

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE MODELOS DE RIGIDEZ LATERAL EQUIVALENTE PARA
ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:
Olbrich Betancourt, Florian Marcel
Páez Hernández, Valentina Beatriz

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, noviembre 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE MODELOS DE RIGIDEZ LATERAL EQUIVALENTE PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA.

Tutor Académico: Prof. Francisco Garcés

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por lo Bachilleres:
Olbrich Betancourt, Florian Marcel
Páez Hernández, Valentina Beatriz
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, noviembre 2010

ACTA

El día 8 de noviembre de 2010 se reunió el jurado formado por los profesores:

Agustina Mazzero
Osvaldo López
Francisco Galvis

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado "ESTUDIO DE MODELOS DE RIGIDEZ LATERAL EQUIVALENTE PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA" Presentado ante la Iustre Universidad Central de Venezuela para optar por el Título de INGENIERO CIVIL.

Una vez oída la defensa oral que los bachilleres hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Florian Marcel Cibrich Betancourt	20	Veinte
Br. Valentina Beatriz Páez Hernández	20	Veinte

Recomendaciones

FIRMAS DEL JURADO

Agustina Mazzero
Osvaldo López
Francisco Galvis

Caracas 8 de noviembre de 2010

DEDICATORIA

A mi madre, una mujer ejemplar y mi guía a lo largo de todos los caminos recorridos en mi vida.

A mi padre, un hombre ejemplar motivo de inspiración para mi formación como profesional.

Florian Olbrich

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de formarme como profesional y ser una institución de excelencia académica llena de valores morales.

A mi madre Elizabeth, por apoyarme en toda mi vida con su amor, enseñanzas y mantener dentro de mí la fe de que las metas se pueden alcanzar producto de trabajo, responsabilidad, humildad y pasión. Eres una madre ejemplar.

A mi padre Manfred, por ser un ejemplo constante en mi vida de trabajo y honestidad. Tus acciones me inspiran a crecer cada día más. Eres un padre ejemplar.

A mis hermanos, Manfred y Christian. Siempre serán mis mejores amigos y motivo de inspiración por sus acciones. Han sido un apoyo incondicional en mi vida. Christian, por siempre hacerme saber que la familia es lo más importante y Manfred, por tus pensamientos profundos y constante búsqueda por alcanzar las metas que realmente llenan nuestra vida.

A mi familia. Mi abuela Aura, tus palabras llenas de sabiduría siempre me hacen reflexionar y continuar por un camino correcto. Mis tías Elianska y Anais. Mis tíos, Elio, Paco y Raul. Mis primos, Francisco, Juan Pablo, Abril, Aitana, Rodrigo, Maximiliano y Gleydy. Son un ejemplo de familia. Por su apoyo y por siempre creer en mí.

A mi tutor, el profesor Francisco Garcés, por guiarme en la realización de este trabajo. Por sus enseñanzas. Sus acciones son un ejemplo para mejorar nuestra Venezuela.

A la familia Osorio. Sr. Rómulo, Sra. Rachidi, Daniela y en especial a Hilda. Son una familia ejemplar. Hilda, por tu apoyo incondicional desde el inicio de mi carrera, por todo el amor que me has dado y por creer en mí.

A mi compañera y amiga Valentina. Por tu apoyo a lo largo de toda nuestra carrera y por nuestra amistad.

A mi querida amiga Verónica Torres. Nunca nos rendimos y logramos que esto fuera una realidad.

A mi querido amigo Gustavo Contreras, por todo su apoyo.

A mis compañeros y amigos. Alejandro, Romme y José Gregorio, grandes amigos. David, Adriana, María, Sergio, Ronnie, Félix.

A la profesora Korody, Profesora Alba y a Heidi. Por su apoyo a lo largo de mi carrera.

A las secretarias del IMME que nos atendieron amablemente y colaboraron para que esto sea realidad.

Transformemos este país, este mundo, siempre por un camino de tolerancia, paz e igualdad.

Florian Olbrich

DEDICATORIA

Le dedico mi trabajo a Dios, mi mama, Carlos, Adrian, Daniel, Gustavo y a mi
Abuelita Ángela (+).

Hoy lunes 8 de Noviembre del 2010 siendo las 8:00 am comienzo dando las gracias a Dios y a la Virgen María por darme la fuerza necesaria para poder llegar al fin de mi carrera, a mi Madre y Hermanos, por tener la paciencia de darme el apoyo en todos los sentidos, sin ellos no podría haber llegado al final.

A mí querida casa de estudio la Universidad Central de Venezuela la cual permitió complementar mi formación académica.

Mis queridos profesores Korody, Velázquez, Limonghi, Marinilli, Hernández, como les pagare tanta ayuda, en especial al profesor Francisco Garcés, Tutor de mi tesis, Ministro con tanta responsabilidad nunca me desamparo, a los profesores que a lo largo de mi carrera me tendieron la mano, N. Fernández, Guzmán, Braganti, Velázquez, Romero, Marcial, Mazzeo, Spacic y Rincones; a mis compañeros de estudios que siempre estuvieron ahí: Florian, Romme; José Gregorio, Félix y Ronnie, a Thays y las secretarias del IMME que nos atendieron amablemente y colaboraron para que esto sea realidad.

Que Dios y la Virgen los bendigan siempre y les retribuya todo en Salud, Paz, Amor y Prosperidad por siempre.

Mill besos* muackss

Valentina B. Páez Hernández

**Olbrich B., Florian M.
Páez H., Valentina B.**

**ESTUDIO DE MODELOS DE RIGIDEZ LATERAL EQUIVALENTE PARA
ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA**

Tutor: Prof. Francisco Garcés

**Trabajo Especial de Grado. Ciudad Universitaria de Caracas, Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. 2010. 126 págs.**

Palabras claves: Mampostería confinada, Simulación numérica, Análisis estático lineal, Rigidez lateral, Modelos equivalentes, Biela diagonal simple, Columna ancha, Venezuela.

Dando continuidad a la línea de investigación formulada desde hace más de veinte (20) años en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), se elaboró un estudio de los modelos de rigidez lateral equivalente para estructuras de mampostería confinada existentes en la literatura técnica, con la finalidad de recomendar uno o más modelos equivalentes que permitan el cálculo de la rigidez lateral de estructuras de mampostería confinada de forma simplificada.

Para el logro de los objetivos de este trabajo, se elaboró una metodología estructurada en seis etapas, la primera una revisión bibliográfica en la cual se destacaron las propiedades de los materiales de uso frecuente en Venezuela para estructuras de mampostería confinada y se definieron dos modelos equivalentes conocidos como Biela Diagonal Simple y Columna Ancha. La segunda etapa consistió en la simulación de modelos numéricos con características de ensayos reales llevados a cabo en el IMME, con la finalidad de calibrar el proceso de simulación y obtener la rigidez lateral. En tercer lugar se hizo un estudio detallado de modelos numéricos patrón donde se fijaron características mecánicas y geométricas específicas con variaciones de relaciones de aspecto, número de vanos y niveles para calcular sus valores de rigidez lateral y observar el comportamiento en porcentajes de área del muro de mampostería sometidos a esfuerzos de tracción y compresión. La cuarta etapa consistió en un estudio detallado de los modelos equivalentes con las mismas características mecánicas y geométricas que los modelos patrón con la finalidad de calcular su rigidez lateral equivalente. La quinta etapa un estudio comparativo entre los modelos patrón y equivalentes a través de definiciones de porcentajes de error. La sexta etapa en una propuesta para ajustar el modelo de Biela Diagonal Simple. De todo lo anterior, se logró caracterizar mecánicamente y geoméricamente las estructuras de mampostería confinada de uso común en Venezuela, se caracterizaron los modelos equivalentes de Biela Diagonal Simple y Columna Ancha destacando las variables requeridas por los mismos para su aplicación y se definió una tabla indicativa de aplicación de los modelos equivalentes en función de la relación de aspecto, número de vanos y pisos de estructuras de mampostería confinada con propiedades mecánicas específicas según los materiales empleados, para la obtención de porcentajes de errores inferiores al 10% en la mayoría de los casos, al momento de estimar la rigidez lateral equivalente.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
PROBLEMA.....	3
I.1. Planteamiento del problema.....	3
I.2. Objetivos	6
I.2.1. Objetivo general.....	6
I.2.2. Objetivos específicos	6
I.3. Alcance y limitaciones.....	7
I.3. Aportes.....	8
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO	10
II.1. Mampostería	10
II.2. Clasificación por su función estructural.....	10
II.2.1. No portantes	10
II.2.2. Portantes	10
II.3. Clasificación por la distribución del refuerzo	11
II.3.1. No reforzados	11
II.3.2. Reforzados	11
II.3.2.1. Muros armados.....	11
II.3.2.2. Muros confinados	11
II.4. Elementos de mampostería confinada.....	11
II.4.1. Bloques y ladrillos	11
II.4.2. Mortero	12

II.4.2.1. Relación cemento/arena/agua	12
II.4.3. Vigas y machones.....	13
II.5. Propiedades mecánicas de los diferentes elementos conformantes de las estructuras de mampostería confinada típicas en Venezuela.....	15
II.5.1 Piezas	15
II.5.2 Mortero	15
II.5.3 Resistencia de la mampostería a la compresión.....	16
II.5.3.1 Valores típicos en Venezuela de resistencia de la mampostería a la compresión	17
II.5.4. Resistencia de la mampostería a la compresión diagonal	17
II.5.5. Módulo de elasticidad y módulo de corte para la mampostería	18
II.5.6. Resistencia de diseño de los elementos confinantes.....	19
II.6. Efecto del confinamiento	20
II.7. Tipos de análisis para estructuras ante cargas.....	20
II.7.1. Análisis estático.	20
II.7.1.1. Análisis estático lineal.....	20
II.7.2. Análisis dinámico	21
II.7.2.1. Análisis dinámico lineal.....	21
II.8. Definición de rigidez en el rango elástico.....	22
II.9. Modelos teóricos para simular la rigidez lateral de estructuras de mampostería confinada	22
II.9.1. Modelo de biela diagonal	22
II.9.1.1. Propiedades del modelo de biela diagonal	23
II.9.1.2. Variantes del modelo de biela diagonal	24
II.9.1.3. Determinación del ancho efectivo de la biela.....	25

II.9.1.3.1. Fórmula de Holmes	25
II.9.1.3.2. Fórmula de Stafford Smith	25
II.9.1.3.3. Fórmula de Paulay y Priestley.....	26
II.9.1.3.4. Fórmula de Bazán y Meli.....	26
II.9.1.4. Determinación de la rigidez lateral a través del modelo equivalente de biela diagonal simple	27
II.9.2. Modelo de columna ancha.....	33
II.9.2.1. Propiedades del modelo de columna ancha.....	33
II.9.2.2. Determinación de la rigidez lateral a través del modelo equivalente de columna ancha	34
II.9.2.2.1. Fórmula Bazán y Meli:.....	34
II.9.2.2.2. Fórmula Rigidez lateral equivalente (R.L.E.).....	36
CAPÍTULO III.....	37
MÉTODO.....	37
III.1. Modalidad de la investigación.	37
III.2. Tipo de investigación.	37
III.3. Etapas de la investigación.....	39
III.3.1. Etapa 1: revisión bibliográfica	40
III.3.1.1. Antecedentes.....	40
III.3.2. Etapa 2: simulación y calibración de los modelos numéricos	41
III.3.2.1. Descripción de la simulación	41
III.3.2.2. Calibración de acuerdo a los esfuerzos en el muro de mampostería	46
III.3.2.3. Cálculo de la rigidez lateral en los modelos numéricos calibrados...	49
III.3.2.4. Comparación entre los valores de rigidez de los modelos numéricos calibrados y los valores de rigidez de los ensayos experimentales.....	50
III.3.3. Etapa 3: Estudio de los modelos numéricos patrón.....	50

III.3.3.1. Características geométricas de los modelos patrón	50
III.3.3.1.1. Modelos de un (1) vano.....	51
III.3.3.1.2. Modelos de dos (2) y tres (3) vanos	52
III.3.3.1.3. Modelos de dos (2) niveles	53
III.3.3.2. Características mecánicas de los materiales de los modelos patrón	55
III.3.3.3. Determinación de la rigidez lateral de los modelos patrón.....	56
III.3.3.4. Estudio del comportamiento de los porcentajes de área a compresión y tracción de los modelos patrón	56
III.3.3.4.1. Determinación de los porcentajes de área a compresión y área a tracción de los modelos patrón.	56
III.3.4. Etapa 4: Estudio de modelos equivalentes	58
III.3.4.1. Cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple.....	58
III.3.4.2. Cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo equivalente de columna ancha	62
III.3.5. Etapa 5: Comparación entre los modelos numéricos patrón y sus respectivos modelos equivalentes	64
III.3.6. Etapa 6: Propuesta de un ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple.	65
III.3.6.1. Determinación de ancho efectivo (w) para modelos de un (1) vano con diferentes relaciones de aspecto	65
III.3.6.2. Propuesta del ancho efectivo (w).....	66
CAPÍTULO IV.....	67
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	67
IV.1. Resultados de la revisión bibliográfica.....	67
IV.2 Resultados de la simulación y calibración de los modelos numéricos.....	68

IV.3. Resultados del estudio de los modelos numéricos patrón.....	69
V.3.1. Resultados del cálculo de la rigidez lateral de los modelos patrón.....	73
V.3.2. Resultados del estudio del comportamiento de los porcentajes de área a compresión y tracción de los modelos patrón.....	75
IV.4. Resultados del estudio del modelo equivalente de biela diagonal simple.....	80
IV.4.1. Resultados del cálculo de anchos efectivos (W)	80
IV.4.2. Resultados del cálculo de la rigidez lateral.....	86
IV.5. Resultados del estudio del modelo equivalente de columna ancha.....	92
IV.6. Resultados de la comparación entre los modelos patrón y los modelos equivalentes.....	96
IV.6.1. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Holmes.....	97
IV.6.2. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Stafford.	100
IV.6.3. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Paulay.....	103
IV.6.4. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Bazán y Meli	106
IV.6.5. Resultados de la comparación de las propuestas del modelo equivalente de biela diagonal simple con los modelos patrón	108
IV.6.6. Modelo equivalente de columna ancha según Bazán y Meli.	109
IV.6.7. Modelo equivalente de columna ancha según Formulación (R.L.E).....	111
IV.6.8. Resultados de la comparación de las propuestas del modelo equivalente de columna ancha con los modelos patrón.....	114

IV.7. Resultados de propuesta de un ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple.....	114
CAPÍTULO V.....	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
ANEXOS	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones volumétricas para tipos de mortero según la norma peruana E.070.....	13
Tabla 2. Valores típicos de esfuerzos medios en bloque huecos de arcilla cocida ...	15
Tabla 3. Factores de corrección del esfuerzo medio $f'm$ por esbeltez.....	16
Tabla 4. Valores promedios de $f'm$ para Venezuela.....	17
Tabla 5. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según Manual de Aplicación de normas para estructuras sismorresistentes de Venezuela.....	18
Tabla 6. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según la Norma Técnica E. 070 Albañilería de Perú.....	19
Tabla 7. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según la Norma Mexica NTCM.....	19
Tabla 8. Identificación y caracterización de los modelos patrón en función de su relación de aspecto ($H/B = \text{altura/ancho}$)	51
Tabla 9. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de un (1) vano	52
Tabla 10. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de dos (2) vanos.....	52
Tabla 11. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de tres (3) vanos	53
Tabla 12. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de un (1) vano y dos (2) niveles	54
Tabla 13. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de dos (2) vanos y dos (2) niveles.....	54
Tabla 14. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de tres (3) vanos y dos (2) niveles	55
Tabla 15. Propiedades mecánicas de los materiales usados en la simulación de los modelos patrón.....	55
Tabla 16. Configuración geométrica de los modelos numéricos empleados en el estudio de los porcentajes de área sometidos a esfuerzos de tracción y compresión	57
Tabla 17. Ecuación para el cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple en función del número de vanos	59
Tabla 18. Ecuación para el cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple en función del número de vanos y número de niveles.	60

Tabla 19. Resumen de las características de los ensayos sobre muros de mampostería confinada a escala real realizados en el Instituto de materiales y modelos estructurales (IMME).....	67
Tabla 20. Valores de rigidez lateral de los ensayos experimentales y de sus correspondientes modelos numéricos.....	68
Tabla 21. Porcentajes de error entre los valores rigidez lateral de los ensayos experimentales y de sus respectivos modelos numéricos.....	68
Tabla 22. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en los modelos patrón.....	69
Tabla 23. Resultados de rigidez obtenidos por el modelo patrón, para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	73
Tabla 24. Porcentaje de área sometida a tracción para los modelos patrón de un (1) nivel.....	75
Tabla 25. Porcentaje de área sometida a tracción para los modelos patrón de dos (2) niveles.....	76
Tabla 26. Porcentaje de área a tracción para el estudio de los modelos de un (1) vano un (1) nivel.....	77
Tabla 27. Porcentaje de área a compresión para el estudio de los modelos de un (1) vano un (1) nivel.....	79
Tabla 28. Ancho efectivo (w) según modelo de Holmes para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles.....	80
Tabla 29. Ancho efectivo (w) según modelo de Stafford para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles.....	82
Tabla 30. Ancho efectivo (w) según modelo de Paulay para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles.....	83
Tabla 31. Ancho efectivo (w) según modelo de Bazán y Meli para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles.....	84
Tabla 32. Resultados de rigidez lateral según anchos efectivos (w) de Holmes para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	86
Tabla 33. Resultados de rigidez según anchos efectivos (w) de Stafford para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	87
Tabla 34. Resultados de rigidez según anchos efectivos de Paulay para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	88
Tabla 35. Resultados de rigidez según anchos efectivos de Bazán y Meli para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	90
Tabla 36. Resultados de rigidez lateral obtenidos por el modelo de columna ancha según Bazán y Meli para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	92

Tabla 37. Resultados de rigidez obtenidos por el modelo de columna ancha por la Formulación R.L.E. para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.....	94
Tabla 38. Porcentajes de error para el modelo equivalente de biela diagonal simple	96
Tabla 39. Porcentajes de error para el modelo equivalente de columna ancha.....	96
Tabla 40. Tabla de aplicación de modelos equivalentes según los porcentajes de error obtenido, relación de aspecto, número de vanos y número de niveles.....	109
Tabla 41. Tabla de aplicación de modelos equivalentes según los porcentajes de error obtenido, relación de aspecto, número de vanos y número de niveles.....	114
Tabla 42. Valores empleados para el cálculo del área transversal y el ancho efectivo (w) de la biela diagonal simple	115
Tabla 43. Valores de área transversal y ancho efectivo (w) de la biela diagonal simple para modelos de un (1) vano y un (1) piso en función de la relación de aspecto H/B.	115
Tabla 44. Propuesta de valores de ancho efectivo (w) para modelos de un (1) vano y un (1) nivel.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del ensayo sobre pilas de mampostería.....	16
Figura 2. Esquema del ensayo de muretes de mampostería.	18
Figura 3. Efecto del confinamiento de muros de mampostería.	20
Figura 4. Gráfico de fuerza aplicada en función del desplazamiento.	22
Figura 5. Modelo de Biela diagonal simple.....	23
Figura 6. Variantes del modelo de biela diagonal simple y de múltiples bielas diagonales.....	24
Figura 7. Configuración estructural general del modelo de biela diagonal sin las restricciones respectivas.	27
Figura 8. Configuración del modelo de biela diagonal.....	28
Figura 9. Deformada elemental del modelo de biela diagonal. Detalle de la deformación de la biela diagonal.....	29
Figura 10. Coordenadas locales de un elemento lineal.....	31
Figura 11. Deformación por corte y flexión en muros.....	33
Figura 12. Identificación de variables geométricas del modelo de columna ancha ...	35
Figura 13. Esquema general de una estructura de mampostería confinada	42
Figura 14. Características de los elementos finitos empleados en la simulación	43
Figura 15. Configuración modificada de los elementos finitos utilizados en la simulación	43
Figura 16. Configuración de las restricciones de la estructura simulada.....	44
Figura 17. Comportamiento de una pared ante carga lateral	45
Figura 18. Condición de nodos dobles.....	45
Figura 19. Condición de separación y solape entre el marco confinante y el muro de mampostería	46
Figura 20. Esfuerzos principales del muro de mampostería.....	47
Figura 21. Variación del estado de esfuerzos en función del ángulo resultante.....	48
Figura 22. Elementos modificados luego de la identificación de estar sometidos a tracción.....	48
Figura 23. Condición de nodo simple	49
Figura 24. Modelo simulado con deformación resultante	49
Figura 25. Nomenclatura de clasificación de los modelos patrón.....	51
Figura 26. Configuración de los modelos equivalentes de columna ancha para modelos de más de un (1) vano, más de un (1) nivel ó ambos.	63
Figura 27. Consideración del valor de área transversal empleada en la ecuación de rigidez lateral equivalente descrita en el capítulo II, sección II.9.2.2.2.	64
Figura 28. Modelo patrón (MA2)-1-1	70
Figura 29. Modelo patrón (MA2)-2-1	70

Figura 30. Modelo patrón (MA2)-3-1	71
Figura 31. Modelo patrón (MA2)-1-2	71
Figura 32. Modelo patrón (MA2)-2-2	72
Figura 33. Modelo patrón (MA2)-3-2	72
Figura 34. Modelo patrón (MA1)-1-1	126
Figura 35. Modelo patrón (MA1)-2-1	126
Figura 36. Modelo patrón (MA1)-3-1	127
Figura 37. Modelo patrón (MA1)-1-2	127
Figura 38. Modelo patrón (MA1)-2-2	128
Figura 39. Modelo patrón (MA1)-3-2	128
Figura 40. Modelo patrón (MA3)-1-1	129
Figura 41. Modelo patrón (MA3)-2-1	129
Figura 42. Modelo patrón (MA3)-3-1	130
Figura 43. Modelo patrón (MA3)-1-2	130
Figura 44. Modelo patrón (MA3)-2-2	131
Figura 45. Modelo patrón (MA3)-3-2	131
Figura 46. Modelo patrón (MA4)-1-1	132
Figura 47. Modelo patrón (MA4)-2-1	132
Figura 48. Modelo patrón (MA4)-3-1	133
Figura 49. Modelo patrón (MA4)-1-2	133
Figura 50. Modelo patrón (MA4)-2-2	134
Figura 51. Modelo patrón (MA4)-3-2	134

INTRODUCCIÓN

Resulta evidente observar en nuestro país el uso extensivo de estructuras de mampostería confinada como solución habitacional de bajo costo. La construcción de estas estructuras en la mayoría de los casos es hecha sin intervención de profesionales y con escasez de criterios técnicos, ya que se elaboran de forma empírica y con conocimientos adquiridos de la práctica común. Sumado a esto, Venezuela se caracteriza por tener una alta actividad sísmica que puede afectar considerablemente a este tipo de estructuras.

Actualmente existen Instituciones cuyas investigaciones se han enfocado en este tema de las viviendas de Mampostería como lo son el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), las cuales pretenden generar diferentes conocimientos técnicos que permitan una construcción adecuada de las estructuras de mampostería confinada con la finalidad de garantizar su comportamiento sismorresistente.

En esta investigación se elaboró un estudio de modelos de rigidez lateral equivalente para estructuras de mampostería confinada con la finalidad de dar continuidad a la línea de investigación formulada desde hace más de veinte (20) años en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), destacando la rigidez lateral como variable fundamental en el comportamiento dinámico de las estructuras. El estudio se elaboró a través de herramientas computacionales mediante la elaboración de modelos numéricos con el uso del programa SAP2000 para el análisis estructural y la posterior comparación con los modelos equivalentes de rigidez lateral. La investigación se dividió en cuatro (4) capítulos que se describen a continuación:

En el capítulo I, Problema; se definieron las limitaciones, alcances, contexto y finalmente los aportes que implicó realizar la investigación.

En el capítulo II, Marco teórico; se elaboró una descripción detallada del contenido teórico implicado en la investigación para su comprensión. Se definieron conceptos relacionados con las estructuras de mampostería confinada, aspectos de diferentes normas tanto nacionales como internacionales relacionados con la mampostería confinada, conceptos referidos a los modelos equivalentes para el cálculo de la rigidez lateral y las condiciones del análisis estático lineal.

En el capítulo III, Metodología; se definieron todos los pasos seguidos en la investigación para el logro de los objetivos planteados. En este sentido, se presentaron seis (6) etapas: en primer lugar, a una revisión bibliográfica, en segundo lugar, una explicación detallada del proceso de simulación y calibración de los modelos numéricos elaborados, en tercer, lugar al estudio de los modelos numéricos elaborados a través de la simulación en el programa SAP2000, en cuarto, lugar el estudio de los modelos equivalentes definidos como modelo equivalente de biela diagonal simple y modelo equivalente de columna ancha, en quinto lugar, la comparación entre los modelos numéricos y los modelos equivalentes y la sexta etapa consistió en una propuesta para el empleo del modelo equivalente de biela diagonal simple.

En el capítulo IV, Resultados y Análisis; se expusieron todos los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos y la metodología empleada en esta investigación y los diferentes análisis derivados de los resultados.

En el capítulo V se expusieron las conclusiones derivadas de este trabajo, así como las recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

I.1. Planteamiento del problema

Debido a su ubicación geográfica entre la placa suramericana y la placa del Caribe, Venezuela está sometida a constantes movimientos sísmicos generados por la interacción de dichas placas. La zona norte de Venezuela se encuentra cercana a diferentes fallas activas tales como: San Sebastián, La Victoria, El Pilar, Boconó, Oca Ancón (La Investigación sismológica en Venezuela, 2002) siendo la zona con mayor amenaza sísmica del país de acuerdo con la zonificación de la norma Venezolana COVENIN 1756 (2001) y sumado a esto sabemos que el mayor porcentaje (aproximadamente 80%) de la población se encuentra en la zona norte costera según el Instituto Nacional de Estadística. Por la alta concentración de habitantes en esta zona del país, se ha observado un uso frecuente de estructuras de mampostería confinada como construcción popular debido a su bajo costo, facilidades constructivas y principalmente, porque representa una solución habitacional.

El uso extensivo de estructuras de mampostería construidas sin intervención de profesionales, podría generar una condición de riesgo para estas estructuras ya que se ha evidenciado que la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitud moderada ($M_s > 5$) puede generar daños a las mismas (sismo de Tiara 4 de Mayo 2009, Edo. Aragua). Aunado a esto, en Venezuela no existe una normativa para este sistema constructivo. Existen investigaciones en Venezuela sobre el comportamiento de estas estructuras ante solicitaciones horizontales generadas por movimientos sísmicos (Instituto de Materiales y Modelos Estructurales) así como en diferentes países (Chile, Perú, España, Francia) y como resultado de tales investigaciones se cuenta con propuestas de modelos de rigidez lateral equivalente para dichas

estructuras. Sin embargo, no han sido divulgados en las normas actuales de construcción en Venezuela.

Se propone en el marco de este Trabajo Especial de Grado estimar los valores de rigidez lateral equivalente mediante diferentes modelos propuestos en la literatura técnica, utilizando una estructura de mampostería confinada de hasta tres (3) vanos y de baja altura construida con materiales de uso frecuente en el país. Los valores obtenidos serán comparados con los calculados por medio de la simulación por computadora de la misma estructura sometida a cargas sísmicas horizontales. De esta forma, se representan a través de la simulación numérica las solicitaciones sísmicas en forma de cargas laterales, a las cuales pueden estar sometidas las estructuras de mampostería mediante un análisis estático lineal, destacando la rigidez lateral como variable del comportamiento dinámico de la estructura.

Con la comparación entre los valores de rigidez lateral calculados con los modelos equivalentes propuestos en la literatura técnica y los valores de rigidez lateral calculados mediante la simulación numérica, se elegirá y recomendará el ó los modelos equivalentes propuestos que presentaron los valores más cercanos a los calculados por la simulación numérica, destacando sus ventajas y características como alternativa de cálculo simplificado de la rigidez lateral como variable fundamental en el análisis dinámico de las estructuras.

El problema planteado busca responder las siguientes interrogantes:

¿Cuáles son los modelos existentes en la literatura técnica para el cálculo de la rigidez lateral equivalente de estructuras de mampostería confinada?

¿Cuáles son las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en Venezuela para la construcción de estructuras de mampostería confinada?

¿Cuáles son los valores experimentales de rigidez lateral equivalente de muros de mampostería confinada elaborados en Venezuela?

¿Qué diferencia hay entre los valores de rigidez lateral de muros de mampostería confinada calculados mediante la simulación numérica y los valores calculados mediante los modelos de rigidez lateral equivalente propuestos en la literatura técnica?

¿Cuál o cuáles modelos equivalentes resultan más convenientes para el cálculo simplificado de las propiedades dinámicas de las estructuras de mampostería confinada?

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo general

Comparar valores de rigidez lateral equivalente de estructuras de mampostería confinada obtenidos mediante simulación por computadora con los calculados a través de modelos equivalentes reportados en la literatura técnica.

I.2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar geométrica y mecánicamente los muros de mampostería confinada de uso frecuente en la construcción de viviendas populares en Venezuela.
2. Identificar las características, limitaciones y aplicabilidad de modelos de rigidez lateral equivalente propuestos en la literatura técnica.
3. Calcular los valores de rigidez lateral para una estructura de mampostería confinada en función del número de pisos, vanos y su relación de aspecto, a través de la simulación numérica.
4. Calcular los valores de rigidez lateral para una estructura de mampostería confinada, en función del número de pisos, vanos y su relación de aspecto, utilizando modelos teóricos de rigidez lateral equivalente propuestos en la literatura técnica.
5. Contrastar los valores de rigidez lateral calculados mediante simulación numérica con los calculados a través de modelos equivalentes reportados en la literatura técnica.
6. Recomendar el ó los modelos que arrojen los valores de rigidez lateral más cercanos a los valores obtenidos por la simulación numérica.

I.3. Alcance y limitaciones

1. Los modelos numéricos patrón se hacen para diferentes relaciones de aspecto, variando hasta tres (3) el número de vanos y hasta dos (2) el número de niveles.
2. El análisis estructural de los modelos numéricos patrón se hace mediante un análisis estático lineal en el plano de la estructura.
3. No se considera degradación de la rigidez, es decir se trabaja en el rango elástico de la estructura.
4. Se toman referencias de ensayos experimentales y de normativas internacionales de reciente edición.

I.3. Aportes

En la línea de investigación

Dar continuidad a la línea de investigación de mampostería estructural formulada desde hace más de 20 años por el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), organismo adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (FI/UCV).

Contribuir en la recomendación de uno o varios modelos equivalentes de estructuras de mampostería confinada para el cálculo simplificado de la rigidez lateral como variable fundamental en el análisis dinámico estructural.

En lo institucional

Instituciones cuyas investigaciones se han enfocado al tema de las viviendas de Mampostería, que además, tienen alta experiencia en el aporte teórico a la elaboración de normativas técnicas Nacionales son: El Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). El Trabajo de Grado propuesto propone aportes en conjunto con estas Instituciones al desarrollo de la Investigación y de Normativas en el área de la Mampostería.

En lo social

En Venezuela las estructuras de mampostería representan una solución habitacional para la mayoría de la población, principalmente por su bajo costo y facilidad constructiva. Se sabe que aproximadamente un 80% de la población se encuentra en la zona norte costera, la cual se caracteriza por presentar una alta amenaza sísmica y sumado a esto, las construcciones se realizan sin intervención de profesionales. Por lo antes mencionado, en este trabajo se propone aportar

información y complementar los conocimientos técnicos que ayuden a disponer de metodologías de análisis simplificados que garanticen la seguridad estructural de las viviendas de mampostería y como consecuencia generar mejores condiciones de vida de nuestros ciudadanos.

En lo personal

En nuestra formación profesional y personal consideramos que este trabajo de grado nos crea una visión crítica sobre la situación del país y los sistemas estructurales empleados para la construcción de viviendas, donde la mayoría de la población habita en estructuras de mampostería construidas de forma empírica, sin apoyo técnico. Consideramos una situación grave el hecho de que las universidades en nuestro país no fomenten y no contemplen en su programa, el estudio de la mampostería estructural, el cual es un sistema estructural predominante en Venezuela. Es importante para los futuros profesionales conocer y atender las problemáticas del país así como también, generar diferentes medios de divulgación de información técnica que permita a las personas realizar sus construcciones con criterios técnicos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Mampostería

La mampostería se define como “un conjunto de unidades trabadas o adheridas entre sí con algún material, como el mortero de barro o de cemento. Las unidades pueden ser naturales (piedras) o artificiales (adobes, tapias, ladrillos y bloques)” (Bartolomé, 1998).

La mampostería es un material estructural compuesto que está integrado por unidades asentadas con morteros, es heterogéneo y anisotrópico, y tiene una resistencia a la compresión elevada, dependiente principalmente de aquella de la propia unidad, mientras que la resistencia a tracción es reducida y está controlada por la adhesión entre la unidad y el mortero. (Gallegos, 1989)

II.2. Clasificación por su función estructural

II.2.1. No portantes

Los muros no portantes son aquellos que no se encuentran sometidos a solicitaciones verticales como por ejemplo: tabiques, cercos y parapetos. Fundamentalmente estos muros deben diseñarse ante cargas perpendiculares a su plano, originadas por viento, sismo u otras cargas de empuje (Bartolomé, 1998).

II.2.2. Portantes

Se consideran los muros portantes como elementos que ofrecen un comportamiento estructural en las edificaciones. Pueden estar sujetos a todo tipo de solicitaciones, tanto perpendicular como contenida en el plano del muro, así como también verticales, laterales y permanentes o alternantes (Bartolomé, 1998).

II.3. Clasificación por la distribución del refuerzo

II.3.1. No reforzados

Los muros no reforzados se definen como “muros que carecen de acero de refuerzo; o que teniéndolo, no cumplen con las especificaciones mínimas reglamentarias que debe tener todo muro reforzado” (Bartolomé, 1998).

II.3.2. Reforzados

Se definen como aquellos muros con una cantidad mínima necesaria de acero de refuerzo. Tienen diferentes clasificaciones de acuerdo con la disposición del refuerzo (Bartolomé, 1998).

II.3.2.1. Muros armados

Este tipo de muro se caracteriza por presentar el acero de refuerzo en el interior de las unidades de mampostería (bloques) en las dos direcciones del muro, es decir, refuerzo vertical y refuerzo horizontal (Bartolomé, 1998).

II.3.2.2. Muros confinados

Este tipo de muros es de uso frecuente en toda Latinoamérica (Bartolomé, 1998). Se caracteriza por estar constituido de un muro de mampostería enmarcado o rodeado en todo su perímetro por elementos esbeltos de concreto reforzado vaciados en sitio posterior a la construcción del muro. El muro de mampostería frecuentemente es fabricado con ladrillos de arcilla, con bloques huecos de arcilla o de concreto unidos con mortero de cemento (Castilla y Marinilli, 2007).

II.4. Elementos de mampostería confinada

II.4.1. Bloques y ladrillos

Representan las unidades básicas para la construcción del muro de mampostería. Es elaborado de materias primas como arcilla, concreto y la mezcla de sílice y cal. Los ladrillos se caracterizan por tener dimensiones que los hacen

manejables con una sola mano en el proceso de asentado y su peso no excede los 4 kilos, a diferencia del bloque cuyas dimensiones hacen que deba manipularse con dos manos; su peso se encuentra alrededor de los 15 kilos (Gallegos, 1992).

II.4.2. Mortero

El mortero cumple la función de asumir las inevitables irregularidades de las unidades y, sobre todo, la de unir las o adherirlas con relativa estabilidad en el proceso constructivo, proveyendo rigidez hilada para permitir el asentado de la siguiente hilada, y para formar, en última instancia, un conjunto durable, impermeable y con alguna resistencia a la tracción (Gallegos, 1992).

El mortero básicamente está compuesto por cemento portland tipo 1, cal hidratada normalizada, arena gruesa y agua. El cemento y la cal funcionan como aglomerantes, mientras que la arena es un agregado inerte.

La función del cemento es proporcionar resistencia a la mezcla, en tanto que la cal le proporciona trabajabilidad y retentividad (evita que el agua se evapore rápidamente). La función de la arena es proporcionar estabilidad volumétrica de la mezcla, permitiendo el asentado de varias hiladas en una jornada de trabajo: adicionalmente la arena atenúa la contracción del secado (Bartolomé, 1998).

II.4.2.1. Relación cemento/arena/agua

La norma peruana E.070 (2006) especifica las proporciones volumétricas de la mezcla, clasificándola con las siglas “P” para su empleo en muros portantes y “NP” para los muros no portantes, en ambos casos, se deja como alternativa emplear el mortero:

Tabla 1. Relaciones volumétricas para tipos de mortero según la norma peruana E.070

Tipo	Cemento	Cal*	Arena
P1-C	1	1	4
P2-C	1	1	5
NP-C	1	1	6
* Es recomendable no usar mas de ½ volumen de cal			
Tipo	Cemento	Arena	
P1	1	4	
P2	1	5	
NP	1	6	

Fuente: Norma Peruana NT E.070 Albañilería (2004).

En cuanto a la adherencia unidad-mortero, ésta se logra cuando los solubles del cemento (básicamente la etringita) son adsorbidos por la unidad, cristalizándose (como agujas) en sus poros. La adherencia se ve favorecida cuando el mortero penetra en las perforaciones y rugosidades de la unidad, formando una especie de llaves de corte entre las hiladas.

La consistencia (temple o fluidez) se define como la capacidad que tiene la mezcla de poder fluir; en tanto que la retentividad se define como la capacidad que tiene la mezcla para mantener su consistencia, o de continuar siendo trabajable después de un lapso de tiempo. (Bartolomé, 1998).

II.4.3. Vigas y machones

Los elementos de confinamiento verticales son usualmente denominados machones y los elementos de confinamiento horizontales son denominados vigas de corona, siendo las dimensiones de sus secciones transversales comparables con el espesor del muro de mampostería (Castilla y Marinilli, 2007).

Se presentan algunos requisitos normativos sobre la separación de los elementos de confinamiento verticales, o machones, en muros de mampostería confinada.

La norma argentina (INPRES-CIRSOC 103, 1991) indica que se deben colocar machones en los extremos libres de los muros, en las intersecciones con otros muros y que se deben colocar machones intermedios para cumplir con las dimensiones y áreas máximas estipuladas. Las dimensiones máximas de los muros de mampostería dependerán de la zona sísmica en consideración; así para las zonas de mayor amenaza (zonas 3 y 4) se establece un área máxima de 20m^2 y una dimensión máxima de hasta 5m. La distancia máxima entre ejes de machones no podrá exceder de dos veces la distancia entre ejes de apoyos horizontales (Castilla y Marinilli, 2007).

La norma chilena (NCh2123, 1997) señala que se deben colocar machones en todos los bordes libres de los muros, en todas las intersecciones de muros y en el interior de un muro de mampostería, para que el área máxima del mismo sea $12,5\text{m}^2$ o tenga una dimensión horizontal máxima de 6m entre ejes de machones sucesivos. La norma colombiana (NSR, 1998) señala que se deben colocar machones en todos los extremos de los muros estructurales, en las intersecciones con otros muros estructurales, en lugares intermedios a distancias no mayores de 35 veces el espesor efectivo del muro, 1,5 veces la distancia entre elementos horizontales de confinamiento o 4m (Castilla y Marinilli, 2007).

La norma mexicana (NTCM, 2004) indica que se deben colocar machones por lo menos en los extremos de los muros, en las intersecciones con otros muros y en puntos intermedios de un muro a una separación no mayor que 1,5 veces la altura del muro ni 4m. La norma peruana (Sencico, 2006) señala que la distancia máxima medida centro a centro entre los machones debe ser dos veces la distancia entre los elementos de confinamiento horizontales y no mayor de 5m (Castilla y Marinilli, 2007).

La norma venezolana (Ministerio de Obras Públicas, 1959) indicaba que para construcciones sismorresistentes se deben colocar machones en todas las intersecciones de muros y que la distancia entre centros de machones no debía ser superior a 20 veces el espesor del muro (Castilla y Marinilli, 2007).

II.5. Propiedades mecánicas de los diferentes elementos conformantes de las estructuras de mampostería confinada típicas en Venezuela

Las propiedades mecánicas descritas a continuación fueron tomadas del Manual de Aplicaciones de las Normas para Edificaciones Sismorresistentes publicado en el año 1984 (Grases, López, & Hernández, 1984).

II.5.1 Piezas

El esfuerzo de diseño $f'p$ a la compresión, referida al área bruta, de las piezas a usar en elementos de mampostería es igual al esfuerzo $f\bar{p}$ debidamente minorado según la relación:

$$f'p = \frac{f\bar{p}}{1+2,5 CVp} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

CVp = Representa el coeficiente de variación cuyo valor no será inferior a 0,25.

El esfuerzo medio y CVp se obtendrán de un número no menor de 10 ensayos sobre piezas seleccionadas aleatoriamente en la fábrica.

