

**DETERMINACIÓN DE LA INCIDENCIA DE IRREGULARIDADES EN LA
CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN LA RESPUESTA RESISTENTE DE LAS
EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA**

ELKIN MAURICIO LÓPEZ MORANTES

Ing. Civil

Grupo de Investigación INME

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**DETERMINACIÓN DE LA INCIDENCIA DE IRREGULARIDADES EN LA
CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN LA RESPUESTA RESISTENTE DE LAS
EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA**

ELKIN MAURICIO LÓPEZ MORANTES

Ing. Civil

Grupo de Investigación INME

**Trabajo de grado para optar el título de:
Maestro en Ingeniería Civil**

Director:

GUSTAVO CHIO CHO

Ingeniero Civil, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICO EL SIGUIENTE TRABAJO A:

A mi madre, padre y hermano, que sin sus grandes aportes y esfuerzos no
hubiese sido posible alcanzar esta meta.

Al profesor Gustavo Chío, por su valioso aporte en la dirección y asesoramiento en
el desarrollo del presente trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	22
1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL...25	
1.1 ASPECTOS GENERALES EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA.....	25
1.2 CLASIFICACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL.....	25
1.3 EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA	30
1.4 MATERIALES DE LA MAMPOSTERÍA Y SUS PROPIEDADES	31
1.4.1 Unidades de mampostería o ladrillos.....	32
1.4.2 Morteros de pega	33
1.5 MAMPOSTERÍA COMO MATERIAL COMPUESTO	33
1.5.1 Mampostería-Resistencia a la compresión.....	33
1.5.2 Mampostería - Curvas Esfuerzo Vs Deformación y Módulo de elasticidad.....	35
1.5.3 Mampostería – Módulo de rigidez o cortante.....	36
1.6 VULNERABILIDAD EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA.....	37
1.6.1 Metodología propuesta por el Grupo INME para determinar el índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones a partir de la opinión de expertos.	38
1.7 IRREGULARIDADES EN LA CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA EN EDIFICACIONES	42
1.7.1 Irregularidades en planta	42
1.7.2 Irregularidades en altura	44
1.8 IRREGULARIDADES EN LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES.....	45
1.8.1 Las concentraciones de masa.	45
1.8.1.1 Pisos suaves o blandos.	46
2 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA ANTE CARGAS LATERALES.....	52
2.1 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LA CURVA DE CAPACIDAD PARA LA MAMPOSTERÍA CONFINADA.....	56
2.2 Trabajo realizado por R. Meli.....	57
2.3 Trabajo realizado por M. O. Moroni.....	59
2.4 Trabajo realizado por Tomazevic.....	60
3 ENFOQUES EN EL MODELAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA.....	63
3.1 MICROMODELOS	63
3.2 MACROMODELOS	67
3.2.1 El método del puntal equivalente.....	67
3.2.1.1 Ajustes en el ancho del puntal por presencia de irregularidades [36, 37].....	70

3.2.1.2 Excentricidad del puntal equivalente [36,37].	70
3.2.1.3 Pórticos confinantes parcialmente rellenos [36, 37]	71
3.2.1.4 Paneles con aberturas [36.37]	72
3.2.1.5 Ajustes en el ancho del puntal por presencia de daño (agrietamiento) en el panel [36, 37].	74
3.2.1.6 Resistencia a la compresión del relleno de mampostería [36].	75
3.2.1.7 Resistencia al cortante del relleno de mampostería [36].	76
3.2.1.8 Comportamiento carga-deformación del puntal [36, 37].	77
3.2.1.9 Posición de las rótulas plásticas [36, 37].	79
3.2.2 Macromodelamiento con elementos finitos.	80
3.3 MACROMODELAMIENTO CONSIDERANDO LAS IRREGULARIDADES EN LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA.	84
3.4 TÉCNICAS GENERALES DE EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES	87
3.4.1 Procedimiento estático lineal (LSP)	88
3.4.2 Procedimiento dinámico lineal (LDP)	88
3.4.3 Procedimiento estático no lineal (NSP)	88
3.4.4 Procedimiento dinámico no lineal (NDP)	89
4 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES.	90
4.1 SELECCIÓN DE LA LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA.	90
4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE BLOQUES INDIVIDUALES (f'_{cu}).	91
4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE MORTEROS (f'_{cp})	93
4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PILAS DE MAMPOSTERÍA (f'_m).	94
4.5 ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN PILAS DE MAMPOSTERÍA (V'_m).	97
5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE UNO Y DOS PISOS CONSIDERANDO IRREGULARIDADES EN SU CONFIGURACIÓN.	100
5.1 PROCEDIMIENTO ESTÁTICO NO LINEAL (NSP) PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA	100
5.1.1 Definición de los principios generales de la modelación	100
5.1.1.1 Capacidad de las edificaciones.	101
5.1.1.2 Demanda sísmica sobre la estructura.	102
5.1.1.3 Definición de la demanda (Espectro de diseño NSR-10).	103
5.1.1.4 Comportamiento de las edificaciones [37].	106
5.1.1.5 Definición del punto de comportamiento.	107

