

Influencia de la relación de aspecto de la geometría vertical en el comportamiento estructural de edificaciones aporticadas de concreto armado

Oswaldo J. Russián A., Víctor R. Salazar V. y Gerardo J. Gutiérrez D.

Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo - Venezuela
oswaldorussian1706@gmail.com, vrsv92@hotmail.com, gerardojgutierrezd@hotmail.com

Recibido: 15-02-2013 Aceptado: 20-09-2013

Resumen

La relación de aspecto es el cociente de las dos dimensiones de un contorno rectangular. El concepto se aplica para caracterizar cinco modelos estructurales, con el objetivo de cuantificar la influencia del mismo en el comportamiento estructural de edificaciones aporticadas de concreto armado. En el estudio se diseñaron edificaciones volumétricamente similares con relaciones de aspecto de 1:1, 1:2, 2:1, 1:3 y 3:1. Después de obtenidos los resultados del análisis de cada modelo, los valores de desplazamientos, derivas, reacciones de apoyo, período fundamental, corte basal y consumo de material, fueron evaluados en paralelo y se establecieron tendencias de variación que definen su comportamiento como función de la variable. Metodológicamente, el estudio se ubica en el tipo descriptivo, no experimental, transeccional. Se implementó la observación documental para la determinación de las condiciones de contorno de los modelos, según las especificaciones nacionales. En el análisis de los parámetros se determinó una tendencia de disminución potencial de los desplazamientos nodales, el período fundamental y el consumo de material en función de la relación de aspecto. Por el contrario, los valores de deriva y corte basal presentaron una tendencia de incremento con respecto a la variable, siendo las líneas de forma logarítmica y potencial respectivamente.

Palabras clave: Relación de aspecto, geometría vertical, edificaciones aporticadas, concreto armado, simetría.

Influence of the aspect ratio of vertical geometry on the structural behavior of framed reinforced concrete buildings

Abstract

The aspect ratio is the quotient of the two dimensions in a rectangular contour. This concept is used to characterize five structural models in order to quantify the influence of said quotient in the structural behavior of framed reinforced concrete buildings. In the study, volumetrically equivalent buildings with an aspect ratio of 1:1, 1:2, 2:1, 1:3 and 3:1 were designed. Once the analysis' results were obtained for each model, the values for displacements, relative displacements between levels, support reactions, fundamental vibration period, base shear and material usage were evaluated in parallel in order to establish tendency lines that define their behavior as a function of the variable. Methodologically, the study has a cross-sectional, non experimental, descriptive design. Documentary

observation was implemented in order to find the technical data required to define de boundary conditions for each model, in consonance with the national code. In the analysis of the parameters, a decremental tendency was found for the nodal displacements, fundamental vibration period and material usage as a function of the aspect ratio. On the contrary, the values for relative displacements between levels and base shear presented an incremental tendency in relation to the variable.

Key words: Aspect ratio, vertical geometry, framed buildings, reinforced concrete, symmetry.

Introducción

En esta investigación, el objetivo fundamental fue analizar la influencia de la relación de aspecto de la geometría vertical de las edificaciones de concreto armado, en su comportamiento estructural. La relación de aspecto de un plano vertical se define como el cociente de las dimensiones horizontal y vertical del edificio en dicho plano. El estudio consiste en la proyección de cinco (5) modelos estructurales en concreto armado con diferente relación de aspecto y volumétricamente equivalentes, sometidos a cargas permanentes, variables y sísmicas.

Los modelos fueron analizados para determinar las líneas de tendencia que definen el comportamiento de los siguientes parámetros: desplazamientos nodales, derivas, reacciones de apoyo, período natural, corte basal y consumo de material, en función de la relación de aspecto.

Inicialmente, se presenta una síntesis de los fundamentos y procedimientos metodológicos que se aplicaron en la realización del trabajo. Posteriormente, se presenta un resumen de los resultados obtenidos, en concordancia con los objetivos y fases de la investigación y, finalmente, se plantean las conclusiones del estudio.

