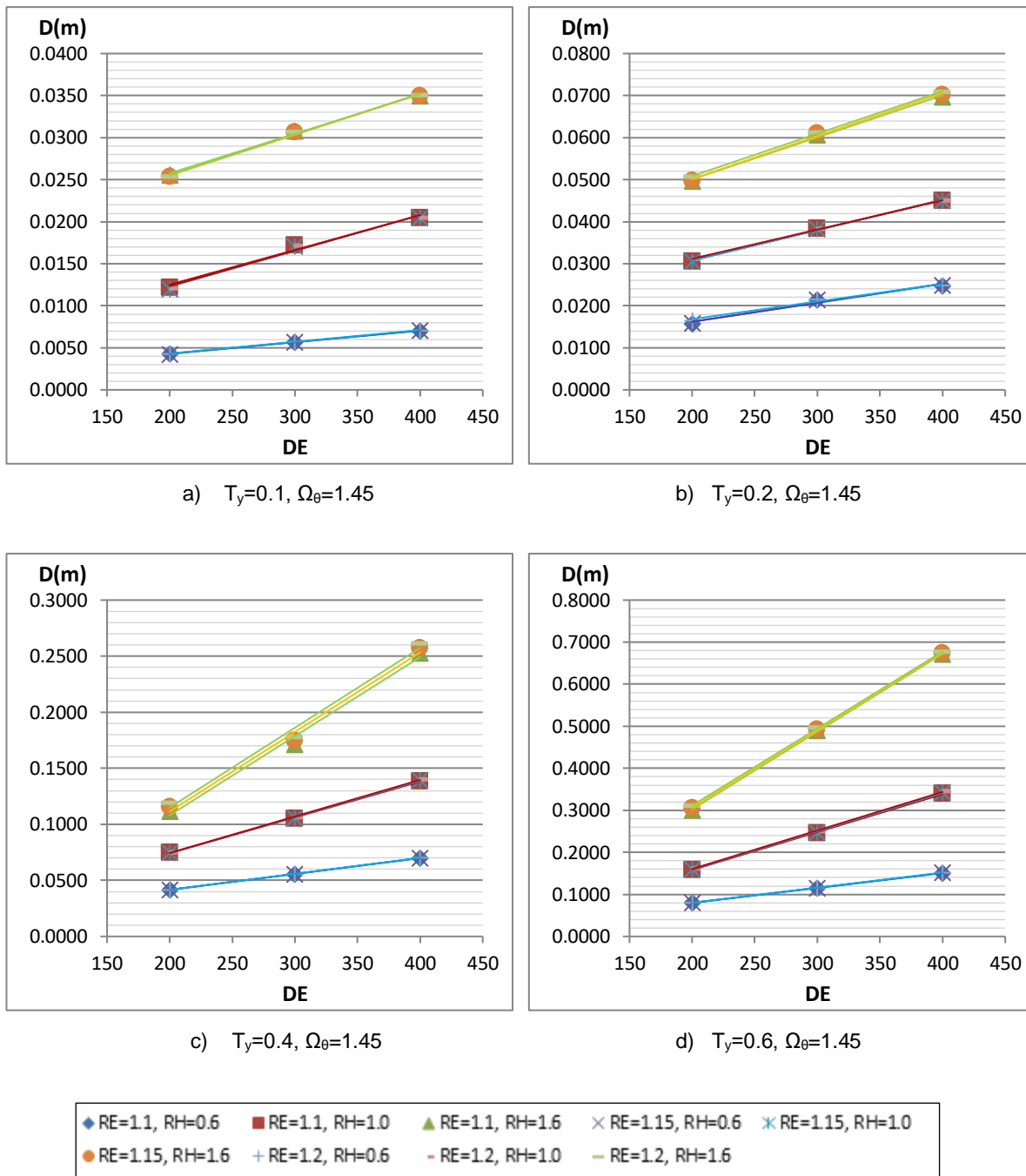


Figura D.119. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.

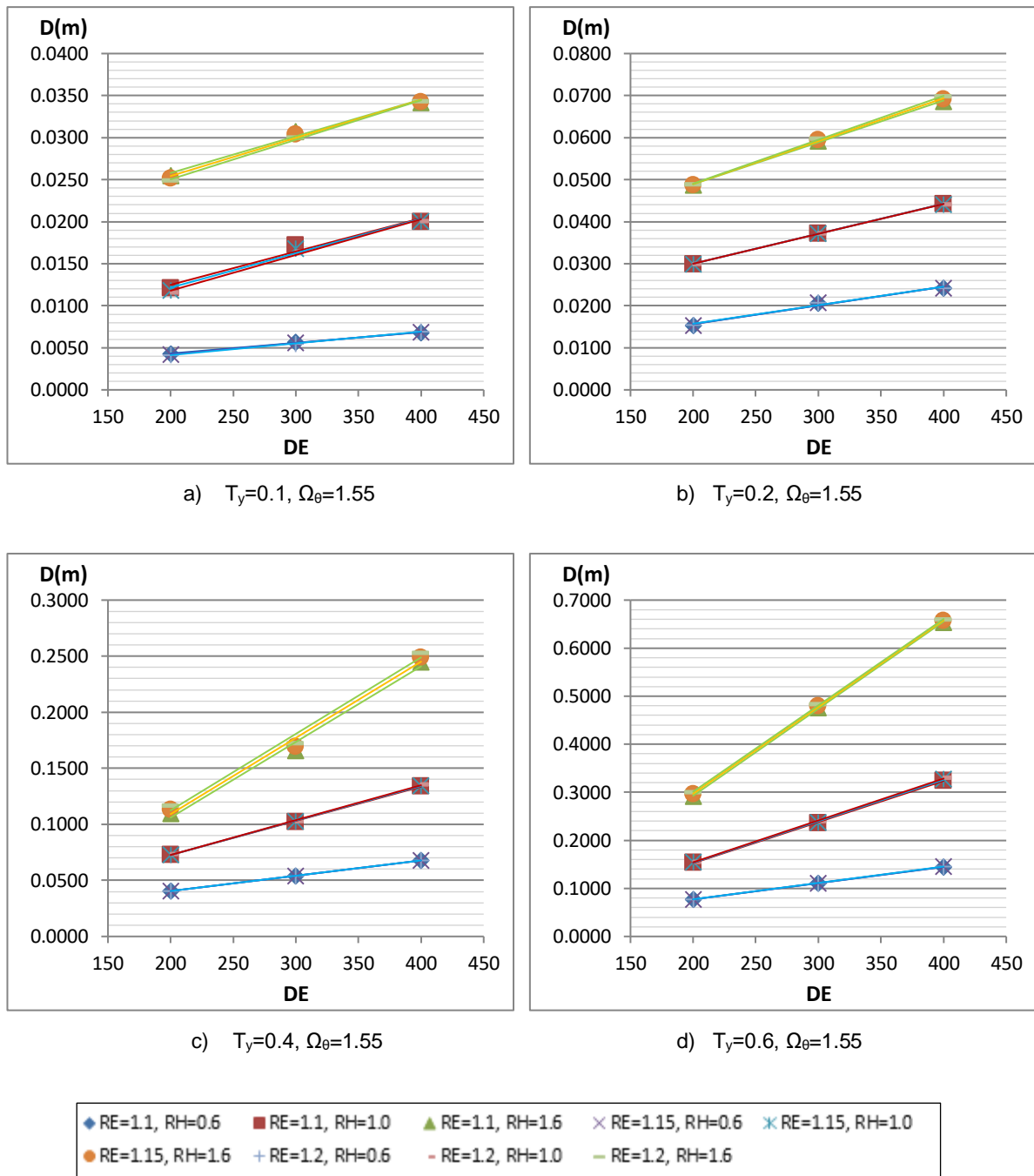
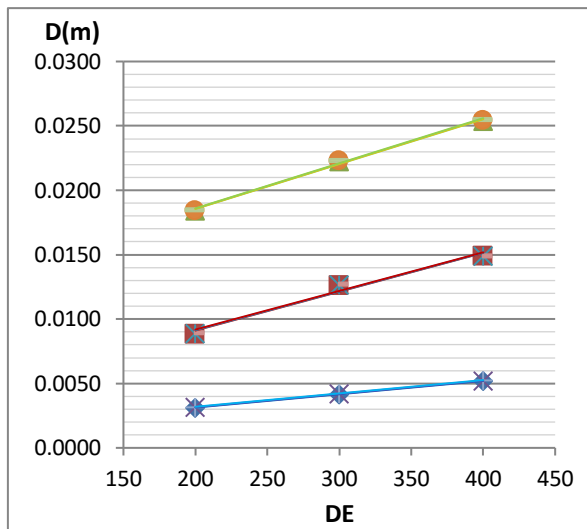
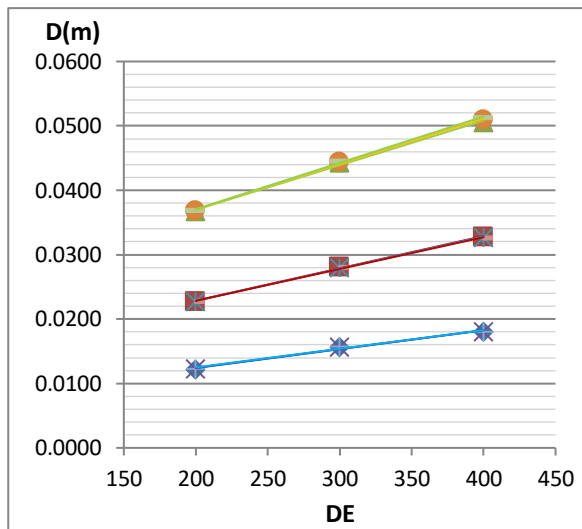


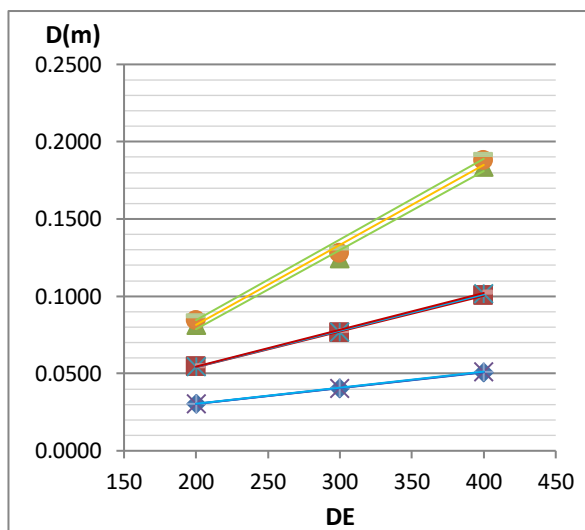
Figura D.120. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



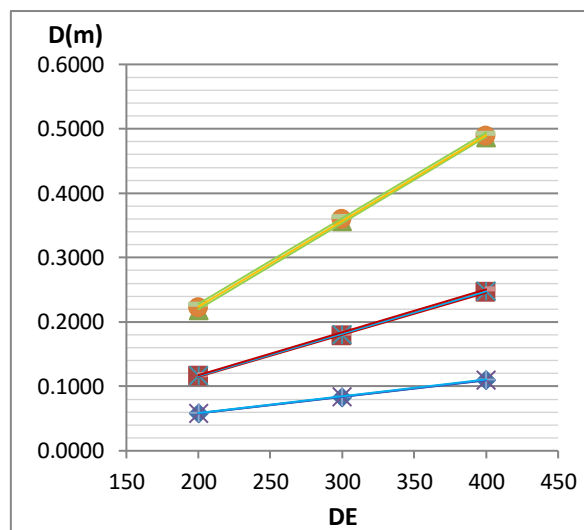
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

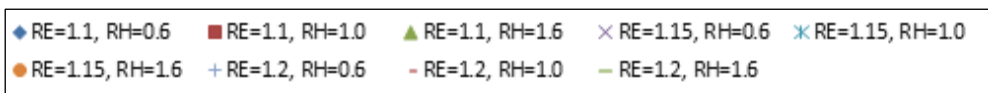
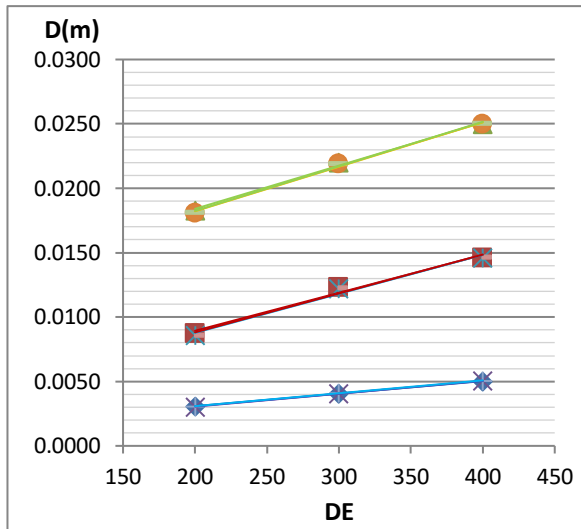
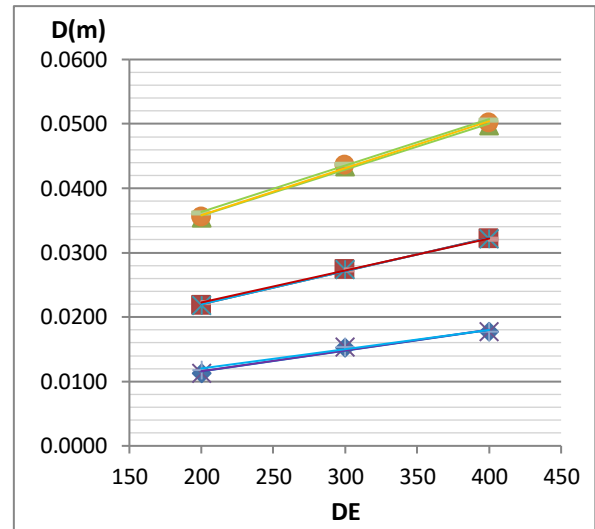


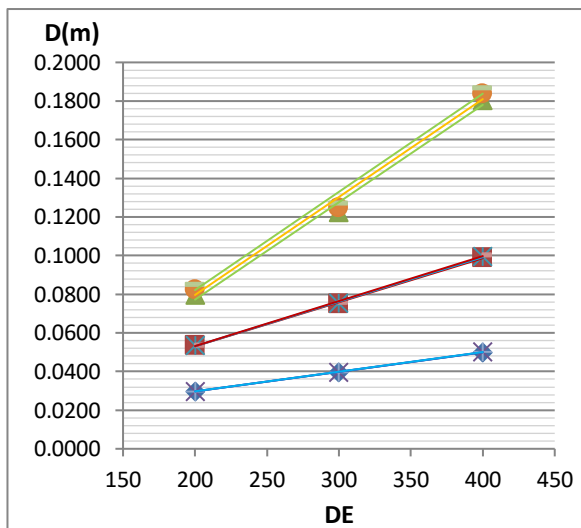
Figura D.121. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



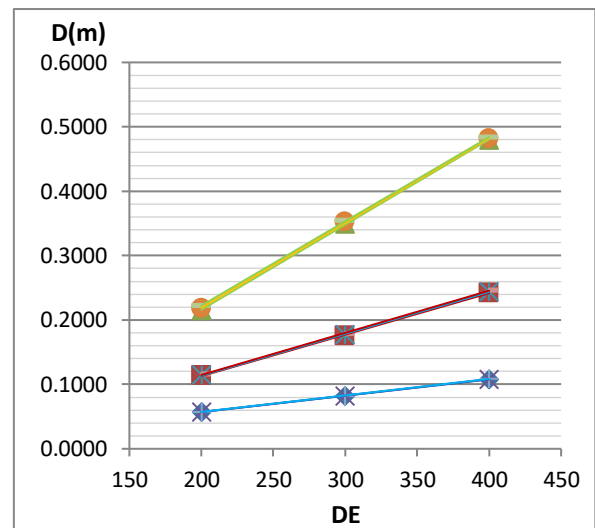
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

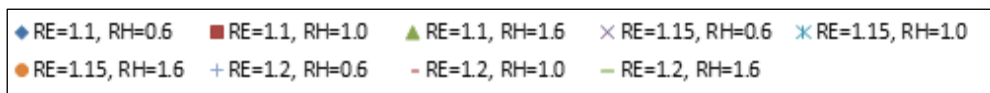


Figura D.122. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.

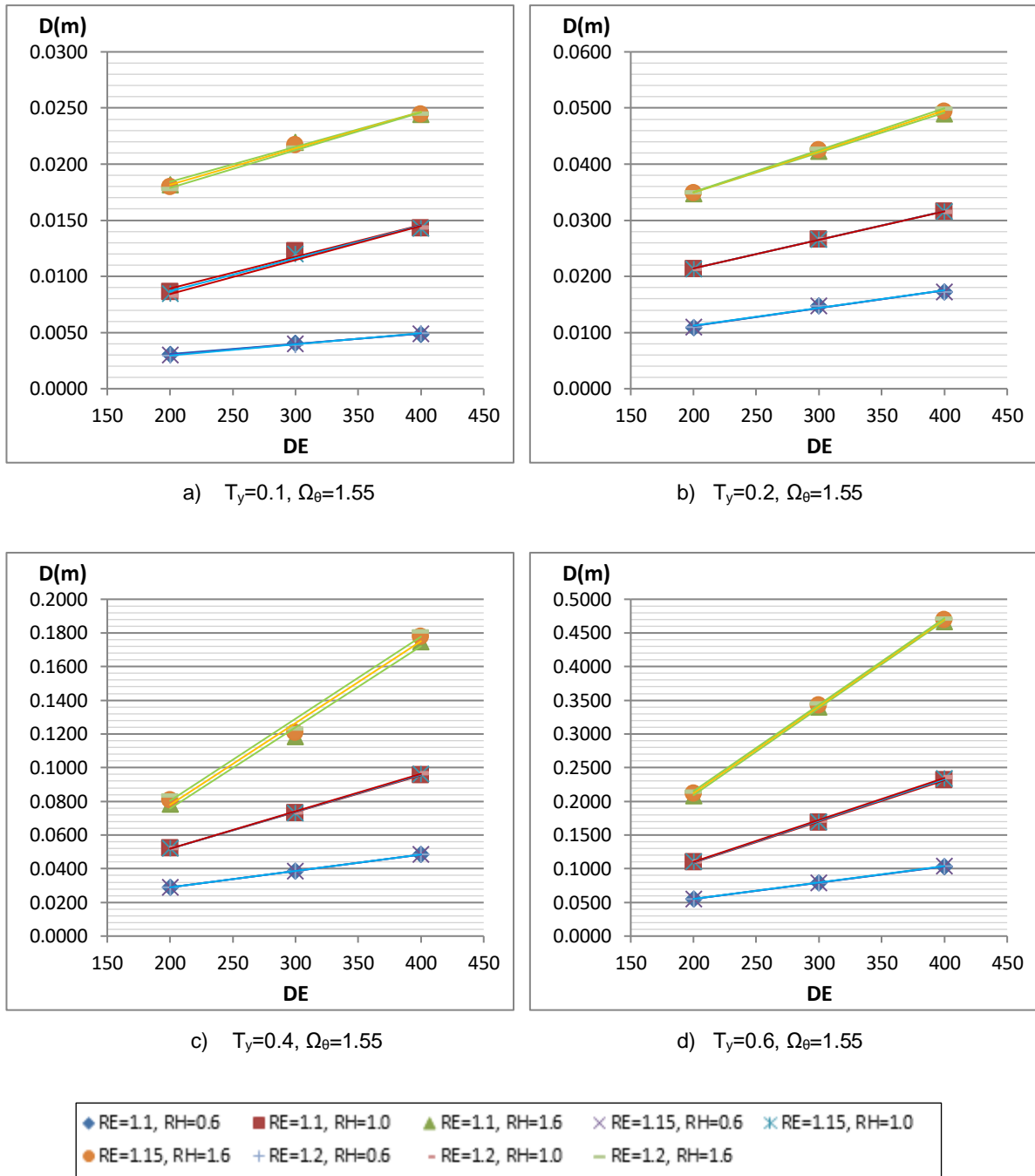


Figura D.123. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.

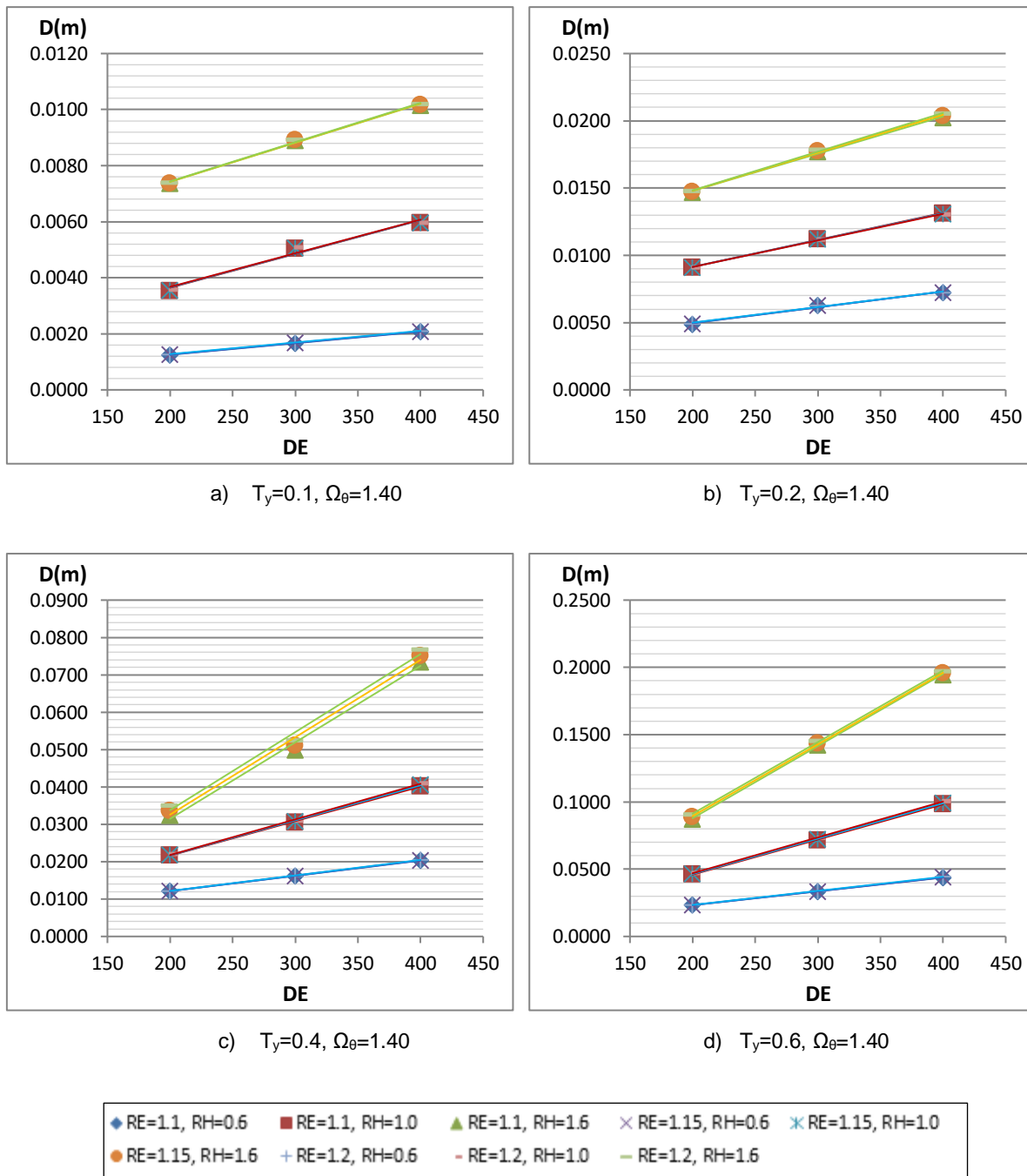


Figura D.124. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

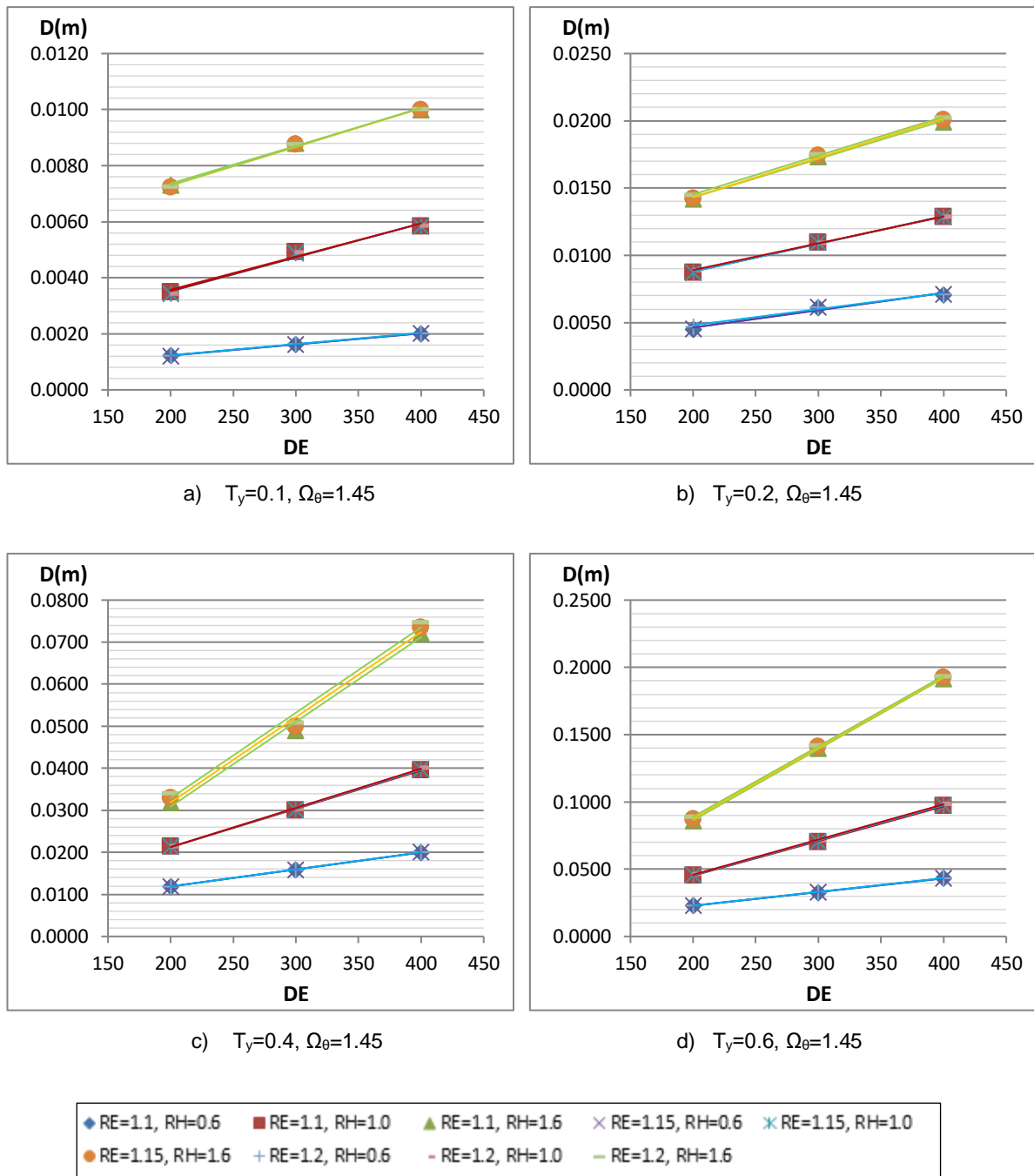
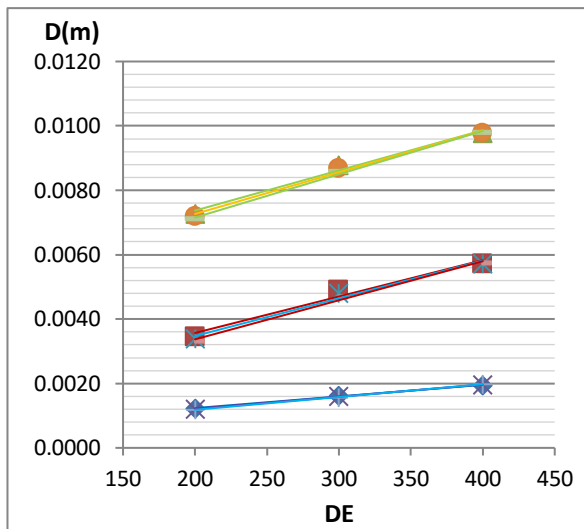
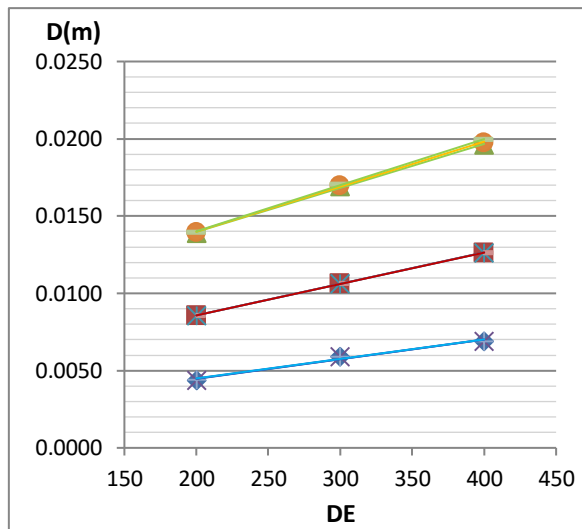


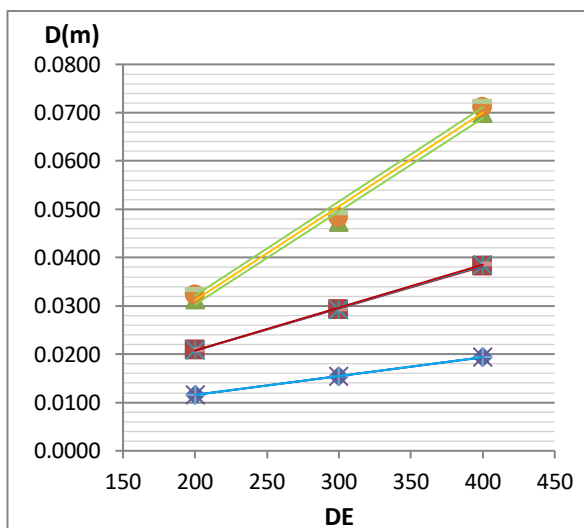
Figura D.125. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



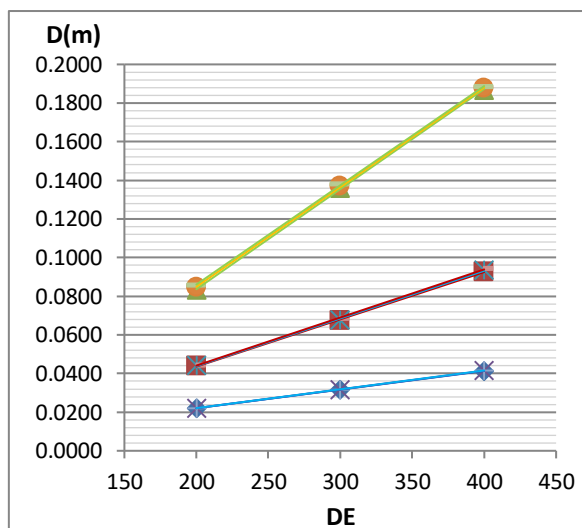
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

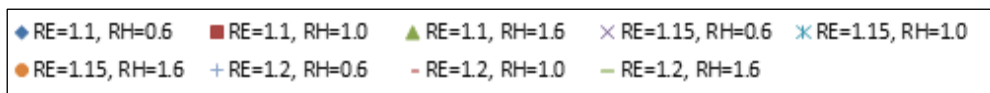


Figura D.126. Relación del Desplazamiento máximo frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

Cortante máximo de columnas:

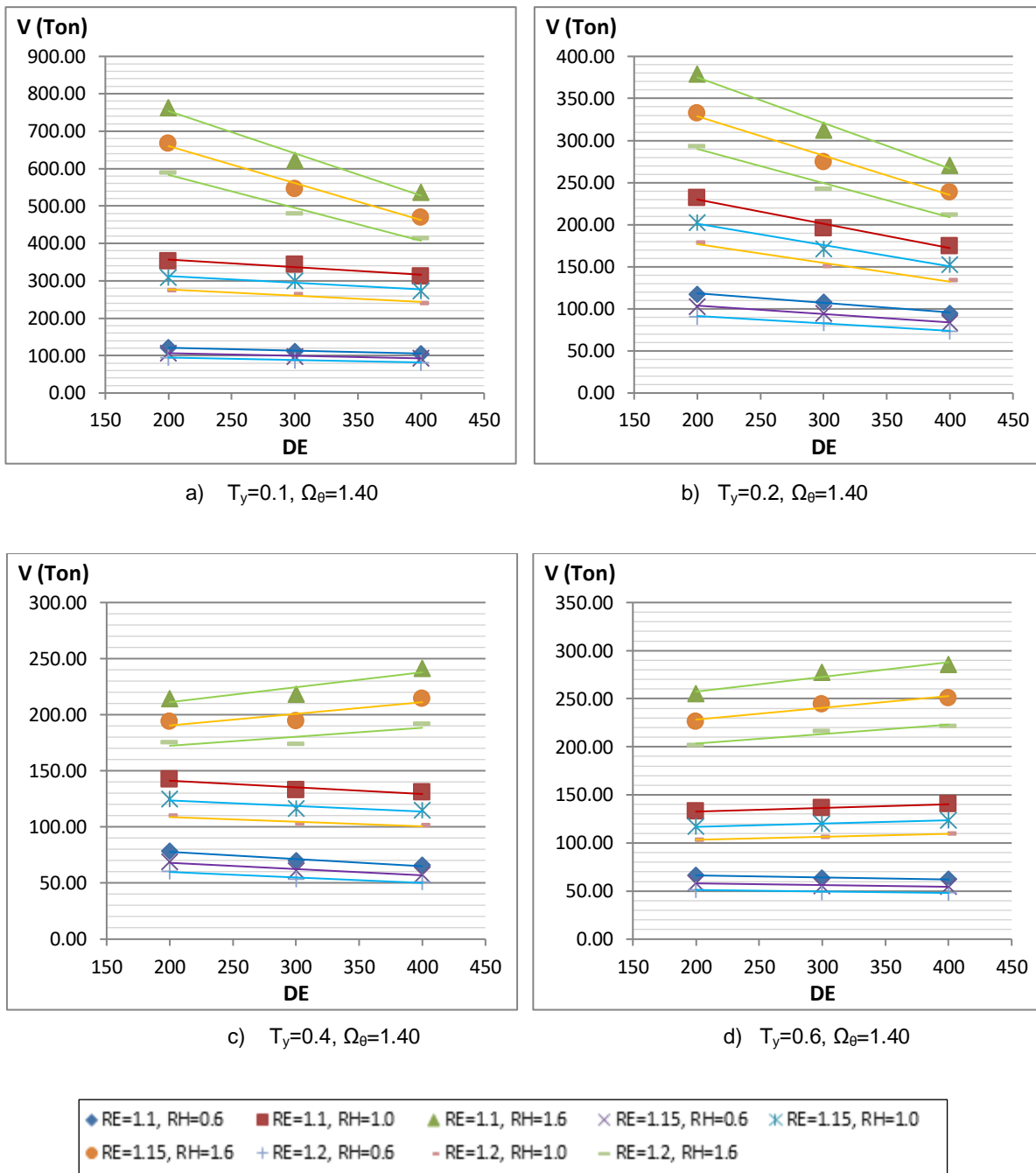


Figura D.127. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

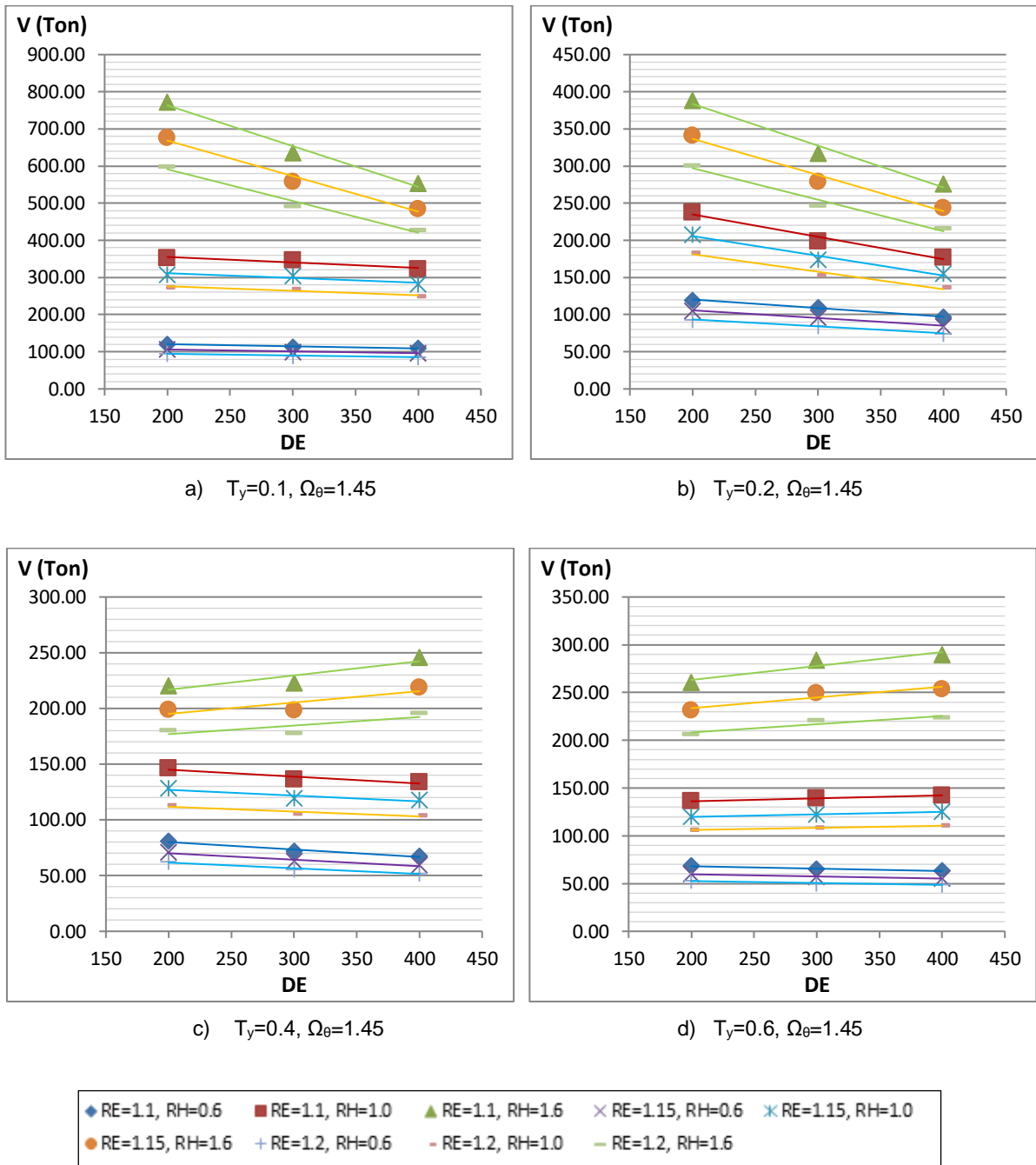


Figura D.128. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

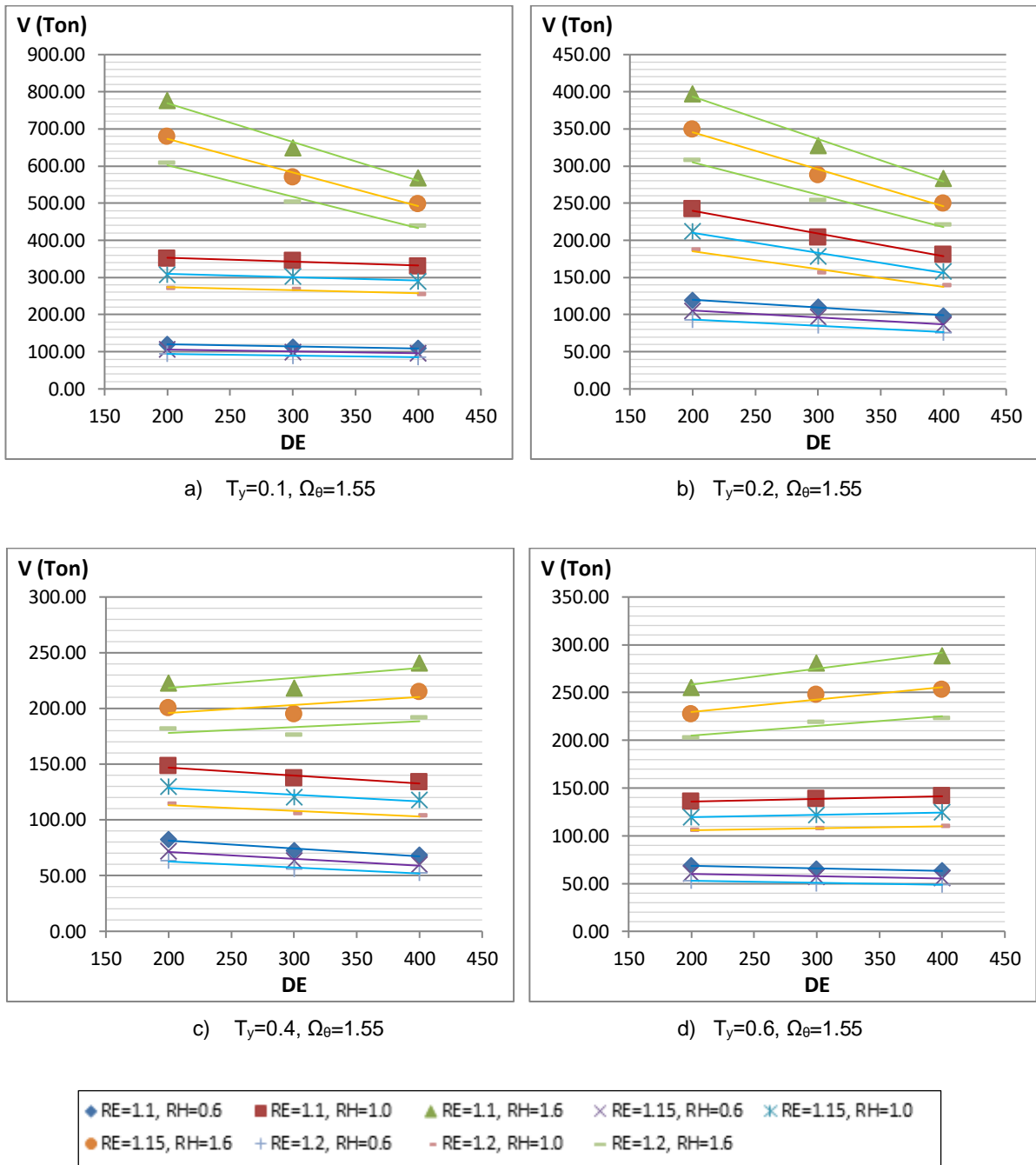


Figura D.129. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.

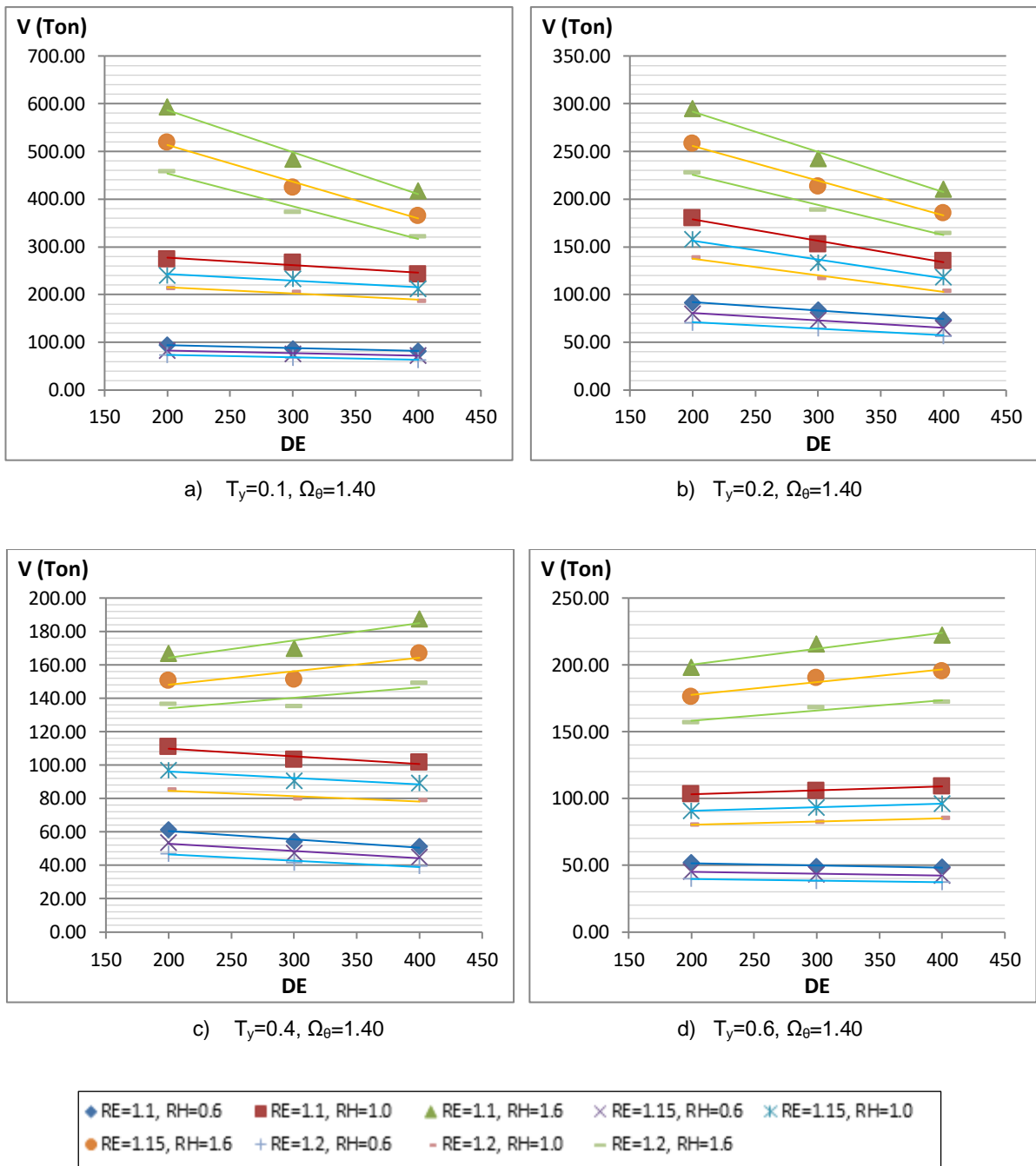


Figura D.130. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

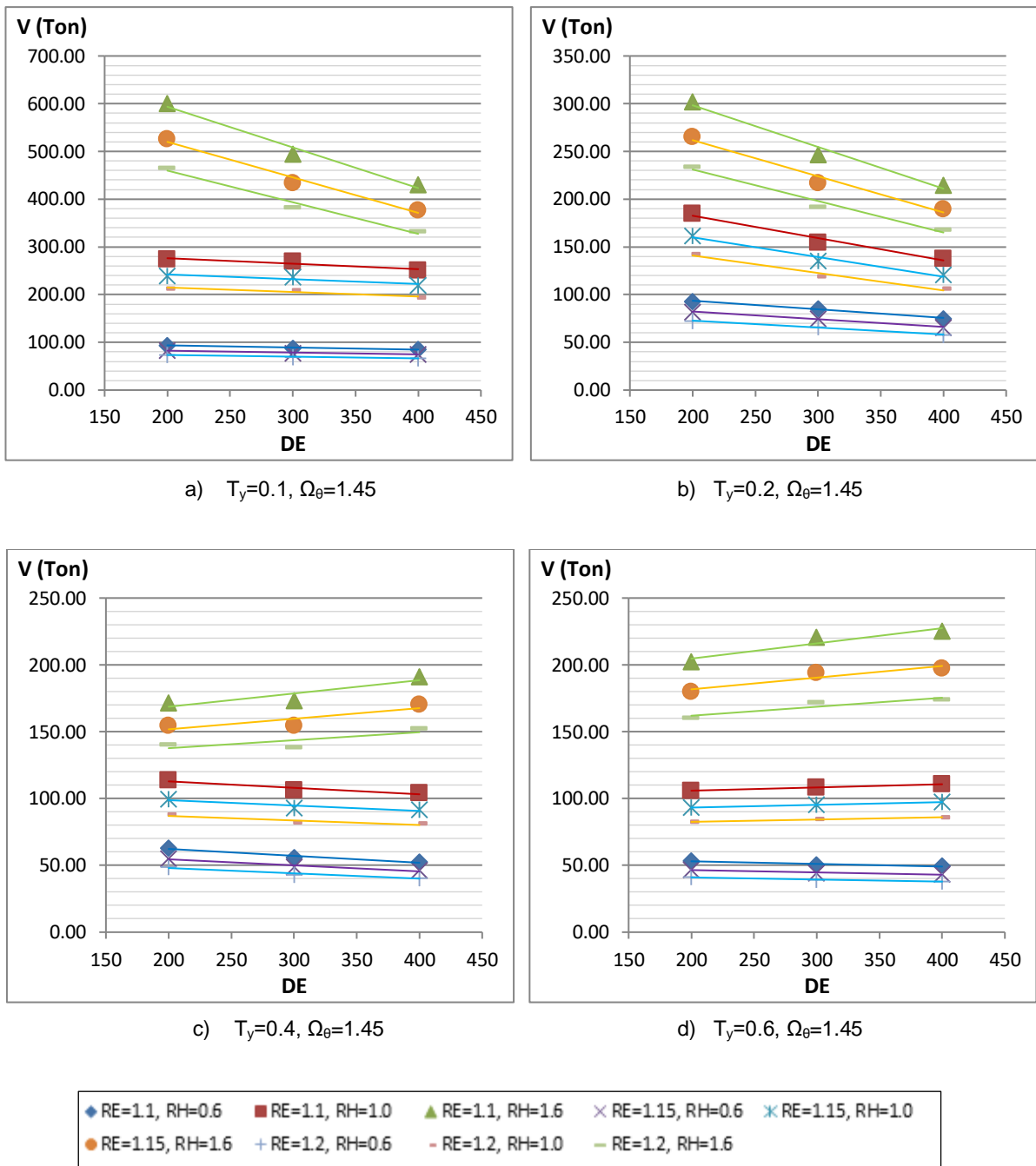


Figura D.131. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

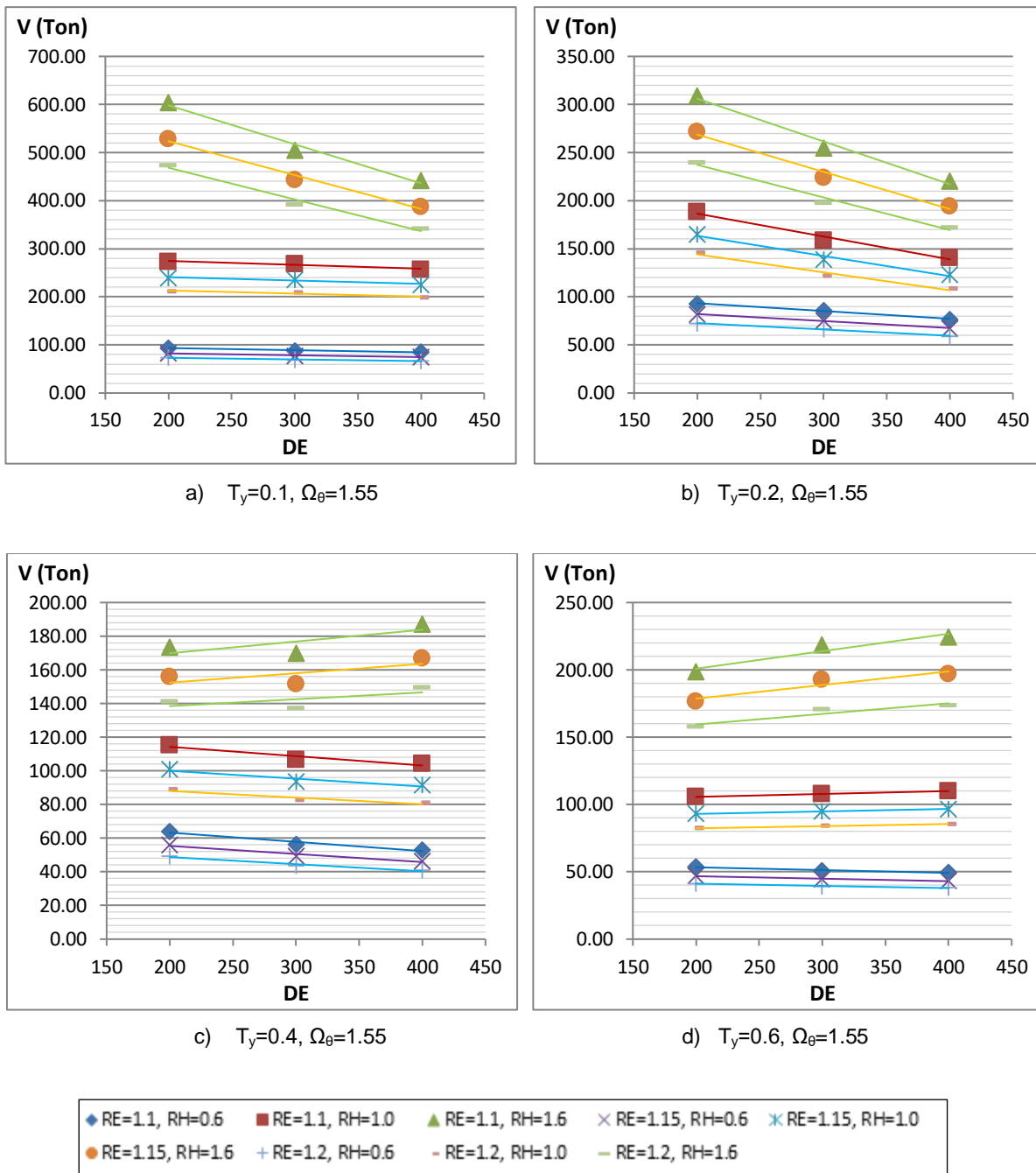


Figura D.132. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.