5.2 EVALUACIÓN DEL DAÑO GLOBAL EN LAS EDIFICACIONES	110
5.2.1 Niveles y rangos de daño.....	112
5.3 SELECCIÓN DE LA CASA TIPO	114
5.3.1 Descripción general.....	114
5.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A CONSIDERAR EN EL MODELADO	116
5.5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO PRESENCIA DE ABERTURAS EN SU MUROS PORTANTES. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	121
5.5.1 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de dos (2) pisos.....	121
5.5.1.1 Modelos hipotéticos.....	121
5.5.1.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.....	127
5.5.1.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en la edificación.....	130
5.5.1.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.	134
5.5.2 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de un piso.....	135
5.5.2.1 Modelos hipotéticos.....	135
5.5.2.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de un piso propuestas.....	140
5.5.2.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de un piso.....	144
5.5.2.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.	148
5.6 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO PRESENCIA DE ABERTURAS EN SU MUROS PORTANTES. MÉTODO DEL PUNTAL EQUIVALENTE.....	149
5.6.1 Parámetros del puntal equivalente para modelamiento de mampostería confinada.....	150
5.6.2 Modelamiento de edificaciones de dos pisos por el método del puntal equivalente.	156
5.6.2.1 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.....	158
5.6.2.2 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de dos pisos.....	161
5.6.2.3 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.	165
5.6.3 Modelamiento de edificaciones de un piso por el método del puntal equivalente.....	166
5.6.3.1 Determinación de la capacidad de las edificaciones de un piso propuestas.....	168
5.6.3.2 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de un piso.....	171
5.6.3.3 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.	175
5.7 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO CONFINAMIENTO PARCIAL DE LA EDIFICACIÓN. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	176

5.7.1 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de dos pisos.....	177
5.7.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.....	179
5.7.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de dos pisos.....	181
5.7.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.....	185
5.8 RECOMENDACIONES DE MODELAMIENTO DE MAMPOSTERÍA CONFINADA.....	186
5.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	189
5.9.1 Por Irregularidades en presencia de aberturas y confinamiento parcial en función del método de modelamiento empleado y daño obtenido.....	189
5.9.2 Comparación por métodos de modelamiento en término de curvas de capacidad (Pushover).....	195
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	199
REFERENCIAS.....	203
BIBLIOGRAFÍA.....	209
ANEXOS.....	216

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Detalle muro de cavidad reforzada (Tomado de [2]).....	26
Figura 2. Detalle muro mampostería reforzada o parcialmente reforzada (Tomada de [2]).....	27
Figura 3. Muro de mampostería reforzada externamente (Tomado de [3]).....	28
Figura 4. Muros diafragma dentro de pórticos (Fuente: Autor)	28
Figura 5. Edificación con sistema de muros de mampostería confinada Tomado de [4]).....	29
Figura 6. Tipos de mampostería estructural (Fuente: Autor).....	30
Figura 7. Detalle muro de mampostería confinada (Fuente: Autor)	30
Figura 8. Unidades típicas de mampostería (Fuente: Autor).....	32
Figura 9. Curva esfuerzo Vs deformación de pilas en compresión (Tomado de [6])	34
Figura 10. Determinación del módulo de elasticidad (Adaptado de [7]).....	35
Figura 11. Curvas esfuerzo Vs deformación obtenidas en ensayos de compresión diagonal (Adaptado de [6]).....	36
Figura 12. Localización de juntas sísmicas (Adaptada de [17])	43
Figura 13. Configuraciones irregulares en planta (Adaptada de [17])	44
Figura 14. Configuraciones irregulares en altura (Adaptada de [17]).....	44
Figura 15. a) Masas concentradas en diferentes niveles; b) Falla de una edificación por concentraciones de masa (Tomada de [18]).....	45
Figura 16. (a) y (b). Discontinuidad de elementos estructurales (Fuente: Autor) ..	47
Figura 17. Presencia de aberturas (Fuente: Autor).....	48
Figura 18. Efectos de torsión en edificaciones (Tomado de [17])	49
Figura 19. Ensayo en voladizo para un muro de mampostería (Adaptada de [9])	52
Figura 20. Envoltorio modelo histerético (Tomado de [6]).....	54
Figura 21. Modelo trilineal para cargas cuasi-estáticas (Tomado de [6]).....	57
Figura 22. Modelo histerético para muros de mampostería confinados propuesto por Moroni (Tomado de [21])	60
Figura 23. Idealización envoltorio de comportamiento (Tomado de [52]).....	61

Figura 24. Modelo del puntal equivalente en compresión (Tomado de [35]).....	68
Figura 25. Excentricidad del puntal equivalente respecto a la columna (Tomado de [37]).....	71
Figura 26. Ubicación del puntal en pórticos parcialmente rellenos (Tomado de [37]).....	72
Figura 27. Reducción del ancho del puntal por presencia de aberturas (Tomado de [37]).....	72
Figura 28. Esquema de posible representación del puntal equivalente en estudio de efectos locales en muros con aberturas (Tomado de [37])	74
Figura 29. Clasificación de grietas según su tamaño (Adaptado de [36]).	74
Figura 30. Simplificación de una grieta de cortante (Tomado de [37]).....	76
Figura 31. Parámetros en la determinación de la relación Carga-Deformación del puntal (Tomado de [37]).....	78
Figura 32. Parámetros en la determinación de la relación Carga-Deformación del puntal (Tomado de [37]).....	78
Figura 33. Localización de rotulas plásticas en un muro confinado(Tomado de [37]).....	80
Figura 34. Macromodelo empleando elementos finitos (Fuente: Autor).....	81
Figura 35. Esquema del Modelo de columna ancho (Tomado de [40]).....	82
Figura 36. Factor de condiciones de apoyo (Tomado de [40])	83
Figura 37. Factor de reducción de rigidez para muros de relleno en función del porcentaje de aberturas (Tomado de [43]).....	85
Figura 38. Unidades de perforación horizontal (H-10, H-15), y macizo (tolete). (Tomado de [48])	90
Figura 39. Ensayo de resistencia a la compresión de unidades de mampostería.	91
Figura 40. Muestras de mortero de pega	94
Figura 41. Ensayo de compresión axial (Fuente: Autor).	94
Figura 42. (a) Prensa hidráulica (b) Máquina universal (MTS).....	95
Figura 43. Curvas esfuerzo Vs deformación a compresión simple de pilas con bloques H-10 (Tomado de [48])	96