Tabla 2. Valores típicos de esfuerzos medios en bloque huecos de arcilla cocida

Tipo de Bloque	Esfuerzo medio perpendicular a las celdas (Kgf/cm ²)	Esfuerzo medio paralelo a las celdas (Kgf/cm ²)
Bloques huecos de arcilla cocida	30	70

Fuente: Manual de aplicación de las Normas para edificaciones sismorresistentes del año 1984.

II.5.2 Mortero

El esfuerzo de diseño del mortero $f'mor$ no será menor de 40 Kgf/cm² y se calculará según la relación:

$$f'mor = \frac{f\bar{mor}}{1+2,5 CVmor} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$CVmor$ = Representa el coeficiente de variación cuyo valor no será inferior a 0,25.

$f\bar{mor}$ = Esfuerzo medio obtenido de un número no menor de 10 ensayos

Cuando no se disponga de valores experimentales las relaciones volumétricas arena/cementante no deben exceder de 3; el contenido de agua debe ser el mínimo necesario para lograr una trabajabilidad adecuada.

II.5.3 Resistencia de la mampostería a la compresión

El esfuerzo de diseño f'_m de la mampostería a compresión se puede determinar experimentalmente, ó, a partir de la resistencia de las piezas y el mortero. La alternativa experimental requiere usualmente del ensayo, a los 28 días, de una serie de por lo menos nueve (9) pilas construidas con las piezas y mortero a ser empleadas en la obra, con esbelteces comprendidas entre 2 y 5. El esfuerzo medio, medido sobre el área bruta, se debe corregir por esbeltez multiplicando los valores por los factores dados a continuación:

Tabla 3. Factores de corrección del esfuerzo medio f'_m por esbeltez

Factores de corrección del esfuerzo medio f'_m por esbeltez				
Relación: altura/espesor	2	3	4	5
Factor de corrección	0,75	0,90	1,00	1,05

Fuente: Manual de aplicación de las Normas para edificaciones sismorresistentes del año 1984.

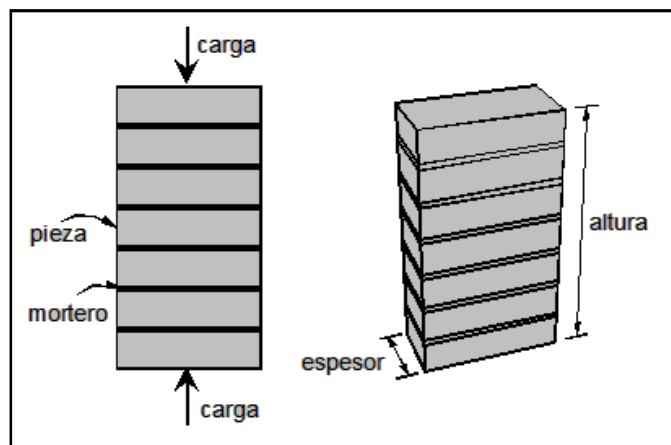


Figura 1. Esquema del ensayo sobre pilas de mampostería.

Fuente: Norma mexicana NTCM (2004).

El esfuerzo de diseño f'_m se obtiene a partir del esfuerzo medio (corregido por esbeltez) tomando en consideración la dispersión estadística:

$$f'm = \frac{f_m}{1+2,5 CVm} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Cvm = Representa el coeficiente de variación cuyo valor oscila entre 0,1 y 0,30 para bloques huecos de arcilla ensayados en Venezuela.

II.5.3.1 Valores típicos en Venezuela de resistencia de la mampostería a la compresión

A través de numerosos ensayos hechos en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) sobre bloques y muretes de mampostería, se logró caracterizar los valores de $f'm$ para el tipo de mampostería que pudiera utilizarse en Venezuela. En todos los casos el mortero de pega usado tuvo una relación volumétrica de 4:1:1 (Partes de arena, cal y cemento respectivamente).

Tabla 4. Valores promedios de $f'm$ para Venezuela

Valores Promedio de f_m para Venezuela	
Tipo de Mampostería	$f'm$ (Kgf/cm ²)
Bloques huecos de arcilla	15 a 20
Bloques de concreto estructurales	50 a 80
Bloques de concreto de menor calidad	20 a 30
Ladrillos macizos de arcilla de mejor calidad	150 a 160
Ladrillos macizos de arcilla de menor calidad	80 a 100

Fuente: Castilla (1997)

II.5.4. Resistencia de la mampostería a la compresión diagonal

La norma mexicana (NTCM, 2004) propone que la resistencia a la compresión diagonal $v'm$ se determinará a través del ensayo de muretes a los 28 días sobre al menos 9 muretes con las mismas características que se usaran en la obra. La expresión que permite el cálculo de $v'm$ se muestra a continuación:

$$v' m = \frac{\bar{v} m}{1+2,5 CV} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$\bar{v} m$ = Media de la resistencia a compresión diagonal de muretes, sobre área bruta medida a lo largo de la diagonal paralela a la carga

cv = Coeficiente de variación de la resistencia a compresión diagonal de muretes, que en ningún caso se tomara inferior a 0,20.

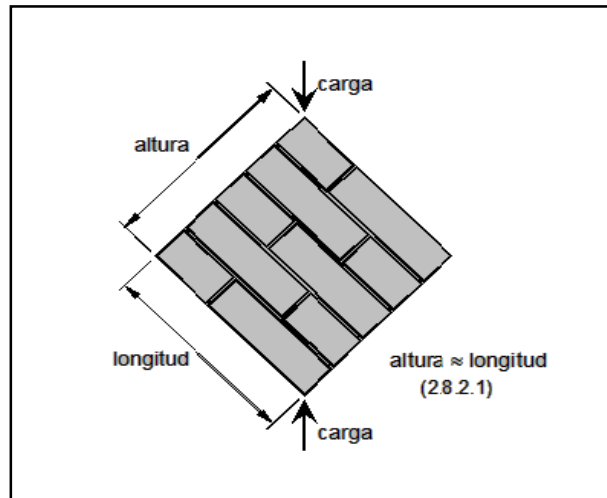


Figura 2. Esquema del ensayo de muretes de mampostería.
Fuente: Norma mexicana NTCM (2004).

II.5.5. Módulo de elasticidad y módulo de corte para la mampostería

A continuación se muestran las propuestas de diferentes normativas para la determinación del módulo de elasticidad de la mampostería (E_m) y el módulo de corte de la mampostería (G_m):

Según Manual de aplicación de las normas para estructuras sismorresistentes del año 1984:

Tabla 5. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según Manual de Aplicación de normas para estructuras sismorresistentes de Venezuela

	E_m	G_m
Cargas de corta duración	$E_m = 400f'm$	$G_m = 0,4E_m$
Cargas sostenidas	$E_m = 250f'm$	$G_m = 0,3E_m$

Fuente: Manual de Aplicación de normas para estructuras sismorresistentes del año 1984.

Según Norma Técnica E. 070 Albañilería de Perú:

Tabla 6. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según la Norma Técnica E. 070 Albañilería de Perú

Elementos	Expresión
Unidades de Arcilla	$E_m = 500f'm$
Unidades Sílico - Calcáreas	$E_m = 600'm$
Unidades de concreto vibrado	$E_m = 700f'm$
Para todo tipo de albañilería	$G_m = 0,4E_m$

Fuente: Norma Peruana NT E.070 Albañilería (2004).

Según Norma Mexica (NTCM, 2004):

Tabla 7. Valores de módulo de elasticidad (E_m) y módulo de corte para la mampostería (G_m) según la Norma Mexica NTCM

Mampostería de tabiques y bloques de concreto	
Cargas de corta duración	$E_m = 800f'm$
Cargas sostenidas	$E_m = 350'm$
Mampostería de tabiques de barro y otras piezas, excepto concreto	
Cargas de corta duración	$E_m = 600f'm$
Cargas sostenidas	$E_m = 350'm$
Módulo de cortante	
$G_m = 0,4E_m$	

Fuente: Norma mexicana NTCM (2004).

II.5.6. Resistencia de diseño de los elementos confinantes

Los machones y las vigas coronas de una estructura de mampostería confinada se encuentran elaborados por concretos con poco control de calidad y se le asocia una resistencia de diseño f'_c de concreto pobre, aproximadamente entre 80Kgf/cm² y 180Kgf/cm² (Porrero, 2004).

II.6. Efecto del confinamiento

El confinamiento de muros de mampostería mediante elementos de concreto armado cumple varias funciones, principalmente retrasar o demorar el agrietamiento diagonal (Ver: Figura 3) excesivo de los muros y de resistir los esfuerzos de tracción que se generan por la flexión producida por las cargas laterales en el plano de los muros (Castilla, E. 1991.)

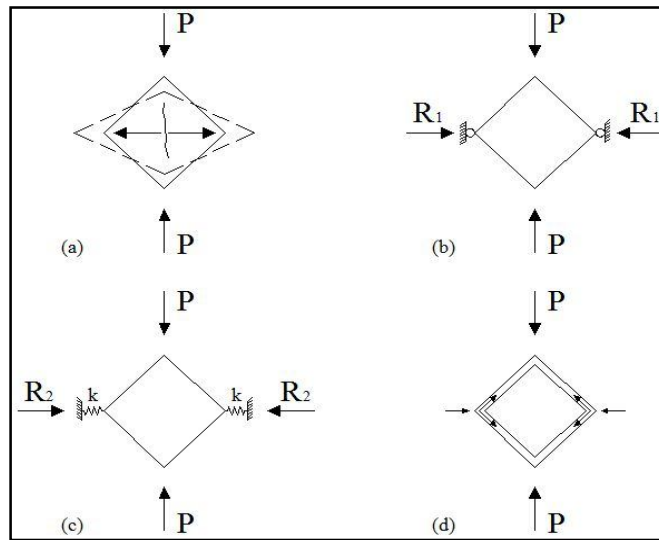


Figura 3. Efecto del confinamiento de muros de mampostería.
Fuente: Castilla (1994).

II.7. Tipos de análisis para estructuras ante cargas

II.7.1. Análisis estático.

Este tipo de análisis se caracteriza por el hecho de que las cargas actuantes sobre las estructuras no varían con el tiempo.

II.7.1.1. Análisis estático lineal

La estructura se modela como un sistema de un grado de libertad con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se modela mediante una distribución de fuerzas laterales equivalentes. A partir de la estimación de la primera frecuencia fundamental de la estructura usando relaciones

empíricas o el método de Rayleigh, se determina, mediante un espectro de respuesta apropiado, la aceleración espectral (S_a), la cual multiplicada por la masa (m) de la estructura, corresponde a la fuerza lateral equivalente o cortante basal (V). Esta fuerza se distribuye a lo largo de toda la altura y se determina, mediante un análisis estático lineal, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura. Este tipo de procedimientos se utilizan principalmente para propósitos de diseño y se encuentran incorporados en la mayoría de los códigos. Su uso se limita a estructuras regulares donde el primer modo de vibración es el predominante (Agudelo, 2008).

II.7.2. Análisis dinámico

Este tipo de análisis se caracteriza por el hecho de que las cargas actuantes sobre las estructuras varían con el tiempo y es necesaria la participación de las fuerzas de inercia en la estimación de las respuestas de la estructura.

II.7.2.1. Análisis dinámico lineal.

La estructura se modela como un sistema de múltiples grados de libertad con una matriz elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se modela utilizando un análisis espectral modal o un análisis temporal. El análisis espectral modal supone una respuesta elástica donde sólo se consideran los modos que contribuyen considerablemente a la respuesta de la estructura. Las respuestas modales se combinan usando métodos tales como “la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados”. El análisis temporal involucra una evaluación paso a paso de la respuesta de la estructura, usando registros de sismos reales o acelerogramas sintéticos. En ambos casos, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura se determinan mediante un análisis dinámico lineal (Agudelo, 2008).

II.8. Definición de rigidez en el rango elástico

Para estructuras con comportamiento lineal, la fuerza elástica se define como el producto de la rigidez lateral por el desplazamiento de la estructura (Chopra, 1980).

$$F = K * U \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

F = Fuerza elástica

K= Rigidez lateral

U= Desplazamiento

De la Ecuación 5, se despeja el termino K para obtener el valor de la rigidez lateral. En la gráfica mostrada a continuación (Figura 4), la pendiente de la recta fuerza elástica vs desplazamiento, representa el valor de la rigidez, la cual no se degrada por tratarse del rango elástico.

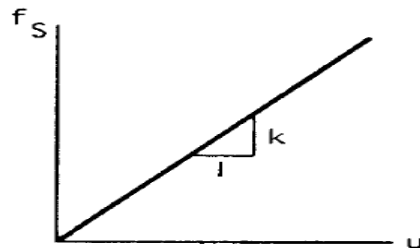


Figura 4. Gráfico de fuerza aplicada en función del desplazamiento.
Fs = fuerza elástica; U= desplazamiento; K = Rigidez. Fuente: Chopra (1980)

II.9. Modelos teóricos para simular la rigidez lateral de estructuras de mampostería confinada

II.9.1. Modelo de biela diagonal

Los primeros estudios analíticos basados en teoría elástica sobre el comportamiento de la mampostería estructural fueron desarrollados por *Polyakov* y *Severn*. Sus estudios fueron complementados con ensayos de muretes sometidos a tracción diagonal lo que derivó en la hipótesis de que el efecto del confinamiento de la mampostería sometida a sollicitaciones laterales podía ser equivalente a una biela

diagonal. A partir de esa hipótesis, *Holmes* propone que la biela equivalente debe presentar un ancho aproximadamente igual a la tercera parte de la longitud de la biela. *Stafford Smith* ajusta el valor del ancho equivalente de la biela realizando diversos ensayos. En la actualidad es mundialmente aceptado como modelo simple y racional del efecto del confinamiento en las estructuras de mampostería (Crisafulli, 1997).

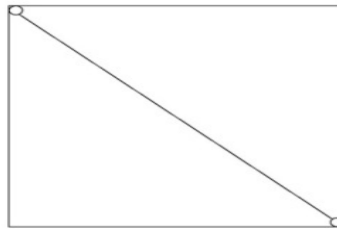


Figura 5. Modelo de Biela diagonal simple.
Fuente: Crisafulli (1997).

Puede aceptarse que el modelo de biela diagonal individual, a pesar de su simplicidad, ofrece una adecuada estimación de la rigidez para estructuras de mampostería confinada así como también de las fuerzas axiales inducidas al marco confinante por el efecto de las fuerzas laterales (Crisafulli, 1997).

II.9.1.1. Propiedades del modelo de biela diagonal

La mayor ventaja que presenta este método es su simplicidad, lo que implica el interés de los investigadores por comprender y desarrollar de forma aproximada su aplicabilidad. Las propiedades requeridas para definir el modelo dependen del tipo de análisis (elástico o inelástico) y del tipo de cargas aplicadas (monotónicas, cíclicas o dinámicas). En el caso del análisis elástico lineal sólo se necesita el valor del área de la biela, el valor de la longitud de la biela y el módulo de elasticidad para determinar la rigidez lateral equivalente (Crisafulli, 1997).

Normalmente se asume que el extremo de la diagonal coincide en el nodo con el punto de intersección entre el eje de la columna y el eje de la viga, lo que implica que la longitud de la biela será un poco mayor a la longitud de la diagonal del muro de mampostería. Sin embargo, esta diferencia puede ser despreciada en la mayoría

de los casos. El espesor y el módulo de elasticidad de la biela serán igual a los del material que conforma el muro de mampostería (Crisafulli, 1997).

El ancho efectivo es la variable que genera más controversia a nivel de las investigaciones, ya que diferentes investigadores han propuesto expresiones empíricas derivadas de ensayos experimentales o a través de la simulación por computadora con el método de los elementos finitos que permiten el cálculo del ancho efectivo de la biela (Crisafulli, 1997).

II.9.1.2. Variantes del modelo de biela diagonal

El modelo de una sola biela diagonal es capaz de representar de forma simple el efecto del confinamiento sobre la mampostería. Sin embargo, no logra describir los efectos locales de la influencia entre los elementos confinantes y el muro de mampostería. Como resultado, los momentos y las fuerzas cortantes en el marco confinante no son consistentes con la realidad y la ubicación de las potenciales rotulas plásticas no puede ser determinada. Por esta razón, el modelo de una biela diagonal individual ha sido modificado por diversos investigadores (Crisafulli, 1997).

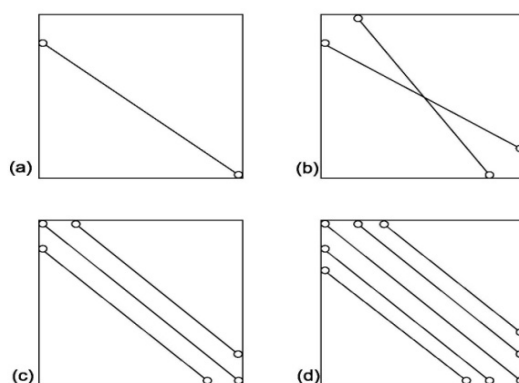


Figura 6. Variantes del modelo de biela diagonal simple y de múltiples bielas diagonales.
Fuente: Crisafulli (1997).

Žarnić y Tomažević proponen el modelo (a) expresado en la figura 3, basándose en su resultados experimentales. En este experimento, los daños ocurridos en la zona superior del muro de mampostería ocurren fuera de la diagonal, probablemente debido a la perturbación ocasionada por el dispositivo para aplicar las

solicitaciones verticales y laterales en la esquina superior izquierda de la estructura. Como consecuencia, este modelo no contempla la conexión de la diagonal con el nodo estructural viga-columna. Este modelo puede ser usado en los casos donde la falla por corte se desarrolle en el tope de la columna (Crisafulli, 1997).

Los modelos (b), (c), (d) fueron propuestos por *Schmidt, Chrysostomou y Syrmakesis y Vratsanou* respectivamente. La principal razón del desarrollo de estos modelos más complejos, es representar de forma más precisa el efecto del confinamiento de la mampostería (Crisafulli, 1997).

II.9.1.3. Determinación del ancho efectivo de la biela

II.9.1.3.1. Fórmula de Holmes

$$w = \frac{dm}{3} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

w = ancho efectivo de la biela

dm = longitud de la diagonal del muro de mampostería

II.9.1.3.2. Fórmula de Stafford Smith

$$w = 1.5 Z \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

w = ancho efectivo de la biela

z = longitud de contacto entre la columna y la mampostería

$$z = h \frac{\pi}{2 \lambda h} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

z = longitud de contacto entre la columna y la mampostería

λh = rigidez relativa al marco confinante del muro de mampostería

h = altura del muro de mampostería

$$\lambda h = h \sqrt[4]{\frac{E_m \cdot t \cdot \text{sen}(2\theta)}{4 \cdot E_c \cdot I_c \cdot h m}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

λh = rigidez relativa al marco confinante del muro de mampostería

t = ancho del muro de mampostería

h = altura de la estructura completa de mampostería confinada

θ = ángulo de inclinación respecto a la horizontal de la diagonal de la biela

E_m = módulo de elasticidad de la mampostería

E_c = módulo de elasticidad del concreto

I_c = momento de inercia de las columnas

h_m = altura del muro de mampostería

Asumiendo que h y h_m son aproximadamente iguales y que el ángulo 2θ es igual a la unidad (variando comúnmente entre 25° - 50°) la expresión se simplifica

$$\lambda h = \sqrt[4]{\frac{E_m \cdot t \cdot h_m^3}{4 \cdot E_c \cdot I_c}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

II.9.1.3.3. Fórmula de Paulay y Priestley

$$w = 0.25 \cdot dm \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

w = ancho efectivo de la biela

dm = longitud de la diagonal del muro de mampostería

Esta ecuación es recomendada para cargas laterales en el orden del 50 % de la capacidad última.

II.9.1.3.4. Fórmula de Bazán y Meli

$$w = (0.35 + 0.22 \cdot \beta) \cdot h \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

w = ancho efectivo de la biela

h = altura del muro de mampostería

β = rigidez relativa al marco confinante del muro de mampostería

$$\beta = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

A_c = área de la sección transversal de la columna

E_c = módulo de elasticidad del concreto

A_m = área de la sección transversal de la mampostería en el plano horizontal

G_m = Módulo de corte de la albañilería

$$Gm = 0.4 \cdot Em$$

(Ecuación 14)

Donde:

Em = módulo de elasticidad de la mampostería

II.9.1.4. Determinación de la rigidez lateral a través del modelo equivalente de biela diagonal simple

Como se mencionó anteriormente en la sección II.9.1.1, en el caso del análisis estático lineal, la rigidez lateral equivalente puede determinarse conociendo la geometría del modelo, el área de la biela y el Módulo de elasticidad.

En primer lugar se muestra la configuración general de un modelo de un vano con cierta geometría con sus respectivas coordenadas locales básicas por elemento sin tomar en cuenta las restricciones que esta debe tener.

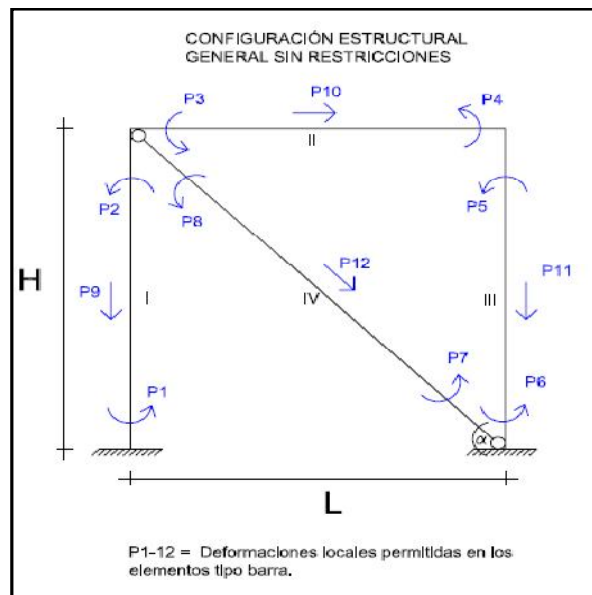


Figura 7. Configuración estructural general del modelo de biela diagonal sin las restricciones respectivas.

Luego de tomar en cuenta las restricciones que caracterizan el modelo de biela diagonal para una estructura de mampostería confinada se obtiene la siguiente configuración:

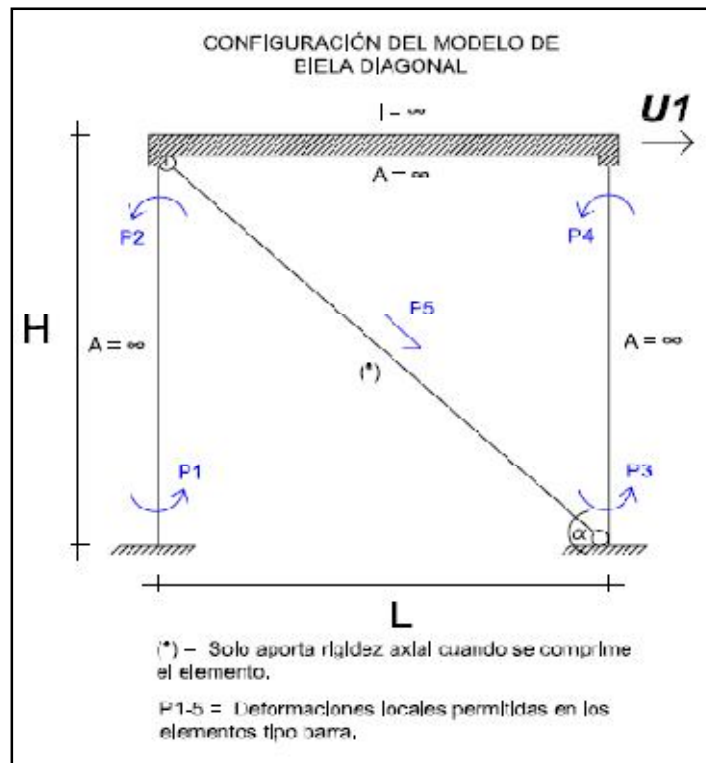


Figura 8. Configuración del modelo de biela diagonal.
 U_1 , representa el único grado de libertad dinámico que posee el modelo.

Se observa en la figura 8, como se redujeron las posibles deformaciones locales asociadas a cada elemento; esto debido al comportamiento real del modelo de mampostería confinada donde fundamentalmente se presenta un grado de libertad dinámico en su plano y la mayor rigidez es aportada por el muro de mampostería y no por los elementos confinantes (Castilla, 1991). La rigidez del muro de mampostería está asociado a la coordenada local P5, la cual sólo es aportada cuando dicho elemento se encuentra en compresión axial. La rigidez asociada a las coordenadas restantes (P1, P2, P3 y P4) sólo es aportada por el marco confinante.

Con la finalidad de obtener la ecuación para el cálculo de la rigidez lateral se debe estudiar cómo se deforma el modelo debido a su grado de libertad dinámico.

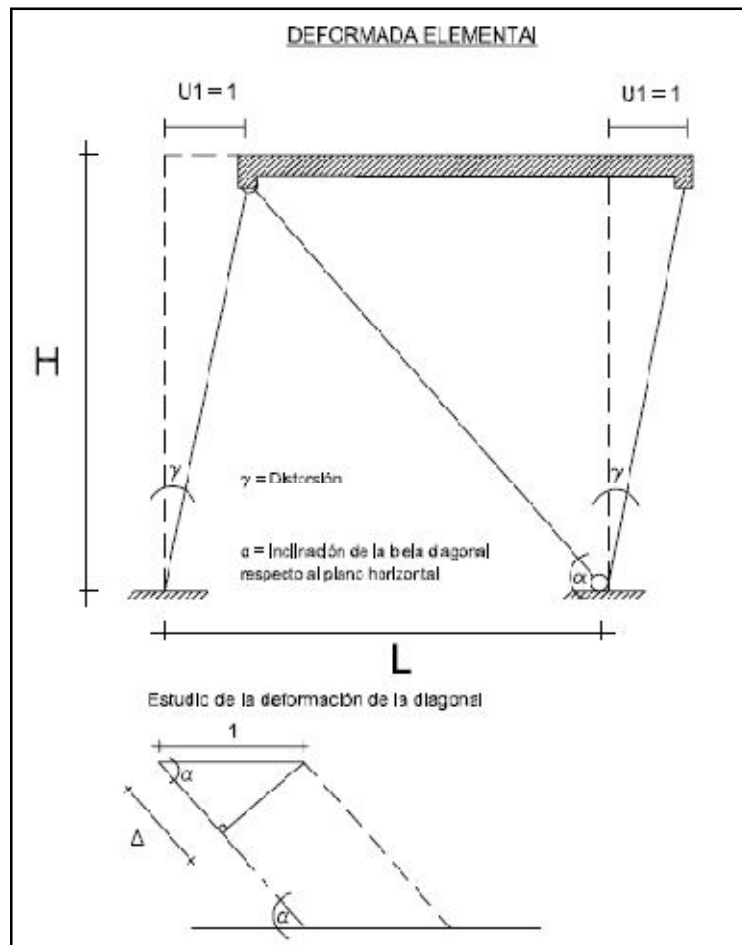


Figura 9. Deformada elemental del modelo de biela diagonal. Detalle de la deformación de la biela diagonal.

Partiendo de la deformada elemental, se determina la matriz de compatibilidad geométrica, conocida como matriz A. Para las deformaciones de los elementos confinantes se determina el valor de la distorsión:

$$\gamma = \frac{U1}{H} = \frac{1}{H} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:
H = Altura de los machones.

Observando la Figura 9, se debe destacar que no se presentan rotaciones independientes de los nodos, por lo tanto el valor de las deformaciones asociadas a los elementos confinantes se determina de la siguiente manera:

$$P = \theta(i) - \gamma(ij) \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Donde:

θ_i = Rotación independiente del nodo i

γ_{ij} = Distorsión del elemento ij. Positivo en sentido anti horario.

Sabiendo que $\theta = 0$, se reduce la expresión

$$P = -\gamma(ij) \quad \text{(Ecuación 17)}$$

La deformación asociada a la biela diagonal, se determina geoméricamente a través del detalle de la Figura 9, donde por simples funciones trigonométricas se obtiene el valor de la deformación.

$$\Delta = \frac{\cos(\alpha)}{1} = \cos(\alpha) \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Donde:

Δ = Deformación axial de la biela diagonal. Ver Figura 9.

Se construye la matriz A con las deformaciones ordenadas según muestra el índice numeral de cada coordenada.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{H} \\ \frac{1}{H} \\ \frac{1}{H} \\ \frac{1}{H} \\ \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad \text{(Matriz de compatibilidad geométrica)}$$

De igual forma se obtiene la matriz A transpuesta, intercambiando los elementos de filas a columnas

$$[A^t] = \left[\frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad \text{Cos}(\alpha) \right]$$

Partiendo de las coordenadas básicas locales de un elemento tipo barra, se obtiene una matriz de rigidez como se muestra a continuación:

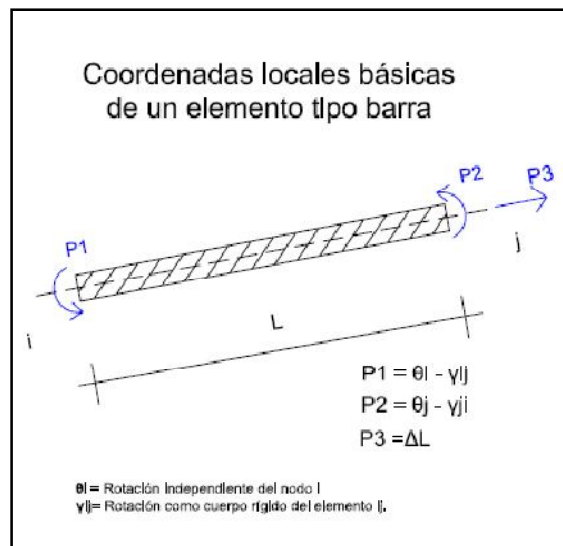


Figura 10. Coordenadas locales de un elemento lineal
Fuente: Elaboración propia

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} & 0 \\ \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{L} & 0 \\ 0 & 0 & AE \end{bmatrix} \quad (\text{Matriz de rigidez del elemento lineal en coordenadas locales})$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material del que está compuesto el elemento

I = Inercia de la sección transversal del elemento

A = Área transversal del elemento

Finalmente, partiendo de la matriz de rigidez para un elemento tipo barra, se elaboró la matriz general de rigidez de todos los elementos que conforman la modelo, ordenada según la numeración que identifica a los elementos observada en la Figura 7.

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{4EI}{H} & \frac{2EI}{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2EI}{H} & \frac{4EI}{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4EI}{H} & \frac{2EI}{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2EI}{H} & \frac{4EI}{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI}{H} & \frac{2EI}{H} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI}{H} & \frac{4EI}{H} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI}{H} & \frac{2EI}{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI}{H} & \frac{4EI}{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE_m}{d} \end{bmatrix} \quad (\text{Matriz de rigidez general del modelo})$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material del que están compuesto los machones (concreto armado)

Em = Módulo de elasticidad del muro de mampostería

I = Inercia de la sección transversal de los machones

A = Área transversal de la biela diagonal

d = Longitud de la biela diagonal

H = Altura de los machones

Partiendo de la siguiente expresión se calcula la rigidez lateral:

$$Kl = [A^t] * [k] * [A] \quad (\text{Ecuación 19})$$

Finalmente de la operación matemática se obtiene:

$$kl = \frac{24EI}{H^3} + \frac{AE_m \cos^2(\alpha)}{d} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

Kl = Rigidez lateral equivalente

E = Módulo de elasticidad del material del que están compuesto los machones (concreto armado)

Em = Módulo de elasticidad del muro de mampostería

I = Inercia de la sección transversal de los machones

A = Área transversal de la biela diagonal

d = Longitud de la biela diagonal

H = Altura de los machones

α = Ángulo de inclinación de la biela diagonal respecto al plano horizontal de la base de la estructura

De esta forma, la Ecuación 20, permite calcular la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal. Se debe conocer el módulo de elasticidad de los elementos que aportan rigidez a flexión (elementos confinantes), la geometría del modelo y el área transversal de la biela diagonal.

II.9.2. Modelo de columna ancha

II.9.2.1. Propiedades del modelo de columna ancha

El análisis de muros confinados por marcos y sujetos a cargas laterales ha estado sujeto a numerosas investigaciones. Se ha observado que inicialmente muro y marco trabajan como una columna global ancha en la que las columnas del marco proporcionan casi toda la rigidez a flexión mientras el muro resiste la mayoría de los esfuerzos cortantes (Bazan y Meli, 2001).

Partiendo de las deformaciones del muro confinado, se puede fijar que la deformación total medida como un desplazamiento en el tope de la estructura viene dada por la siguiente expresión (Ver figura 11).

$$D_t = D_f + D_c \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

D_t = Desplazamiento total

D_f = Desplazamiento por deformación a flexión

D_c = Desplazamiento por deformación a corte

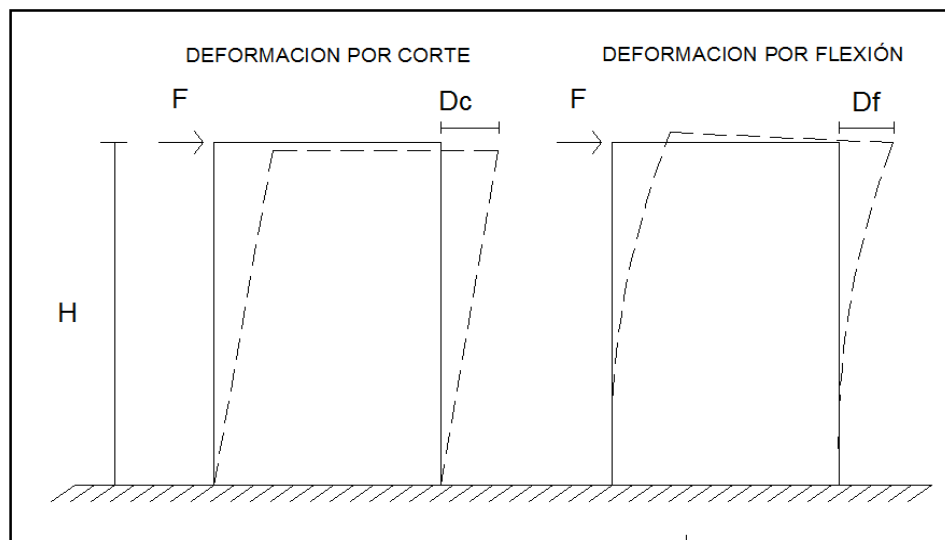


Figura 11. Deformación por corte y flexión en muros.

H = altura del muro, F = Fuerza lateral, D_c = Desplazamiento por corte, D_f = Desplazamiento por flexión.

Partiendo de expresiones conocidas, se puede determinar los desplazamientos producto de las deformaciones mostradas en la Figura 11.

$$Df = \frac{f \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

Df = Desplazamiento por deformación a flexión

f = Fuerza lateral

H = Altura del muro

E = Módulo de elasticidad

I = Inercia de la sección transversal del muro

$$Dc = \frac{f \cdot H}{A \cdot G} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

Dc = Desplazamiento por deformación a corte

f = Fuerza lateral

H = Altura del muro

A = Módulo de corte

I = Área transversal del muro

II.9.2.2. Determinación de la rigidez lateral a través del modelo equivalente de columna ancha

Con las expresiones antes mostradas se puede calcular la rigidez lateral tomando consideraciones específicas para el caso de muros de mampostería confinada. En este sentido se muestran a continuación dos (2) fórmulas propuestas en base al método de columna ancha para el cálculo de dicha variable. La aplicación de estas fórmulas sólo se encuentra descrito para modelos de un (1) vano.

II.9.2.2.1. Fórmula Bazán y Meli:

$$\delta = \frac{P \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{P \cdot H}{G \cdot \Omega} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

- δ = Desplazamiento
- P = Carga lateral aplicada.
- H = Altura del muro de mampostería.
- E_c = Módulo de elasticidad del concreto.
- I = Momento de inercia.
- G = Módulo de corte
- Ω = Área efectiva de cortante en su sección transversal.

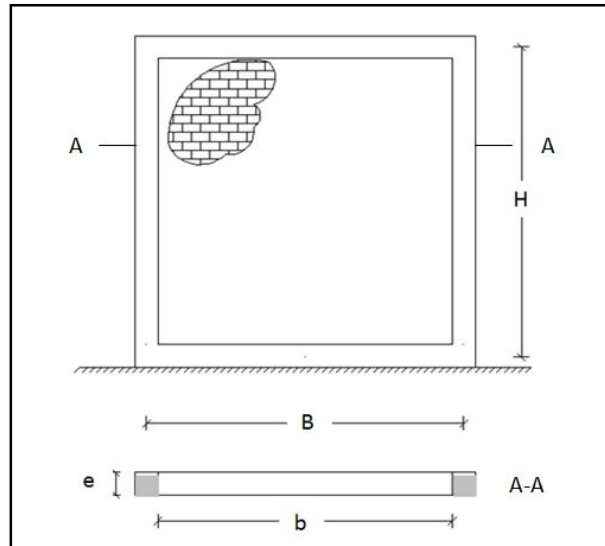


Figura 12. Identificación de variables geométricas del modelo de columna ancha
Fuente. Bazán y Meli (2001)

$$\Omega = (0,37 - 0,12\xi + 0,023\lambda) * (A_m + 2A_c) \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

- ξ = Relación de aspecto.
- λ = Parámetro basado en las rigideces relativas.
- A_m = Área de la mampostería
- A_c = Área de la columna

$$I = \frac{A_c * b^2}{2} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

- b = Luz libre.
- A_c = Área de la columna

$$\xi = B/H. \quad (\text{Ecuación 27})$$

Donde:

B = Ancho del muro

H= Altura del muro.

$$\lambda = \frac{E_c * A_c}{G_m * A_m} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad del concreto

A_c = Área de la columna

A_c = Módulo de corte de la mampostería

A_m = Área de la mampostería

$$A_m = e * b \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

e = Espesor del muro de mampostería

b = Ancho del muro de mampostería

Finalmente la rigidez se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Kl = F / \delta \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

Kl = Rigidez lateral

A_c = Fuerza aplicada en el tope de la estructura

δ = Desplazamiento horizontal del tope de la estructura

II.9.2.2.2. Fórmula Rigidez lateral equivalente (R.L.E.)

$$Kl = \left(\frac{H^3}{3 * E_c * I_c} + \frac{H}{G_m * A_m} \right)^{(-1)} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

Kl = Rigidez lateral

H = Altura del muro de mampostería.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto.

I_c = Momento de inercia de los machones respecto al centro de gravedad de la sección transversal de todo el muro confinado.

G_m = Módulo de corte de la mampostería

A_m = Área transversal del muro de mampostería en el plano horizontal.

CAPÍTULO III

MÉTODO

III.1. Modalidad de la investigación.

La modalidad del diseño del presente Trabajo Especial de Grado es documental, como se expresa a continuación:

Documental

El diseño de la presente investigación amerita una revisión documental y análisis de datos obtenidos de diferentes fuentes de información, tales como, manuales técnicos, informes de investigación, Gacetas Oficiales, Reglamentos, Normas, Textos, etc. En este sentido Sabino (2006), expresa: "... la investigación documental corresponde a la técnica de documentación para dar mayor confiabilidad a sus resultados" (p.59). Los objetivos planteados en la presente investigación se medirán de acuerdo al trabajo de simulación computarizada a realizar y la revisión de la información de otros autores nacionales e internacionales relacionados con el tema, lo que permitirán dar respuestas a las interrogantes formuladas y a cada uno de los planteamientos realizados.

III.2. Tipo de investigación.

El presente Trabajo Especial de Grado es de tipo descriptivo y de tipo aplicada como sigue:

Descriptivo

De acuerdo a los objetivos planteados se considera que el presente Trabajo Especial de Grado es de tipo descriptivo, al respecto Méndez (2001), la define como: "el estudio que identifica las características del universo de investigación, señala formas de conducta y actitudes del universo investigado, establece comportamientos

concretos y descubre y comprueba la asociación entre variables de investigación” (p. 126). Tamayo (2004) expresa: “la investigación descriptiva comprende la descripción, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición y procedimientos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre una persona, grupo o cosa, que conduce o funciona en el presente.” (p. 46).

Este tipo de investigación permitirá obtener información y datos relacionados con las variables involucradas en la investigación, que permitirá comprender el comportamiento de estructuras de mampostería confinada de uso típico en Venezuela y los diferentes modelos equivalentes de la literatura técnica que permiten el cálculo simplificado de la variable rigidez lateral.

Aplicado

Esta investigación es aplicada. Sabino (2006), define la investigación aplicada “como un conocimiento que permite obtener los insumos necesarios para proceder luego a la acción que persiguen fines concretos, inmediatos de carácter unitarios” (p. 96). Es considerada como aplicada porque tras comparar valores de rigidez lateral equivalente de estructuras de mampostería confinada obtenidos mediante simulación por computadora con los calculados a través de modelos equivalentes reportados en la literatura técnica se harán propuestas que permitirán el cálculo simplificado de la variable rigidez lateral y en este sentido proponer estos conocimientos técnicos en la concepción de normas actualizadas que se orienten a difundir criterios técnicos para la construcción adecuada de estructuras de mampostería confinada con la finalidad de mejorar su comportamiento sismorresistente.