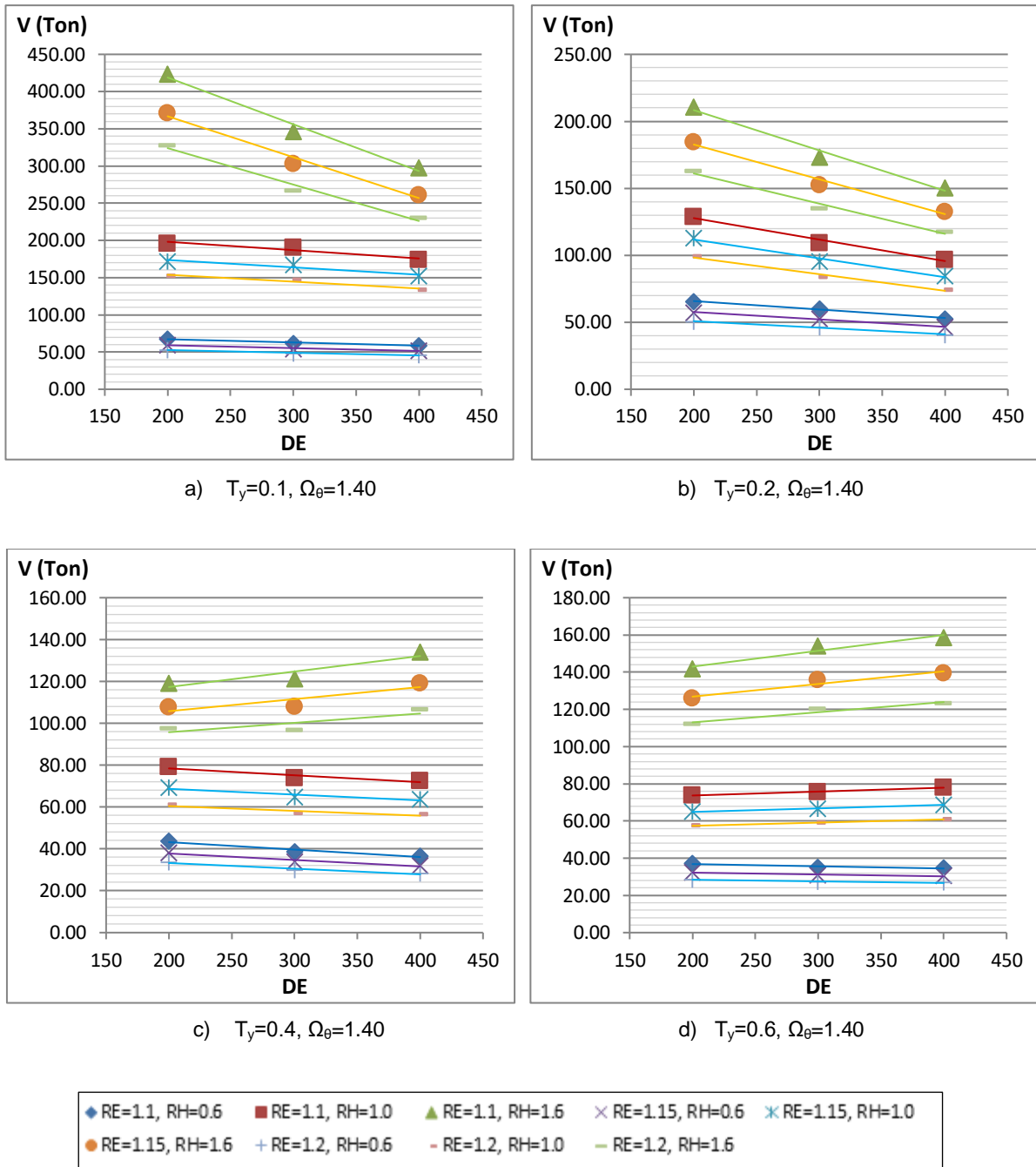
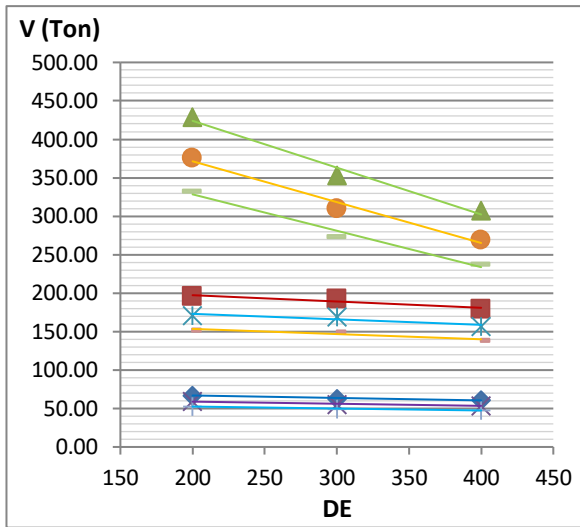
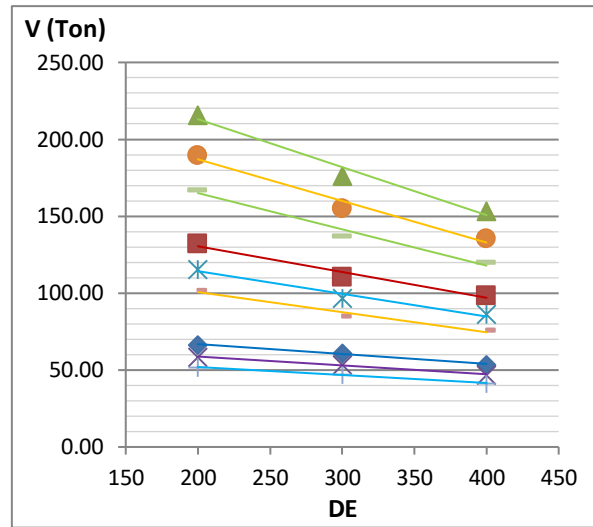


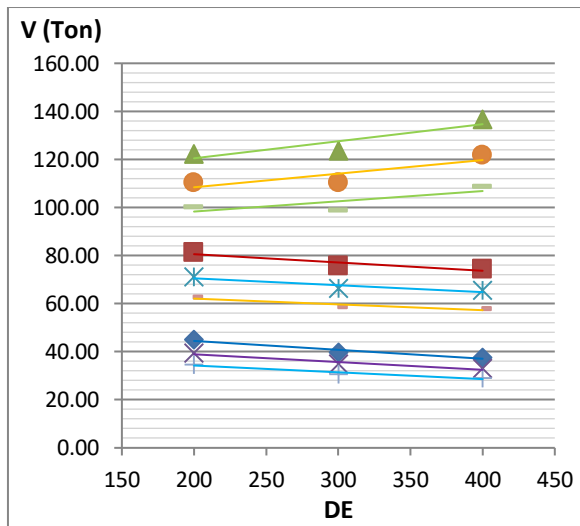
Figura D.133. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



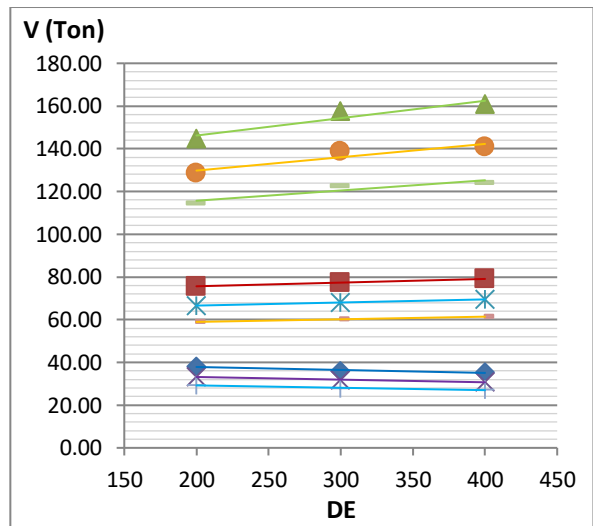
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

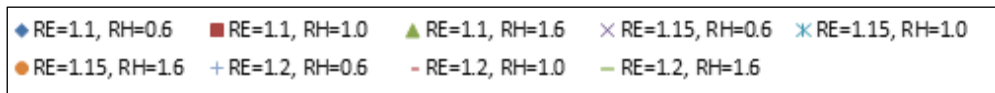


Figura D.134. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

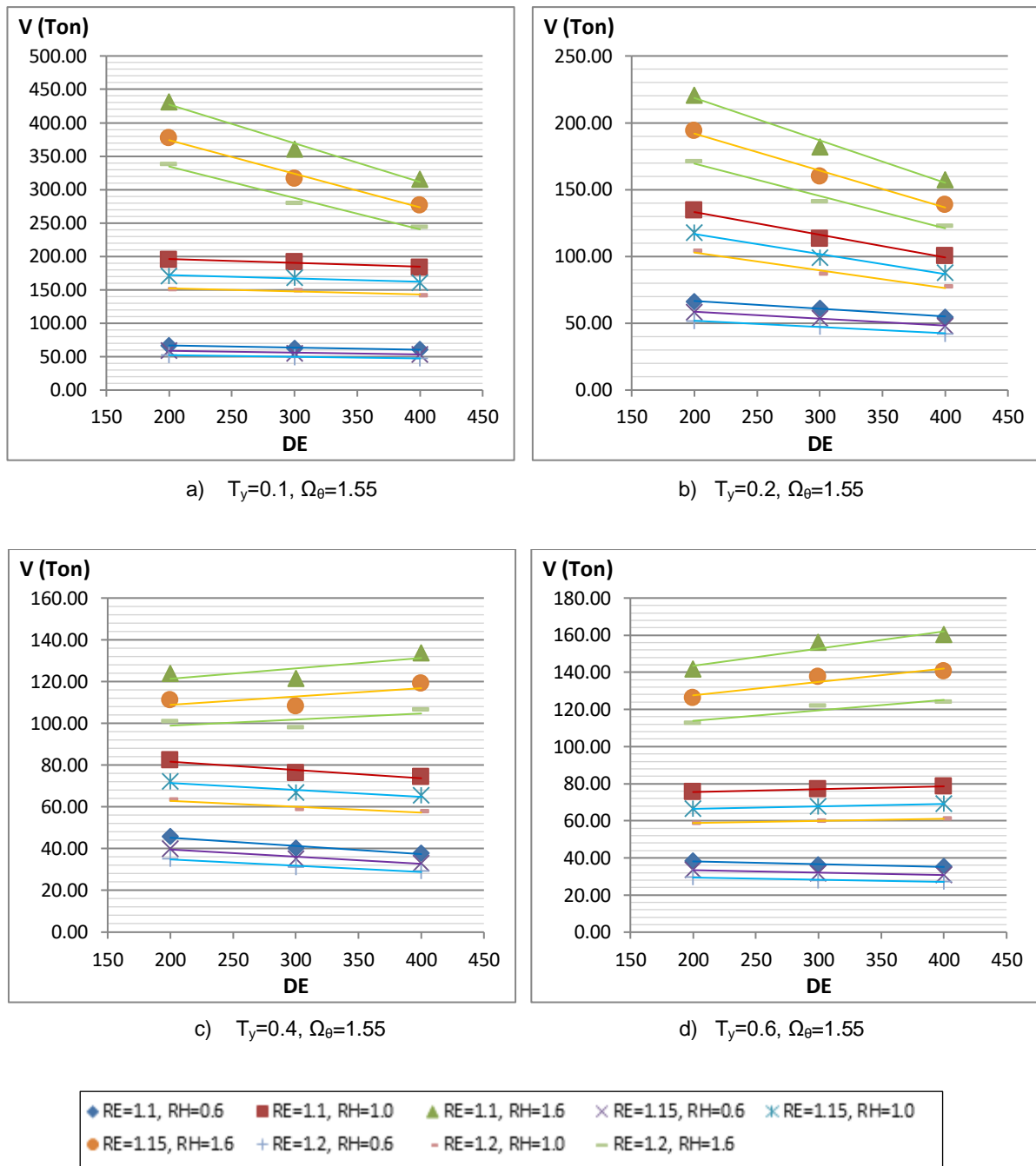


Figura D.135. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.

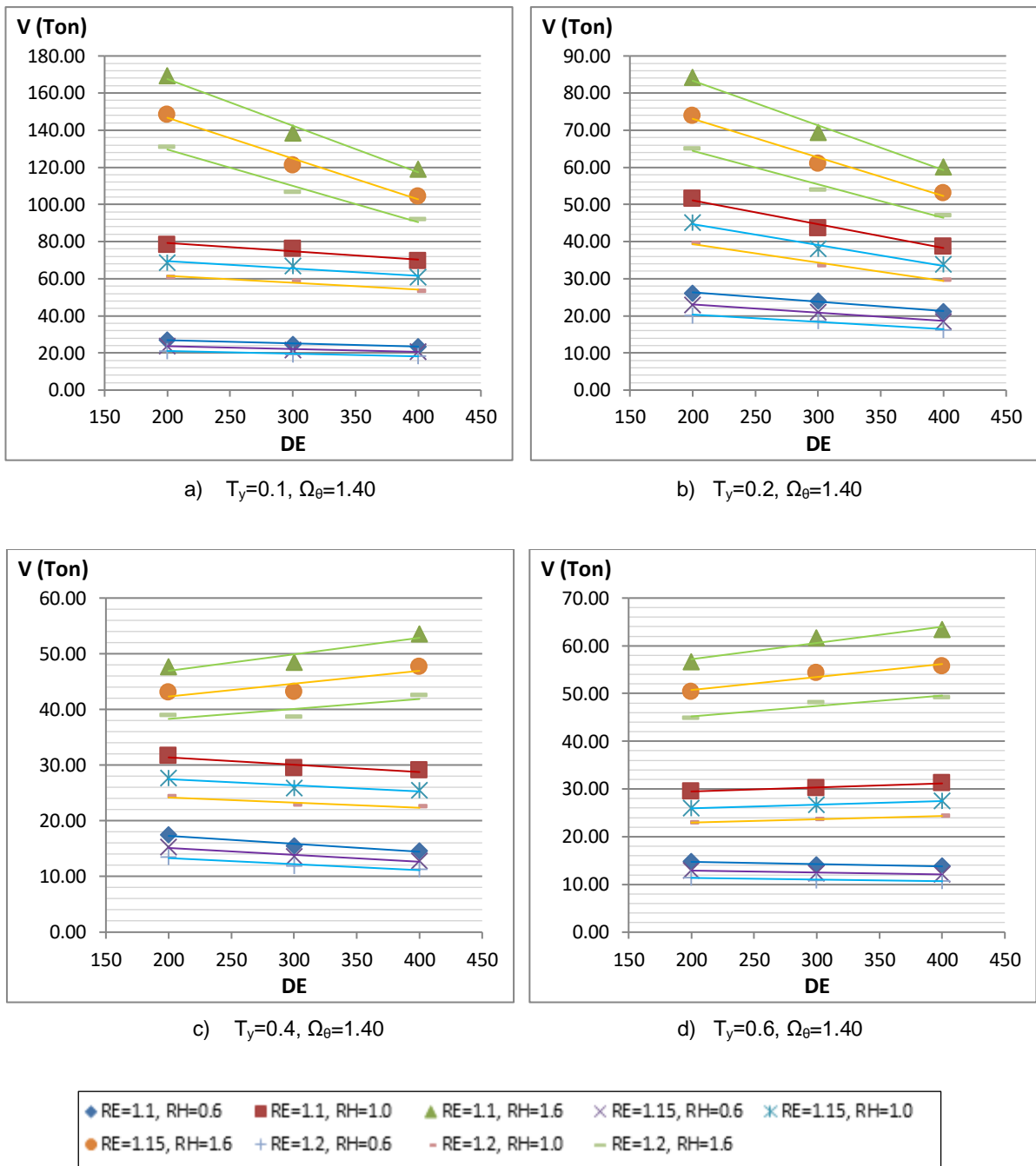


Figura D.136. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

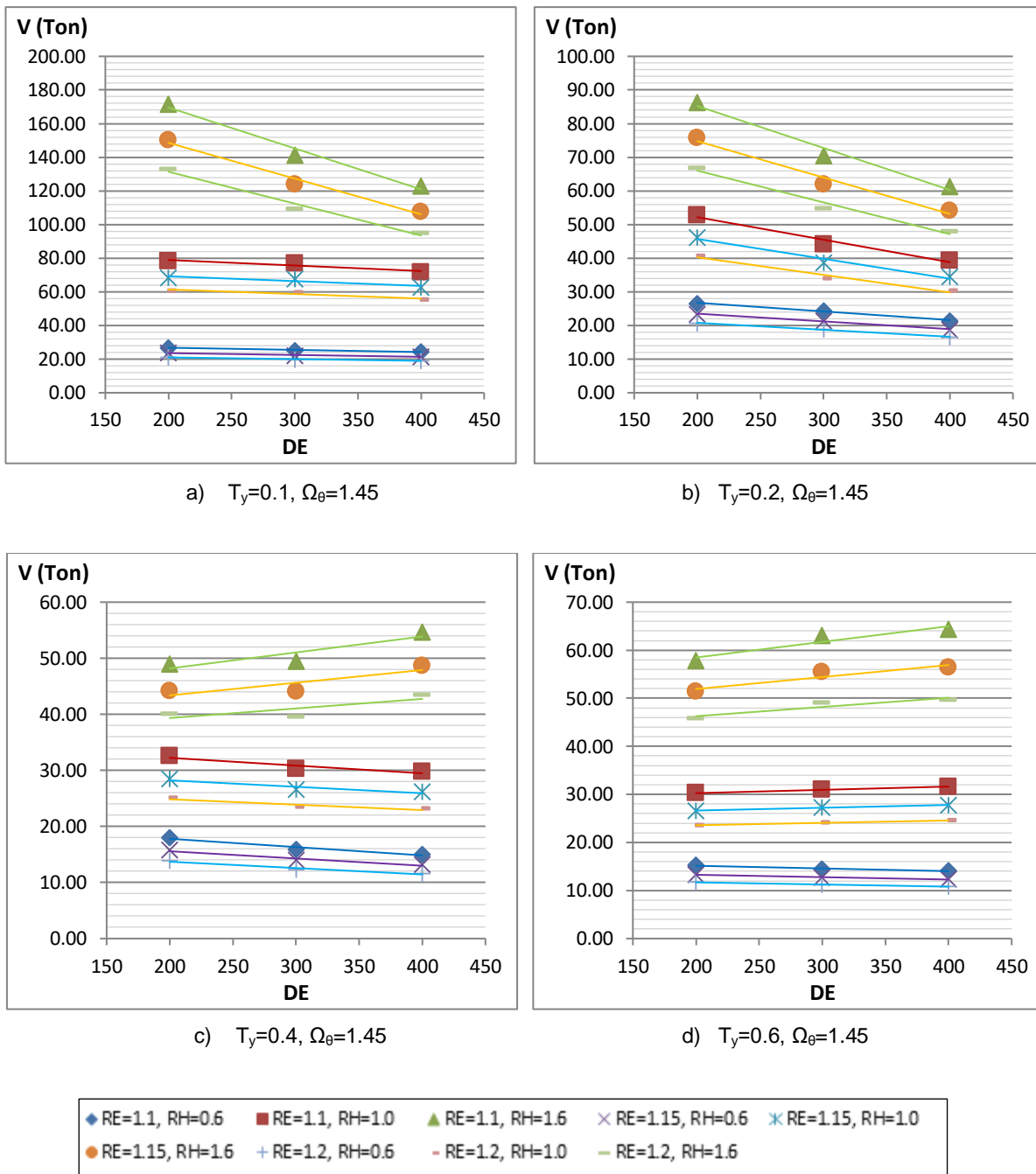


Figura D.137. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

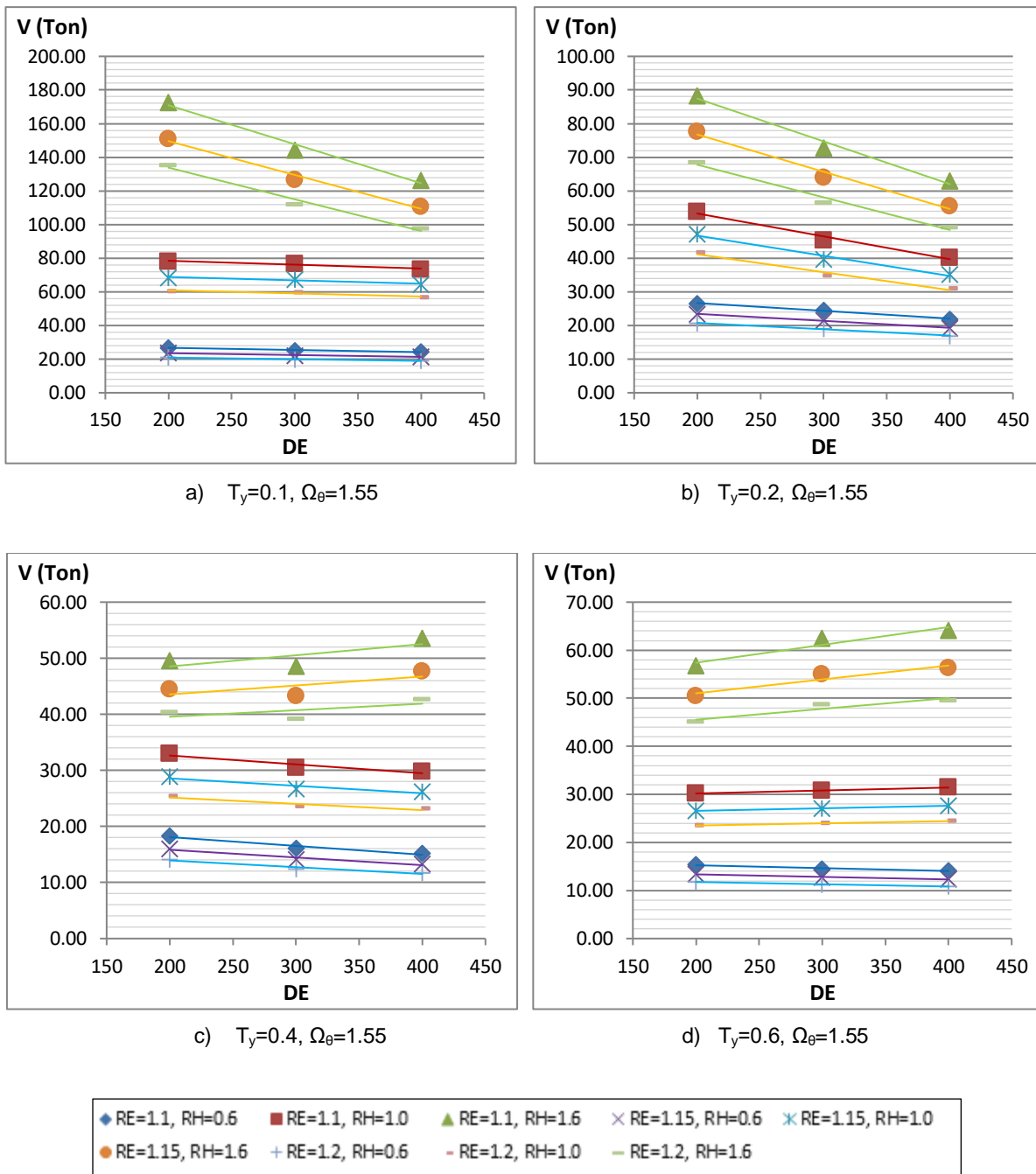


Figura D.138. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.

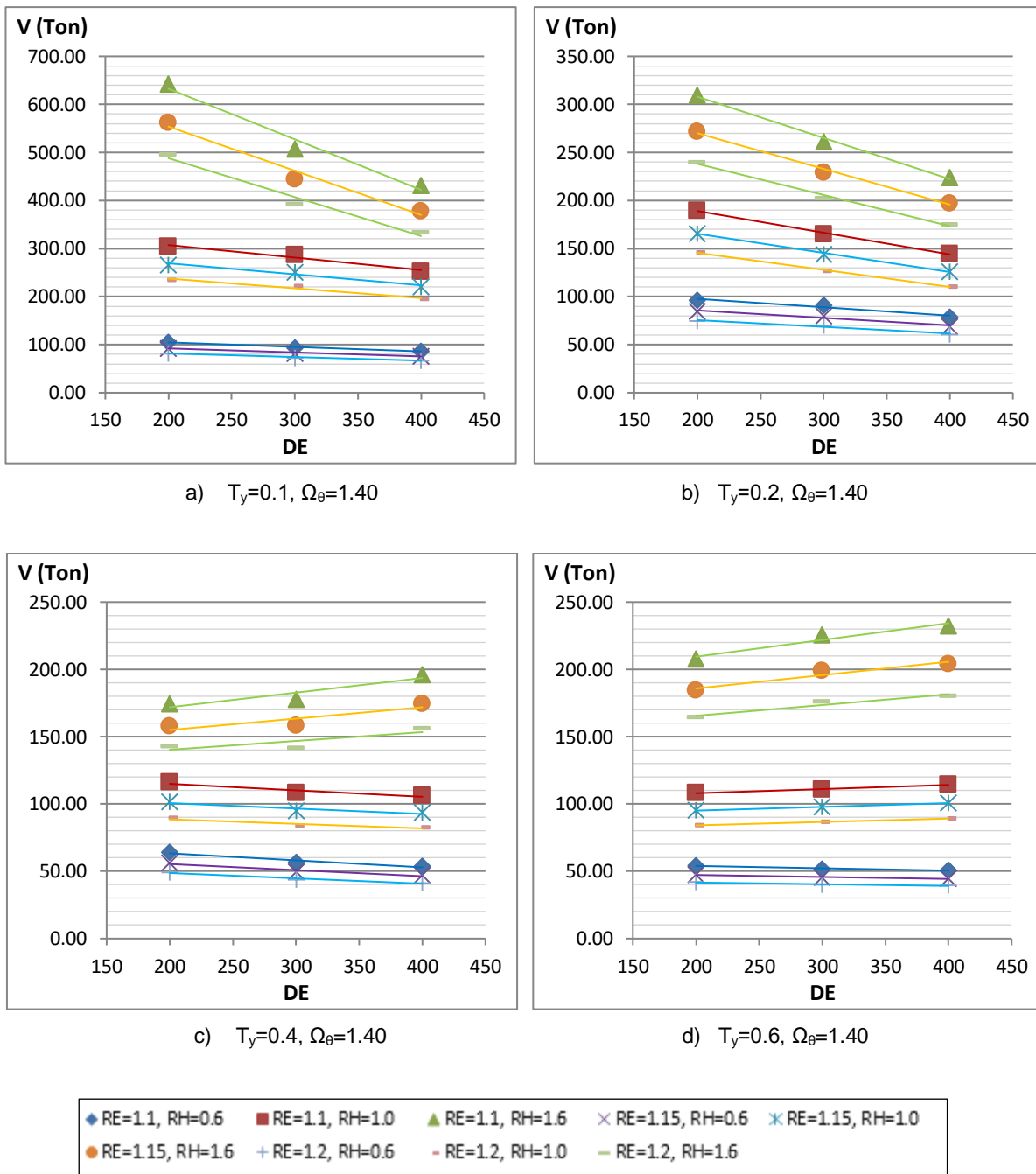


Figura D.139. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

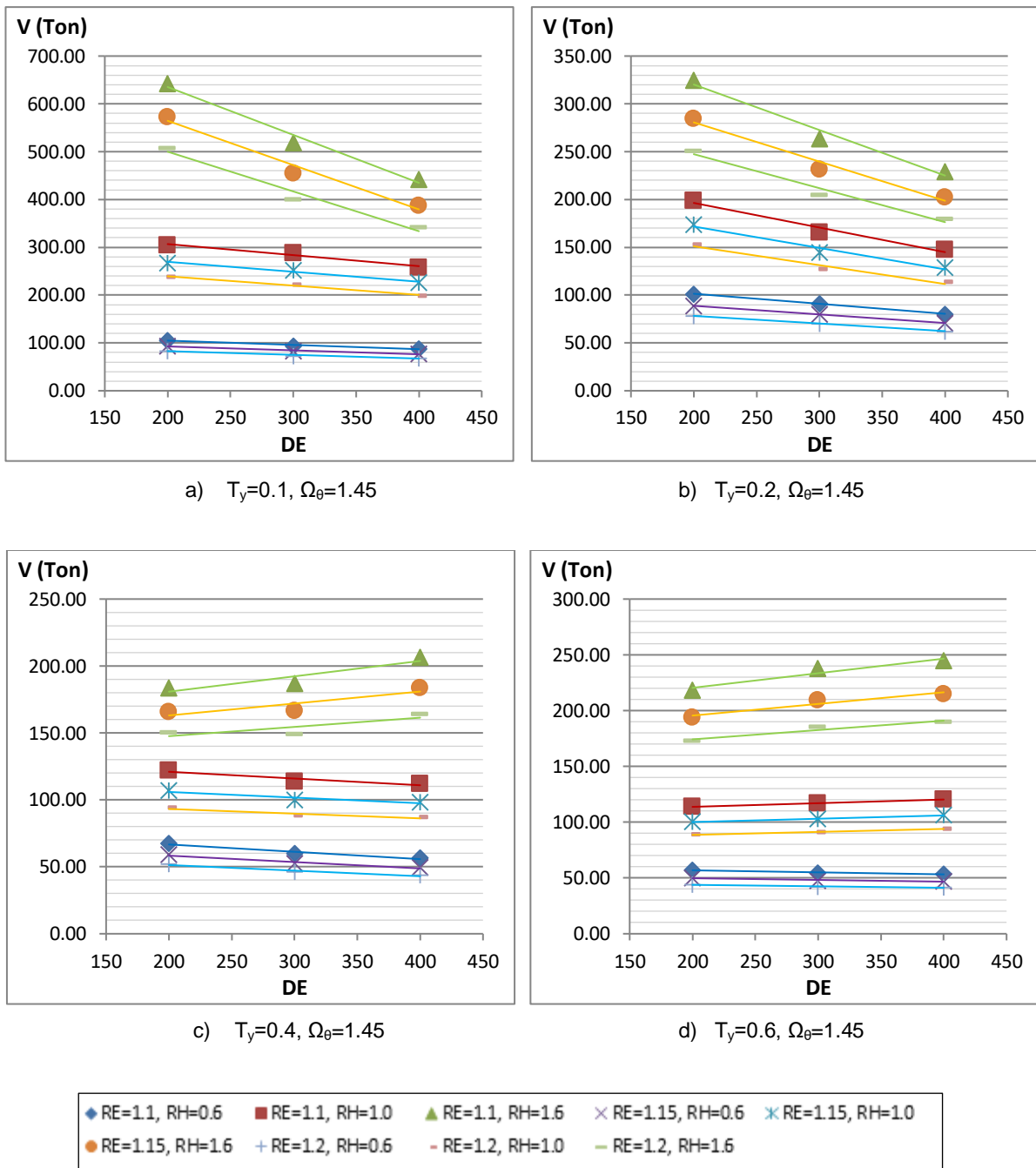


Figura D.140. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

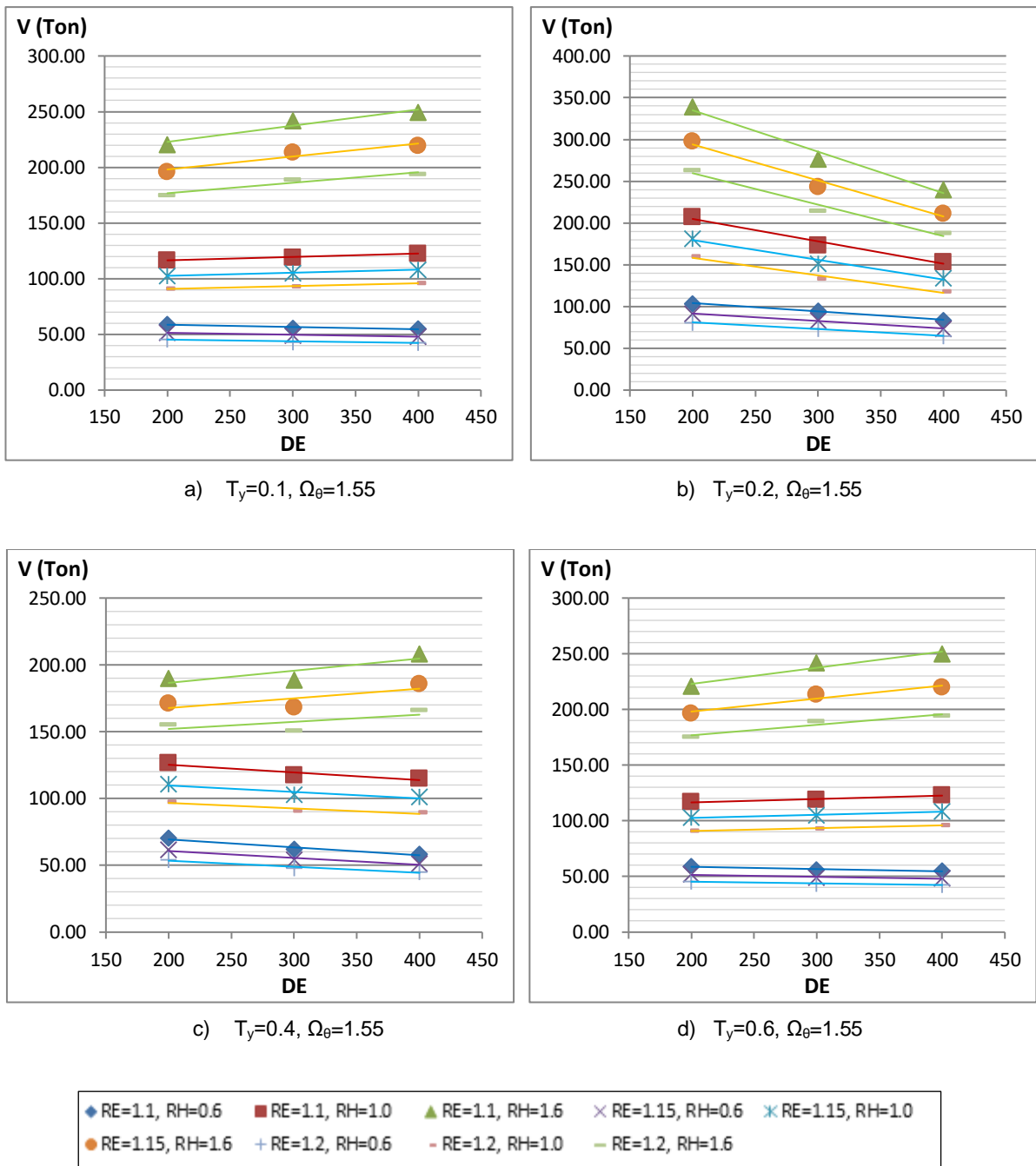


Figura D.141. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.

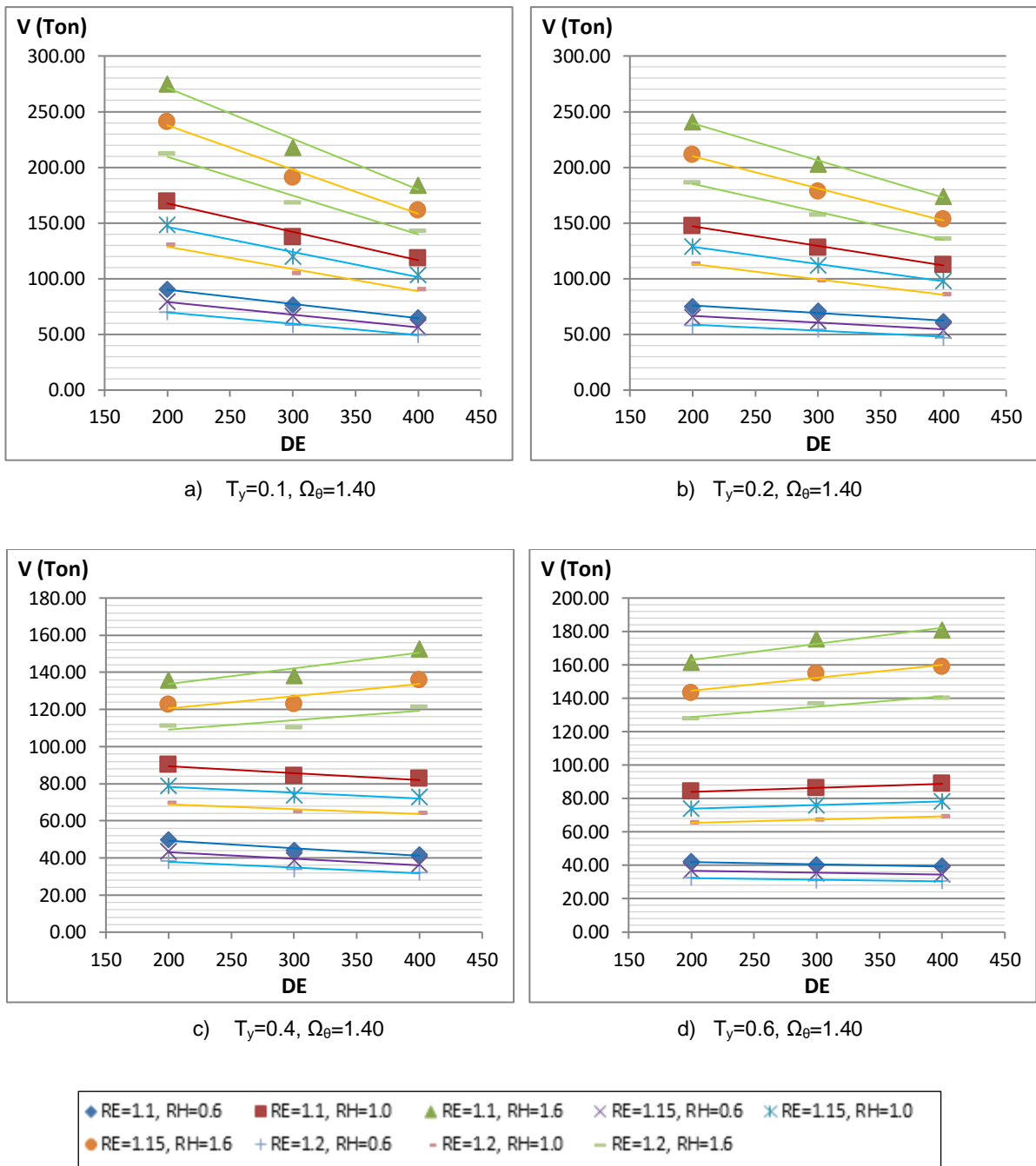


Figura D.142. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.

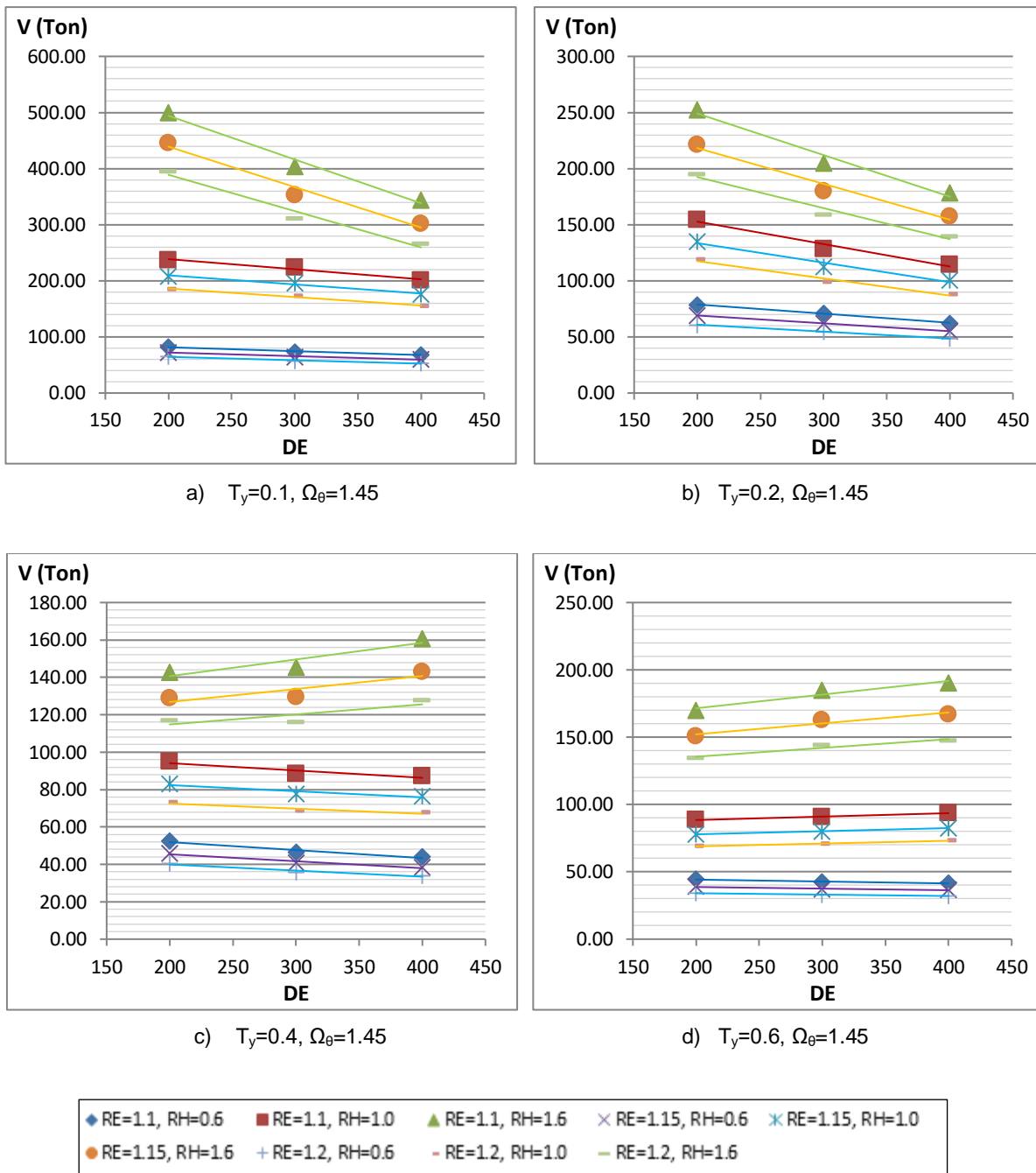
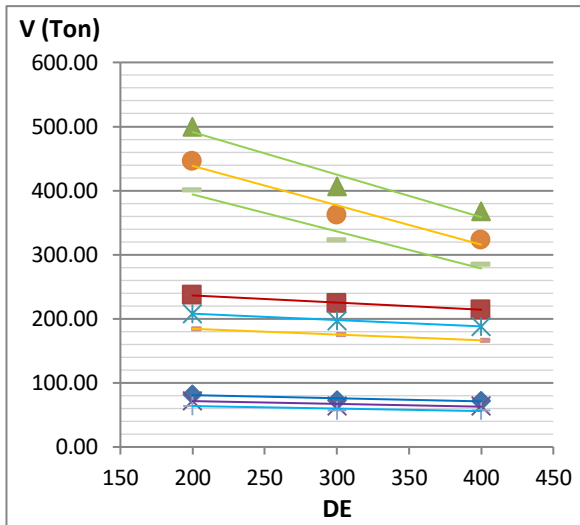
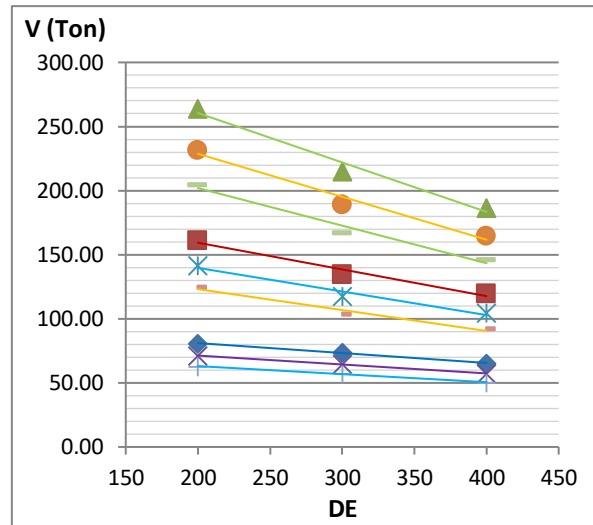


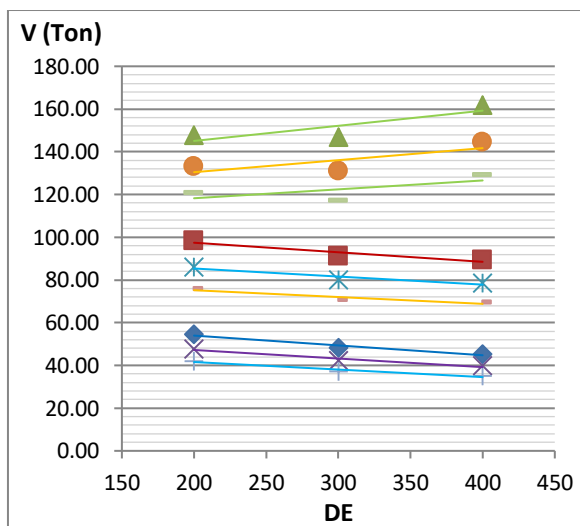
Figura D.143. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



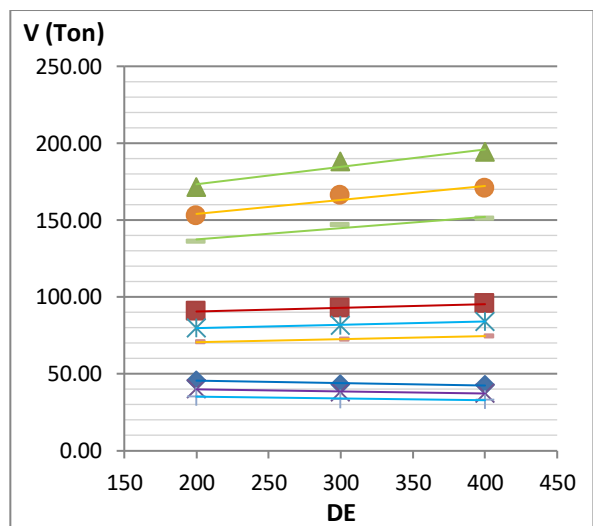
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

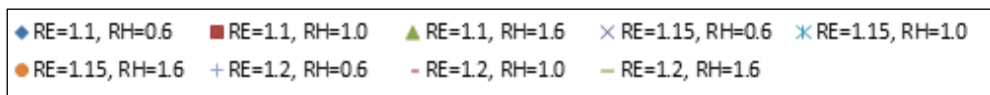


Figura D.144. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.

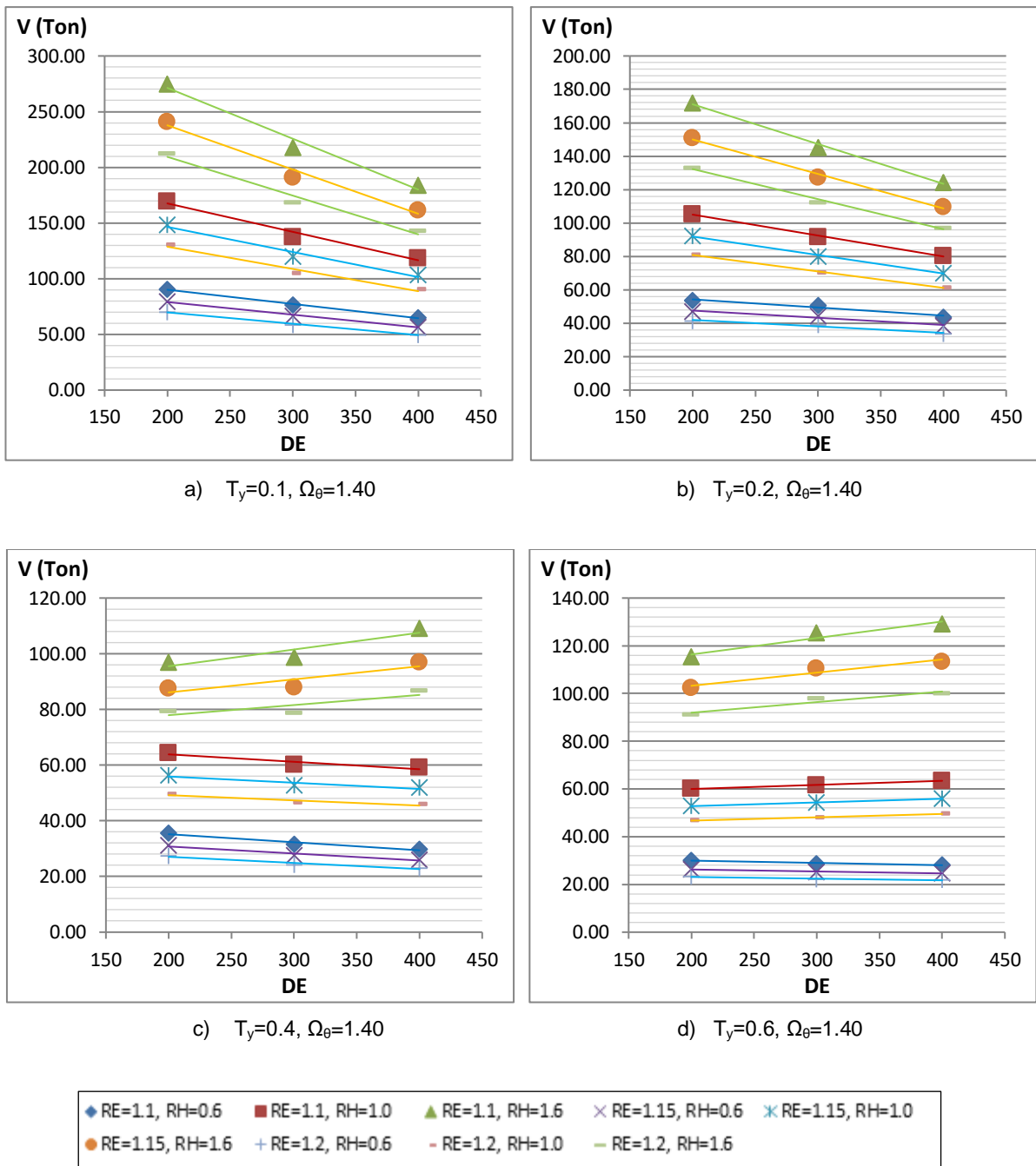


Figura D.145. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.

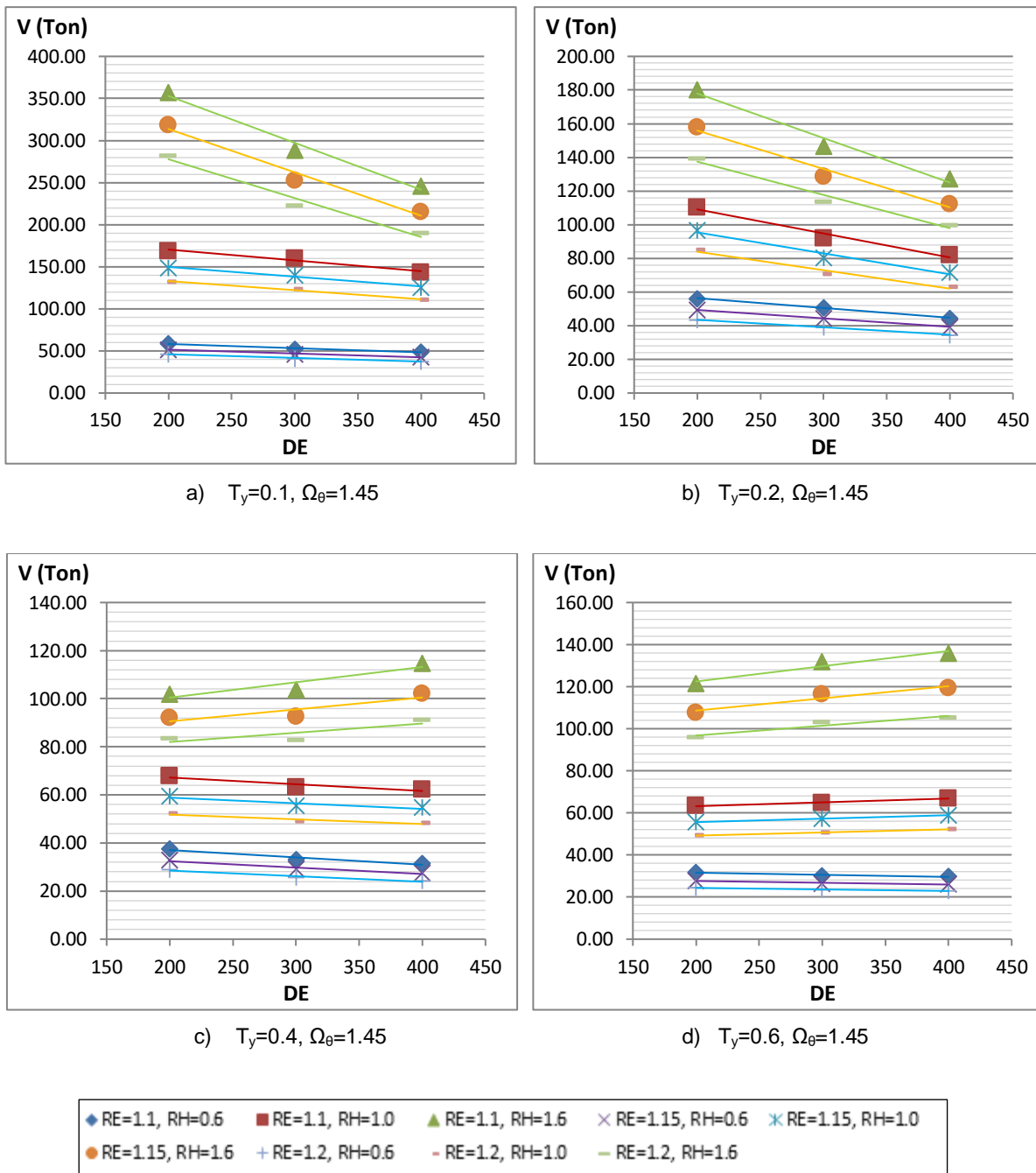
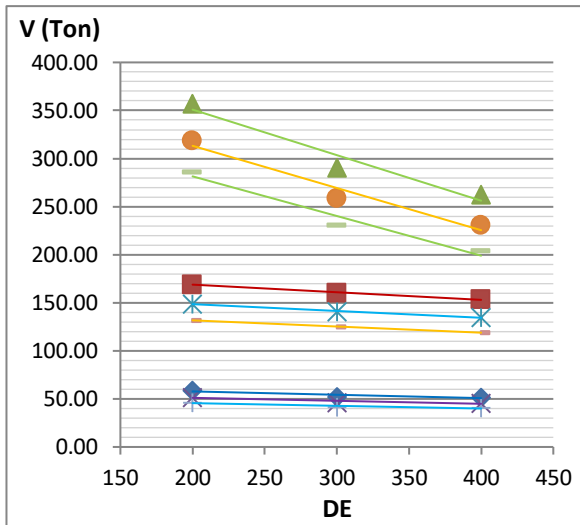
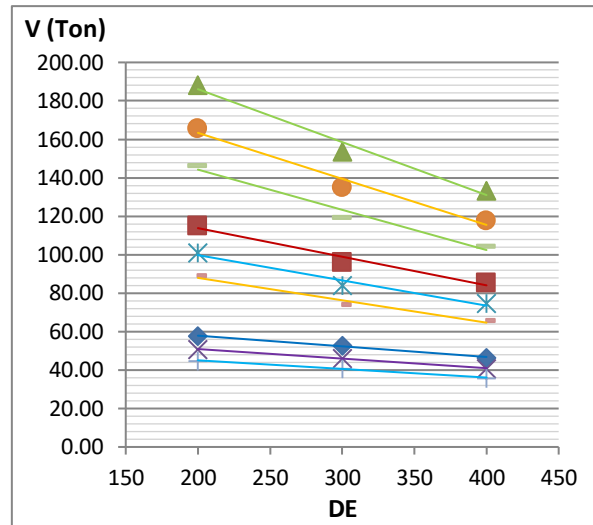


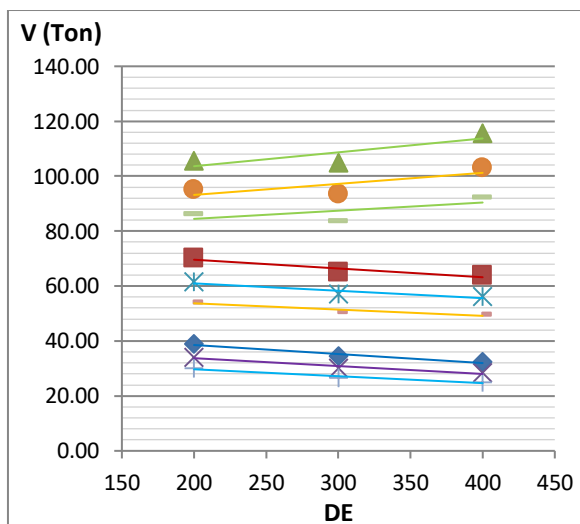
Figura D.146. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



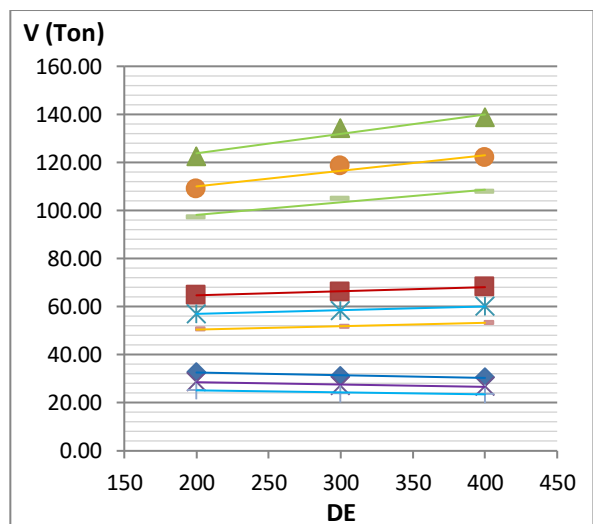
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

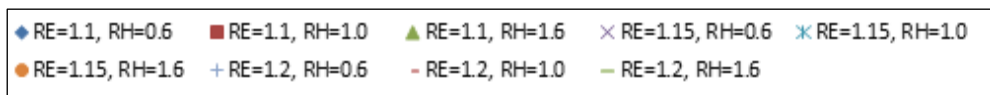


Figura D.147. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.