Figura 44. Fallas típicas de cortante por tensión diagonal (Fuente Autor)	98
Figura 45. Curvas esfuerzo Vs deformación por tensión diagonal de pilas con bloques H-10 (Tomado de [40])	98
Figura 46. Esquema general de un análisis Pushover (Tomado de [54]).....	102
Figura 47. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño como fracción de g. (Tomado de [1])	103
Figura 48. Espectro elástico definido como la demanda para el análisis de las edificaciones (Fuente: Autor)	105
Figura 49. Método del espectro de capacidad (Tomado de [37]).....	106
Figura 50. Método de los coeficientes de desplazamiento (Tomado de [37])	107
Figura 51. Curva de capacidad “Pushover”, representación bilineal (Adaptada de [46]).....	108
Figura 52. Método del espectro de capacidad (performance point).....	108
Figura 53. Hoja de cálculo para el cálculo del punto de comportamiento y daño.	109
Figura 54. Planta distribución arquitectónica de la casa tipo para nivel 1, 2 (proyectado) y cubierta.	115
Figura 55. Fachada frontal edificación tipo	116
Figura 56. Dimensiones Bloque H10 (Tomado de [37])	117
Figura 57. Sección transversal y aceros de refuerzo considerados para elementos confinantes (Fuente: Autor)	118
Figura 58. (a) Curva esfuerzo Vs deformación de la mampostería con f'_m [Kg/cm ²]= 15, (b) Modelo Linealizado DEPMI-UNAM (Adaptado de [55])	119
Figura 59. Sección aligerada de entrepiso y cubierta para casas de uno y dos pisos (Fuente: Autor)	120
Figura 60. Modelo 3D Casa Original (% Aberturas= 17%).....	124
Figura 61. (a) Sección de muros representada como capas de espesor igual a 1.3cm, (b) Rótulas plásticas en elementos de confinamiento	125
Figura 62. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 00%).....	127
Figura 63. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 17%)	128

Figura 64. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 31%).....	128
Figura 65. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 42%).....	129
Figura 66. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 55%).....	129
Figura 67. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 100%).....	130
Figura 68. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)....	131
Figura 69. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 17%)....	131
Figura 70. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 31%)....	132
Figura 71. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 42%)....	132
Figura 72. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 55%)....	133
Figura 73. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%)...	133
Figura 74. Curva de daño por aberturas para edificaciones de dos pisos	135
Figura 75. Modelo 3D Casa Original (% Aberturas= 15%).....	138
Figura 76. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 00%).....	140
Figura 77. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 15%)	141
Figura 78. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 26%).....	141
Figura 79. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 37%).....	142
Figura 80. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 50%).....	142
Figura 81. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 75%).....	143
Figura 82. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 100%).....	143
Figura 83. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)....	144
Figura 84. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 15%)....	145
Figura 85. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 26%)....	145
Figura 86. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 37%)....	146
Figura 87. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 50%)....	146
Figura 88. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 75%)....	147
Figura 89. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%)...	147
Figura 90. Curva de daño por aberturas para edificaciones de un piso	149
Figura 91. Muro confinado representado como Puntal equivalente (Tomado de [35]).....	151
Figura 92. Pórtico solo indicando localización y generación de rotulas plásticas	153

Figura 93. Curva de capacidad y resistencia del pórtico solo.	154
Figura 94. Curva de comportamiento de la mampostería como puntal por carga axial	156
Figura 95. Modelo 3D Casa Original método del puntal (% Aberturas= 17%). (a) Modelo con distribución de puntales, (b) Tipos y localización de las rótulas	158
Figura 96. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 0.0%).....	159
Figura 97. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 17%).....	159
Figura 98. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 31%).....	160
Figura 99. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 42%).....	160
Figura 100. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 55%).....	161
Figura 101. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)..	162
Figura 102. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 17%)...	162
Figura 103. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 31%)...	163
Figura 104. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 42%)...	163
Figura 105. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 55%)...	164
Figura 106. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%).	164
Figura 107. Curva de daño por aberturas para edificaciones de dos pisos	166
Figura 108. Modelo 3D Casa Original método del puntal (% Aberturas= 15%) ..	167
Figura 109. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 0.0%).....	168
Figura 110. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 15%)	169
Figura 111. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 26%).....	169
Figura 112. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 37%).....	170
Figura 113. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 50%).....	170
Figura 114. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 75%).....	171
Figura 115. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)..	172
Figura 116. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 15%)...	172
Figura 117. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 26%)...	173
Figura 118. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 37%)...	173
Figura 119. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 50%)...	174
Figura 120. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 75%)...	174