Metodología

Los datos fueron obtenidos a través de la aplicación del análisis estructural de los modelos, llevado a cabo mediante la implementación de teorías y modelos matemáticos reconocidos, sin manipular los elementos que definen el fenómeno, por lo cual se determina esta investigación de tipo descriptivo. Por otra parte, el diseño de la misma es no experimental transeccional.

La muestra está representada por cinco (5) modelos estructurales de relación de aspecto 1:1, 1:2, 2:1, 1:3, 3:1, cuyo uso es habitacional y están localizados en una zona sísmica del tipo Z3 sobre un suelo tipo S2.

Para llevar a cabo esta investigación se plantearon cuatro (4) fases. La primera consistió en la conceptualización geométrica de los modelos. La segunda fase se basó en el predimensionamiento de los elementos estructurales de cada modelo, a partir de la cual se determinaron sus propiedades geométricas. Una tercera fase abarcó el cálculo y diseño estructural de los modelos. En ésta, los resultados de interés corresponden a los parámetros: desplazamientos nodales, derivas, reacciones de apoyo, período fundamental, corte basal y consumo de material. Finalmente, en la cuarta fase se tabularon los resultados obtenidos con respecto a los parámetros de interés, obteniendo además líneas de tendencia que definen el comportamiento de éstos con respecto a la variable en estudio.

Resultados

Conceptualización Geométrica de los Modelos

Se determinó el área de planta y la altura correspondiente a cada modelo, mediante la implementación de la ecuación 1, y considerando valores de relación de aspecto de 1:1, 1:2, 2:1, 1:3, 3:1. Las características se presentan en la tabla 1 y se muestran en la figura 1.

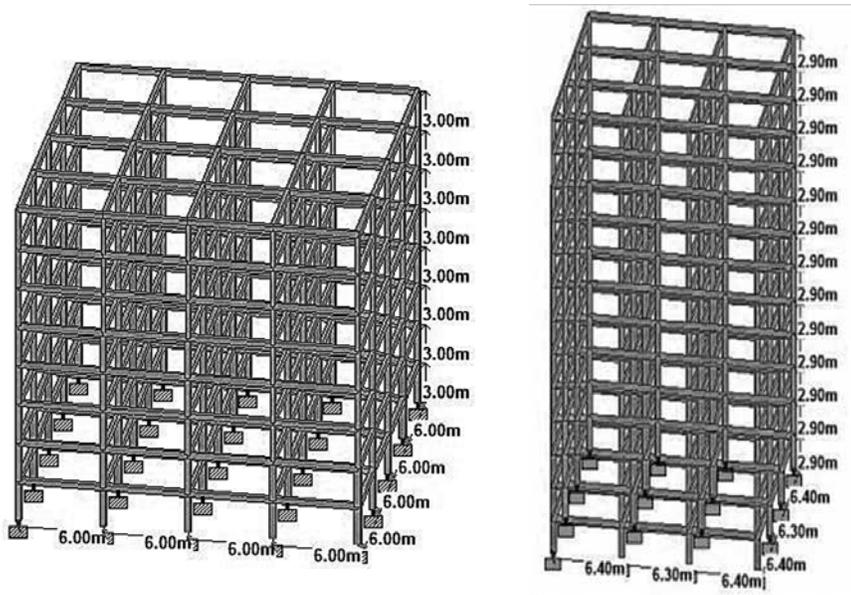
$$V = A_p \times h \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, V: volumen referencial; A_p : área de planta del modelo; h: altura del modelo.