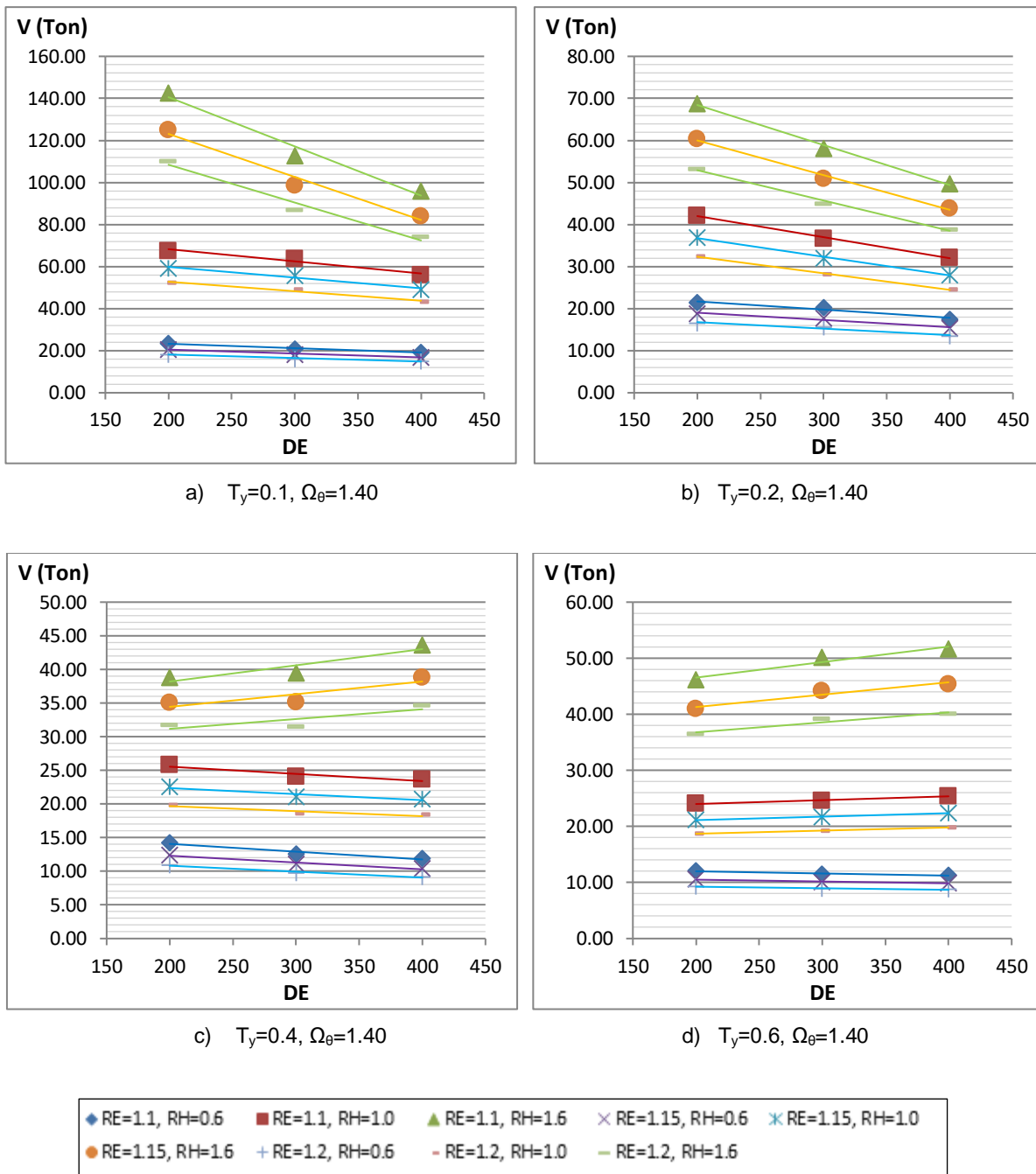


Figura D.148. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

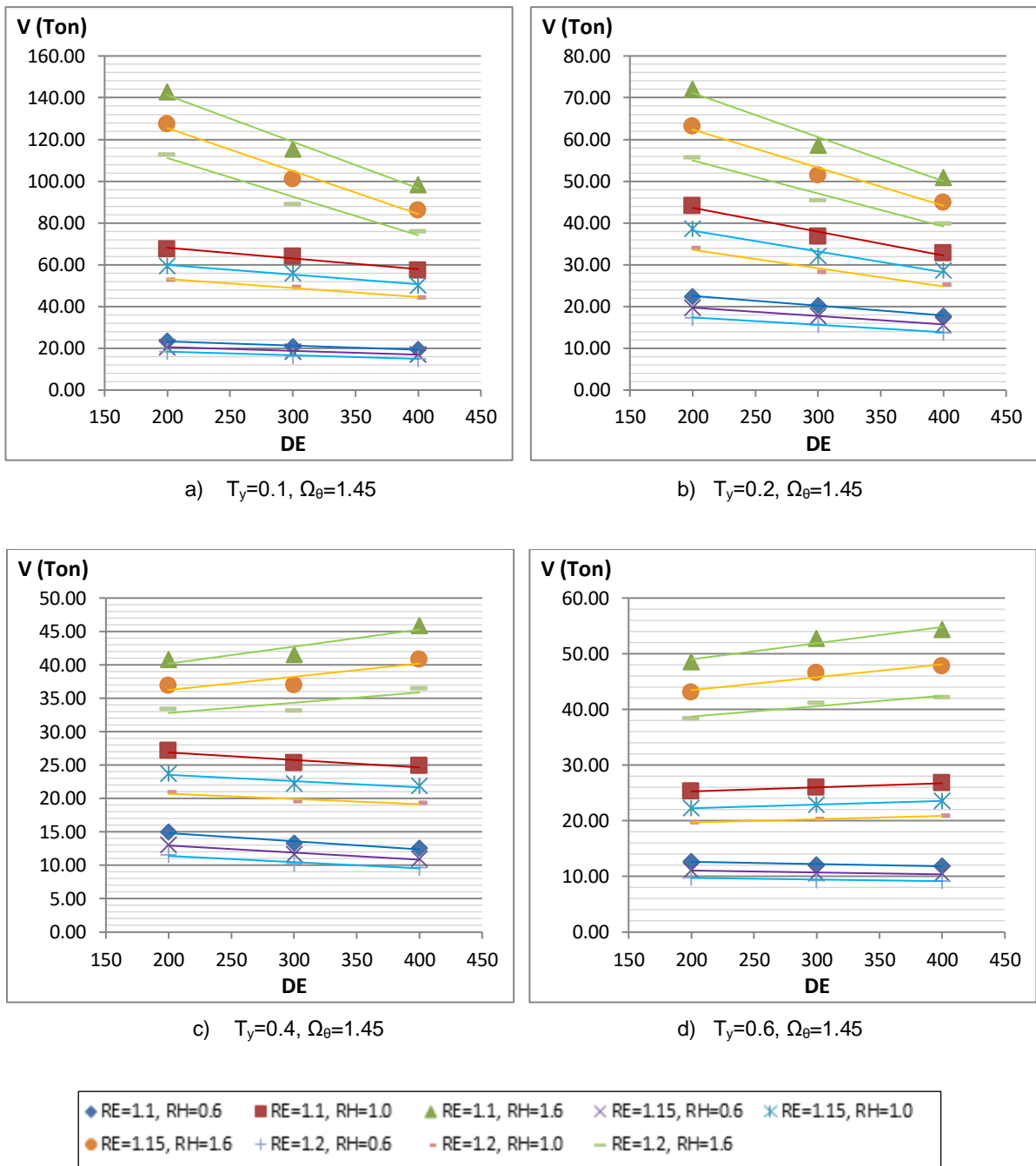


Figura D.149. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

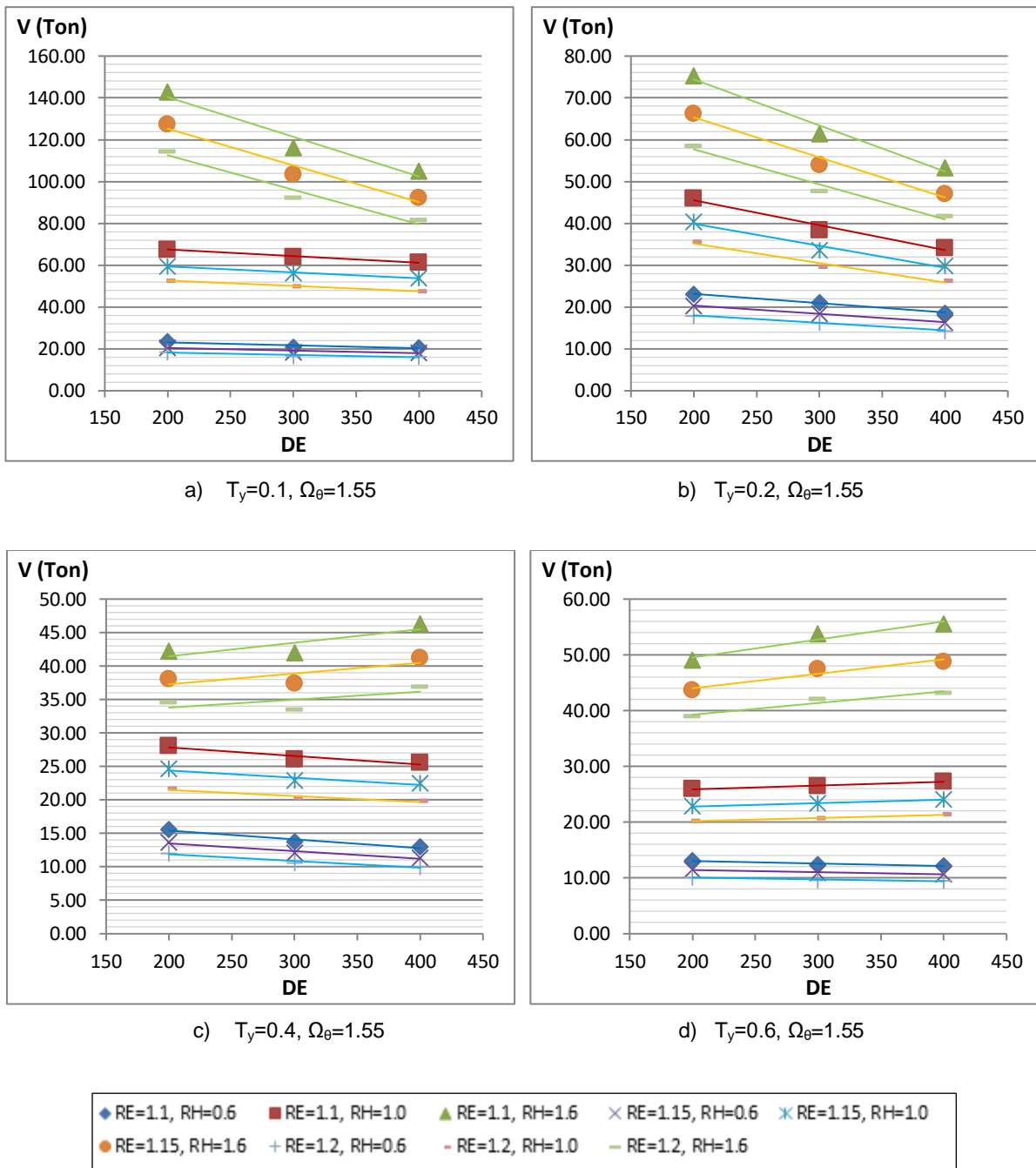


Figura D.150. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

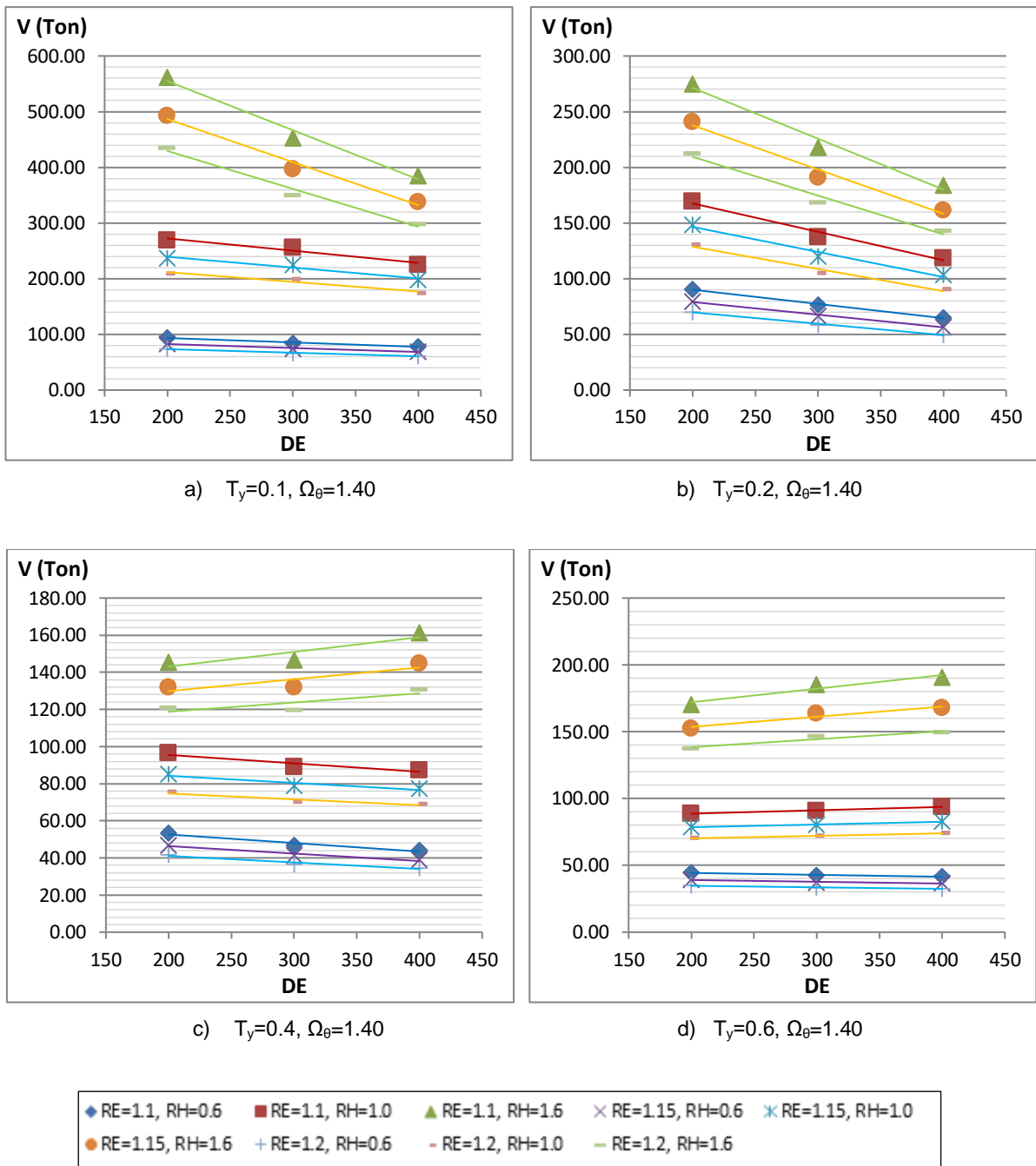


Figura D.151. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.

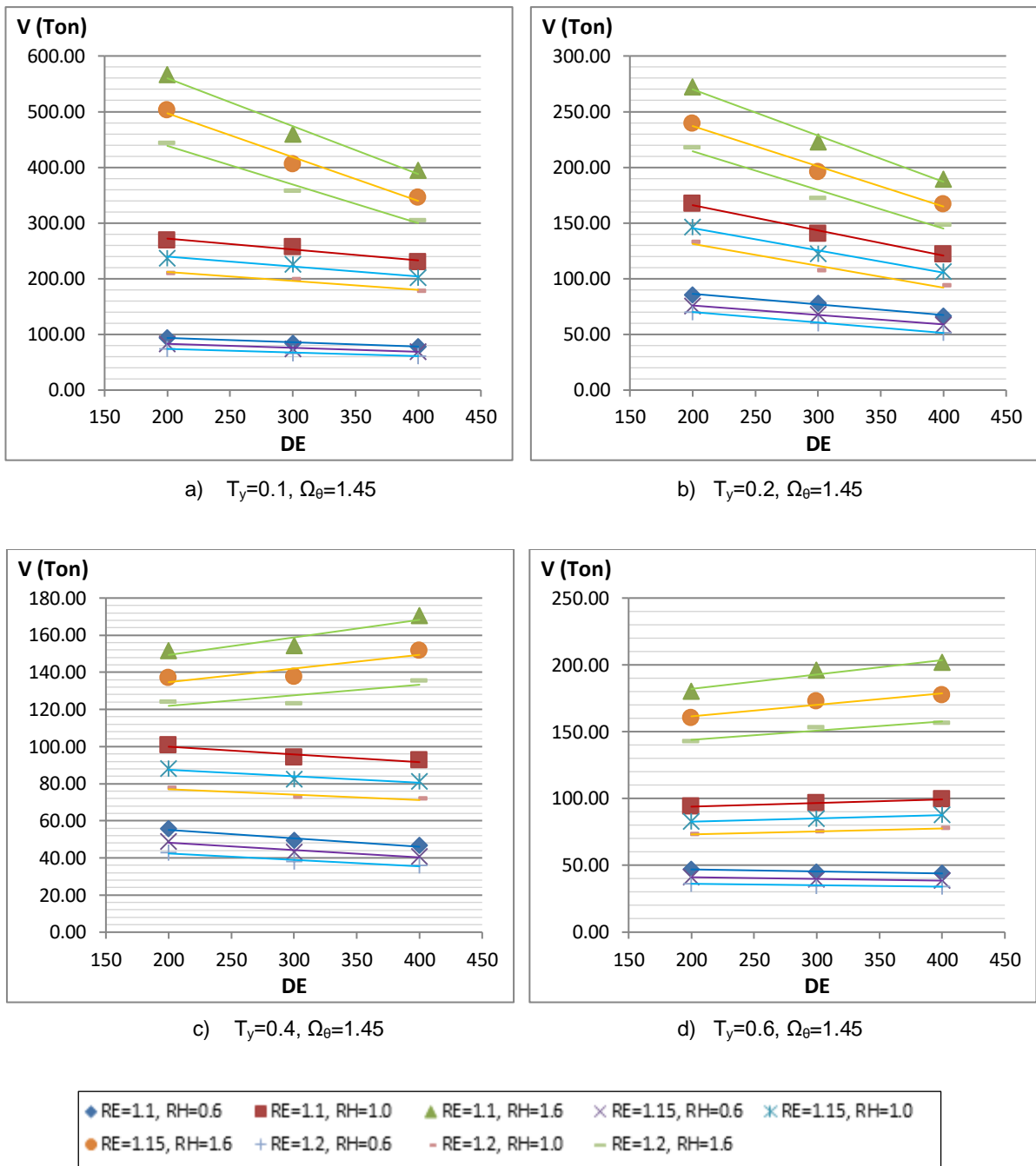


Figura D.152. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.

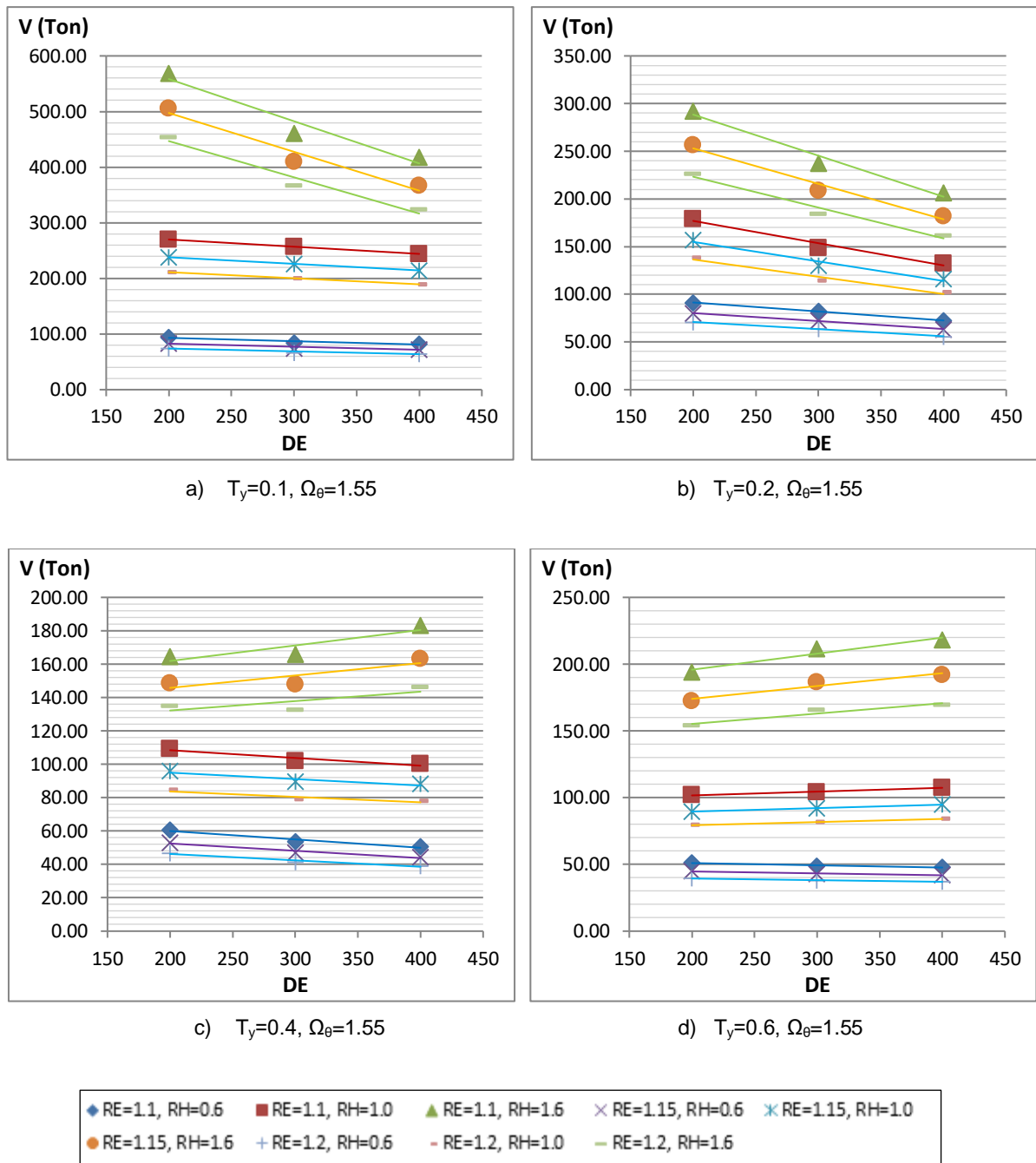


Figura D.153. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.

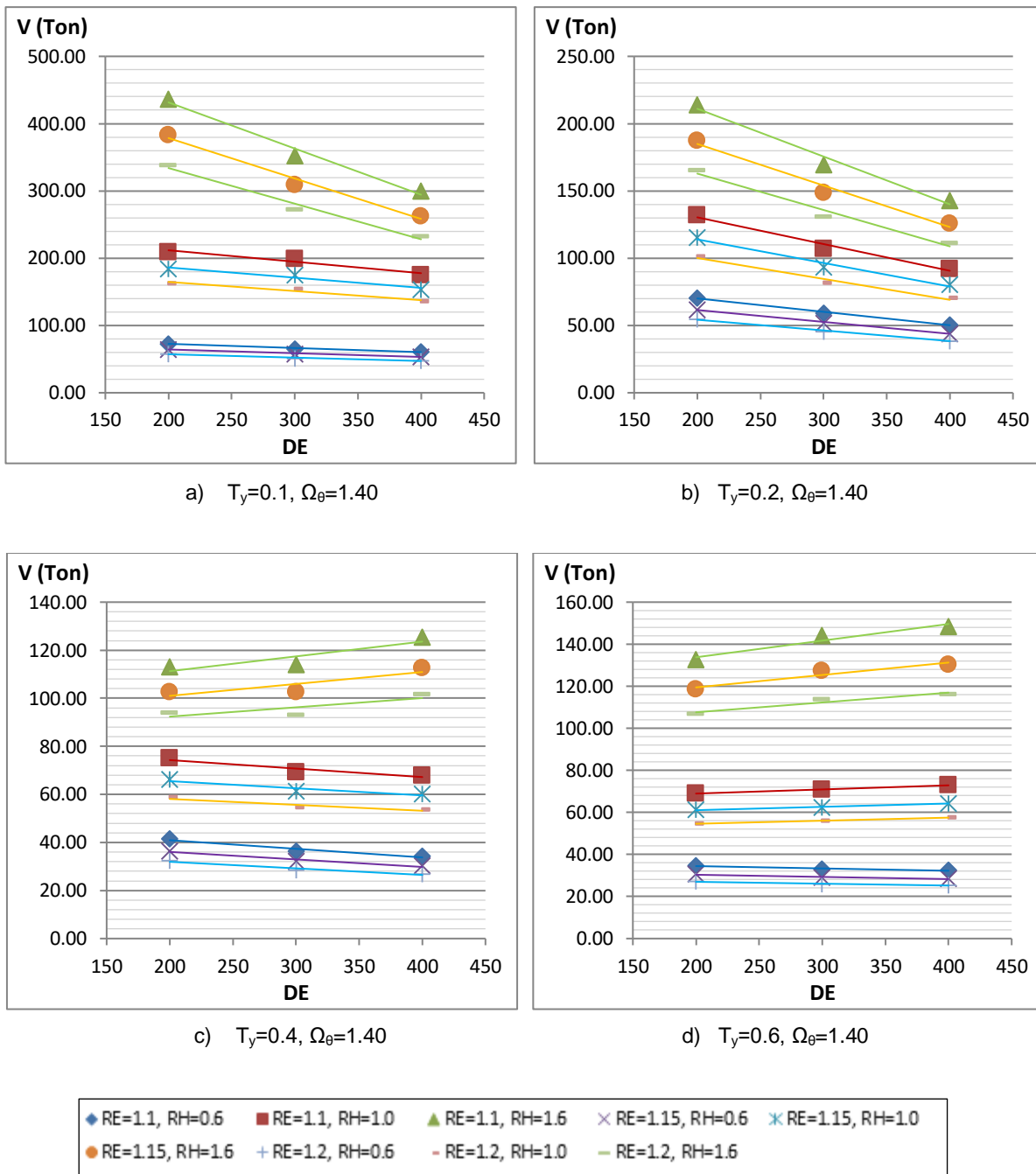


Figura D.154. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.

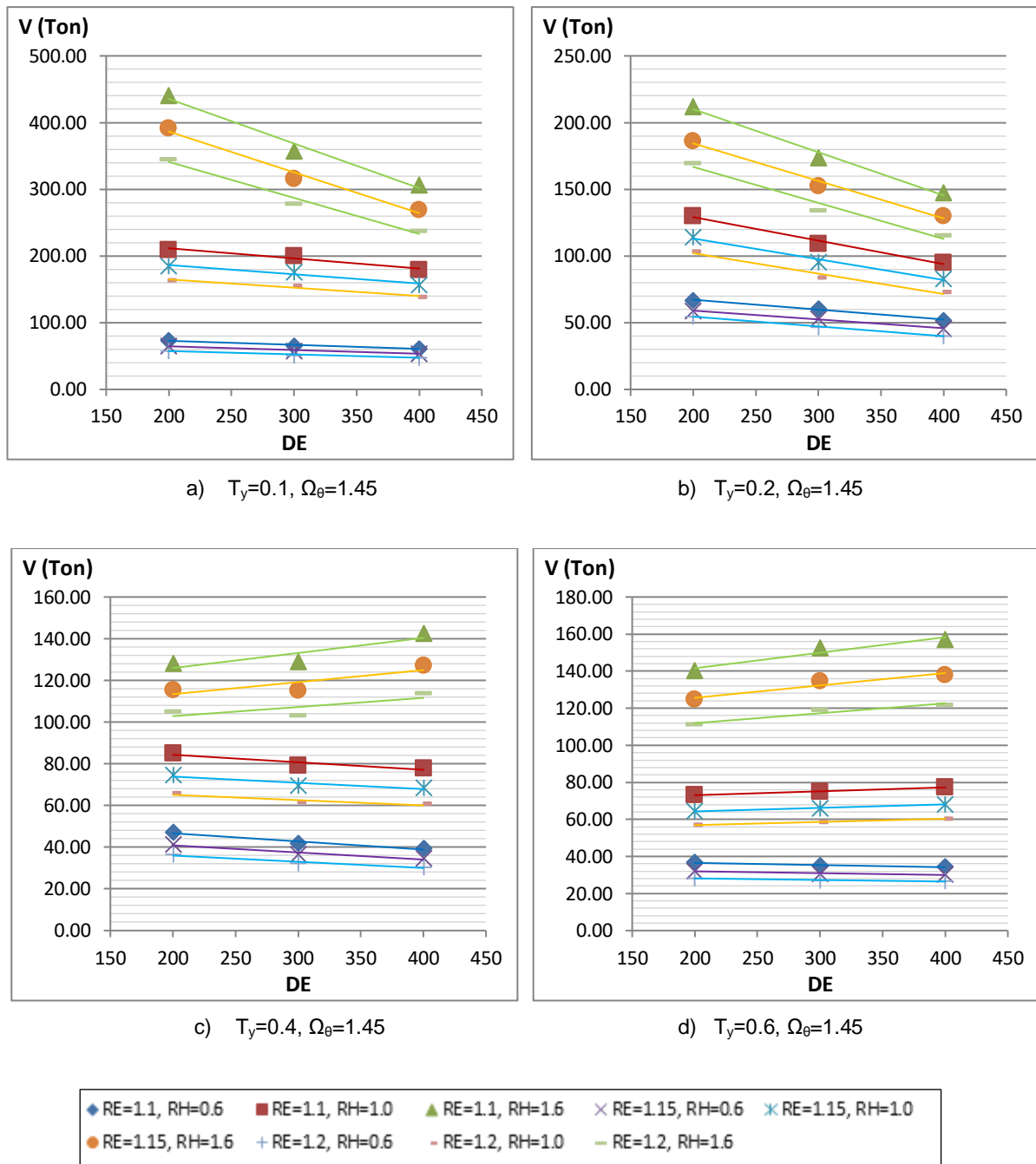


Figura D.155. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.

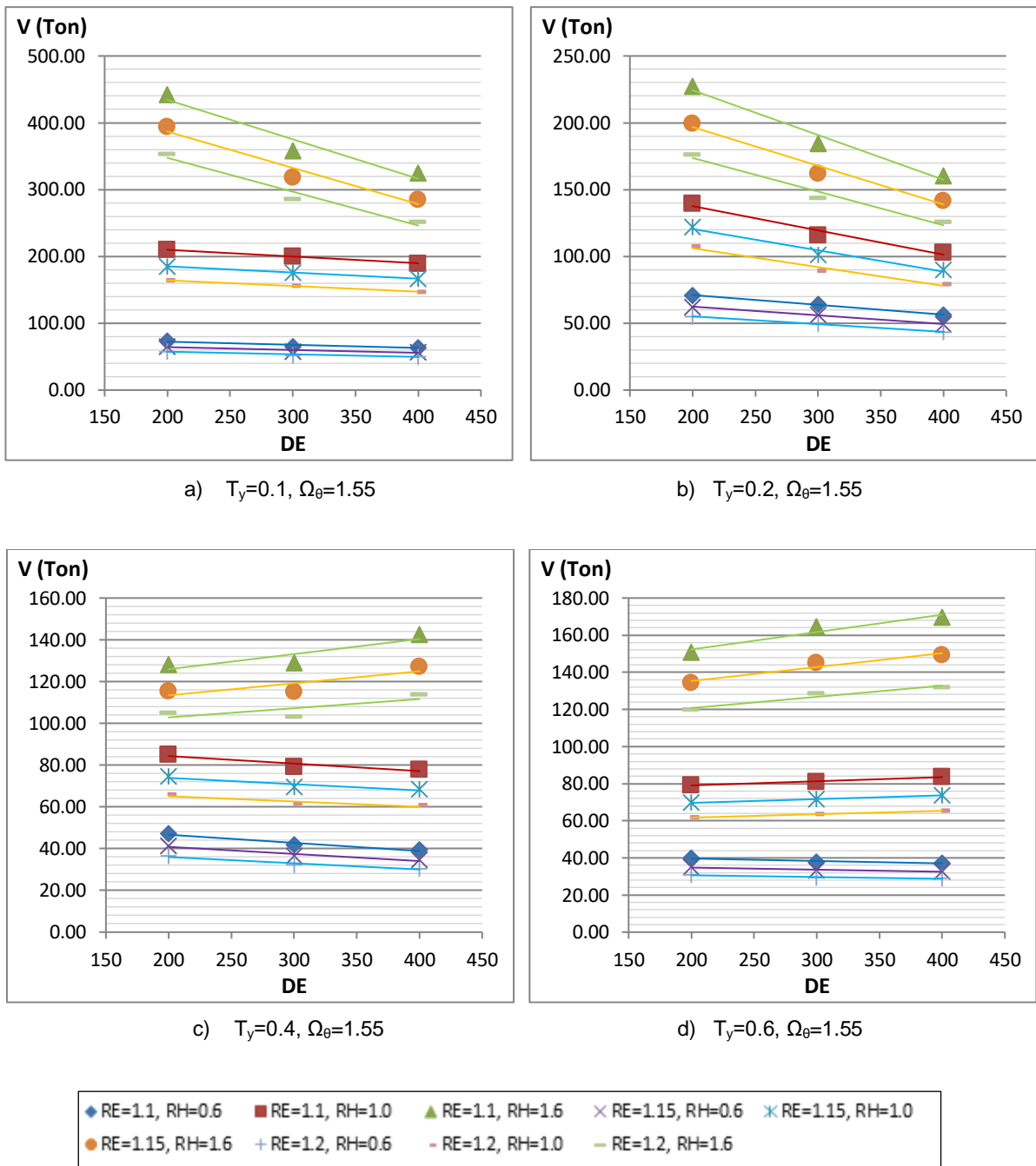
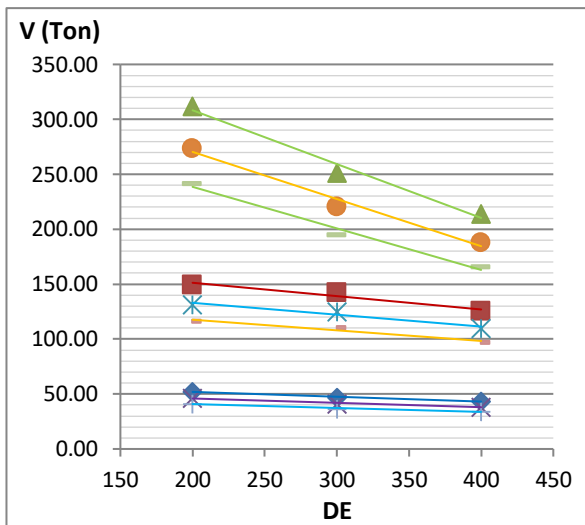
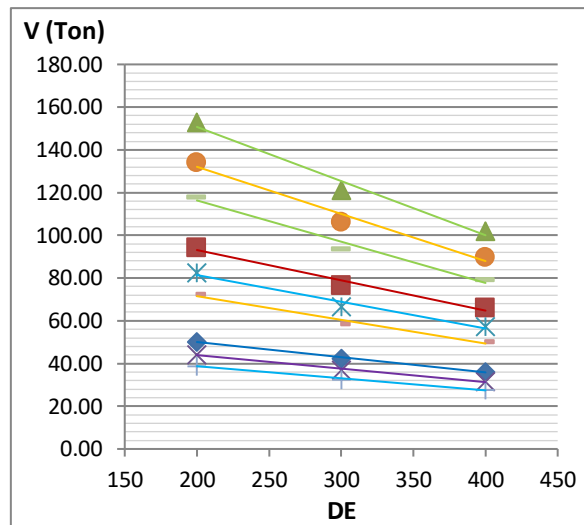


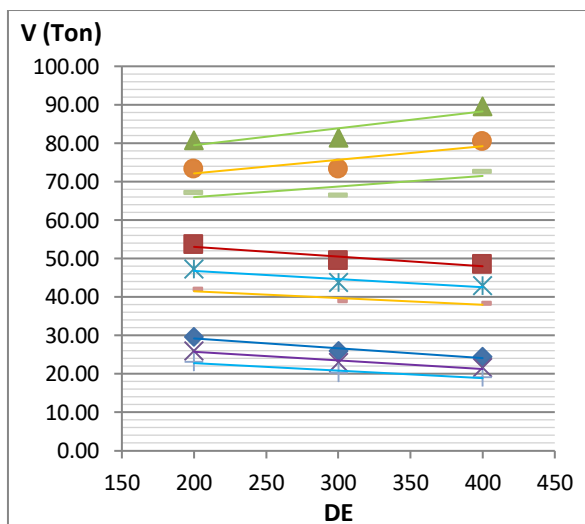
Figura D.156. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



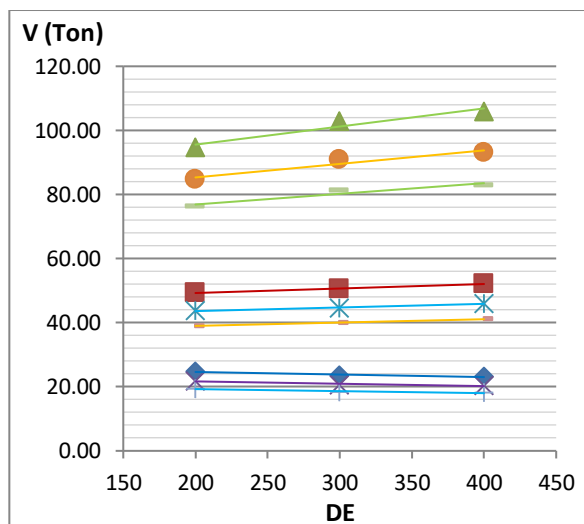
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

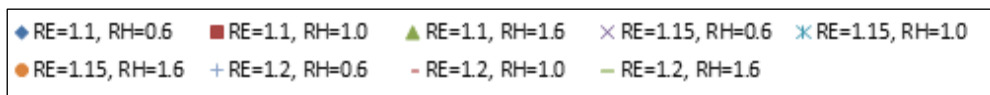


Figura D.157. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.

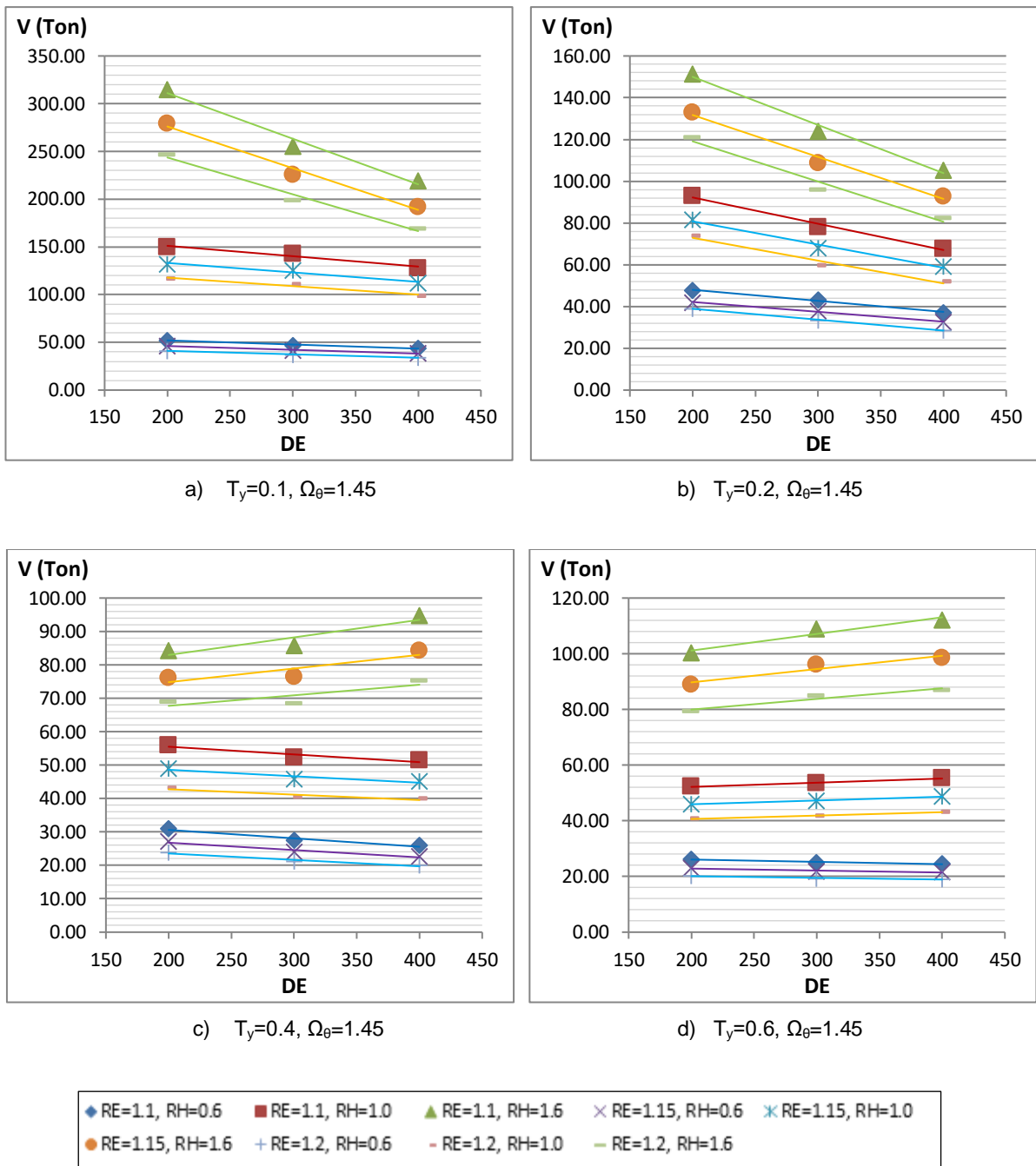
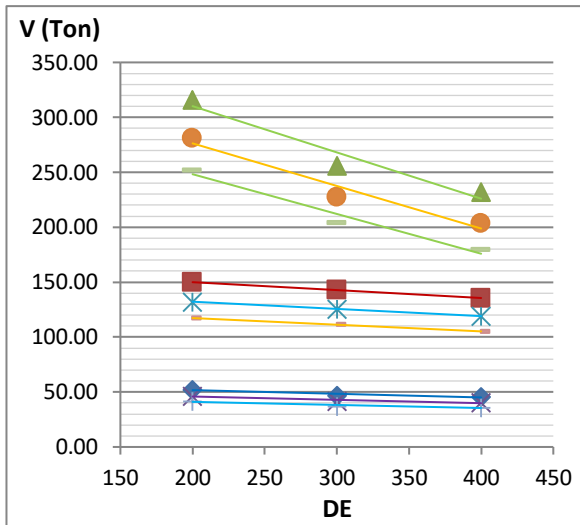
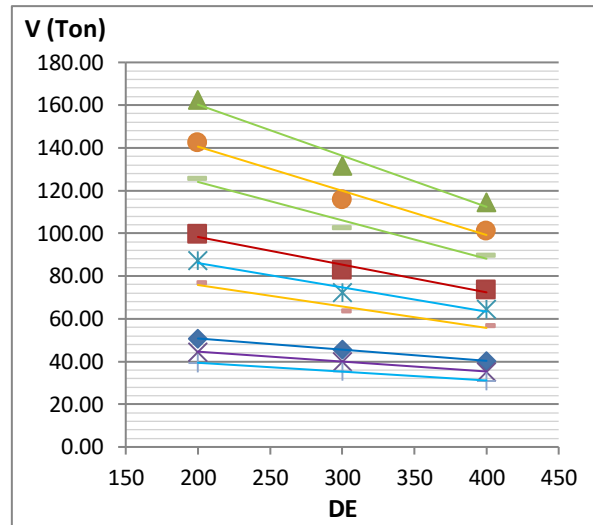


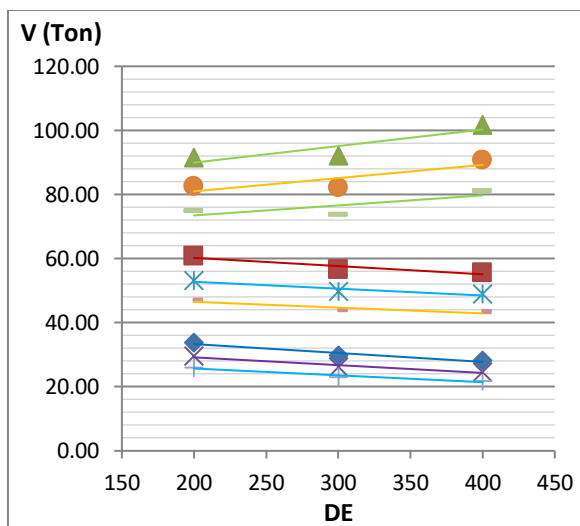
Figura D.158. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas



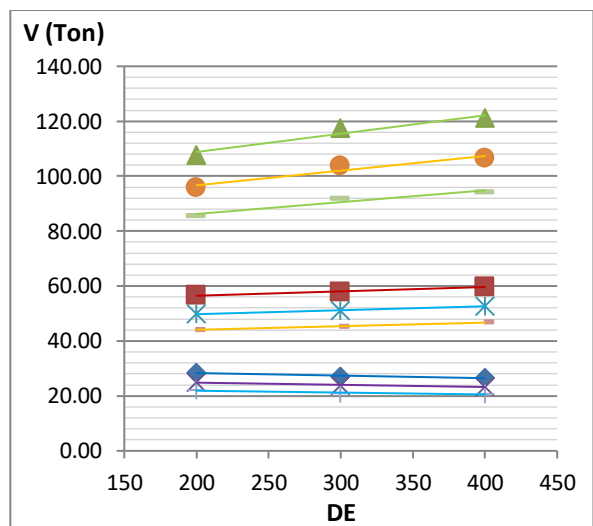
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

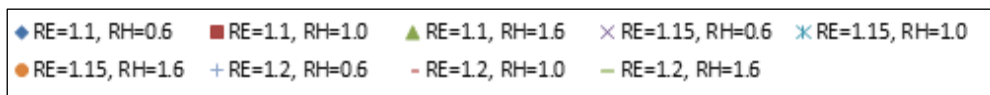


Figura D.159. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas

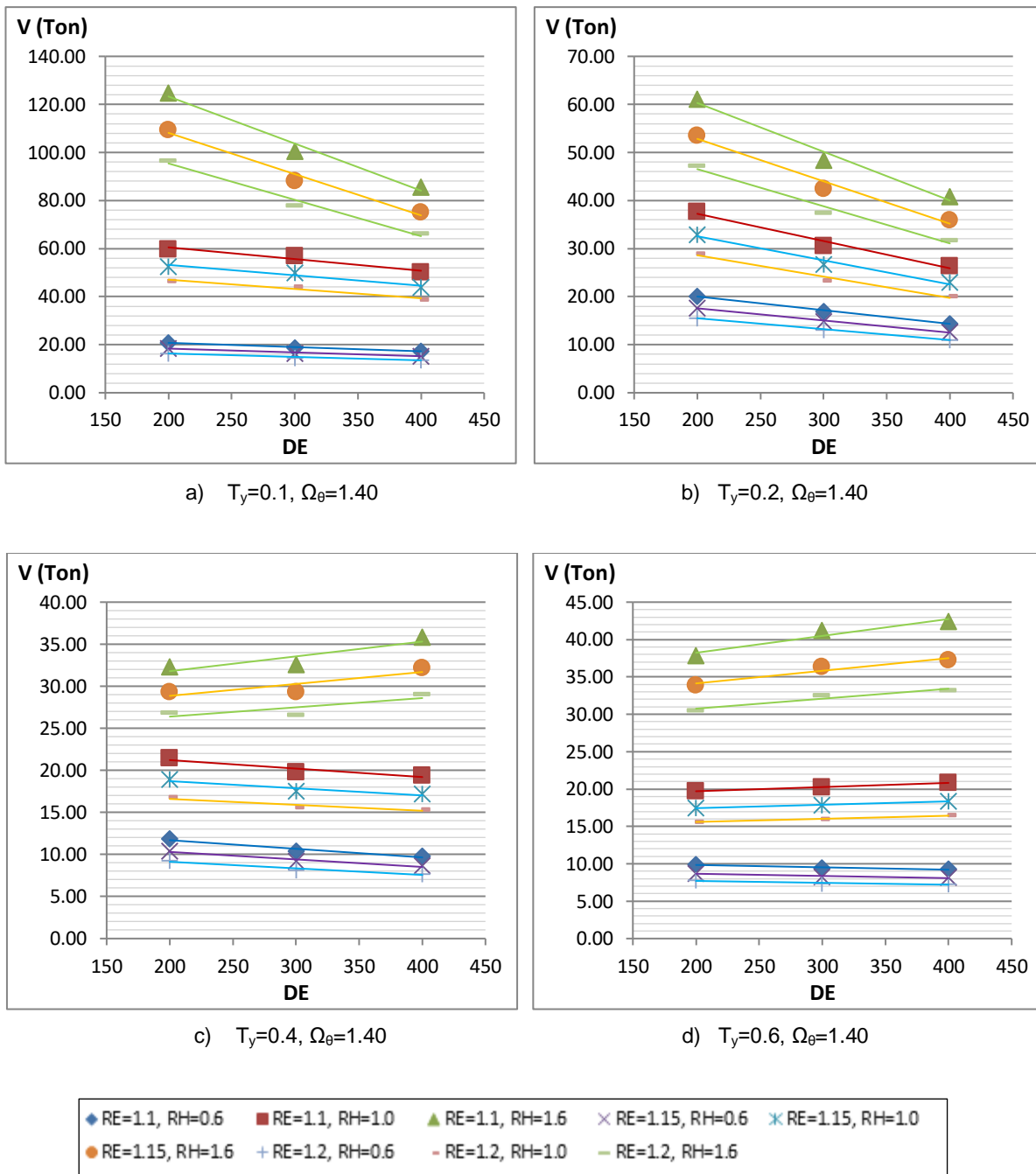


Figura D.160. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

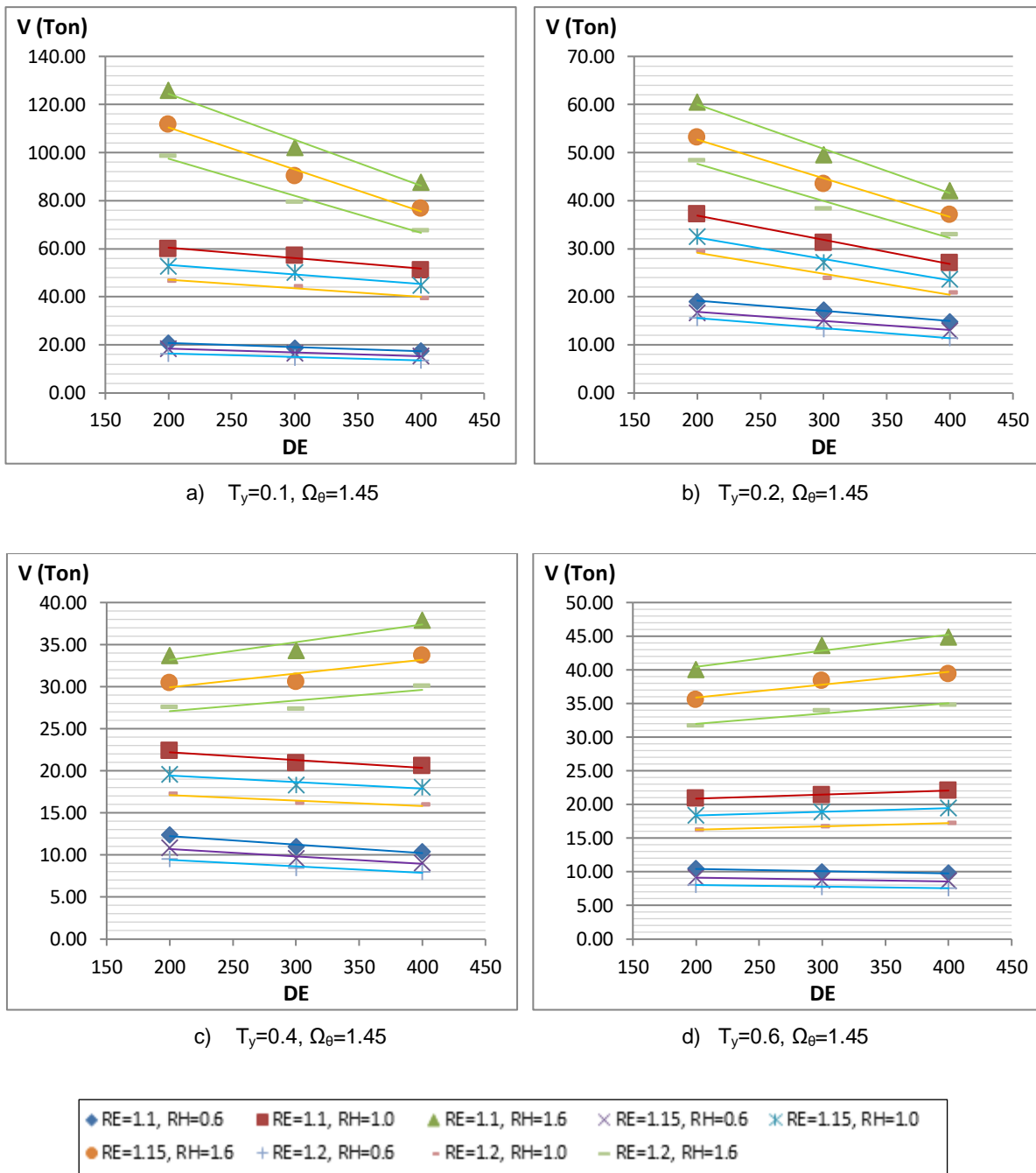


Figura D.161. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

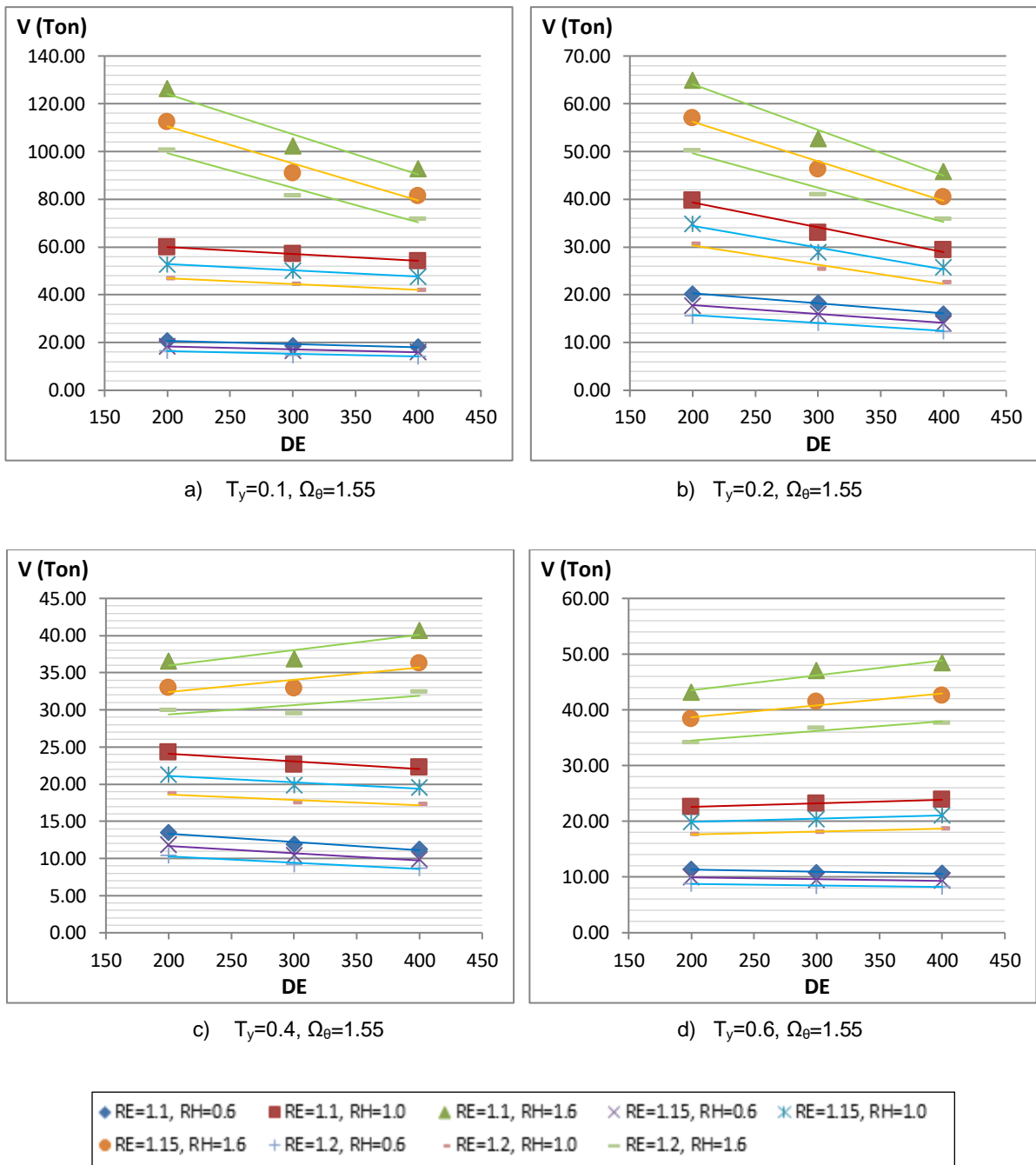
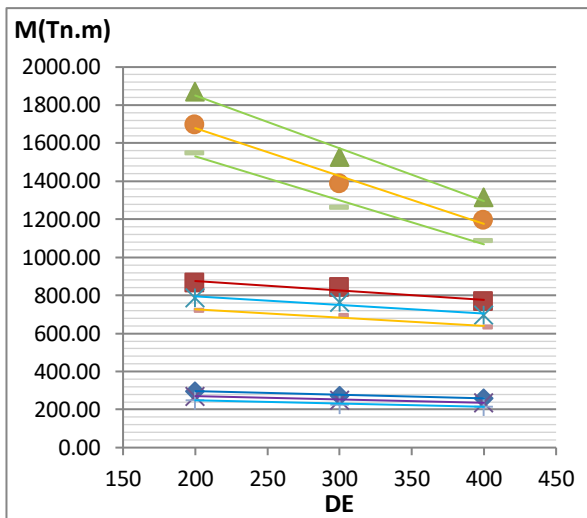
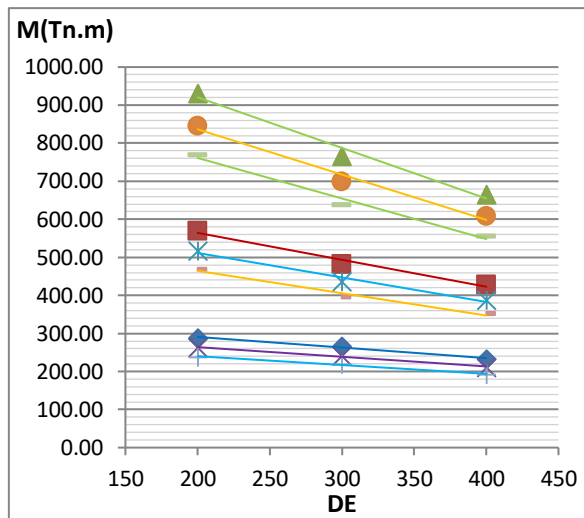


Figura D.162. Relación del cortante máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

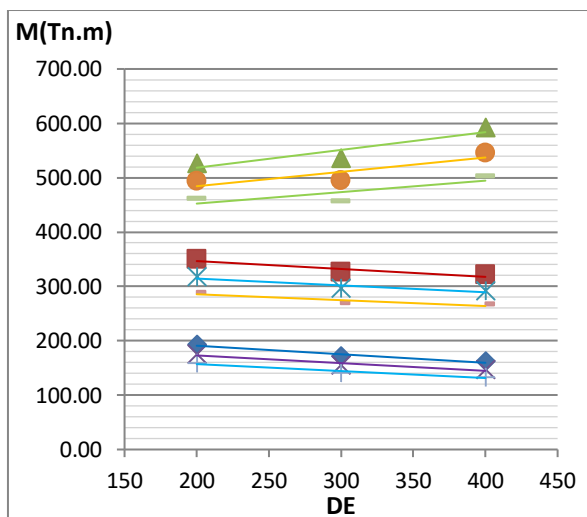
Momento máximo de columnas:



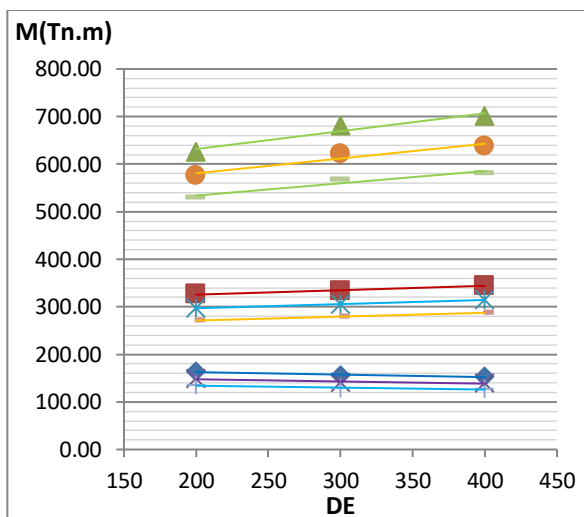
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

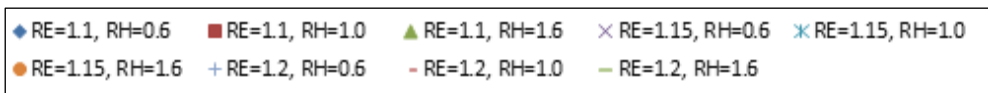
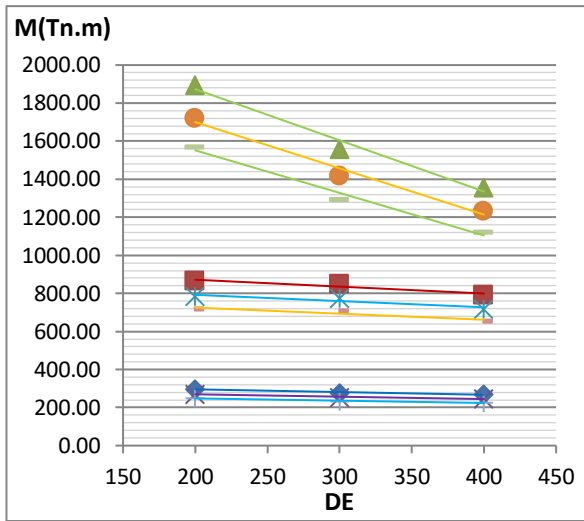
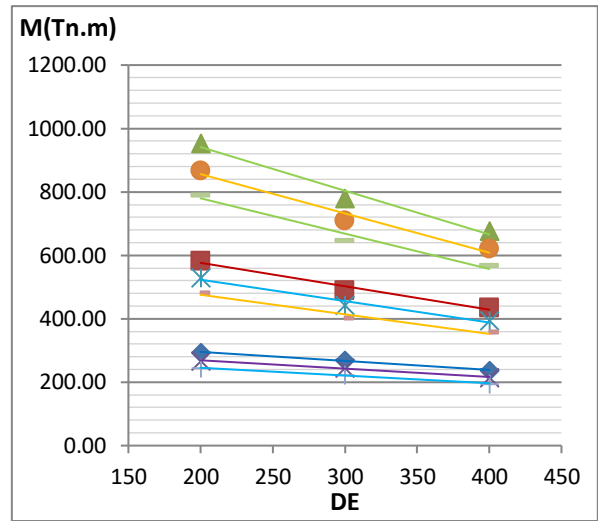


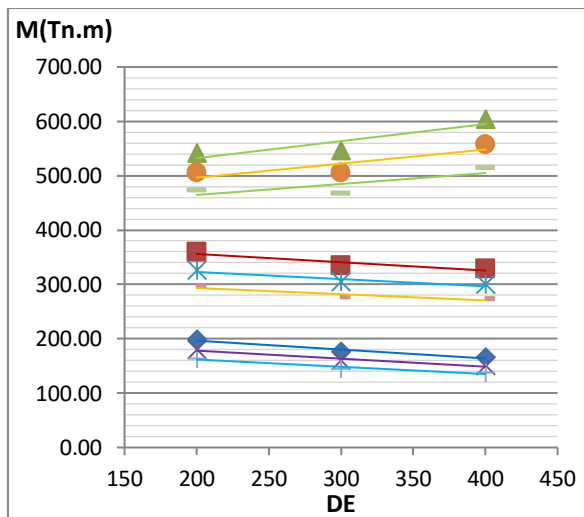
Figura D.163. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



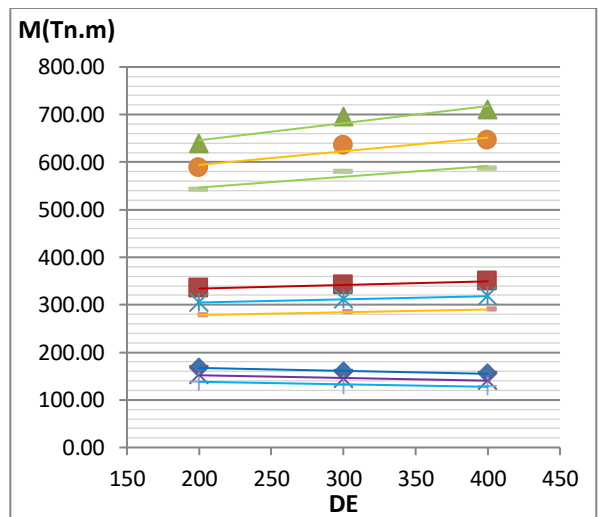
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

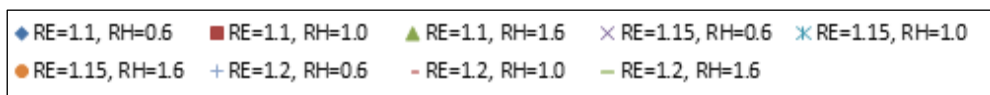
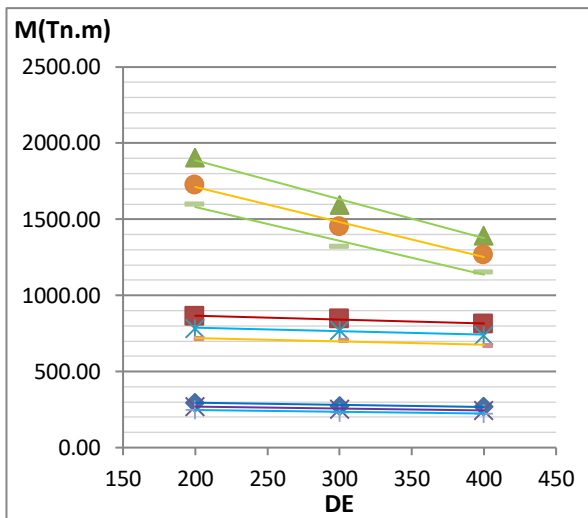
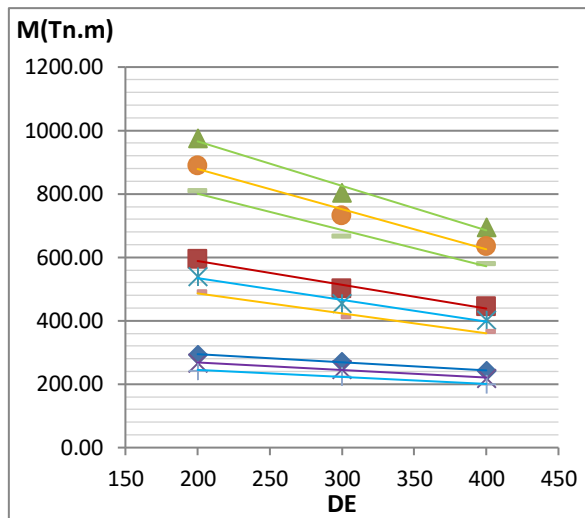