Figura 121. Curva de daño por aberturas para edificaciones de un piso	176
Figura 122. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 100%) ...	179
Figura 123. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 82.1%) ..	180
Figura 124. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 53.87%)	180
Figura 125. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 28.247%)	181
Figura 126. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 100%)..	182
Figura 127. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 82.1%).	182
Figura 128. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 53.87%)	183
Figura 129. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 28.24%)	183
Figura 130. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 0.0%)...	184
Figura 131. Curva de daño por confinamiento para edificaciones de dos pisos .	185
Figura 132. Valores de Fuerza Cortante por efecto de aberturas, casas de un piso	189
Figura 133. Valores de Fuerza Cortante por efecto de aberturas, casas de dos pisos	190
Figura 134. Porcentajes de daño para casas de un piso. Método FEM y Método Puntal.....	191
Figura 135. Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM y Método Puntal.....	192
Figura 136. Niveles de daño para casas de uno y dos pisos. Método FEM.....	193
Figura 137. Niveles de daño para casas de uno y dos pisos. Método Puntal	194
Figura 138. Modelo Puntal y FEM. Casas de un piso (Abert= 0.0%)	196
Figura 139. Modelo Puntal y FEM. Casas de un piso (Abert= 37%)	196
Figura 140. Modelo Puntal y FEM. Casas de dos pisos (Abert= 0.0%).....	197
Figura 141. Modelo Puntal y FEM. Casas de dos pisos (Abert= 31%).....	198

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas típicas de las unidades (Tomado de [5]).....	32
Tabla 2. Propiedades mecánicas típicas de las unidades (Adaptado de [1])	33
Tabla 3. Propiedades mecánicas de las piezas (Adaptado de [1])	33
Tabla 4. Parámetros considerados y categorías propuestas (Tomada de [15])	40
Tabla 5. Factores de reducción (R_2); acorde al tipo de daño y la relación de esbeltez.(Tomado de [37])	75
Tabla 6. Relaciones Fuerza/Deflexión para análisis estático no lineal (Tomado de [35]).....	79
Tabla 7. Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])	91
Tabla 8. Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])	92
Tabla 9. Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])	92
Tabla 10. Valores de Absorción para los bloques ensayados (Tomado de [48])...	93
Tabla 11. Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])	94
Tabla 12. Valores de f'_m teóricos y experimentales de las unidades ensayadas (Tomado de [48])	96
Tabla 13. Valores de resistencia por tensión diagonal de las unidades ensayadas (Tomado de [48])	99
Tabla 14. Valores de coeficiente de importancia (Tomado de [1]).....	105
Tabla 15. Grado de daño e Índice de pérdidas (Tomado de [50, 16]).	112
Tabla 16. Estados definidos método AUTH del Wp4 (Tomado de [50, 16]).	113
Tabla 17. Estados de daño y desplazamientos límites en edificaciones de mampostería sin reforzar. (Tomado de [50, 16]).....	113
Tabla 18. Dimensiones de los elementos estructurales de la casa tipo	115
Tabla 19. Valores de ϕ_c y ϕ_e (Tomado de [1])	117
Tabla 20. Propiedades de los materiales tomadas para los elementos confinantes de concreto y de la mampostería.....	118
Tabla 21. Carga muerta y viva impuesta a las edificaciones	120

Tabla 22. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección XZ casa original (% aberturas= 17%)	122
Tabla 23. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección YZ casa original (% aberturas= 17%)	123
Tabla 24. Modelos 3D Considerados la variación del parámetro en aberturas para el análisis de casas de dos pisos.....	126
Tabla 25. Puntos de comportamiento y valores de periodo en el sentido débil, de cortante y desplazamiento obtenidos, casas de dos pisos	134
Tabla 26. Niveles de daño para las casas analizadas casas de dos pisos	134
Tabla 27. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección XZ casa original (% aberturas= 15%)	136
Tabla 28. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección YZ casa original (% aberturas= 15%)	137
Tabla 29. Modelos 3D Considerados la variación del parámetro en aberturas para el análisis de casas de un piso.	139
Tabla 30. Puntos de comportamiento y valores de periodo en el sentido débil, de cortante y desplazamiento obtenidos, casas de un piso.....	148
Tabla 31. Niveles de daño para las casas analizadas de un piso	148
Tabla 32. Propiedades de los materiales (Confinantes y Mampostería)	151
Tabla 33. Valores de a_{red} para la casa original (Aberturas= 17%).....	157
Tabla 34. Puntos de comportamiento, periodo, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de dos pisos en el sentido débil	165
Tabla 35. Niveles de daño para las casas analizadas.....	165
Tabla 36. Valores de a_{red} para la casa original (Aberturas= 15%).....	167
Tabla 37. Puntos de comportamiento, periodo, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de un piso en el sentido débil.....	175
Tabla 38. Niveles de daño para las casas analizadas.....	175
Tabla 39. Porcentaje de confinamiento para casas tipo en el sentido débil (XZ).....	178
Tabla 40. Puntos de comportamiento, período, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de dos pisos en el sentido débil	184

Tabla 41. Niveles de daño para las casas analizadas.....	185
Tabla 42. Porcentajes de daño para casas de un piso. Método FEM y Método Puntal.....	191
Tabla 43. Porcentajes y Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM y Método Puntal.....	192
Tabla 44. Porcentajes y Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM	195