Tabla 1. Conceptualización geométrica de los modelos

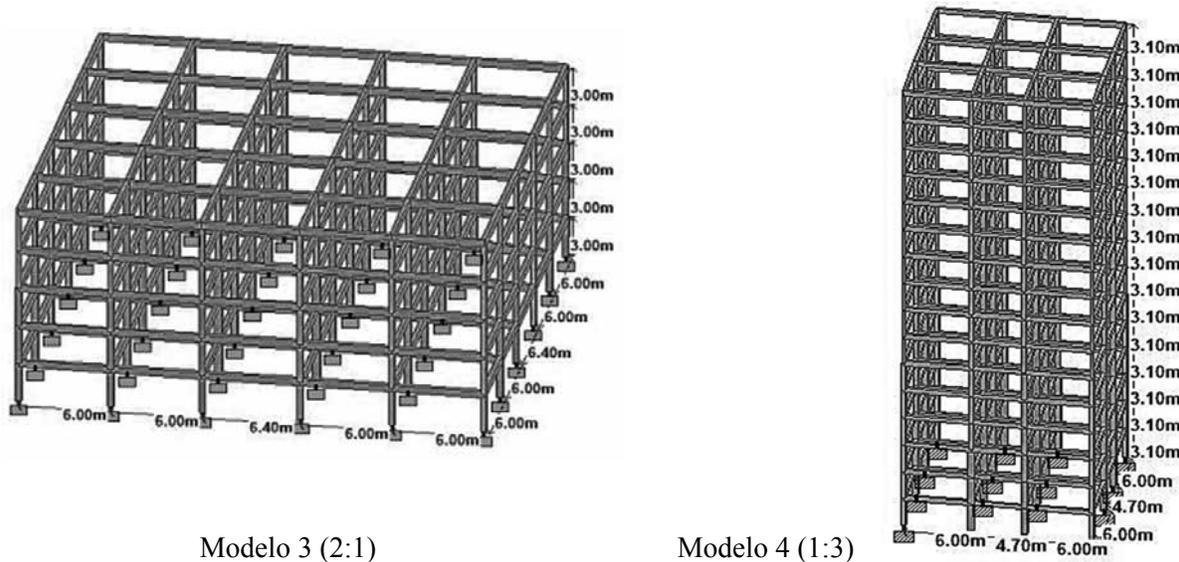
Modelo	H/V	A_p (m ²)	H (m)	Niveles	V (m ³)
1 (1:1)	1.00	576.00	24.0	8	13824.00
2 (1:2)	0.51	361.81	37.7	13	13753.34
3 (2:1)	2.02	924.16	15.0	5	13862.40
4 (1:3)	0.34	278.89	49.6	16	13832.94
5 (3:1)	2.97	1190.25	11.6	4	13607.53

Figura 1. Modelos estructurales



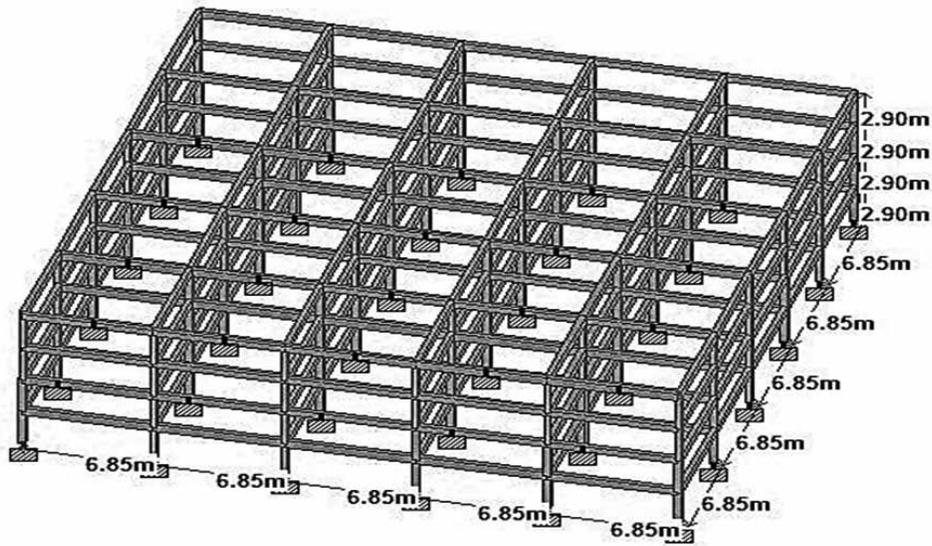
Modelo 1 (1:1)