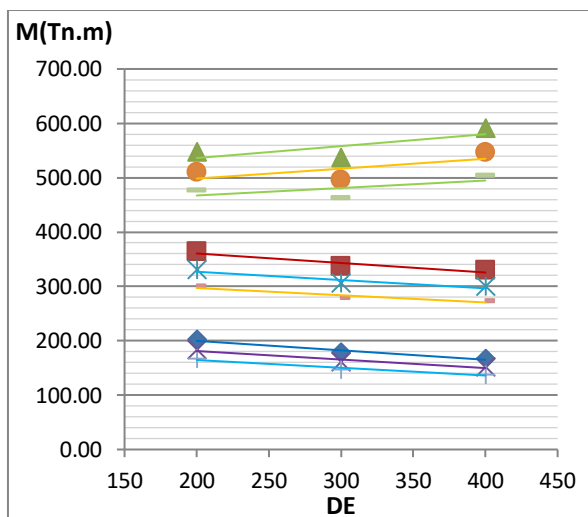
Figura D.164. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



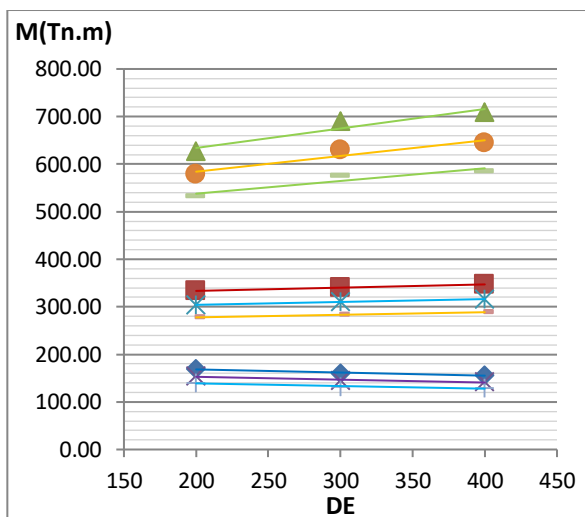
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

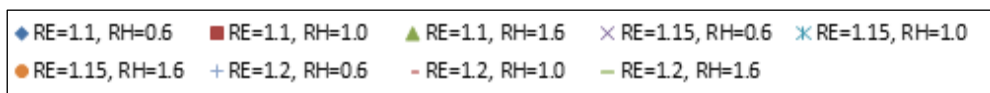
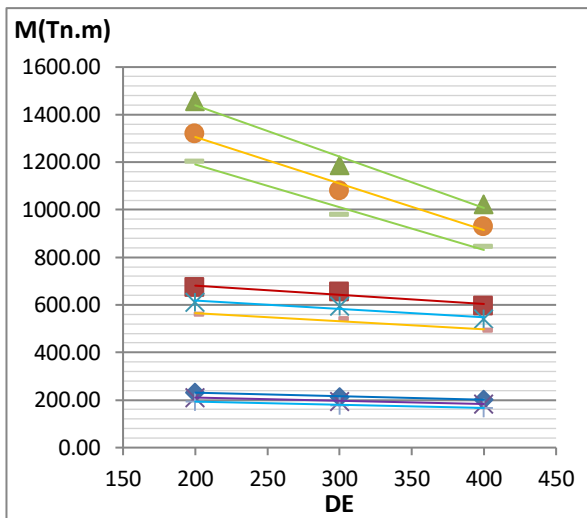
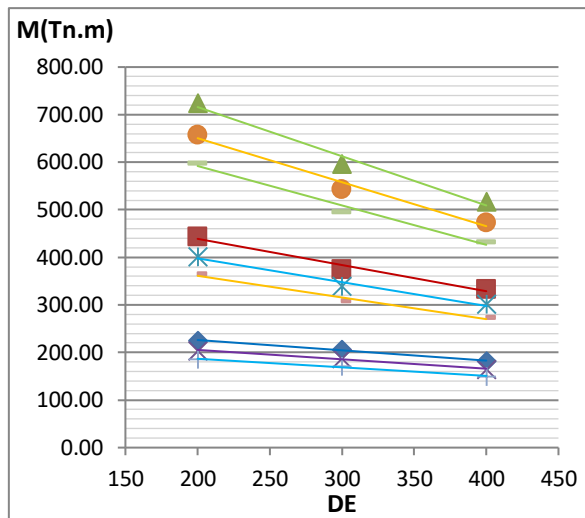


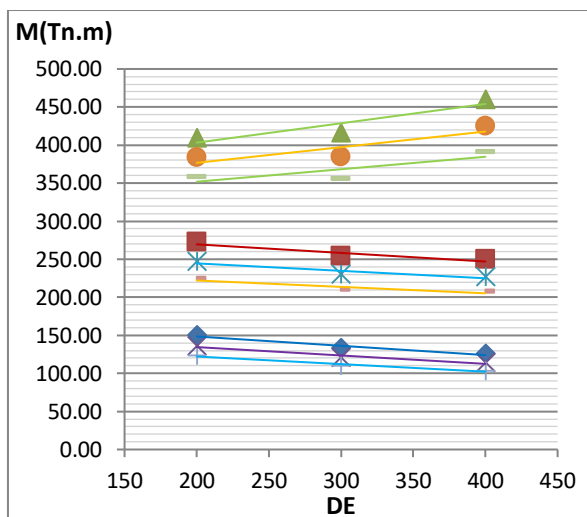
Figura D.165. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



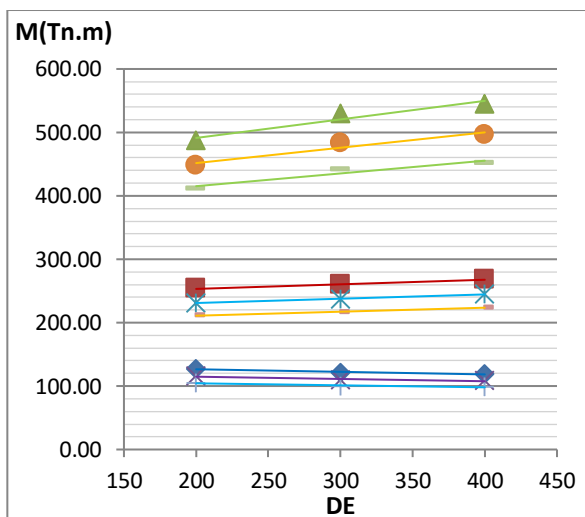
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

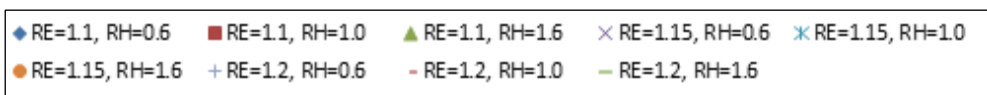
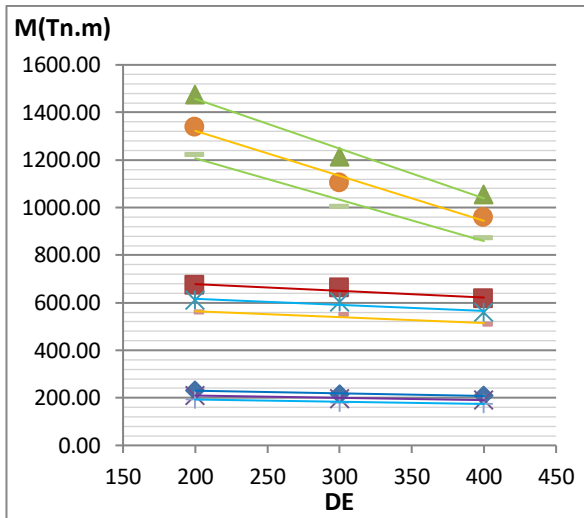
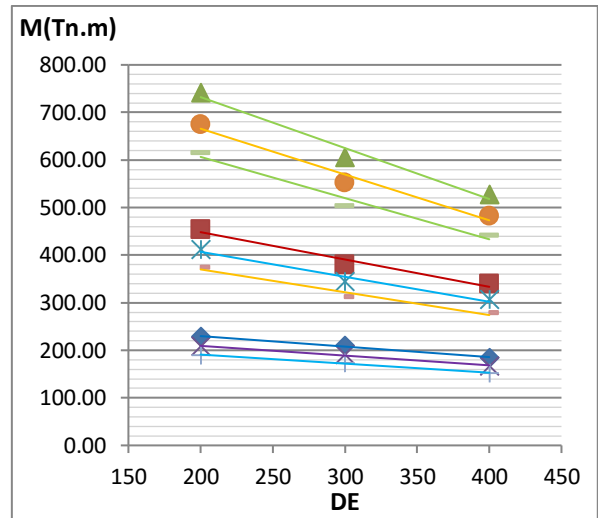


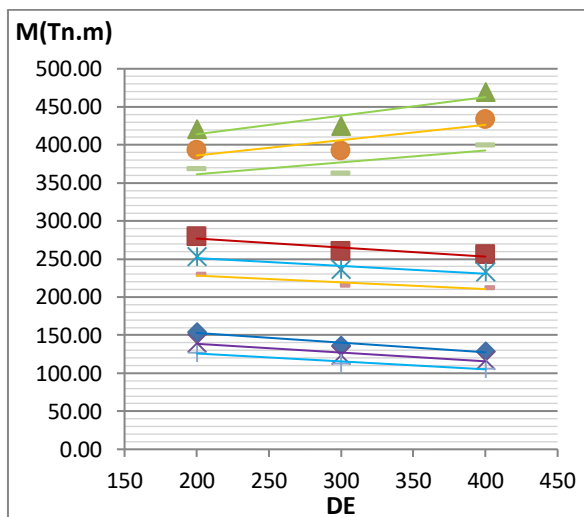
Figura D.166. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



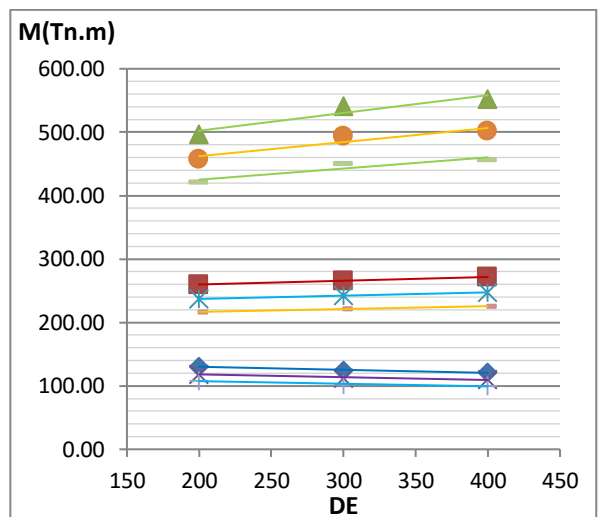
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

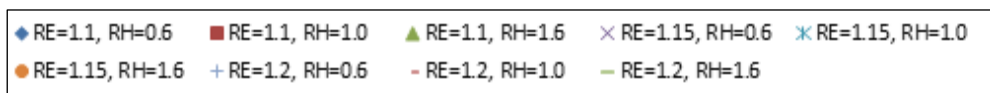
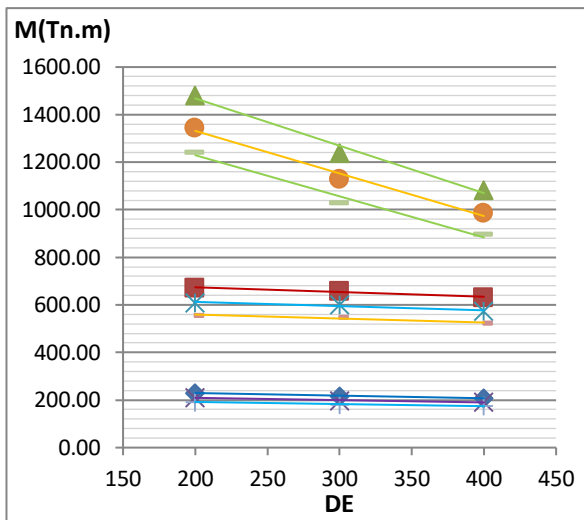
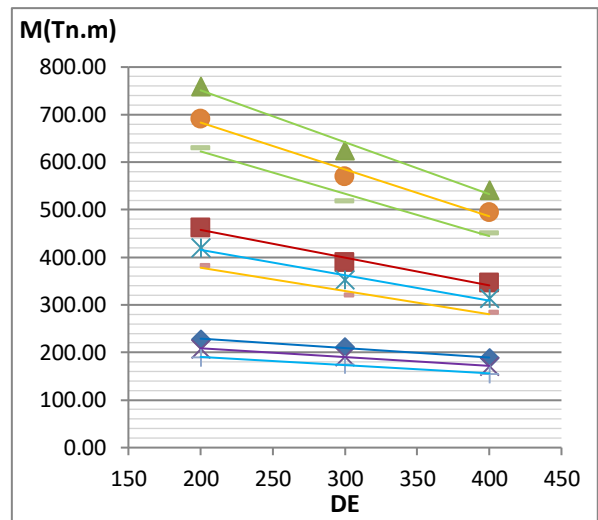


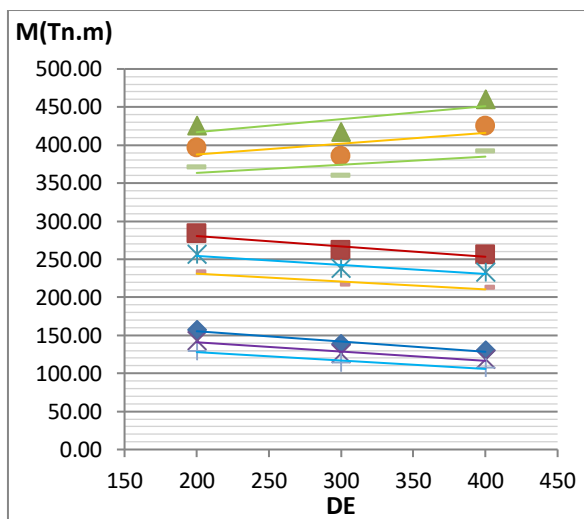
Figura D.167. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



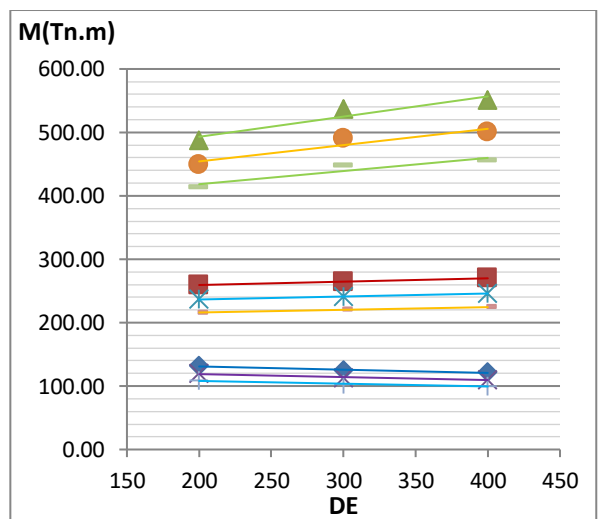
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

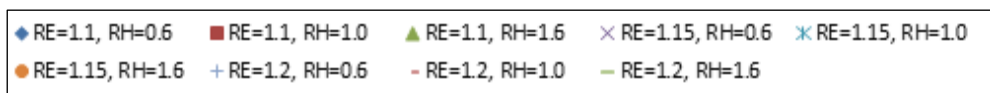
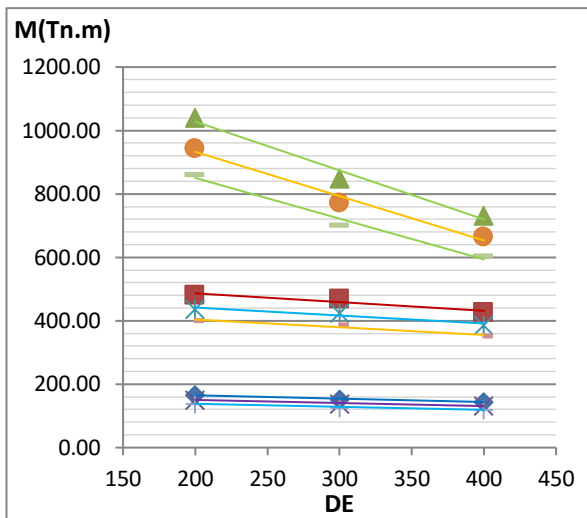
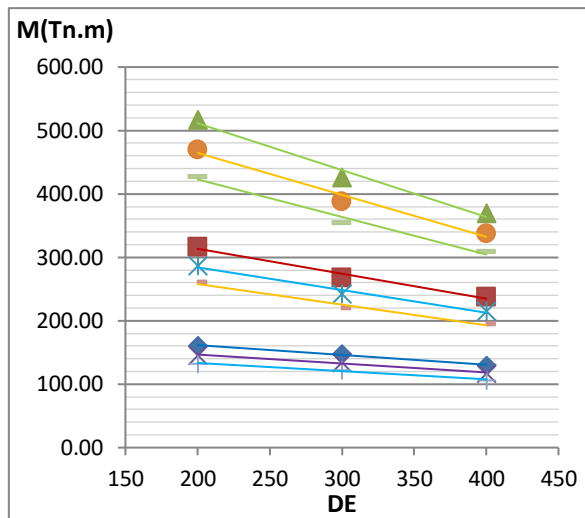


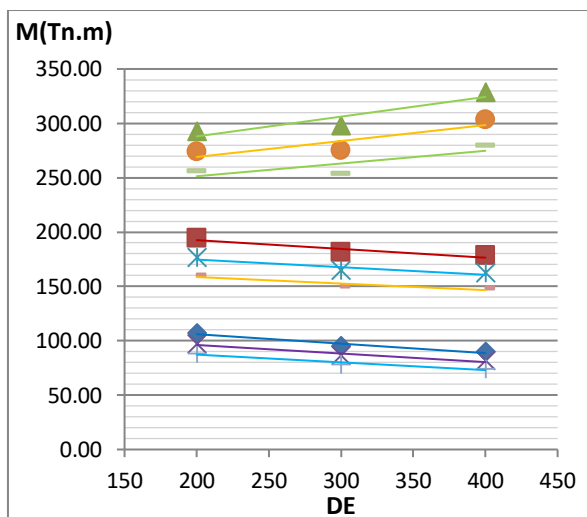
Figura D.168. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



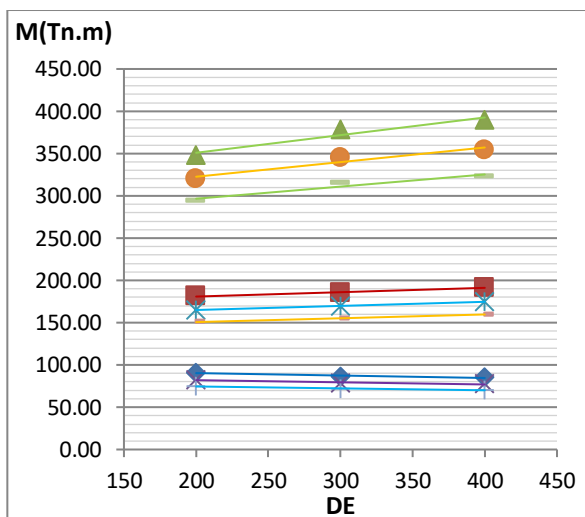
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

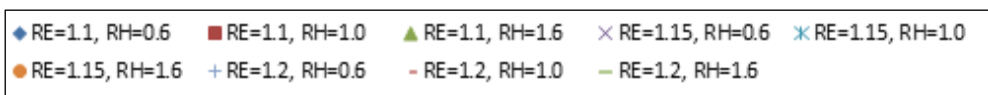
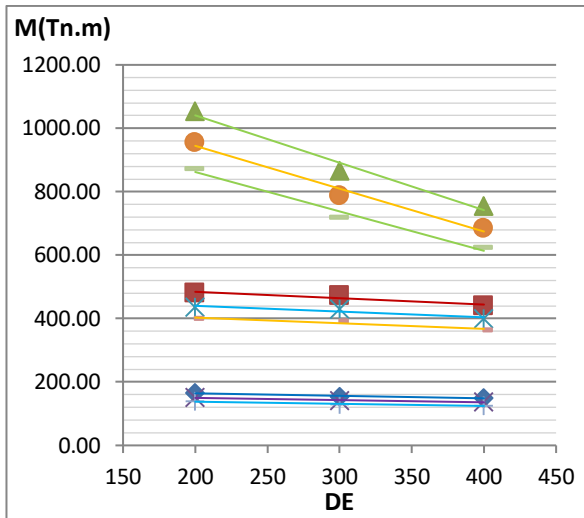
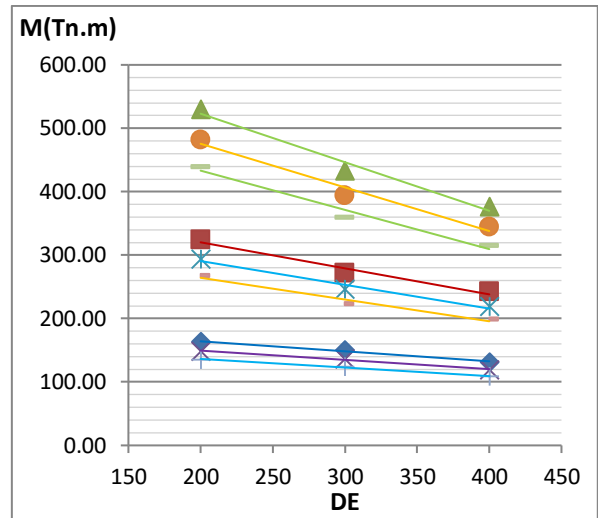


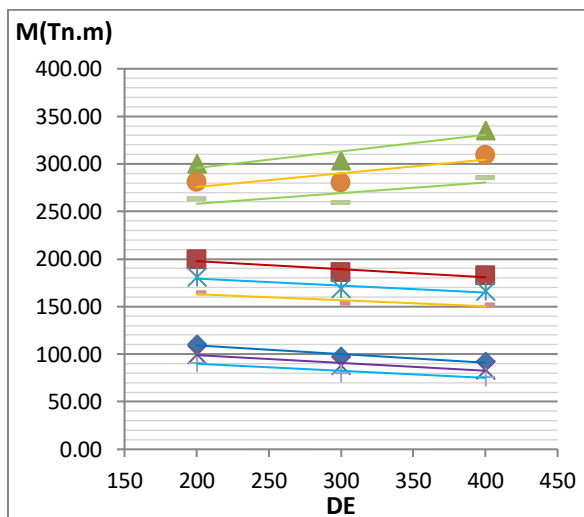
Figura D.169. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



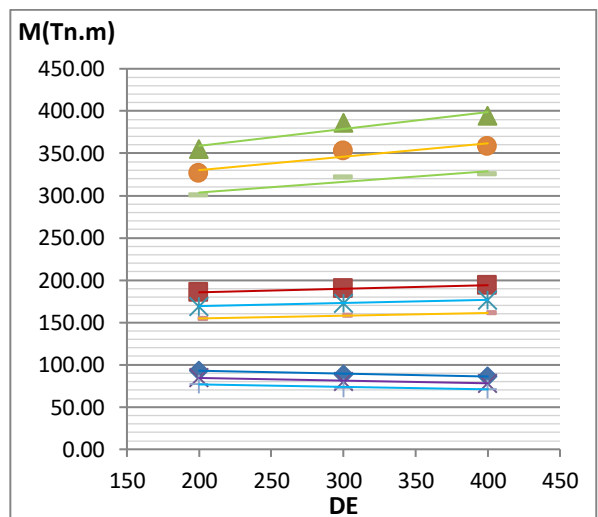
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

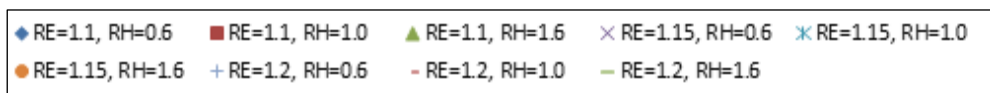
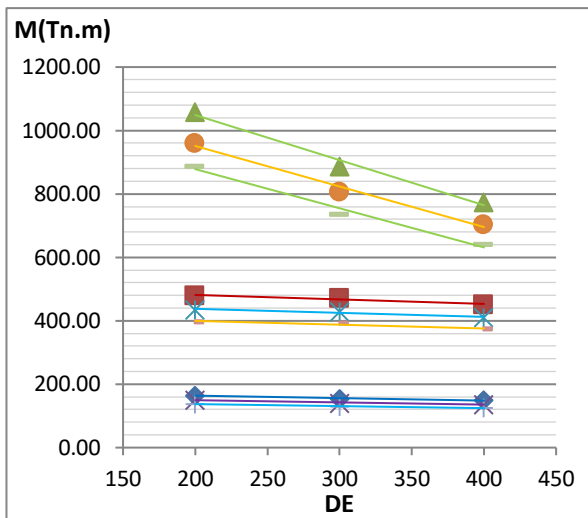
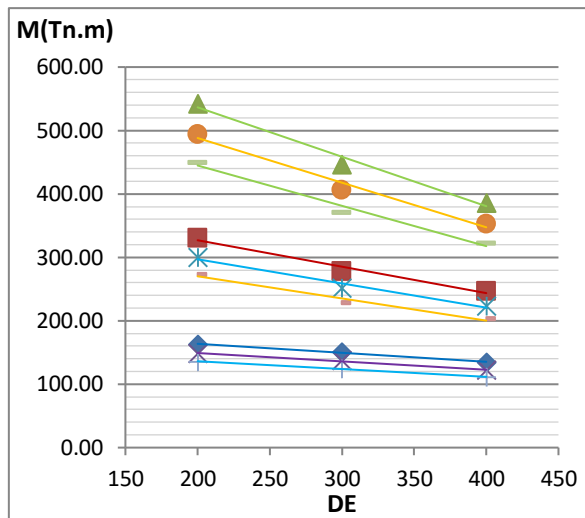


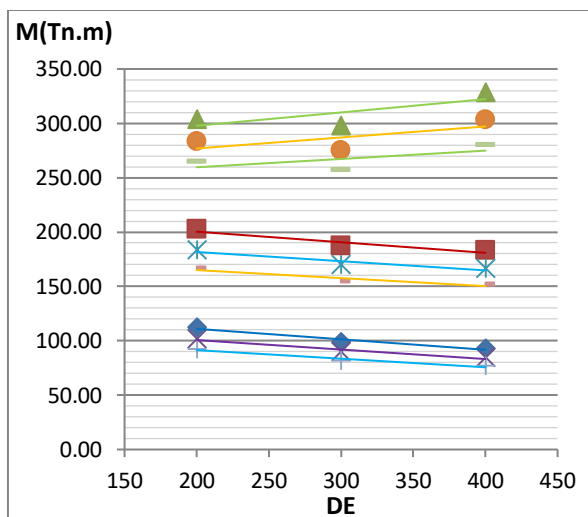
Figura D.170. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



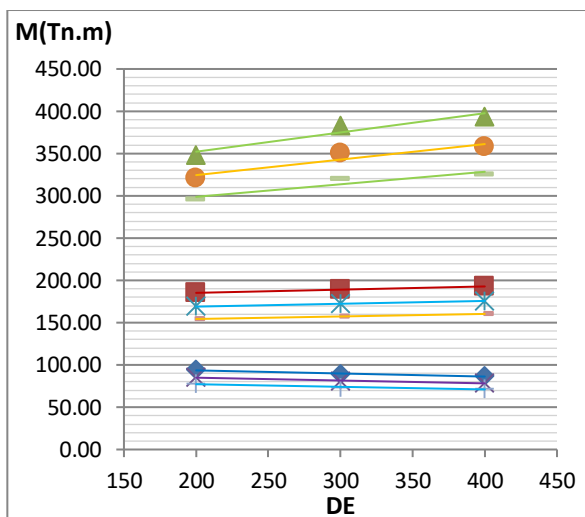
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

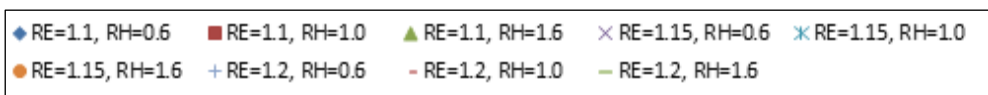
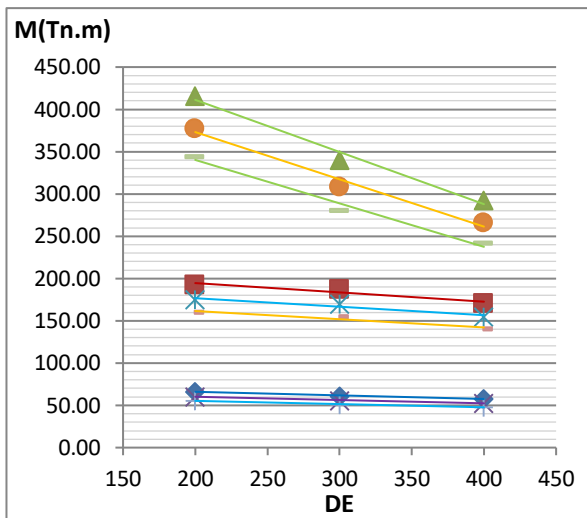
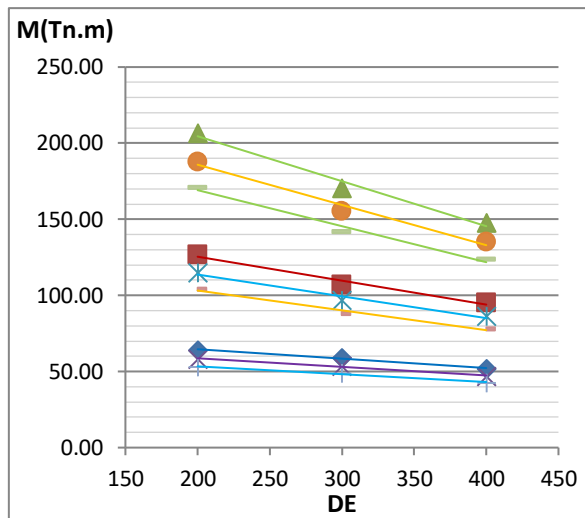


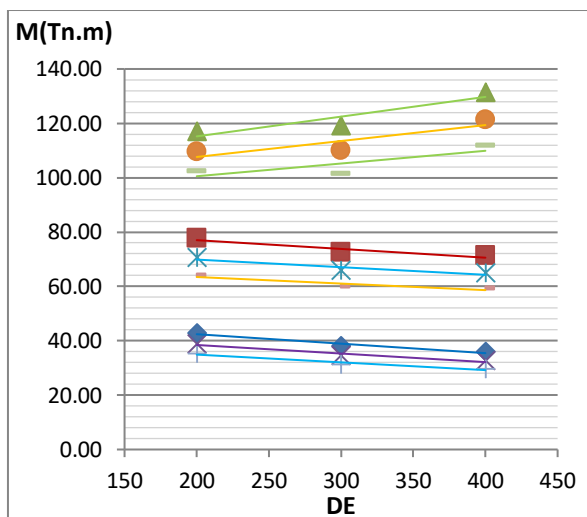
Figura D.171. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



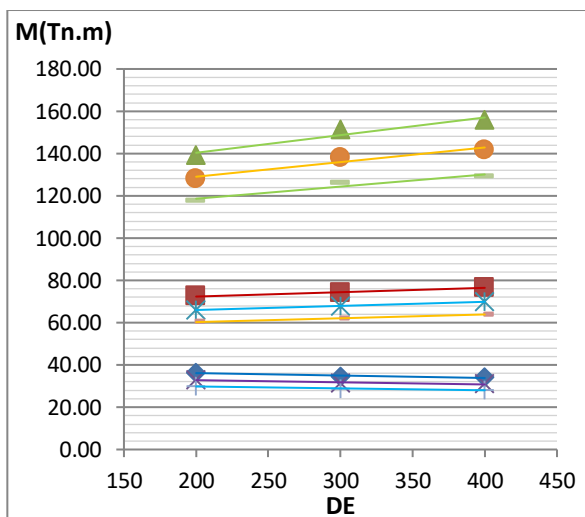
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

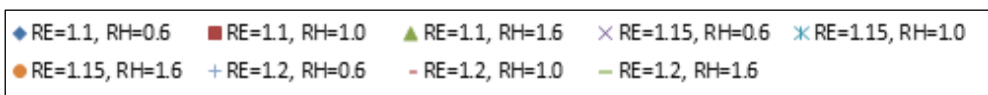
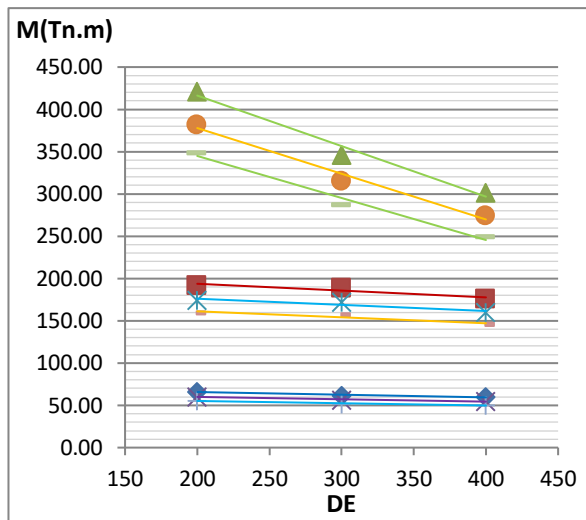
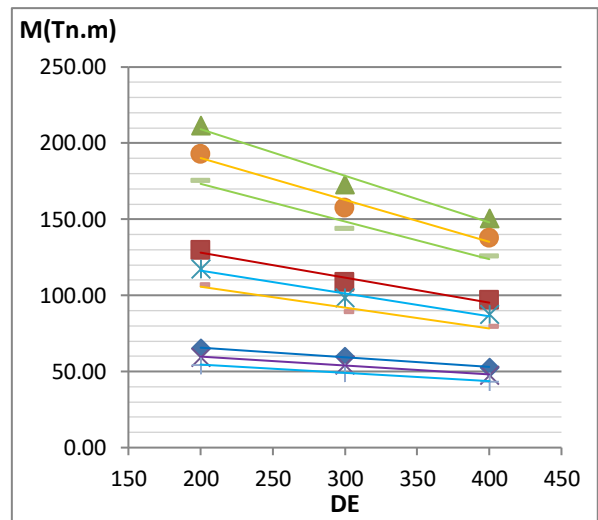


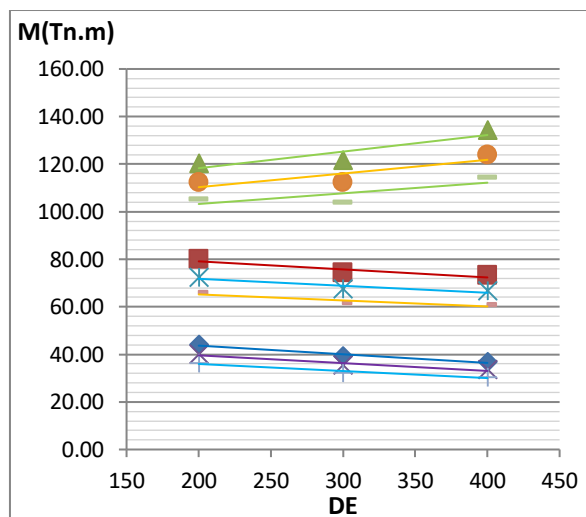
Figura D.172. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



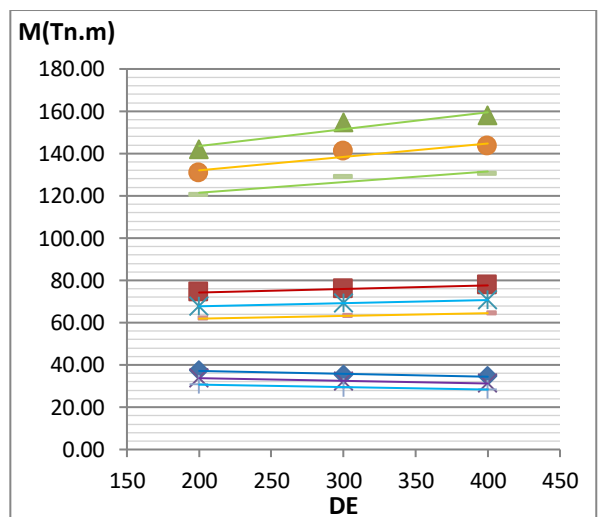
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

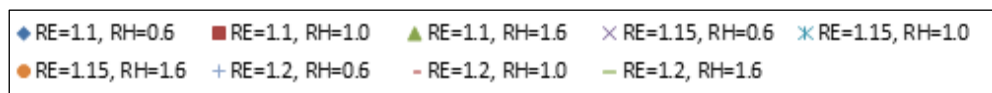
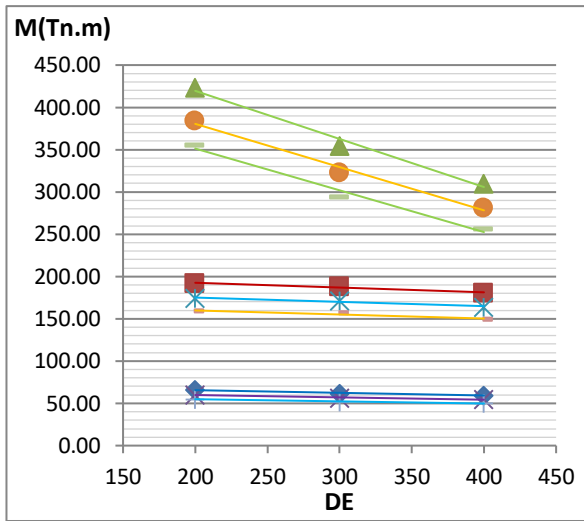
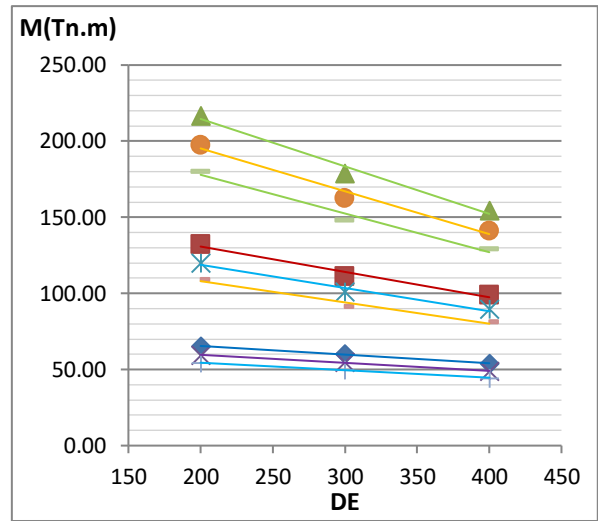


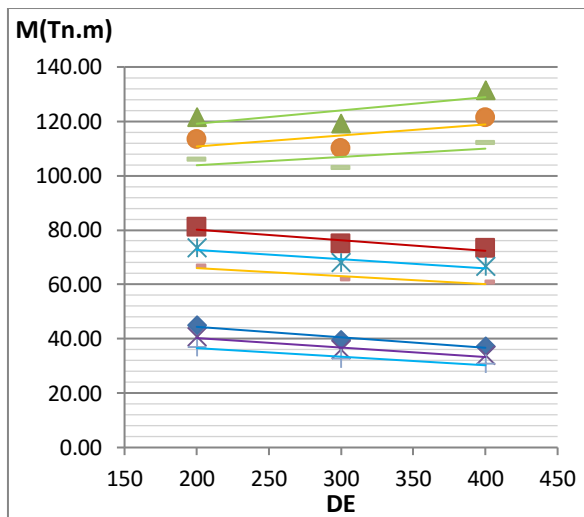
Figura D.173. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



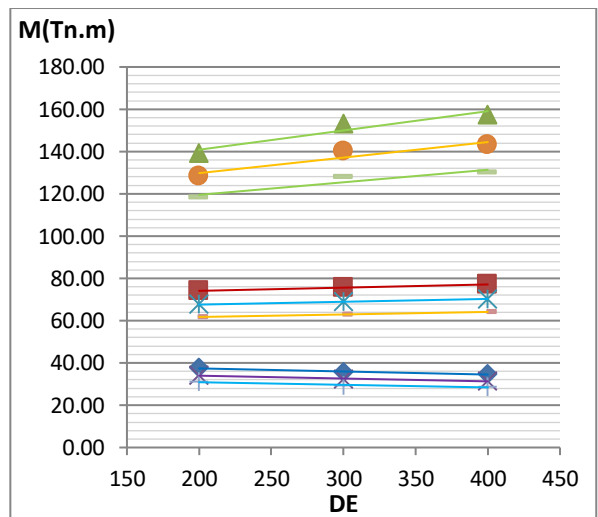
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

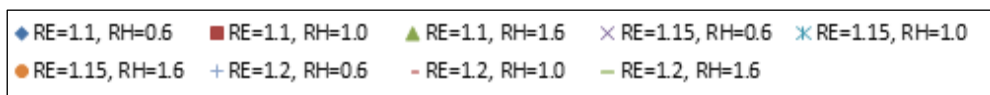
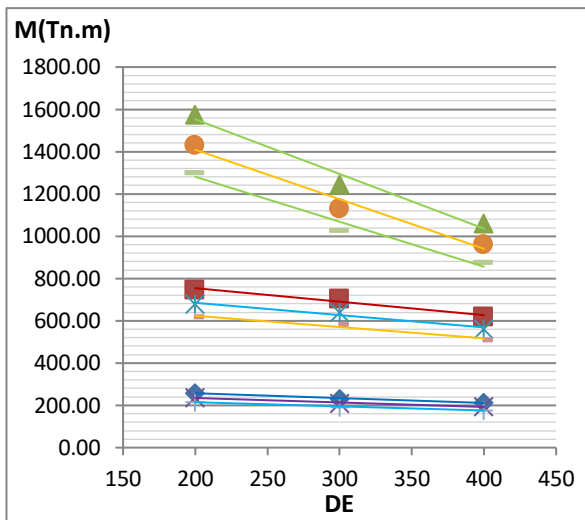
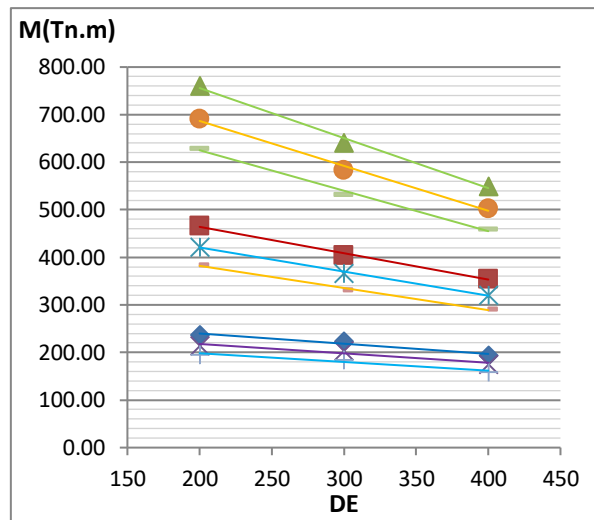


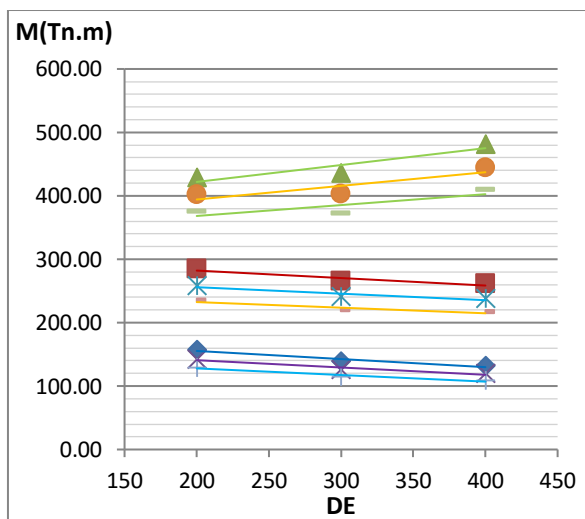
Figura D.174. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



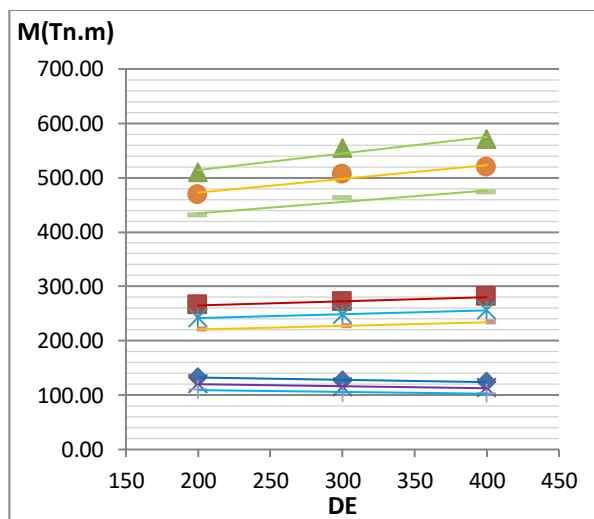
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

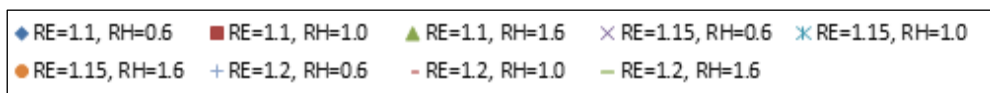
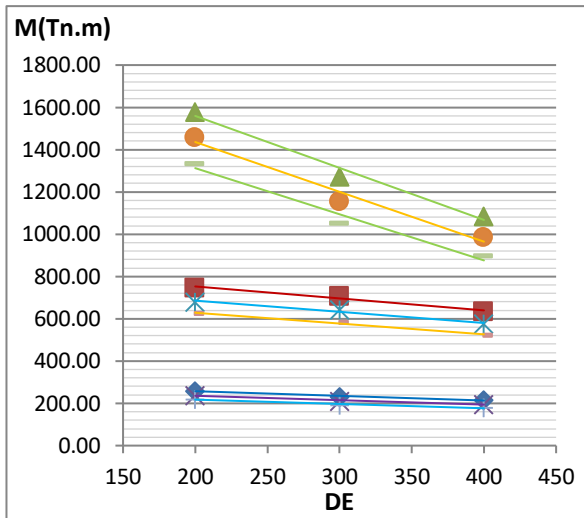
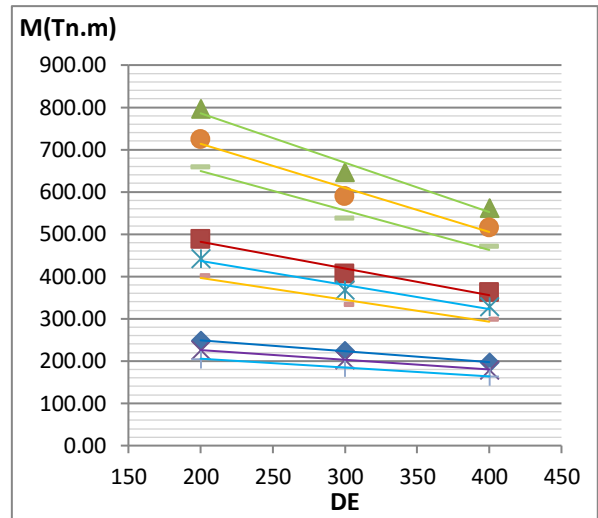


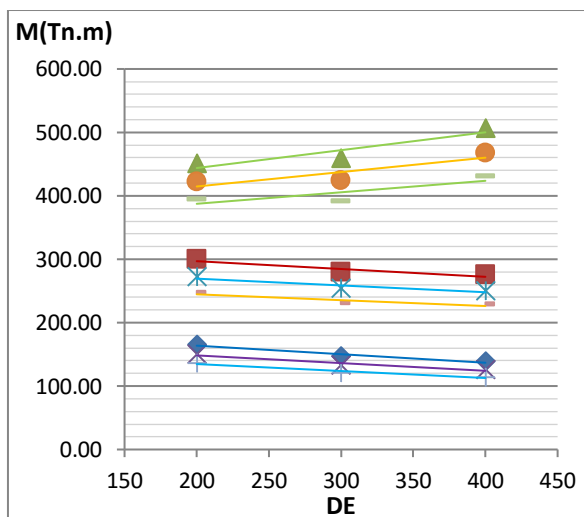
Figura D.175. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



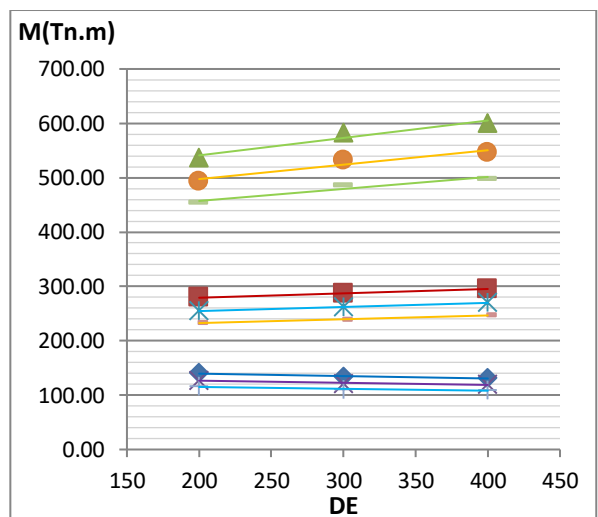
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

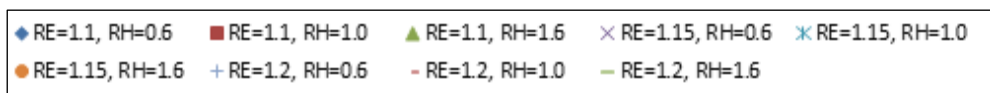
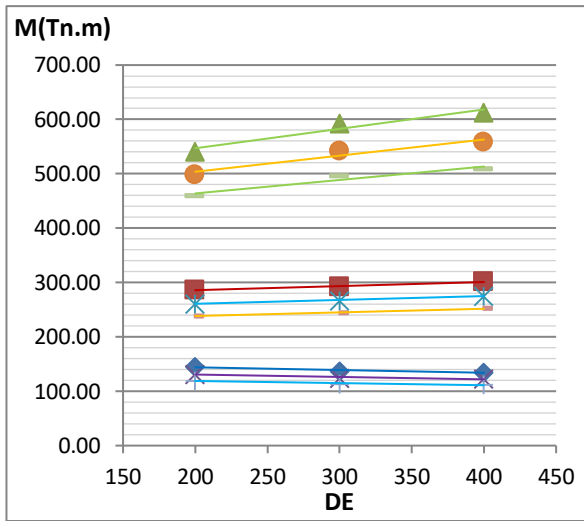
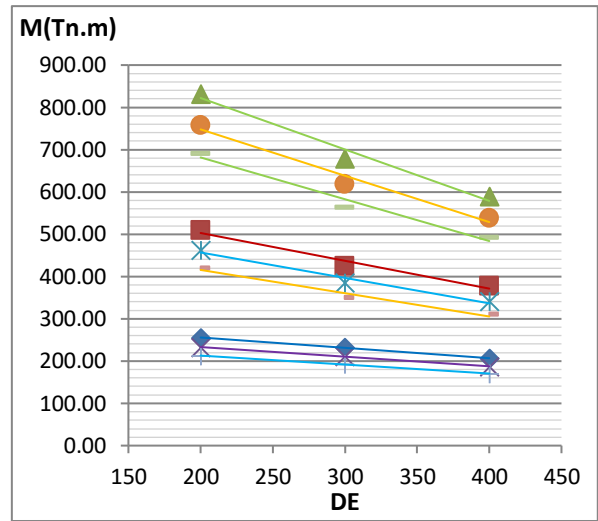


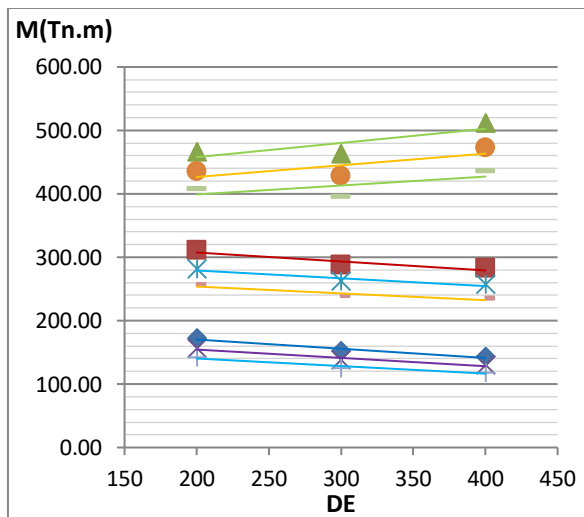
Figura D.176. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



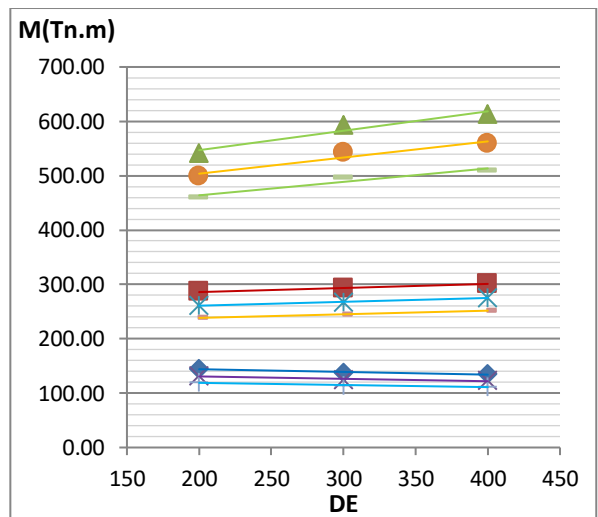
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

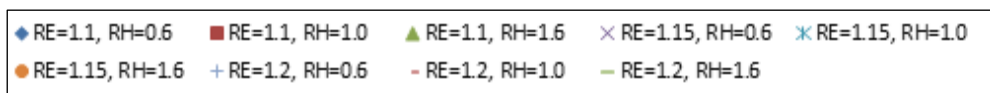
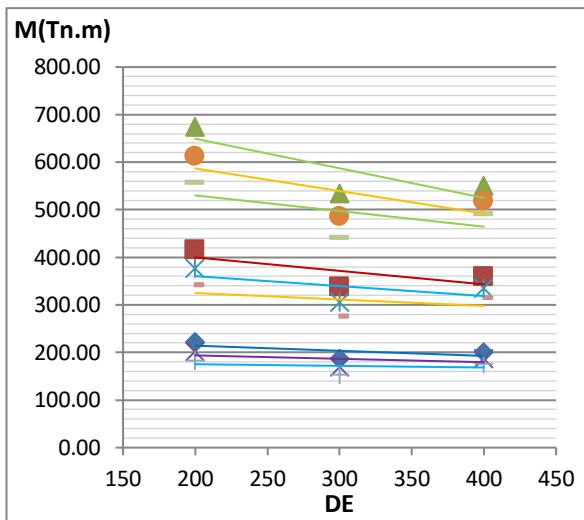
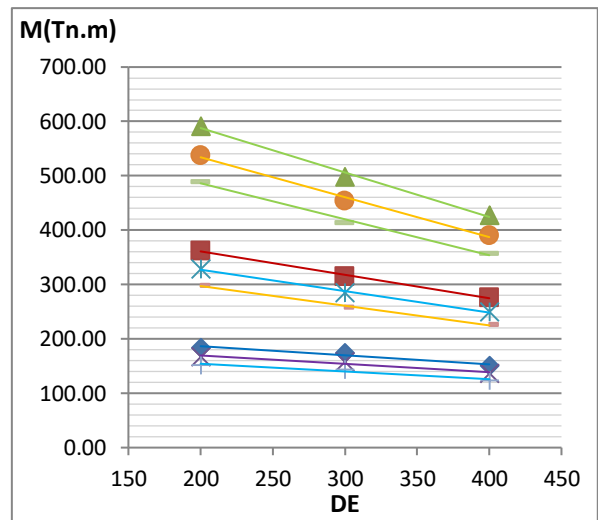


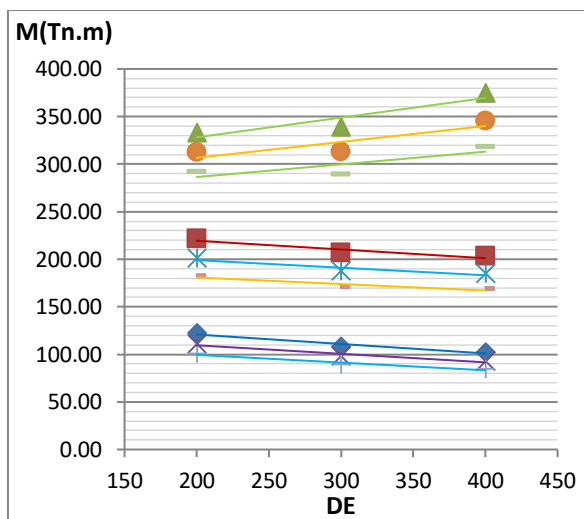
Figura D.177. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



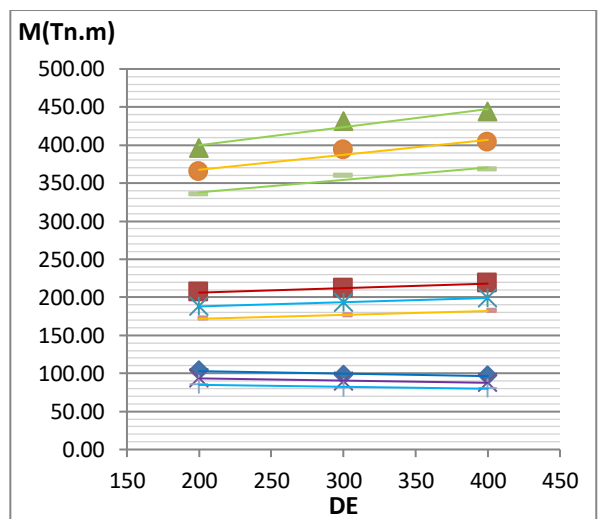
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

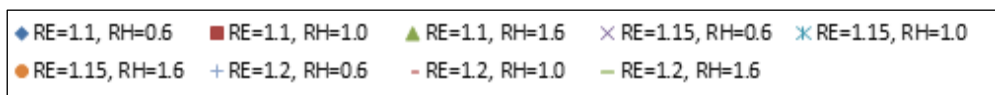
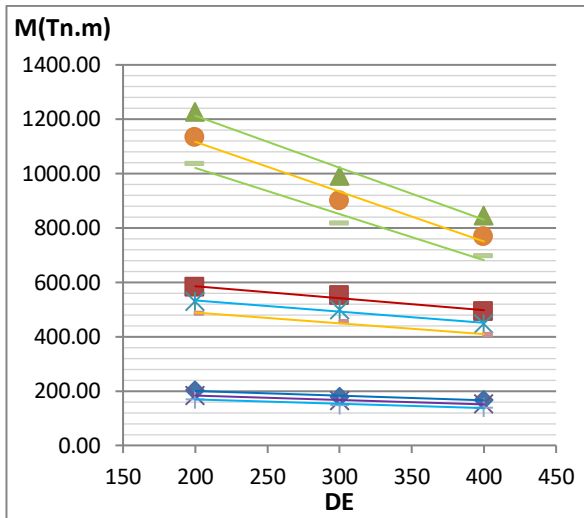
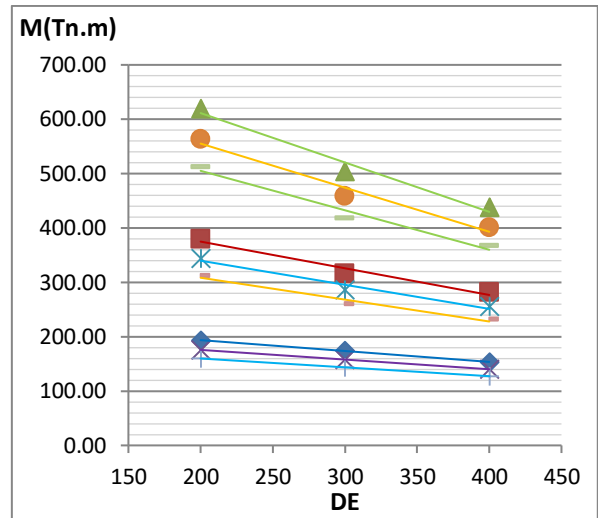


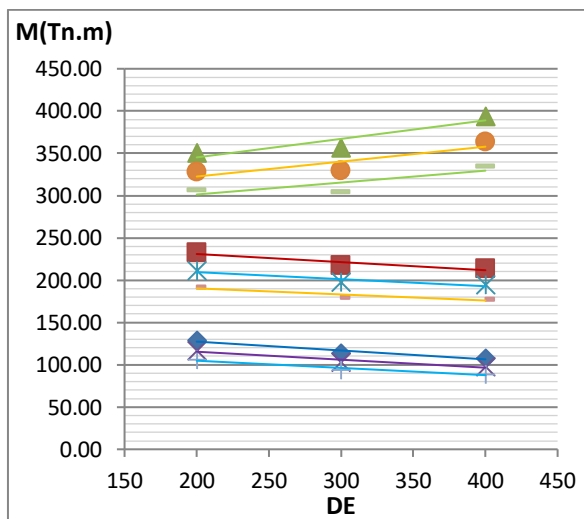
Figura D.178. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



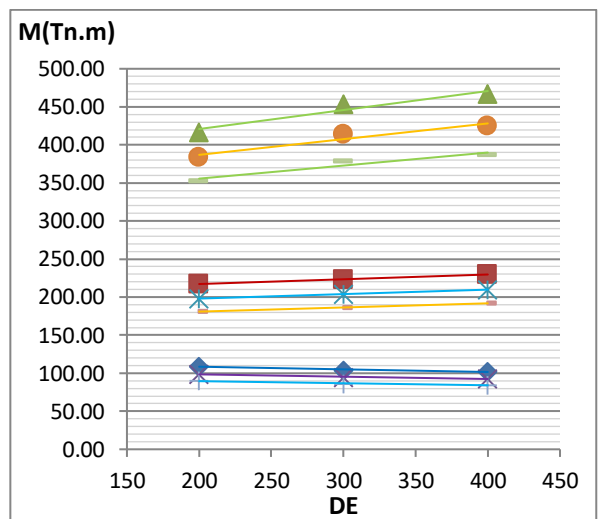
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

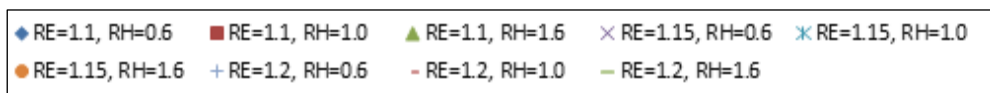
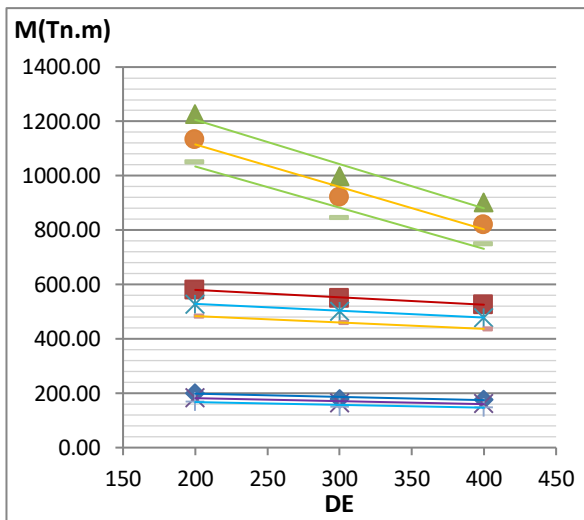
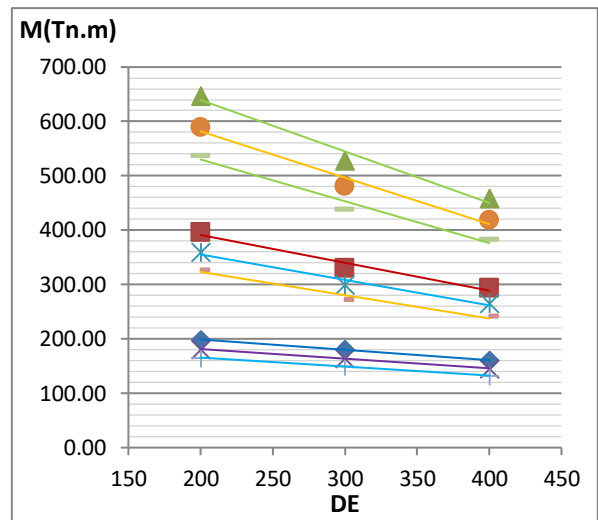


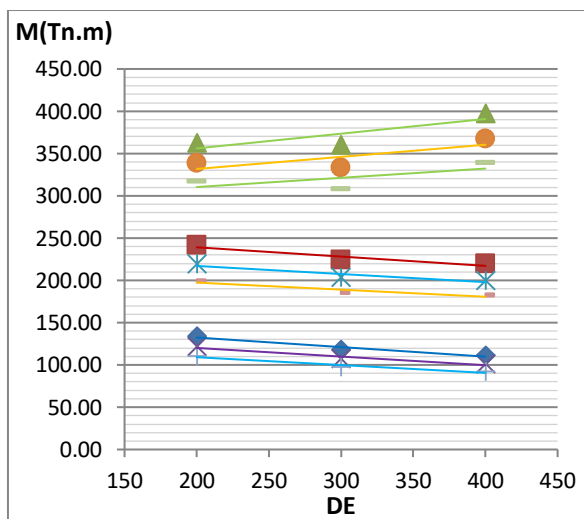
Figura D.179. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



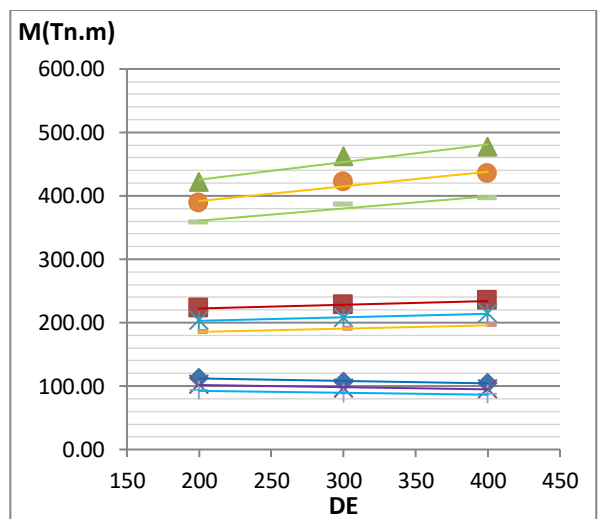
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

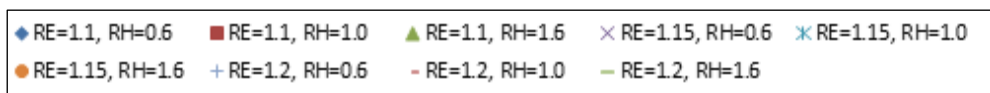


Figura D.180. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.