III.3. Etapas de la investigación

El presente trabajo especial de grado se estructuró siguiendo una serie de pasos que serán descritos a continuación con la finalidad de estudiar y cumplir con los objetivos planteados. En forma general la metodología empleada constó de seis (6) etapas dividida cada una en cierto número de pasos para cumplir con el objetivo propuesto.

La primera etapa consistió en una revisión bibliográfica de documentos técnicos con la finalidad de obtener las características mecánicas y geométricas de las estructuras de mampostería confinada de uso frecuente en Venezuela. Sumado a esto, se buscó toda la información correspondiente a los diferentes modelos equivalentes que permiten el cálculo simplificado de la rigidez lateral en estructuras mampostería confinada.

La segunda etapa consistió en la descripción del proceso de simulación de los modelos numéricos empleando el programa SAP2000 y su respectiva calibración para la obtención de resultados mediante un análisis estático lineal en el plano acordes con la realidad.

La tercera etapa consistió en el estudio de los modelos numéricos patrón, en la cual se definieron las consideraciones geométricas y mecánicas de las estructuras de mampostería modeladas. Los modelos fueron clasificados en función de su relación de aspecto, número de vanos y número de niveles. Para todos los modelos simulados se calculó su rigidez lateral y se hizo un estudio particular de los porcentajes de áreas del vano de mampostería sometidas a esfuerzos de tracción y a esfuerzos de compresión en función de la relación de aspecto.

La cuarta etapa consistió en el estudio de los modelos equivalentes para el cálculo de la rigidez lateral. Se definieron las propiedades geométricas y mecánicas usadas para dichos modelos equivalentes, así como también las consideraciones tomadas para el empleo de las ecuaciones definidas en el capítulo II de las diferentes propuestas de ancho efectivo (w) del muro, en el caso del modelo equivalente de

biela diagonal simple y las ecuaciones del modelo equivalente de columna ancha. Todos los modelos equivalentes fueron clasificados en función de su relación de aspecto, número de vanos y número de niveles, manteniendo una concordancia de estas variables con los modelos numéricos patrón.

La quinta etapa consistió en la comparación de los resultados obtenidos de rigidez lateral de los modelos numéricos patrón con los resultados obtenidos de rigidez lateral mediante los modelos equivalentes.

La sexta etapa consistió en proponer un ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple con la finalidad de ajustar mejor el valor de la rigidez lateral equivalente al comportamiento real de la estructura de mampostería confinada.

A continuación se describe detalladamente todas las etapas mencionadas anteriormente destacando todos los pasos intermedios realizados.

III.3.1. Etapa 1: revisión bibliográfica

Se hizo una revisión bibliográfica de diferentes documentos técnicos en el área de la mampostería confinada con la finalidad de caracterizar mecánicamente y geoméricamente los materiales de uso común en Venezuela para este tipo de estructuras. De igual manera a través de la revisión bibliográfica, se buscaron diferentes propuestas de modelos equivalentes para el cálculo simplificado de la rigidez lateral en estructuras de mampostería confinada destacando sus características, limitaciones y aplicabilidad.

III.3.1.1. Antecedentes

Un aspecto fundamental en la revisión bibliográfica fue la búsqueda de antecedentes en la línea de investigación de la mampostería confinada en Venezuela; en este sentido se buscaron diferentes ensayos realizados en el Instituto de Materiales y Modelos estructurales (IMME) sobre estructuras de mampostería

confinada sometidas a cargas laterales, elaboradas con bloques huecos de arcilla y bloques de concreto.

Sólo se estudiaron los ensayos sometidos a carga lateral sin cargas axiales verticales, tomando sus características geométricas y mecánicas y los resultados arrojados, destacando solamente la rigidez lateral inicial antes de la degradación de la misma. La finalidad de esta recopilación fue tener una primera aproximación a los órdenes de magnitud de la rigidez lateral para este tipo de estructuras.

Para algunos ensayos recopilados, la fuerza en el tope y el desplazamiento del tope como variables para calcular la rigidez lateral según la ecuación 5.0 descrita en el capítulo II, sección II.8, fueron obtenidos directamente mediante tablas elaboradas por los autores de los ensayos, sin embargo en la mayoría de los casos fue necesario tomar los diagramas de histéresis (fuerza vs desplazamiento) de los diferentes muros ensayados y estudiar el comportamiento lineal de la primera curva donde se considera que la rigidez no se ha degradado, es decir, se mantiene en su rango elástico. En este sentido, todos valores de rigidez estudiados se encuentran dentro del comportamiento elástico de la estructura.

III.3.2. Etapa 2: simulación y calibración de los modelos numéricos

El proceso de calibración y simulación se diferenció en tres (3) pasos intermedios que permitieron de forma ordenada obtener los modelos numéricos de las estructuras de mampostería confinada.

III.3.2.1. Descripción de la simulación

A continuación se muestra un esquema general de la configuración típica de una estructura típica de mampostería confinada.

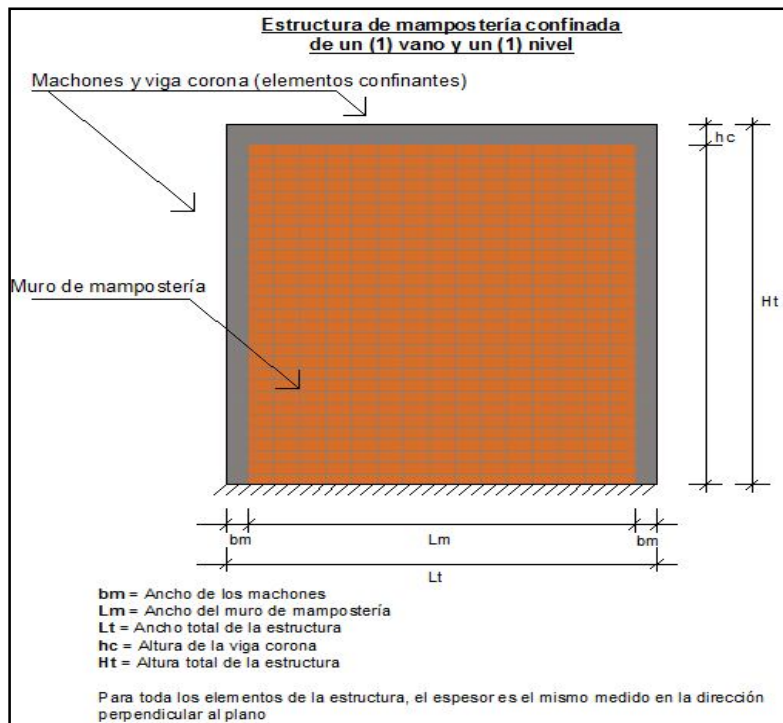


Figura 13. Esquema general de una estructura de mampostería confinada

Partiendo del esquema general, se identificaron dos principales elementos conformantes de la estructura. Para el caso de los elementos confinantes, los mismos fueron tomados como elementos de concreto armado. Se partió de la condición de que dichos elementos no tienen capacidad de transmitir momento al muro de mampostería (Garcés, 2008). A continuación se presenta las consideraciones utilizadas en los elementos finitos para conformar el modelo numérico.

1. Descripción de los elementos finitos usados en la simulación

La simulación de los modelos numéricos se hizo a través del programa SAP2000. La estructura se configuró a través de elementos de área diferenciados de acuerdo al elemento de la estructura al que pertenecían. Los elementos confinantes se configuraron como tipo “*Shell*” y los elementos del muro de mampostería también como tipo “*Shell*” con un cierto factor para alterar su capacidad de resistir momentos. A continuación se describe detalladamente estas condiciones.

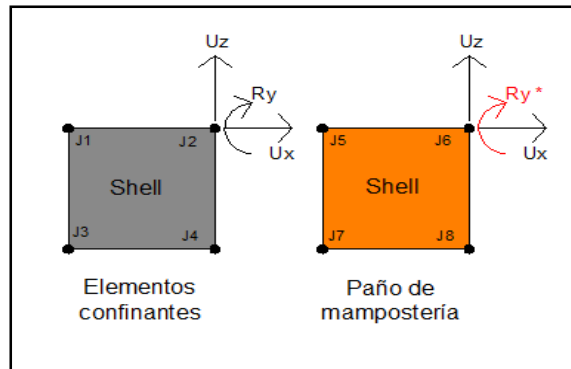


Figura 14. Características de los elementos finitos empleados en la simulación
 Fuente: SAP2000, *Manual User*

El elemento tipo “*Shell*”, tomando las solicitaciones en el plano, es capaz de transmitir momentos y fuerzas. Presenta grados de libertad de traslación y rotación. Se comporta como un elemento membrana y placa.

Se partió de la configuración mostrada en la figura 14, fijando elementos planos, aproximadamente cuadrados con cuatro nodos y de aproximadamente 10 centímetros de lado, sin embargo como se mencionó anteriormente, fue necesario alterar por un factor la capacidad de resistir momentos a los elementos del muro de mampostería. Para esto, el programa SAP2000 presenta la opción de alterar la rigidez de los elementos ante diferentes deformaciones; para este caso se modificó ante deformaciones de flexión por un factor de 0,000001, lo que prácticamente implicó eliminar la capacidad de resistir momento. Este elemento “*shell*” modificado ahora tendrá el comportamiento de un elemento “*plane*”, el cual sólo es capaz de transmitir fuerzas en su plano.

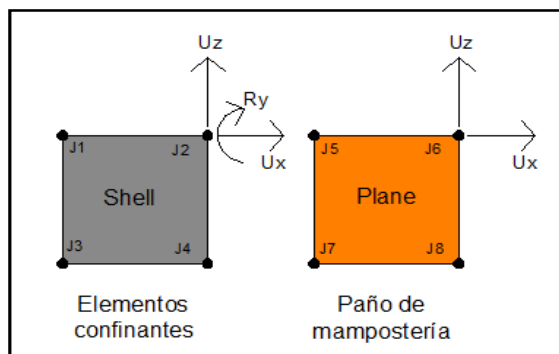


Figura 15. Configuración modificada de los elementos finitos utilizados en la simulación
 Fuente: SAP2000, *Manual User*

2. Definición de las propiedades mecánicas de los materiales

Los materiales empleados para la simulación consistieron principalmente en concreto armado para el caso de los elementos confinantes y mampostería para el muro interno. Las propiedades fundamentales que se fijaron en el programa SAP2000 fueron el módulo de elasticidad, módulo de poisson y el módulo de corte.

3. Descripción de las restricciones de la estructura en la simulación

Se tomó la estructura como perfectamente empotrada en su base y partiendo de que los elementos confinantes se deforman en conjunto con el muro de mampostería según una deformación por corte, como se muestra en la Figura 11 del capítulo II, se le asignó a los elementos del tope de la estructura (viga corona) un “*constraint*” tipo “*equal*” (SAP2000, *Manual User*). Esta condición en el programa SAP2000 se define como restricciones en conjunto de juntas y tiene como finalidad reducir los grados de libertad. Para este caso, el “*equal*” permitió que los elementos del tope de la estructura tuvieran el mismo desplazamiento horizontal.

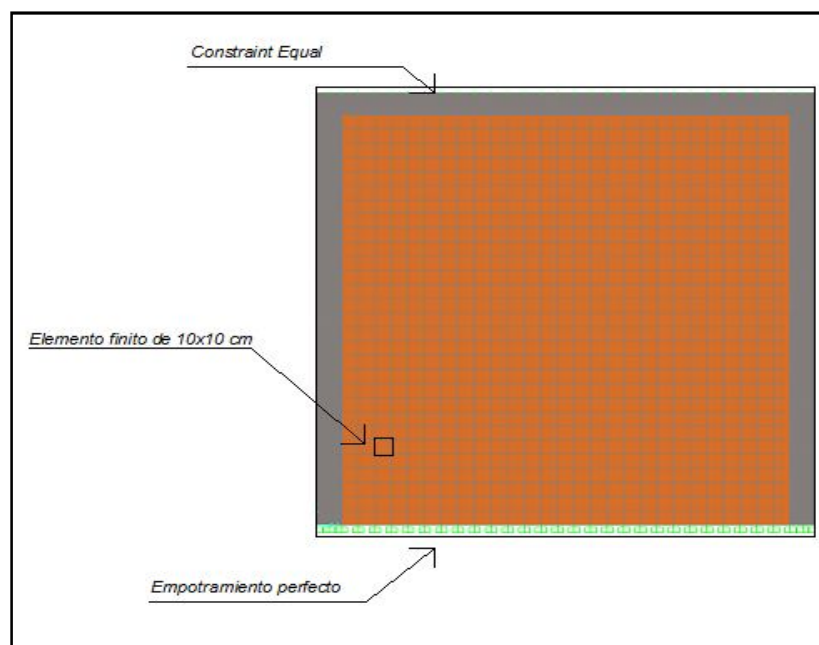


Figura 16. Configuración de las restricciones de la estructura simulada

4. Condición de los nodos intermedios entre los elementos confinantes verticales y los elementos del muro de mampostería

Se debió establecer una condición especial para los nodos que se encuentran entre los machones y el muro de mampostería con la finalidad de observar las zonas donde se generan esfuerzos de compresión y esfuerzos de tracción en el muro de mampostería. La figura mostrada a continuación esquematiza de forma general el comportamiento de una pared sometida a carga lateral.

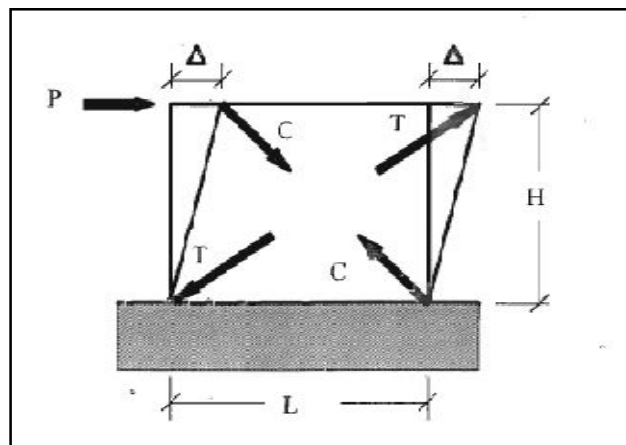


Figura 17. Comportamiento de una pared ante carga lateral

P= Carga lateral; Δ= Desplazamiento; T = Esfuerzos de tracción; C = Esfuerzos de compresión.

Fuente: Lafuente y Genatios (1998)

Partiendo de la condición mostrada en la Figura 17, se estableció para los nodos intermedios entre los machones y el muro de mampostería la opción de “nodos dobles” es decir, el programa SAP2000, presenta la opción de establecer la ubicación espacial de dos nodos en una misma coordenada.

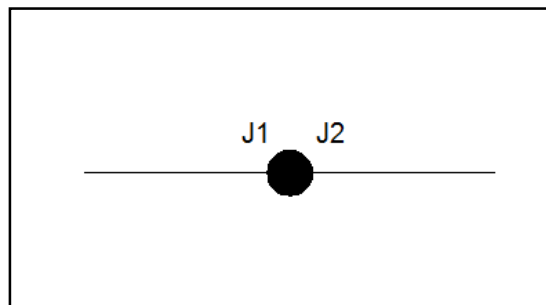


Figura 18. Condición de nodos dobles

III.3.2.2. Calibración de acuerdo a los esfuerzos en el muro de mampostería

En el tope de la estructura fue asignada una fuerza horizontal distribuida en todos los nodos con la finalidad de simular el efecto de una carga lateral proveniente de una acción sísmica. Para el estado de esfuerzos generados como consecuencia de la fuerza aplicada sobre la estructura, se asumió que la resistencia del muro de mampostería ante esfuerzos de tracción es despreciable, por lo tanto fue necesario limitar todas las zonas donde ocurren estos esfuerzos, para luego establecer una condición especial a todos los elementos del muro de mampostería que se encontraran en estas zonas. Partiendo de que la rigidez del material depende directamente de su módulo de elasticidad, se definió que para todos los elementos identificados en las zonas de esfuerzos de tracción el módulo de elasticidad fuera muy bajo para que no aporten rigidez a la estructura, cuyo valor fue de 1 Kgf/cm².

A continuación se describe el proceso de simulación:

1. Identificación de las zonas del muro de mampostería sometidas a esfuerzos de tracción y compresión

A continuación se muestra una imagen que describe como fue el proceso de identificación de las zonas de compresión y tracción.

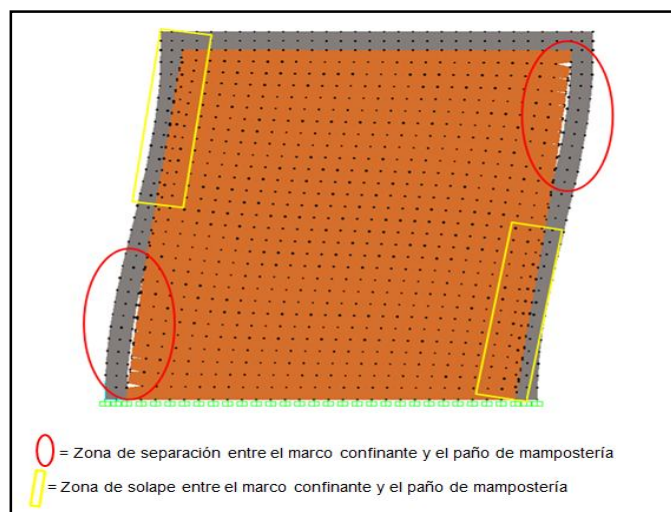


Figura 19. Condición de separación y solape entre el marco confinante y el muro de mampostería

Partiendo de lo observado en la Figura 19, se estableció que para la zona donde hay separación entre el marco confinante y el muro de mampostería confinada se encuentra la zona de los esfuerzos principales de tracción y en el sentido opuesto, donde ocurre el solape se encuentra la zona de los esfuerzos principales de compresión, sin embargo no fue suficiente con identificar las zonas de separación entre el marco confinante y el muro, ya que hacia el interior del muro también se debió establecer la zona donde son más representativos los esfuerzos de tracción que los esfuerzos de compresión. En este sentido se identificaron los esfuerzos principales mediante el programa SAP2000 en forma de flechas, donde se identifican las magnitudes de los mismos y el ángulo del esfuerzo resultante.

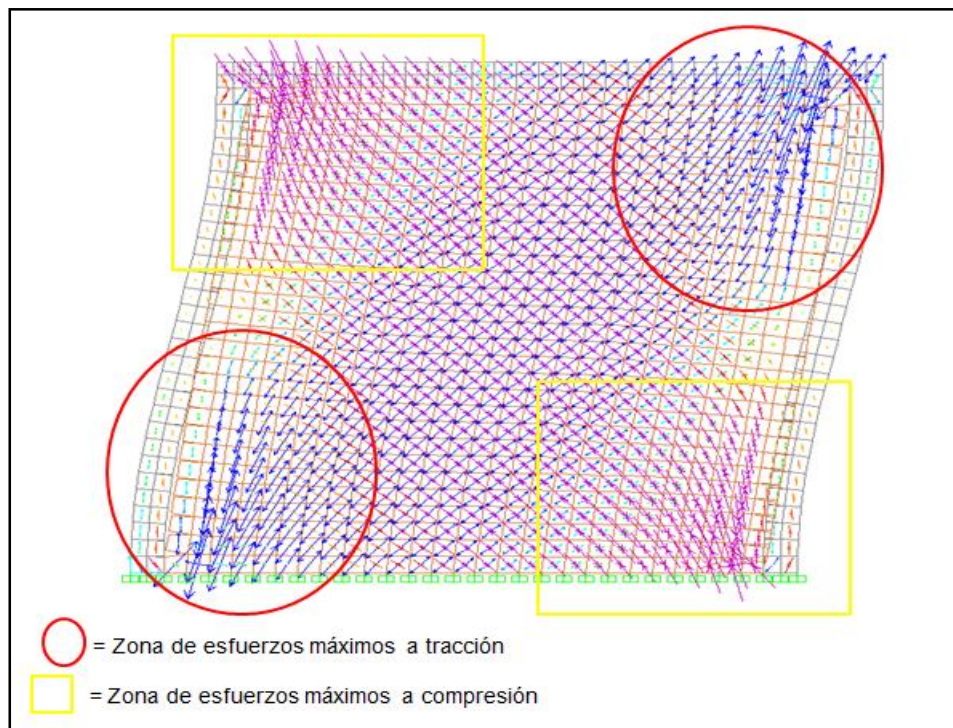


Figura 20. Esfuerzos principales del muro de mampostería

Luego de obtenidos los esfuerzos observados en la Figura 20, se asumió un criterio mediante el cual se seleccionaran los elementos sometidos a esfuerzos de tracción considerables.

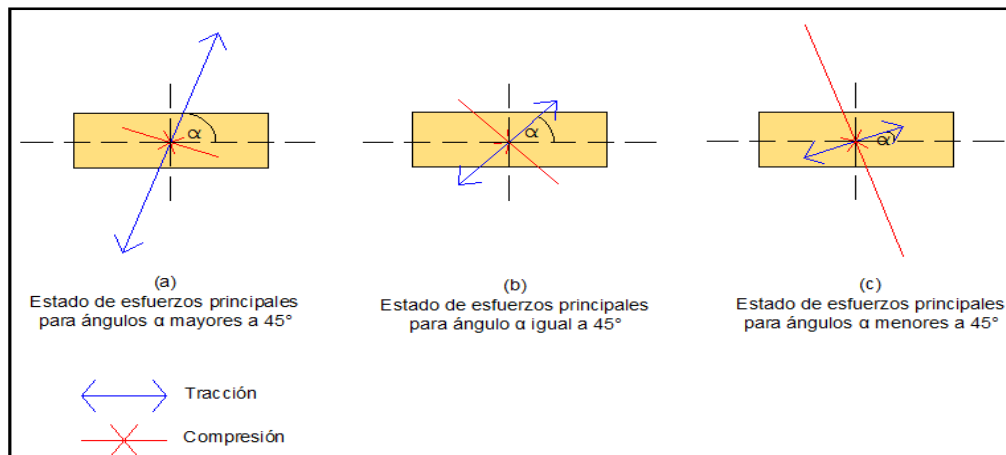


Figura 21. Variación del estado de esfuerzos en función del ángulo resultante

Observando la Figura 21, se observa claramente como para ángulos mayores a 45° (a), los esfuerzos a tracción comienzan a ser mayores a los esfuerzos de compresión. En este sentido, el criterio establecido fue seleccionar todos aquellos elementos cuyo estado de esfuerzos principales mostrara un ángulo mayor a 45° .

2. Modificación de los elementos sometidos a esfuerzos de tracción

Una vez seleccionados los elementos sometidos a esfuerzos de tracción, como se mencionó anteriormente, se le asignó al material un valor de módulo de elasticidad igual a 1Kgf/cm^2 .

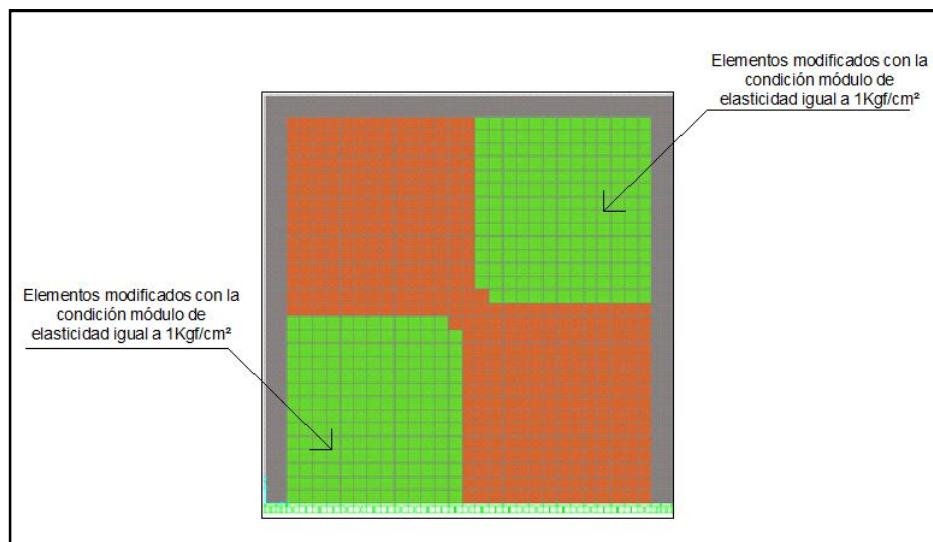


Figura 22. Elementos modificados luego de la identificación de estar sometidos a tracción

3. Reajuste de los nodos intermedios entre los elementos confinantes verticales y el muro de mampostería

Una vez que se modificaron los elementos a tracción, se modificó nuevamente los nodos intermedios entre los machones y el muro de mampostería con la condición de que los mismos conformaran nodos simples, quitando la condición inicial de nodos dobles.

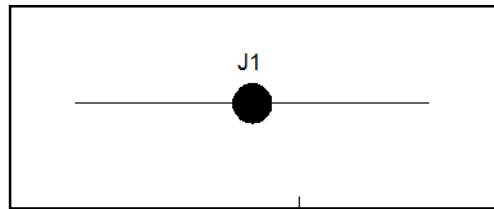


Figura 23. Condición de nodo simple

III.3.2.3. Cálculo de la rigidez lateral en los modelos numéricos calibrados

Finalmente, una vez obtenido el modelo calibrado, se volvió a aplicar la misma fuerza distribuida en los nodos superiores de la estructura con la finalidad de observar la deformación de la misma y tomar como resultado el desplazamiento de cualquier nodo superior de la estructura, esto recordando que le fue asignado la condición de “*equal*” a todos estos nodos superiores, por lo tanto todos tendrán el mismo desplazamiento.

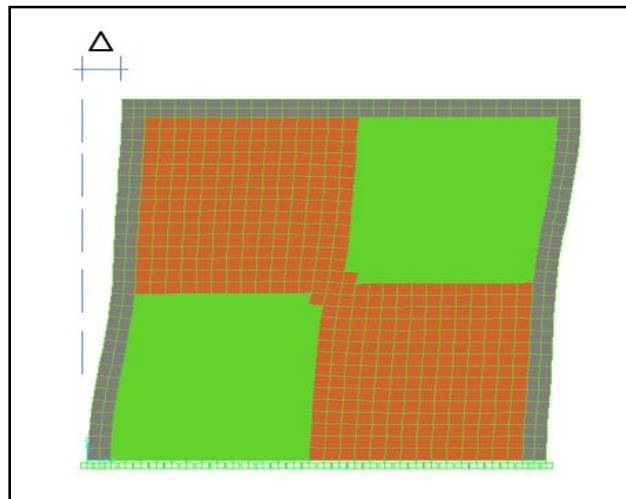


Figura 24. Modelo simulado con deformación resultante
 Δ = Desplazamiento horizontal.

Se aplicó la Ecuación 5.0 descrita en el capítulo II, sección II.8, despejando el valor de la rigidez lateral (K), donde conociendo la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido a través de un análisis estático lineal realizado en la simulación, se determinó el valor de la rigidez lateral de la estructura.

III.3.2.4. Comparación entre los valores de rigidez de los modelos numéricos calibrados y los valores de rigidez de los ensayos experimentales

Con los datos recopilados a través de la revisión bibliográfica descrita en la sección III.3.1, del presente capítulo, se tomaron las mismas propiedades mecánicas y geométricas de cada ensayo y se elaboraron sus correspondientes modelos numéricos de acuerdo a todos los pasos especificados anteriormente y de esta manera se obtuvieron sus respectivos valores de rigidez lateral. Dichos valores fueron comparados con los valores de rigidez lateral inicial obtenidos de los ensayos experimentales definiendo porcentajes de error mediante la siguiente expresión:

$$\%Error = \frac{100*(Rn-Re)}{Re} \quad \text{(Ecuación 32)}$$

Donde:

Rn = Valor de rigidez del modelo numérico

Re = Valor de rigidez del ensayo experimental estudiado

III.3.3. Etapa 3: Estudio de los modelos numéricos patrón

De acuerdo a todo lo especificado en la etapa uno (1) de este marco metodológico, se procedió a realizar todos los modelos patrón en función de su relación de aspecto definida como la relación entre la altura del muro y el ancho del mismo, número de vanos y número de niveles.

III.3.3.1. Características geométricas de los modelos patrón

Se configuraron veinticuatro (24) modelos patrón bajo criterios de relación de aspecto, número de vanos y número de niveles. A continuación se muestra la clasificación de los modelos en función de su relación de aspecto:

Tabla 8. Identificación y caracterización de los modelos patrón en función de su relación de aspecto (H/B =altura/ancho)

Identificación del patrón en función de su relación de aspecto.	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
Bloques de concreto				
1	300	200	1,50	15
2	300	300	1,00	15
3	300	400	0,75	15
4	300	500	0,60	15

Para todos los ensayos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección trasversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

Luego de clasificar todos los modelos de acuerdo a su relación de aspecto, se clasificaron los mismos en función del número de vanos y el número de niveles según la nomenclatura mostrada a continuación:

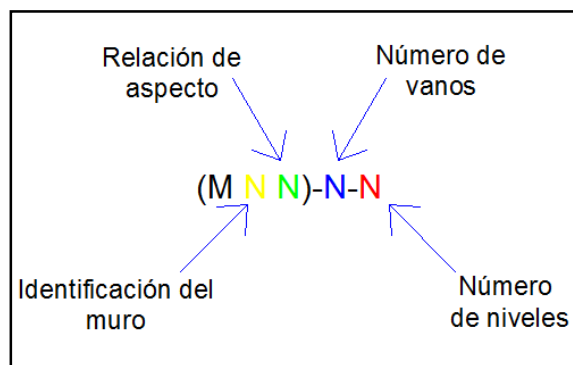
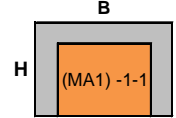
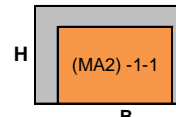
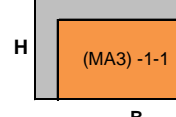
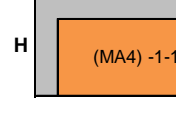


Figura 25. Nomenclatura de clasificación de los modelos patrón

III.3.3.1.1. Modelos de un (1) vano

Para todos los modelos de un (1) vano, la configuración geométrica se hizo en función de las relaciones de aspecto especificadas en la tabla anterior. A continuación se muestra una tabla con las configuraciones establecidas:

Tabla 9. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de un (1) vano

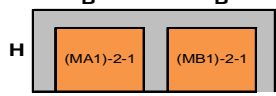
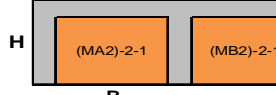
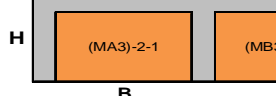
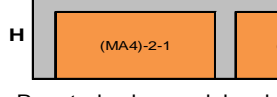
Identificación de modelos de un (1) vano	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
 (MA1) -1-1	300	200	1,50	15
 (MA2) -1-1	300	300	1,00	15
 (MA3) -1-1	300	400	0,75	15
 (MA4) -1-1	300	500	0,60	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

III.3.3.1.2. Modelos de dos (2) y tres (3) vanos

Para todos los modelos, por cada relación de aspecto especificada se le incrementó el número de vanos según se muestra a continuación:

Tabla 10. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de dos (2) vanos

Identificación de modelos de dos (2) vanos	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
 (MA1)-2-1 (MB1)-2-1	300	200	1,50	15
 (MA2)-2-1 (MB2)-2-1	300	300	1,00	15
 (MA3)-2-1 (MB3)-2-1	300	400	0,75	15
 (MA4)-2-1 (MB4)-2-1	300	500	0,60	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

Tabla 11. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de tres (3) vanos

Identificación de modelos de tres (3) vanos		Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
		H (cm)	B (cm)		
H	 (MA1)-3-1 (MB1)-3-1 (MC1)-3-1	300	200	1,50	15
	 (MA2)-3-1 (MB2)-3-1 (MC2)-3-1	300	300	1,00	15
	 (MA3)-3-1 (MB3)-3-1 (MC3)-3-1	300	400	0,75	15
	 (MA4)-3-1 (MB4)-3-1 (MC4)-3-1	300	500	0,60	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

III.3.3.1.3. Modelos de dos (2) niveles

Se tomaron las mismas geometrías antes descritas para los modelos de un (1), dos (2) y tres (3) vanos y se le incrementó el número de niveles a dos (2). A continuación se muestran las tablas resumen de las configuraciones de todos estos modelos.

Tabla 12. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de un (1) vano y dos (2) niveles

Identificación de modelos de un (1) vano - dos (2) niveles	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
	300	200	1,50	15
	300	300	1,00	15
	300	400	0,75	15
	300	500	0,60	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

Tabla 13. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de dos (2) vanos y dos (2) niveles

Identificación de modelos de dos (2) vanos - dos (2) niveles	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
	300	200	1,50	15
	300	300	1,00	15
	300	400	0,75	15
	300	500	0,60	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

Tabla 14. Identificación y caracterización geométrica de los modelos numéricos patrón de tres (3) vanos y dos (2) niveles

Identificación de modelos de tres (3) vanos- dos (2) niveles		Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
		H (cm)	B (cm)		
H		300	200	1,50	15
		H		300	300
H				300	400
		H		300	500

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

III.3.3.2. Características mecánicas de los materiales de los modelos patrón

Luego de definir geoméricamente los modelos patrón, se procedió a definir las propiedades mecánicas de los materiales. Se definió el módulo de elasticidad, el módulo de corte y el coeficiente de poisson según se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 15. Propiedades mecánicas de los materiales usados en la simulación de los modelos patrón

Material	Resistencia diseño	Módulo de Elasticidad	Módulo de corte (Kg/cm ²)	Módulo de Poisson
Concreto armado (machones y viga corona)	f_c	$E_c = 15100 \sqrt{f_c}$	$G_c = 0,4 * E_c$ Valor por defecto del programa SAP2000	0,3
Mampostería	f_m	$E_m = 400 * f_m$ Tomando la referencia de la sección II.5	$G_c = 0,4 * E_m$ Valor por defecto del programa SAP2000 Tomando la referencia de la sección II.5	0,3

III.3.3.3. Determinación de la rigidez lateral de los modelos patrón

Luego de configurar geoméricamente y mecánicamente todos los modelos patrón y calibrarlos de acuerdo al procedimiento descrito en la etapa uno (1) sección III.3.1.2.2, referente a la desincorporación de los elementos sometidos a esfuerzos de tracción, se les aplicó a todos los modelos una fuerza de 10.000 Kgf distribuida en los nodos del tope de la estructura con la finalidad de que a través del análisis estático lineal realizado con la simulación, se obtuviera el desplazamiento total del tope de la estructura. Se tomó en todos los modelos, el desplazamiento del nodo ubicado en la esquina superior derecha de la viga corona. Como se describió en la etapa 1, sección III.3.1.2.3, se usó la Ecuación 5 para calcular la rigidez lateral.

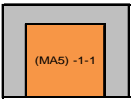
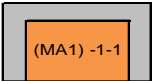
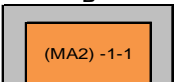
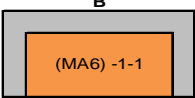
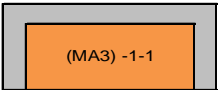
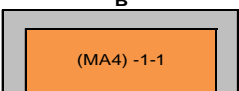
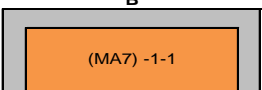
III.3.3.4. Estudio del comportamiento de los porcentajes de área a compresión y tracción de los modelos patrón

A parte del cálculo de la rigidez lateral de todos los modelos patrón, se hizo un estudio particular al comportamiento de los porcentajes del área del muro de mampostería sometidos a esfuerzos de tracción y compresión.

III.3.3.4.1. Determinación de los porcentajes de área a compresión y área a tracción de los modelos patrón.

Se hizo énfasis sólo en los modelos de un (1) vano y un (1) nivel, complementándolos con la elaboración de tres modelos numéricos adicionales con nuevas configuraciones geométricas y manteniendo las mismas propiedades mecánicas de los modelos patrón. A continuación se muestra una tabla con la configuración geométrica de los modelos numéricos tomados para este estudio.

Tabla 16. Configuración geométrica de los modelos numéricos empleados en el estudio de los porcentajes de área sometidos a esfuerzos de tracción y compresión

Identificación de modelos de un (1) vano	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)
	H (cm)	B (cm)		
 (MA5) -1-1	300	150	2,00	15
 (MA1) -1-1	300	200	1,50	15
 (MA2) -1-1	300	300	1,00	15
 (MA6) -1-1	300	240	1,25	15
 (MA3) -1-1	300	400	0,75	15
 (MA4) -1-1	300	500	0,60	15
 (MA7) -1-1	300	600	0,50	15

Para todos los modelos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x15 cm para la viga corona.

Se identificaron los elementos finitos sometidos a esfuerzos de tracción como se especificó en la etapa uno (I) sección III.3.1.2.2, y a través de la siguiente expresión se calcularon los porcentajes de área a tracción y compresión:

$$\%At = 100 * \left(\frac{NETR}{ET} \right) \quad \text{(Ecuación 33)}$$

Donde:

%At = Porcentaje de área del muro de mampostería sometida a esfuerzos de tracción

NETR = Número de elementos finitos del muro de mampostería sometidos a tracción

ET = Elementos finitos totales del muro de mampostería

$$\%Ac = 100 - \%At \quad \text{(Ecuación 34)}$$

%Ac = Porcentaje de área del muro de mampostería sometida a esfuerzos de compresión

%At = Porcentaje de área del muro de mampostería sometida a esfuerzos de tracción

Con todos los valores de porcentajes de área a tracción y compresión, se elaboraron gráficos con la finalidad de comprender la influencia de la relación de aspecto en dichos porcentajes.

III.3.4. Etapa 4: Estudio de modelos equivalentes

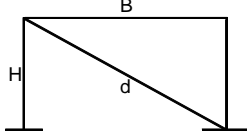
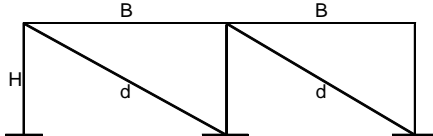
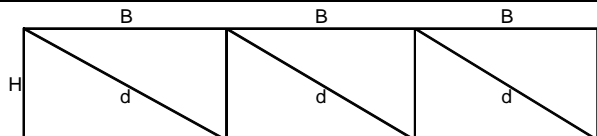
Una vez fijados los modelos equivalentes, se tomaron las mismas propiedades geométricas y mecánicas fijadas en los modelos patrón para determinar la rigidez lateral equivalente. Los cálculos se diferenciaron por el modelo empleado.

III.3.4.1. Cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple

1. Ecuaciones del modelo equivalente de biela diagonal simple en función del número de vanos y número de pisos

A través de la Ecuación 20 especificada en el capítulo II, sección II.9.1.4, se hicieron los cálculos correspondientes a la determinación de la rigidez lateral equivalente para cada modelo patrón clasificado en función de su relación de aspecto, número de vanos y número de pisos. Se debe mencionar que para emplear la Ecuación 20 se debió tomar ciertas consideraciones para su aplicación en los modelos con más de un (1) vano, más de un (1) nivel o ambos. A continuación se muestra una tabla con la modificación de la Ecuación 20 en función del número de vanos manteniendo constante la relación de aspecto.

Tabla 17. Ecuación para el cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple en función del número de vanos

N° Vanos	Modelo según número de vanos	Ecuación aplicada
1		$kl = \frac{24EI}{H^3} + \frac{AE\cos^2(\alpha)}{d}$
2		$kl = \frac{36EI}{H^3} + \frac{2AE\cos^2(\alpha)}{d}$
3		$kl = \frac{48EI}{H^3} + \frac{3AE\cos^2(\alpha)}{d}$

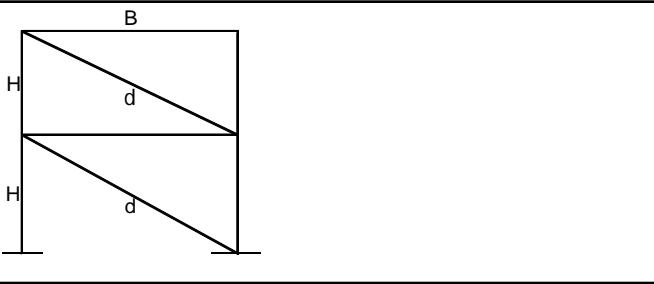
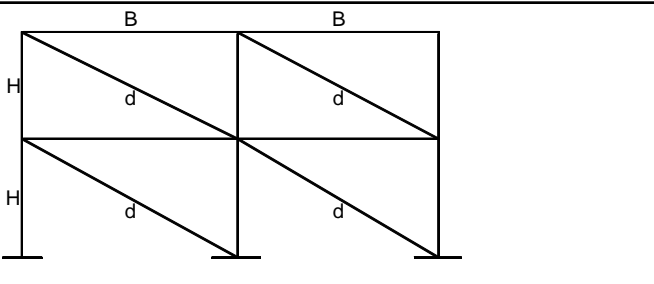
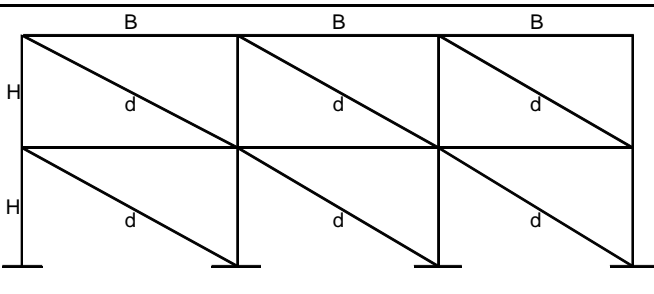
La Tabla 17 muestra la modificación de la Ecuación 20 en función del número de vanos. Debe notarse que las modificaciones de esta ecuación se hicieron partiendo de la demostración de la sección II.9.1.4, donde prácticamente se mantiene la misma base de la ecuación, sin embargo el hecho de incrementar el número de vanos, introduce un machón más y una diagonal más a la matriz general de rigidez, por lo tanto se estima la rigidez lateral de los modelos equivalentes según la siguiente expresión:

$$Kl = \frac{(24+12*(n-1))*EI}{H^3} + \frac{n*AE\cos^2(\alpha)}{d} \quad \text{(Ecuación 35)}$$

Donde:
n = Número de vanos

Cuando se incrementó el número de vanos y niveles de la estructura manteniendo la relación de aspecto, la Ecuación 20 también fue modificada según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 18. Ecuación para el cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo de biela diagonal simple en función del número de vanos y número de niveles.