Modelo 2 (1:2)



Modelo 3 (2:1)

Modelo 4 (1:3)



Modelo 5 (3:1)

Predimensionamiento de los Modelos

Considerando las configuraciones geométricas presentadas en la figura 1, se calcula un espesor ponderado de la losa para cada modelo, según lo establecido por la Norma COVENIN 1753:2006 [1, pág. 56] y expresado por Rojas [3, pág. 55], utilizando las ecuaciones 2 a 6.

Losa nervada simplemente apoyada:

$$e=L/16 \quad (\text{Ec. 2})$$

Losa nervada continua en un extremo:

$$e=L/18.5 \quad (\text{Ec. 3})$$

Losa nervada continua:

$$e=L/21 \quad (\text{Ec. 4})$$

Losa nervada en voladizo:

$$e=L/8 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$e_p = \frac{\sum A_i \times e_i}{\sum A_i} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde, e: espesor de la losa; L: luz entre apoyos; e_i : espesor ponderado; A_i : área de la losa i.

Los resultados obtenidos para las losas de cada modelo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Espesores de losa

Modelo	Espesor de loseta (cm)	Altura del nervio (cm)	Espesor total (cm)	Ancho de nervios (cm)	Ancho de bloques (cm)	Altura de bloques (cm)
1 (1:1)	5	25	30	10	40	25
2 (1:2)	5	30	35	10	40	30
3 (2:1)	5	25	30	10	40	25
4 (1:3)	5	25	30	10	40	25
5 (3:1)	5	30	35	10	40	30

Considerando espesores de 30 cm y 35 cm, se determinan las cargas permanentes y variables que actúan en cada caso. Un resumen de estas cargas se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Carga sobre las losas

Modelo	Carga permanente (kgf/m ²)	Carga permanente última (kgf/m ²)	Carga variable (kgf/m ²)	Carga variable última (kgf/m ²)
1 (1:1)	513.00	615.60	175.00	280.00
2 (1:2)	538.00	645.60	175.00	280.00
3 (2:1)	513.00	615.60	175.00	280.00
4 (1:3)	513.00	615.60	175.00	280.00
5 (3:1)	538.00	645.60	175.00	280.00

Para el caso de las vigas, el dimensionamiento se realizó según lo planteado por Rojas [3, pág. 58], utilizando las ecuaciones empíricas 7 y 8.

$$h_v = L / 12.5 \quad (\text{Ec. 7})$$

$$b_o = 0.6 \times h_v \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde, h_v : altura de la viga; L : luz entre columnas; b_o : ancho de la viga.

Las dimensiones de vigas para cada modelo se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones de vigas

Modelo	Tipo	Ancho (cm)	Altura (cm)
1 (1:1)	VC (X)	30	50
	VA (Z)	30	45
3 (2:1)	VC (X)	30	55
	VA (Z)	30	50
5 (3:1)	VC (X)	30	55
	VA (Z)	30	50
2 (1:2)	VC (X)	30	55
	VA (Z)	30	45
4 (1:3)	VC (X)	30	60
	VA (Z)	30	55

Las dimensiones de columnas se calcularon a través la aplicación de las ecuaciones 9 a 12, y la tabla 5, planteadas por Rojas [3, págs. 67-69], considerando sólo fuerzas axiales.