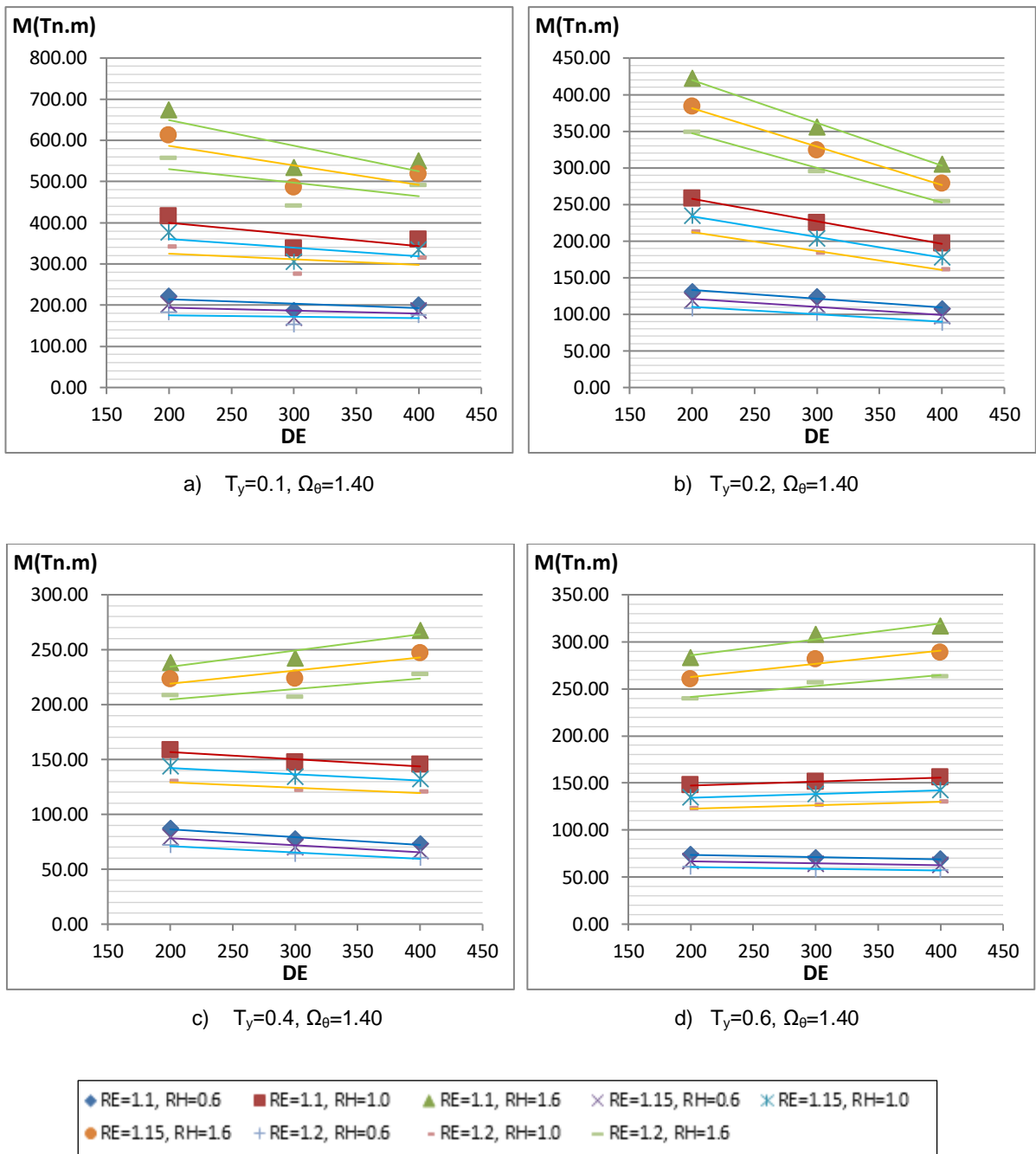
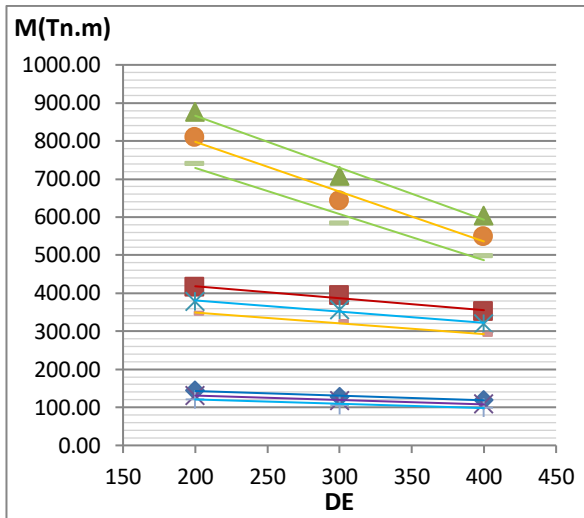
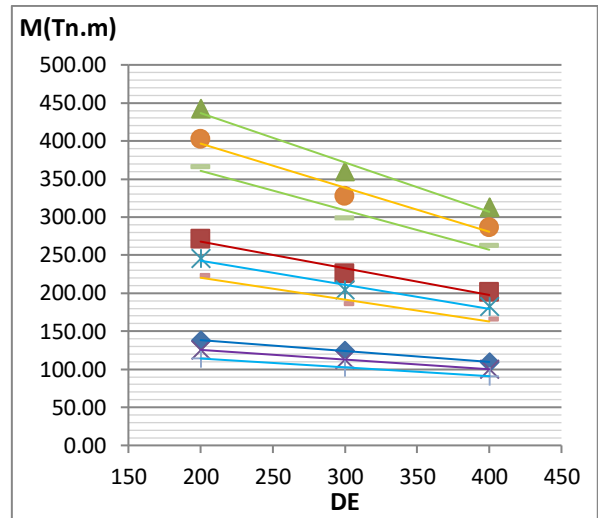


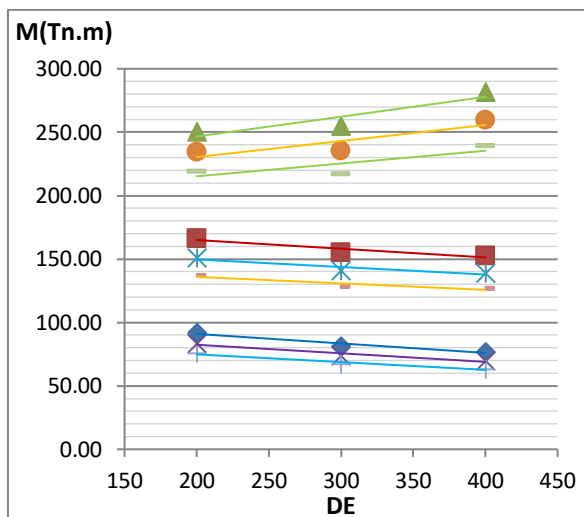
Figura D.181. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



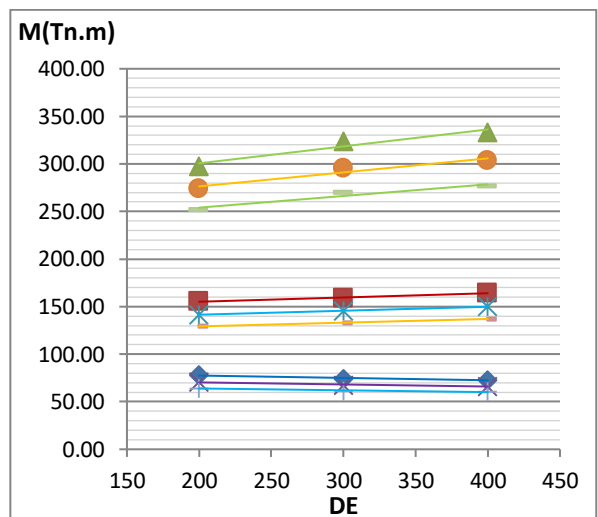
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

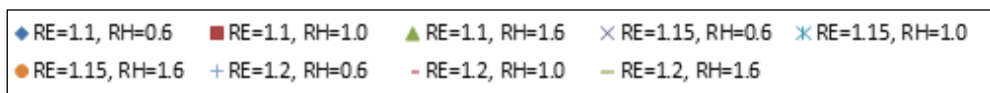
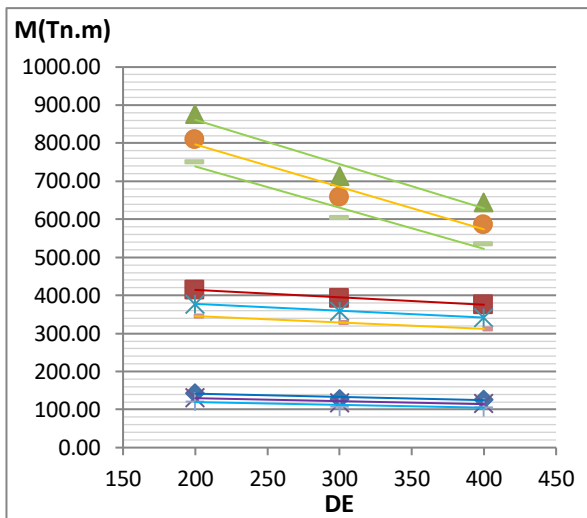
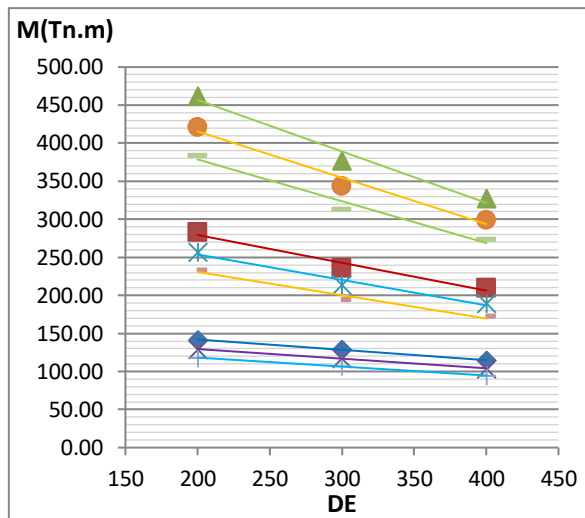


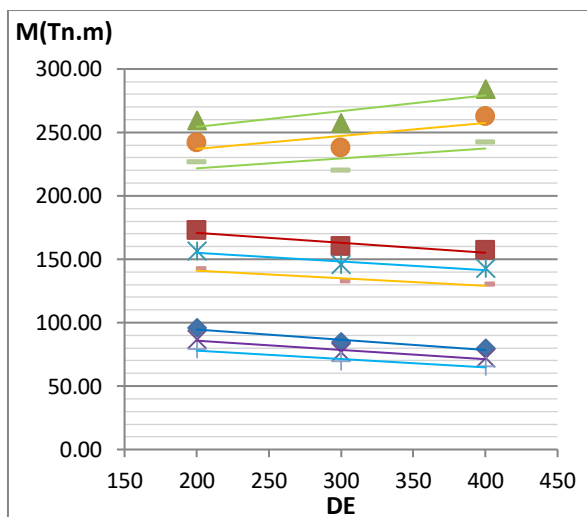
Figura D.182. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



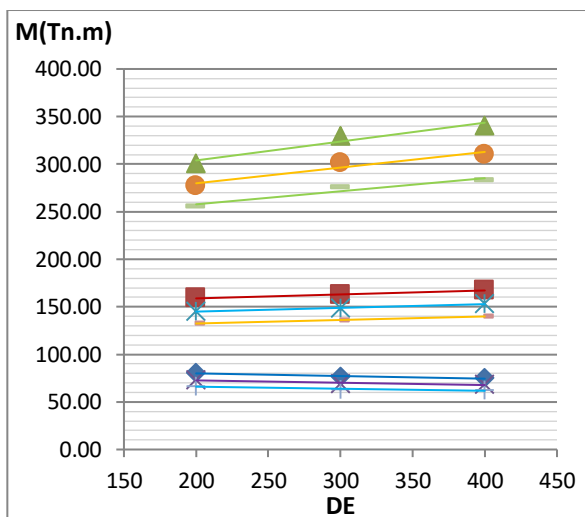
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

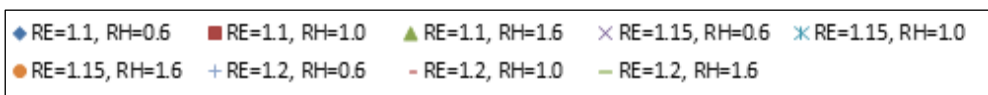
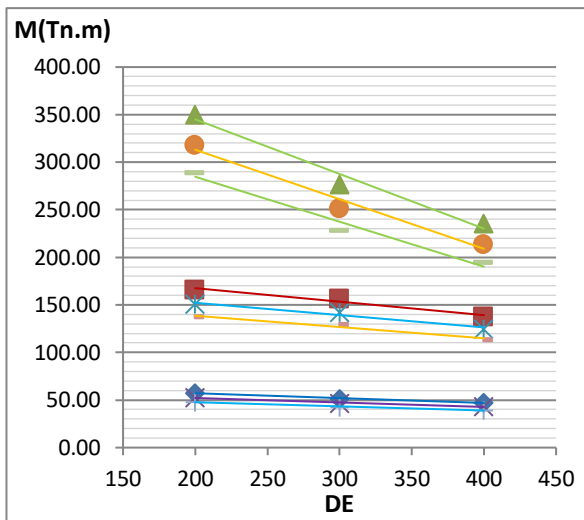
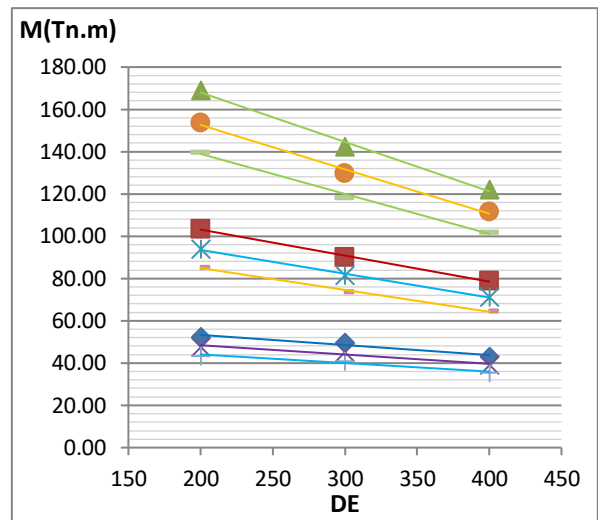


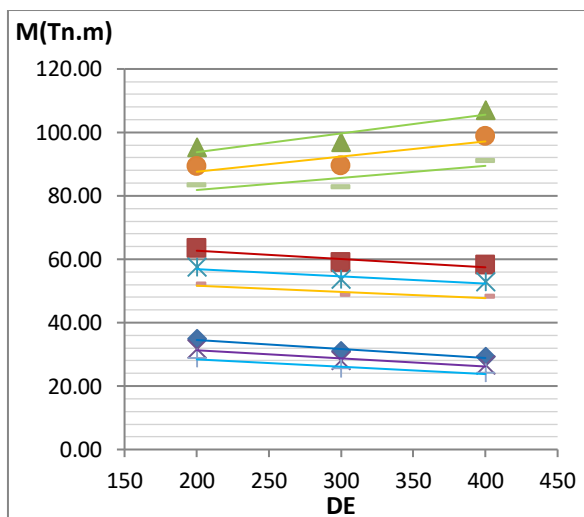
Figura D.183. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



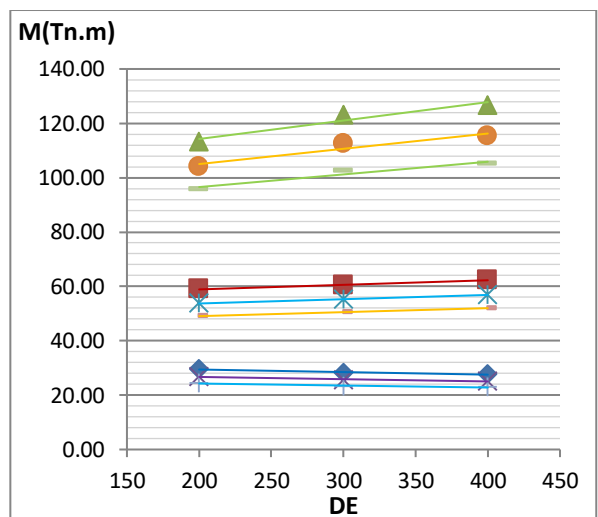
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

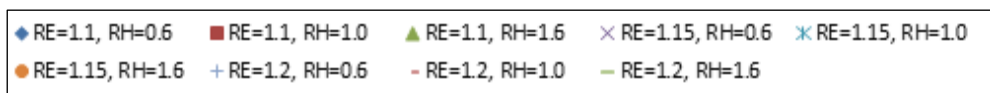


Figura D.184. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

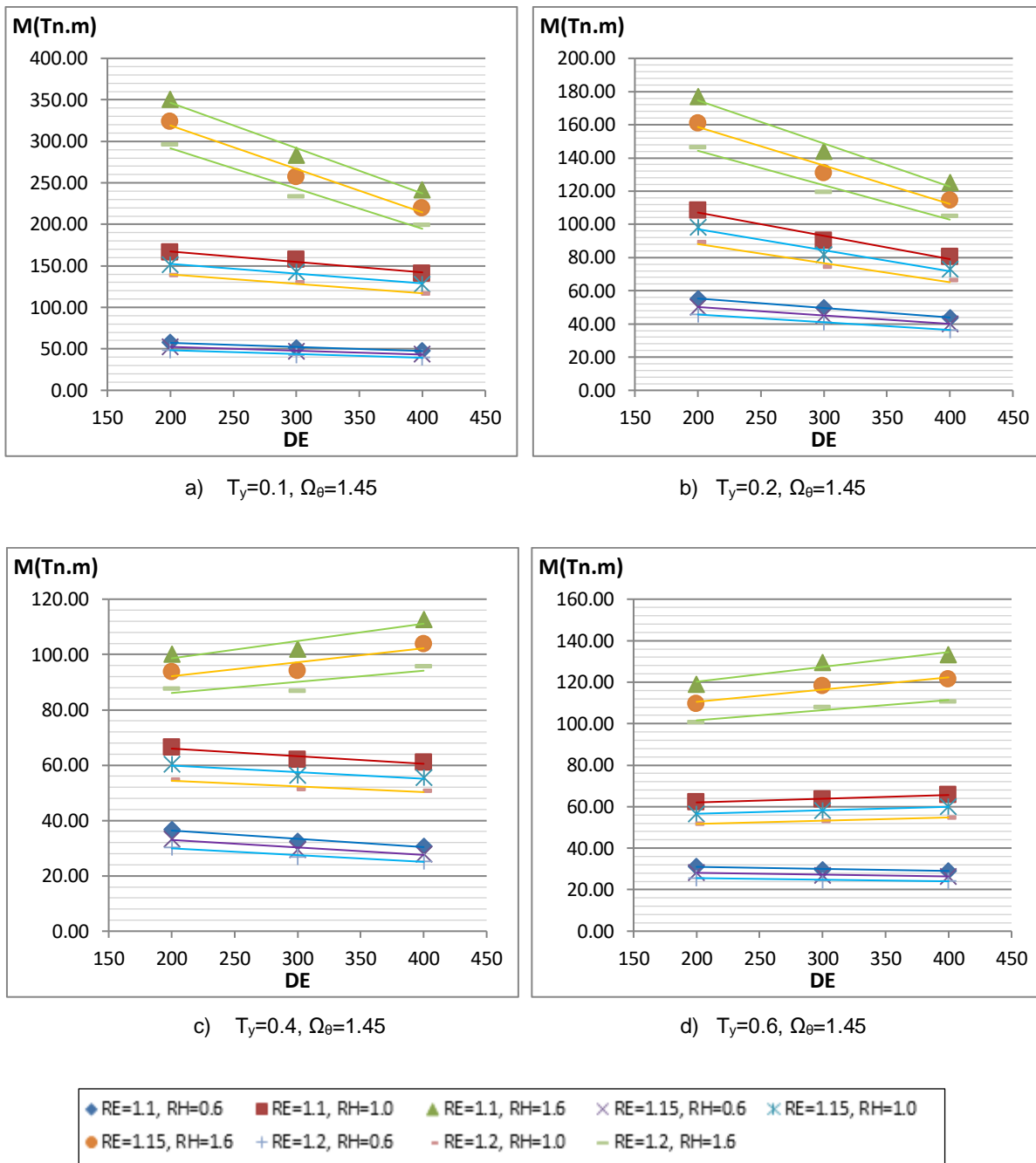


Figura D.185. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.

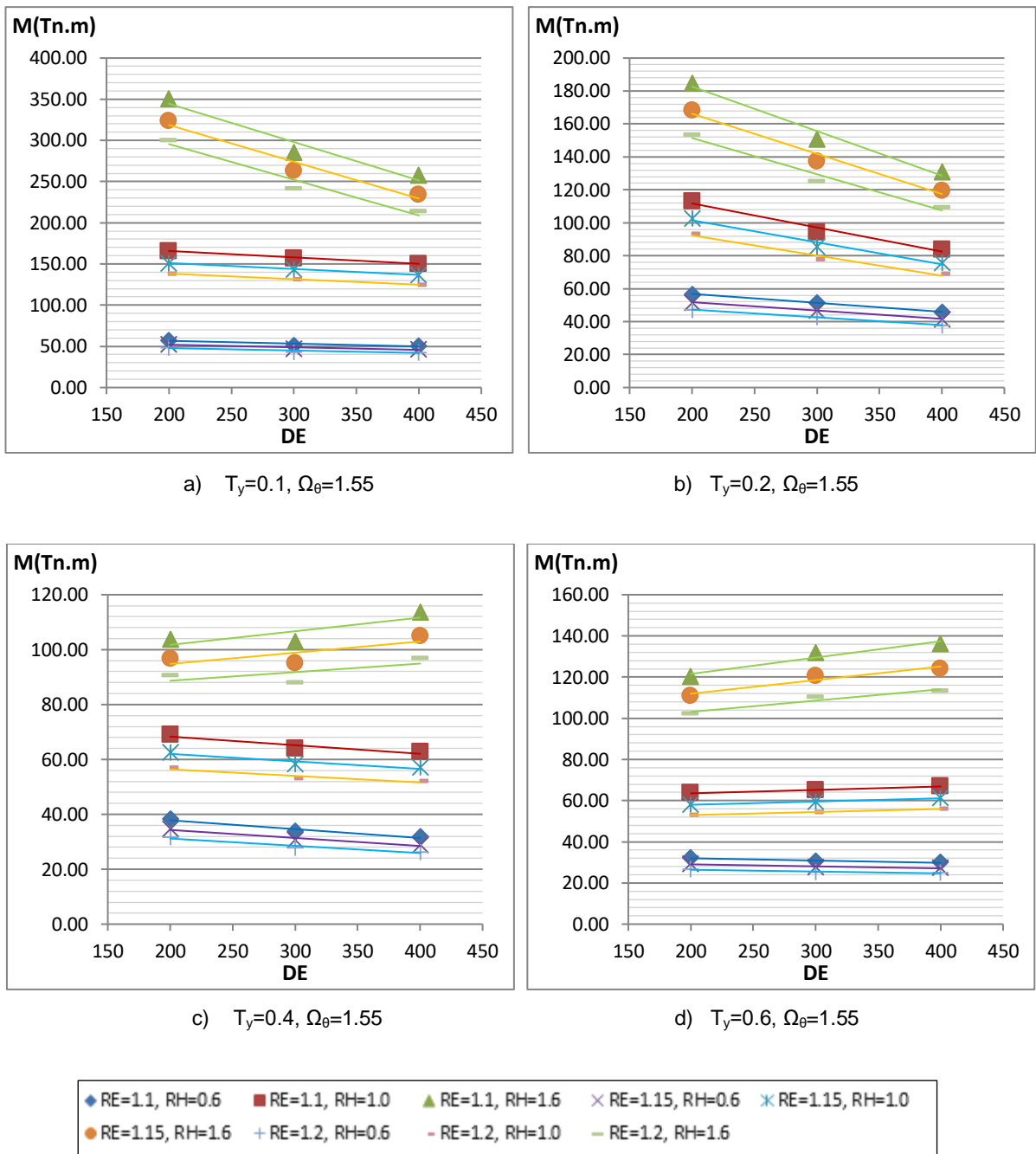
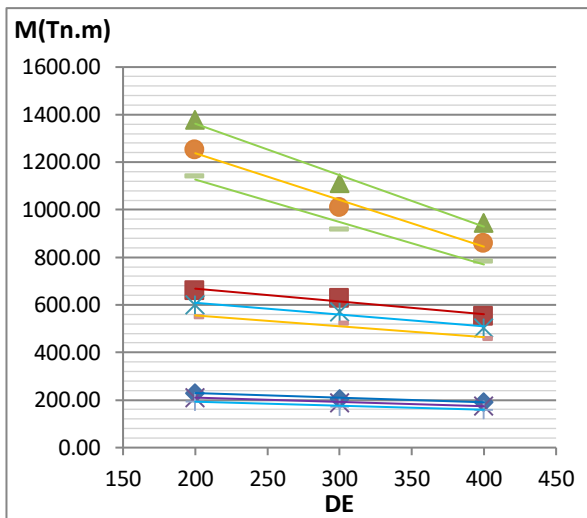
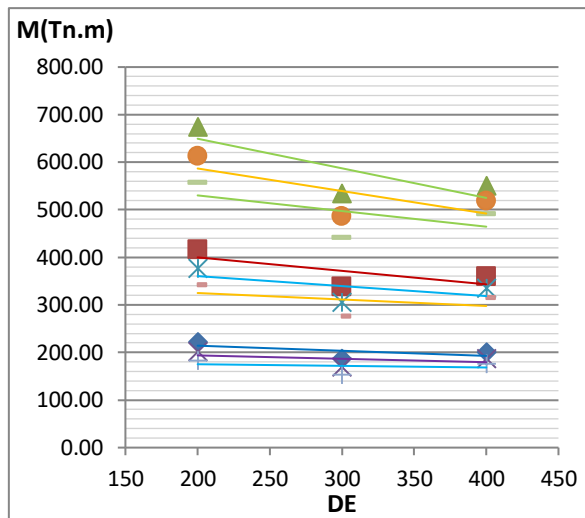


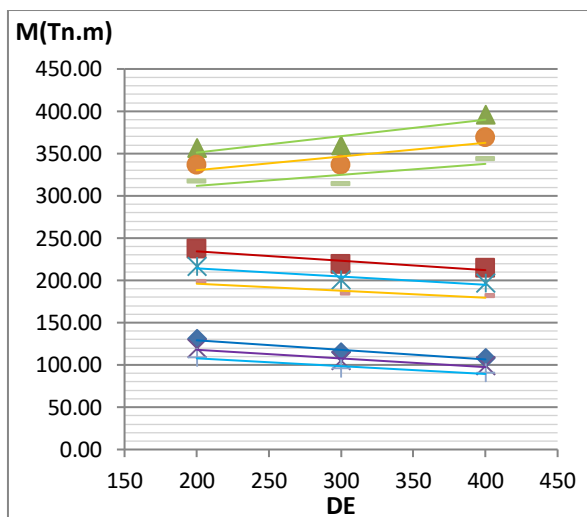
Figura D.186. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



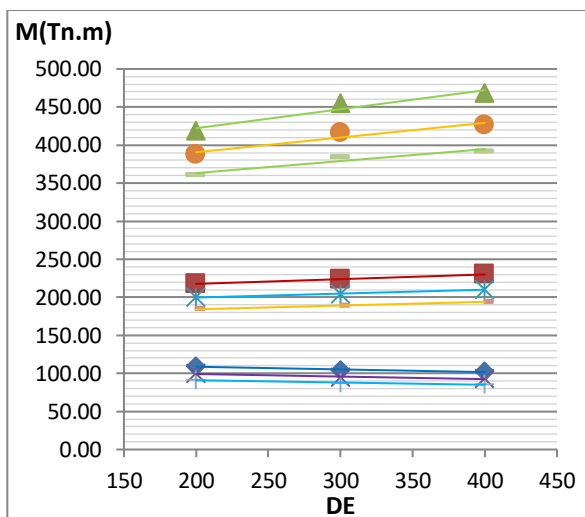
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

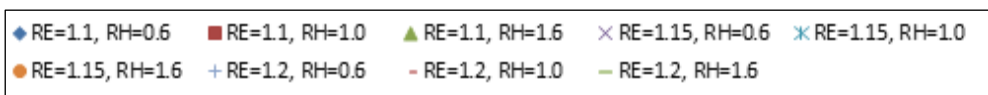
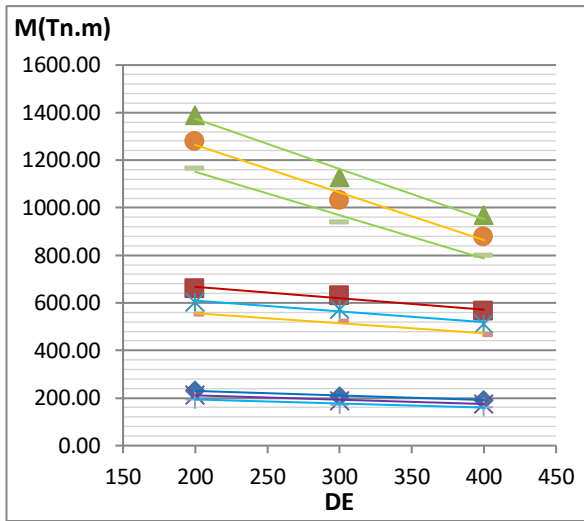
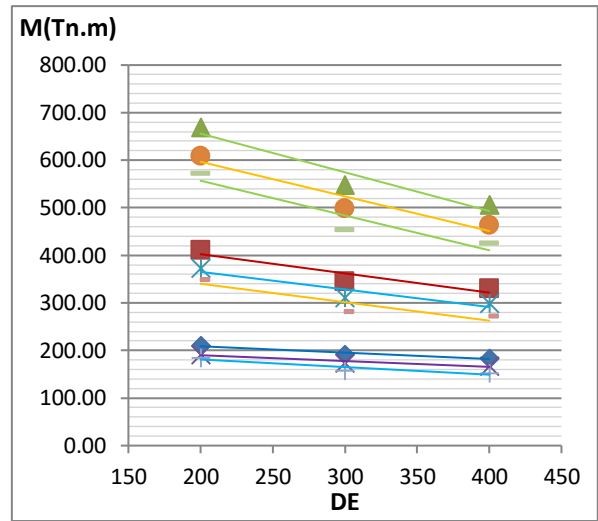


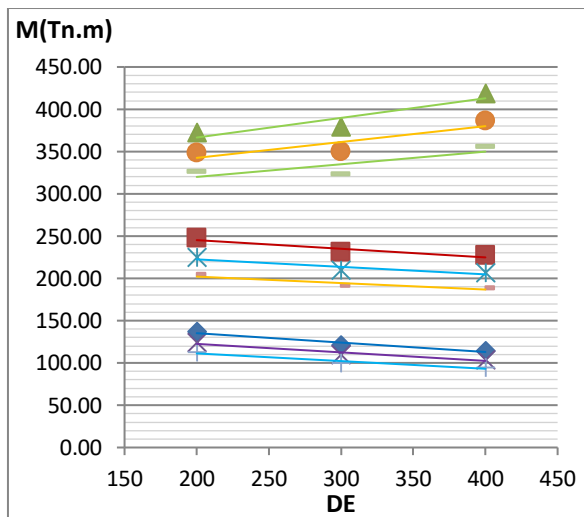
Figura D.187. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



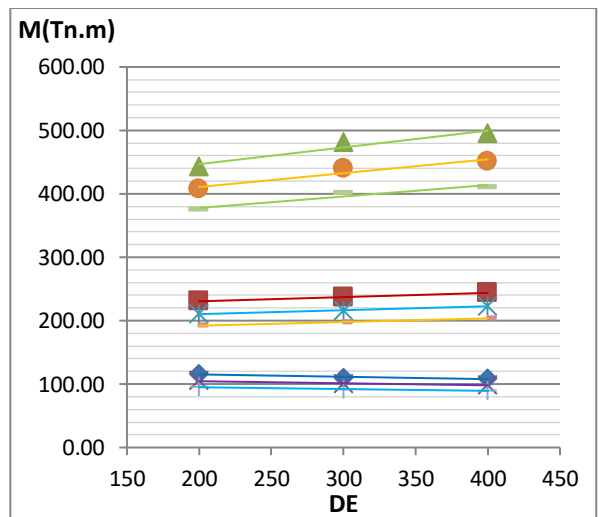
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

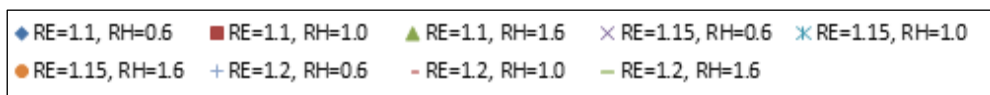
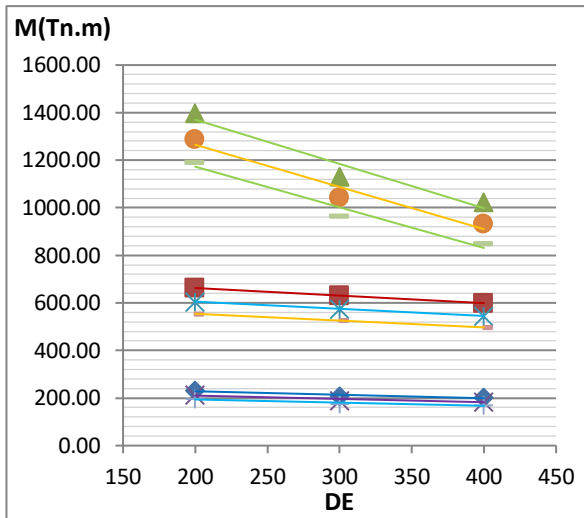
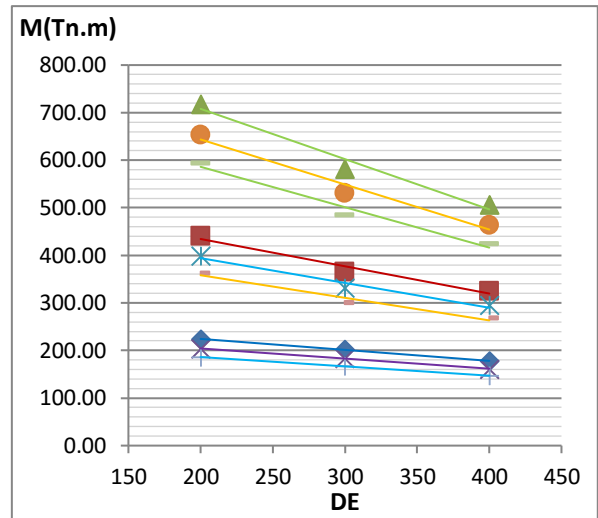


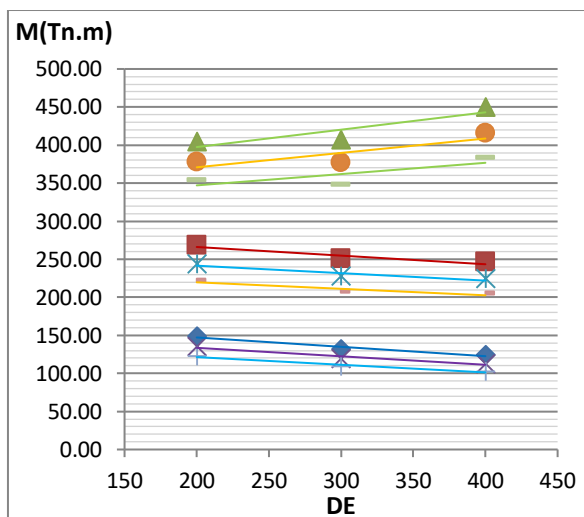
Figura D.188. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



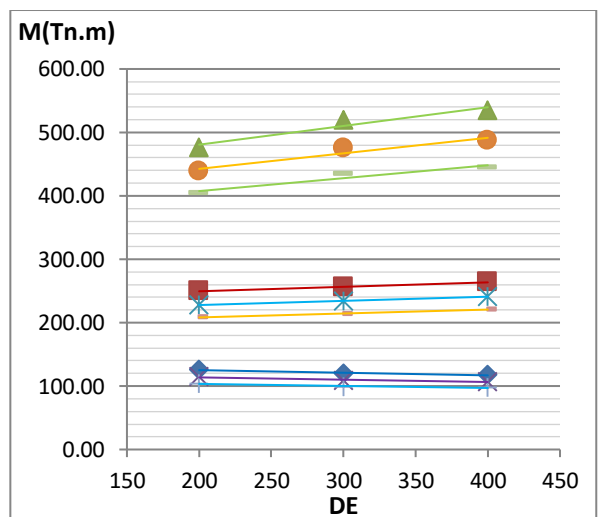
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

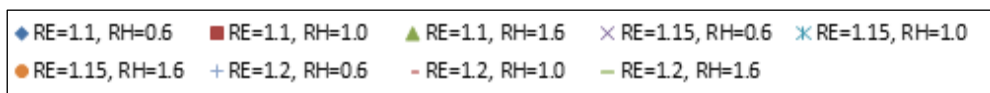
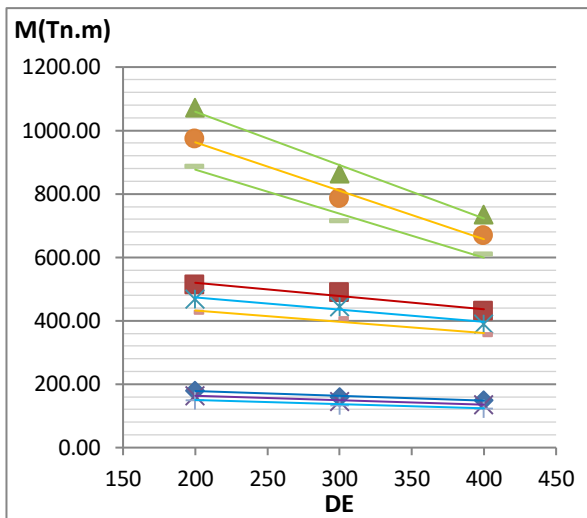
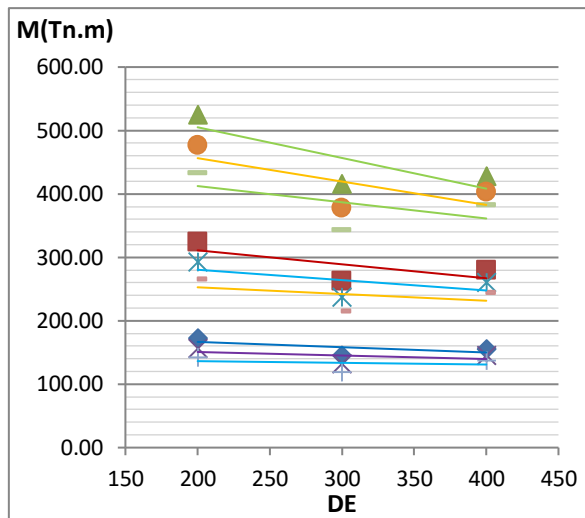


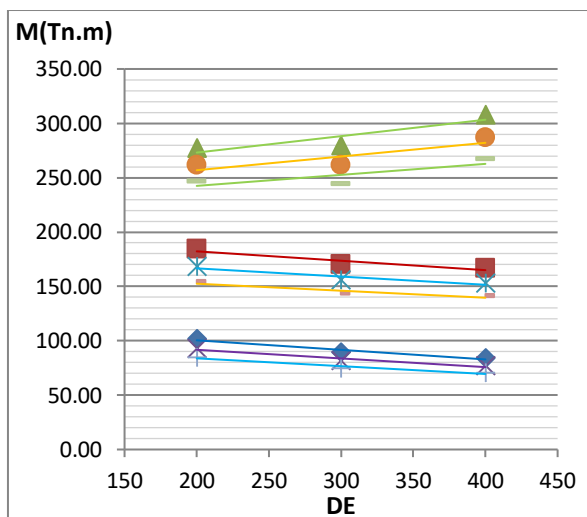
Figura D.189. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



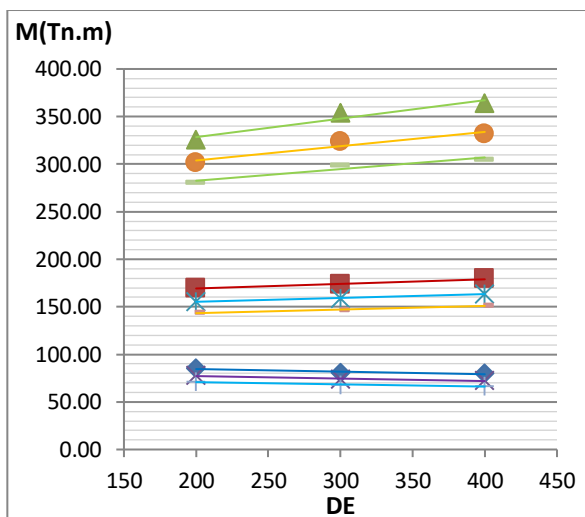
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

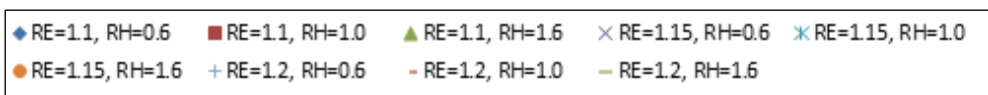
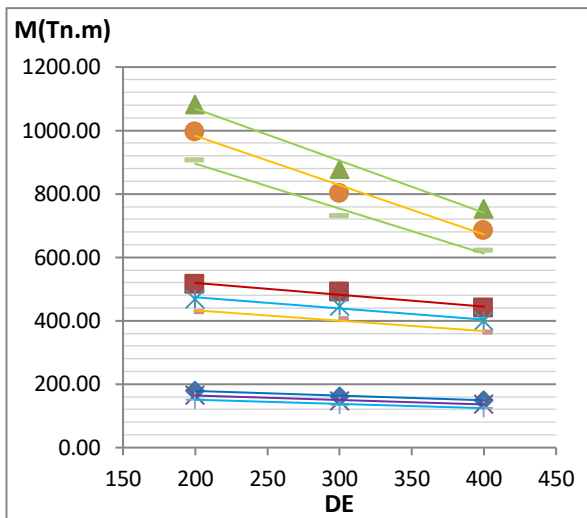
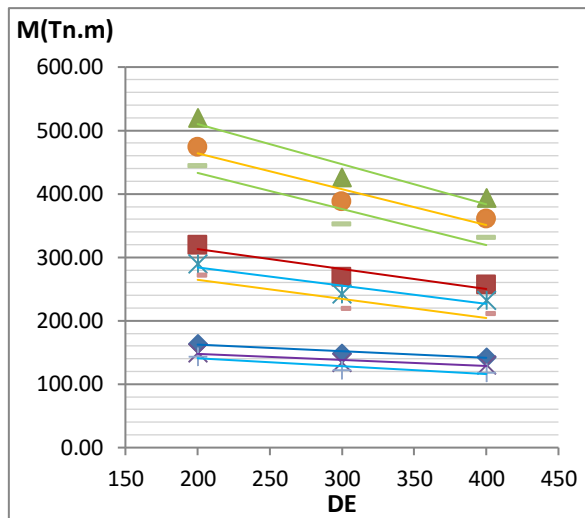


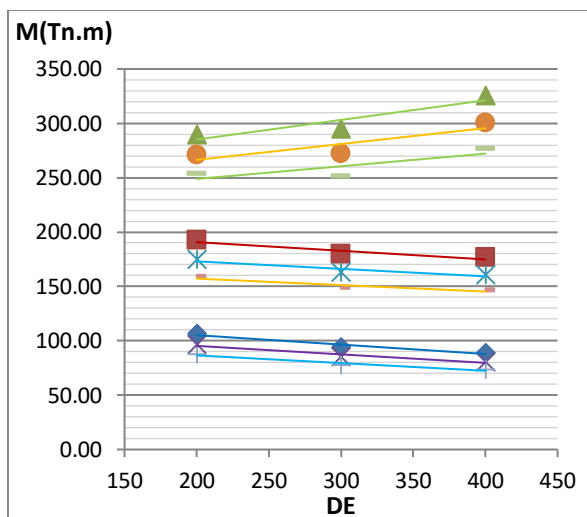
Figura D.190. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



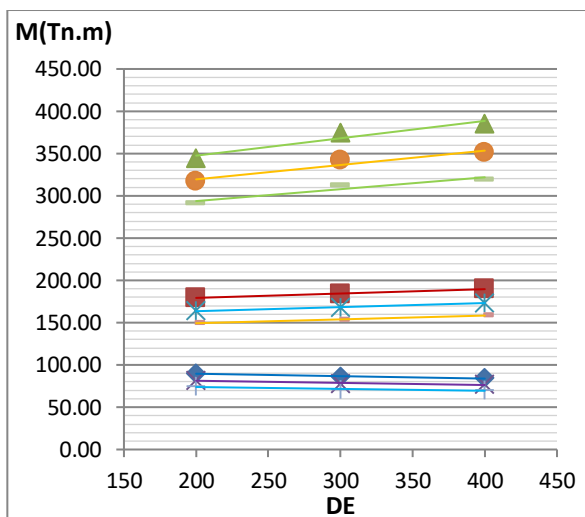
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

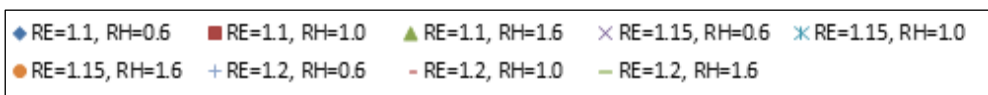
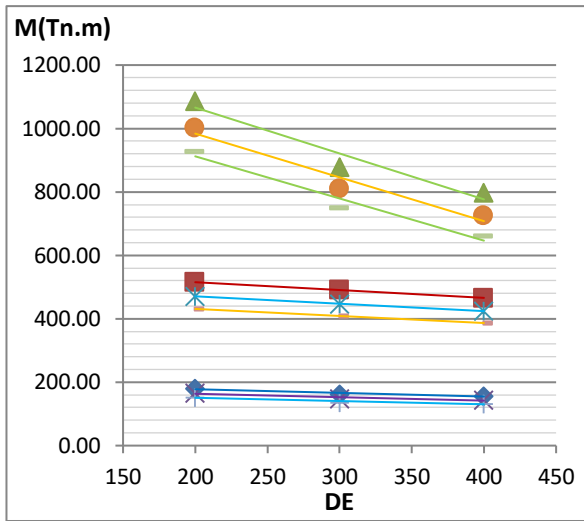
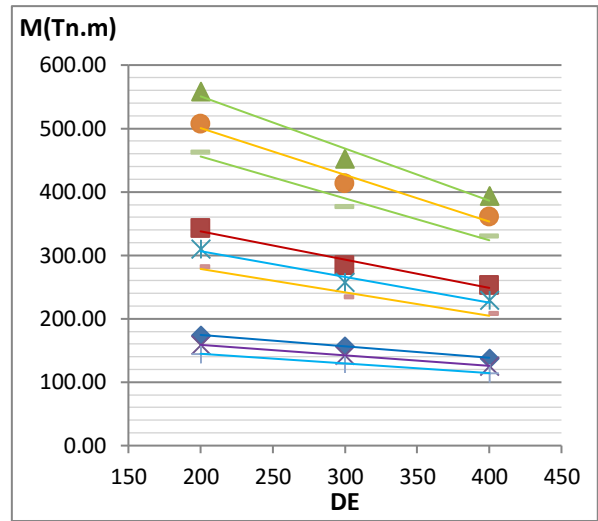


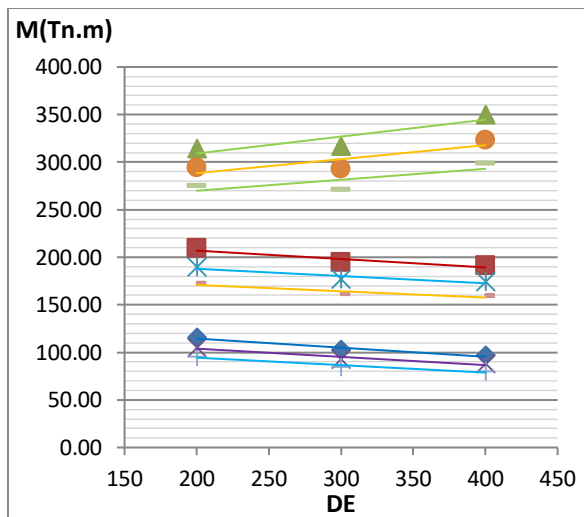
Figura D.191. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



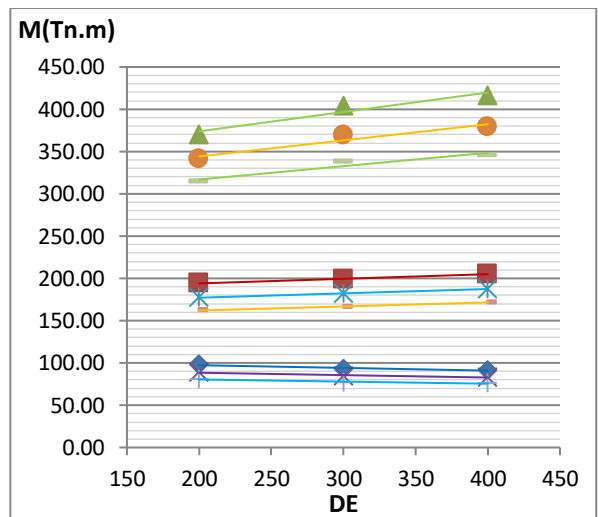
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

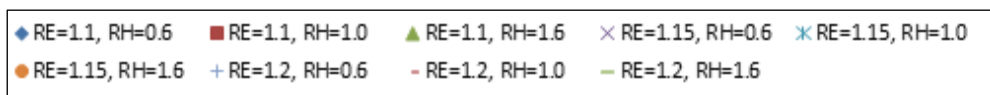
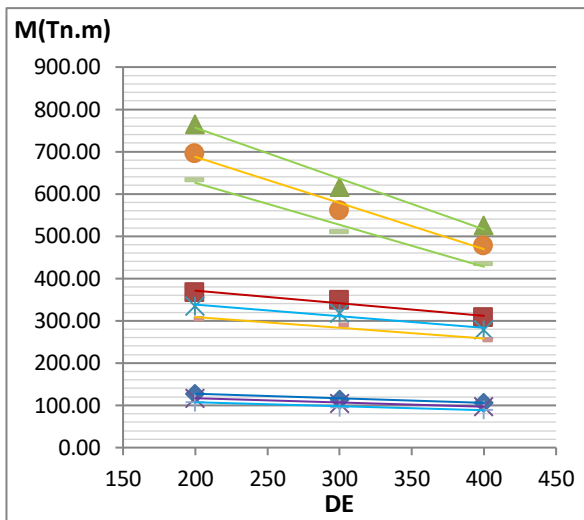
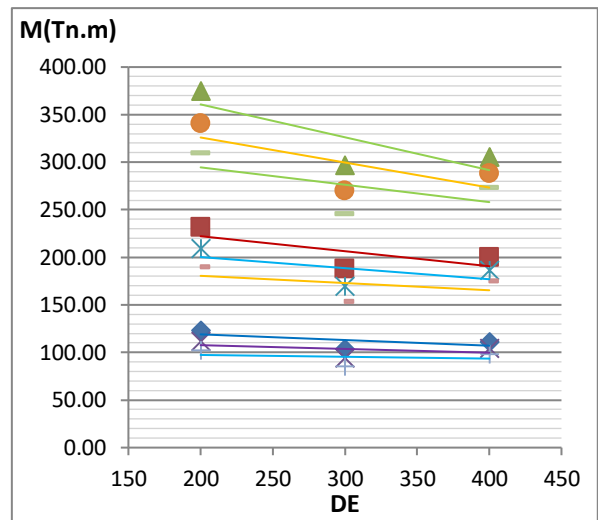