N° Vanos	Modelo según número de vanos y niveles	Ecuación aplicada
1		$kl = \frac{24EI}{H^3} + \frac{AE\text{m}\text{Cos}^2(\alpha)}{2d}$
2		$kl = \frac{36EI}{H^3} + \frac{2AE\text{m}\text{Cos}^2(\alpha)}{2d}$
3		$kl = \frac{48EI}{H^3} + \frac{3AE\text{m}\text{Cos}^2(\alpha)}{2d}$

La Tabla 18 muestra como fue modificada la Ecuación 20 en función del número de pisos y número de vanos. A continuación se muestra la modificación antes mencionada:

$$Kl = \frac{(24+12*(n-1))*EI}{H^3} + \frac{n*AE\text{m}\text{Cos}^2(\alpha)}{pd} \quad (\text{Ecuación 36})$$

Donde:

n = Número de vanos

p = Número de niveles

2. Propiedades mecánicas empleadas en el modelo equivalente de biela diagonal simple

Las variables referentes a las propiedades de los materiales fueron tomadas de acuerdo a las mismas características empleadas en los modelos patrón especificadas en la Tabla 15 de la sección III.3.2.2.

3. Determinación del ancho efectivo (w) en el modelo de biela diagonal simple

El espesor de la biela resulta ser el mismo que el espesor del muro de mampostería, por lo tanto la variable del ancho efectivo (w) se toma como incógnita; dicho valor fue calculado a través de las ecuaciones establecidas por diferentes autores descritas en el capítulo II, en la sección II.9.1.3. Determinación del ancho efectivo de la biela.

Se debe mencionar que para todos los casos, el cálculo del ancho efectivo (w) se hace en función de un modelo de un (1) vano, por lo tanto en los casos donde hubo variación de número de vanos y número de niveles, el mismo valor de ancho efectivo calculado para una relación de aspecto fija de un modelo de un (1) vano le fue asignado a su correspondiente variación de vanos y niveles.

4. Determinación del área empleada para el modelo equivalente de biela diagonal simple

La variable referente al área de la biela fue calculada a través de la siguiente expresión:

$$A = w * e \quad (\text{Ecuación 37})$$

Donde:

w = Ancho efectivo de la biela equivalente

e = Espesor de la biela equivalente (igual al espesor del muro de mampostería)

5. Cálculo de la rigidez lateral equivalente

Por cada modelo patrón clasificado en función de su relación de aspecto, número de vanos y número niveles, se configuró su respectivo modelo equivalente de biela diagonal simple con sus mismas características geométricas y mecánicas con la finalidad de calcular su rigidez lateral equivalente mediante las ecuaciones 35 ó 36, dependiendo de cómo quedó configurado el modelo equivalente.

Se debe mencionar que por cada modelo de biela diagonal equivalente configurado, se calcularon cuatro (4) valores diferentes de rigidez lateral equivalente ya que se usaron las cuatro (4) propuestas de ancho efectivo (w) para el cálculo del área de la biela diagonal simple.

III.3.4.2. Cálculo de la rigidez lateral equivalente a través del modelo equivalente de columna ancha

1. Ecuaciones del modelo de columna ancha

Para los modelos equivalentes de columna ancha, las ecuaciones empleadas fueron las descritas en el capítulo II, sección II.9.2.2. A diferencia del modelo equivalente de biela diagonal simple, las ecuaciones de este método no fueron modificadas en función de la variación del número de vanos y número de niveles.

2. Propiedades mecánicas empleadas en el modelo equivalente de columna ancha

Todas las propiedades de los materiales necesarias para aplicar las ecuaciones del modelo de columna ancha fueron tomadas de acuerdo a las mismas características empleadas en los modelos patrón especificadas en la Tabla 15 de la sección III.3.2.2.

3. Cálculo de la rigidez lateral equivalente

Por cada modelo patrón clasificado en función de su relación de aspecto, número de vanos y número niveles, se configuró su respectivo modelo equivalente de columna ancha con sus mismas características geométricas y mecánicas con la finalidad de calcular la rigidez lateral equivalente. Para todos los modelos equivalentes con más de un (1) vano, más de un (1) piso o la combinación de ambos, la aplicación de las ecuaciones del modelo equivalente de columna ancha se hizo asumiendo que dichos modelos conformaban un sólo muro con dos machones perimetrales y una viga corona en el tope de la estructura. A continuación se ilustra esta consideración:

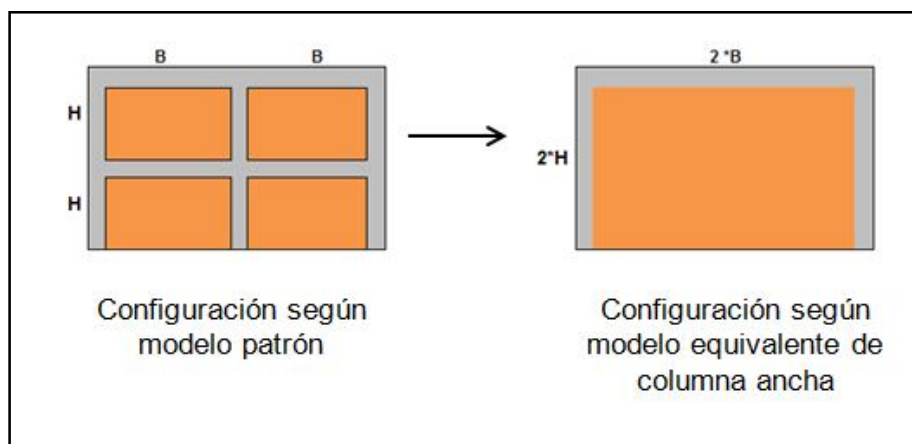


Figura 26. Configuración de los modelos equivalentes de columna ancha para modelos de más de un (1) vano, más de un (1) nivel ó ambos.

El cálculo realizado a través de la ecuación especificada en la sección II.9.2.2.1, del capítulo II, propuesta por Bazán y Meli (2001) fue realizado directamente con las consideraciones tomadas por los autores asumiendo para todos los casos una carga aplicada de 10000Kgf. Para el caso de la ecuación II.9.2.2.2, se asumieron ciertas consideraciones para su aplicación. En este sentido, partiendo de los modelos patrón, la variable referente al área transversal del muro de mampostería, fue tomada en cuenta como el porcentaje de área a compresión luego del proceso de simulación y calibración debido a que por la condición establecida para los elementos sometidos esfuerzos de tracción descrita en la sección III.3.1.2.2, del presente capítulo, a los cuales se les asignó una propiedad de módulo de

elasticidad de 1 Kgf/cm² y por consecuencia de esto, un módulo de corte de 0,4 Kgf/cm², la rigidez que ofrecen dichos elementos a la estructura es despreciable. A continuación se ilustra la consideración antes mencionada:

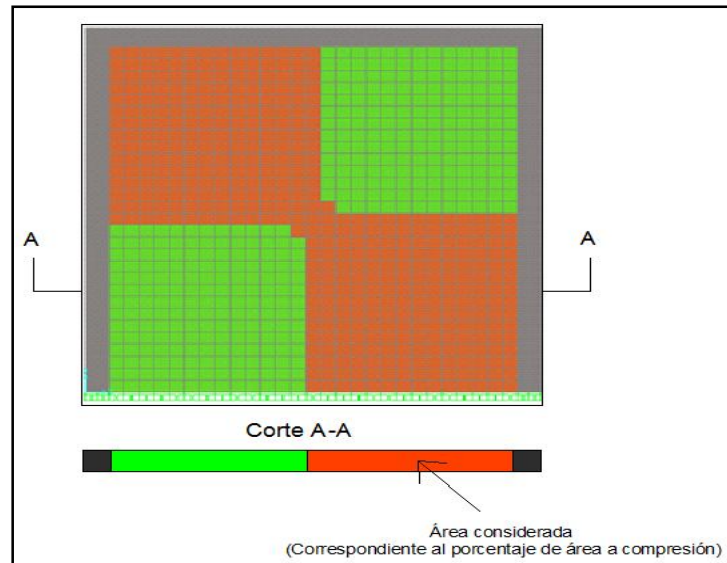


Figura 27. Consideración del valor de área transversal empleada en la ecuación de rigidez lateral equivalente descrita en el capítulo II, sección II.9.2.2.2.

III.3.5. Etapa 5: Comparación entre los modelos numéricos patrón y sus respectivos modelos equivalentes

Como se mencionó en la etapa 3 del presente capítulo, para todos los modelos numéricos patrón simulados y calibrados, fueron calculados sus respectivos valores de rigidez lateral y para todos sus respectivos modelos equivalentes tanto de biela diagonal simple como el de columna ancha, fueron calculados los valores de rigidez lateral equivalente. Con todos los valores obtenidos se hizo un estudio comparativo entre los valores obtenidos por los modelos patrón y los valores obtenidos por los modelos equivalentes. En este sentido, se definieron porcentajes de error a través de la siguiente expresión:

$$\%Error = \frac{100*(Re-Rp)}{Rp} \quad (Ecuación 38)$$

Donde:

R_p = Valor de rigidez del modelo patrón

R_e = Valor de rigidez del modelo equivalente aplicado

Definidos los porcentajes de error, se hizo un estudio detallado para cada modelo equivalente. En el caso del modelo equivalente de biela diagonal simple, se analizaron individualmente los valores por cada propuesta de ancho efectivo (w) tomado en la sección III.3.3.2.1, del presente capítulo. Se elaboraron gráficas de variación porcentaje de error en función de la relación de aspecto, número de vanos y número de pisos.

Para el caso de los modelos equivalentes de columna ancha, se hizo el estudio individual por cada ecuación empleada en la sección III.3.3.2.2, del presente capítulo. Se elaboraron gráficas de variación porcentaje de error en función de la relación de aspecto, número de vanos y número de pisos.

III.3.6. Etapa 6: Propuesta de un ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple.

Luego de realizar todos los estudios comparativos entre los modelos equivalentes y los modelos patrón, se decidió tomar el modelo equivalente de biela diagonal simple con la finalidad de proponer valores de ancho efectivo (w) en función de la relación de aspecto para dicho modelo y de esta manera reducir los posibles porcentajes de error definidos según la Ecuación 38, en la etapa 5 del presente capítulo; sólo se estudiaron los modelos de un (1) vano y un (1) nivel.

III.3.6.1. Determinación de ancho efectivo (w) para modelos de un (1) vano con diferentes relaciones de aspecto

Se tomó la ecuación del modelo equivalente de biela diagonal simple para modelos de un (1) vano, un (1) nivel y se modificó con la finalidad de obtener el valor de área según se muestra a continuación:

$$A = \frac{(kl - \frac{24EI}{H^3})}{Em \cos^2(\alpha)} * d \quad (\text{Ecuación 39})$$

Donde:

A = Área transversal de la biela diagonal

KI = Rigidez lateral proveniente de los modelos patrón

E = Módulo de elasticidad del material del que están compuesto los machones (concreto armado)

Em = Módulo de elasticidad del muro de mampostería

I = Inercia de la sección transversal de los machones

d = Longitud de la biela diagonal

H = Altura de los machones

α = Ángulo de inclinación de la biela diagonal respecto al plano horizontal de la base de la estructura

Todas las variables implicadas en la ecuación fueron las mismas usadas en la sección III.3.3.2.1, del presente capítulo, sin embargo para poder obtener el valor del área transversal de la biela de los modelos estudiados, fue necesario asignarle los respectivos valores de rigidez lateral de los modelos patrón de un (1) vano, un (1) nivel con sus diferentes relaciones de aspecto, incluyendo los tres (3) modelos complementarios especificados en la sección III.3.2.4.1, del presente capítulo.

Con los valores de área obtenidos, se procedió a determinar el ancho efectivo (w) haciendo uso de la Ecuación 37 de la sección III.3.3.2.1, del presente capítulo, donde conocido el espesor y el valor de área, se despejó el ancho efectivo (w) y se calculó su valor.

III.3.6.2. Propuesta del ancho efectivo (w)

Finalmente con todos los valores de ancho efectivo (w) calculados, se elaboró una propuesta a través de una gráfica de este parámetro en función de la relación de aspecto. Con esta propuesta se pretendió disminuir los posibles porcentajes de error al momento de calcular la rigidez lateral de una estructura de mampostería confinada con diferentes relaciones de aspecto a través del modelo equivalente de biela diagonal simple.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en función de los pasos empleados en el capítulo III para cumplir con los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado.

IV.1. Resultados de la revisión bibliográfica

En base a la revisión bibliográfica descrita en el capítulo III, sección III.3.1, se obtuvo toda la información recopilada en el capítulo II, sección II.5. Respecto a los antecedentes, a continuación se muestra una tabla resumen con las características de los ensayos estudiados:

Tabla 19. Resumen de las características de los ensayos sobre muros de mampostería confinada a escala real realizados en el Instituto de materiales y modelos estructurales (IMME).

Autor del ensayo. Propiedades de los materiales ensayados	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)	Fuerza en el tope del muro (Tf)	Desplazamiento del tope del muro (mm)	KI inicial (Tf/mm)
	H (cm)	B (cm)					
Bloques de concreto							
(Castilla y Pose, 1995) f'c = 210 kgf/cm ² . f'm = 60,7kgf/cm ²	240	310	0,77	15	6,00	1,00	6,00
(Castilla y Marinilli, 2003) 1 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	182	1,26	15	9,00	4,00	2,25
(Castilla y Marinilli, 2003) 2 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	236	0,97	15	12,00	3,00	4,00
(Castilla y Marinilli, 2003) 3 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	312	0,74	15	12,00	2,00	6,00

Para todos los ensayos, los elementos confinantes fueron de concreto armado con una sección transversal de 15x15 cm para los machones y 15x20 cm para la viga corona.

En base a la revisión bibliográfica descrita en el capítulo III, sección III.3.1, se establecieron seis (6) propuestas para el cálculo de la rigidez lateral equivalente los cuales corresponden a: cuatro (4) modelos equivalentes de biela diagonal simple y dos (2) modelos equivalentes de columna ancha. Todas sus características, limitaciones y aplicabilidad se encuentran descritas en el capítulo II, sección II.9.

IV.2 Resultados de la simulación y calibración de los modelos numéricos

De acuerdo a todos los pasos descritos en el capítulo III, sección III.3.2, se elaboraron cuatro (4) modelos numéricos correspondientes a cada ensayo experimental y se calculó el valor de rigidez de cada uno. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 20. Valores de rigidez lateral de los ensayos experimentales y de sus correspondientes modelos numéricos

Autor del ensayo. Propiedades de los materiales ensayados	Geometría general		Relación de aspecto (H/B)	Espesor del muro (cm)	Fuerza en el tope del muro (Tf)	Desplazamiento del tope del muro (mm)	KI modelos numéricos (tf/mm)	KI inicial (Tf/mm)
	H (cm)	B (cm)						
Bloques de concreto								
(Castilla y Pose, 1995) f'c = 210 kgf/cm ² . f'm = 60,7kgf/cm ²	240	310	0,77	15	6,00	1,00	5,40	6,00
(Castilla y Marinilli, 2003) 1 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	182	1,26	15	9,00	4,00	-	2,25
(Castilla y Marinilli, 2003) 2 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	236	0,97	15	12,00	3,00	-	4,00
(Castilla y Marinilli, 2003) 3 f'c = 360 kgf/cm ² . f'm = 80kgf/cm ²	230	312	0,74	15	12,00	2,00	-	6,00

Nota: No se calcularon los valores para los modelos de Castilla y Marinilli (2003) ya que solo se tomaron aproximadamente las propiedades mecánicas de acuerdo a lo descrito en el capítulo II, sección II.5, donde el f'c esta entre 80 Kgf/cm²-180Kgf/cm².

H = Atura de la estructura; **B** = Ancho de la estructura; **H/B** = Relación de aspecto; **e** = espesor del muro; **KI** = Rigidez lateral.

Con los valores mostrados en la tabla anterior se calcularon los porcentajes de error de acuerdo a la Ecuación 32 descrita en el capítulo III, sección III.3.2.4. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 21. Porcentajes de error entre los valores rigidez lateral de los ensayos experimentales y de sus respectivos modelos numéricos.

Modelo	% Error
Bloques de concreto	
(Castilla y Pose, 1995)	10,3

El modelo de Castilla y Pose (1995) elaborado con bloques de concreto presenta un valor de error de aproximadamente 10%.

Debido al porcentaje de error presentado por el modelo numérico Castilla y Pose (1995), se decidió tomar las características mecánicas de este ensayo para definir todos los modelos patrón.

De este modo se validó el modelo numérico propuesto luego de la simulación y calibración del mismo con resultados obtenidos por la vía experimental.

IV.3. Resultados del estudio de los modelos numéricos patrón

Se elaboraron los veinticuatro (24) modelos patrón en función de la clasificación geométrica establecida en el capítulo III, sección III.3.3.1 y las consideraciones tomadas para definir mecánicamente los materiales empleados en todos los modelos patrón, fue tomando como referencia los valores aproximados del ensayo experimental de Castilla y Pose (1995). Siguiendo las indicaciones de la tabla 16 definida en el capítulo III, se muestran a continuación los resultados del cálculo de las propiedades mecánicas empleadas:

Tabla 22. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en los modelos patrón

Material	Resistencia diseño (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	Módulo de corte (Kg/cm ²)	Módulo de Poisson
Concreto armado (machones y viga corona)	210	218819,78	87527,91	0,3
Mampostería	60	24000	9600	0,3

A continuación se muestran todos los modelos patrón configurados para la relación de aspecto igual a 1,00 luego del proceso de simulación y calibración. Los modelos patrón configurados para las relaciones de aspecto restantes, se encuentran en la sección de anexos (pág. 126).

Modelo Patrón (MA2)-1-1

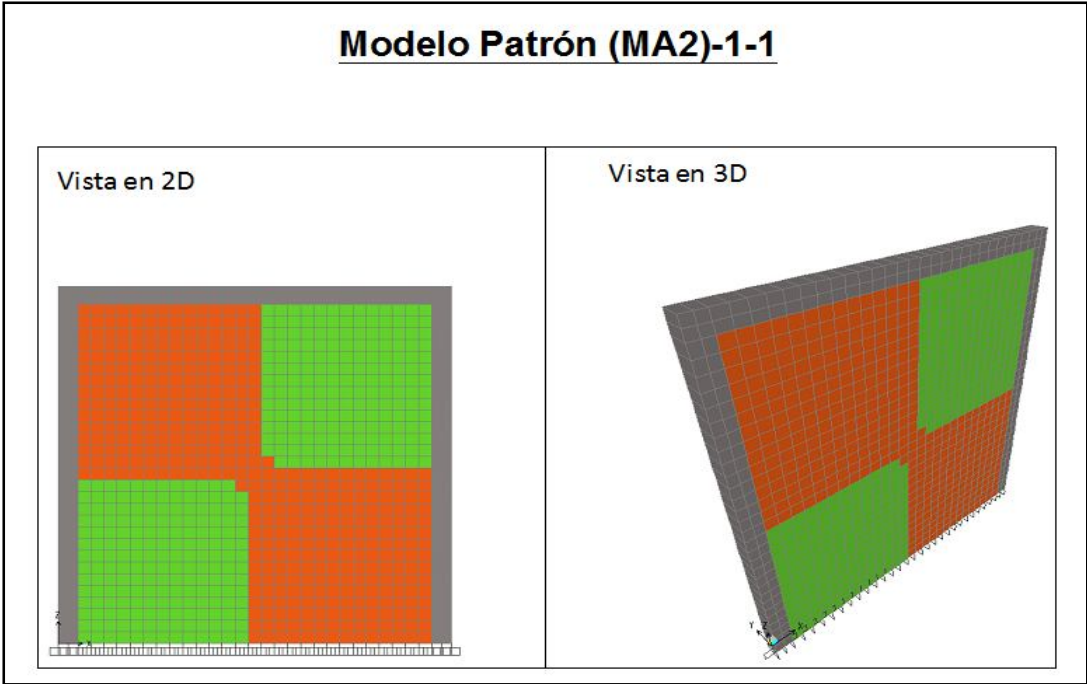


Figura 28. Modelo patrón (MA2)-1-1

Modelo Patrón (MA2)-2-1

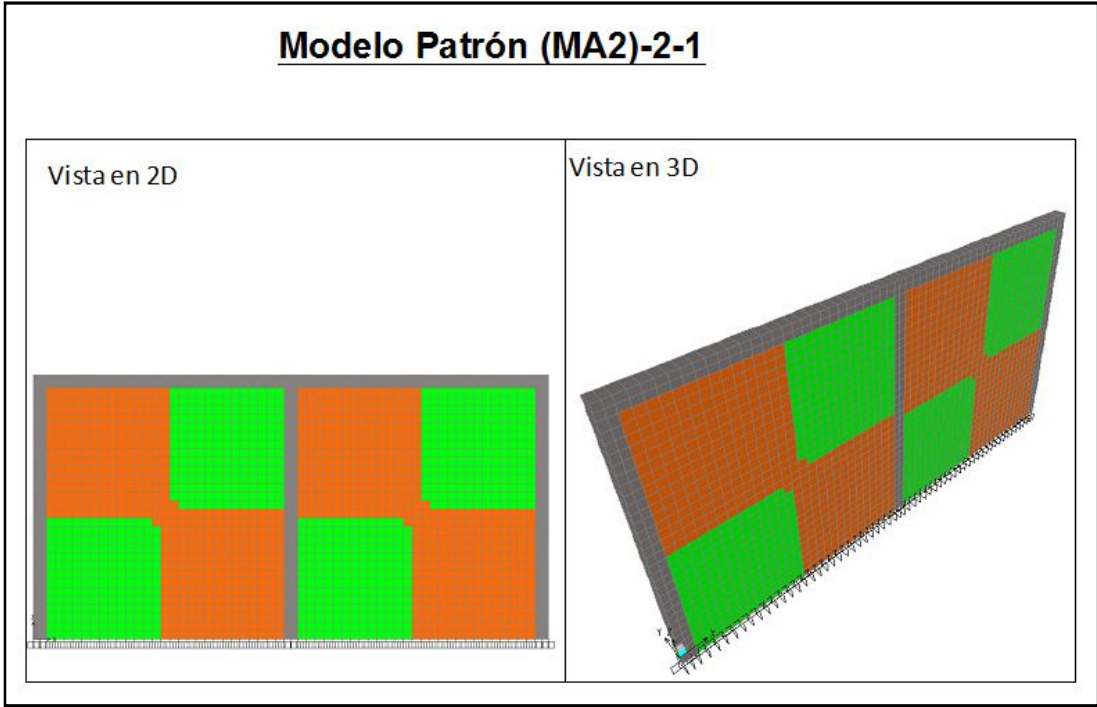


Figura 29. Modelo patrón (MA2)-2-1

Modelo Patrón (MA2)-3-1

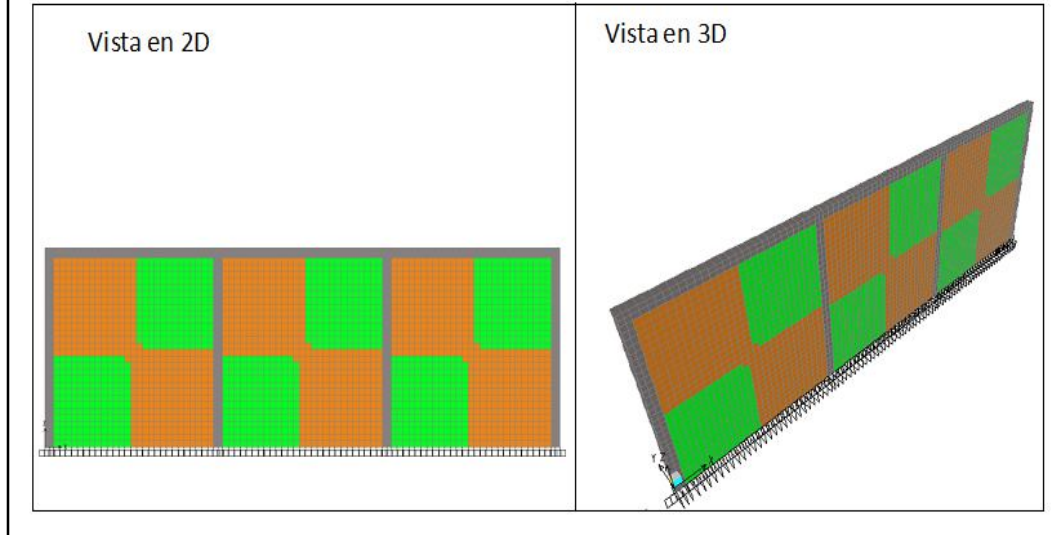


Figura 30. Modelo patrón (MA2)-3-1

Modelo Patrón (MA2)-1-2

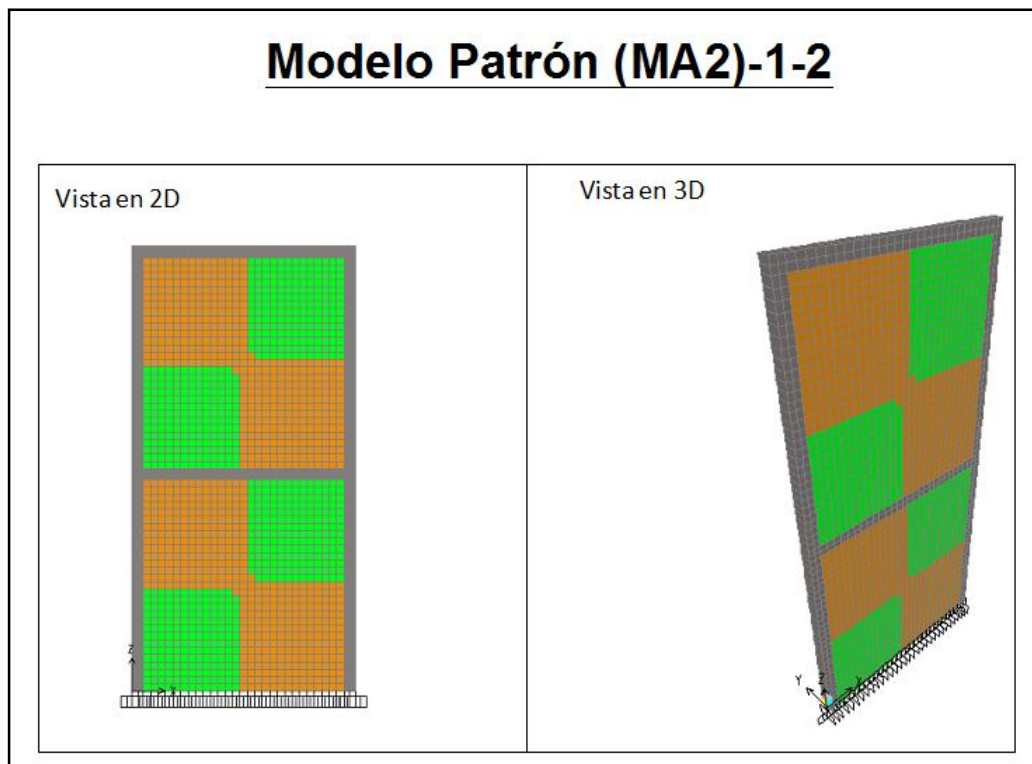


Figura 31. Modelo patrón (MA2)-1-2

Modelo Patrón (MA2)-2-2

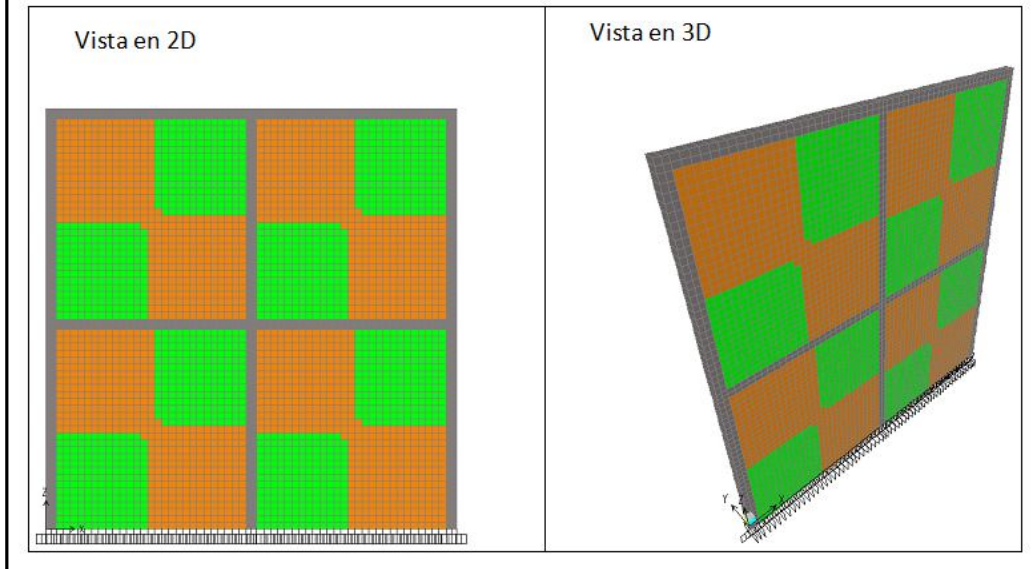


Figura 32. Modelo patrón (MA2)-2-2

Modelo Patrón (MA2)-3-2

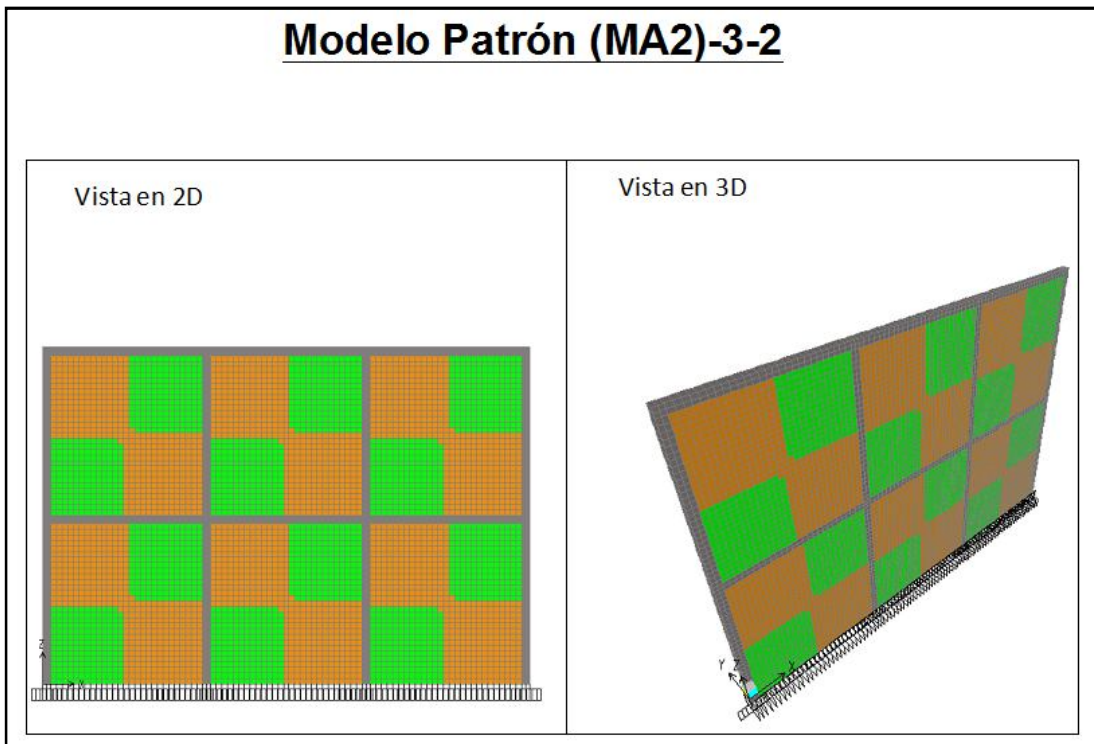


Figura 33. Modelo patrón (MA2)-3-2

V.3.1. Resultados del cálculo de la rigidez lateral de los modelos patrón

En base a todos los modelos patrón simulados se obtuvieron los valores de rigidez lateral correspondientes. A continuación se muestra una tabla resumen con todos los valores calculados:

Tabla 23. Resultados de rigidez obtenidos por el modelo patrón, para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.

Patrón	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto (H/B)			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez lateral (Kgf/cm)			
Patrón	1	1	88967,97	57471,26	44365,57	33244,68
		2	44424,70	29291,15	22133,69	16619,58
	2	1	204918,03	137931,03	98911,97	69881,20
		2	100300,90	66006,60	49677,10	34928,40
	3	1	321543,41	217391,30	155038,76	105374,08
		2	159744,41	108225,11	77942,32	53134,96

A continuación se muestra el gráfico de rigidez lateral en función de la relación de aspecto tomando los datos de la Tabla 23:

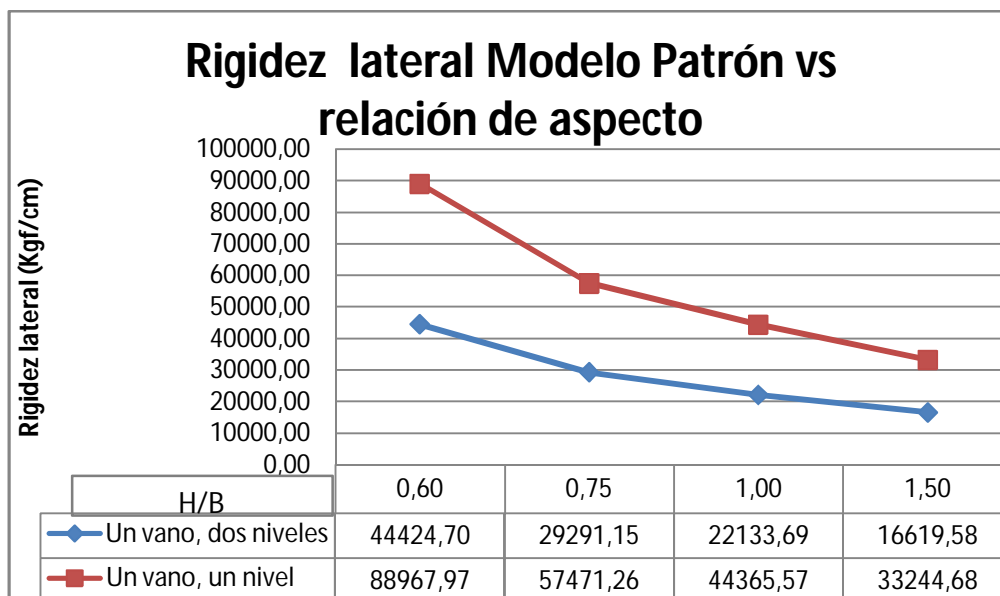


Gráfico 1. Gráfico de rigidez lateral patrón en función de relación de aspecto para modelos patrón de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa claramente que a medida que aumenta la relación de aspecto disminuye la rigidez lateral. Se aprecia que para relaciones de aspecto menores a 0,75 la rigidez lateral disminuye con una pendiente mayor que para relaciones de aspecto mayores a 0,75 donde disminuye de forma moderada para el caso. El incremento de un nivel implica que la rigidez lateral disminuya aproximadamente un 50%.

El comportamiento descrito anteriormente se repite en los modelos de dos y tres vanos con sus respectivos incrementos de niveles.

A continuación se presenta un gráfico comparativo del comportamiento de la rigidez lateral para modelos de relaciones de aspecto 0,60; 0,75; 1,00 y 1,50, aumentando el número de vanos de 1 a 2.

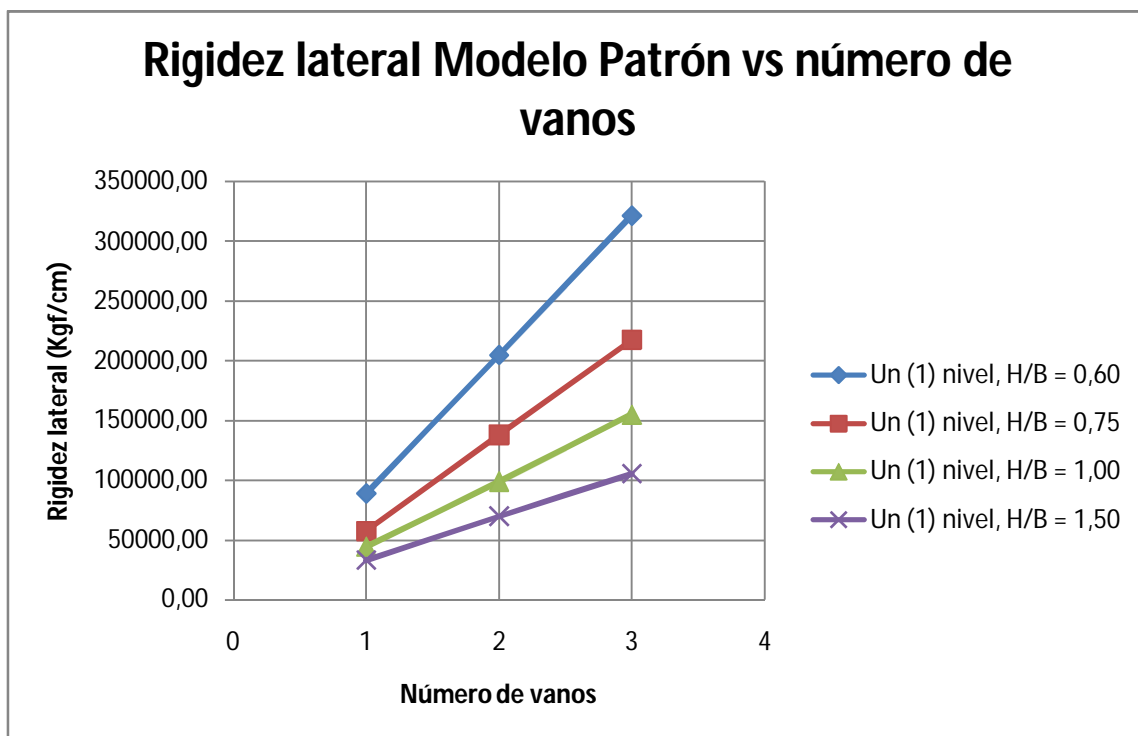


Gráfico 2. Gráfico de rigidez lateral patrón en función del número de vanos para todos los modelos patrón de un (1) nivel.

Del gráfico anterior se observa que al incrementar la relación de aspecto disminuye la rigidez lateral equivalente, lo que implica una relación directamente proporcional.

Se nota que al incrementar de uno a dos vanos, para todos los casos la rigidez lateral tiene una razón de incremento promedio de 2,30 veces la rigidez lateral de un vano; al aumentar de uno a tres la razón de incremento de rigidez promedio es de 3,50 veces la rigidez lateral de un vano. En todos los casos la tendencia de incremento es aproximadamente lineal; este mismo comportamiento se repite para los modelos de dos niveles con sus respectivas variaciones de número de vanos y relaciones de aspecto. La rigidez lateral para modelos de dos vanos es un 50% de la rigidez correspondiente a la de un nivel.