$$Pu_i = \sum_{j=1}^n CPu_j + FRCV_i \sum_{j=1}^n CVu_j + 1.2 \sum_{j=1}^n Ppcol_j \quad (\text{Ec. 9})$$

$$g = (t - 2d')/t \quad (\text{Ec. 10})$$

$$Ag = Pu / (f'c \times Ku) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$tx = ty = \sqrt{Ag} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde, Pu_i : carga total actuante en la columna; CPu_j : carga permanente sobre la columna; $FRCV_i$: factor de reducción de carga variable del piso; CVu_j : carga variable sobre la columna; $Ppcol_j$: peso propio de la columna; g : relación entre la separación de los aceros con respecto a la dimensión de la columna; t : altura de la sección transversal de la columna; d' : recubrimiento de cálculo; Ag : área de la sección transversal de la columna; Pu : carga actuante mayorada; $f'c$: resistencia a la compresión del concreto; Ku : relación entre la carga actuante, las dimensiones de la sección y la resistencia; tx , ty : dimensiones de la columna.

Ku es tomado de la tabla 5. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 6 a 10:

Tabla 5. Valores de Ku

G	Columnas internas (e/t)=0.15	Columnas externas (e/t)=0.20
0.6	0.54	0.47
0.7	0.56	0.49
0.8	0.57	0.50

Tabla 6. Columnas - Modelo 1 (1:1)

Elemento		Ancho (cm)			Alto (cm)		
Piso		1 a 3	4 a 6	7 y 8	1 a 3	4 a 6	7 y 8
Columnas	Interiores	45	40	35	45	40	35
	Exteriores	40	35	30	40	35	30

Tabla 7. Columnas - Modelo 2 (1:2)

Elemento		Ancho (cm)					Alto (cm)				
Piso		1 a 3	4 a 6	7 a 9	10 y 11	12 y 13	1 a 3	4 a 6	7 a 9	10 y 11	12 y 13
Columnas	Interiores	65	60	50	45	40	65	60	50	45	40
	Exteriores	50	45	40	35	30	50	45	40	35	30

Tabla 8. Columnas - Modelo 3 (2:1)

Elemento		Ancho (cm)		Alto (cm)	
Piso		1 a 3	4 y 5	1 a 3	4 y 5
Columnas	Interiores	40	35	40	35
	Exteriores	35	30	35	30

Tabla 9. Columnas - Modelo 4 (1:3)

Elemento		Ancho (cm)						Alto (cm)					
Piso		1 a 3	4 a 6	7 a 9	10 a 12	13 a 15	16	1 a 3	4 a 6	7 a 9	10 a 12	13 a 15	16
Columnas	Interiores	60	55	50	45	40	35	50	45	40	35	30	30
	Exteriores	50	45	40	35	30	30	50	45	40	35	30	30
	Esquinas	40	35	30	30	30	30	40	35	30	30	30	30

Tabla 10. Columnas - Modelo 5 (3:1)

Elemento		Ancho (cm)		Alto (cm)	
Piso		1 a 3	4	1 a 3	4
Columnas	Interiores	40	35	40	35
	Exteriores	35	30	35	30

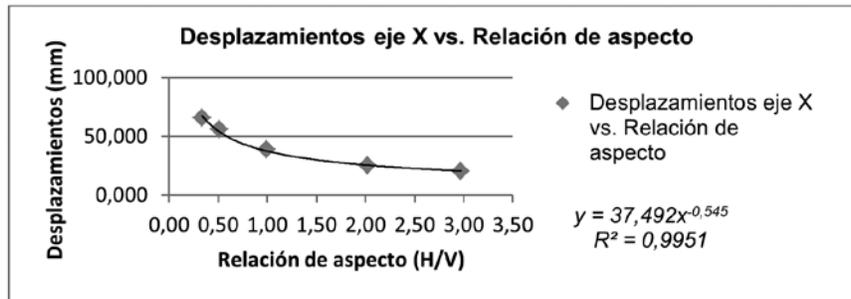
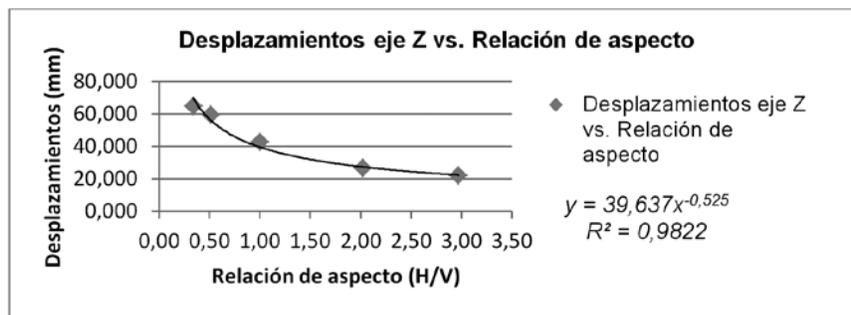
Cálculo Estructural y Procesamiento de Resultados