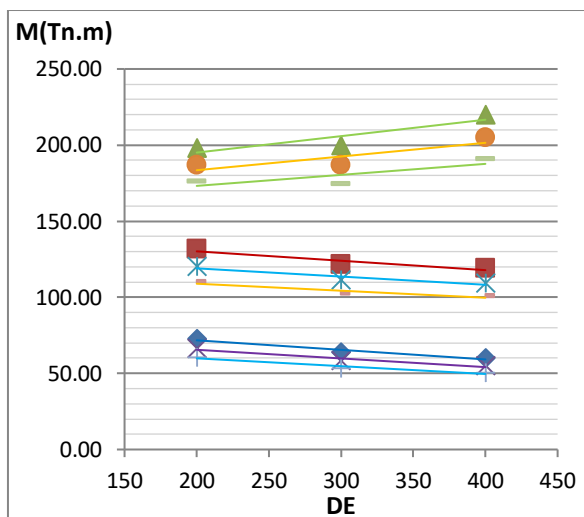
Figura D.192. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



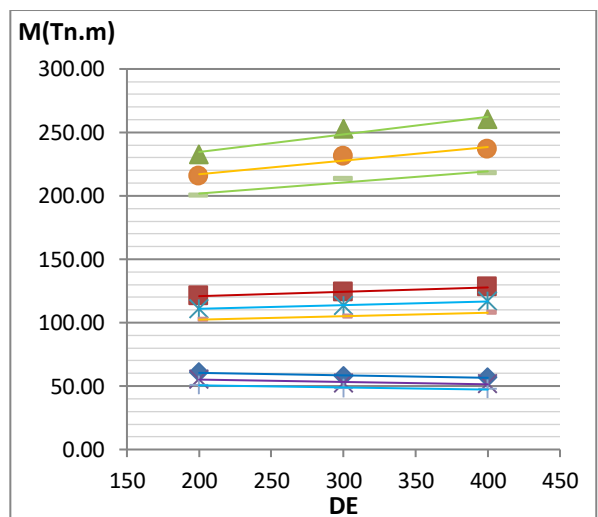
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

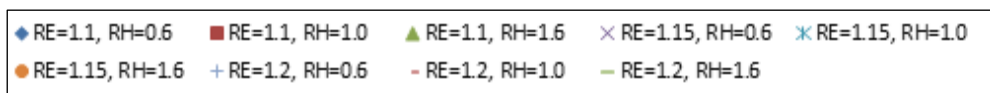
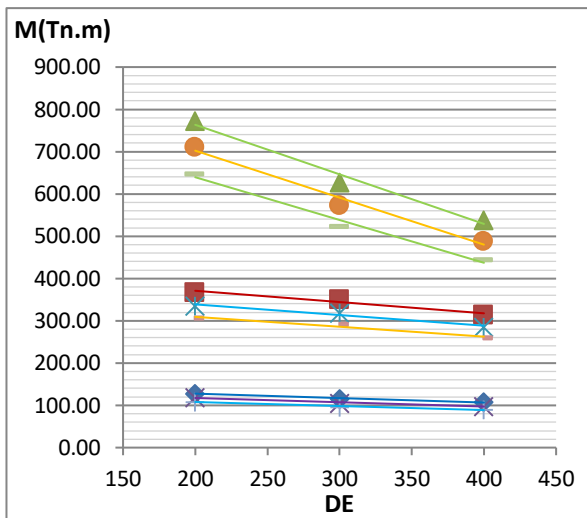
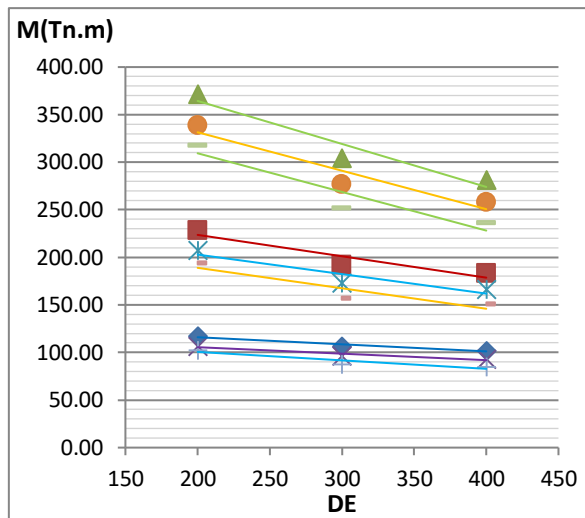


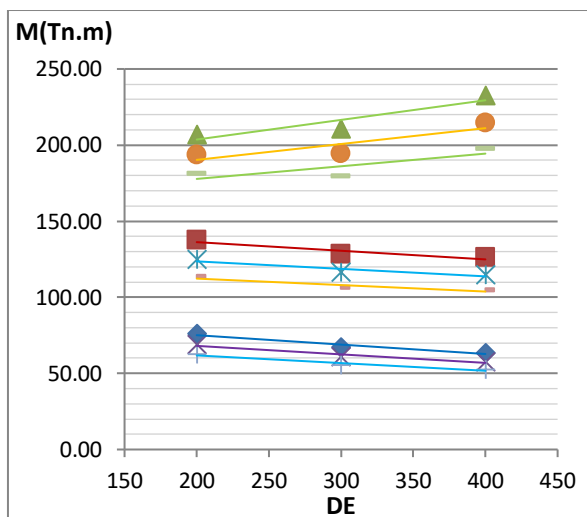
Figura D.193. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



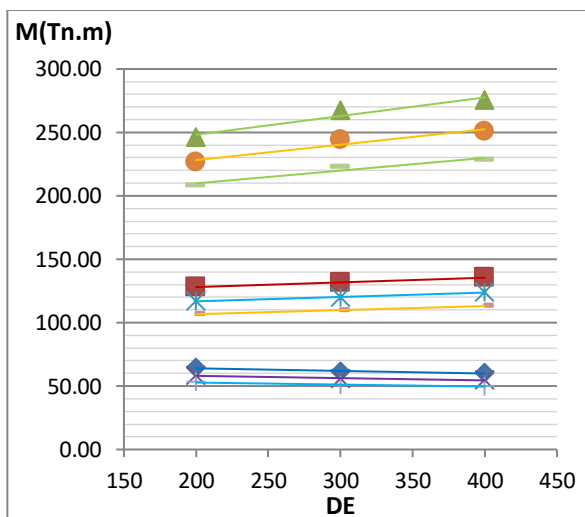
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

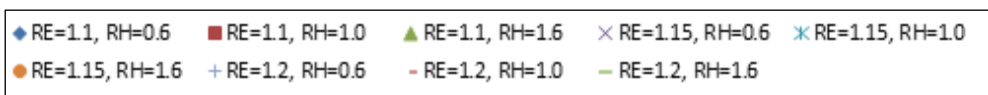
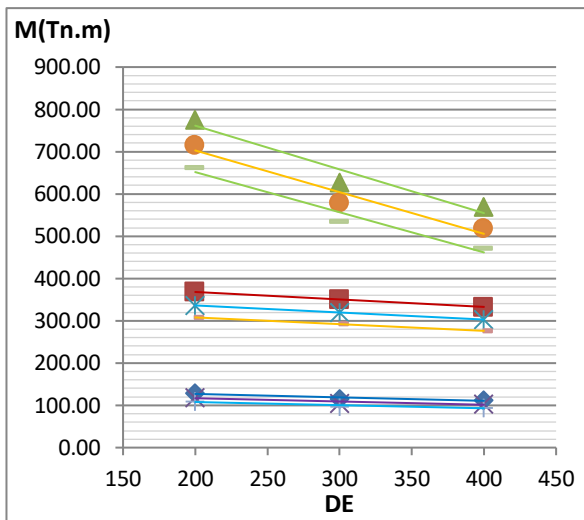
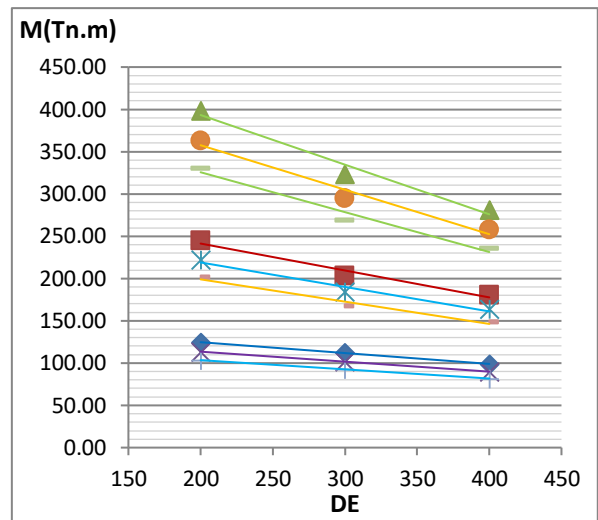


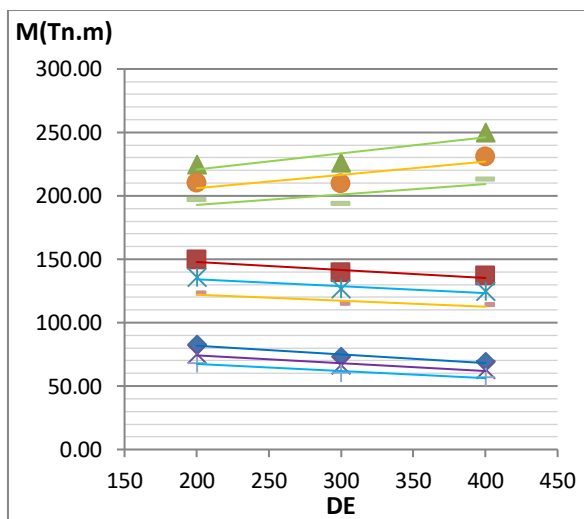
Figura D.194. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



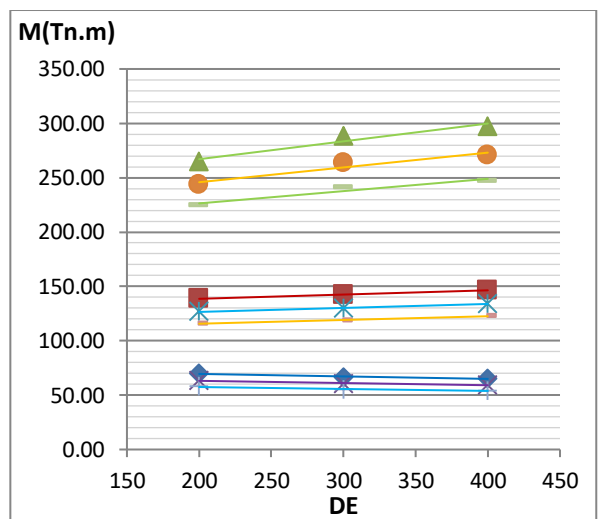
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

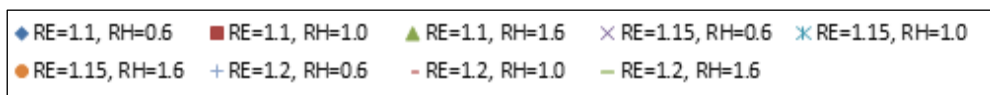
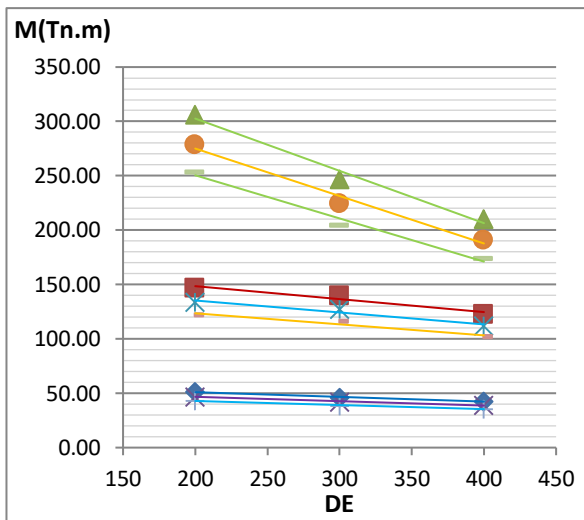
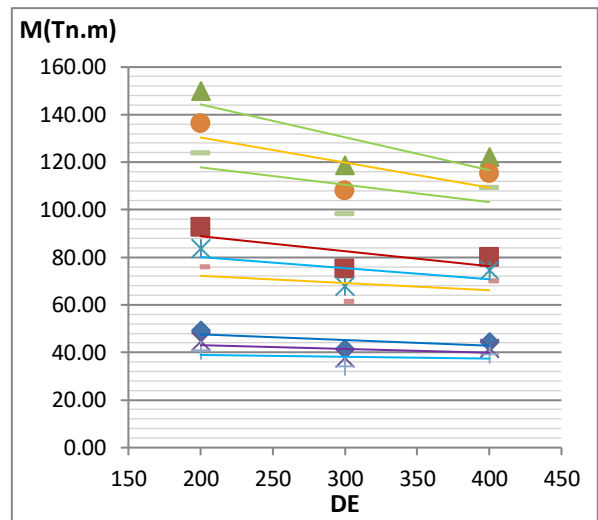


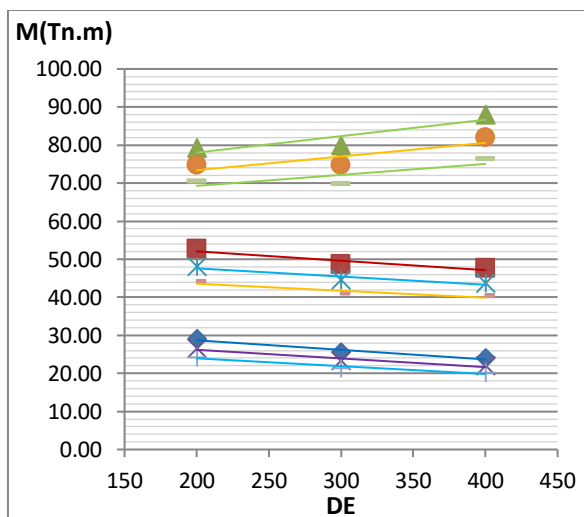
Figura D.195. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



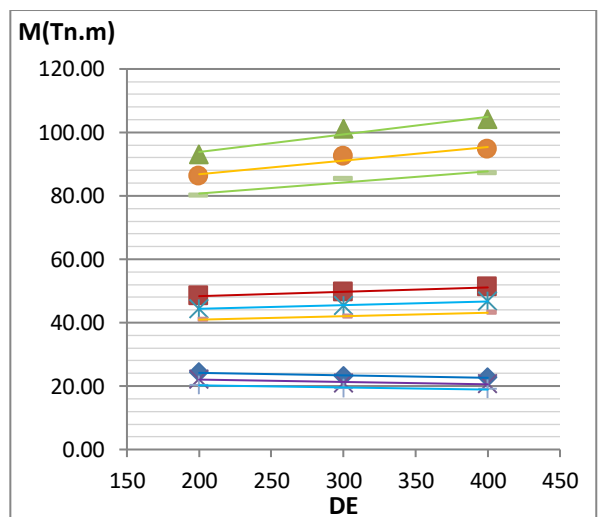
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

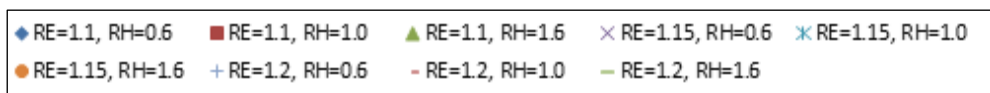
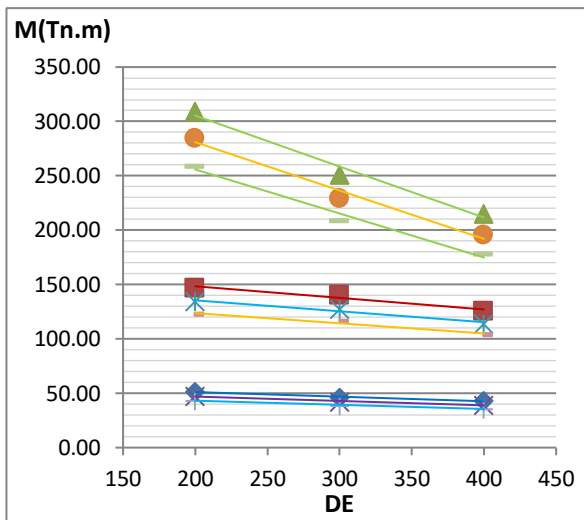
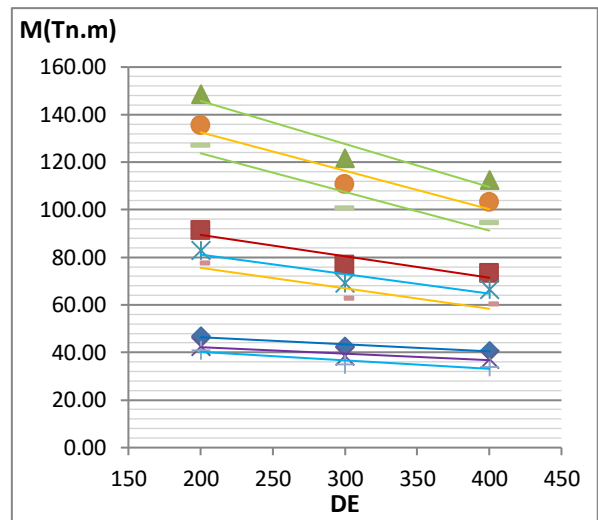


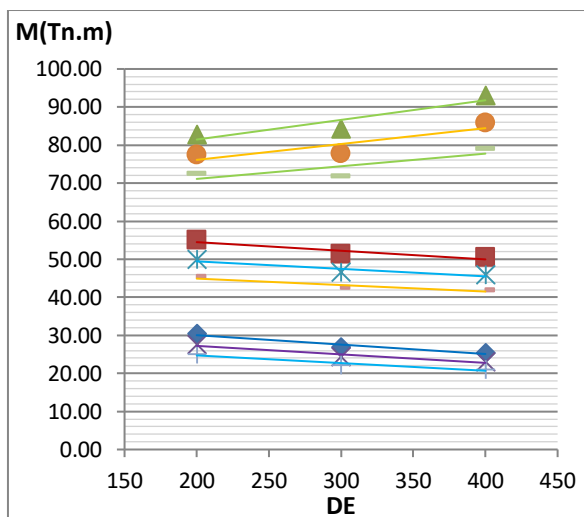
Figura D.196. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



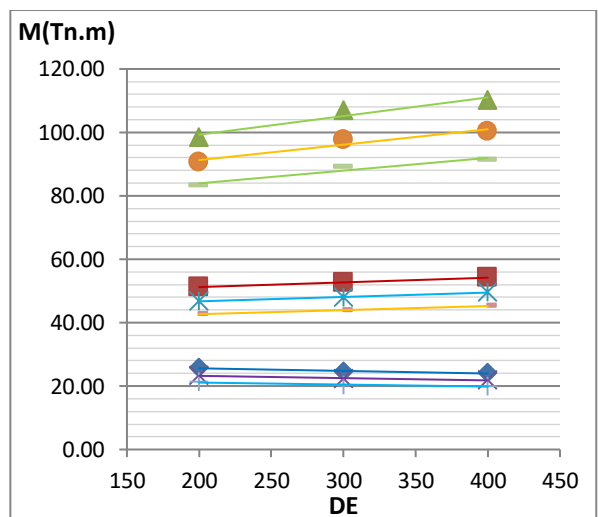
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

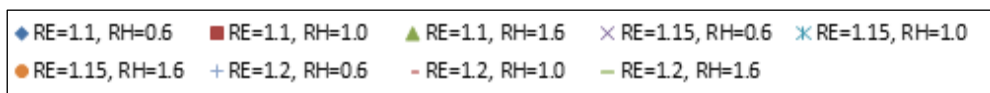
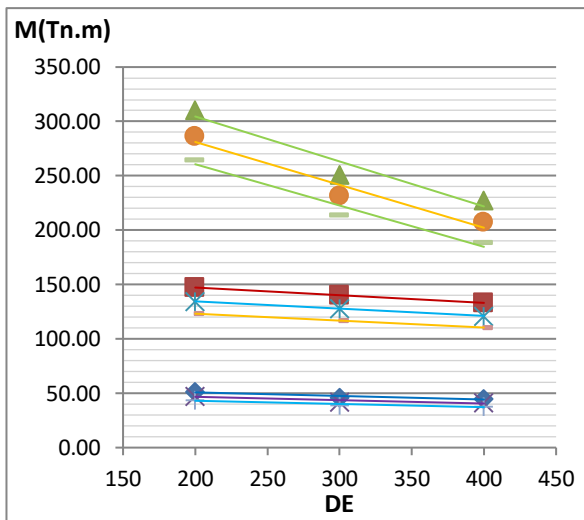
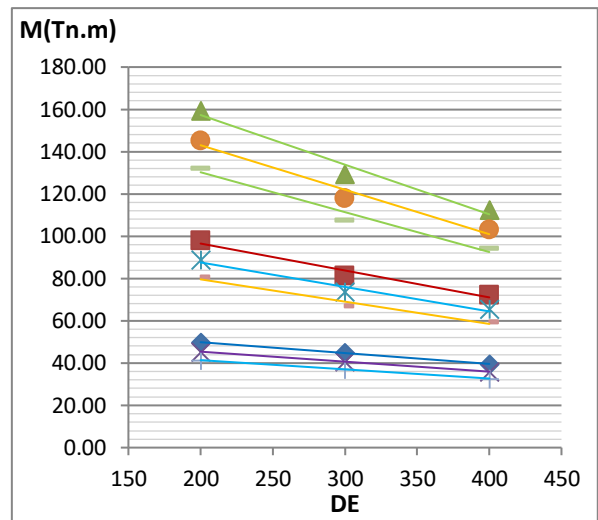


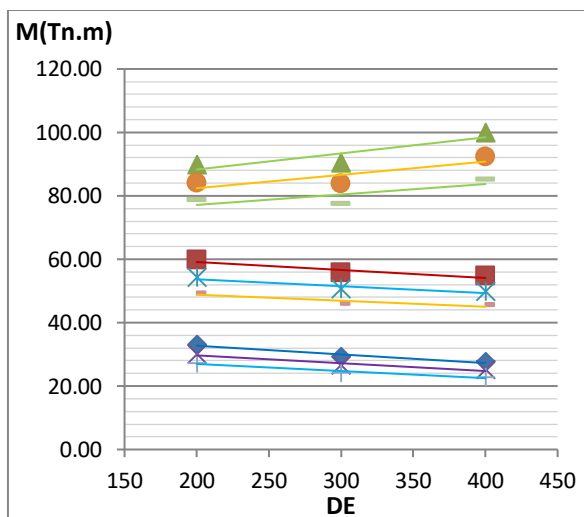
Figura D.197. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



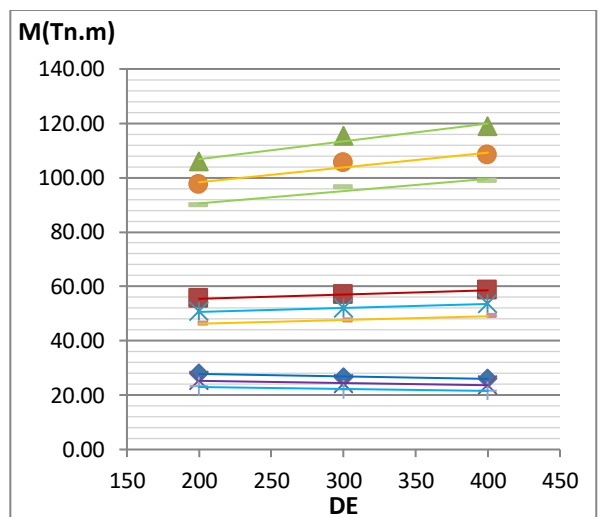
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

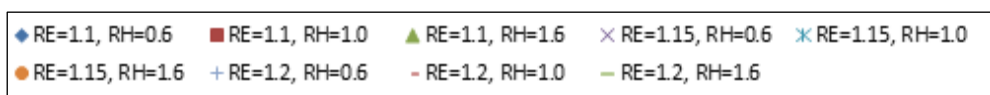
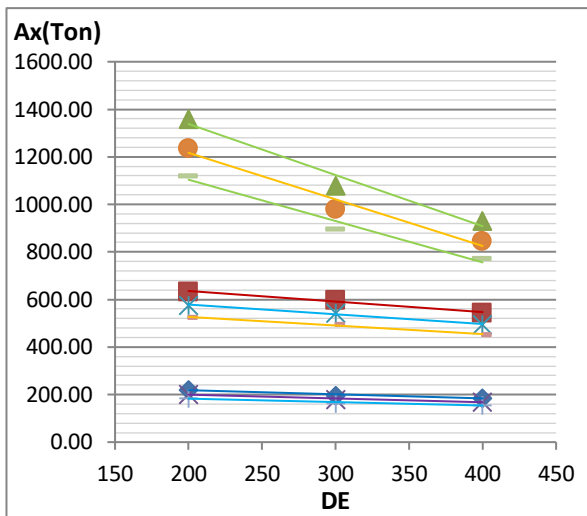
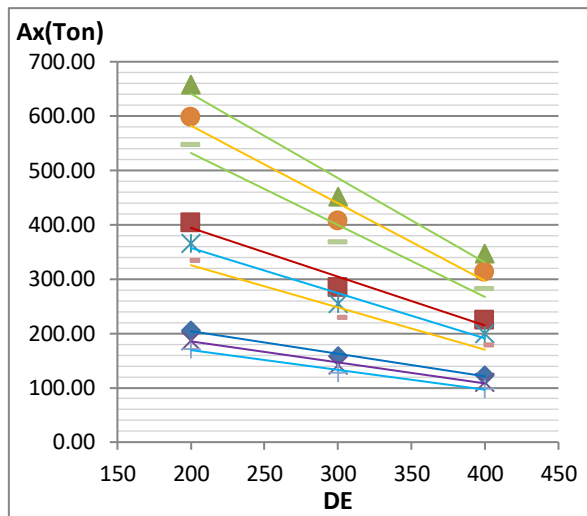


Figura D.198. Relación del momento máximo en columnas frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.

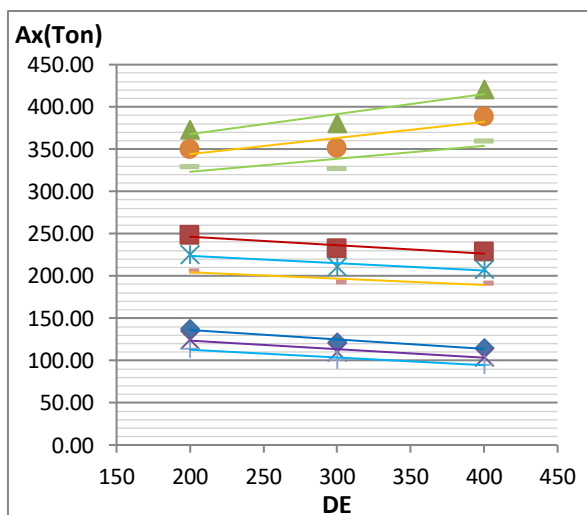
Esfuerzo axial máximo de arriostres



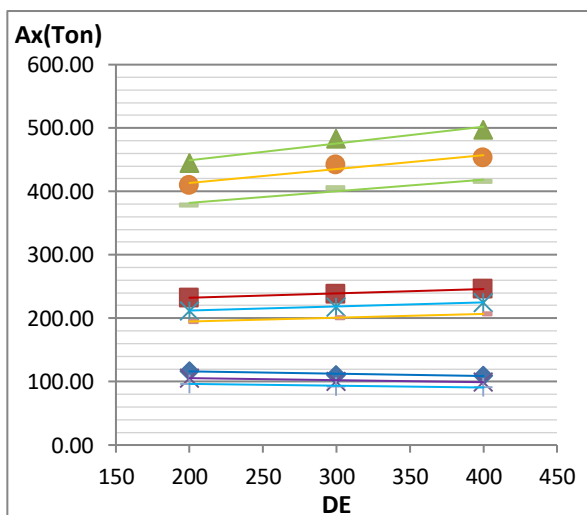
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

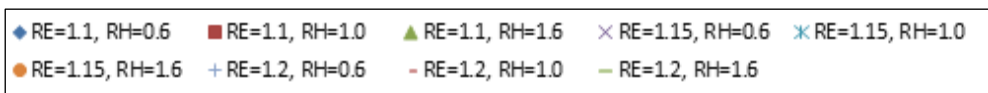
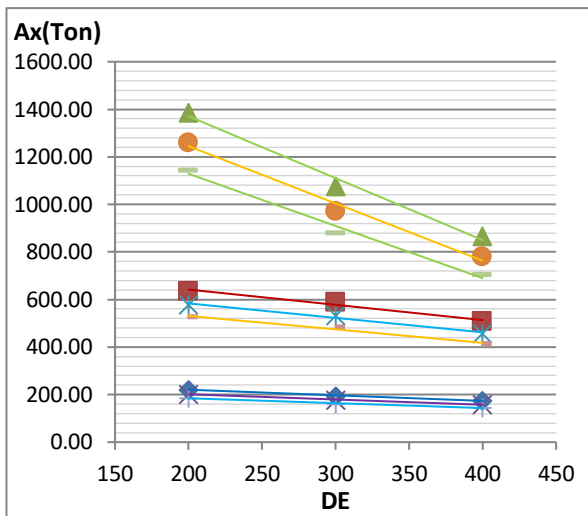
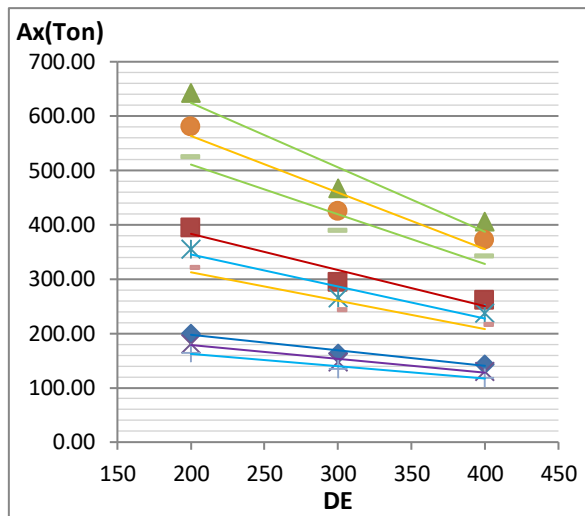


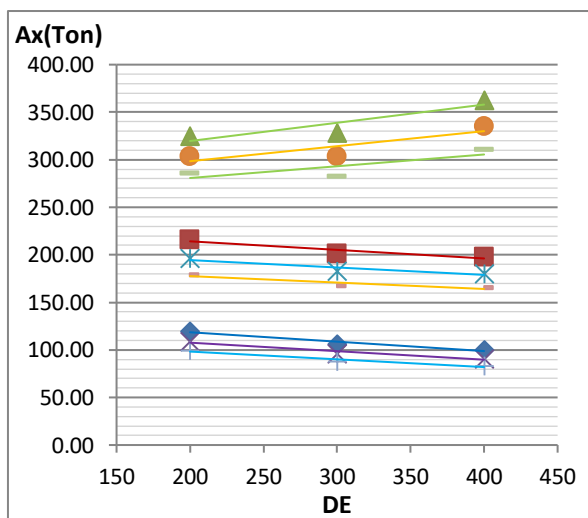
Figura D.199. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



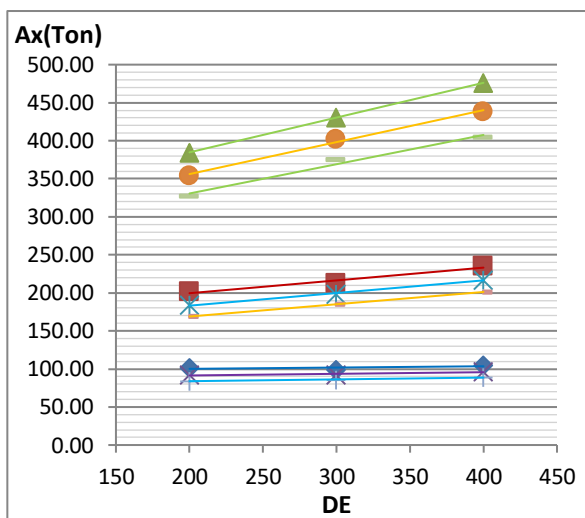
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

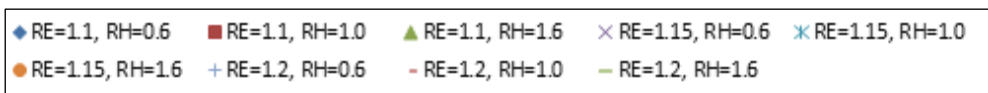
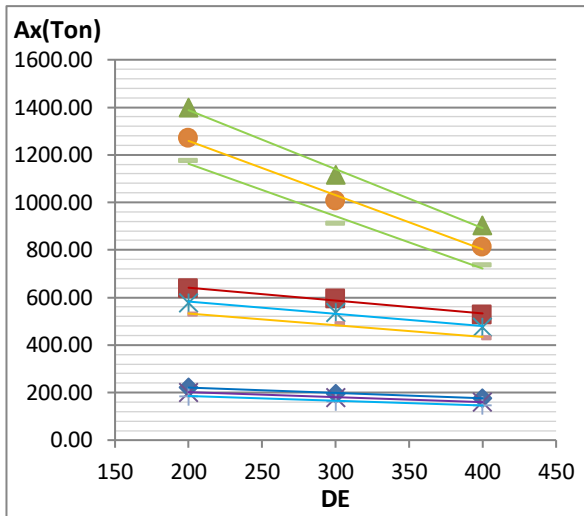
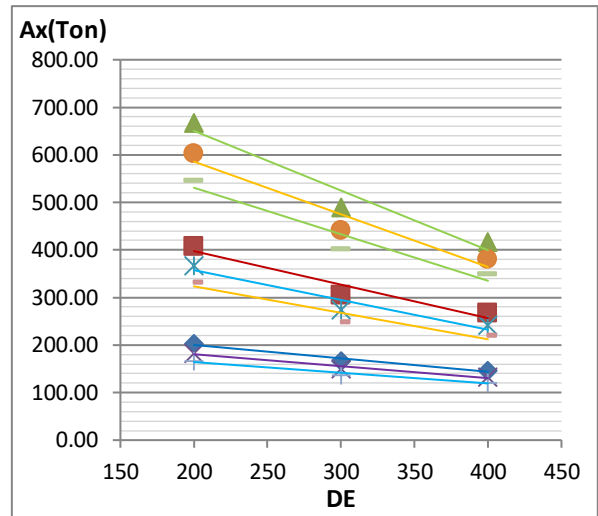


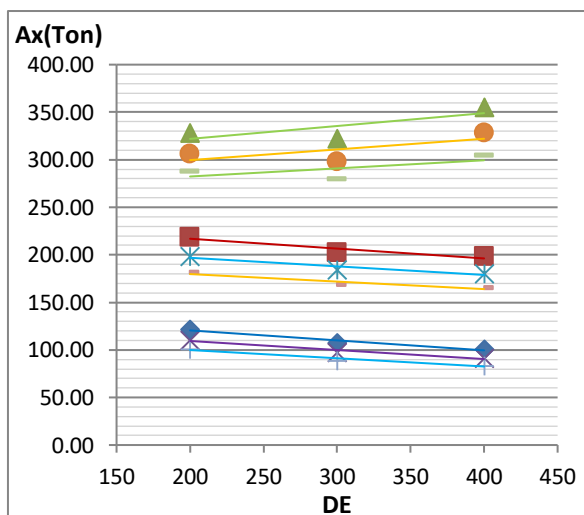
Figura D.200. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



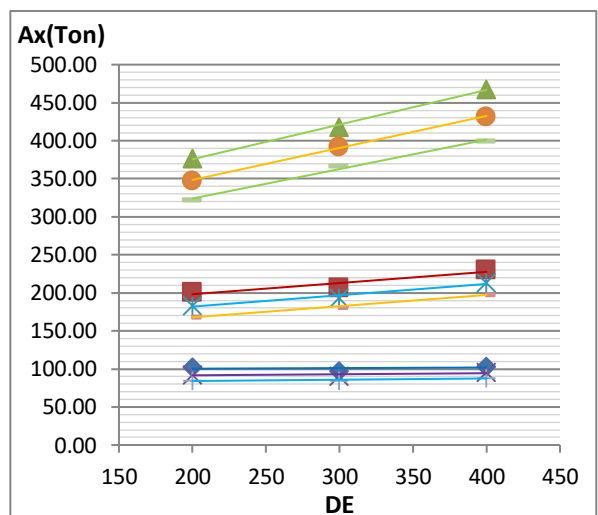
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

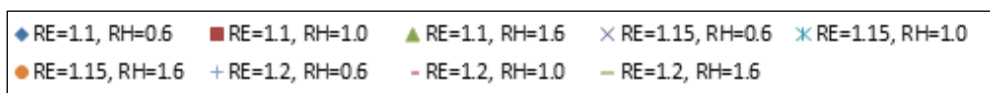
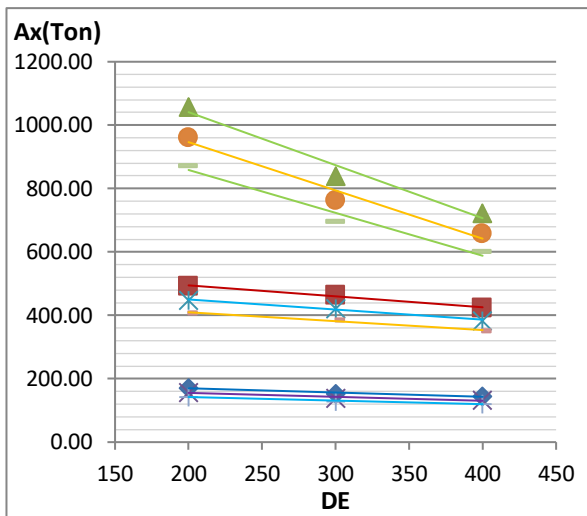
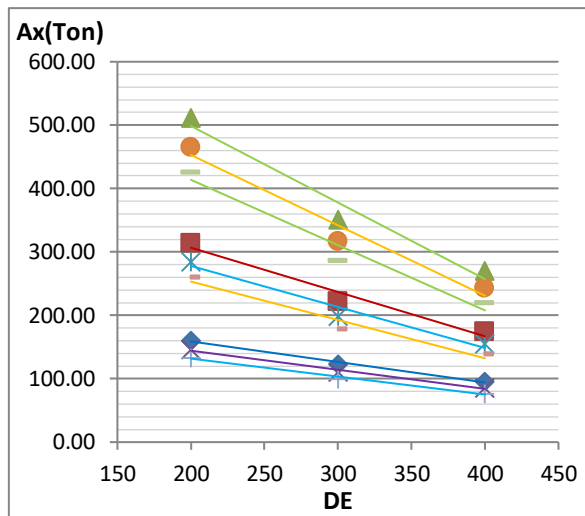


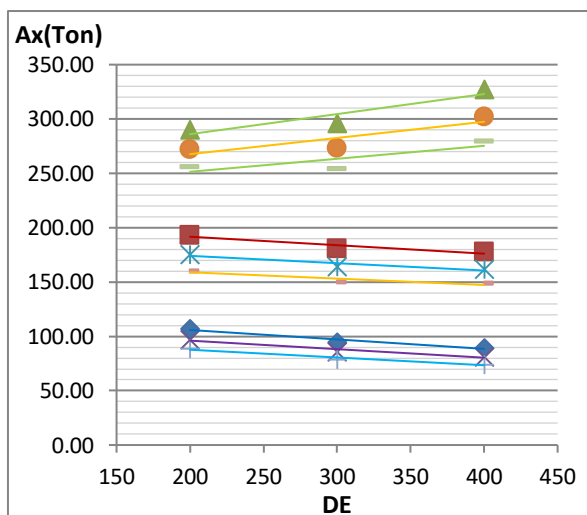
Figura D.201. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 6 columnas.



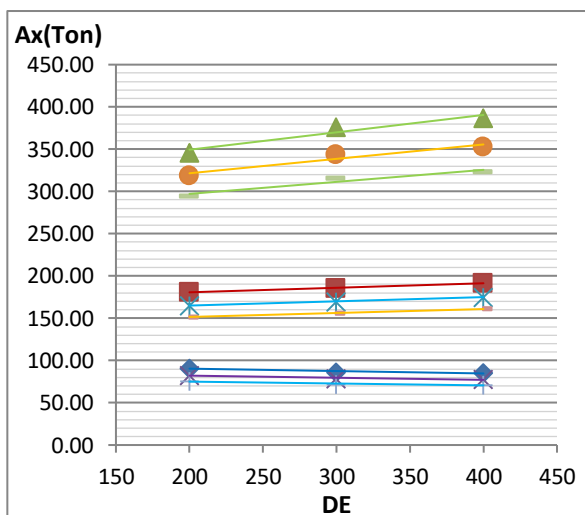
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

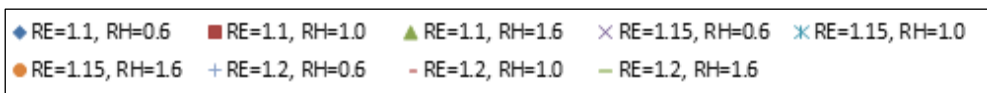
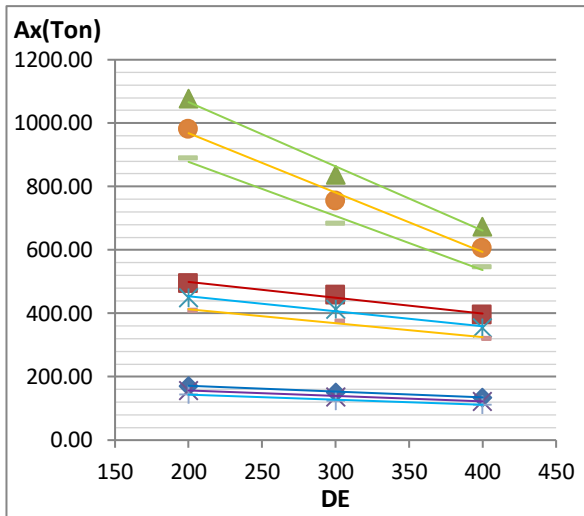
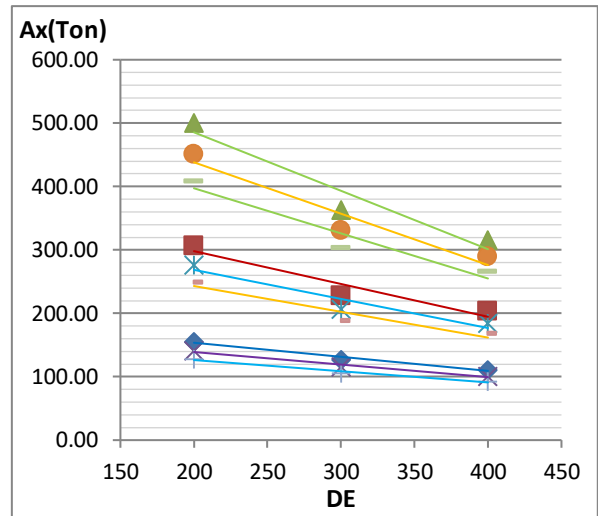


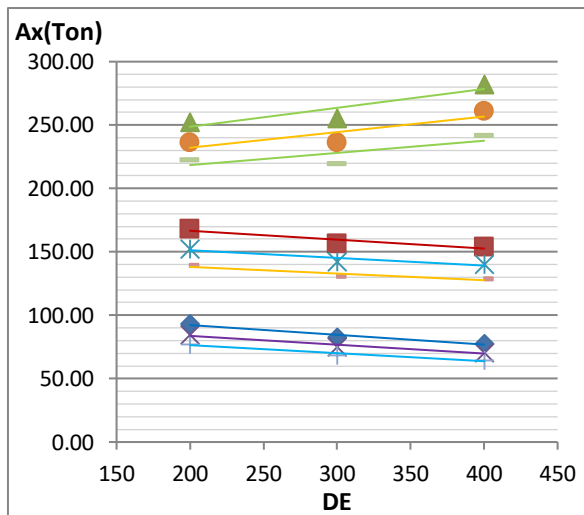
Figura D.202. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



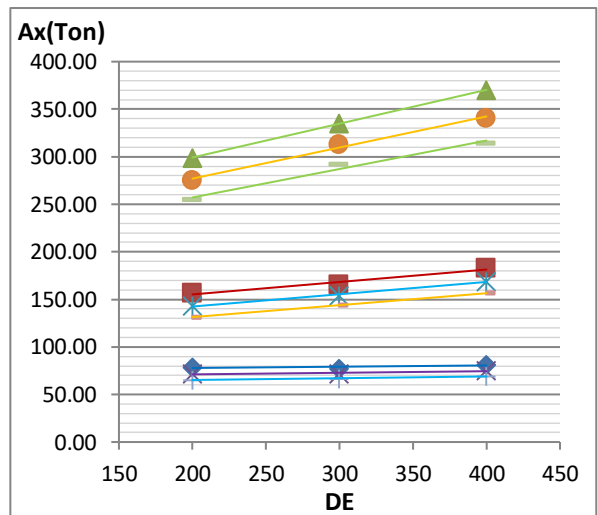
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

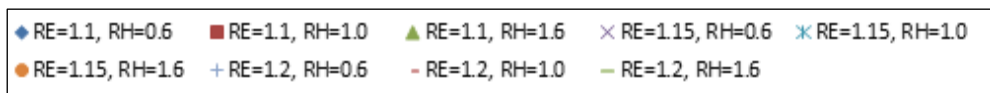
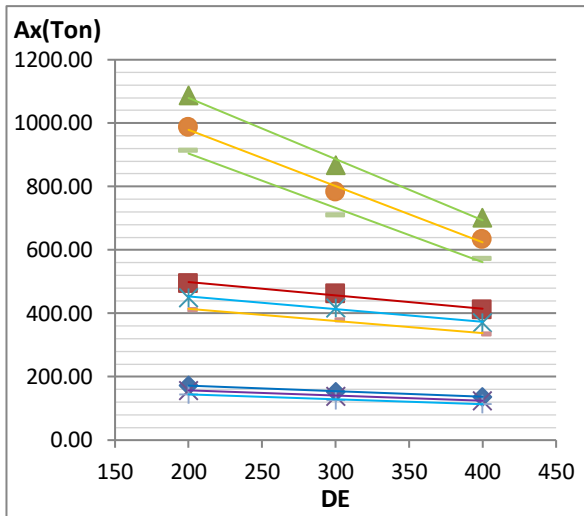
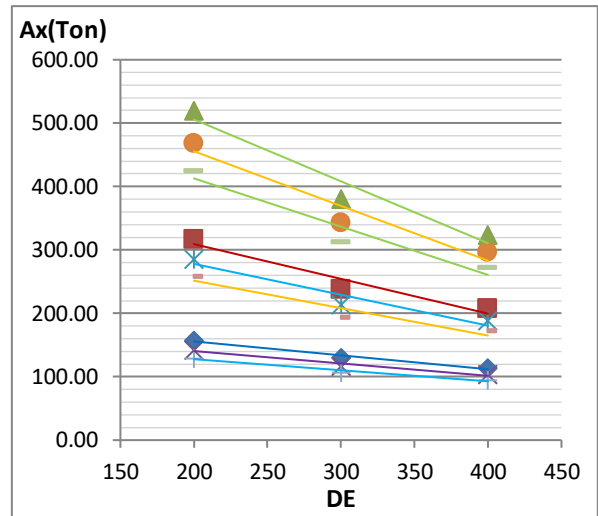


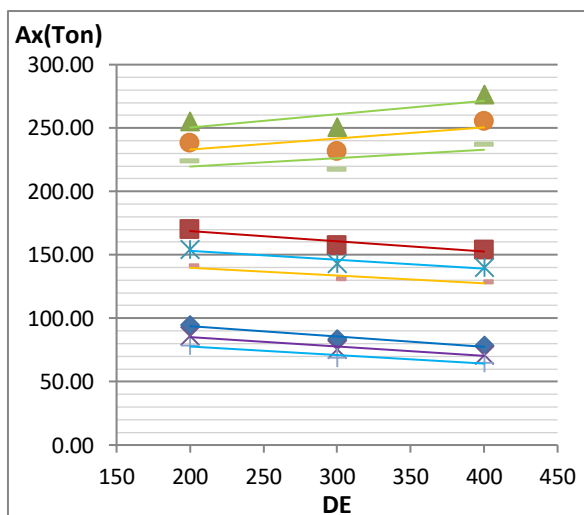
Figura D.203. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



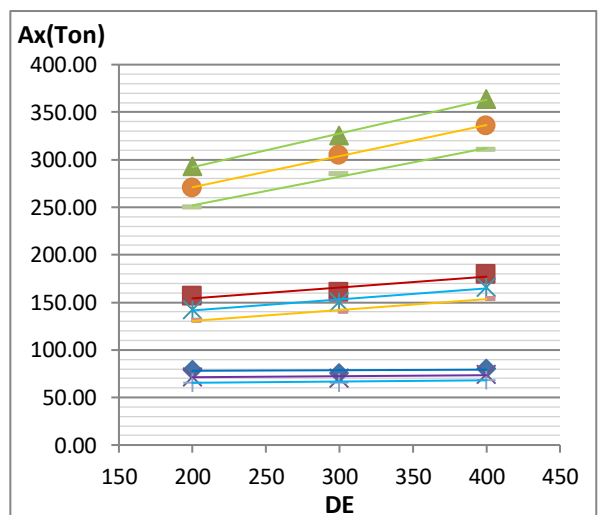
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

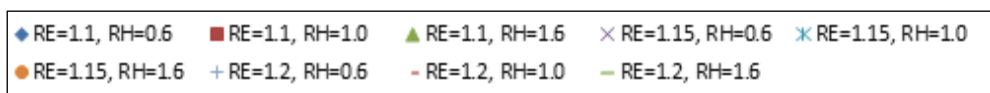
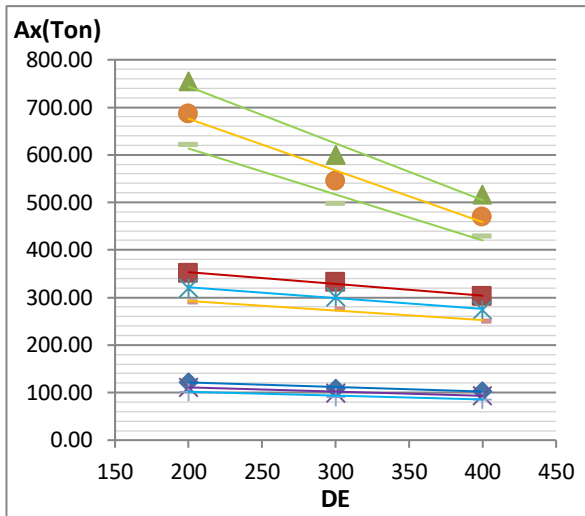
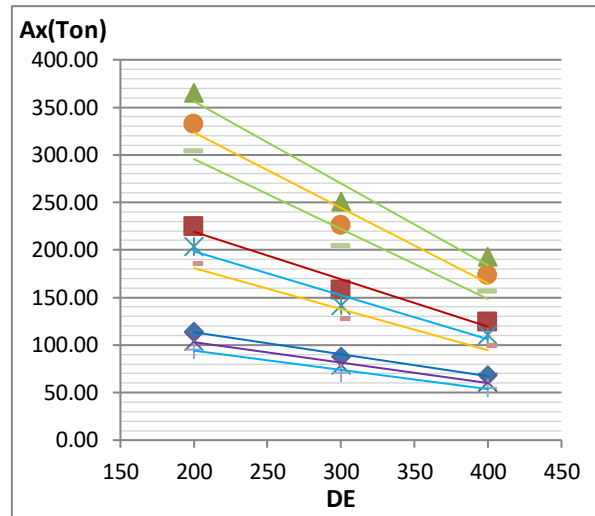


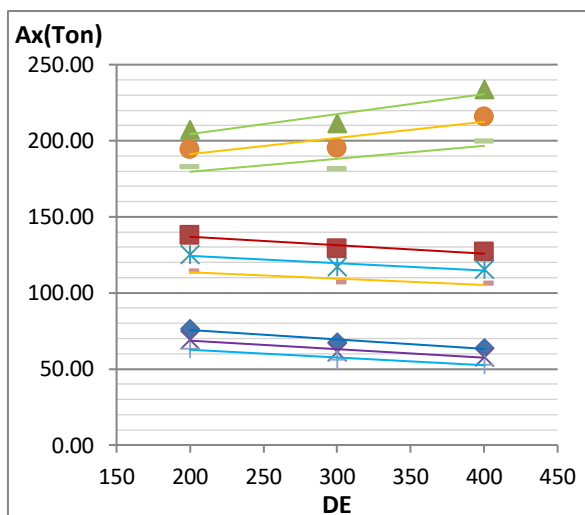
Figura D.204. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 6 columnas.



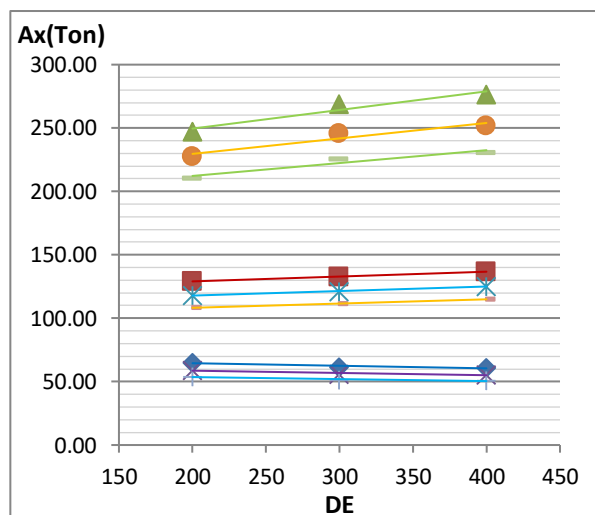
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

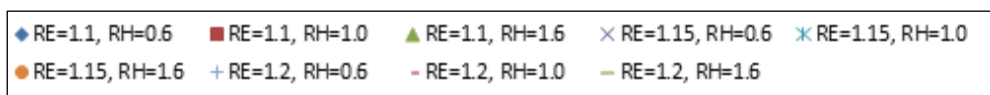
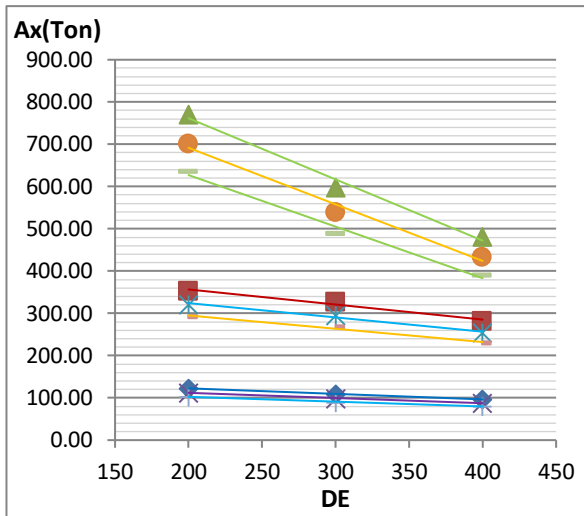
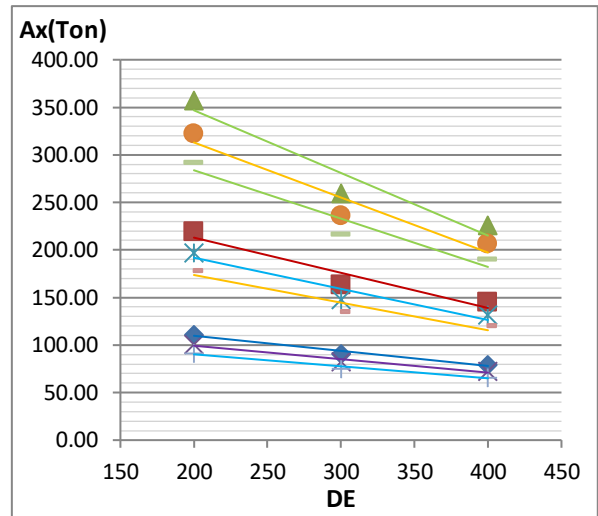


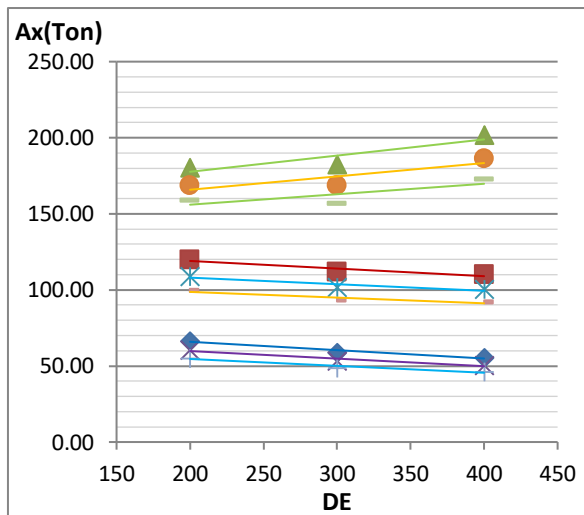
Figura D.205. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



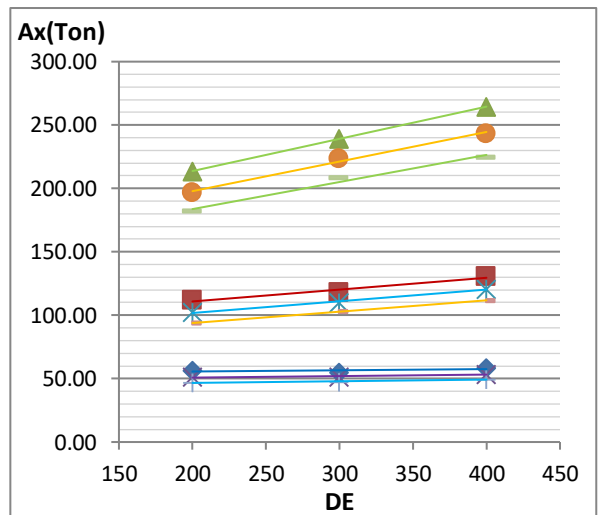
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

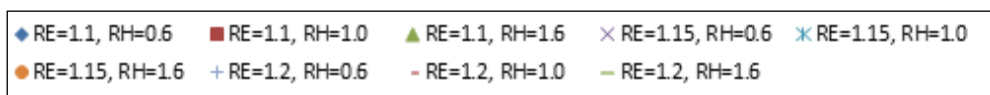
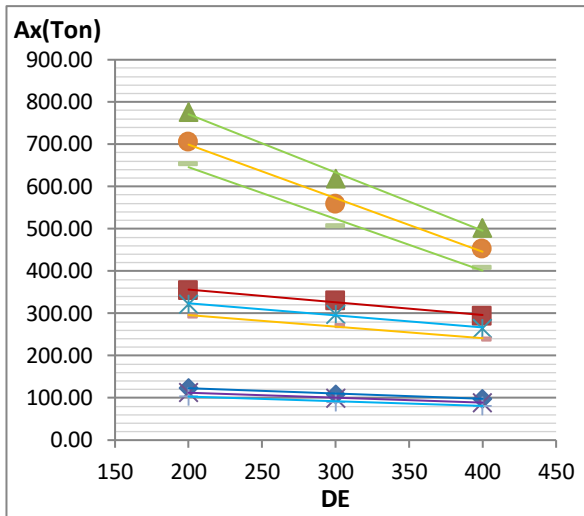
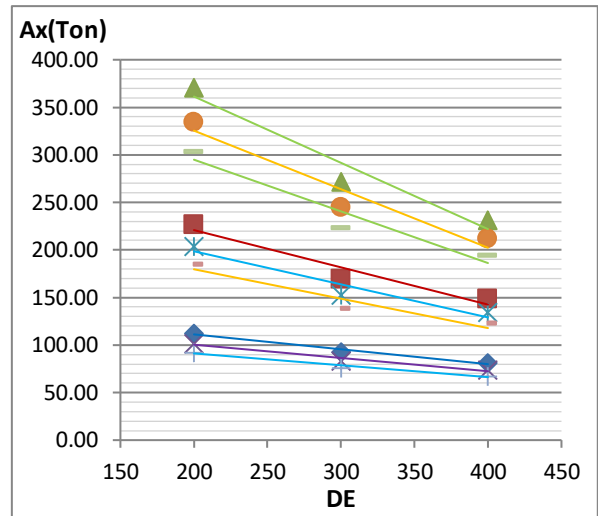


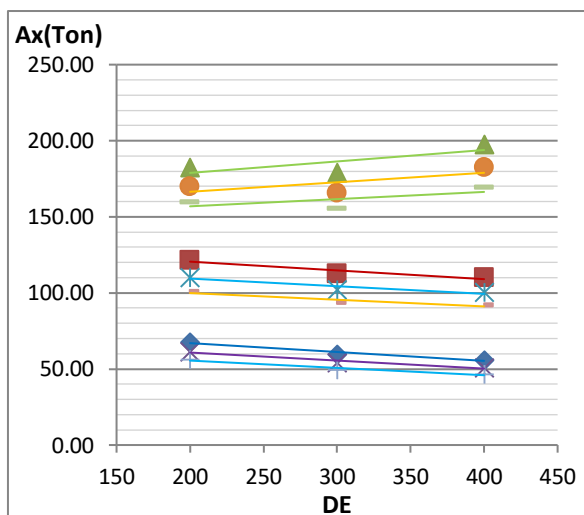
Figura D.206. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



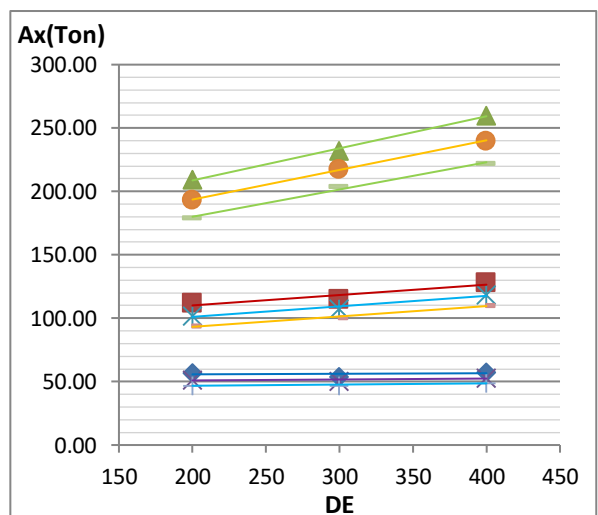
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

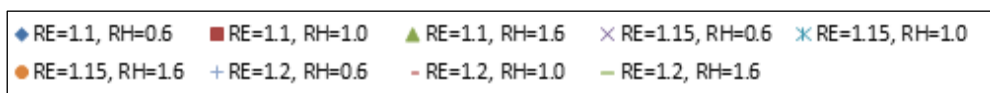
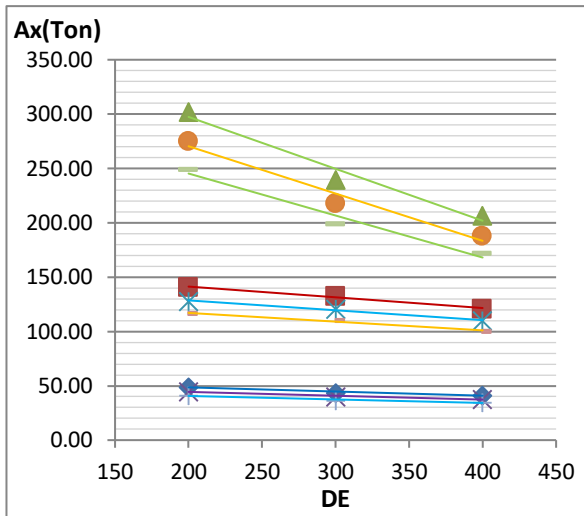
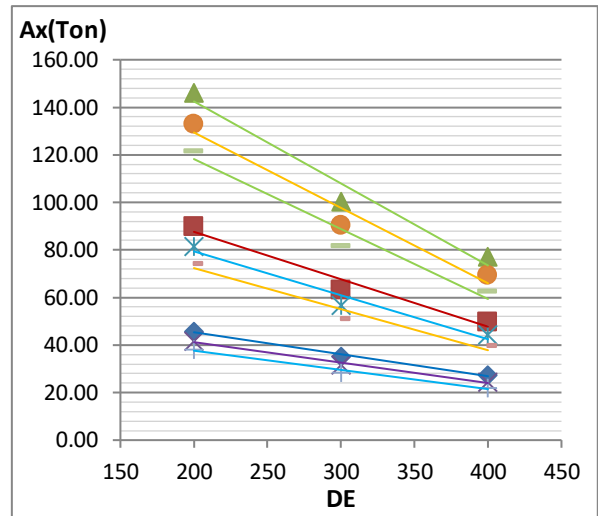


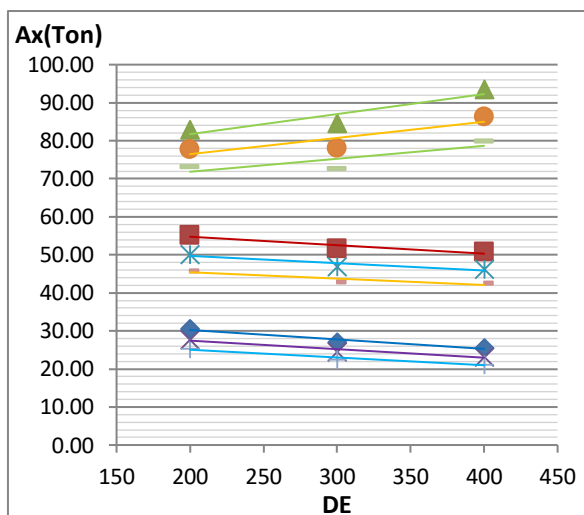
Figura D.207. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 6 columnas.