V.3.2. Resultados del estudio del comportamiento de los porcentajes de área a compresión y tracción de los modelos patrón

Tomando todos los modelos patrón simulados y a través del procedimiento descrito en el capítulo III, sección III.3.3.4.1 se obtuvieron todos los valores de porcentaje de área sometida a esfuerzos de tracción y a esfuerzos de compresión. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 24. Porcentaje de área sometida a tracción para los modelos patrón de un (1) nivel

Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Porcentaje de área a tracción (%)					
	H (cm)	B (cm)	Un (1) Vano un (1) nivel	Dos (2) Vanos - un (1) nivel		Tres (3) Vanos - un (1) nivel		
			Muro A	Muro A	Muro B	Muro A	Muro B	Muro C
0,60	300	500	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31
0,75	300	400	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55
1,00	300	300	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72
1,50	300	200	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84

Tabla 25. Porcentaje de área sometida a tracción para los modelos patrón de dos (2) niveles

Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Porcentaje de área a tracción (%)							
			Un (1) Vano dos (2) niveles		Dos (2) Vanos - dos (2) niveles		Tres (3) Vanos - dos (2) niveles			
	H (cm)	B (cm)	Muro A	Muro B	Muro C	Muro A	Muro B	Muro D	Muro E	Muro F
0,60	300	500	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31
			33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	33,31	
0,75	300	400	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55
			44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	
1,00	300	300	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72
			45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	45,72	
1,50	300	200	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84
			45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	45,84	

Observando los valores de las tablas anteriores se evidencia que la variación de número de vanos y niveles no influyen en los valores área a tracción. Tomando sólo los valores del porcentaje de área a tracción de los modelos de un vano y un nivel se presenta el siguiente gráfico de variación del porcentaje de área a tracción en función de la relación de aspecto:

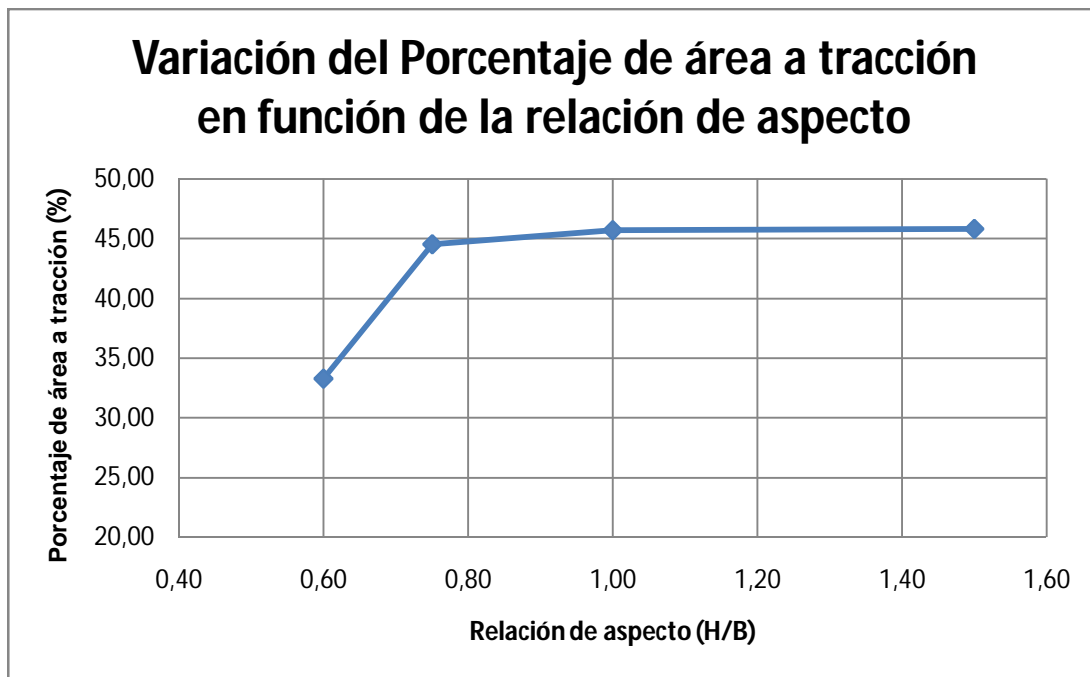


Gráfico 3. Porcentaje de área a tracción de modelos patrón según la relación de aspecto.

Del gráfico anterior, se observa que a medida que la relación de aspecto se incrementa el área a tracción también se incrementa, para relaciones de aspecto menores a 0,75 el incremento es significativo ya que el porcentaje de área sometida a tracción varía de un 33,31% a un 44,55% para relaciones de aspecto de 0,60 y 0,75 respectivamente; para relaciones mayores a 0,75 el porcentaje tiende a permanecer constante como se observa en la Tabla 24 y 25; ya que para una relación de aspecto de 1,50 el porcentaje es de 45,85, lo cual nos indica que la variación de porcentaje de área a tracción entre modelos de relación de aspecto igual a 0,75 y 1,50 es de un 1,30%.

Complementando el estudio, se obtuvieron resultados de tres modelos adicionales según lo especificado en la Tabla 16 del capítulo III, la cual muestra el porcentaje de área a tracción de los modelos patrón incluyendo las tres nuevas relaciones de aspecto.

Tabla 26. Porcentaje de área a tracción para el estudio de los modelos de un (1) vano un (1) nivel

Porcentaje de área a tracción (%)			
Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Un (1) Vano un (1) nivel
	H (cm)	B (cm)	
0,50	300	600	25,65
0,60	300	500	33,31
0,75	300	400	44,55
1,00	300	300	45,72
1,25	300	240	45,65
1,50	300	200	45,84
2,00	300	150	45,89

Se elaboró nuevamente un gráfico de área a tracción en función de las siete (7) relaciones de aspecto con la finalidad de mejorar la tendencia de la curva, el cual se presenta a continuación:

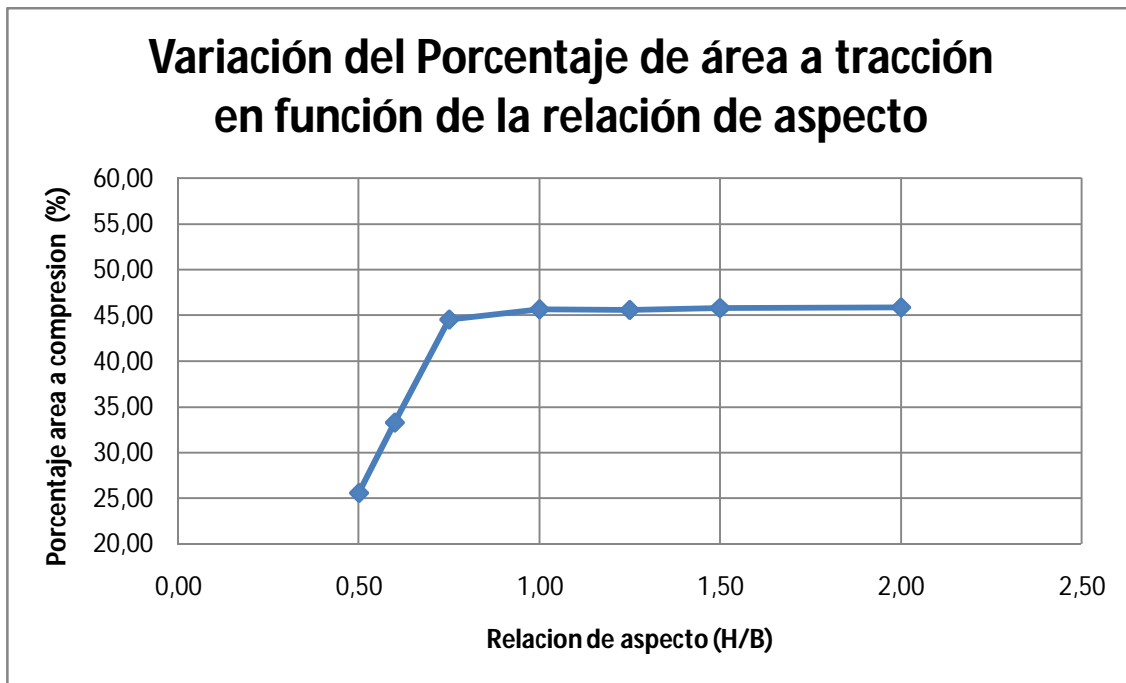


Gráfico 4. Porcentaje de áreas a tracción, incluyendo los tres modelos complementarios.

Del gráfico anterior, Se observa claramente lo antes mencionado, para relaciones de aspecto menores a 0,75 el decremento del área es significativo y a partir del mismo punto tiende a ser constante.

Partiendo de que a medida que la relación de aspecto se incrementa, el muro se hace más esbelto y empieza a tener un comportamiento de deformación a flexión, por lo tanto el área a tracción se debe incrementar, tal como se observa en el Gráfico 4. En el caso de relaciones de aspecto menores a 0,75, el comportamiento del muro se da por deformaciones a corte y el área a tracción disminuye; según se muestra en el gráfico anterior.

Calculando los valores de porcentaje de área a compresión se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 27. Porcentaje de área a compresión para el estudio de los modelos de un (1) vano un (1) nivel

Porcentaje de área a compresión (%)			
Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Un (1) Vano un (1) nivel
	H (cm)	B (cm)	
0,50	300	600	74,35
0,60	300	500	66,69
0,75	300	400	55,45
1,00	300	300	54,28
1,25	300	240	54,35
1,50	300	200	54,16
2,00	300	150	54,11

Graficando los valores del porcentaje de área sometida a compresión, en función de la relación de aspecto, tomados de la tabla anterior se obtiene:

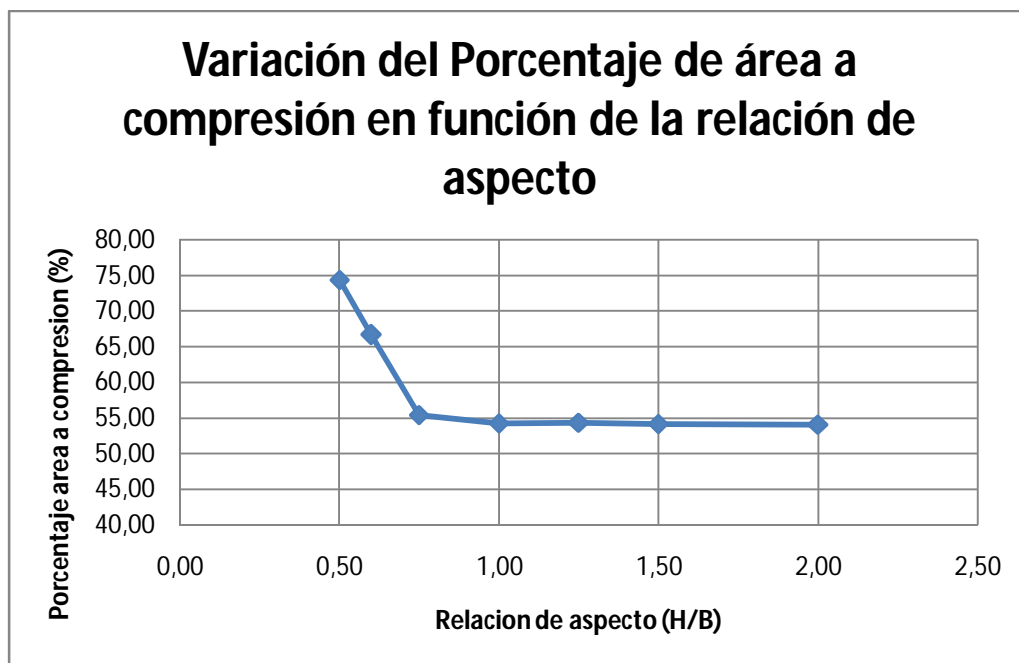


Gráfico 5. Porcentaje de áreas a compresión incluyendo los tres modelos complementarios.

Del gráfico anterior, evidentemente se observa que la curva de áreas a compresión es la inversa de la curva de áreas a tracción, se afirma que el área a compresión tiende a ser constante para muros esbeltos, con relación de aspecto mayor a 0,75; para muros con menor relación de aspecto el área a compresión se

incrementa de forma significativa lo que nos indica que ese tipo de muros trabajan a corte debido a su configuración geométrica.

De los resultados anteriores se establece que la variación de número de vanos y de pisos no modifica el porcentaje de área a tracción ya que este depende de la geometría de del muro y la disposición de los elementos confinantes. El porcentaje de área sometida a tracción se incrementa a medida que la relación de aspecto aumenta. Para relaciones de aspecto menores a 0,75 el área sometida a tracción decrece de un 44,55% a un 25,65% lo cual representa una diferencia de 18,90% entre una relación de aspecto de 0,75 y 0,50; en cambio para relaciones de aspecto mayores a 0,75 el área sometida a tracción tiende a ser constante ya que la variación es de 1,84% entre una relación de aspecto de 0,75 y 2,00. El área sometida a compresión tiende a ser constante para relaciones de aspecto mayores a 0,75; para relaciones menores de esta tiende a incrementarse hasta un 18,90%.

IV.4. Resultados del estudio del modelo equivalente de biela diagonal simple

IV.4.1. Resultados del cálculo de anchos efectivos (W)

A continuación se presentan los valores de ancho efectivo (w) calculados por las propuestas de: Holmes, Stafford, Paulay, Bazán y Meli, la cuales se encuentran especificadas en el Capítulo II, sección II.9.1.3. Referente al modelo de biela diagonal simple:

Tabla 28. Ancho efectivo (w) según modelo de Holmes para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles

Propuesta Holmes	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Ancho Efectivo w (cm)			
1	1	1	188,79	161,17	136,13	115,36
		2	188,79	161,17	136,13	115,36
2	1	1	188,79	161,17	136,13	115,36
		2	188,79	161,17	136,13	115,36
3	1	1	188,79	161,17	136,13	115,36
		2	188,79	161,17	136,13	115,36

Se observa que la formulación sólo depende de la geometría del modelo ya que al modificar el número de vanos e incrementar el número de pisos, el ancho resultante se mantiene constante. Al incrementar la relación de aspecto disminuye el ancho efectivo lo cual indica que es una relación inversamente proporcional esto se debe a que la formulación que establece el autor (ver punto II.9.1.3.1. Modelo de Holmes, Ecuación 6), ya que el ancho depende de la longitud de la biela diagonal la cual disminuye a medida que la relación de aspecto aumenta.

A continuación se presenta un gráfico que muestra la variación del ancho efectivo de la biela diagonal en función de la relación de aspecto.

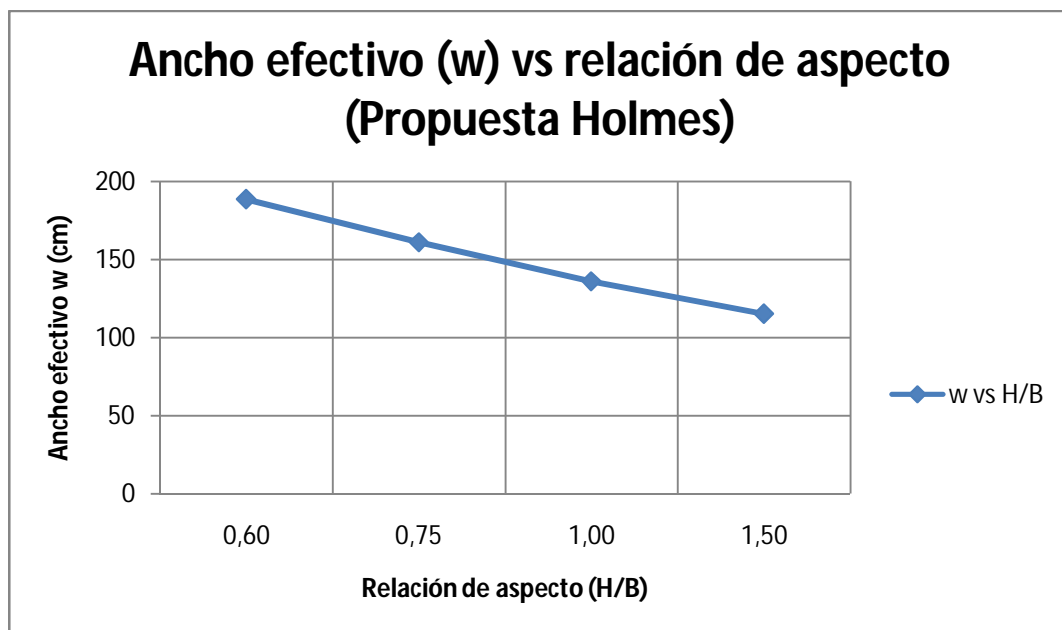


Gráfico 6. Variación del ancho efectivo (w) para la propuesta Holmes.

Claramente se observa que a medida que a medida que la relación de aspecto aumenta el ancho efectivo (w) disminuye.

A continuación se muestra los resultados de ancho efectivo (w) según el modelo establecido por Stafford, para uno, dos y tres vanos, de uno y dos niveles, variando la relación de aspecto de 0,60 a 1,00.

Tabla 29. Ancho efectivo (w) según modelo de Stafford para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles

Propuestas Stafford	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Ancho efectivo w (cm)			
1	1	1	102,55	102,55	102,55	102,55
		2	102,55	102,55	102,55	102,55
2	1	1	102,55	102,55	102,55	102,55
		2	102,55	102,55	102,55	102,55
3	1	1	102,55	102,55	102,55	102,55
		2	102,55	102,55	102,55	102,55

Para esta propuesta, se nota que el ancho efectivo (w) se mantiene constante a medida que varía el número de vanos, el número de pisos y la relación de aspecto. Es importante mencionar que la determinación del ancho efectivo (w) por medio de esta propuesta, depende de la altura del modelo y no de su relación alto/ancho, por lo que al mantener una altura constante, tratándose de este caso, el ancho efectivo (w) permanece constante (Ver Ecuación 7).

El gráfico siguiente muestra el ancho obtenido al variar la relación de aspecto

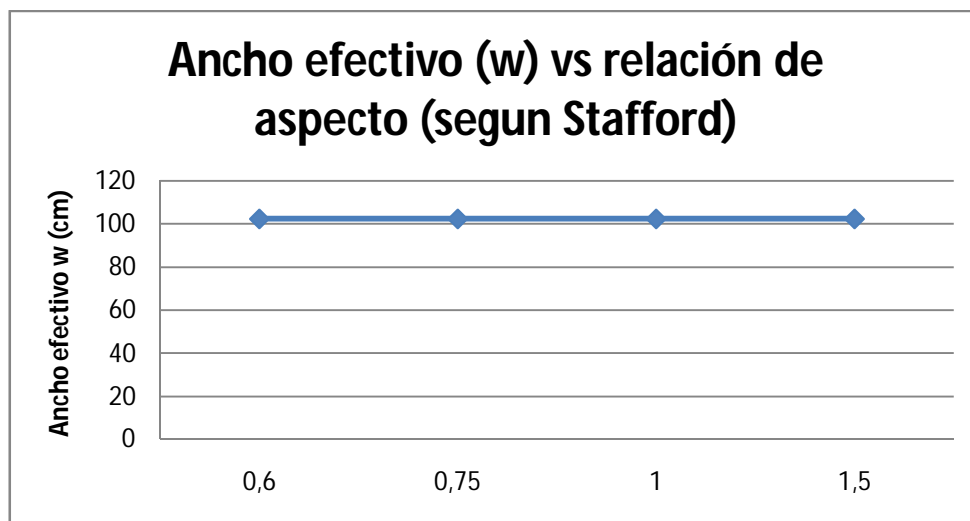


Gráfico 7. Variación del ancho efectivo (w) para la propuesta Stafford.

Se observa en el gráfico anterior que al modificar la relación de aspecto el ancho efectivo obtenido por Stafford se mantiene constante.

La siguiente tabla muestra el ancho efectivo obtenido según el modelo de Paulay, para los casos estudiados.

Tabla 30. Ancho efectivo (w) según modelo de Paulay para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles

Propuesta Paulay	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Ancho efectivo w (cm)			
1	1	1	141,59	120,88	102,1	86,52
		2	141,59	120,88	102,1	86,52
2	1	1	141,59	120,88	102,1	86,52
		2	141,59	120,88	102,1	86,52
3	1	1	141,59	120,88	102,1	86,52
		2	141,59	120,88	102,1	86,52

La formulación (Ecuación 11) no depende del incremento o disminución del número de vanos o niveles, ya que el ancho efectivo (w) permanece constante para una misma relación de aspecto variado el número de vanos y niveles.

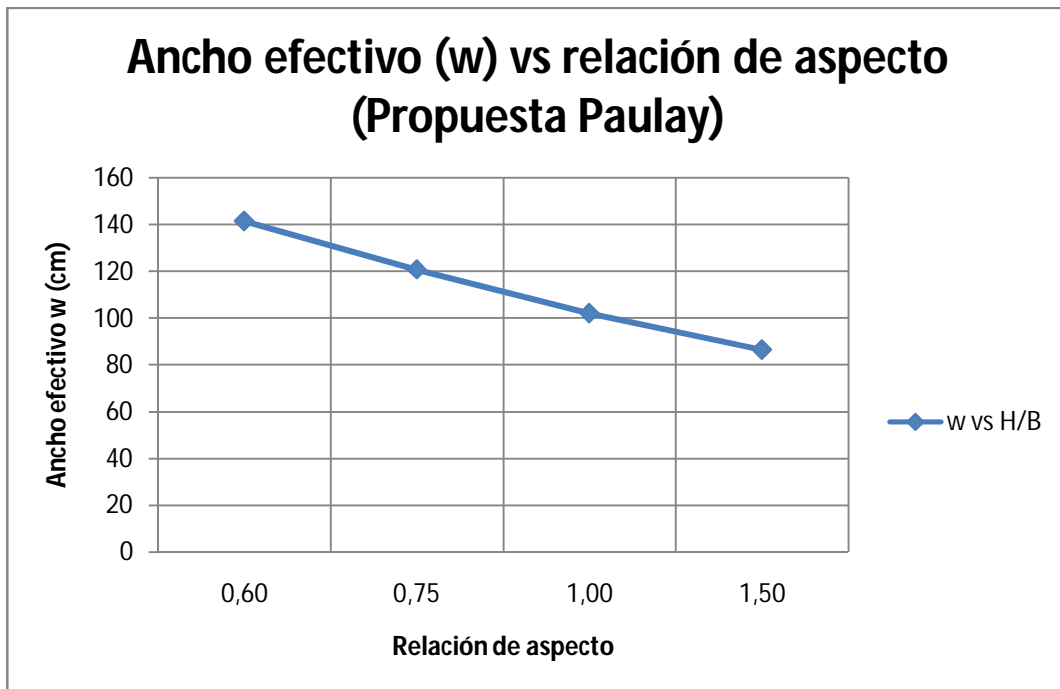


Gráfico 8. Variación del ancho efectivo (w) para la propuesta Paulay.

Al igual que la propuesta de Holmes, Paulay establece un ancho efectivo (w) que varía según la relación de aspecto de forma inversa, ya que a menor relación de aspecto mayor ancho efectivo.

Se muestra en la tabla a continuación los anchos efectivos obtenidos según la formulación propuesta por Bazán y Meli, para los casos en estudio.

Tabla 31. Ancho efectivo (w) según modelo de Bazán y Meli para uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, incrementando el número de niveles.

Propuesta Bazán y Meli	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Ancho efectivo w (cm)			
1	1	1	153,01	165,99	188,58	237,74
		2	153,01	165,99	188,58	237,74
2	1	1	153,01	165,99	188,58	237,74
		2	153,01	165,99	188,58	237,74
3	1	1	153,01	165,99	188,58	237,74
		2	153,01	165,99	188,58	237,74

Se observa que a medida que aumenta la relación de aspecto el ancho efectivo (w) se incrementa.

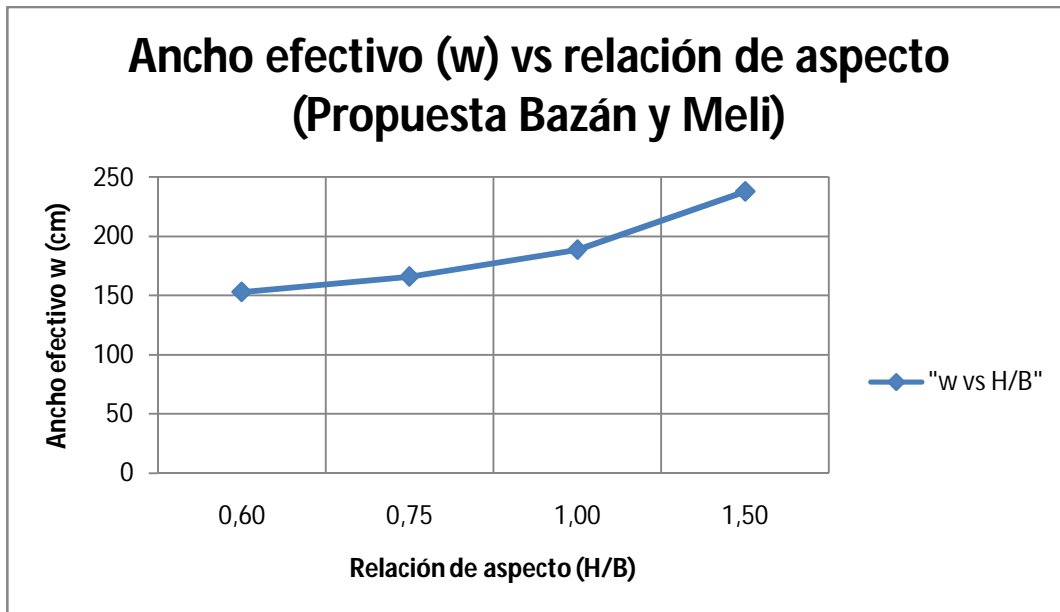


Gráfico 9. Variación del ancho efectivo (w) para la propuesta Bazán y Meli.

Se observa que el ancho efectivo propuesto por Bazán y Meli, es directamente proporcional a la relación de aspecto ya medida que la relación de aspecto se incrementa el ancho efectivo también (Ecuación 12).

Es importante mencionar que la modificación del número de vanos o de pisos no afecta el cálculo del ancho efectivo (w) para ninguna de las propuestas, ya que permanece constante para una relación de aspecto fija.

Elaborando un gráfico comparativo entre todos los valores de ancho efectivo (w) por cada propuesta en función de la relación de aspecto se observa lo siguiente:

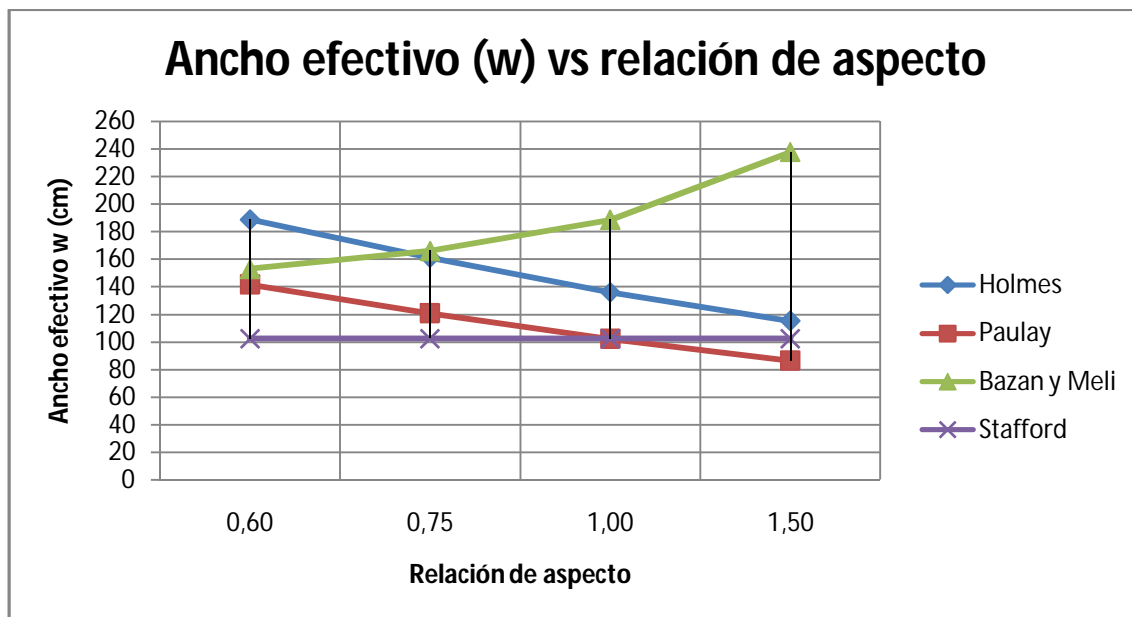


Gráfico 10. Comparación del ancho efectivo (w) para cada propuesta en función de la relación de aspecto.

El modelo de Holmes al igual que el de Paulay, proponen una disminución del ancho efectivo (w) a medida que la relación de aspecto se incrementa, entre estos dos modelos se observa que el modelo de Paulay da valores de ancho efectivo (w) menores al modelo de Holmes. El propuesta de Stafford establece un ancho efectivo (w) constante, ya que depende directamente de la altura del modelo, en cambio el modelo de Bazán y Meli establece un incremento del ancho efectivo a medida que la relación de aspecto aumenta.

IV.4.2. Resultados del cálculo de la rigidez lateral

Con todos los anchos efectivos (w) determinados, se calcularon los valores de rigidez lateral equivalente para cada propuesta. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 32. Resultados de rigidez lateral según anchos efectivos (w) de Holmes para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.

Modelo Holmes	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez lateral (Kgf/cm)			
1	1	1	88815,12	76904,52	59262,40	35108,08
		2	44099,84	38144,54	29323,48	17246,32
2	1	1	177219,95	153398,75	118114,50	69805,87
		2	88148,40	76237,80	58595,68	34441,36
3	1	1	265624,78	229892,99	176966,61	104503,66
		2	132196,96	114331,06	87867,88	51636,40

Se presenta la siguiente gráfica que muestra los valores de rigidez lateral equivalente según Holmes en función de la relación de aspecto, obtenida con los valores de la tabla anterior:

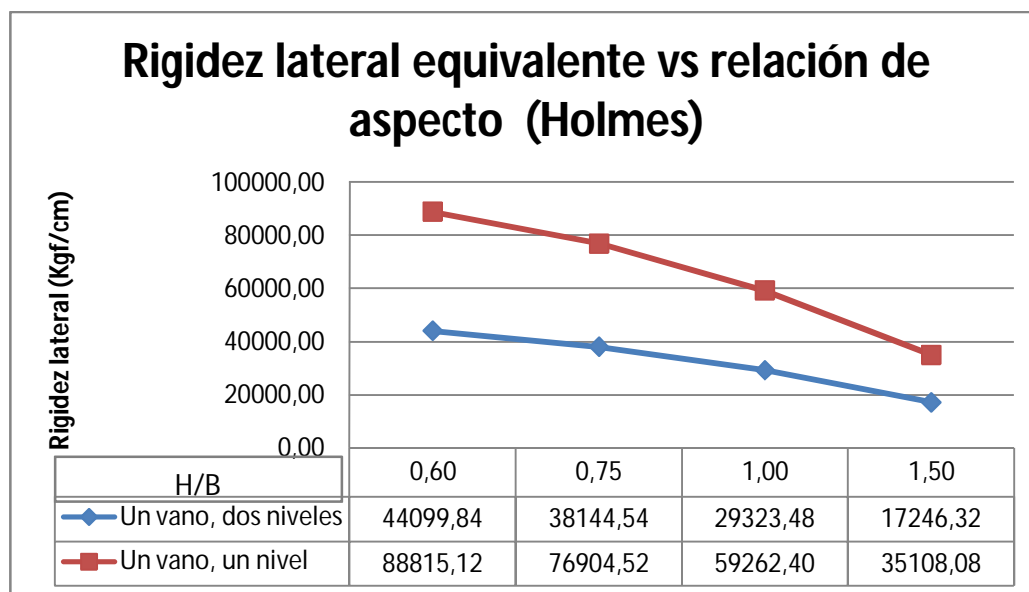


Gráfico 81. Gráfico de rigidez lateral en función de incremento de relación de aspecto para modelos según Holmes de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa que al incrementar la relación de aspecto la rigidez lateral disminuye. Al aumentar a 2 niveles el modelo, la rigidez lateral disminuye un 50% en relación a la de un nivel, para la misma cantidad de vanos.

La rigidez lateral de tres vanos es 3 veces la rigidez lateral de un vano, la rigidez lateral de dos vanos es 2 veces la rigidez lateral de un vano, lo que implica un crecimiento lineal directamente proporcional al incremento del número de vanos.

Se presenta la siguiente tabla, la cual indica los resultados de rigidez lateral equivalente obtenidos según el modelo propuesto por Stafford:

Tabla 33. Resultados de rigidez según anchos efectivos (w) de Stafford para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.

Modelo Stafford	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez (Kgf/cm)			
1	1	1	48620,61	49233,93	44848,39	31300,82
		2	24002,59	24309,25	22116,48	15342,69
2	1	1	96830,93	98057,57	89286,48	62191,35
		2	47953,89	48567,21	44181,67	30634,10
3	1	1	145041,26	146881,21	133724,58	93081,87
		2	71905,20	72825,17	66246,86	45925,51

A continuación se presenta la gráfica que muestra los valores de rigidez lateral equivalente en función de la relación de aspecto según la propuesta de Stafford, obtenida con los valores de la tabla anterior:

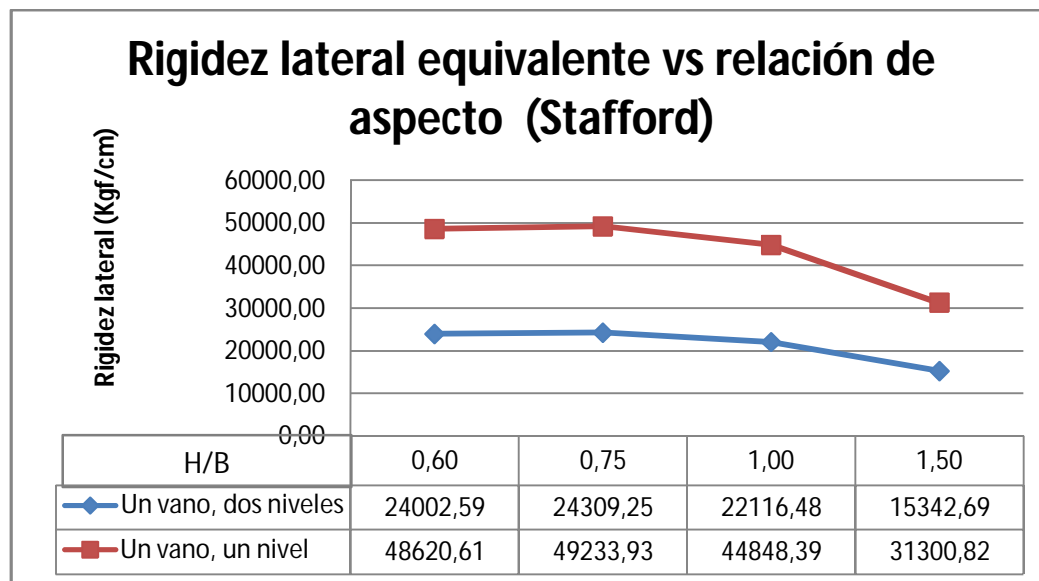


Gráfico 12. Gráfico de rigidez lateral en función de incremento de relación de aspecto para modelos según Stafford de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa que la rigidez se incrementa un 306,66 Kgf/cm y 613,32 Kgf/cm para modelos de uno y dos niveles respectivamente, hasta una relación de aspecto de 0,75 y luego comienza a disminuir. Se mantienen las relaciones, de que al aumentar un nivel la rigidez lateral disminuye un 50%, la rigidez lateral de dos vanos es 2 veces la de un vano y la de tres vanos corresponde a 3 veces la de un vano.

La tabla a continuación muestra los resultados de rigidez lateral equivalente obtenidos según la propuesta de Paulay:

Tabla 34. Resultados de rigidez según anchos efectivos de Paulay para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.

Modelos Paulay	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez (Kgf/cm)			
1	1	1	66816,48	57883,53	44651,94	26536,20
		2	33100,53	28634,05	22018,25	12960,39
2	1	1	133222,68	115356,78	88893,59	52662,12
		2	66149,77	57216,82	43985,22	25869,49
3	1	1	199628,87	172830,03	133135,25	78788,03
		2	99199,01	85799,58	65952,19	38778,58

La gráfica a continuación expresa la variación de la rigidez lateral equivalente en función de la relación de aspecto para el modelo de Paulay comparando los valores de rigidez lateral para uno y dos niveles:

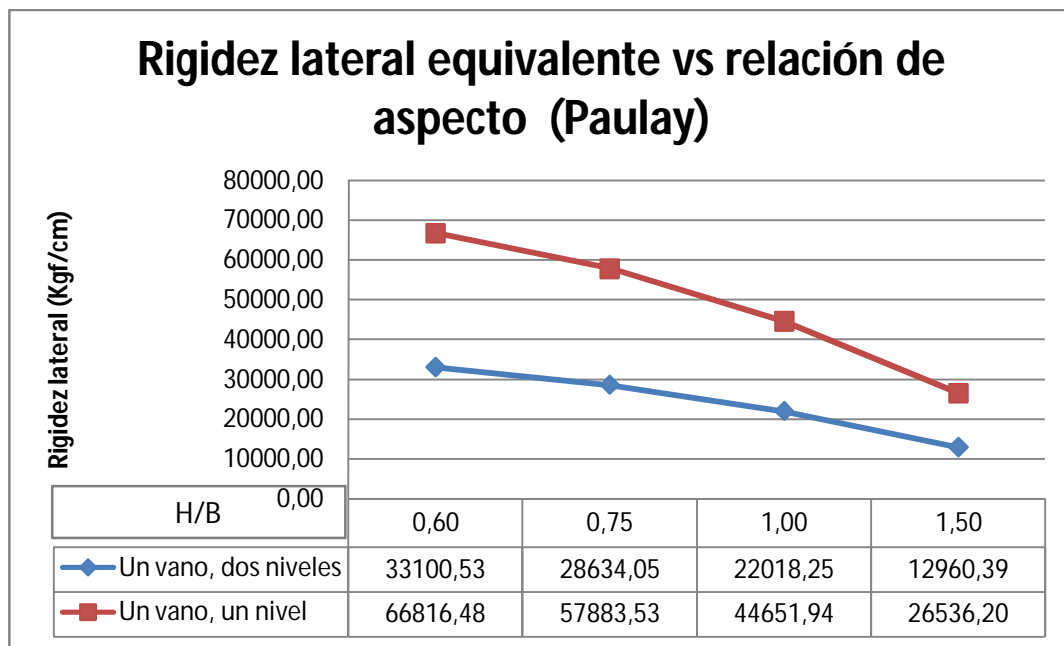


Gráfico 13. Gráfico de rigidez lateral en función de incremento de relación de aspecto para modelos según Paulay de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa que al aumentar la relación de aspecto disminuye la rigidez lateral. Al incrementar a dos niveles el modelo, la rigidez lateral disminuye un 50% en función de la rigidez correspondiente a un nivel, para la misma cantidad de vanos. La rigidez lateral aumenta a medida que el número de vanos se incrementa.

La siguiente tabla muestra los valores de rigidez lateral obtenidos por el modelo propuesto por Bazán y Meli.

Tabla 35. Resultados de rigidez según anchos efectivos de Bazán y Meli para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles.

Modelo Bazán	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez (Kgf/cm)			
Modelo Bazán	1	1	72138,54	79179,37	81778,64	71479,15
		2	35761,55	39281,97	40581,60	35431,86
	2	1	143866,78	157948,46	163146,99	142548,00
		2	71471,82	78512,66	81111,92	70812,43
	3	1	215595,03	236717,54	244515,34	213616,86
		2	107182,08	117743,34	121642,24	106193,00

A continuación se presenta un gráfico que muestra la comparación de la rigidez lateral obtenida para uno y dos niveles, variando la relación de aspecto, con los datos de la Tabla 35:

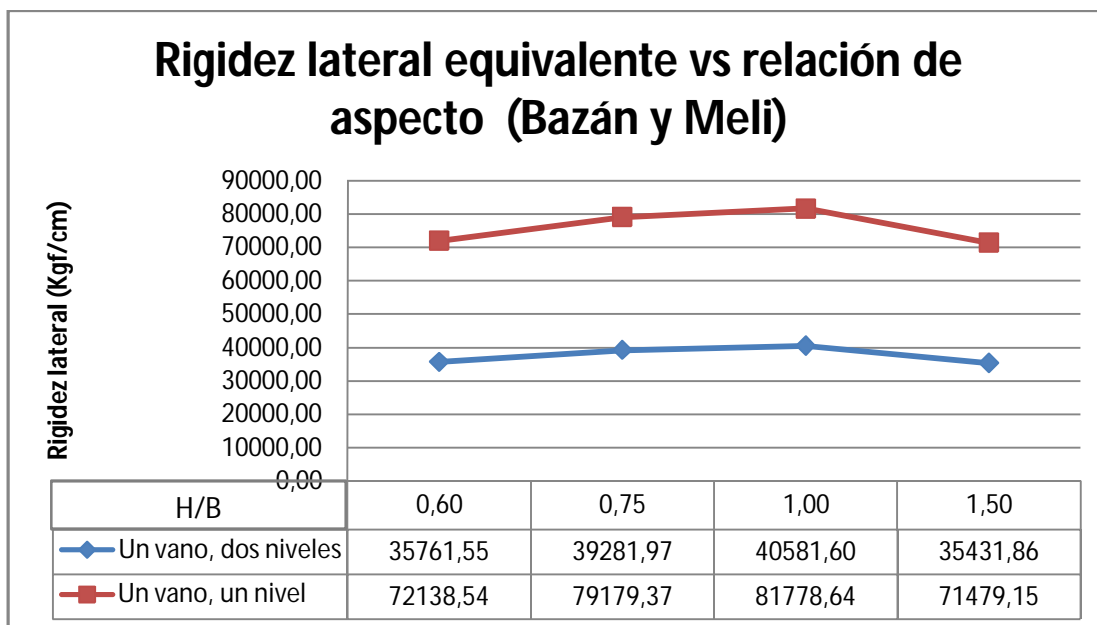


Gráfico 14. Gráfico de rigidez en función de incremento de relación de aspecto para modelos según Bazán y Meli de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa que la tendencia de los valores es a incrementarse hasta una relación de aspecto igual a 1,00 a partir de ella, para relaciones de aspecto mayores la rigidez disminuye. Continua cumpliéndose la relación existente entre los valores de rigidez. La rigidez lateral se incrementa a medida que se aumenta el número de vanos.