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PORCENTAJE DE ABERTURAS CASAS DE 1 PISO.....	216
ANEXO B. PORCENTAJE DE ABERTURAS CASAS DE 2 PISOS.....	219
ANEXO C. VALOR DE a Y a_{red} CASAS DE 2 PISOS MÉTODO PUNTAL.....	220
ANEXO D. MODELOS EVALUADOS EN TÉRMINOS DE CONFINAMIENTO PARCIAL.....	222

RESUMEN EN ESPAÑOL

TÍTULO: *Determinación de la incidencia de irregularidades en la configuración estructural en la respuesta resistente de las edificaciones de mampostería confinada **

AUTOR: Elkin Mauricio López Morantes **

PALABRAS CLAVES: Mampostería Confinada, Irregularidades por aberturas, Confinamiento parcial, Análisis no Lineal, Daño global

RESUMEN

En este proyecto de maestría se presenta un trabajo de investigación basado en un estudio paramétrico realizado a edificaciones de mampostería de uno y dos pisos, en donde se considera la presencia de dos tipos de irregularidades en su configuración estructural: La presencia de abertura en los muros portantes y el confinamiento parcial de la edificación. Para tal fin, se eligió como referencia una casa tipo en la ciudad de Bucaramanga, se llevó a cabo una caracterización de los materiales mediante ensayos de laboratorio que fueron confrontados con las expresiones teóricas dadas en la norma NSR-10. Posteriormente se llevó a cabo un análisis paramétrico variando las condiciones de la edificación en términos de porcentajes de aberturas totales en los muros y desconfinamiento gradual de los muros, aplicando un análisis estático no lineal con el software SAP2000 a cada uno de los modelos planteados, con el fin de determinar la incidencia de éstos factores en las curvas de comportamiento “pushover” de las edificaciones y medir su afectación en la respuesta resistente de la mampostería confinada mediante la construcción de curvas de daño aplicando la metodología WP04 “vulnerabilidad de edificaciones existentes” propuesto por el equipo RISK EU (Milutinovic y Trendafiloski) aplicable a entornos urbanos con diversos sistemas estructurales.

* Proyecto de Maestría

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD Gustavo Chío Cho.

ABSTRACT IN ENGLISH

TÍTULO: *Determination of the incidence of the structural configuration irregularities on the resistance-response of confined masonry* *

AUTHOR: Elkin Mauricio López Morantes **

KEY WORDS: Confined Masonry, Opening Irregularities, Partial Confinement, Non-Linear Analysis, Global Damage.

ABSTRACT

This master degree project presents a research based on a parametric study of masonry of one and two story buildings, considering the presence of two irregularities in its structural configuration: presence of opening in the walls and partial confinement of the building. For this, a building-type model building in the city of Bucaramanga was chosen as reference, materials characterization was performed using laboratory tests that were confronted with theoretical expressions of the NSR-10 code. Subsequently a parametric analysis varying the conditions of the building in terms of percentages of total, openings in the walls and walls gradual deconfinement, applying a nonlinear static analysis (SAP2000) was performed to determine the incidence of these factors in the "pushover" behavior curves of buildings and measure their involvement by building damage curves applying the WP04 methodology "vulnerability of existing buildings", proposed by the EU RISK team (Milutinovic and Trendafiloski) applicable to urban environments.

* Master degree Project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: PhD Gustavo Chío Cho.

INTRODUCCION

Al evaluar la vulnerabilidad sísmica de una edificación a nivel de entornos urbanos, uno de los criterios más importantes, es la respuesta estructural de la misma. La forma más recomendada de evaluar este parámetro, sería tomar muestras de los materiales y realizar un análisis detallado de cada edificación, lo cual resulta impráctico desde cualquier punto de vista cuando se analiza vulnerabilidad a gran escala, por tanto, se recurre a métodos simplificados que se basan en criterios más cualitativos que cuantitativos que no cubren muchos de los casos que se presentan en la realidad, lo cual conlleva en muchos casos a una sobrevaloración o subvaloración de las estructuras, aumentando la incertidumbre en los índices de vulnerabilidad.

Éstos métodos, suelen basarse principalmente en el tipo de sistema estructural y la calidad de los materiales entre otros parámetros, pero a su vez obvian muchos otros aspectos también determinantes en la afectación de la resistencia de una estructura, como en nuestro caso de estudio son las irregularidades por presencia de aberturas y confinamiento parcial de las edificaciones. Por tal motivo el presente trabajo busca a partir de métodos de macromodelamiento, determinar la influencia de éstas irregularidades en la capacidad de la estructura ante cargas sísmicas laterales, mediante la determinación del daño global de la misma.

A continuación se presenta un breve resumen acerca de cada capítulo.

En el CAPITULO 1, se muestran los conceptos básicos acerca de la mampostería, su clasificación, composición, materiales que la componen y sus propiedades; así mismo, se incluye una breve descripción acerca de la vulnerabilidad en éste y otro tipo de estructuras y finalmente se mencionan los principales factores que afectan su capacidad resistente y se describen las irregularidades a evaluar.

En el CAPITULO 2, se describe el comportamiento de la mampostería ante cargas laterales, se presentan algunas metodologías para determinar la curva de capacidad de manera analítica y se presentan el trabajo realizado por algunos autores sobre capacidad ante carga lateral en estructuras de mampostería confinada.