Un resumen de los resultados con respecto a los parámetros de interés se presenta en las tablas y figuras.

Los resultados con respecto a los desplazamientos nodales se presentan en la tabla 11 y las figuras 2 y 3.

Tabla 11. Desplazamientos traslacionales nodales - Valores máximos

Modelo	Relación de aspecto (H:V)	Desplazamientos en X (mm)	Desplazamientos en Z (mm)
1	1:1	39.092	42.829
2	1:2	55.437	59.477
3	2:1	24.653	26.113
4	1:3	65.247	64.914
5	3:1	20.798	22.193

Figura 2. Desplazamientos X vs. Relación de aspecto**Figura 3. Desplazamientos Z vs. Relación de aspecto**

En ambos casos se presentó una tendencia potencial de decremento de los máximos desplazamientos traslacionales nodales en función de la relación de aspecto.

Con respecto a los valores de derivas, se presenta un resumen de los datos obtenidos en la tabla 12 y las figuras 4 y 5.

Tabla 12. Derivas - Valores máximos

Relación de aspecto (H:V)	Derivas máximas en X (mm)	Derivas máximas en Z (mm)
1:3	4.945	5.394
1:2	5.629	6.511
1:1	6.535	7.261
2:1	6.255	6.701
3:1	6.517	7.009

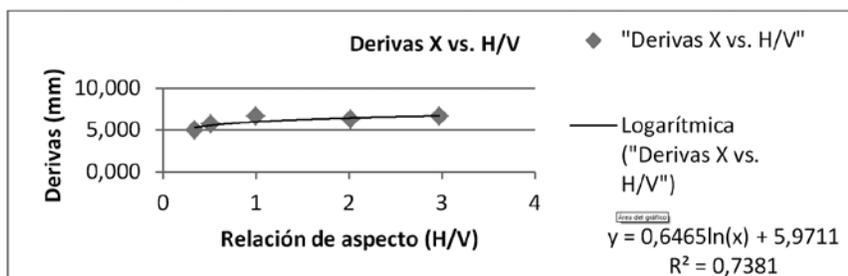
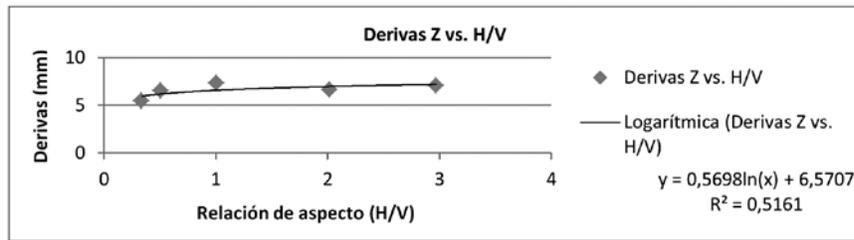
Figura 4. Derivas X vs. Relación de aspecto

Figura 5. Derivas Z vs. Relación de aspecto



En ambos casos, se determinó una tendencia logarítmica de incremento de las derivas con respecto a la relación de aspecto, obteniéndose incrementos porcentuales del 31.66% y 29.94% para los ejes X y Z, respectivamente.