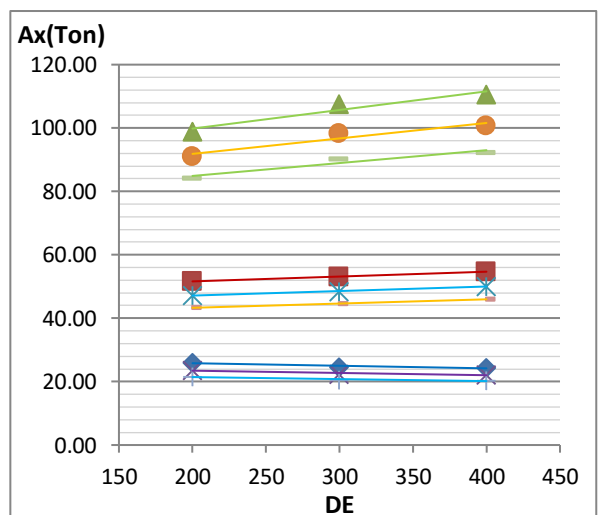
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

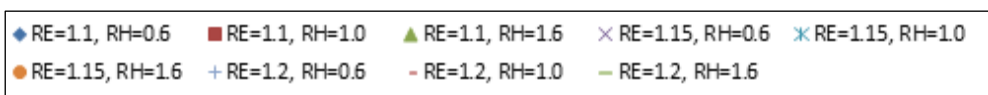
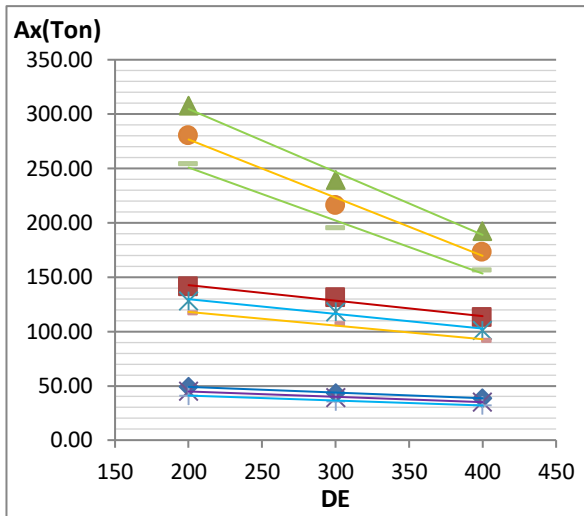
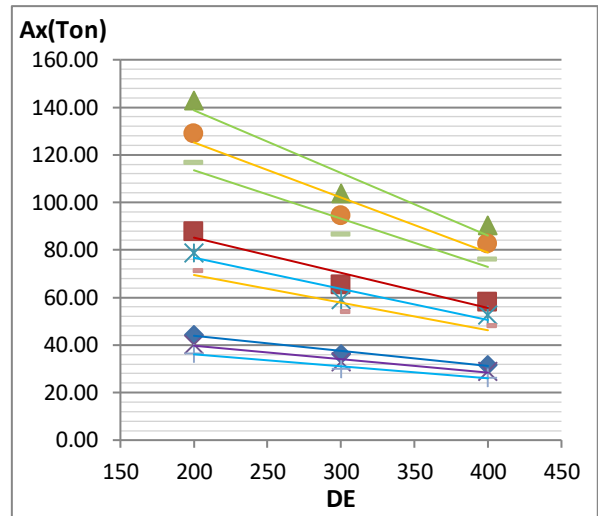


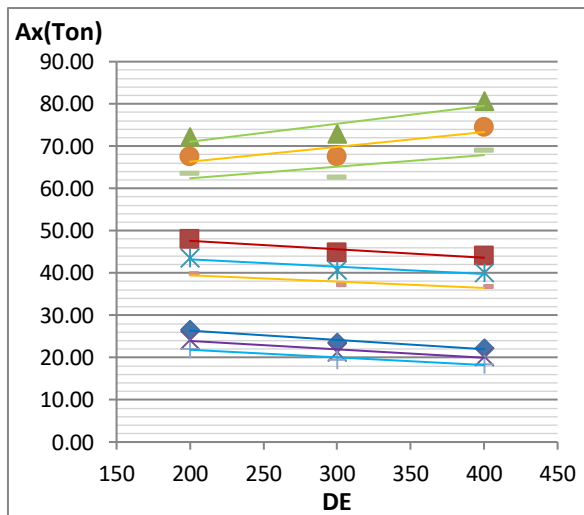
Figura D.208. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



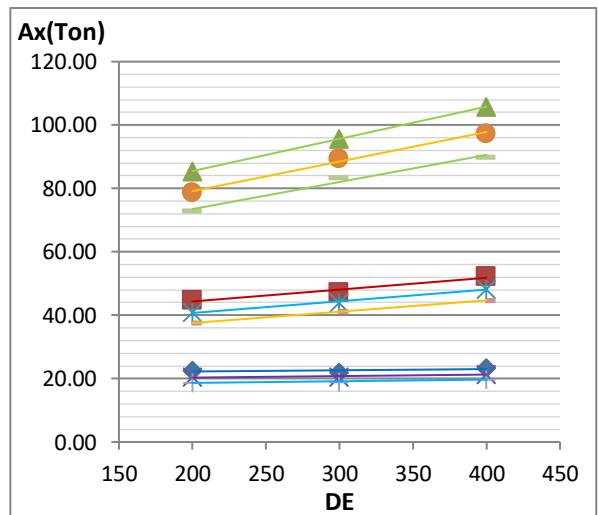
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

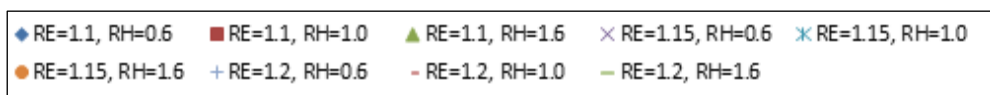
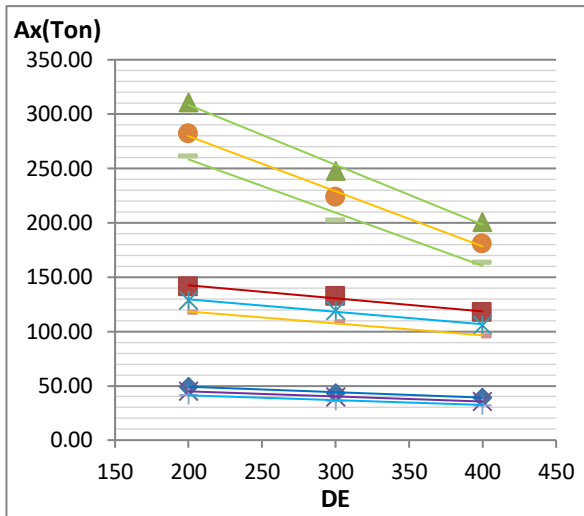
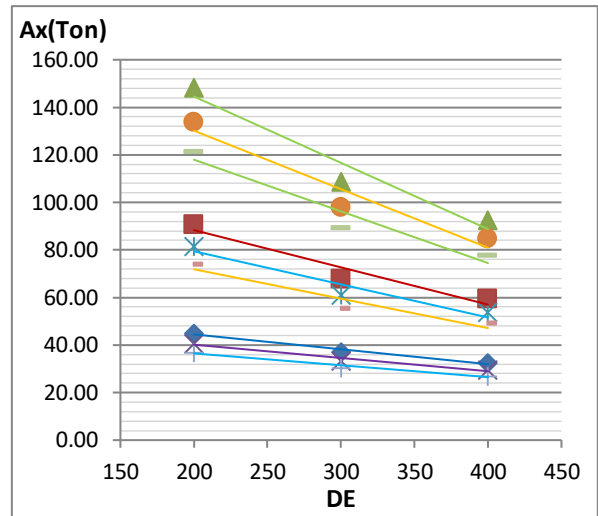


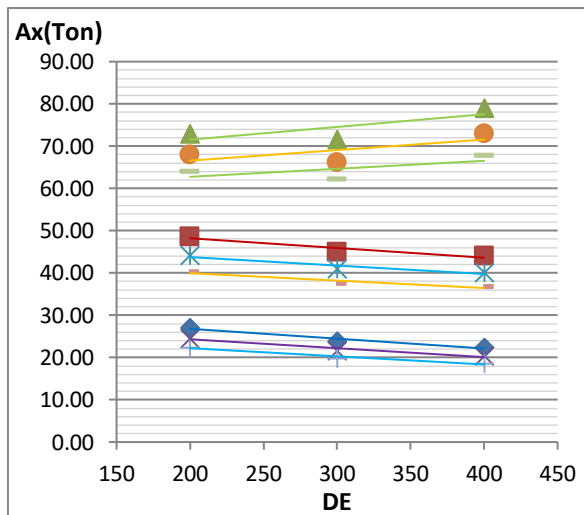
Figura D.209. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



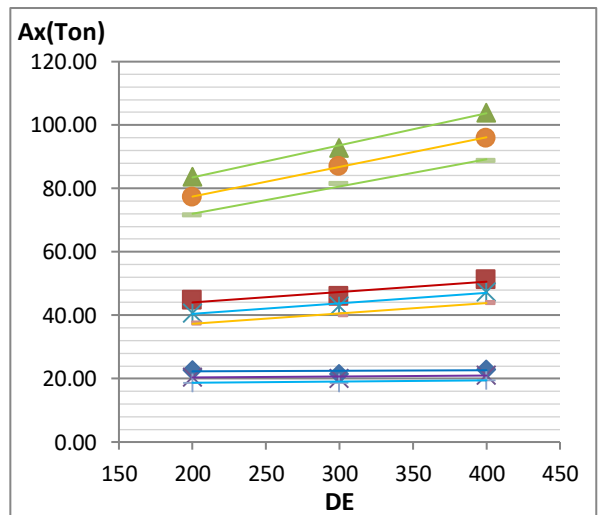
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

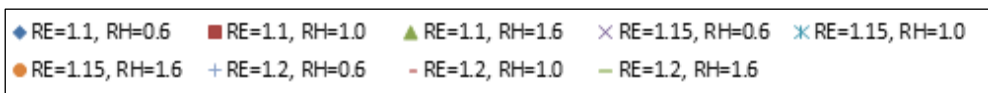
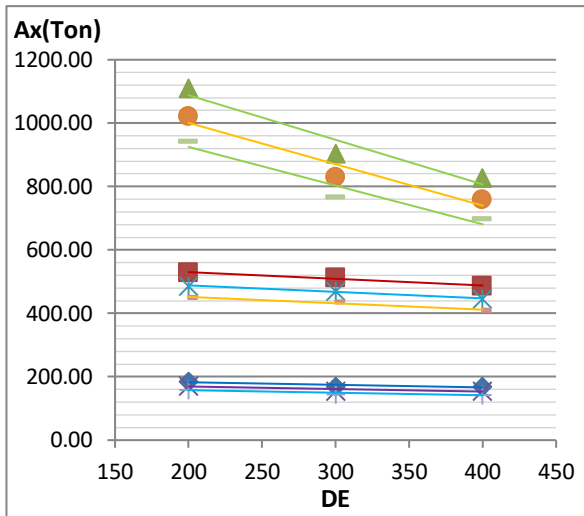
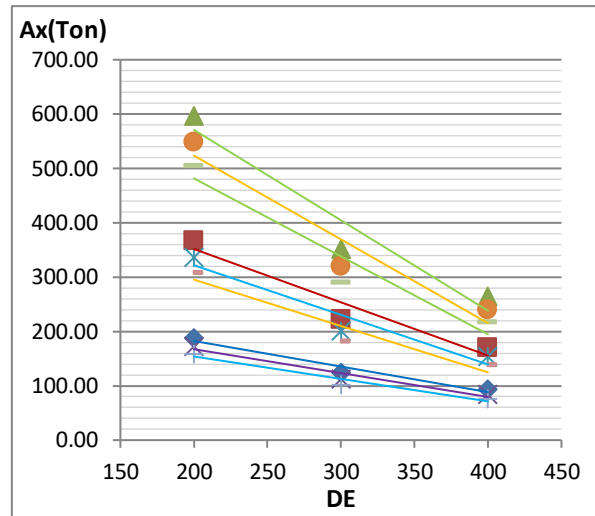


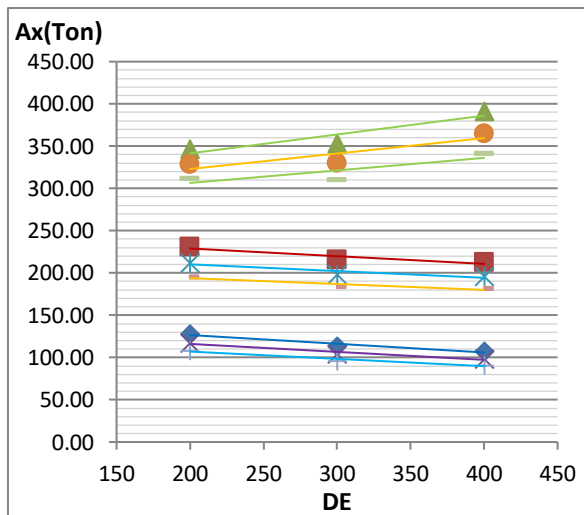
Figura D.210. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 6 columnas.



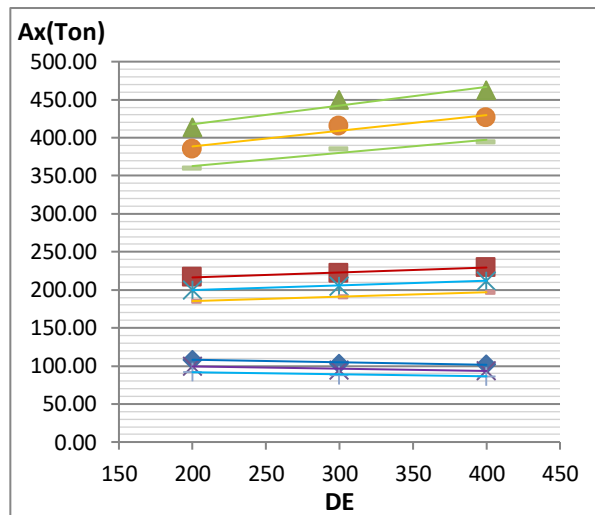
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

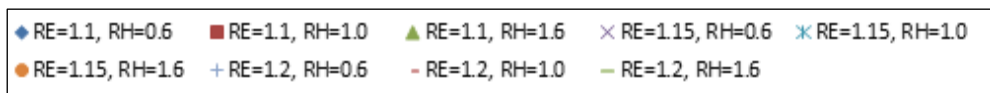
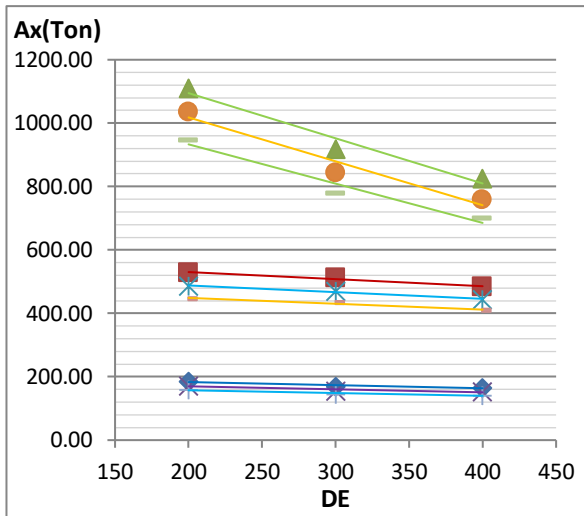
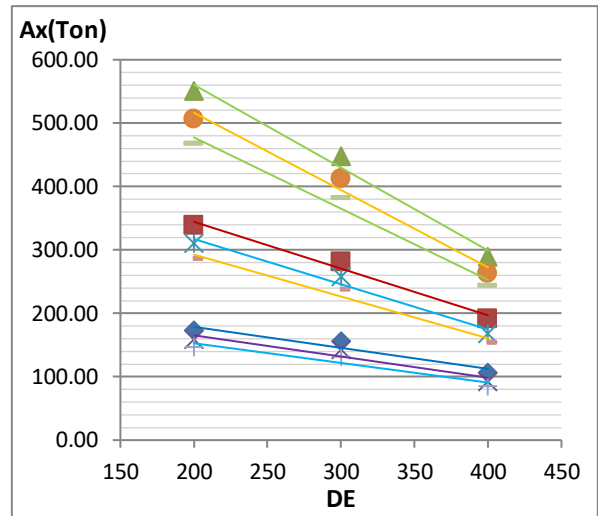


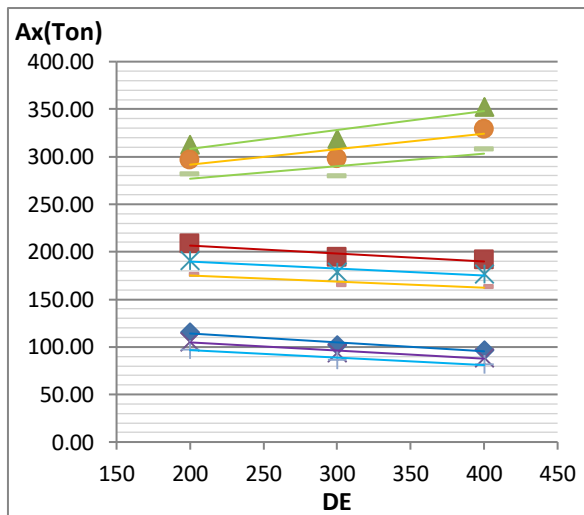
Figura D.211. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



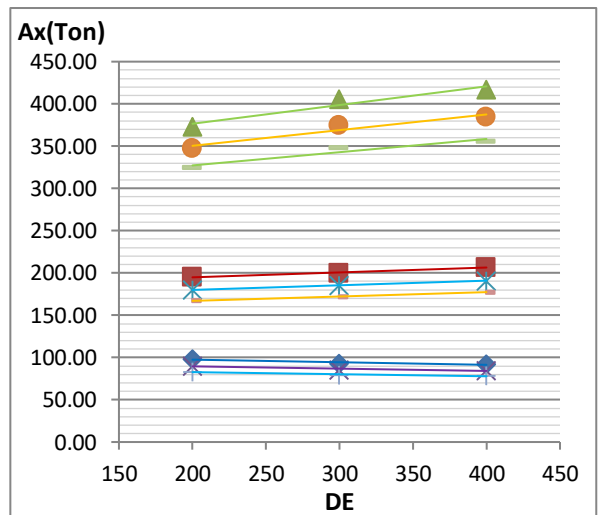
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

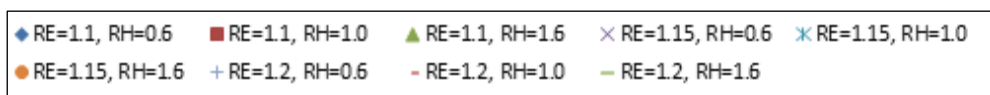
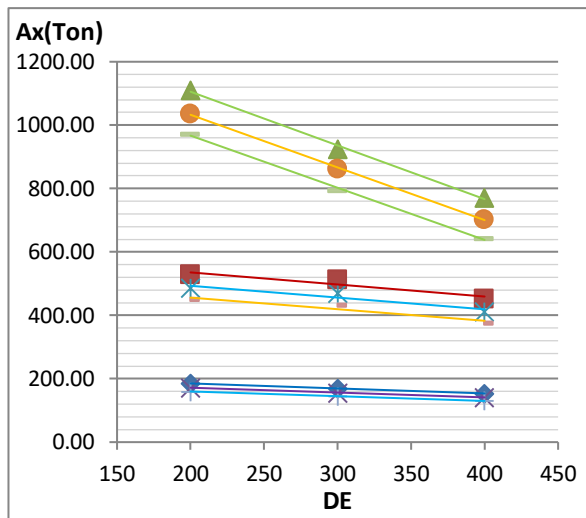
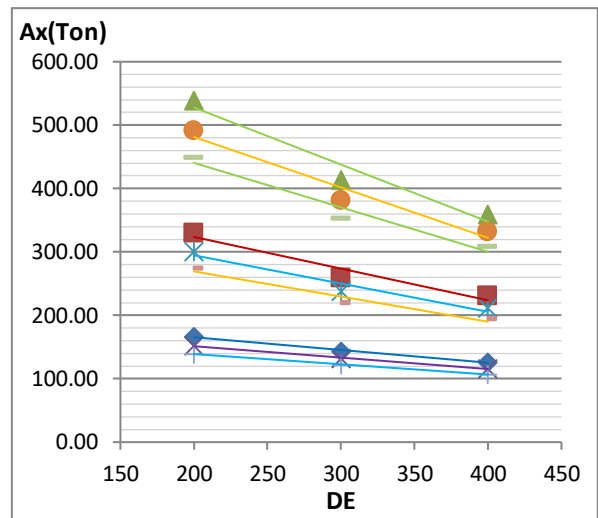


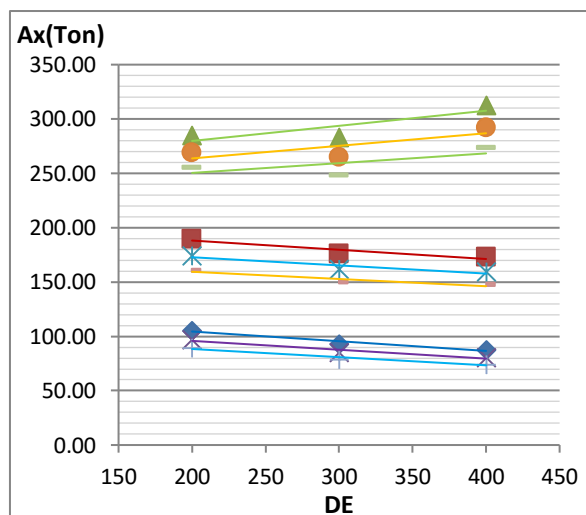
Figura D.212. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



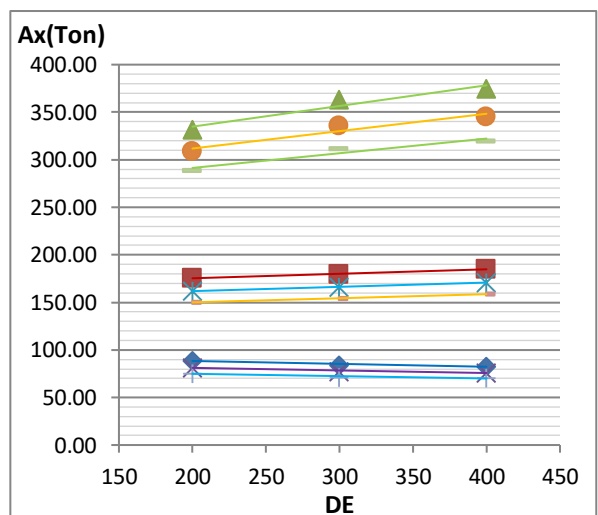
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

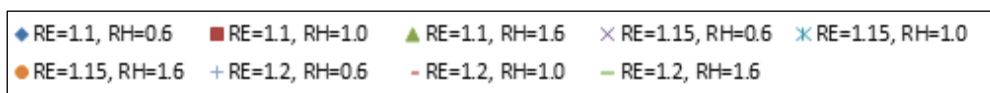
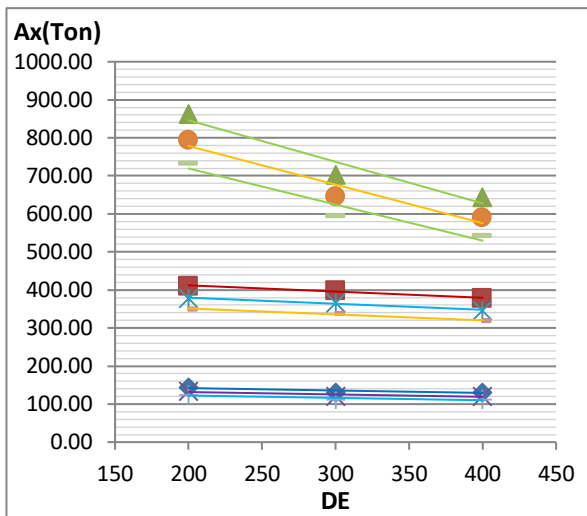
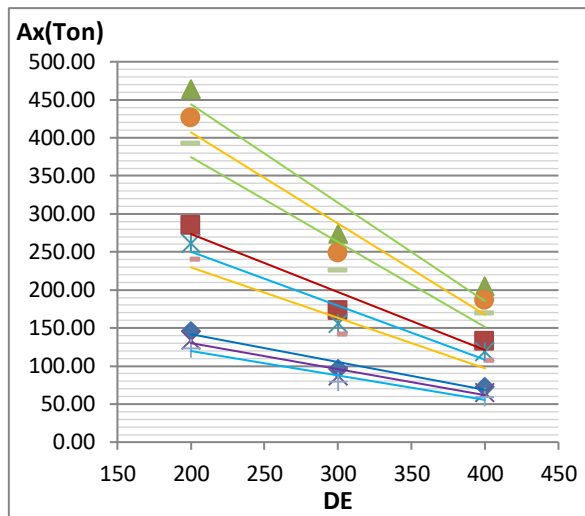


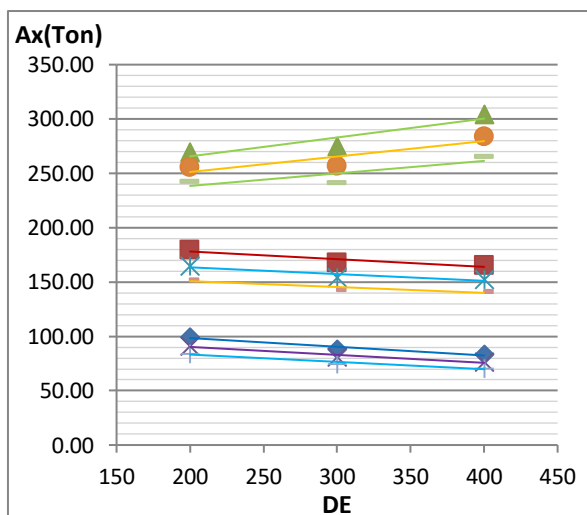
Figura D.213. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 8 columnas.



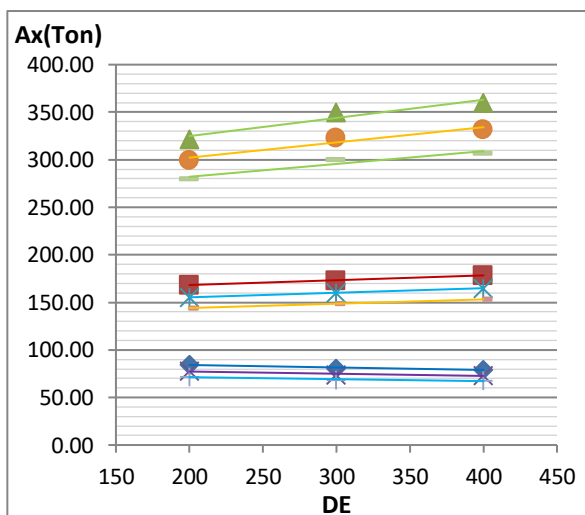
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

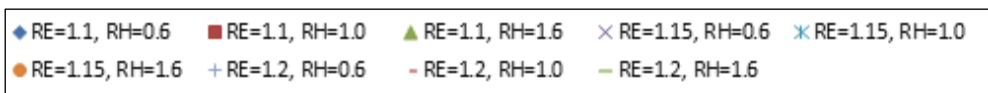
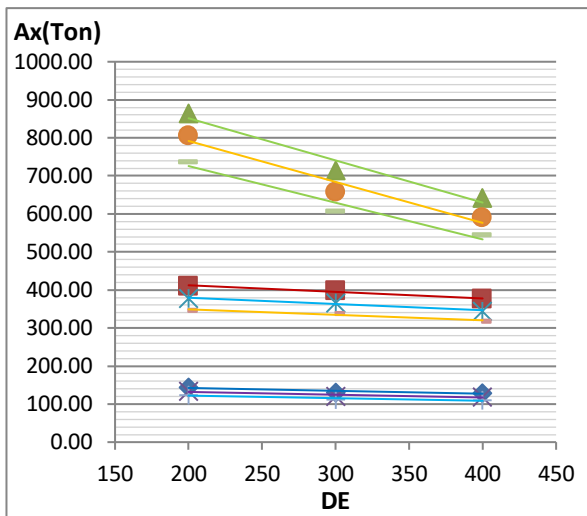
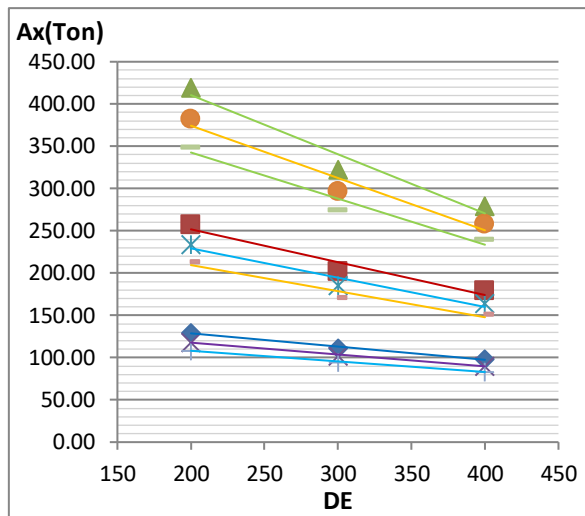


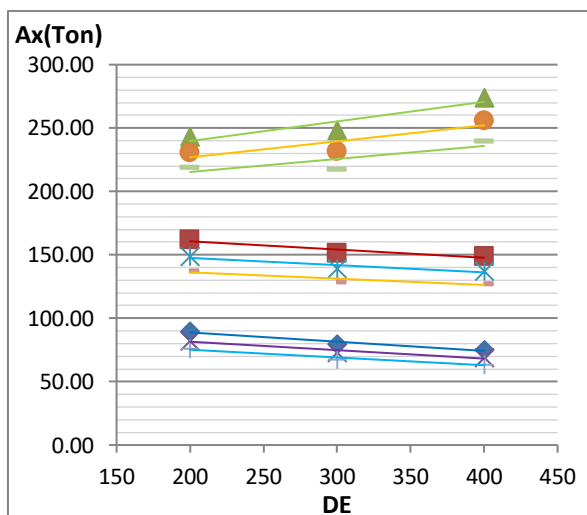
Figura D.214. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



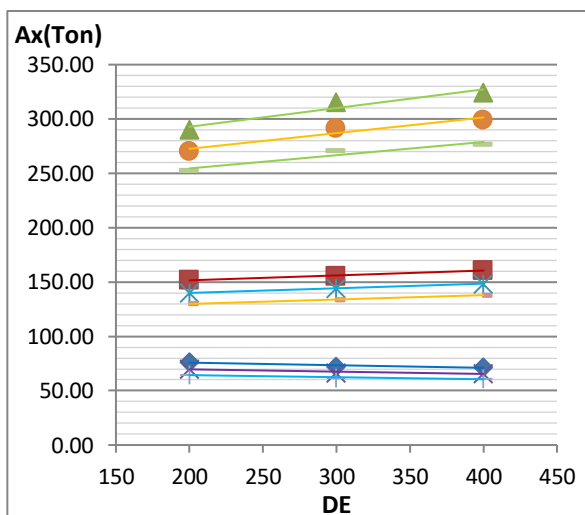
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

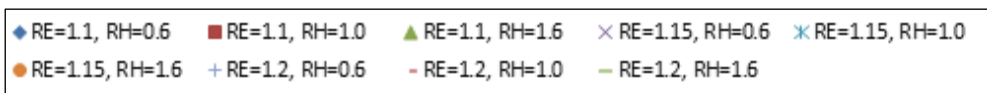
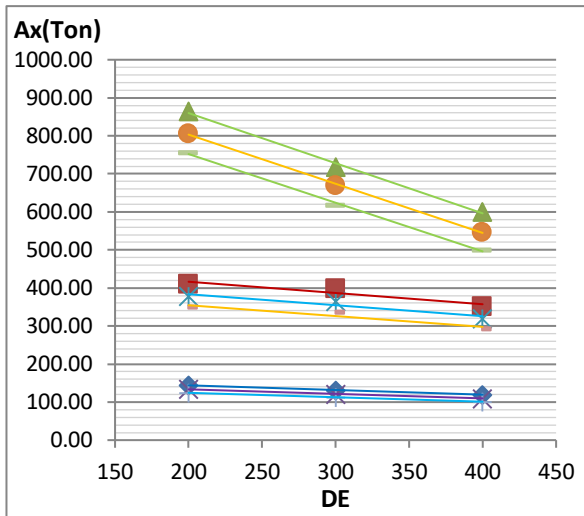
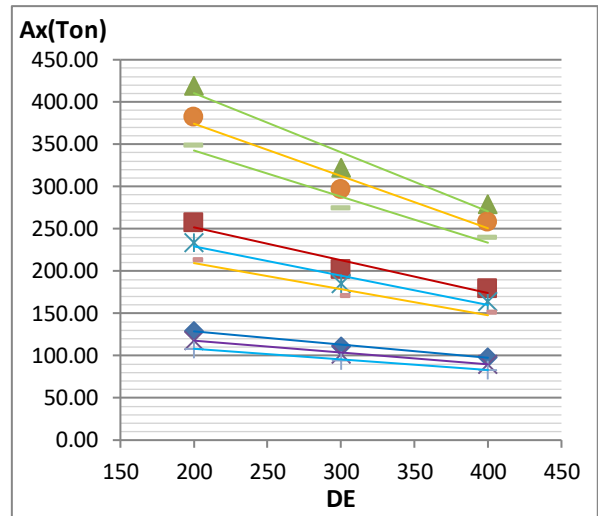


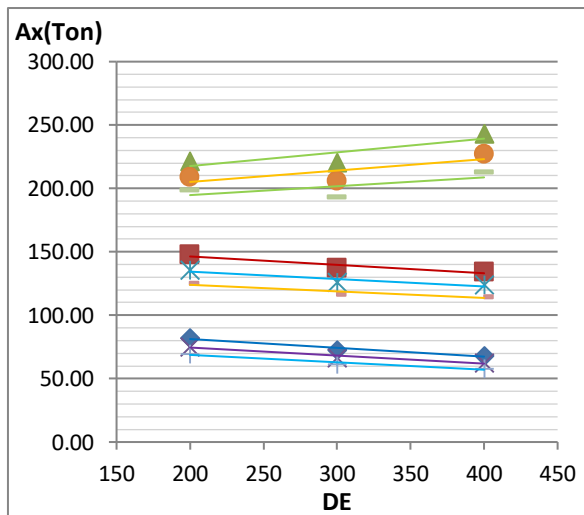
Figura D.215. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.



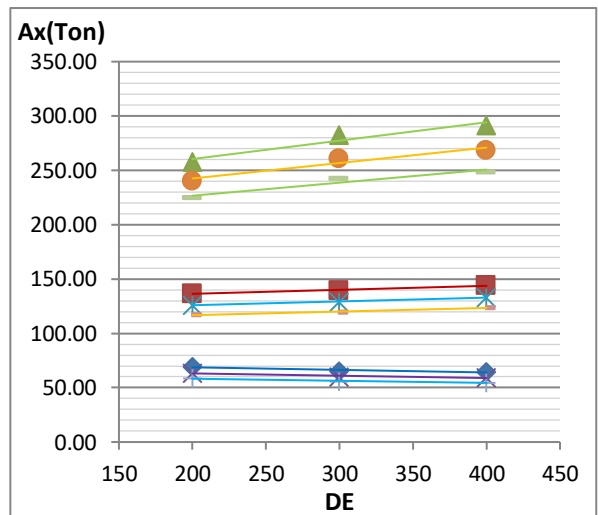
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

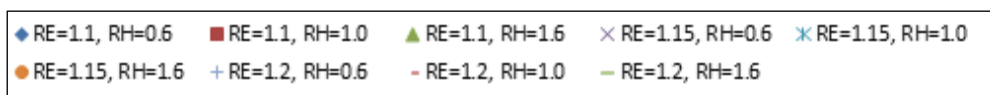


Figura D.216. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 8 columnas.

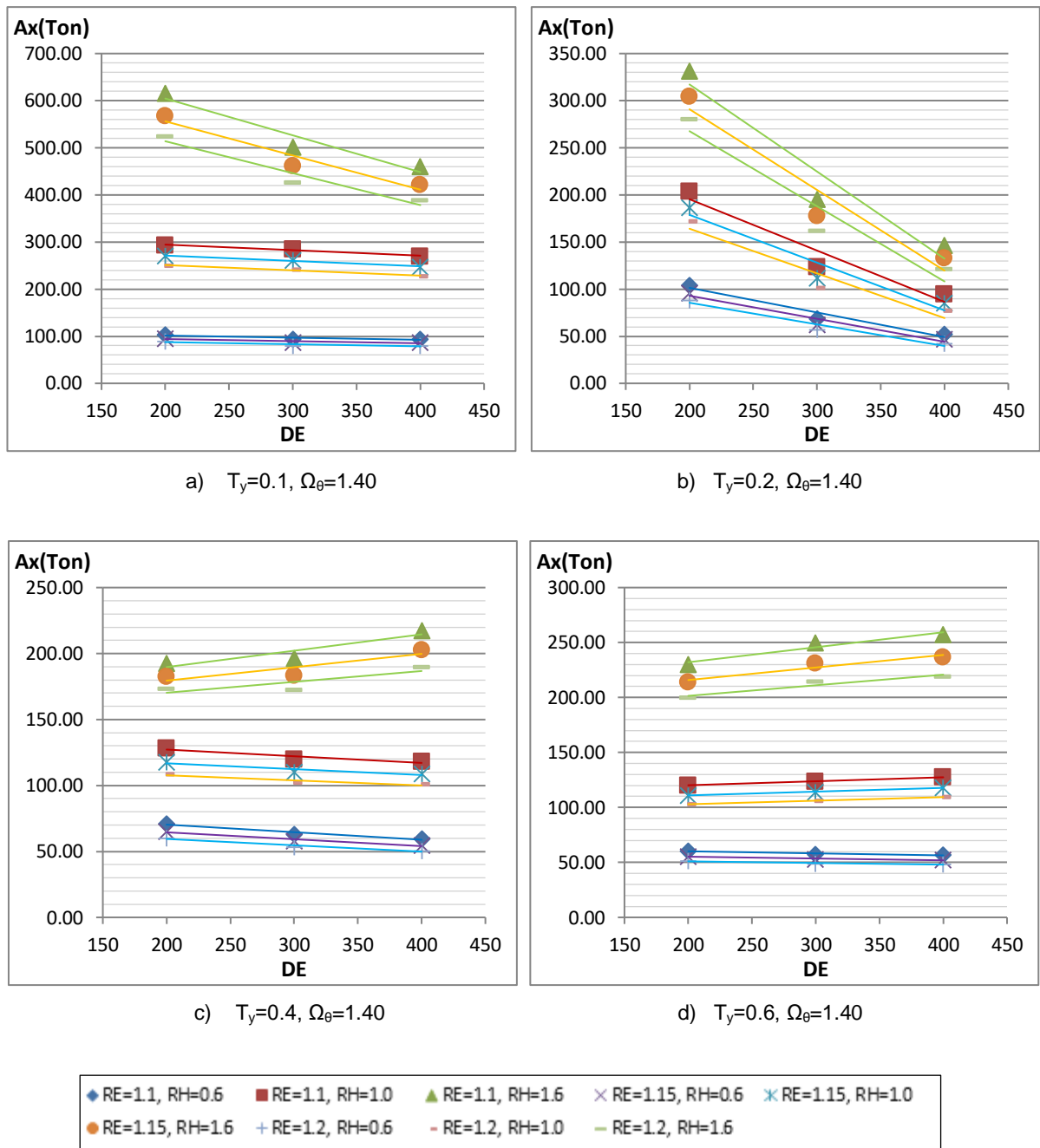
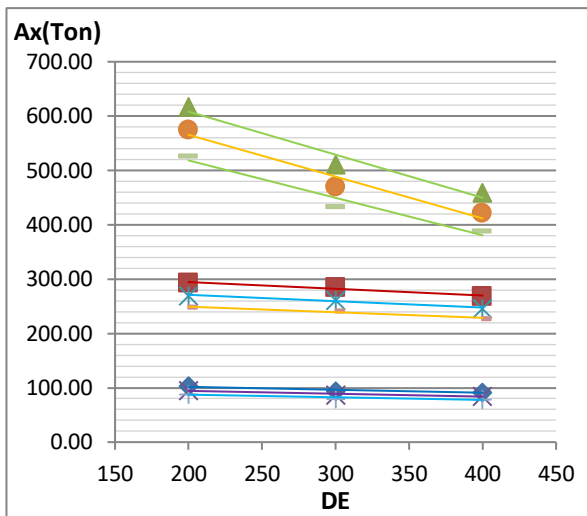
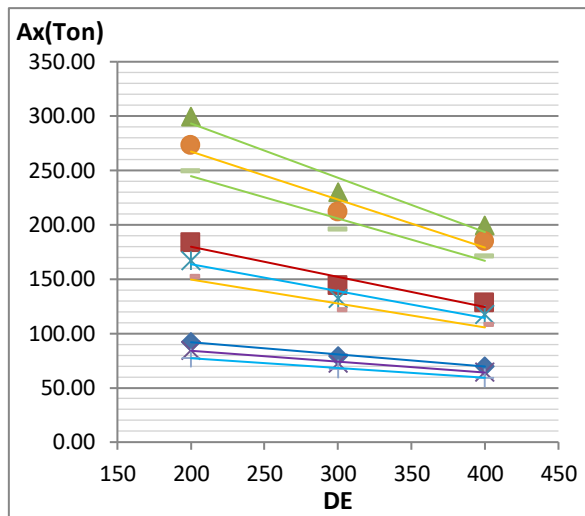


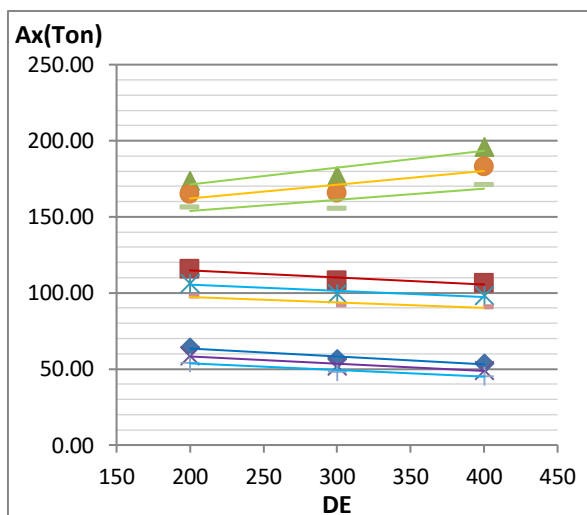
Figura D.217. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



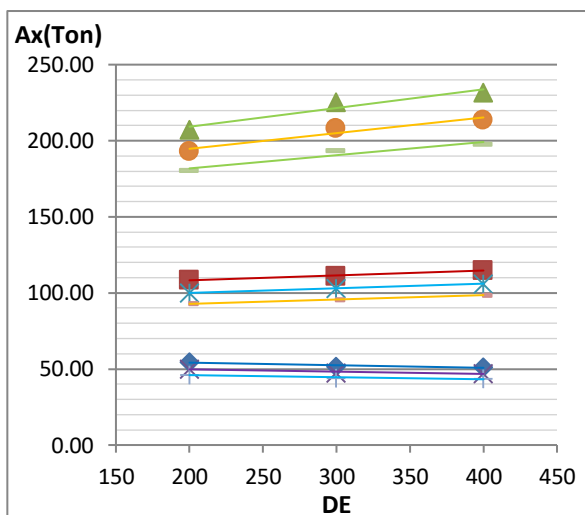
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

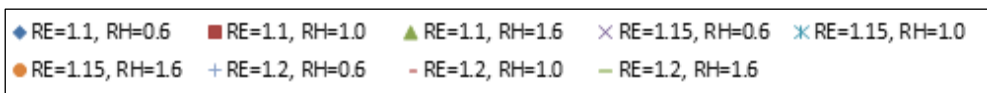
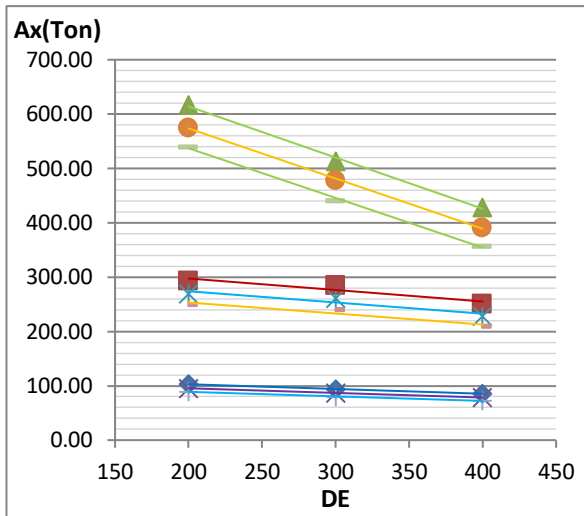
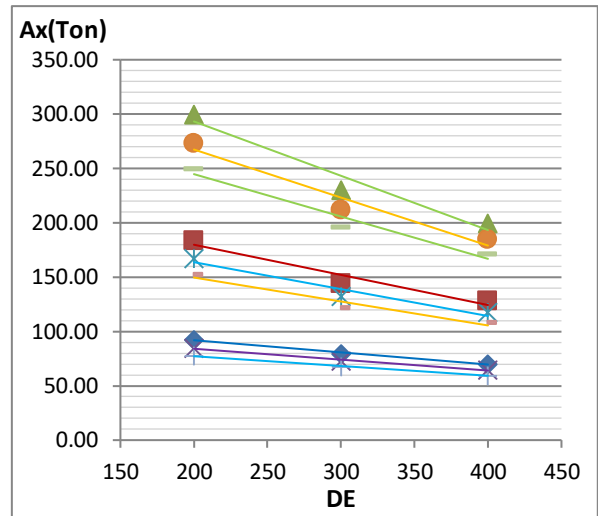


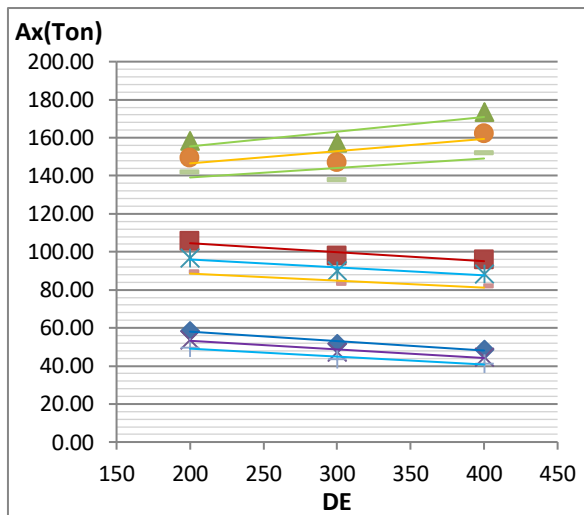
Figura D.218. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



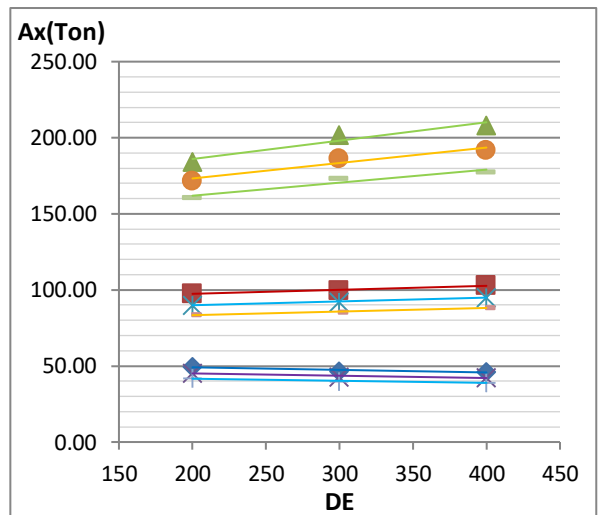
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

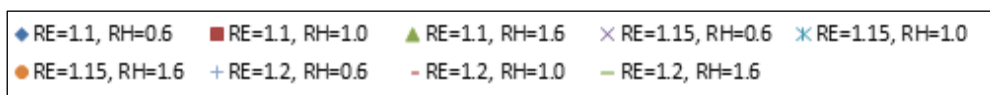
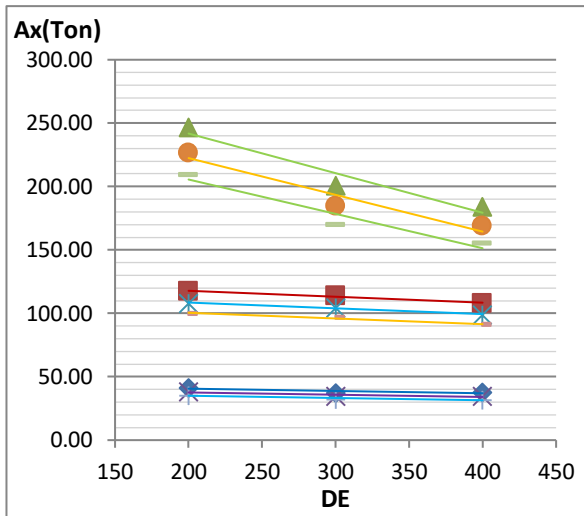
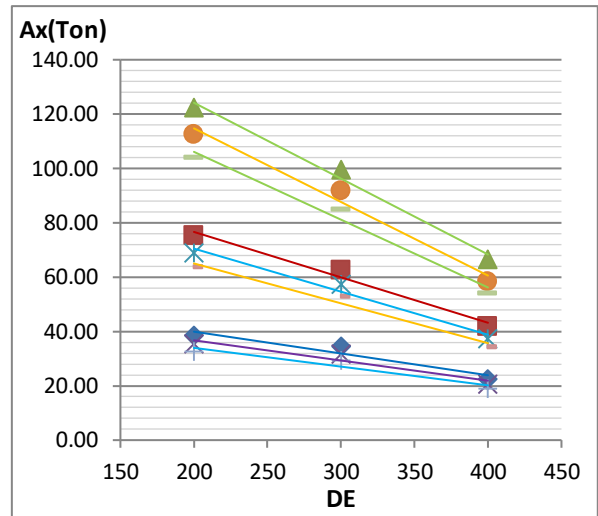


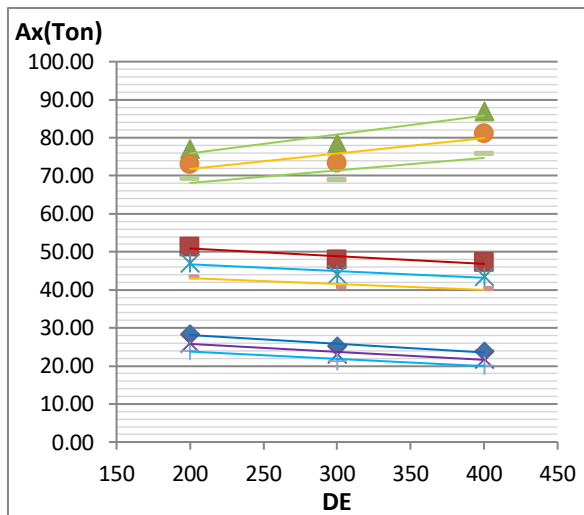
Figura D.219. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 8 columnas.