En el CAPITULO 3, se abordan los diferentes enfoques que existen en el modelamiento, haciendo una recopilación sobre trabajos realizados referentes a mampostería a partir de micromodelos y posteriormente se abordan más en profundidad los macromodelos y en particular el método del puntal equivalente y macromodelos con elementos finitos (Tipos Shell) los cuales son los empleados en el presente trabajo. Finalmente se concluye con una recopilación de trabajos realizados referentes a irregularidades en muros de mampostería y las diferentes técnicas para evaluar el comportamiento sísmico en edificaciones.

En el CAPITULO 4, se resumen los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales que componen la mampostería (Bloques de arcilla, morteros) y de muretes de mampostería como tal, mediante ensayos de laboratorio. Éstos resultados son corroborados con las expresiones teóricas dadas para las propiedades de la mampostería y sus componentes en la NSR-10.

En el CAPITULO 5, se encuentra el desarrollo como tal del objetivo de la tesis, en donde a partir de una casa tipo y las irregularidades a evaluar (Aberturas en muros y confinamiento parcial de la edificación), se lleva a cabo un análisis paramétrico generando modelos hipotéticos, a los cuales se les realiza un análisis estático no lineal, determinando la capacidad de estructura y su posterior confrontación ante el espectro elástico de diseño definido por la NSR-10 para determinar su comportamiento y posible daño en función del porcentaje de irregularidad presente en el modelo.

En el CAPITULO 6, se describen las conclusiones y las recomendaciones de los análisis de los datos, de los resultados obtenidos del capítulo 5 y de los anexos.

En los ANEXOS, se detallan los diferentes casos de aberturas definidos en análisis paramétrico.

1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

1.1 ASPECTOS GENERALES EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

La mampostería es la unión de bloques o ladrillos de arcilla o de concreto con un mortero de manera manual (mampuesto) para conformar sistemas monolíticos tipo muro, que pueden resistir acciones producidas por las cargas de gravedad o las acciones dinámicas tales como de sismo o viento en el caso de constituir el sistema resistente de una edificación o simplemente distribuir espacios al interior de la misma (Muros de fachada y divisorios) en funciones netamente arquitectónicas.

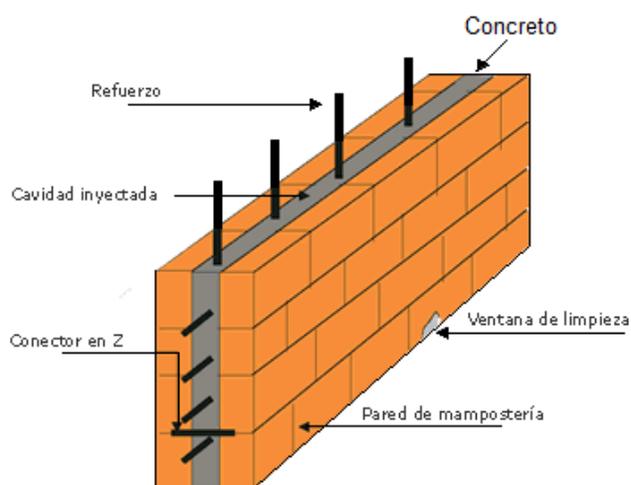
La mampostería remonta sus orígenes en la historia misma de la humanidad. Inicialmente la mampostería se hizo con piedra labrada que se unía mediante una “argamasa” de cal o aún “al tope”. Este material fue ampliamente usado en la antigüedad por los romanos para construir sus puentes y acueductos. Un claro ejemplo es el conocido acueducto de Segovia en España, en donde los bloques de piedra, cortados al detalle se unen sin argamasa. Modernamente, se aprovechan los ladrillos de arcilla y los bloques de concreto de gran resistencia, unidos mediante morteros de cemento. El muro así ensamblado se considera un elemento monolítico, siempre y cuando las uniones de las juntas puedan garantizar la transmisión de esfuerzos entre las piezas individuales, sin fallas o deformaciones considerables.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

Convencionalmente los sistemas estructurales de mampostería, se clasifican en función de si existe algún tipo de reforzamiento adicional, que generalmente suelen ser varillas de acero, e inyección de concreto a través de las cavidades de las unidades, en Colombia la norma sismoresistente NSR-10 [1], reconoce y define los siguientes tipos de mampostería como:

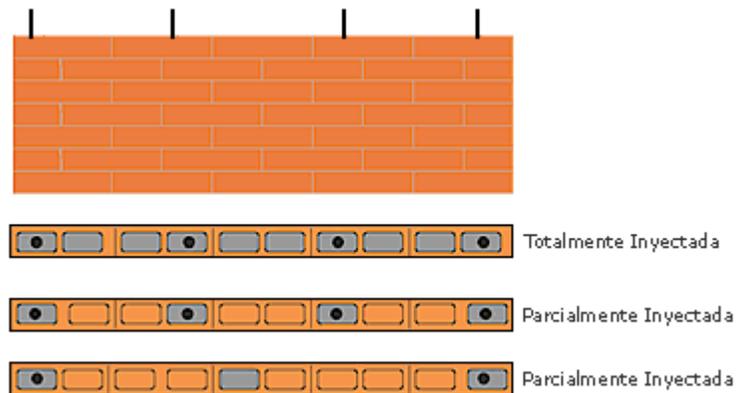
Mampostería de Cavity Reforzada: Es la construcción realizada con dos paredes de piezas de mampostería de caras paralelas reforzadas o no, separadas por un espacio continuo de concreto reforzado, con funcionamiento compuesto (Figura 1). Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES).