En relación al parámetro reacciones de apoyo, un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. Reacciones de apoyo - Resumen

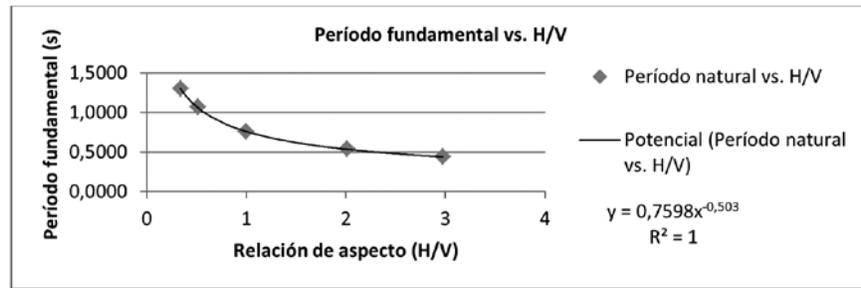
Modelo	Relación de aspecto (H:V)	Fy (tf)	Mx (tf.m)	Mz (tf.m)
1	1:1	351.53	12.95	13.13
2	1:2	658.38	29.80	30.46
3	2:1	225.11	11.59	12.08
4	1:3	573.28	17.24	20.91
5	3:1	243.44	14.15	14.50

En el caso de este parámetro se dificulta el establecimiento de una tendencia de variación clara, indicando que las reacciones de apoyo dependen principalmente del número de soportes. En consecuencia, los datos de la tabla 13 no se representan gráficamente.

Los resultados obtenidos con respecto al período fundamental, coeficiente sísmico y corte basal para el primer modo de vibración se presentan en la tabla 14, y los gráficos de período fundamental y corte basal en las figuras 6 y 7, respectivamente.

Tabla 14. Período fundamental, coeficiente sísmico y corte basal

Relación de aspecto (H:V)	hn (m)	T (s)	F (cps)	Ad	μ_1	μ_2	Cs	Vo (tf)
1:3	49.6	1.308	0.764	0.047	0.795	0.843	0.039	85.91
1:2	37.7	1.065	0.938	0.057	0.811	0.826	0.047	110.21
1:1	24.0	0.759	1.317	0.080	0.850	0.804	0.068	136.82
2:1	15.0	0.533	1.874	0.087	0.891	0.788	0.078	156.18
3:1	11.6	0.440	2.272	0.087	0.910	0.781	0.079	167.61

Figura 6. Período fundamental vs. Relación de aspecto

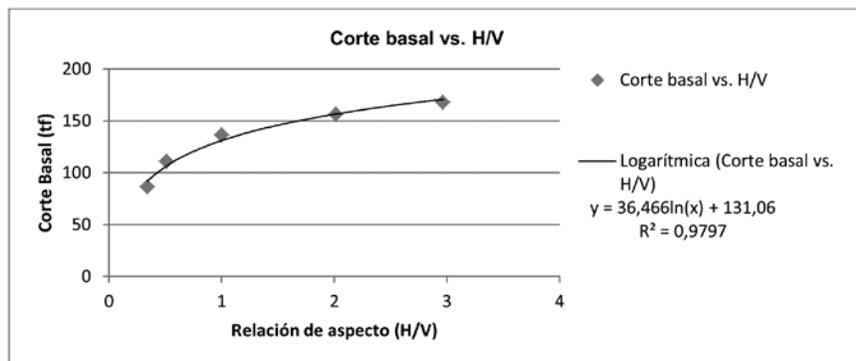
La tendencia derivada para el período fundamental resultó ser una de decremento potencial con un coeficiente de determinación R^2 igual a la unidad. La ecuación utilizada para calcular los períodos es una función potencial de la altura de la edificación, tal como lo define la Norma COVENIN 1756:2001 [2, pág. 45].

$$T=Ta=0.07(hn)^{0.75} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde, $T=Ta$: período fundamental de la estructura; hn : altura de la edificación.