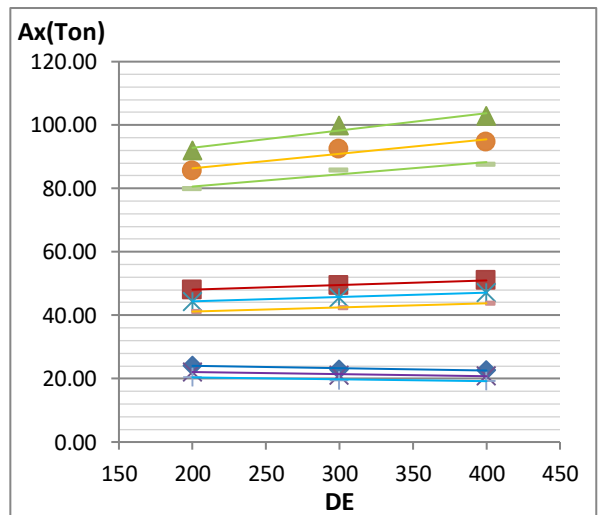
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

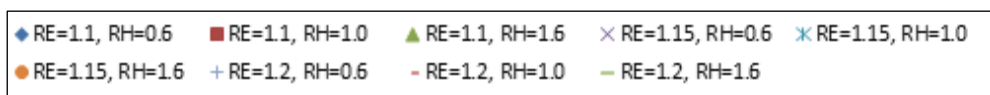
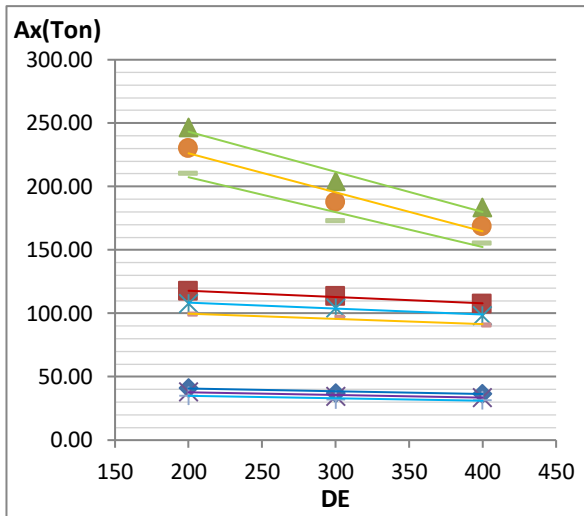
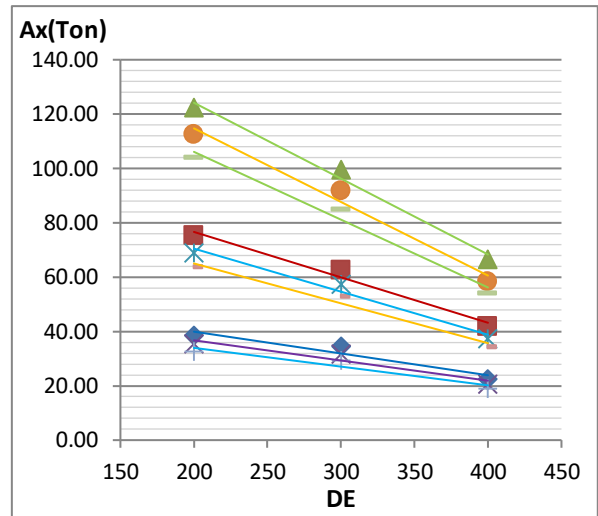


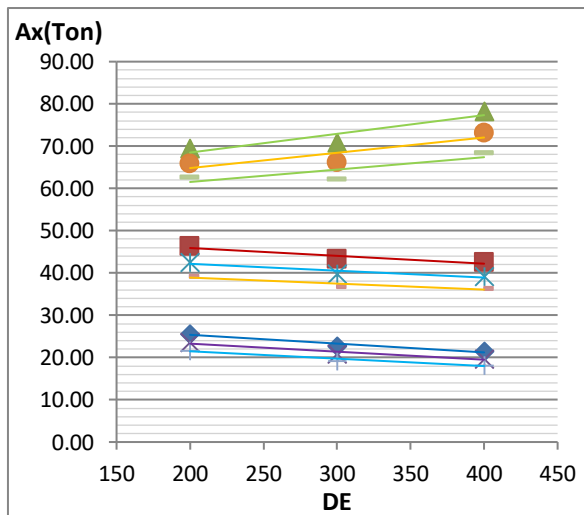
Figura D.220. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



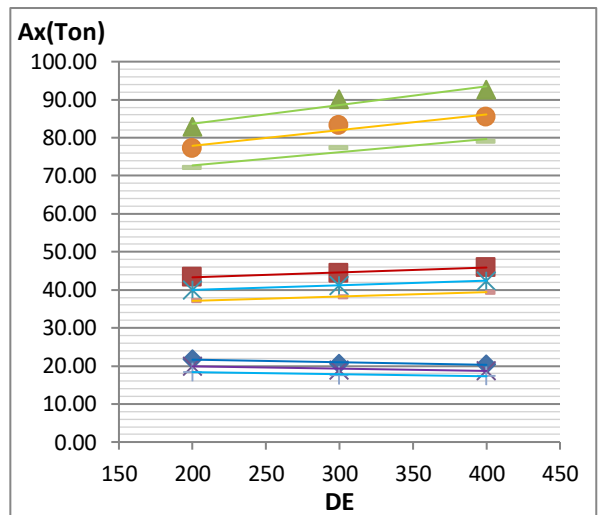
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

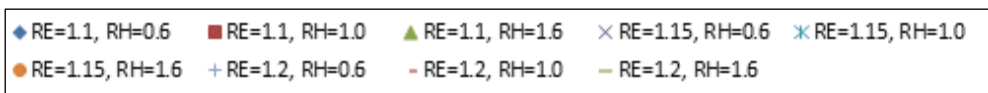
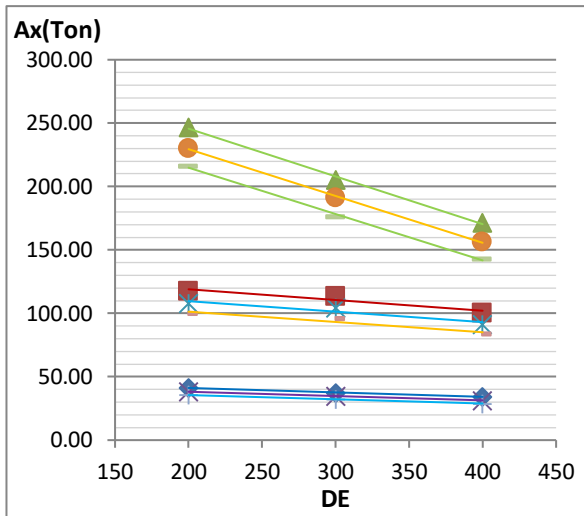
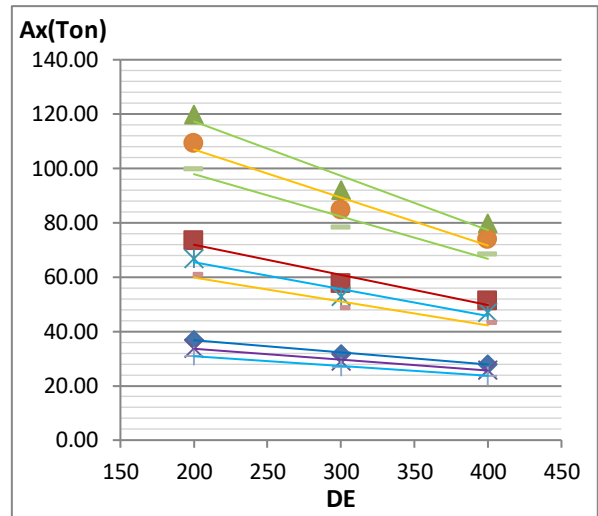


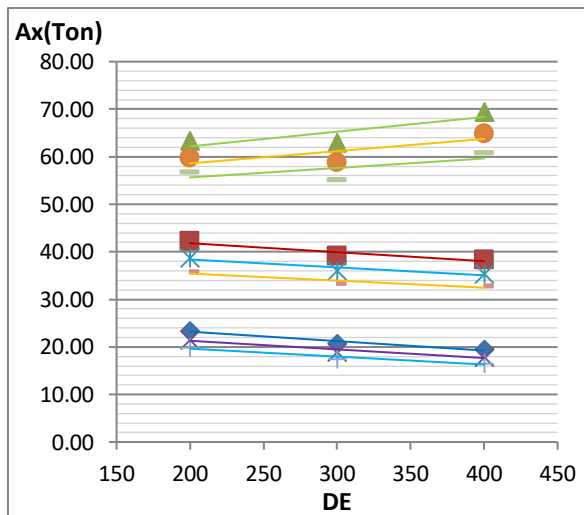
Figura D.221. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



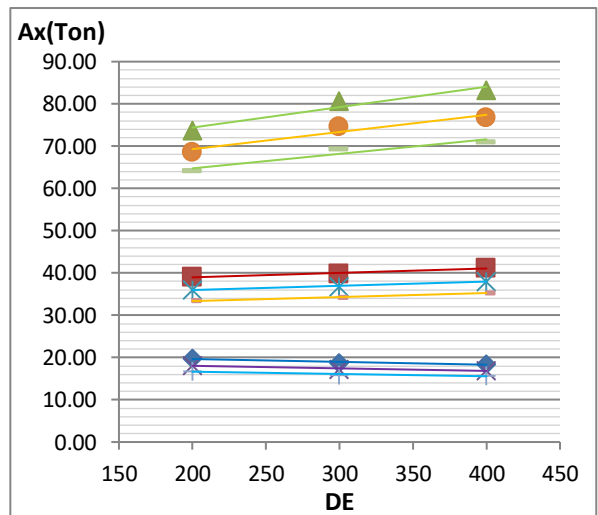
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

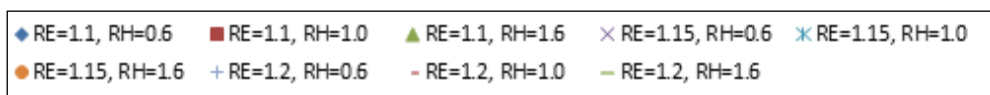
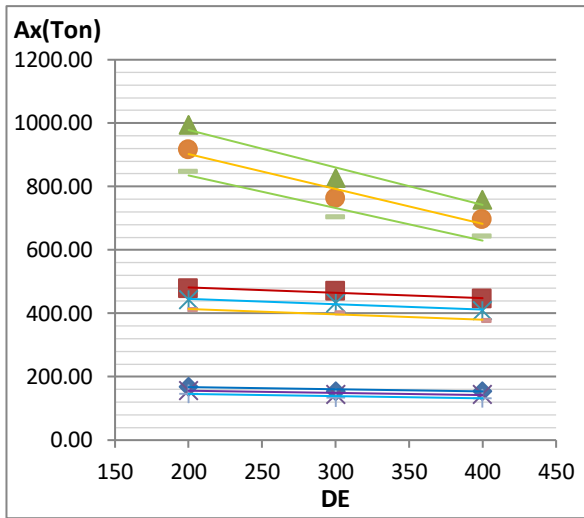
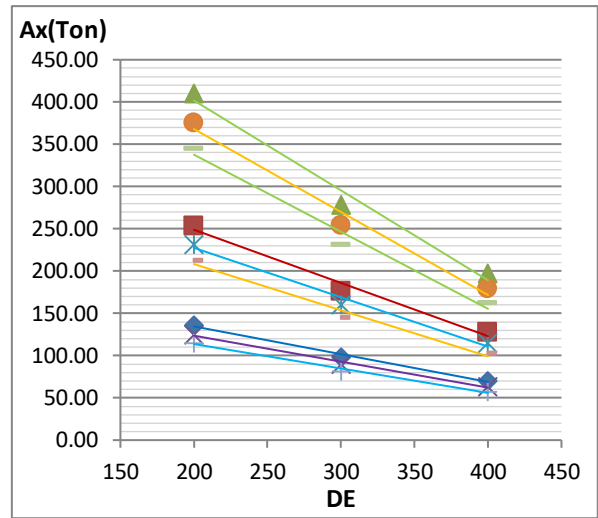


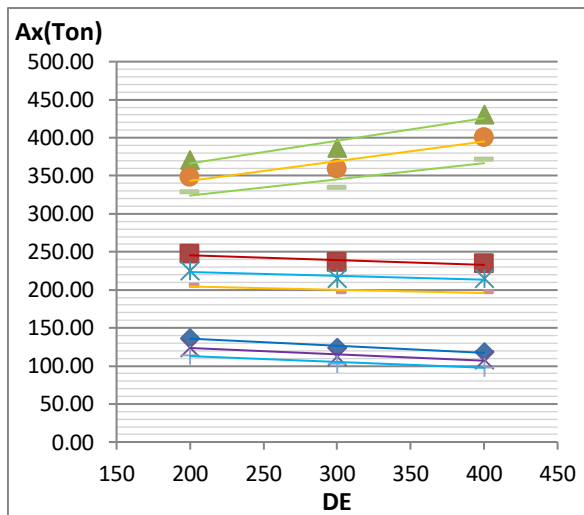
Figura D.222. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 8 columnas.



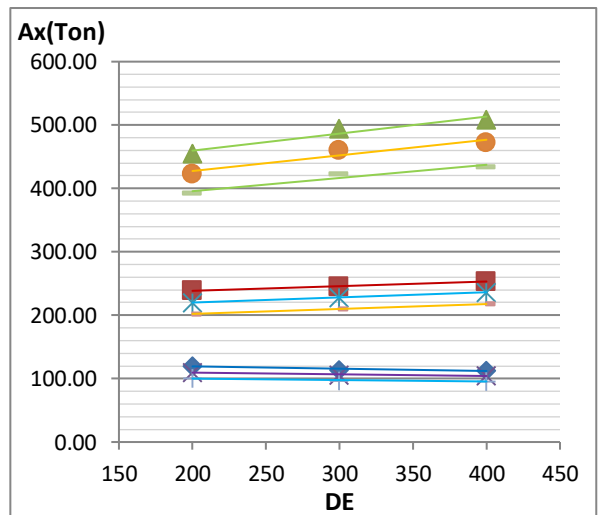
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

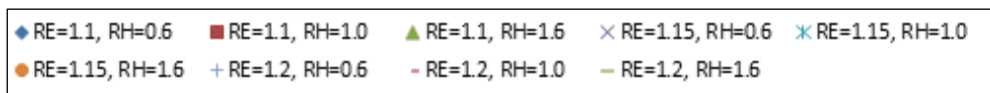
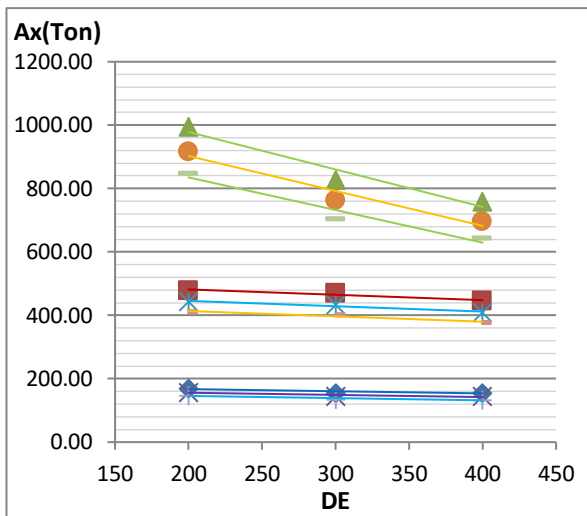
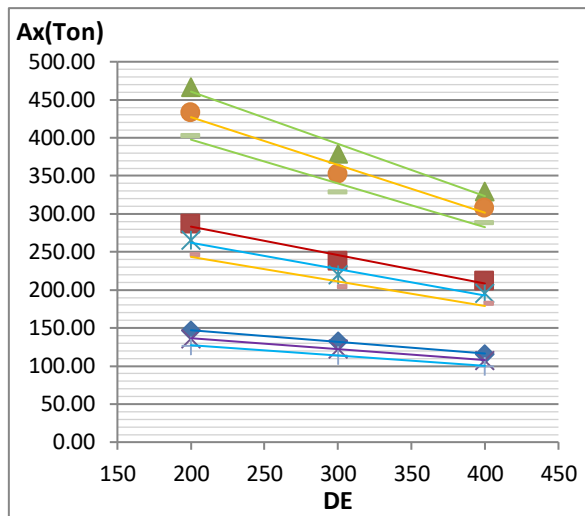


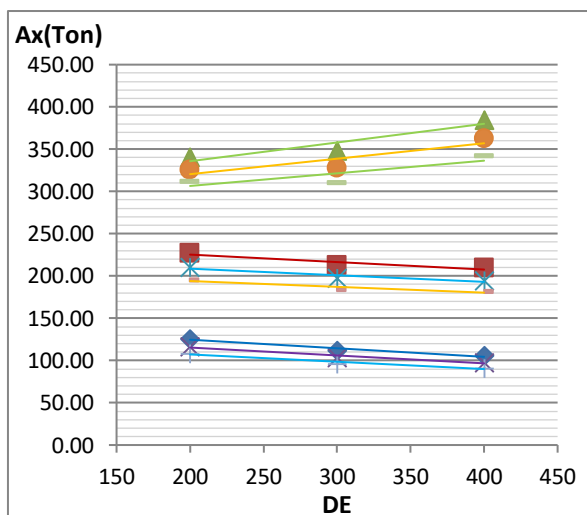
Figura D.223. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas.



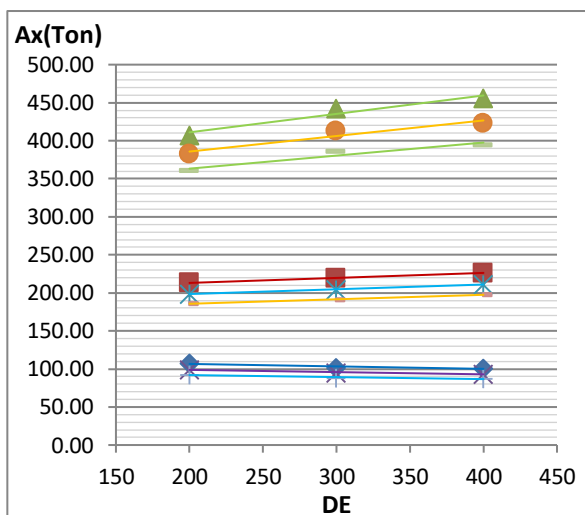
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

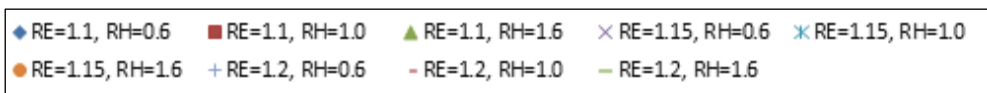
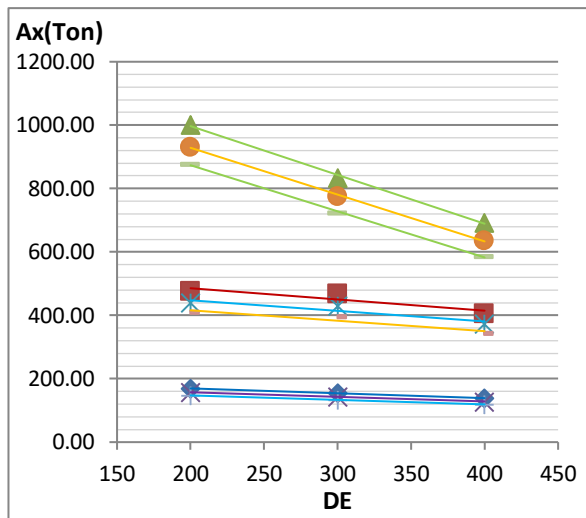
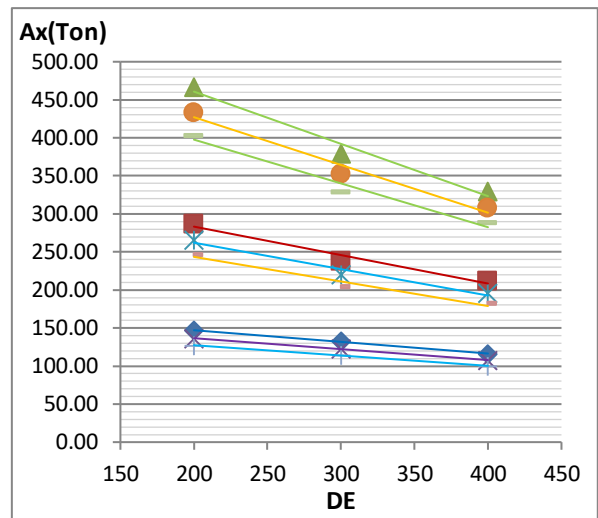


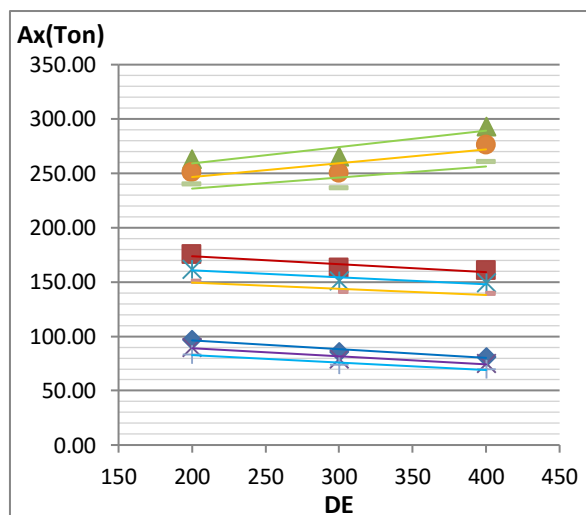
Figura D.224. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas



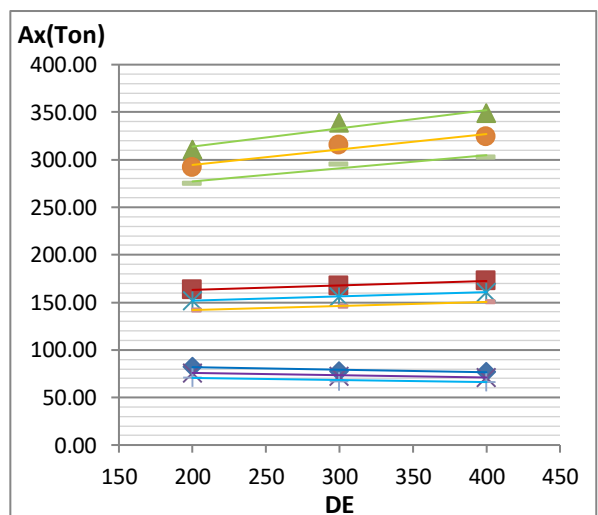
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

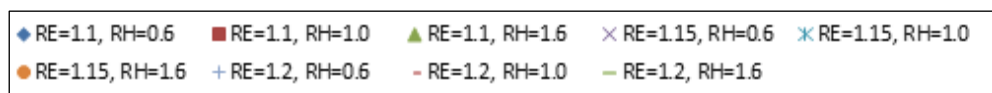
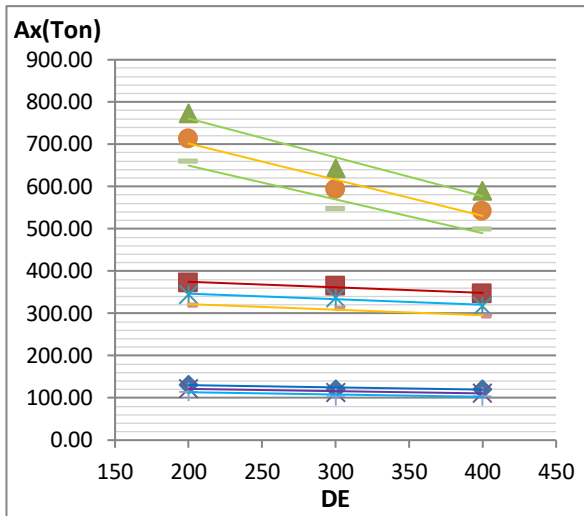
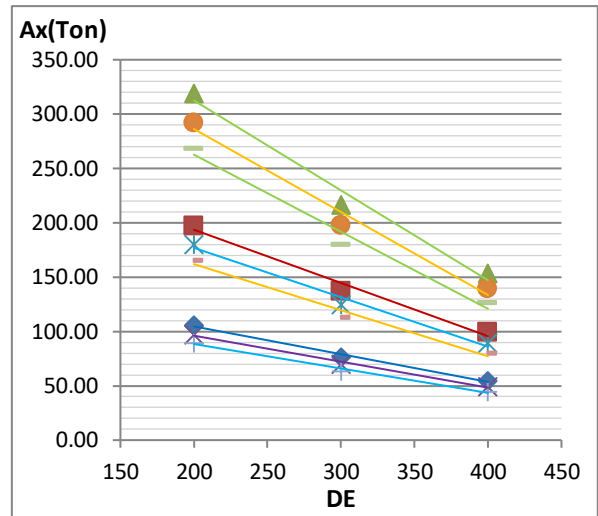


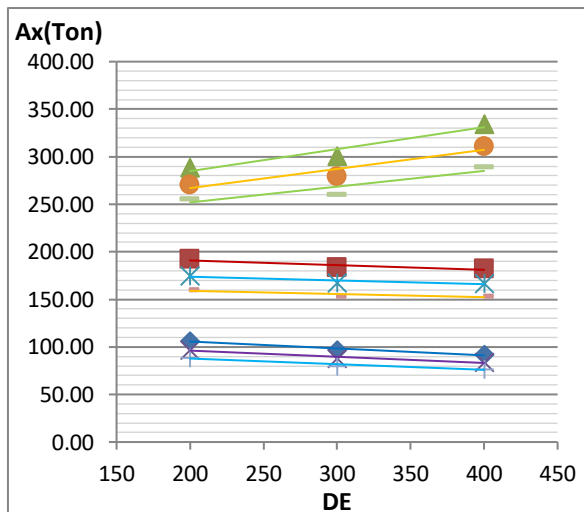
Figura D.225. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 4 - configuración de 10 columnas



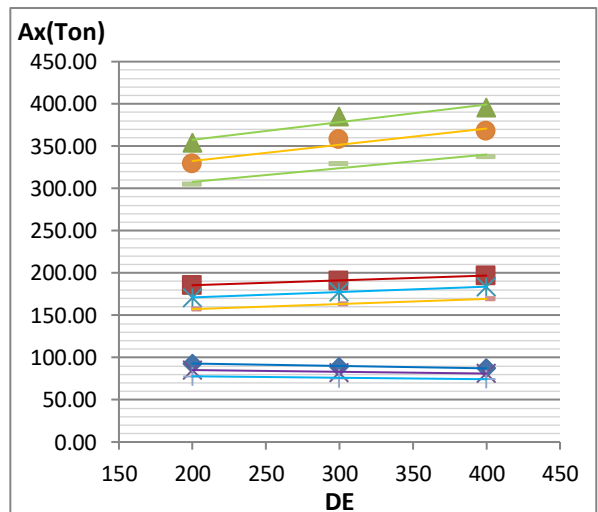
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

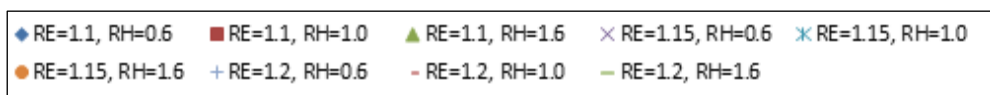
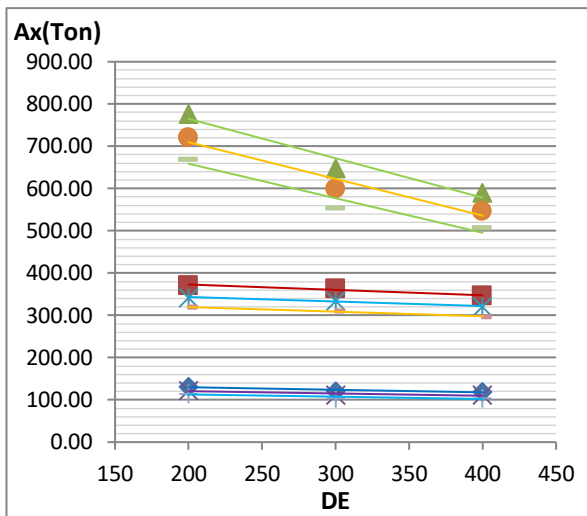
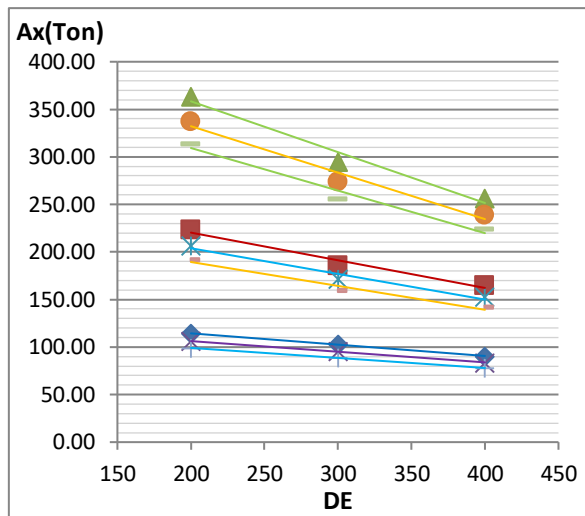


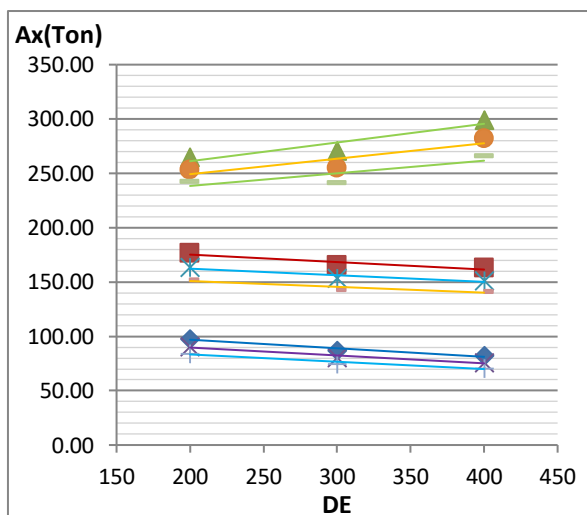
Figura D.226. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



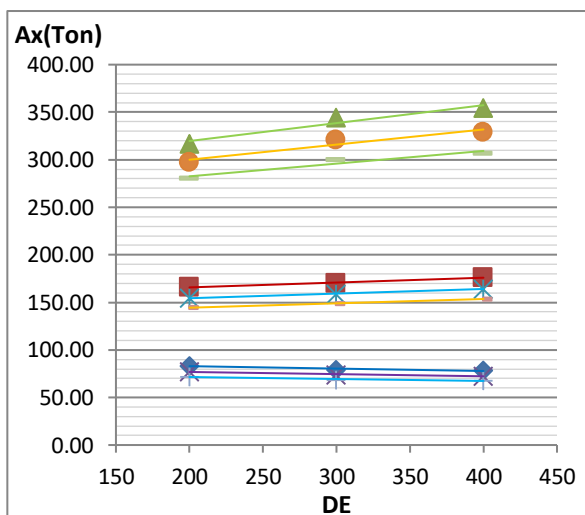
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

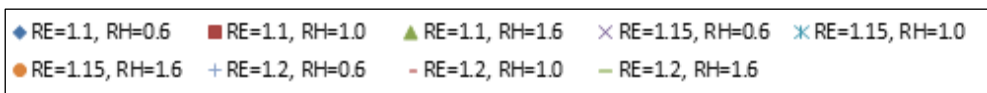
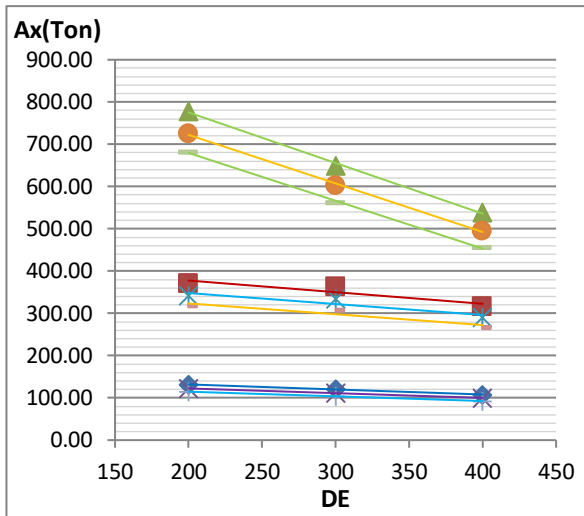
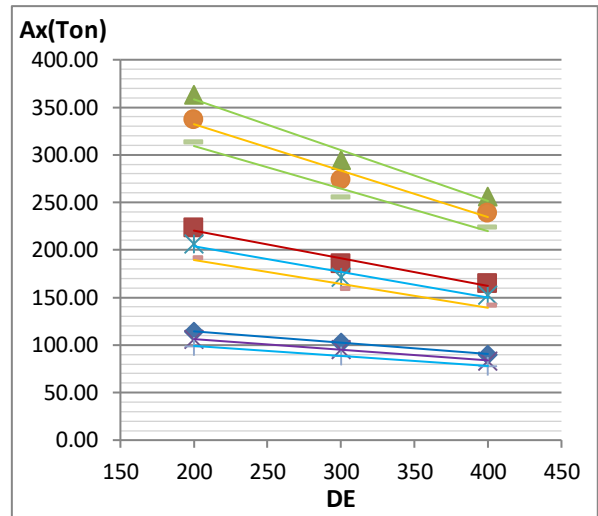


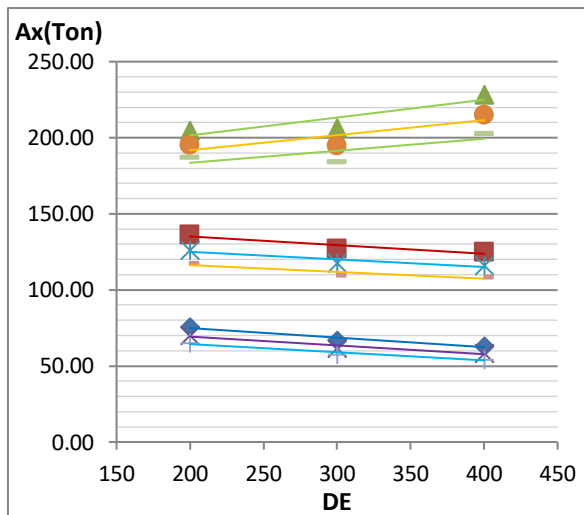
Figura D.227. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



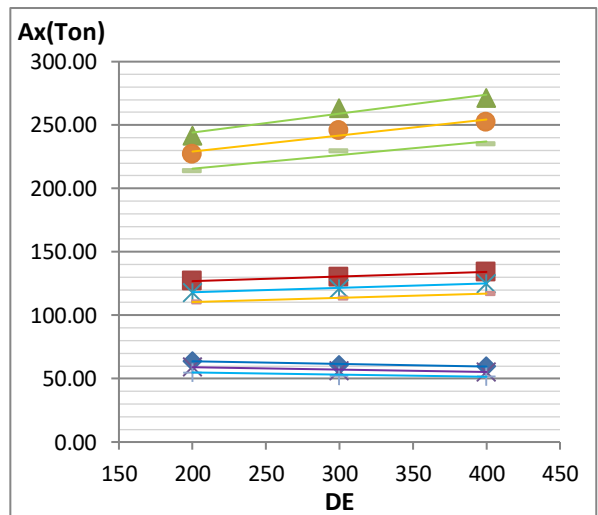
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

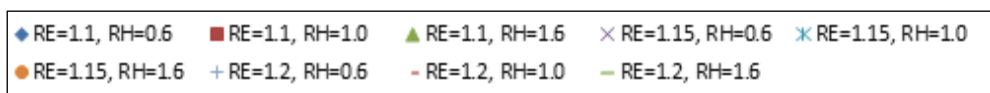
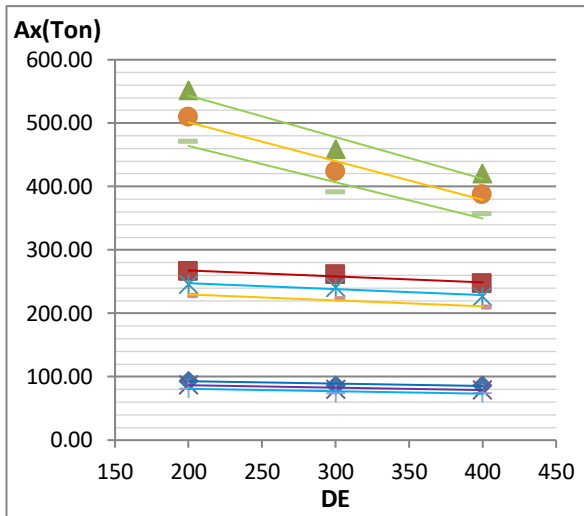
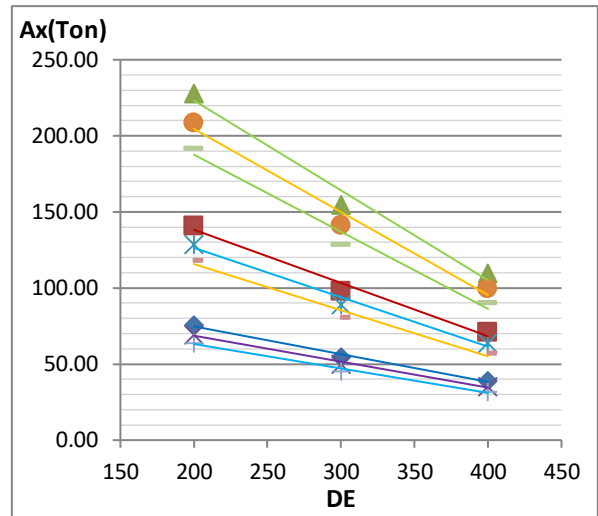


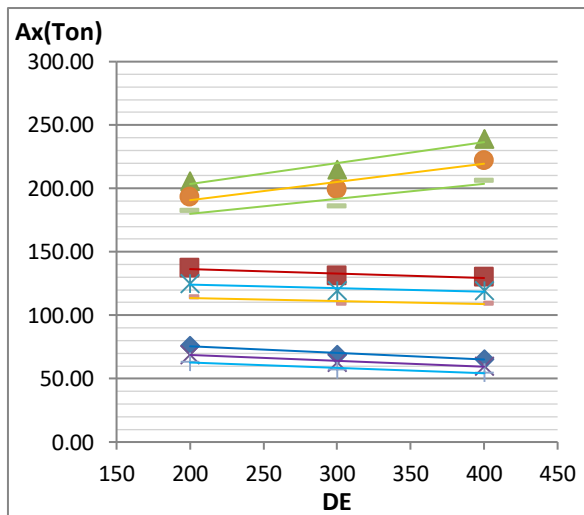
Figura D.228. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 3 - configuración de 10 columnas.



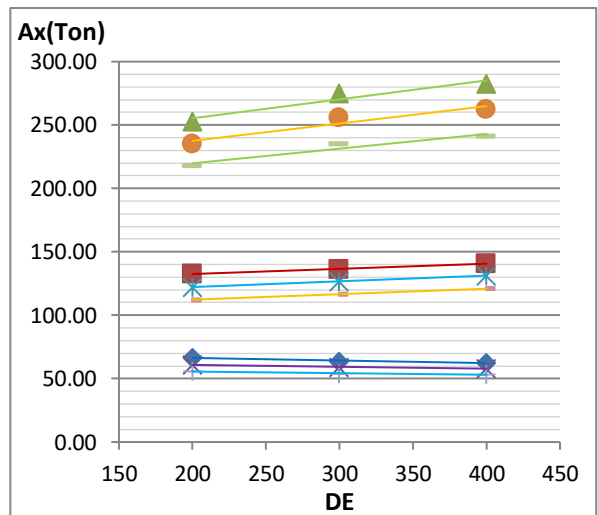
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

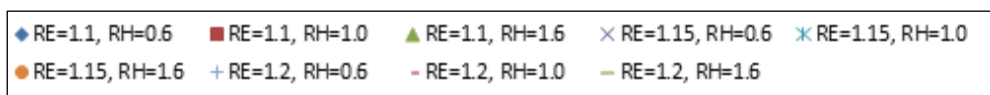
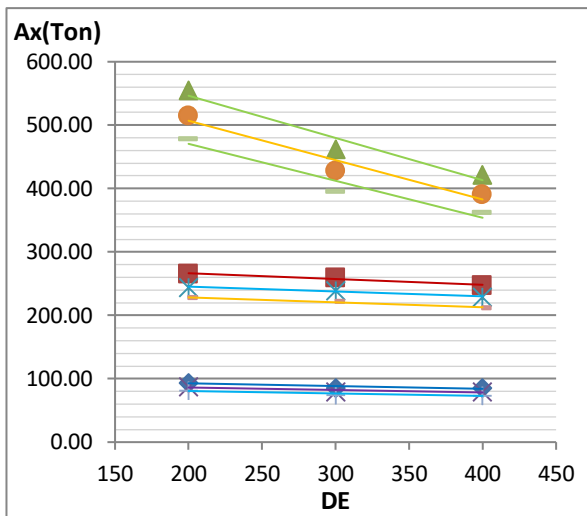
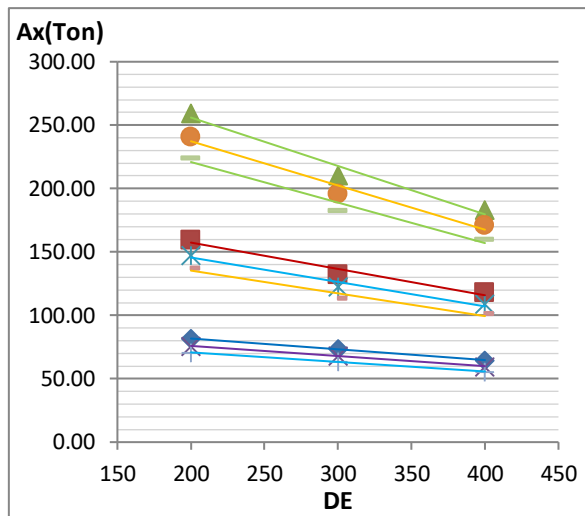


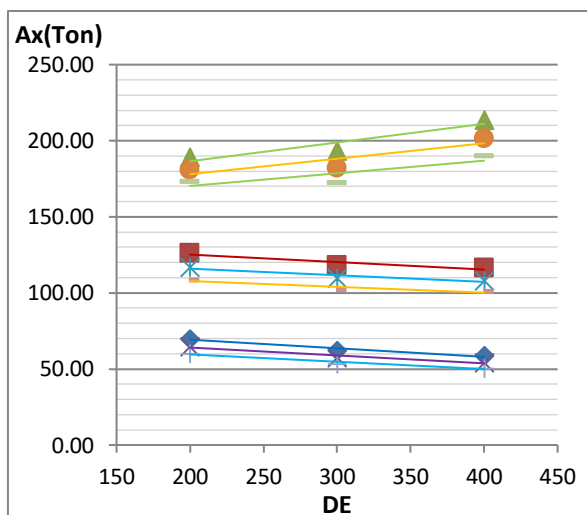
Figura D.229. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



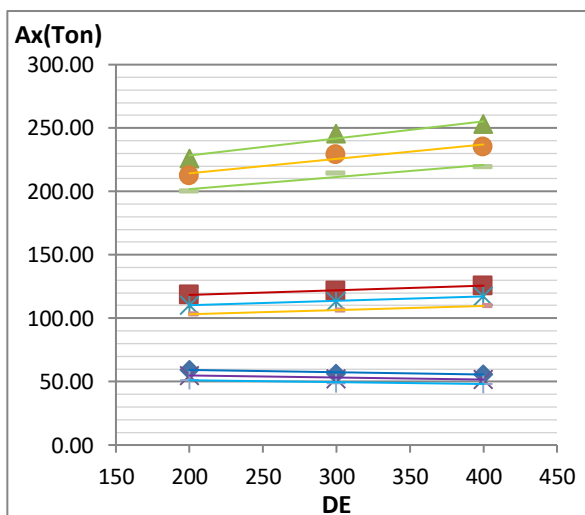
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

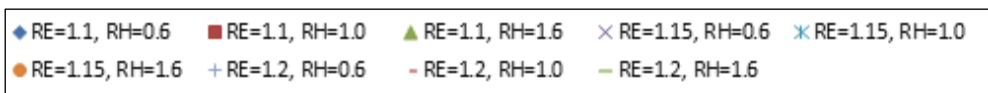
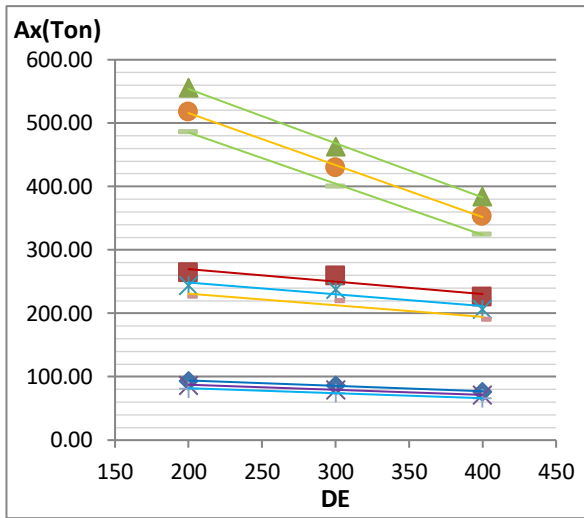
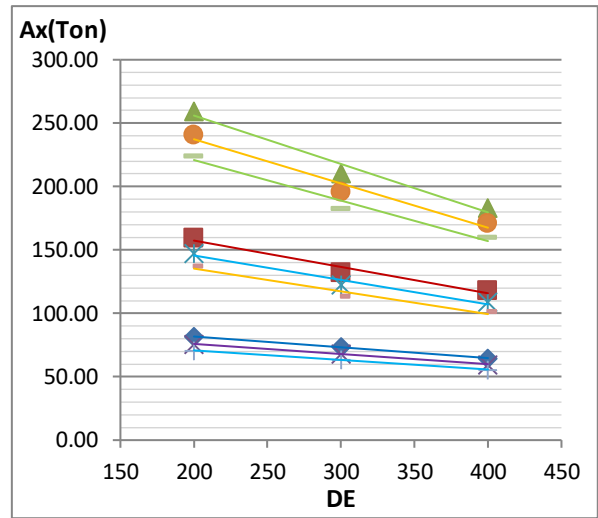


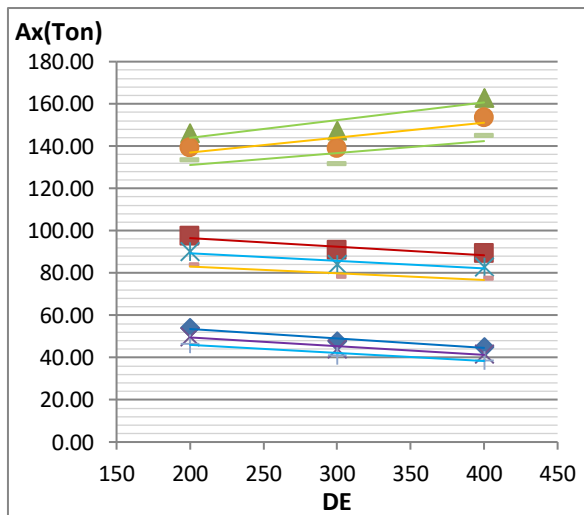
Figura D.230. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



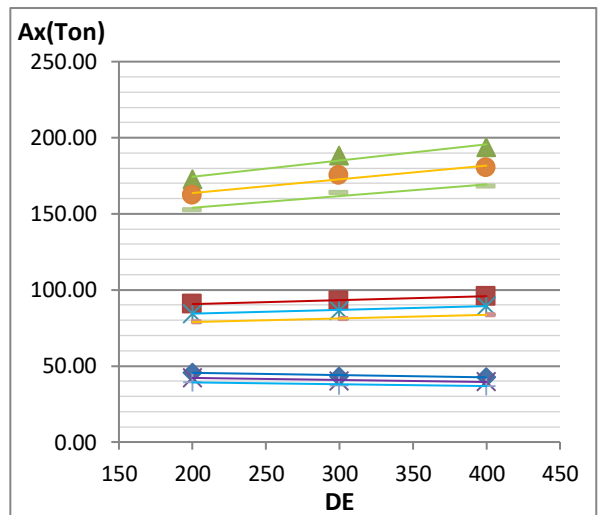
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

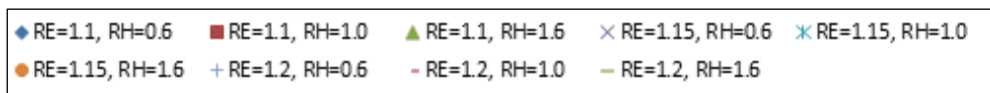
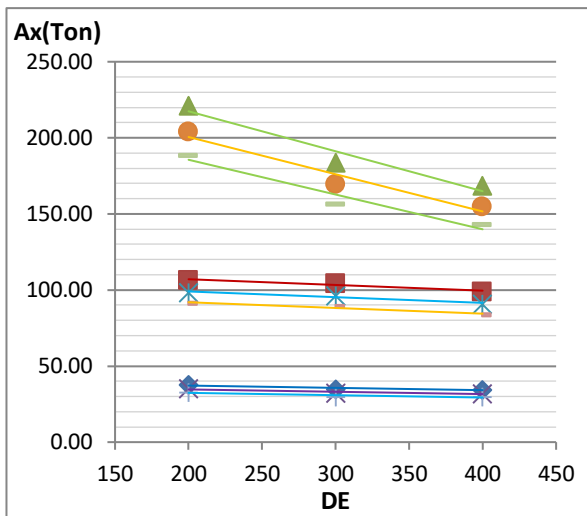
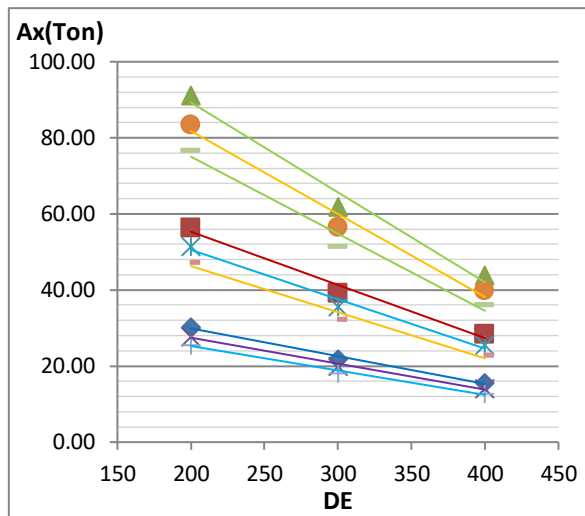


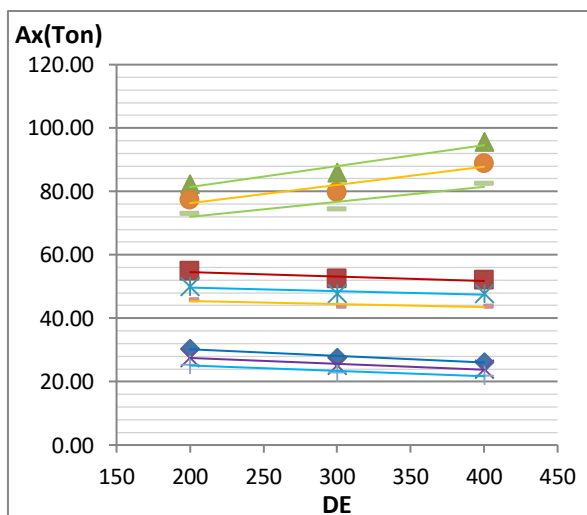
Figura D.231. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 2 - configuración de 10 columnas.



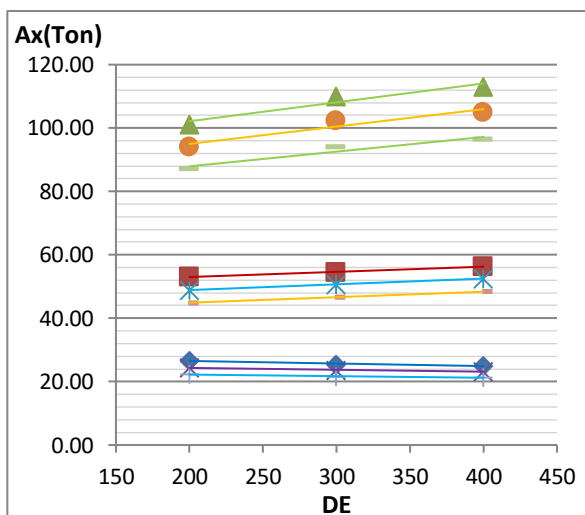
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.40$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.40$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.40$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.40$

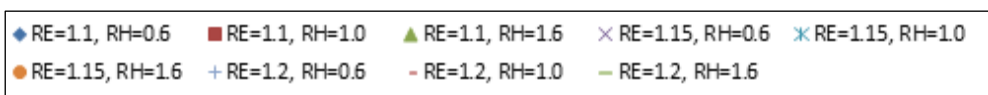
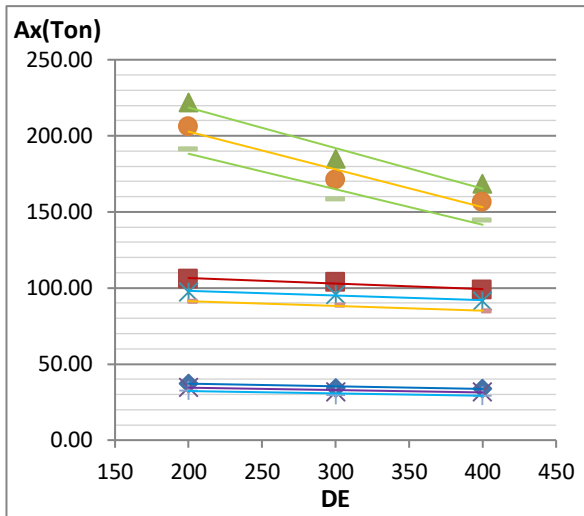
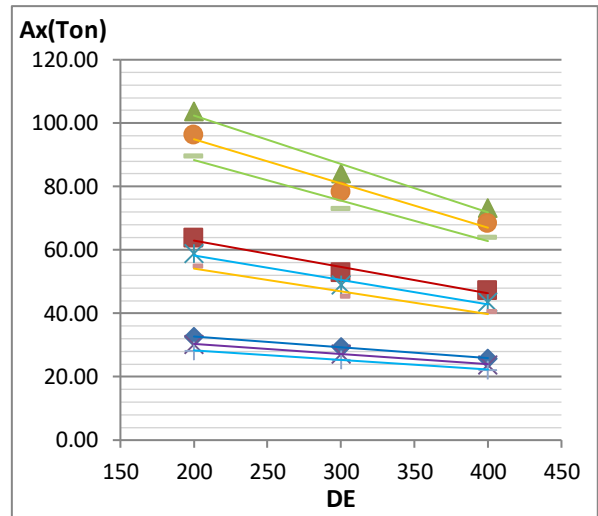


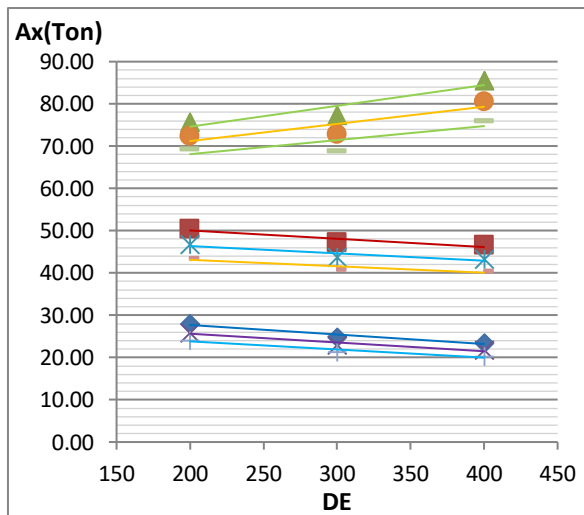
Figura D.232. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.40 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



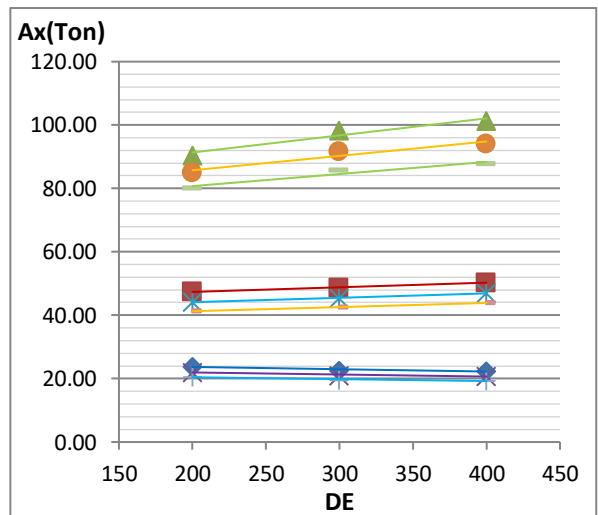
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.45$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.45$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.45$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.45$

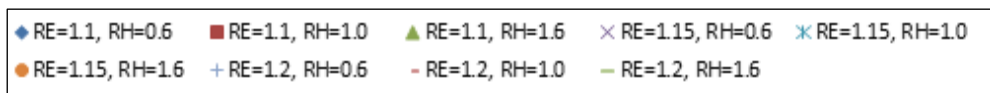
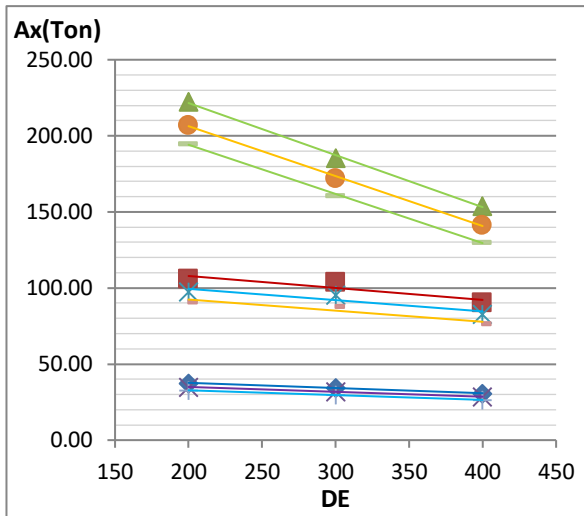
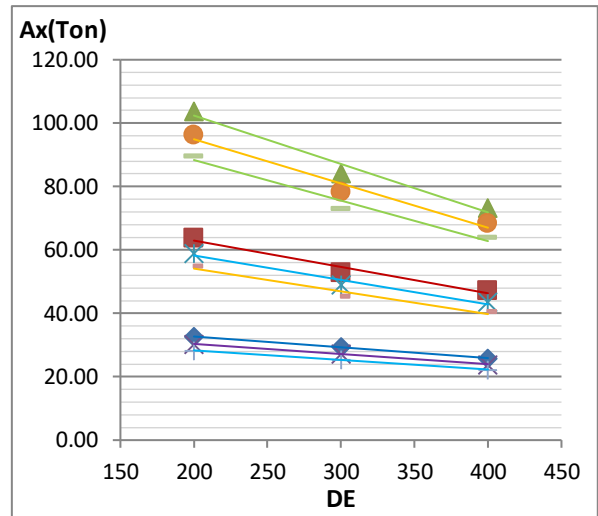


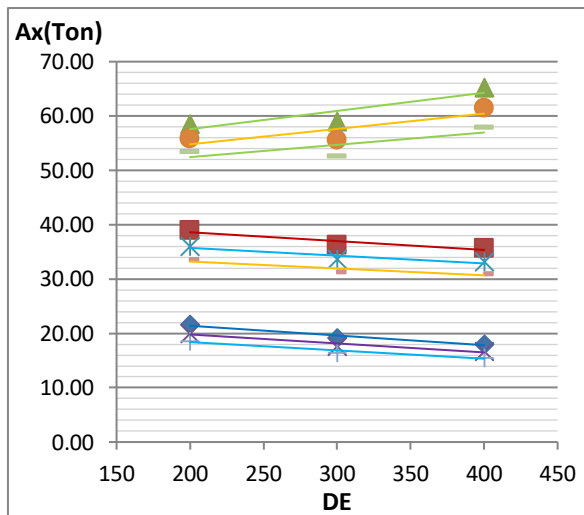
Figura D.233. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.45 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.



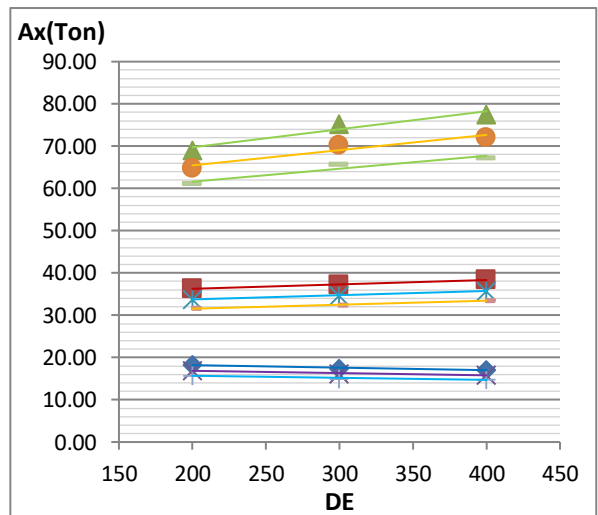
a) $T_y=0.1, \Omega_\theta=1.55$



b) $T_y=0.2, \Omega_\theta=1.55$



c) $T_y=0.4, \Omega_\theta=1.55$



d) $T_y=0.6, \Omega_\theta=1.55$

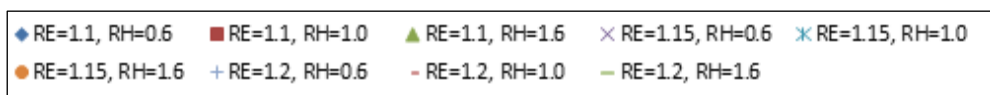


Figura D.234. Relación del esfuerzo axial máximo en arriostres frente a los parámetros para un valor de Ω_θ igual a 1.55 correspondiente a una Zona Sísmica 1 - configuración de 10 columnas.