El siguiente gráfico muestra la comparación de los resultados de la rigidez lateral obtenidos por los cuatro (4) propuestas de modelos equivalentes de biela simple (Holmes, Paulay; Stafford; Bazán y Meli) en función de la rigidez obtenida por el modelo patrón.

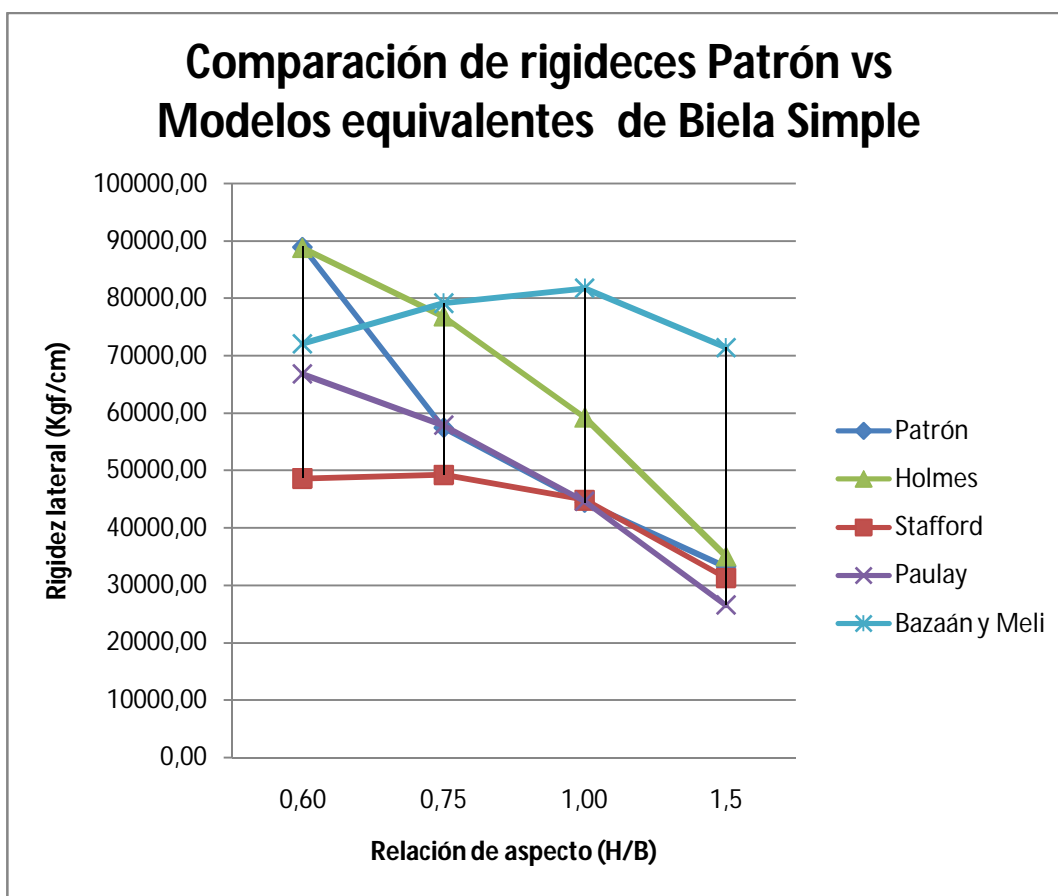


Gráfico 15. Gráfico comparativo de los resultados de rigidez lateral de los modelos equivalentes de biela simple en función del modelo patrón.

Observando el gráfico y tomando los resultados anteriores, se establece que el modelo de Holmes y de Paulay propone una disminución de rigidez al incrementar la relación de aspecto, sin embargo los resultados de rigidez obtenidos por Paulay son menores a los resultantes por Holmes. Stafford propone un incremento de rigidez hasta una relación de aspecto menores e iguales a 0,75, para relaciones de aspecto mayores a esta la rigidez disminuye. Bazán y Meli proponen un incremento de la rigidez lateral hasta una relación de aspecto igual a la unidad, a partir de esta la rigidez disminuye.

IV.5. Resultados del estudio del modelo equivalente de columna ancha

Los resultados del cálculo de la rigidez lateral a través del modelo equivalente de columna ancha se muestran a continuación:

Tabla 36. Resultados de rigidez lateral obtenidos por el modelo de columna ancha según Bazán y Meli para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles

Modelo Bazán y Meli (CA)	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez (Kgf/cm)			
1	1	1	42958,64	41232,64	35302,67	25110,38
		2	17894,88	15796,72	11953,25	6956,94
2	1	1	83969,87	81889,25	71802,87	53653,50
		2	38345,07	35736,05	29185,31	19202,98
3	1	1	124836,64	122318,67	107972,02	81752,95
		2	58769,39	55825,79	46895,46	32390,00

Observando los valores de la tabla anterior, se aprecia que la rigidez para modelos de dos vanos corresponde a un incremento promedio de 2,25 la rigidez de un vano y la rigidez para modelos de tres vanos corresponde a un incremento promedio de 3,53 veces la rigidez lateral de un vano.

A continuación se presenta un gráfico de rigidez lateral equivalente en función de la relación de aspecto para el modelo de columna ancha de Bazán y Meli, tomando los valores de la Tabla 36:

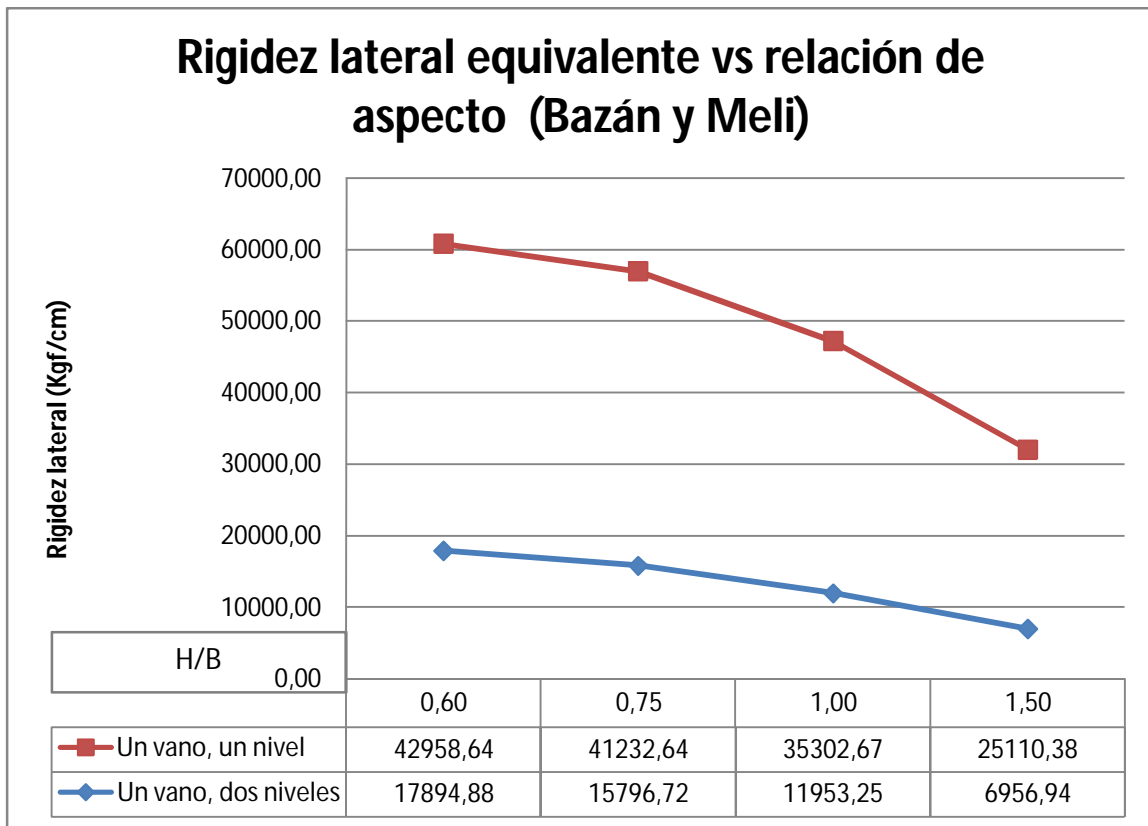


Gráfico 16. Gráfico de rigidez en función la relación de aspecto según modelo de columna ancha por Bazán y Meli de un (1) vano, con dos y un nivel.

Del gráfico anterior se observa que existe una disminución de la rigidez lateral a medida que se incrementa la relación de aspecto. El comportamiento para modelos de uno y de dos niveles es similar, y se observa que la diferencia promedio existente entre esto es de un 25065,75 Kgf/ cm para modelos de relación de aspecto 0,60 y de 18153,44 Kgf/cm para modelos de relación de aspecto 1,50.

La siguiente tabla muestra los resultados de rigidez lateral equivalente obtenidos según el modelo de columna ancha por la formulación R.L.E. (Ecuación 31)

Tabla 37. Resultados de rigidez obtenidos por el modelo de columna ancha por la Formulación R.L.E. para modelos de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos, con uno (1) y dos (2) niveles

Modelo R.L.E (CA)	Número de vanos	Número de niveles	Relación de aspecto			
			0,60	0,75	1,00	1,50
			Rigidez (Kgf/cm)			
1	1	1	101870,37	77900,46	54281,81	31408,33
		2	34557,78	24773,23	15743,78	7899,22
2	1	1	223533,86	174672,95	126033,67	77900,46
		2	88832,35	66432,05	44853,07	24773,23
3	1	1	346099,05	272511,49	199084,29	126033,67
		2	146656,34	111731,26	77554,63	44853,07

Tomando los valores de la Tabla 37, se observa que la rigidez lateral disminuye a medida que la relación de aspecto se incrementa. Se aprecia que para modelos de dos vanos la rigidez lateral representa un promedio de 2,60 veces la rigidez correspondiente a modelos de un vano; para modelos de tres vanos la rigidez lateral representa un promedio de 4,3 veces la rigidez de modelos de un vano.

A continuación se presenta un gráfico de la variación de la rigidez en función de la relación de aspecto para la Formulación R.L.E:

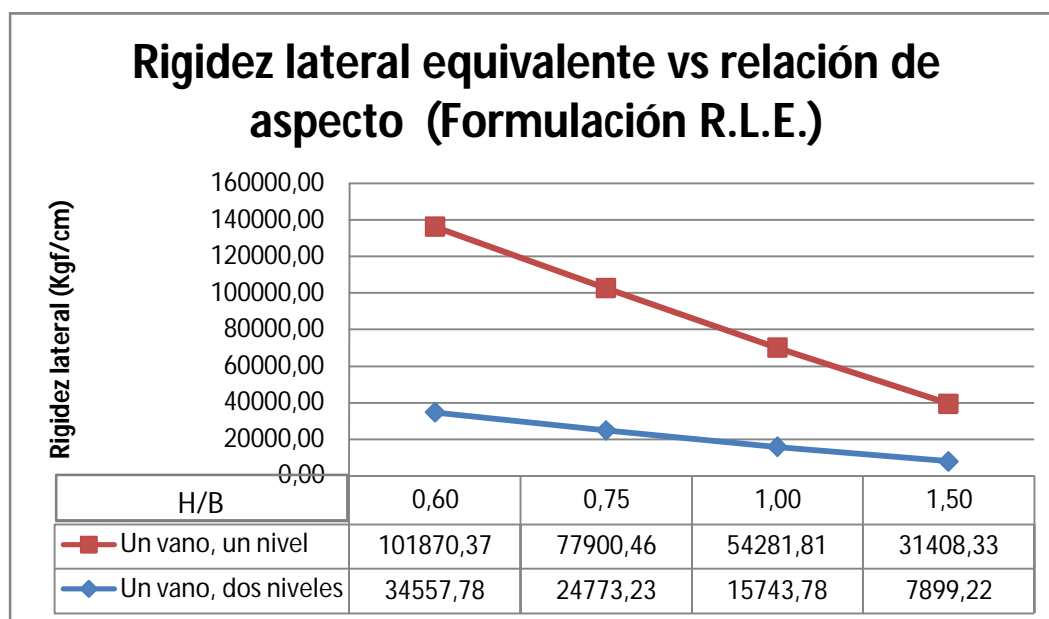


Gráfico 9. Gráfico de rigidez en función la relación de aspecto según modelo de columna ancha por la Formulación R.L.E de un (1) vano, con dos y un nivel.

Se observa en la gráfica anterior qué medida que se incrementa la relación de aspecto la rigidez lateral equivalente disminuye, lo cual nos indica que es una relación inversamente proporcional. Al comparar los modelos de uno y dos niveles de relación de aspecto 0,60 y 1,50 se obtienen diferencias de 67312,58 Kgf/cm y de 23509,10 Kgf/cm respectivamente.

El siguiente gráfico muestra la comparación de los resultados de la rigidez lateral obtenidos por los dos (2) propuestas de modelos equivalentes de columna ancha (Bazán y Meli, Formula R.L.E.) en función de la rigidez obtenida por el modelo patrón.

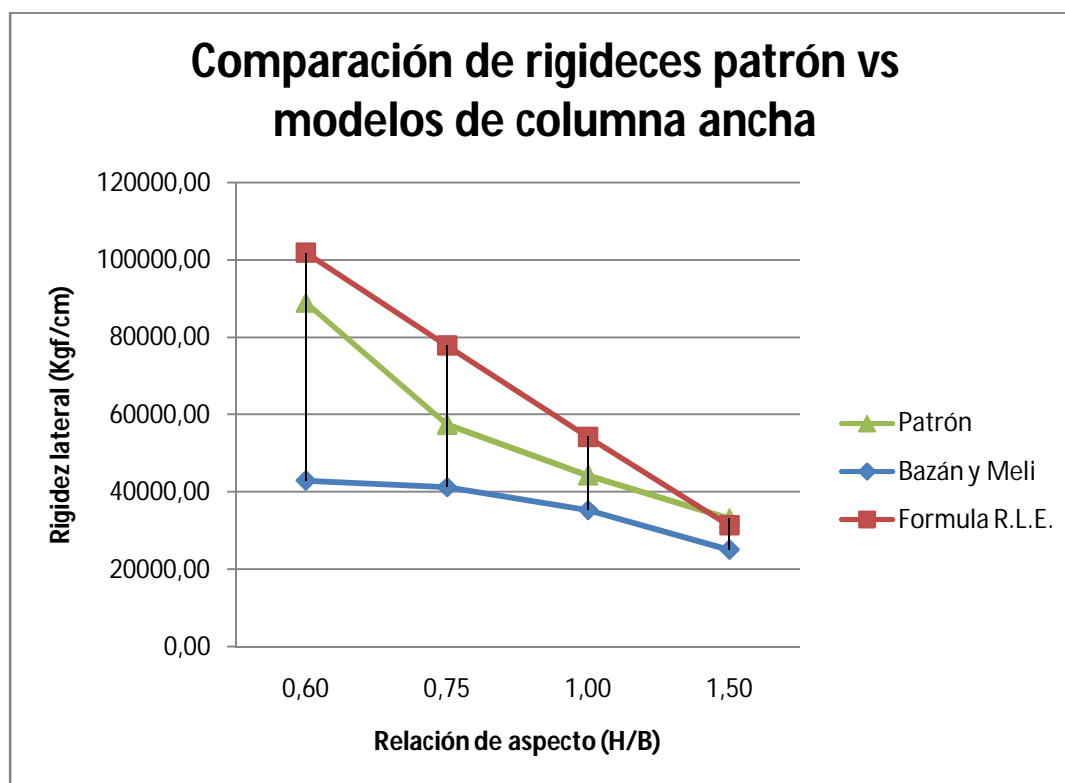


Gráfico 10. Gráfico comparativo de los resultados de rigidez lateral de los modelos equivalentes de columna ancha en función del modelo patrón.

Se observa en la grafica anterior que la rigidez resultante de ambas propuestas de modelos equivalentes de columna ancha disminuye a medida que la

relación de aspecto aumenta. Ambos modelos se ajustan aproximadamente para el punto de relación de aspecto igual a 1,50.

IV.6. Resultados de la comparación entre los modelos patrón y los modelos equivalentes

A través del proceso de comparación de la rigidez obtenida por los modelos equivalentes en función de la rigidez resultante de los modelos patrón, descrito en el Capítulo III, sección III.3.2.4, se obtuvieron los siguientes porcentajes de error:

Tabla 38. Porcentajes de error para el modelo equivalente de biela diagonal simple

Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Modelo Equivalente	Porcentaje de Error (%)					
	H (cm)	B (cm)		Un (1) Vano - un (1) nivel	Un (1) Vano - dos (2) niveles	Dos (2) Vanos - un (1) nivel	Dos (2) Vanos - dos (2) niveles	Tres (3) Vanos - un (1) nivel	Tres (3) Vanos - dos (2) niveles
0,60	300	500	Holmes	-0,2	-0,7	-13,5	-12,1	-17,4	-17,2
			Stafford	-45,4	-46,0	-52,7	-52,2	-54,9	-55,0
			Paulay	-24,9	-25,5	-35,0	-34,0	-37,9	-37,9
			Bazán	-18,9	-19,5	-29,8	-28,7	-32,9	-32,9
0,75	300	400	Holmes	33,8	30,2	11,2	15,5	5,8	5,6
			Stafford	-14,3	-17,0	-28,9	-26,4	-32,4	-32,7
			Paulay	0,7	-2,2	-16,4	-13,3	-20,5	-20,7
			Bazán	37,8	34,1	14,5	18,9	8,9	8,8
1,00	300	300	Holmes	33,6	32,5	19,4	18,0	14,1	12,7
			Stafford	1,1	-0,1	-9,7	-11,1	-13,7	-15,0
			Paulay	0,6	-0,5	-10,1	-11,5	-14,1	-15,4
			Bazán	84,3	83,3	64,9	63,3	57,7	56,1
1,50	300	200	Holmes	5,6	3,8	-0,1	-1,4	-0,8	-2,8
			Stafford	-5,8	-7,7	-11,0	-12,3	-11,7	-13,6
			Paulay	-20,2	-22,0	-24,6	-25,9	-25,2	-27,0
			Bazán	115,0	113,2	104,0	102,7	102,7	99,9

Tabla 39. Porcentajes de error para el modelo equivalente de columna ancha

Relación de Aspecto (H/B)	Geometría		Modelo Equivalente	Porcentaje de Error (%)					
	H (cm)	B (cm)		Un (1) Vano - un (1) nivel	Un (1) Vano - dos (2) niveles	Dos (2) Vanos - un (1) nivel	Dos (2) Vanos - dos (2) niveles	Tres (3) Vanos - un (1) nivel	Tres (3) Vanos - dos (2) niveles
0,60	300	500	Bazán y Meli (CA)	-59,0	-59,7	-59,0	-61,8	-61,2	-63,2
			R.L.E	14,5	-22,2	9,1	-11,4	7,6	-8,2
0,75	300	400	Bazán y Meli (CA)	-28,3	-46,1	-40,6	-45,9	-43,7	-48,4
			R.L.E	35,5	-15,4	27,4	0,6	25,4	3,2
1,00	300	300	Bazán y Meli (CA)	-27,4	-46,0	-27,4	-41,2	-30,4	-39,8
			R.L.E	22,4	-28,9	11,5	-9,7	28,4	-0,5
1,50	300	200	Bazán y Meli (CA)	-24,5	-58,1	-23,2	-45,0	-22,4	-39,0
			R.L.E	-5,5	-52,5	11,5	-29,1	19,6	-15,6

A continuación se muestran los gráficos comparativos de los porcentajes de error entre los modelos patrón y los modelos equivalentes para las diferentes relaciones de aspecto, variaciones de número de vanos y número de niveles por cada modelo equivalente estudiado:

IV.6.1. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Holmes.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, de un nivel variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

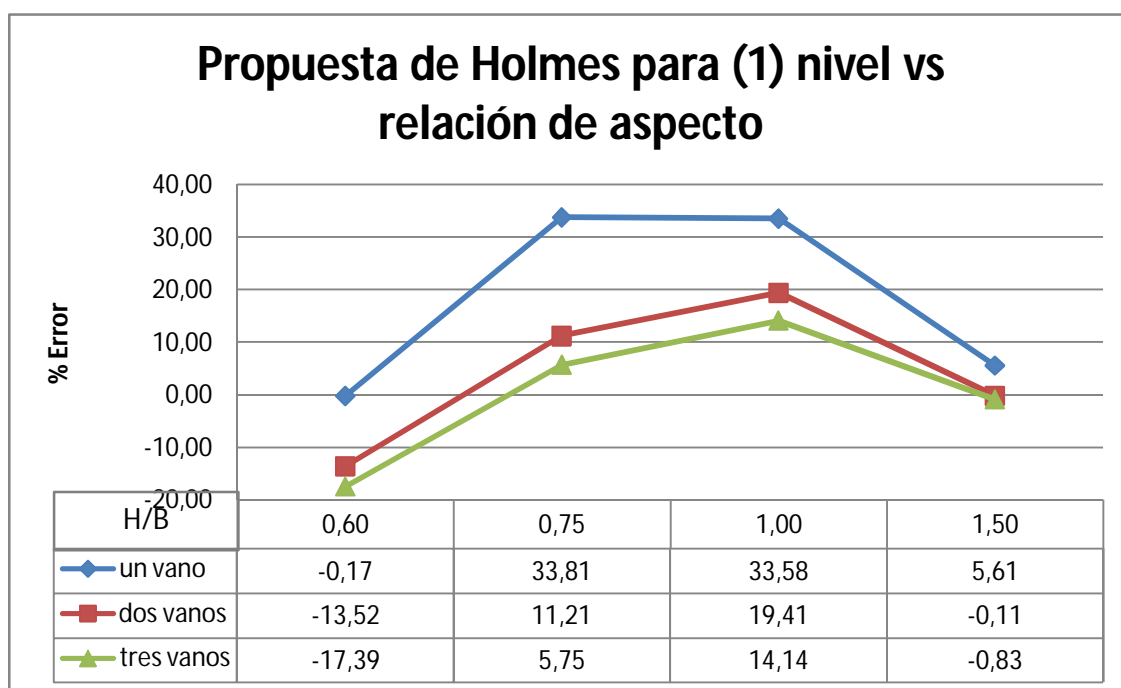


Gráfico 11. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Holmes, para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que no existe una tendencia fija al incrementar la relación de aspecto de los modelos en estudio.

Al incrementar el número de vanos para una relación de aspecto igual a 0,60 se incrementa el porcentaje de error, en cambio para relaciones de aspecto de 0,75 y

1,00 es lo contrario debido a que el porcentaje de error disminuye a medida que el número de vanos se incrementa. Los porcentajes de error varían de 0,17% a 17,39% para la relación de aspecto 0,60, para 0,75 y 1,00 los errores van desde 33,81%, 33,58% a 5,75% y 14,14% respectivamente. Para la relación de aspecto 1,50 los errores van de 5,61% a 0,11%.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Holmes se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,60 de uno y dos vanos ya que el porcentaje error obtenido es de 0,17 y 13,57 respectivamente.
- Modelos de relación de aspecto 0,75 de dos y tres vanos debido a que la diferencia de rigidez obtenida es de 11,21% y 5,75%.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de tres vanos ya que el error es de un 14,14%.
- Modelos de relación de aspecto 1,50 de uno, dos y tres vanos debido a que las diferencias existentes entre la rigidez lateral equivalente obtenida y el modelo patrón es de 5,61%, 0,11% y 0,83% respectivamente.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, con dos niveles variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

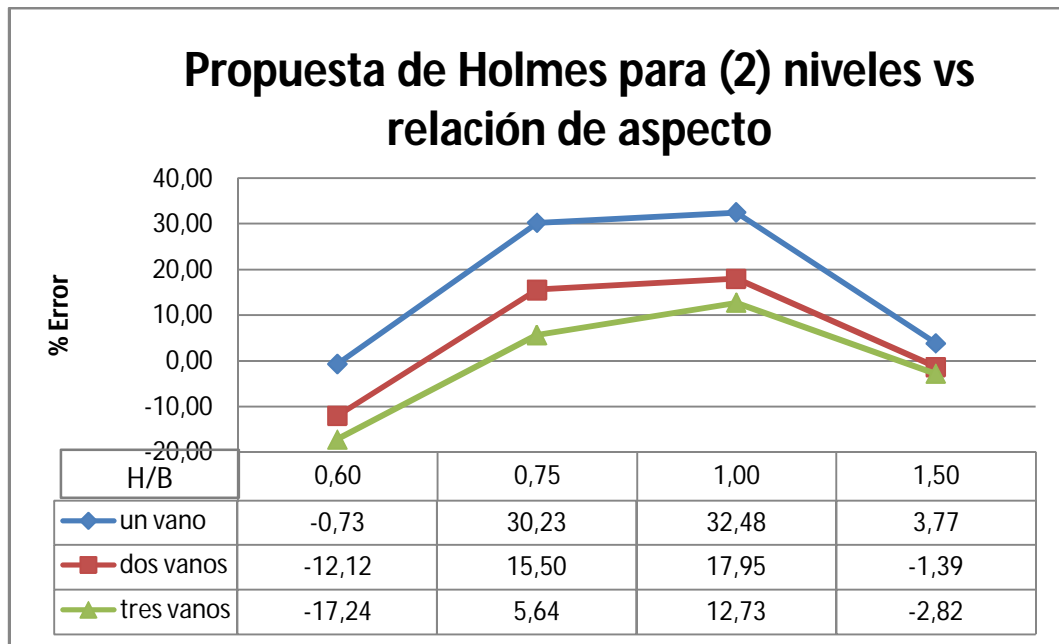


Gráfico 20. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Holmes, para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que no existe una tendencia fija al incrementar la relación de aspecto de los modelos en estudio.

Al incrementar el número de vanos para una relación de aspecto igual a 0,60 se incrementa el porcentaje de error, en cambio para relaciones de aspecto de 0,75 y 1,00 es lo contrario debido a que el porcentaje de error disminuye a medida que el número de vanos se incrementa. La diferencia de porcentaje de error entre modelos de uno hasta tres vanos varía para la relación de aspecto 0,60, 0,75, 1,00 y 1,50 un 16,51%, 24,58%, 19,75% y 6,59% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Holmes se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,60 de uno y dos vanos ya que el porcentaje error obtenido es de 0,73 y 12,12 respectivamente.

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de tres vanos debido a que la diferencia de rigidez obtenida es de 5,64%.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de tres vanos ya que el error es de un 12,73%.
- Modelos de relación de aspecto 1,50 de uno, dos y tres vanos debido a que las diferencias existentes en la rigidez lateral obtenidas y el modelo patrón es de 3,77%, 1,39% y 2,82% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Holmes se ajusta para modelos de uno y dos niveles de relación de aspecto 1,50 con porcentajes de error menores al 6,00%; para relaciones de aspecto 0,60 se ajusta para modelos de uno y de dos vanos dando diferencias menores de 15%; igual que para modelos de tres vanos de relación de aspecto de 0,75 y 1,00.

IV.6.2. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Stafford.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, de un nivel variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

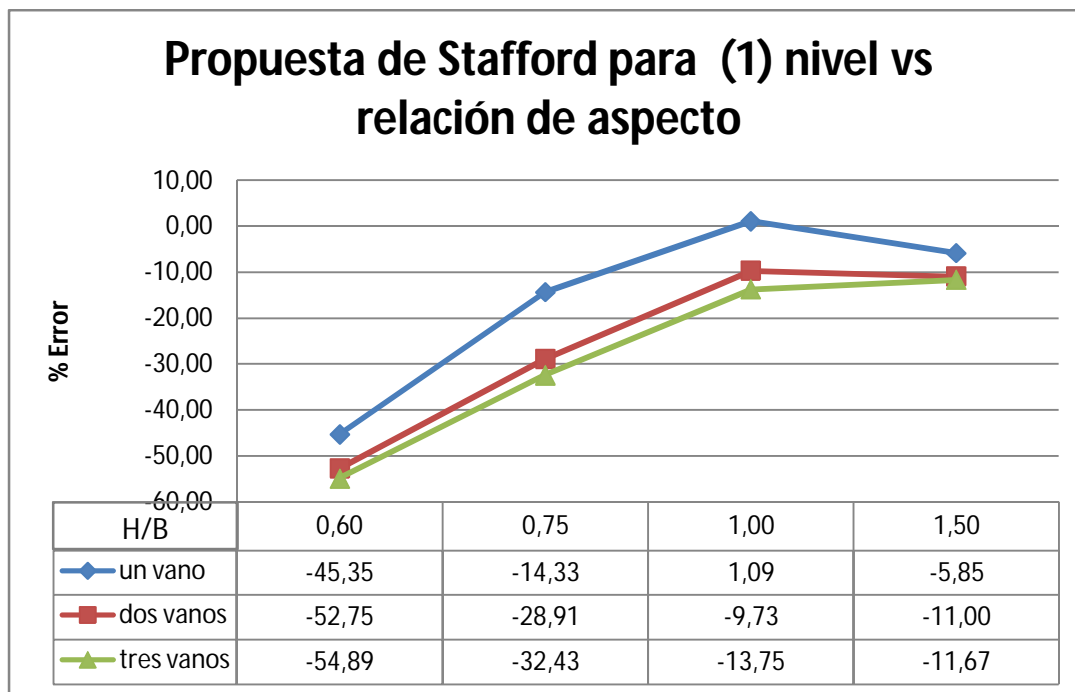


Gráfico 21. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Stafford, para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que el porcentaje de error decrece hasta una relación de aspecto igual a 1,00 y a partir de ella comienza a aumentar para los modelos de uno y dos vanos, sin embargo para modelos de tres vanos el porcentaje de error disminuye al aumentar la relación de aspecto. La diferencia de porcentaje de error entre modelos de uno hasta tres vanos varía para la relación de aspecto 0,60, 0,75, 1,00 y 1,50 un 9,54%, 18,10%, 14,84% y 5,82% respectivamente.

Se aprecia que para relaciones de aspecto estudiadas el porcentaje de error aumenta a medida que el número de vanos se incrementa.

Para una relación de aspecto de 0,60 el modelo obtiene porcentajes de error mayores de un 40%.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Stafford se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de un vano debido a que la diferencia de rigidez no supera el 14,33%.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de uno, dos y tres vanos ya que el error es de un 1,09%, 9,73% y 13,75% respectivamente.
- Modelos de relación de aspecto 1,50 de uno, dos y tres vanos debido a que las diferencias existentes en la rigidez obtenidas y el modelo patrón es de 5,85%, 11,00% y 11,67% respectivamente.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, con dos niveles variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

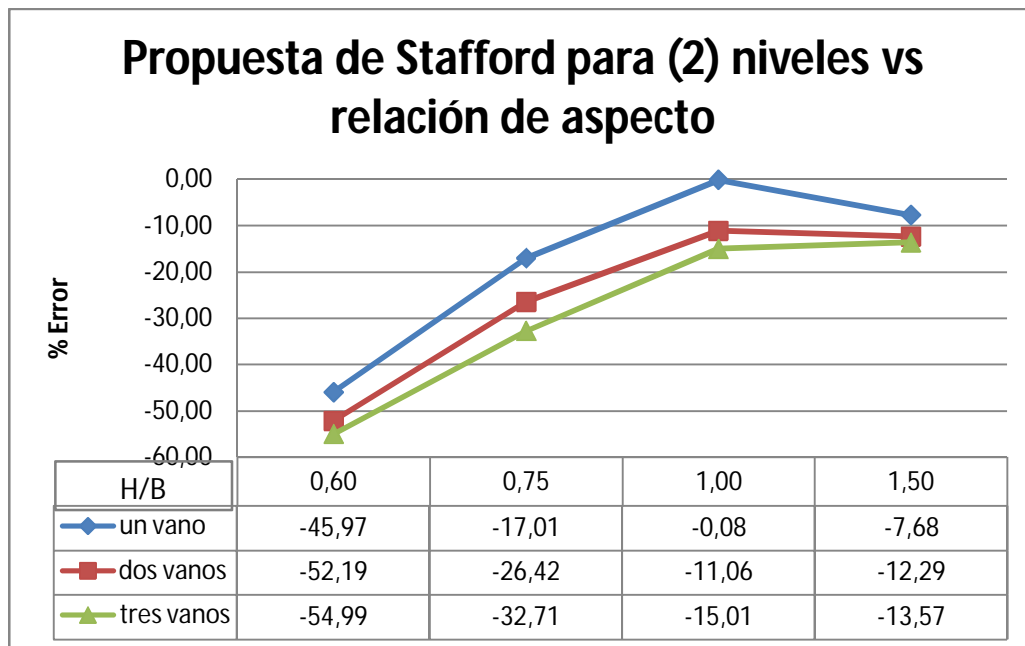


Gráfico 22. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Stafford, para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se aprecia que el comportamiento de los modelos de dos niveles es similar al de un nivel debido a que el porcentaje de error decrece hasta una relación de aspecto igual a 1,00 y a partir de ella comienza a aumentar para los

modelos de uno y dos vanos, sin embargo para modelos de tres vanos el porcentaje de error disminuye al aumentar la relación de aspecto. La diferencia de porcentaje de error entre modelos de uno hasta tres vanos varía para la relación de aspecto 0,60, 0,75, 1,00 y 1,50 un 9,02%, 15,70%, 14,93% y 5,89% respectivamente.

Se aprecia que para las relaciones de aspecto estudiadas el porcentaje de error aumenta a medida que el número de vanos se incrementa.

Para modelos de relación de aspecto igual a 0,60 y 0,75 se obtuvieron errores mayores de un 17,00%.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Stafford se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 1,00 de uno, dos y tres vanos debido a que la diferencia de rigidez no supera el 0,08%, 11,06% y 15,01% respectivamente.
- Modelos de relación de aspecto 1,50 de uno, dos y tres vanos ya que el error es de un 7,68%, 12,29% y 13,57% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Stafford se ajusta para modelos de uno y dos niveles de relación de aspecto igual a 1,00 y 1,50 ya que los porcentajes de error son menores a un 15%.

IV.6.3. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Paulay

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, de un nivel variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

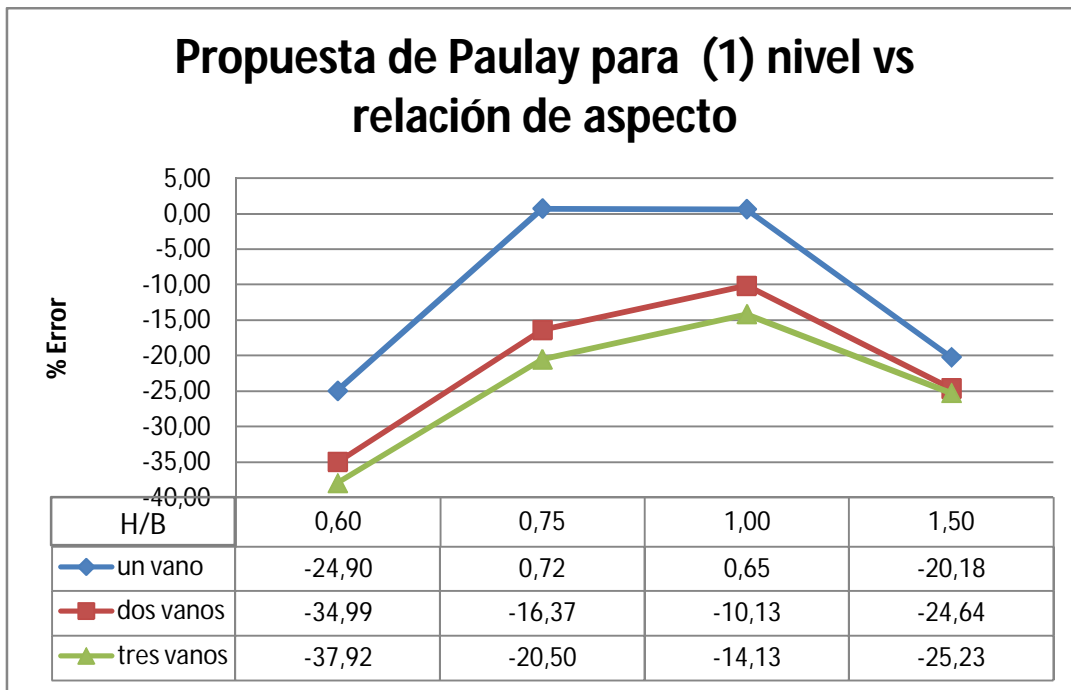


Gráfico 12. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Paulay, para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que el modelo propuesto por Paulay no posee una tendencia fija a medida que la relación de aspecto aumenta, el comportamiento para uno, dos y tres vanos es similar.

Para las relaciones de aspecto de 0,60; 0,75; 1,00 y 1,50 se aprecia que al incrementar el número de vanos el porcentaje de error aumenta un 13,02%, 21,22% 14,77% y 5,05% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Paulay se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de uno vano ya que el porcentaje error obtenido es de 0,72.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de uno dos y tres vanos ya que el error es de un 0,65%, 10,13% y 14,13% respectivamente.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, con dos niveles variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

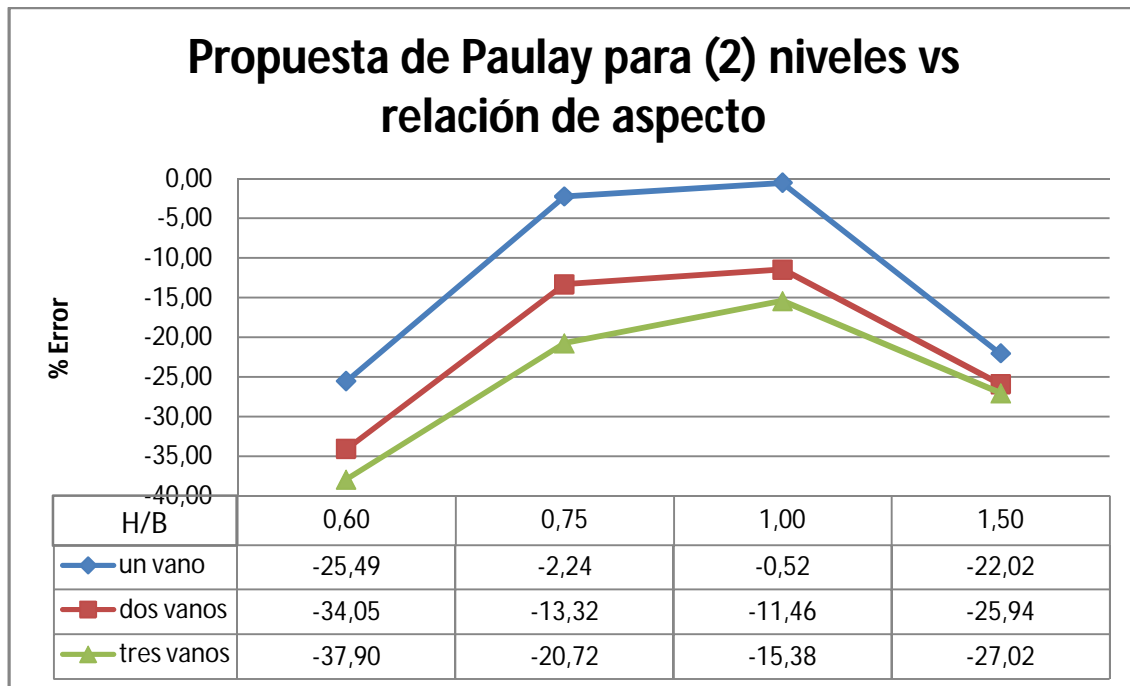


Gráfico 13. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Paulay, para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que el modelo propuesto por Paulay, al igual que para modelos de uno, dos y tres vanos de un nivel, no se observa una tendencia fija a medida que la relación de aspecto aumenta, el comportamiento para uno, dos y tres vanos es similar.

Para las relaciones de aspecto de 0,60; 0,75; 1,00 y 1,50 se aprecia que al incrementar el número de vanos el porcentaje de error aumenta un 12,41%, 18,48 % 14,86 % y 5,00 % respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Paulay se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de uno y dos vanos ya que el porcentaje error obtenido es de 2,24 y 13,32.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de uno y dos vanos ya que el error es de un 0,52% y 11,46% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Paulay se ajusta para modelos de uno y dos niveles de un vano con relación de aspecto 0,75 y para modelos de uno y dos niveles de uno y dos vanos de relación de aspecto 1,00, ya que poseen un porcentaje de error menor a un 15%.