Figura 1 *Detalle muro de cavity reforzada*
(Tomado de [2])



Mampostería Reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzada internamente con barras y alambres de acero. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES) cuando todas sus celdas se inyectan con mortero de relleno, y como uno de los sistemas con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMO) cuando sólo se inyectan con mortero de relleno las celdas verticales que llevan refuerzo.

Figura 2. Detalle muro mampostería reforzada o parcialmente reforzada (Tomada de [2])



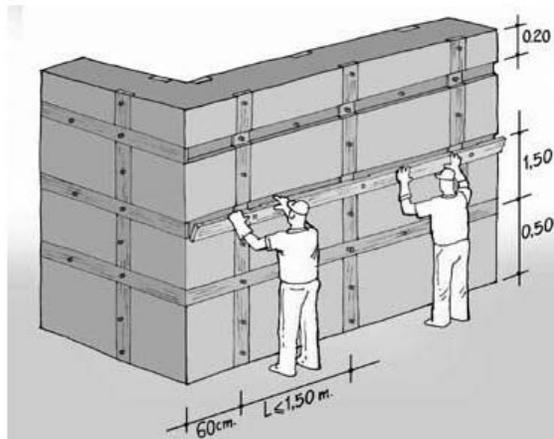
Mampostería Parcialmente Reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzada internamente con barras y alambres de acero. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMO) y se observa en la Figura 2.

Mampostería No Reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero que no cumple las cuantías mínimas de refuerzo establecidas para la mampostería parcialmente reforzada. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI).

Mampostería Reforzada Externamente: Es la construcción de mampostería en donde el refuerzo se coloca dentro de una capa de revoque (pañete) fijándolo al muro de mampostería mediante conectores y/o clavos. Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente,

como uno de los sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI). La Figura 3 ilustra este tipo de mampostería.

Figura 3. Muro de mampostería reforzada externamente (Tomado de [3])



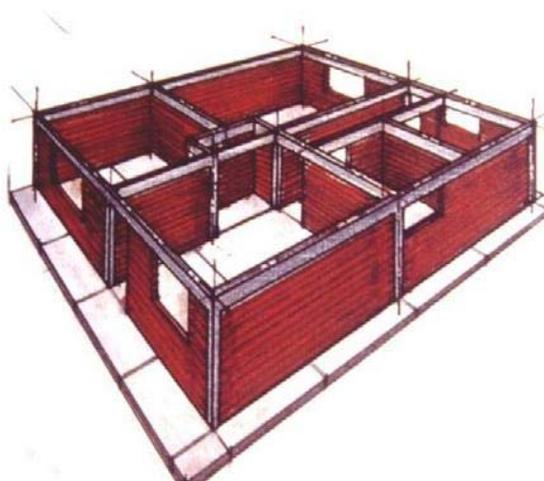
Mampostería de Muros Diafragma: Se llaman muros diafragma de mampostería a aquellos muros colocados dentro de una estructura de pórticos, los cuales restringen su desplazamiento libre bajo cargas laterales. Un ejemplo se aprecia en la Figura 4.

Figura 4. Muros diafragma dentro de pórticos (Fuente: Autor)



Mampostería de Muros Confinados: Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero, reforzada de manera principal con elementos de concreto reforzado construidos alrededor del muro confinándolo (Figura 5). Este sistema estructural se clasifica, para efectos de diseño sismo resistente, como uno de los sistemas con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMO).

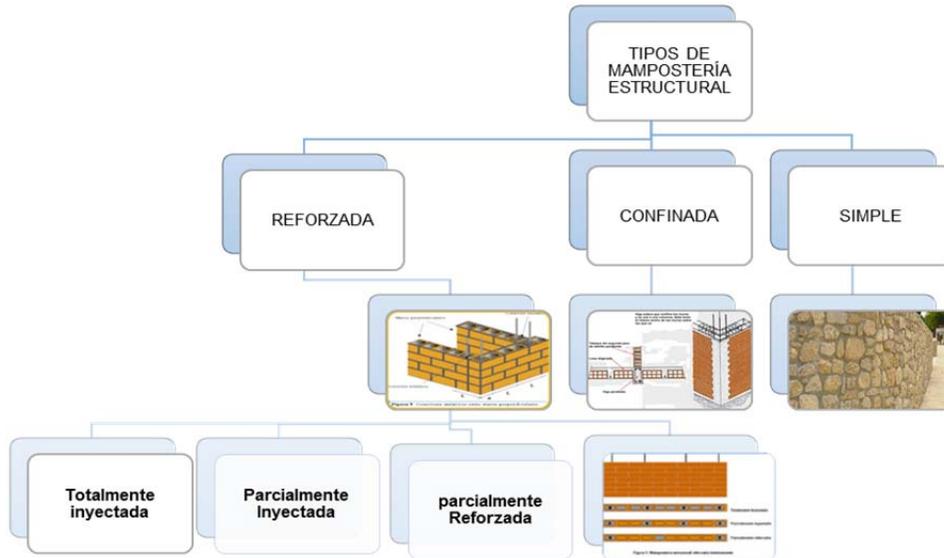
Figura 5. *Edificación con sistema de muros de mampostería confinada*
Tomado de [4])



Éste último sistema estructural es en el cual se basa el presente documento, por ende los conceptos abordados en los numerales y capítulos siguientes, estarán enfocados en hacia la mampostería confinada.

En la Figura 6 se presenta un cuadro resumen con los tipos de mampostería mencionados anteriormente.