Se obtuvieron decrementos porcentuales entre relaciones de aspecto de 1:3 a 3:1 del 65.47%.

Los valores calculados de corte basal para el primer modo de vibración se reflejan en la figura 7 como función de la relación de aspecto.

Figura 7. Corte basal vs. Relación de aspecto

La ecuación 14 fue utilizada para calcular el corte basal en cada modelo. Ésta es establecida en la Norma COVENIN 1756:2001 [2, pág. 44].

$$Vo=Cs \times Wt \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde, Vo : corte basal; Cs : coeficiente sísmico; Wt : peso total del edificio

Considerando pesos similares, esta ecuación refleja lo representado en la figura 7 y la tabla 14: un incremento del corte basal conforme aumenta el coeficiente sísmico.

Finalmente, los resultados con respecto al consumo de concreto y acero de refuerzo se presentan como función de la relación de aspecto en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. Volúmenes de concreto

Relación de aspecto (H:V)	Vigas y Columnas (m ³)	Losas (m ³)	Volumen total de concreto (m ³)	Volumen geométrico (m ³)
1:3	454.86	446.224	901.084	13832.94
1:2	435.92	521.678	957.598	13753.34
1:1	358.89	460.800	819.690	13824.00
2:1	354.92	462.080	817.000	13862.40
3:1	337.03	516.148	853.178	13607.53

Tabla 16. Consumo de acero de refuerzo

Relación de aspecto (H:V)	Modelo	Acero de refuerzo (lbf)	Acero de refuerzo (kgf)
1:3	4	112546.49	51051.09
1:2	2	123418.04	55982.42
1:1	1	96877.94	43943.83
2:1	3	80972.89	36729.30
3:1	5	85064.19	38585.12

Conclusiones

• Los parámetros de comportamiento estructural varían según distintas tendencias en función de la relación de aspecto, para edificaciones volumétricamente similares de concreto armado. Revelando que esta variable geométrica tiene influencia que debe cuantificarse.

• La magnitud de los desplazamientos horizontales disminuye conforme aumenta la relación de aspecto (H/V). Se determinaron variaciones porcentuales del 68.12% y 65.81% para los desplazamientos en X y Z, respectivamente. Las líneas de tendencia derivadas producen valores de R² de 0.989 en promedio, representando el 98.9% de la varianza de las observaciones.

• Los valores de derivas presentan un leve incremento en tendencia logarítmica conforme aumenta la relación de aspecto, a pesar de que los desplazamientos traslacionales nodales tienen un comportamiento inverso. El incremento en las derivas en el eje X fue del 31.66%, y en el eje Z fue del 29.94%. Por el aumento en la rigidez de los elementos estructurales correspondientes a edificaciones con mayor altura, éstas son menos vulnerables a desplazamientos relativos, aunque su elevación las haga susceptibles a mayores desplazamientos absolutos.

• Las líneas de tendencia derivadas para definir las variaciones de las reacciones de apoyo de momentos presentan coeficientes de determinación R² de 0.347 y 0.492, representando sólo el 34.7% y 49.2% de la varianza de las observaciones, respectivamente. Se refleja así que el parámetro es de alta variabilidad y que depende mayormente de las características geométricas y el número de apoyos de los modelos.

• Los valores de corte basal definen una tendencia de aumento logarítmico con un valor del coeficiente de determinación, R², de 0.979, concluyéndose que los edificios de menor altura son más vulnerables a acciones sísmicas en su base.

Referencias bibliográficas

1. COVENIN (Fondonorma), *Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones. Análisis y Diseño*, Norma n.º 1753, Caracas, Venezuela (2006).
2. COVENIN (Fondonorma), *Edificaciones Sismorresistentes*, Norma n.º 1756, Caracas, Venezuela (2001).
3. Rojas O., *Proyectos Técnicos Estructurales*, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela (2000).