IV.6.4. Modelo equivalente de biela diagonal simple con anchos efectivos (w) propuestos por Bazán y Meli

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, de un nivel variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

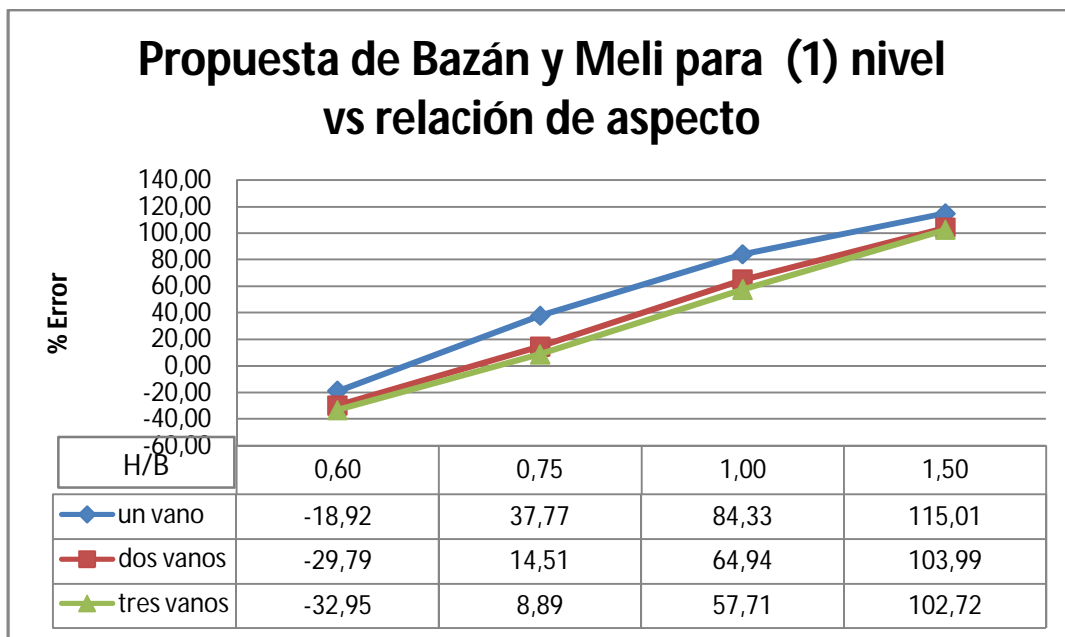


Gráfico 14. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Bazán y Meli, para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que el porcentaje de error disminuye hasta una relación de aspecto igual a 0,75 y a partir de esta se incrementa para modelos de

uno y dos vanos. Para una relación de aspecto de 0,60 se observa que a medida que se incrementa el número de vanos el porcentaje error aumenta un 14,03%, en cambio para relaciones de aspecto de 0,75, 1,00 y 1,50 el porcentaje disminuye un 28,88%; 26,62% y 12,29% respectivamente a medida que se incrementa el número de vanos. Se aprecia que para la mayoría de los casos el porcentaje de error supera el 15%.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Bazán y Meli se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de dos y tres vanos con porcentajes de error de 14,51 y 8,89 respectivamente.

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, con dos niveles variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

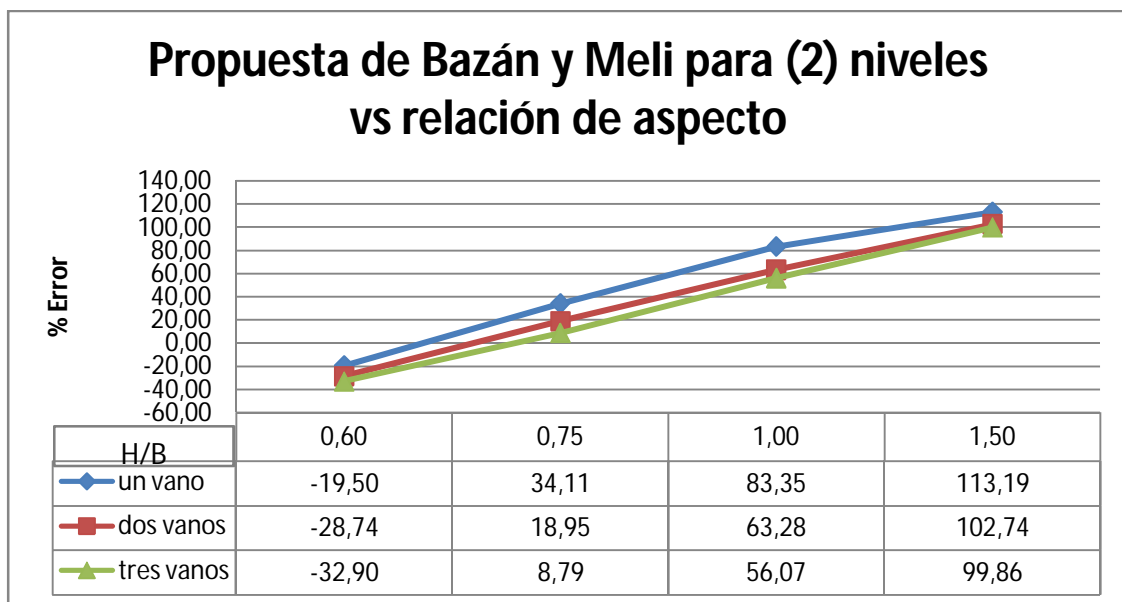


Gráfico 15. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Bazán y Meli, para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior, igual que los modelos de un vano se observa que el porcentaje de error disminuye hasta una relación de aspecto igual a 0,75 y a partir de esta se incrementa para modelos de uno y dos vanos.

Para una relación de aspecto de 0,60 se observa que a medida que se incrementa el número de vanos el porcentaje error aumenta un 13,40%, en cambio para relaciones de aspecto de 0,75, 1,00 y 1,50 el porcentaje disminuye un 25,31%; 27,28% y 13,34% respectivamente a medida que se incrementa el número de vanos. Se aprecia que para la mayoría de los casos el porcentaje de error supera el 15%.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de Bazán y Meli se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,75 de tres vanos con porcentajes de error de 8,79.

IV.6.5. Resultados de la comparación de las propuestas del modelo equivalente de biela diagonal simple con los modelos patrón

A continuación se presenta una tabla indicativa con aplicación de los modelos equivalente de biela diagonal simple de acuerdo las propuestas de ancho efectivo (w) de los diferentes autores, en función de la relación de aspecto, número de vanos y número de niveles, con la finalidad reflejar los modelos que tuvieron porcentajes de error menores al 15%.

Tabla 40. Tabla de aplicación de modelos equivalentes según los porcentajes de error obtenido, relación de aspecto, número de vanos y número de niveles

Relación de Aspecto	Un (1) Vano - un (1) nivel	Un (1) Vano - dos (2) niveles	Dos (2) Vanos - un (1) nivel	Dos (2) Vanos - dos (2) niveles	Tres (3) Vanos - un (1) nivel	Tres (3) Vanos - dos (2) niveles
	Porcentaje de Error (%)					
0,60	-0,17	-0,73	-13,52	-12,12	error > 17%	
0,75	0,72	-2,24	11,21	-13,32	5,75	5,64
1,00	0,65	-0,52	-9,73	-11,06	-13,75	12,73
1,50	5,61	3,77	-0,11	-1,39	-0,83	-2,82

	Modelo de Holmes
	Modelo de Stafford
	Modelo de Paulay
	Modelo de Bazán y Meli

IV.6.6. Modelo equivalente de columna ancha según Bazán y Meli.

El gráfico a continuación muestra el comportamiento del porcentaje de error obtenido de la comparación de modelos de columna ancha en función de los modelos patrón variando el número de vanos y relación de aspecto para un nivel:

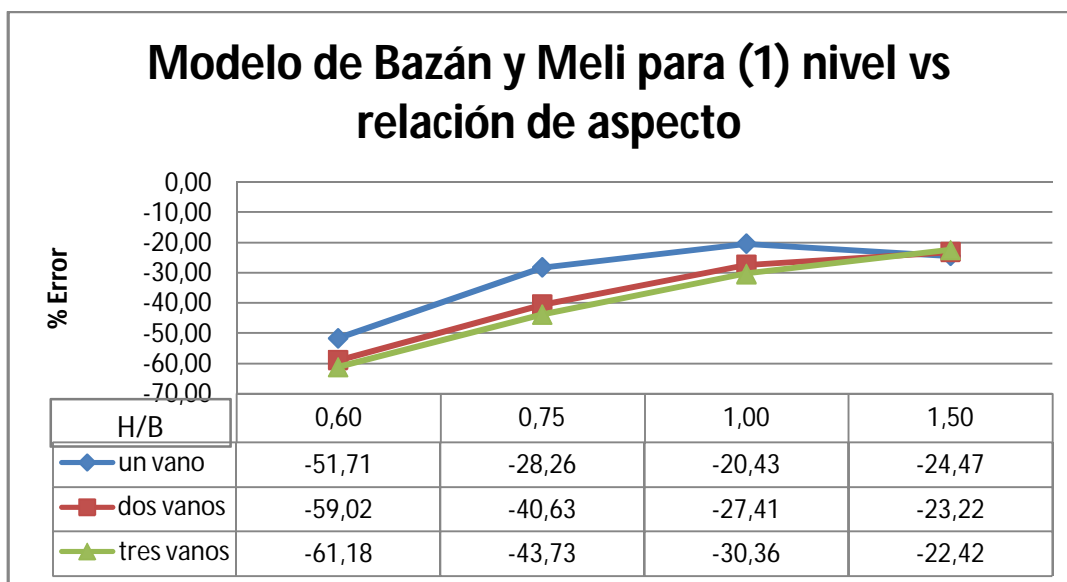


Gráfico 16. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Bazán y Meli (CA), para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se observa que para modelos de un vano el porcentaje de error disminuye hasta una relación de aspecto igual a 1,00 y a partir de esta aumenta, para modelos de dos y tres vanos el porcentaje de error disminuye a medida que la relación de aspecto se incrementa.

La rigidez obtenida por el modelo establecido por Bazán y Meli difiere en la mayoría de los casos en un 22%.

A continuación muestra el comportamiento del porcentaje de error obtenido de la comparación de los modelos de columna ancha en función de los modelos patrón variando el número de vanos y relación de aspecto para dos niveles por medio del gráfico siguiente:

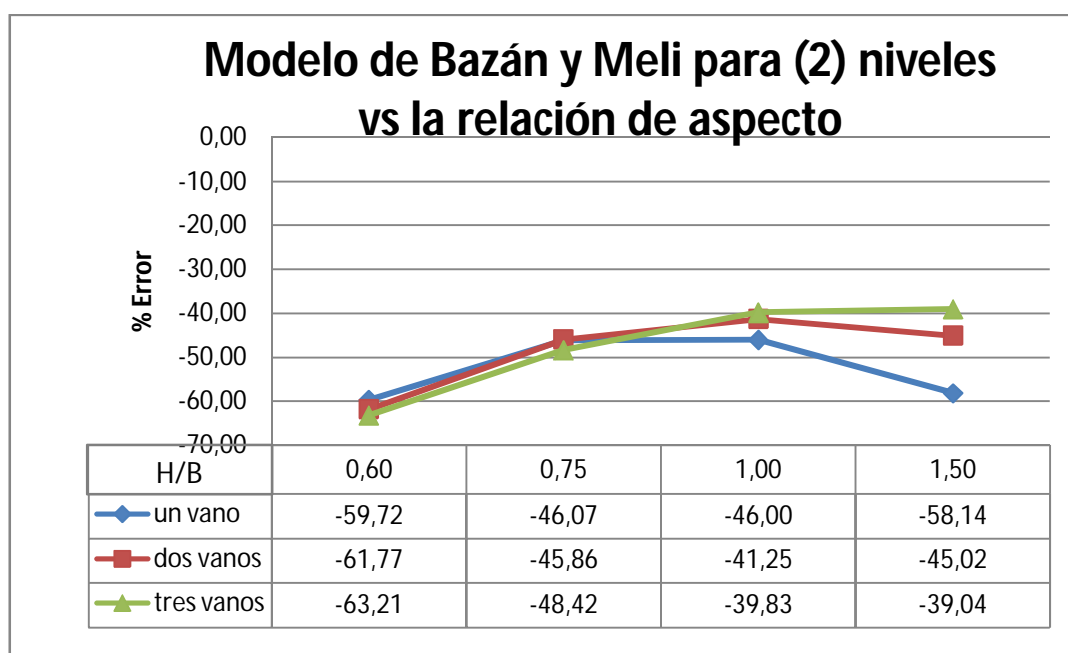


Gráfico 17. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Bazán y Meli (CA), para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Se observa al igual que en el Gráfico 17, que para modelos de uno y dos vanos el porcentaje de error disminuye hasta una relación de aspecto igual a 1,00 y a partir de esta se incrementa, para modelos de tres vanos el porcentaje de error disminuye a medida que la relación de aspecto se incrementa.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de columna ancha propuesto por Bazán y Meli subestima los valores de rigidez debido a la formulación establecida en el punto II.9.2.2.1 (Ecuación 24), ya que la propuesta disminuye el área efectiva del cortante según la ecuación 25, que en comparación a los valores de área a compresión obtenidos en el modelo patrón son menores.

El modelo de Bazán y Meli no se ajusta a los modelos estudiados.

IV.6.7. Modelo equivalente de columna ancha según Formulación (R.L.E)

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a los porcentajes de error obtenidos de la comparación de los modelos de uno, dos y tres vanos, de un nivel variando la relación de aspecto en función de sus respectivos modelos patrón:

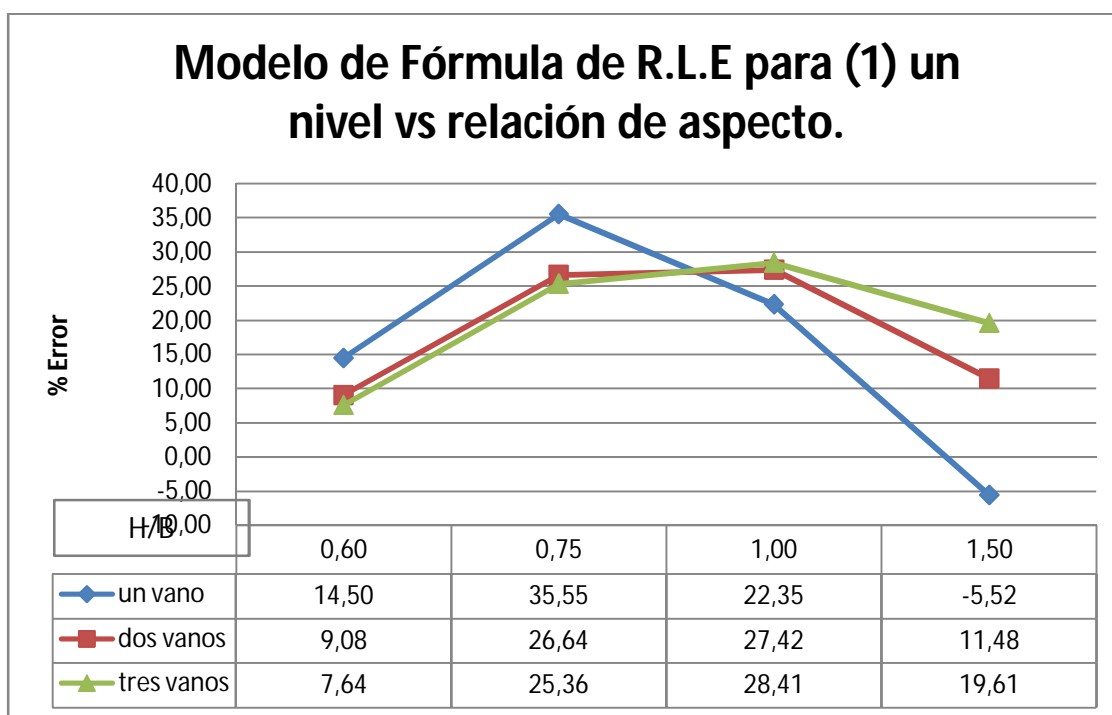


Gráfico 18. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Fórmula de R.L.E., para modelos de un (1) nivel, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Para modelos de un vano se observa un incremento del porcentaje de error hasta una relación de aspecto igual a 0,75 a partir de esta el porcentaje disminuye, para modelos de dos y tres vanos el porcentaje de error aumenta hasta una relación de aspecto igual a 1,00 a partir de esta disminuye.

Para relaciones de aspecto de 0,60 y 0,75 a medida que se incrementa el número de vanos el porcentaje de error disminuye en cambio para relaciones de aspecto de 1,00 y 1,50 a medida que aumenta el número de vanos el porcentaje de error se incrementa.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de la Fórmula R.L.E se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,60 de dos y tres vanos se obtienen errores de un 9,08% y 7,64% respectivamente.
- Modelos de relación de aspecto 1,50 de uno u dos vanos ya que la diferencia entre la rigidez patrón y la obtenida por estos modelos es de un 5,52% y 11,48% respectivamente.

Se presenta a continuación muestra el comportamiento del porcentaje de error obtenido de la comparación del modelo de columna ancha R.L.E., en función de los modelos patrón variando el número de vanos y relación de aspecto para dos niveles por medio del gráfico siguiente:

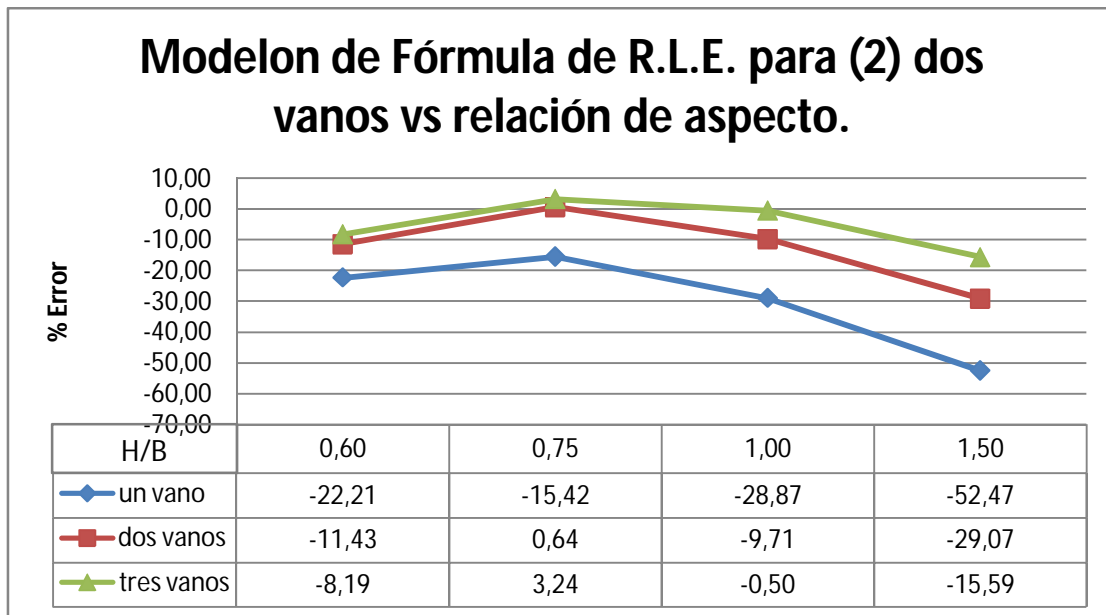


Gráfico 30. Porcentaje de error entre modelos patrón y equivalentes según Fórmula de R.L.E., para modelos de dos (2) niveles, de uno (1), dos (2) y tres (3) vanos en función de la relación de aspecto.

Del gráfico anterior se aprecia que para modelos de uno, dos y tres vanos el porcentaje de error disminuye desde la relación de aspecto 0,60 hasta 0,75, a partir de esta el porcentaje de error aumenta haciéndose más negativo.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de la Fórmula R.L.E se ajusta para:

- Modelos de relación de aspecto 0,60 de dos y tres vanos con porcentajes de error de 11,43 y 8,19.
- Modelos de relación de aspecto 0,75 de dos y tres vanos resultando diferencias de un 0,64% y 3,24% respectivamente, en función de los modelos patrón.
- Modelos de relación de aspecto 1,00 de dos y tres vanos obteniendo errores de un 9,71% y 0,50% respectivamente.

De los resultados anteriores se puede establecer que el modelo de columna ancha según la Fórmula de R.L.E. se ajusta para modelos de uno y dos niveles, de dos y tres vanos de relación de aspecto 0,60 obteniendo porcentajes de error

menores a un 12,00%, para modelos de un nivel de uno y dos vanos con relación de aspecto igual a 1,50 con diferencia no mayores a un 12,00% aproximadamente y para modelos de dos niveles de dos y tres vanos de relación de aspecto de 0,75 y 1,00 con errores menores a un 10%.

IV.6.8. Resultados de la comparación de las propuestas del modelo equivalente de columna ancha con los modelos patrón

A continuación se presenta una tabla indicativa con aplicación de los modelos equivalentes de columna ancha de acuerdo a las diferentes propuestas, en función de la relación de aspecto, número de vanos y número de niveles con la finalidad reflejar los modelos que tuvieron porcentajes de error menores al 15%.

Tabla 41. Tabla de aplicación de modelos equivalentes según los porcentajes de error obtenido, relación de aspecto, número de vanos y número de niveles

Relación de Aspecto	Un (1) Vano - un (1) nivel	Un (1) Vano - dos (2) niveles	Dos (2) Vanos - un (1) nivel	Dos (2) Vanos - dos (2) niveles	Tres (3) Vanos - un (1) nivel	Tres (3) Vanos - dos (2) niveles
	Porcentaje de Error (%)					
0,60	14,50		9,08	-11,43	7,64	-8,19
0,75				0,64		3,24
1,00				-9,71		-0,50
1,50	-5,52		11,48			

	Fórmula R.L.E.
	Modelo de Bazán y Meli
	Porcentaje mayor a 15%

R.L.E. = Formulación de Rigidez latera equivalente, Ecuación 31
Modelo de Bazán y Meli no se ajusta.

IV.7. Resultados de propuesta de un ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple.

Los datos necesarios para el cálculo del área transversal y el ancho efectivo de la biela diagonal fueron determinados y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 42. Valores empleados para el cálculo del área transversal y el ancho efectivo (w) de la biela diagonal simple

MODELOS DE UN (1) VANO Y UN (1) NIVEL						H = 300 cm
H/B	MODELO	B (cm)	D (cm)	α (rad)	$\text{Cos}^2(\alpha)$	KI (Kgf/cm)
0,50	PATRÓN					125156,45
	EQUIVALENTE	600	654,05	0,46	0,80	
0,60	PATRÓN					88967,97
	EQUIVALENTE	500	566,38	0,54	0,73	
0,75	PATRÓN					57471,26
	EQUIVALENTE	400	483,51	0,65	0,63	
1,00	PATRÓN					44365,57
	EQUIVALENTE	300	408,39	0,80	0,49	
1,25	PATRÓN					38535,65
	EQUIVALENTE	240	369,03	0,92	0,37	
1,50	PATRÓN					33244,68
	EQUIVALENTE	200	346,09	1,01	0,29	
2,00	PATRÓN					24485,80
	EQUIVALENTE	150	322,15	1,14	0,18	

H = Atura de la estructura; **B** = Ancho de la estructura; **H/B** = Relación de aspecto; **D** = Longitud de la biela diagonal simple; α = inclinación de la biela diagonal simple respecto al plano horizontal; **KI** = Rigidez lateral de los modelos patrón, asumida también para el modelo equivalente.

A continuación se muestran los valores resultantes del cálculo del área trasversal y ancho efectivo de la biela diagonal simple:

Tabla 43. Valores de área transversal y ancho efectivo (w) de la biela diagonal simple para modelos de un (1) vano y un (1) piso en función de la relación de aspecto H/B.

MODELOS DE UN (1) VANO Y UN (1) NIVEL		
H/B	Am (cm ²)	W (cm)
0,50	4235,51	282,37
0,60	2836,80	189,12
0,75	1800,06	120,00
1,00	1521,45	101,43
1,25	1559,96	104,00
1,50	1636,43	109,10
2,00	1808,88	120,59

Am = Área transversal de la biela diagonal simple; **w** = Ancho efectivo de la biela diagonal simple

Tomando los valores de la tabla anterior se elaboró el siguiente gráfico donde se representa la variación del ancho efectivo (w) en función de la relación de aspecto:

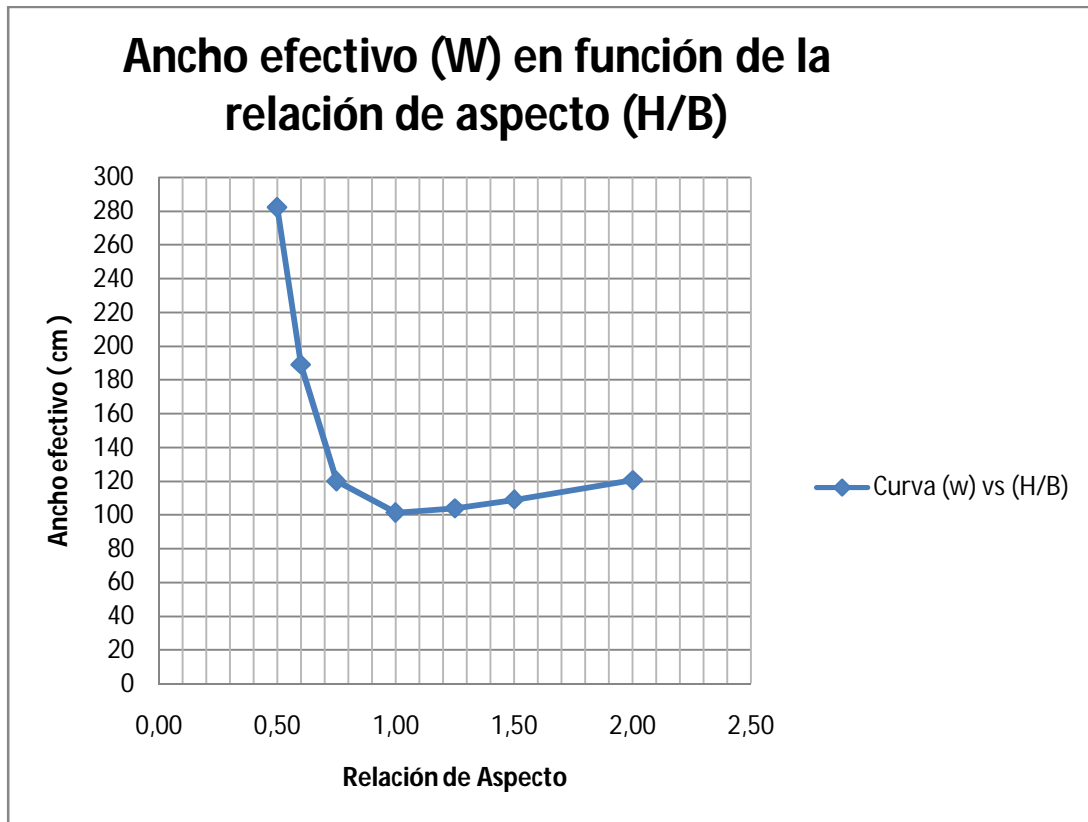


Gráfico 31. Propuesta de ancho efectivo (w) en función de la relación de aspecto

El gráfico anterior muestra que a medida que la relación de aspecto varía de 0,50 a 1,00 el ancho efectivo decrece de 282,37cm a 101,43 cm, obteniendo una diferencia de 90,94cm y para relaciones de aspecto de 1,00 a 2,00 el ancho efectivo (w) aumenta hasta 120,59 cm, lo cual representa una diferencia de 70,84cm. Se aprecia que para relaciones de aspecto comprendidas entre 0,75 y 2,00 el ancho efectivo se encuentra en una franja comprendida entre 100 y 120 centímetros. Para relaciones de aspecto menores a 0,75 se observa que el ancho efectivo varía de 120 a 280 centímetros aproximadamente.

De acuerdo al comportamiento del gráfico anterior se propone la siguiente tabla especificando los valores de ancho efectivo (w) en función de la relación de aspecto para definir dicha variable en la aplicación del modelo de biela diagonal simple para modelos de un (1) vano y un (1) nivel:

Tabla 44. Propuesta de valores de ancho efectivo (w) para modelos de un (1) vano y un (1) nivel

MODELOS DE UN (1) VANO Y UN (1) NIVEL	
Relación de aspecto (H/B)	Ancho efectivo w (cm)
0,50	282,37
0,60	189,12
0,75	120,00
1,00	101,43
1,25	104,00
1,50	109,10
2,00	120,59

A través de los valores propuestos en la tabla anterior, la estimación de la rigidez lateral equivalente mediante el modelo de biela diagonal simple presenta una mejor aproximación a los valores de rigidez lateral de los modelos patrón, ya que como se especificó en el capítulo III, sección III.3.6.1, se tomó el valor de rigidez lateral patrón para determinar el ancho efectivo (w), lo que implica que al usar nuevamente la Ecuación 20, para estimar la rigidez lateral equivalente, se obtendrá exactamente el valor de rigidez patrón .

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados analizados obtenidos de este trabajo permiten concluir lo siguiente:

El proceso de simulación y calibración de los modelos numéricos fue validado al obtener un porcentaje de error aproximadamente igual al 10% en comparación con un ensayo experimental.

Los valores de rigidez lateral calculados por los modelos patrón varían en función de la relación de aspecto de forma inversa, ya que al aumentar la relación de aspecto la rigidez lateral disminuye. El aumento del número de vanos implicó un aumento de la rigidez lateral, donde para modelos de dos vanos la rigidez es aproximadamente 2,3 veces la de un vano y para modelos de tres vanos la rigidez lateral es aproximadamente 3,5 veces la de un vano. El incremento de un nivel en todos los modelos implicó una disminución de aproximadamente 0,5 veces la rigidez lateral de modelos de un nivel.

El porcentaje de área a tracción calculado para los modelos numéricos patrón sólo varía en función de la relación de aspecto (configuración geométrica), ya que al incrementar la relación de aspecto incrementa el porcentaje de área tracción. Para valores de relaciones de aspecto comprendidas entre 0,50 y 0,75 el incremento es acelerado y para relaciones de aspecto mayores a 0,75 el incremento es menos pronunciado con una tendencia a ser constante.

Los valores calculados de ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple varían en función de las diferentes propuestas estudiadas; el ancho efectivo (w) propuesto de Holmes varia inversamente proporcional a la relación de aspecto, ya que al aumentar la relación de aspecto disminuyen los valores de ancho efectivo. Para la propuesta de Stafford la variación del ancho

efectivo sólo depende de la variación de la altura, puesto que al fijar una altura y variar la relación de aspecto no se presentan cambios en los valores. Para la propuesta de Paulay se presenta un comportamiento similar a la propuesta de Holmes puesto que al aumentar la relación de aspecto, disminuyen los valores de ancho efectivo. La propuesta de Bazán y Meli presenta una variación directamente proporcional del ancho efectivo (w) en función de la relación de aspecto, ya que al aumentar la relación de aspecto aumenta el valor de ancho efectivo (w).

El modelo equivalente de biela diagonal dependiendo de los valores de ancho efectivo empleados presentó un comportamiento específico para cada propuesta. Mediante la propuesta de Holmes, la rigidez lateral equivalente disminuye al incrementar la relación de aspecto. La rigidez lateral equivalente mediante la propuesta de Stafford aumenta para relaciones de aspecto entre 0,60 y 0,75 y para relaciones de aspecto mayores a 0,75 disminuye. La propuesta de Paulay implica una disminución de la rigidez lateral equivalente al aumentar la relación de aspecto. La propuesta de Bazán y Meli implica un aumento de la rigidez lateral equivalente para relaciones de aspecto comprendidas entre 0,6 y 1,00, a partir de esta última, disminuye.

El modelo de columna ancha para ambas propuestas presentó un comportamiento similar; a medida que se incrementa la relación de aspecto disminuye la rigidez lateral equivalente.

De la comparación de los modelos equivalentes con los modelos patrón, se obtuvieron los porcentajes de error, los cuales varían de acuerdo al modelo equivalente empleado función de la relación de aspecto, número de vanos y número de niveles.

Para los modelos de un vano un nivel y un vano dos niveles de relación de aspecto igual a 0,60, el modelo de Holmes fue el modelo que mejor se ajustó con porcentajes de error inferior a 5% y para los modelos restantes con la relación de

aspecto igual a 0,60, el modelo que mejor se ajustó fue la formulación R.L.E con porcentajes menores a 15%.

Para los modelos de un vano un nivel y un vano dos niveles de relación de aspecto igual a 0,75 el modelo que mejor se ajustó fue el modelos de Paulay con porcentajes de error menores a 5%, para los modelos de dos y tres vanos de un nivel con relación de aspecto 0,75, el modelo de Holmes se ajustó con porcentajes de error menores a 15% y para modelos de dos y tres vanos con dos niveles para la relación de aspecto 0,75 el modelo de la formulación R.L.E se ajustó con porcentajes menores a 5%.

Para los modelos de un vano un nivel y un vano dos niveles de relación de aspecto igual a 1,00 el modelo de Paulay se ajustó con porcentajes de error inferiores a 5%, para modelos de dos y tres vanos con un nivel y relación de aspecto igual a 1,00, el modelo de Stafford se ajustó con porcentajes de error menores a 15% y para los modelos de dos y tres vanos con dos niveles de relación de aspecto igual a 1,00 el modelo de la formulación R.L.E, se ajustó con porcentajes de errores menores a 10%.

Para todos los modelos de relación de aspecto igual a 1,50, el modelo de Holmes se ajustó con porcentajes de error inferiores al 10%.

Para todos los modelos estudiados, el modelo equivalente de Bazan y Meli tanto para biela diagonal simple como para columna ancha, presentó en la mayoría de los casos porcentajes de error superiores al 15%, por lo tanto no se consideró su ajuste con los modelos numéricos patrón.

No se puede utilizar un modelo equivalente único ya que ninguno se ajustó de manera adecuada para todos los casos. Cada modelo tiene una franja de aplicación como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla de aplicación de los modelos equivalentes de biela diagonal simple y columna ancha en función de la diferencia porcentual entre los valores de rigidez obtenidos en los modelos patrón y los equivalentes, relación de aspecto, número de vanos y número de niveles

Relación de Aspecto (H/B)	Un (1) Vano - un (1) nivel	Un (1) Vano - dos (2) niveles	Dos (2) Vanos - un (1) nivel	Dos (2) Vanos - dos (2) niveles	Tres (3) Vanos - un (1) nivel	Tres (3) Vanos - dos (2) niveles
0,60	Holmes	Holmes	R.L.E.	R.L.E.	R.L.E.	R.L.E.
0,75	Paulay	Paulay	Holmes	R.L.E.	Holmes	R.L.E.
1,00	Paulay	Paulay	Stafford	R.L.E.	Stafford	R.L.E.
1,50	Holmes	Holmes	Holmes	Holmes	Holmes	Holmes

R.L.E. = Formulación de Rigidez lateral equivalente.

Modelos de Bazán y Meli no se ajusta.

Leyenda:

Porcentaje de error según color		<5%
		>5% <10%
		>10% <15%

Se recomienda la tabla anterior como propuesta para la aplicación de los modelos equivalentes de Biela Diagonal Simple para las cuatro propuestas de ancho efectivo (w) y Columna Ancha de acuerdo a las dos formulaciones, en función de la relación de aspecto, número de vanos, número de niveles y porcentajes de error tras la comparación con los modelos numéricos patrón, con la finalidad de garantizar la determinación de la rigidez lateral mediante los diferentes modelos equivalentes con porcentajes de error mínimos (menores a 10% en la mayoría de los casos).

La propuesta de ancho efectivo (w) definida para el modelo equivalente de biela diagonal simple presentó una variación notable en función de la relación de aspecto donde para relaciones de aspecto comprendidas entre 0,5 y 1,00 hay una disminución del mismo de forma acelerada y para relaciones de aspecto mayores a 1,00 hay un incremento moderado de ancho efectivo. Los valores de rigidez lateral equivalente estimados mediante esta propuesta se ajustan exactamente a los valores de rigidez lateral de los modelos patrón.

La siguiente tabla se recomienda para determinar los valores de ancho efectivo (w) del modelo de biela diagonal simple para modelos de un vano y un nivel, en función de la relación de aspecto, con la finalidad de ajustar exactamente la estimación de los valores de rigidez lateral equivalente:

Tabla de valores propuestos de ancho efectivo (w) para el modelo equivalente de biela diagonal simple en función de la relación de aspecto

MODELOS DE UN (1) VANO Y UN (1) NIVEL	
Relación de aspecto (H/B)	Ancho efectivo w (cm)
0,50	282,37
0,60	189,12
0,75	120,00
1,00	101,43
1,25	104,00
1,50	109,10
2,00	120,59

Se recomienda hacer un análisis no lineal donde se considere la degradación de la rigidez lateral para las estructuras de mampostería confinada con la finalidad de representar de forma más aproximada el comportamiento mecánico de los materiales conformantes de este tipo de estructuras.

Se recomienda continuar con esta línea de investigación a nivel de ensayos experimentales sobre estructuras de mampostería confinada a escala real con más de un vano, más de un piso y la combinación de ambos para respaldar este trabajo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, J. (2008). *Curvas de fragilidad para estructuras de porticos de hormigon armado en Puerto Rico involucrando el efecto de las paredes de mamposteria no estructurales*. Trabajo Especial de Grado de Magister en Scientiarum: Puerto Rico.
- Bazán, E., & Meli, R. (2001). *Diseño sísmico de edificios*. México D.F.: Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega., pp. 67-76.
- Castilla, E. (1991). *Experiencias recientes en mampostería confinada sismoresistente*. Caracas: Trabajo de ascenso para optar a la categoria de Profesor Asociado: Universidad Central de Venezuela.
- Castilla, E. (1994). *Recomendaciones para el diseño sismo-resistente de paredes de mampostería confinada de bloques huecos de arcilla*. Contribuciones recientes a la ingeniería estructural y sismo-resistente. pp. 41-55: Carcas, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME.
- Castilla, E. (Julio, 1997). *Recomendaciones para el diseño sismorresistente de edificaciones de mampostería estructural*. Diseño sismorresistente especificaciones y criterios empleados en Venezuela. Caracas: Academia de ciencias físicas matemáticas y naturales. pp. 333-346.
- Castilla, E., & Marinilli, A. (Noviembre 2003). *Experiencia recientes en mamposteria confinada de bloques de concreto*. Boletin Tecnico IMME, Volumen 41, N° 2-3.
- Castilla, E., & Pose, M. (Marzo 1995). *Evaluacion del comportamiento de muros de mamposteria de concreto ante carga horizontal*. Boletin Tecnico del IMME , Volumen 33 N° 1.
- Chopra, A. K. (1981). *Dynamics of structures a primer*. Earthquake engineering research institute.

- COVENIN-FUNVISIS. (2001). *Edificaciones Sismorresistentes 1756*. Caracas, Venezuela: Comision venezolana de normas industriales.
- Crisafulli, F. (1997). *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills*. Trabajo especial de grado de ph.D: University of Canterbury.
- Cruz, M. F., & Lafuente, M. (Octubre 1995). *Estimación de la rigidez lateral equivalente en paredes de mampostería confinada sometidas a cargas cíclicas*. Boletín Técnico IMME, Volumen 33, Nº 3.
- Fundación venezolana de investigaciones sismológica, F. (2002). *La investigación sismológica en Venezuela*. Caracas: FUNVISIS.
- Gallegos, H. (1989). *Albañilería Estructural*. Pontificia Universidad Católica del Perú: Fondo Editorial.
- Gallegos, H. (1992). *Albañilería Estructural*. Medellín: Simposio Internacional sobre Mampostería Estructural y Arquitectónica. ICPC.
- Garcés, F. J. (Marzo 2008). *Identificación de estructuras en ingeniería civil*. Venezuela: Trabajo de Ascenso.
- Grases, J., López, O., & Hernández, J. (1984). *Edificaciones Sismorresistentes Manual de aplicación de las normas*. Caracas: Fondur.
- Marinilli, A., & Castilla, E. (2007). *Evaluación sismorresistente de muros de mampostería confinada con dos o más machones*. Caracas: Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME.
- Mente, B., & Rosero, K. (1990). *Evaluación del comportamiento de muros confinados con bloques de arcilla con esbeltez mayor que uno bajo la acción de cargas axiales y laterales*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- NTCM. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. D.F.; Mexico: Comité de normas Distrito Federal.
- NTE. (2006). *Norma Técnica E.070 Albañilería*. Perú.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. (2004). *Manual del concreto estructura*. Caracas: SIDETUR. pp 37.
- San Bartolomé, A. (1998). *Construcciones de Albañilería*. Pontificia Universidad Católica del Perú: Fondo Editorial.

ANEXOS

Configuración de los modelos patrón para relaciones de aspecto iguales a 1,50, 0,75 y 0,60 luego del proceso de calibración y simulación

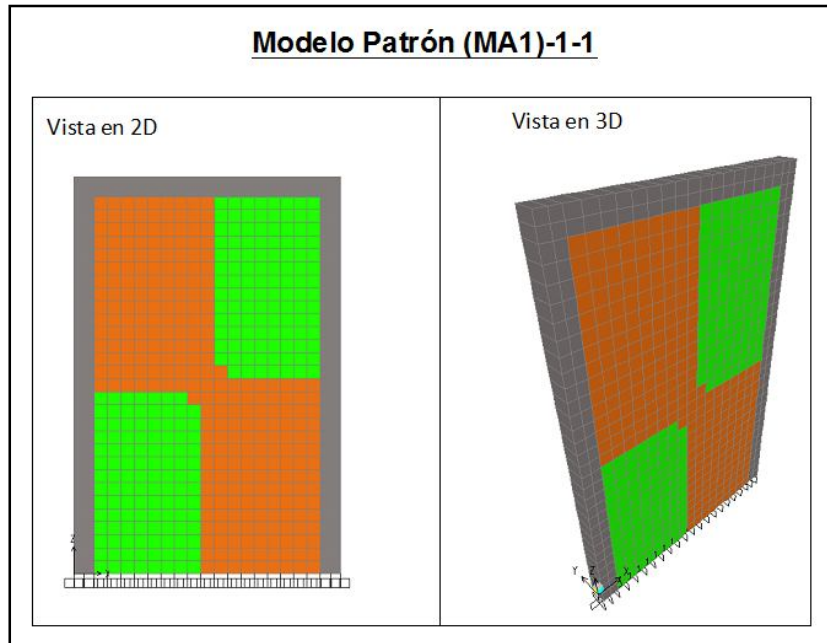


Figura 34. Modelo patrón (MA1)-1-1

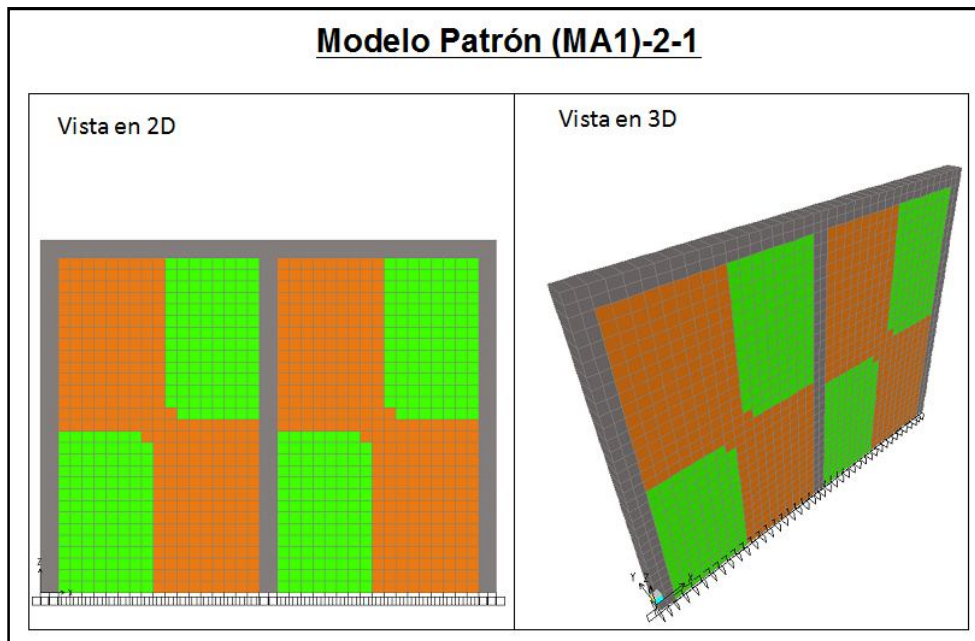


Figura 35. Modelo patrón (MA1)-2-1

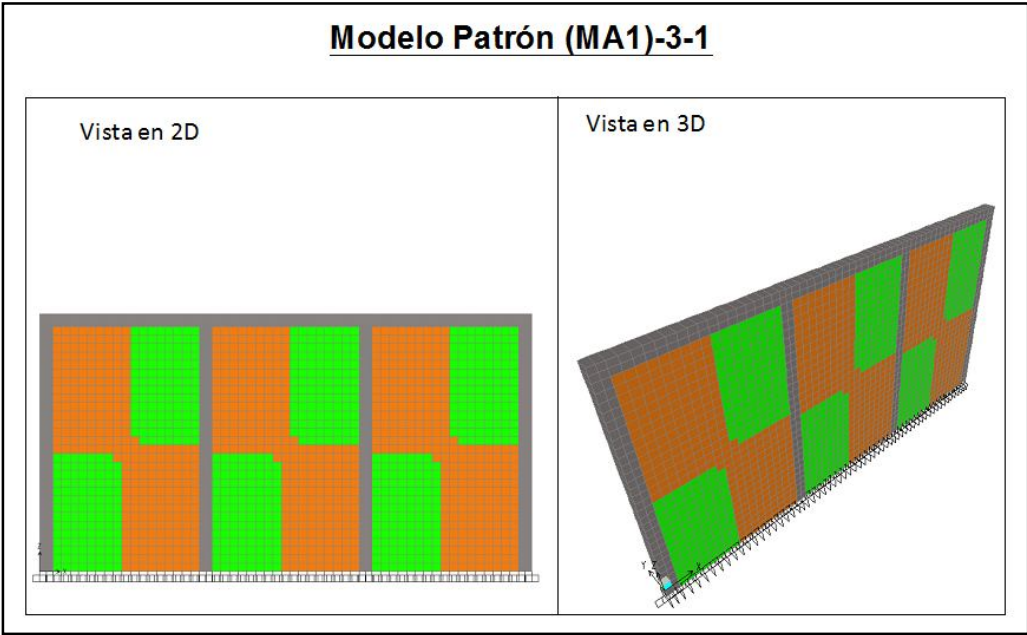


Figura 36. Modelo patrón (MA1)-3-1

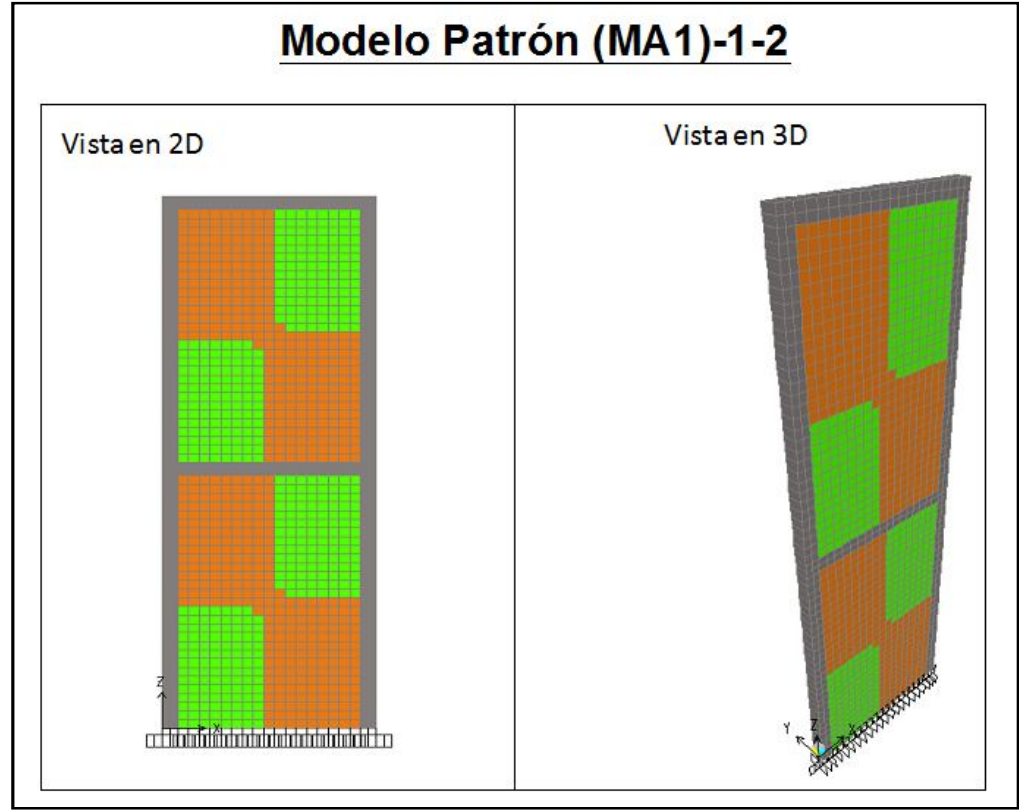


Figura 37. Modelo patrón (MA1)-1-2

Modelo Patrón (MA1)-2-2

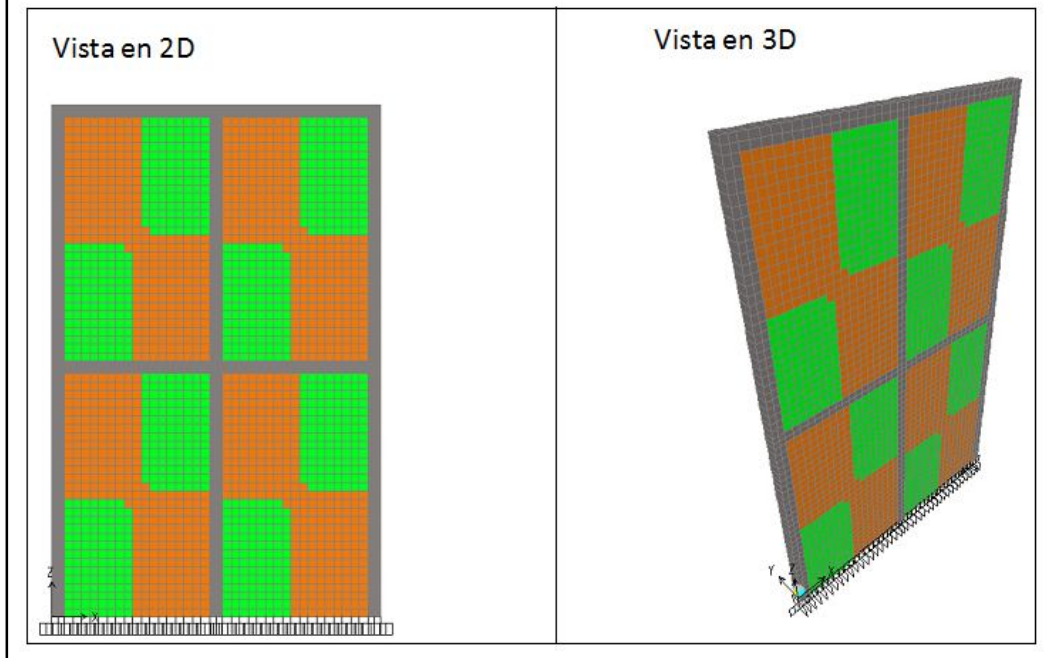


Figura 38. Modelo patrón (MA1)-2-2

Modelo Patrón (MA1)-3-2

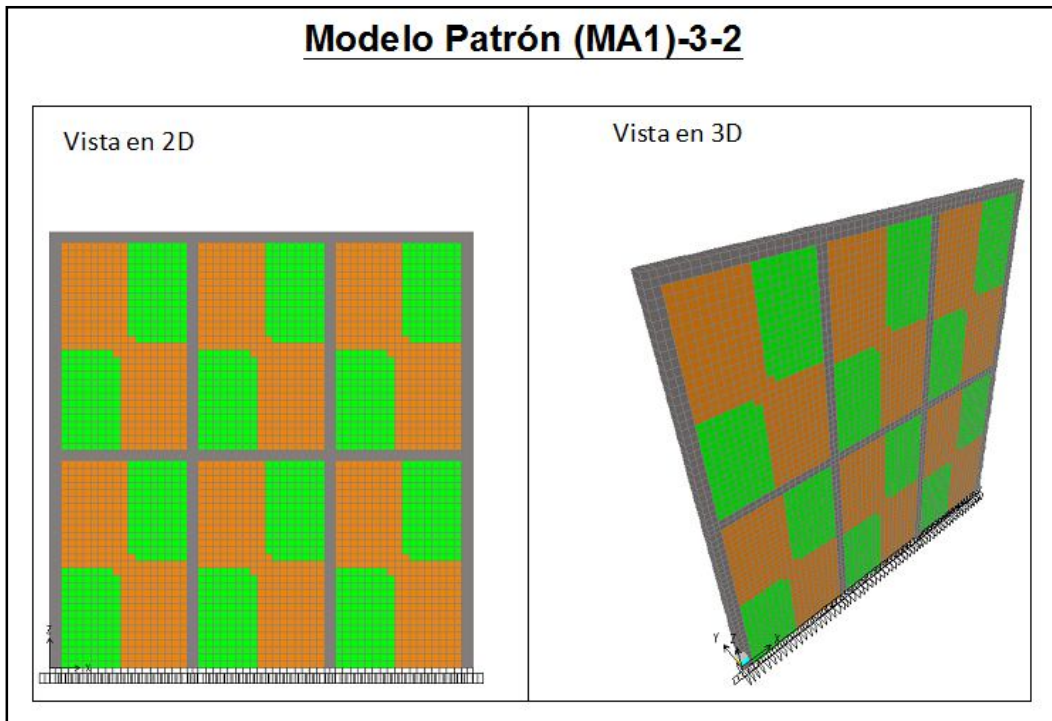


Figura 39. Modelo patrón (MA1)-3-2

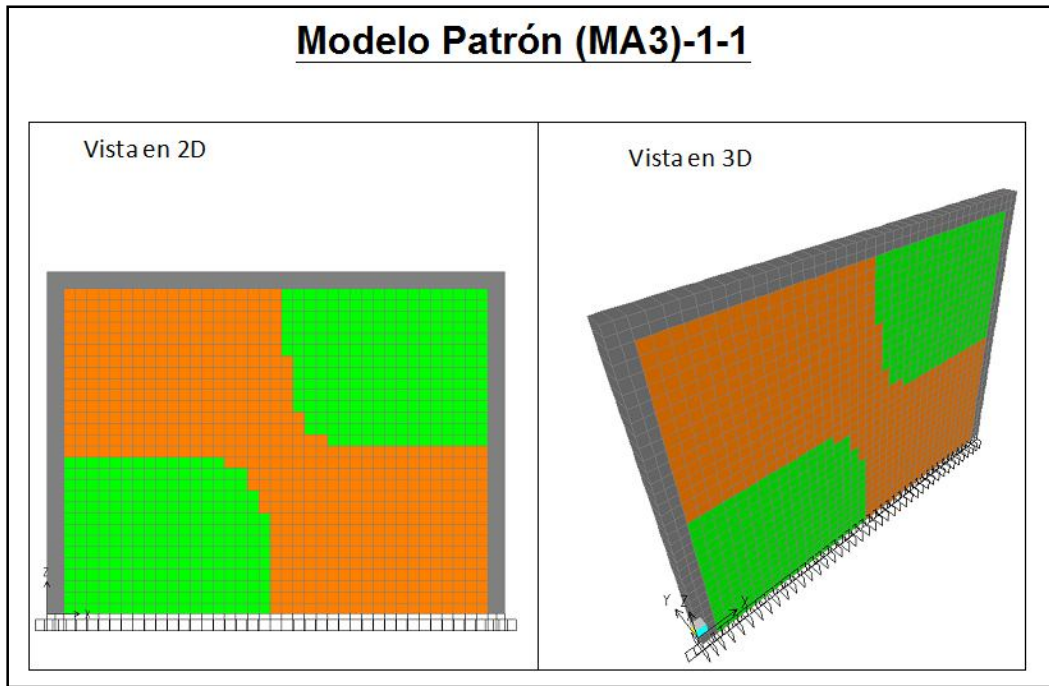


Figura 40. Modelo patrón (MA3)-1-1

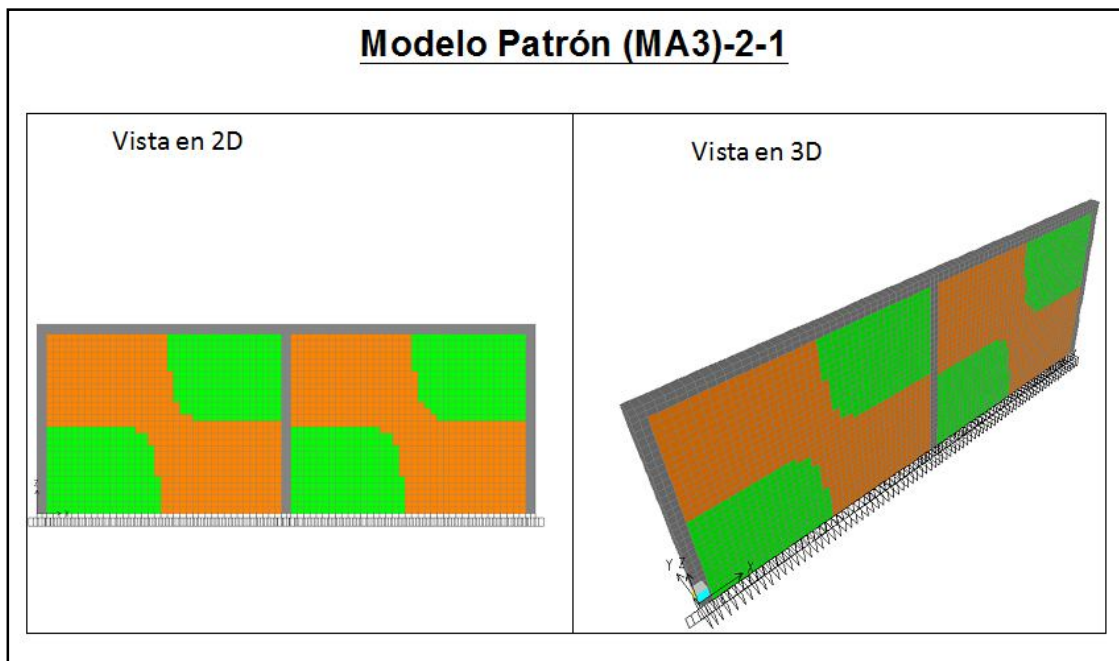


Figura 41. Modelo patrón (MA3)-2-1

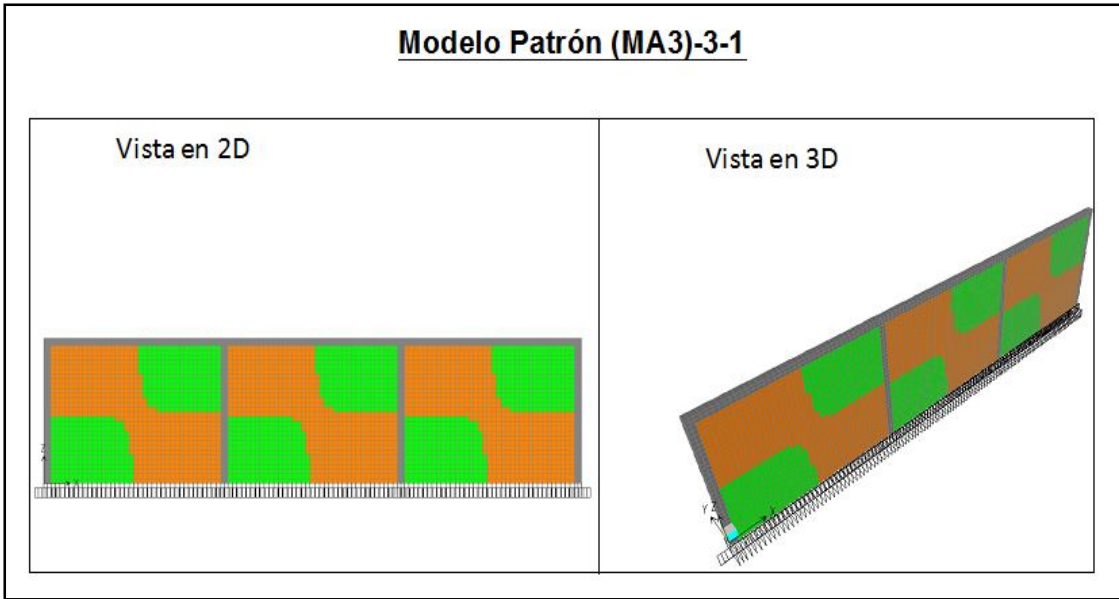


Figura 42. Modelo patrón (MA3)-3-1

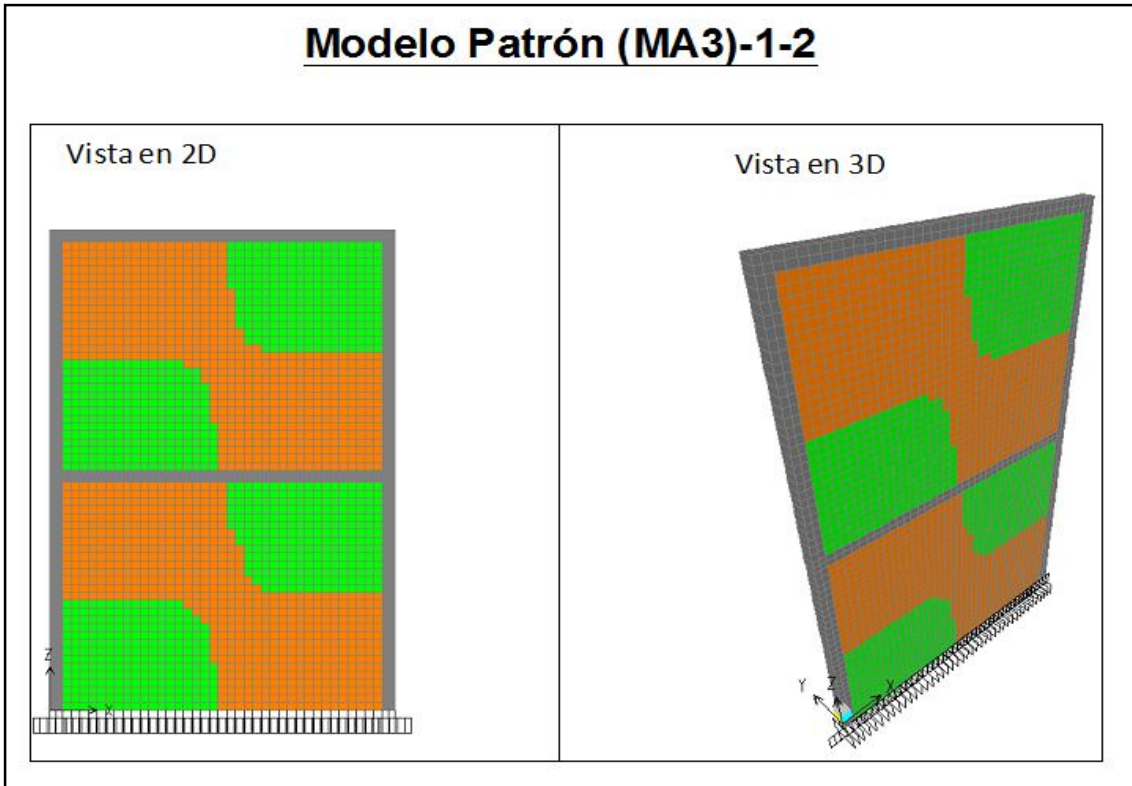


Figura 43. Modelo patrón (MA3)-1-2

Modelo Patrón (MA3)-2-2

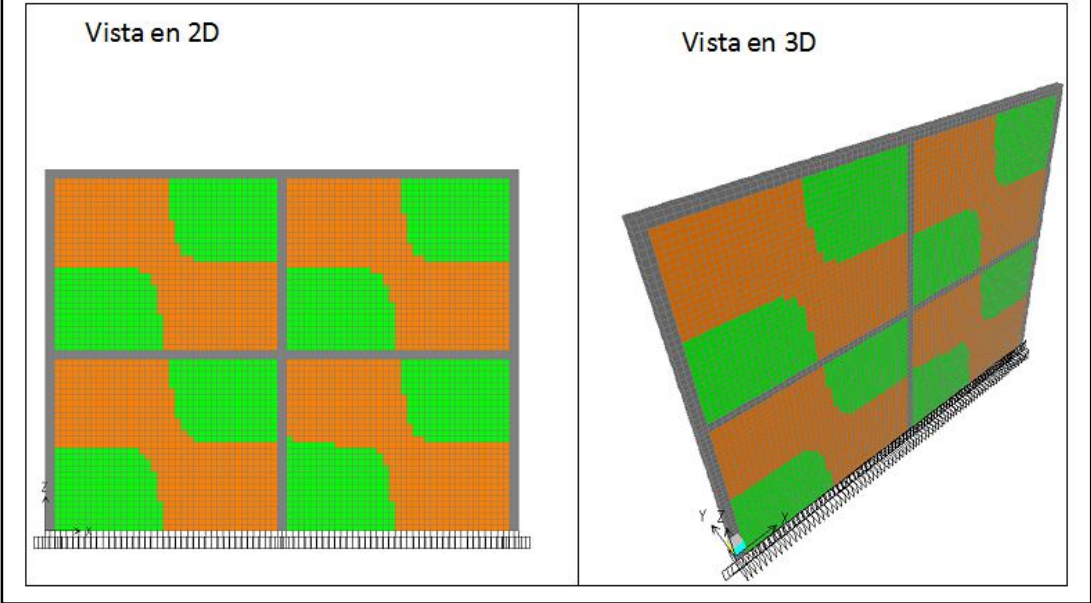


Figura 44. Modelo patrón (MA3)-2-2

Modelo Patrón (MA3)-3-2

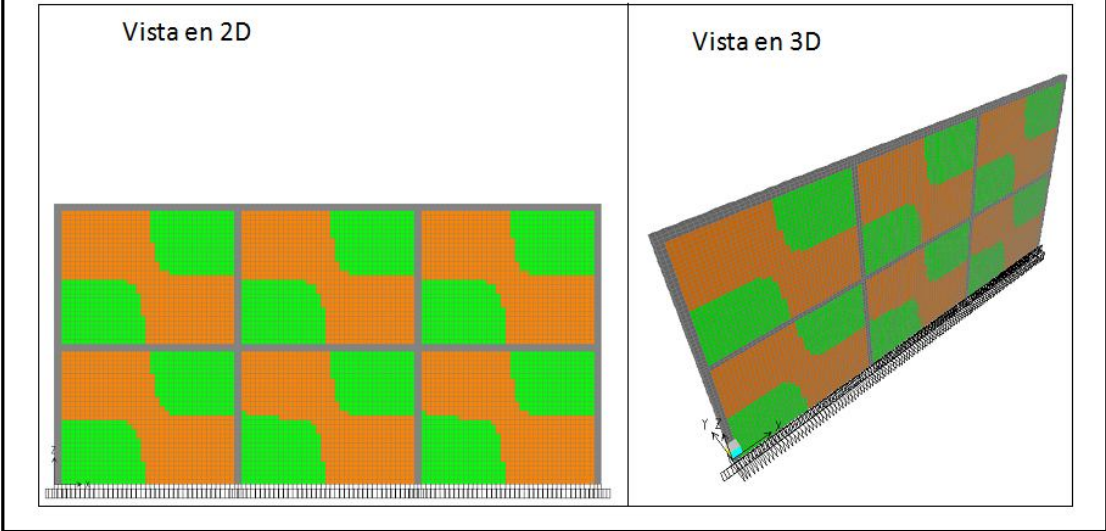


Figura 45. Modelo patrón (MA3)-3-2

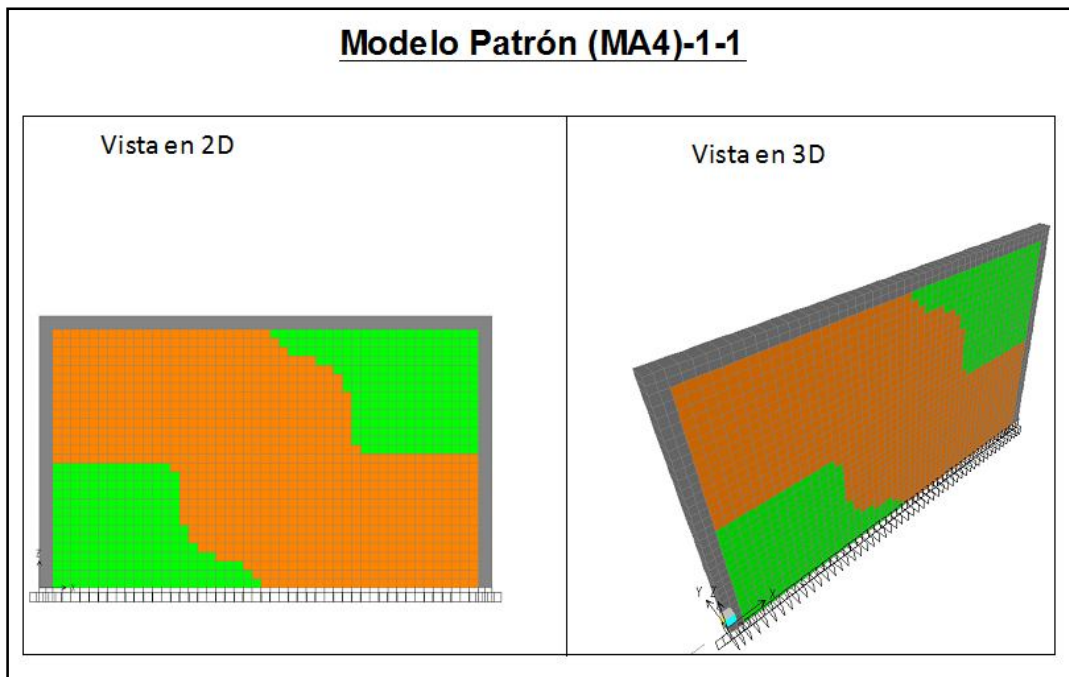


Figura 46. Modelo patrón (MA4)-1-1

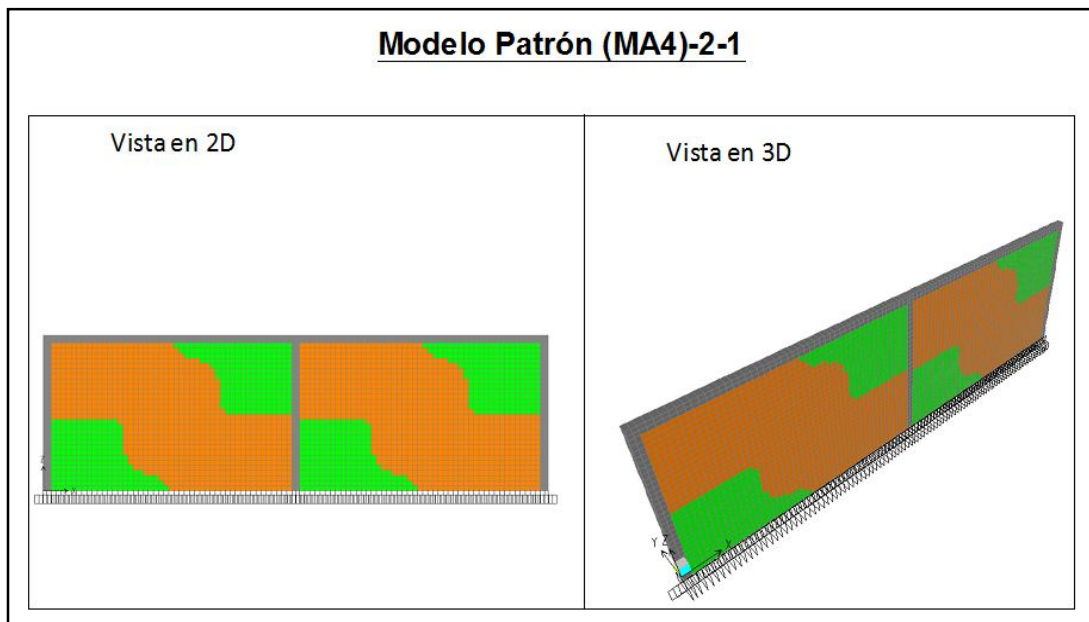


Figura 47. Modelo patrón (MA4)-2-1

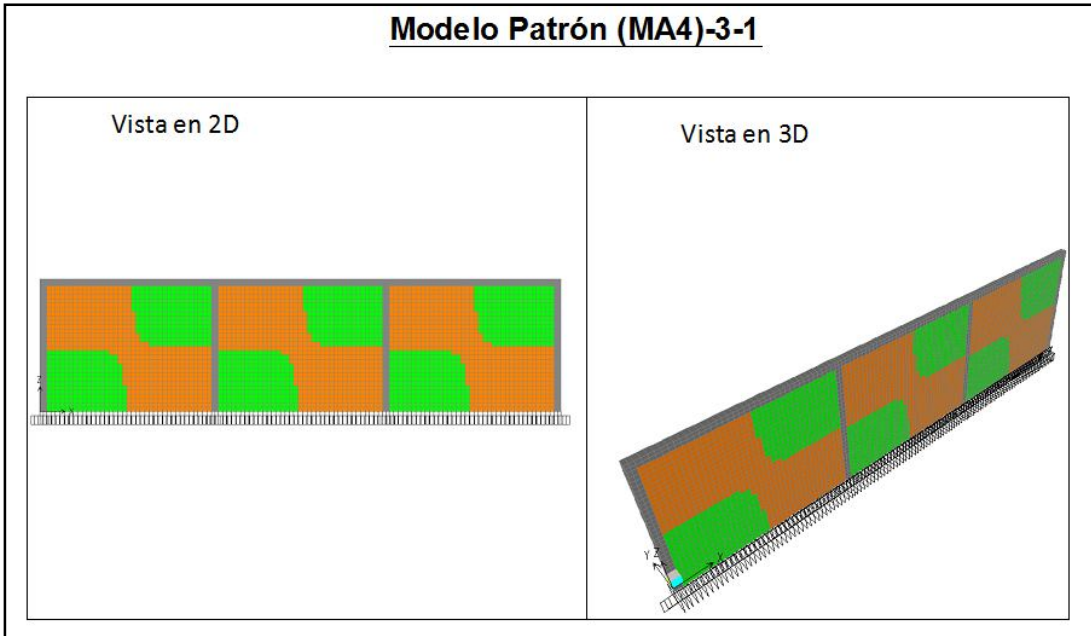


Figura 48. Modelo patrón (MA4)-3-1

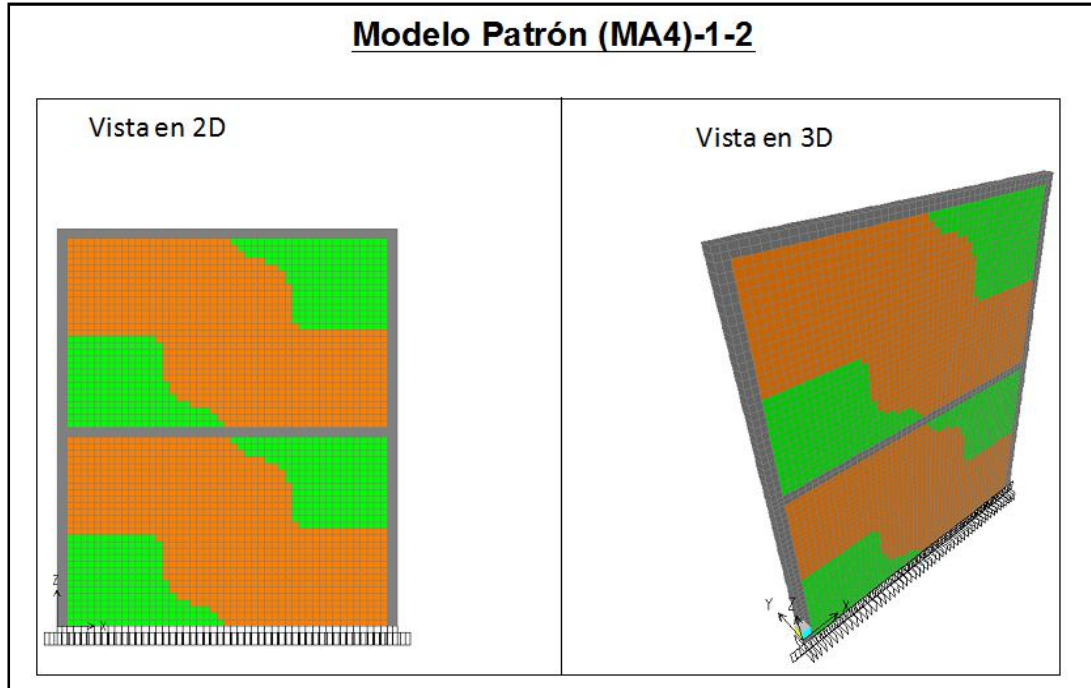


Figura 49. Modelo patrón (MA4)-1-2

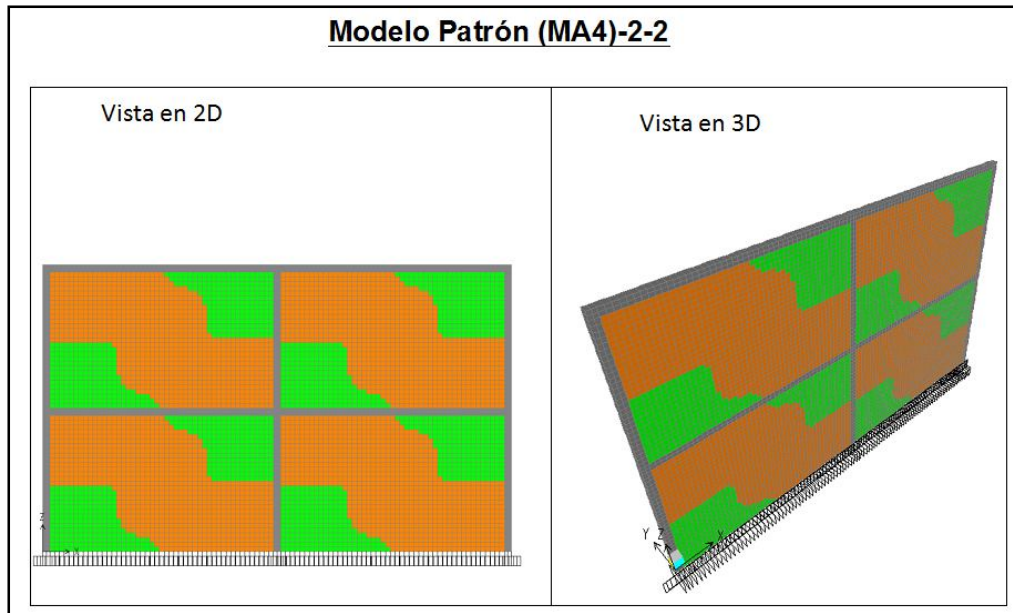


Figura 50. Modelo patrón (MA4)-2-2

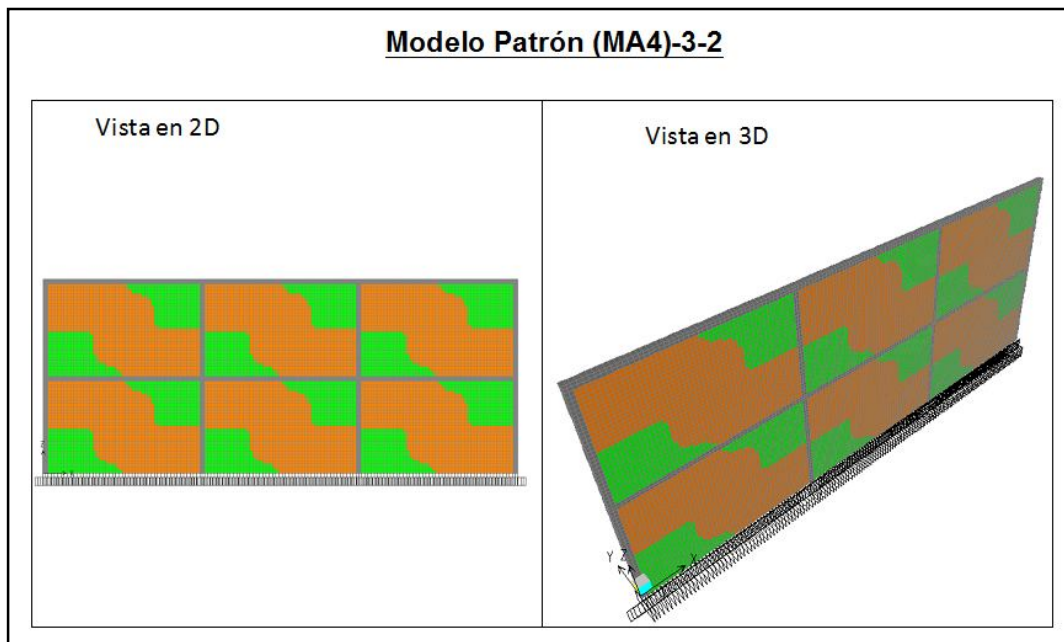


Figura 51. Modelo patrón (MA4)-3-2