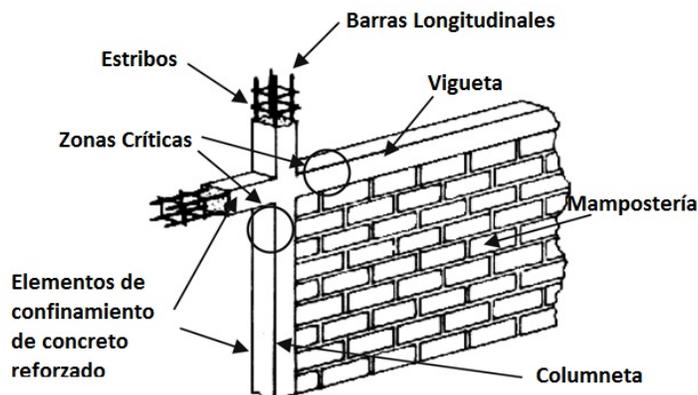
Figura 6. Tipos de mampostería estructural (Fuente: Autor)



1.3 EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

El tipo de mampostería más común en Colombia es la mampostería confinada, la cual es motivo de estudio en el presente trabajo de investigación. El sistema estructural está conformado por muros construidos con ladrillos de arcilla macizos o perforados pegados con mortero, confinados por sistemas de concreto reforzado tradicionales como columnetas y viguetas que pueden resistir acciones producidas por las cargas de gravedad o las acciones dinámicas tal como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Detalle muro de mampostería confinada (Fuente: Autor)



Es un sistema sobre el cual existe amplia experiencia constructiva en Colombia y cuenta con un buen soporte experimental y analítico, aunque no muy desarrollado. Es importante hacer notar que la mampostería confinada tiene un comportamiento mecánico muy diferente a la mampostería no reforzada, y que cuando los elementos confinantes tienen un número, ubicación y detallado adecuado, la mampostería confinada es un sistema adecuado en edificaciones para vivienda de poca altura aún en zonas de alta sismicidad. La mampostería confinada también se usa con mucho éxito en otros países latinoamericanos y Europa. A pesar de lo anterior, es importante mencionar que todavía hay muchos casos de relevancia para la práctica de la ingeniería estructural para los que no se cuenta con la información suficiente sobre el comportamiento de muros y sistemas estructurales de mampostería.

1.4 MATERIALES DE LA MAMPOSTERÍA Y SUS PROPIEDADES

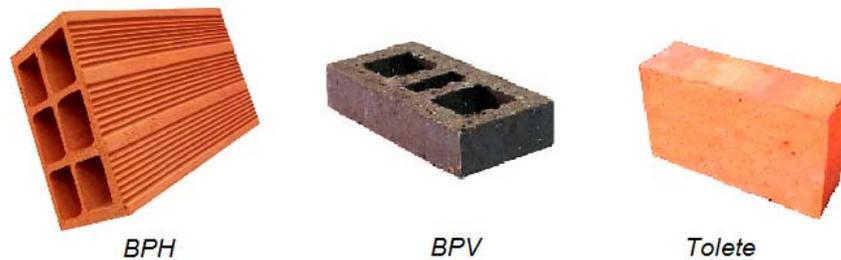
El tipo de mampostería considerada, posee funciones tanto estructural (muros confinados) como arquitectónica y junto con los elementos confinantes de hormigón constituyen el sistema resistente de la edificación. Los muros son comúnmente en tolete macizo o hueco, siendo este último el más generalizado y comercializado localmente y por ende, el ladrillo usado como referente para el posterior modelamiento en el Capítulo 5. La mampostería simple, es un conjunto de piezas de arcilla, cal o concreto, unidas vertical y horizontalmente por medio de morteros de cemento-arena, los cuales incluyen en algunas ocasiones calizas. Los materiales mencionados en este numeral fueron caracterizados experimentalmente y se tratan en el Capítulo 4, cotejando los resultados con los valores teóricos de la normatividad colombiana.

A continuación se presentan las principales propiedades de estos materiales con valores típicos procedentes de normatividades colombianas vigentes [1] y estudios anteriores [5]:

1.4.1 Unidades de mampostería o ladrillos

En general, se encuentran piezas de arcilla, de concreto o de material sílico calcáreo. En cuanto a la forma, la Figura ilustra las unidades más comunes, tales como, bloque de perforación horizontal (BPH), conocido como “bloque”, tolete macizo o hueco, y bloque de perforación vertical (BPV), empleado en la mayoría de los casos para mampostería estructural.

Figura 8. Unidades típicas de mampostería (Fuente: Autor)



Las propiedades mecánicas de la mampostería dependen del tipo de elemento con que se construyan como también de la resistencia del mortero. En la Tabla 1. Se dan las propiedades más relevantes de algunos de los tipos de piezas utilizadas comúnmente en el país, siendo: la tasa Inicial de absorción de la pieza **TIA**, la resistencia a la compresión de la pieza f'_p y el módulo de ruptura σ_r .

Tabla 1. Propiedades mecánicas típicas de las unidades (Tomado de [5])

PIEZA	TIA	ABSORCIÓN (%)	f'_p (kg/cm ²)	σ_r (kg/cm ²)
Tolete macizo	36 - 41	10 - 15	190 - 220	40 - 60
Bloque	18 - 27	9 - 16	30 - 50	20
Silical	14 - 20	13 - 15	170	35

En la Tabla 2, se presentan los valores mínimos de resistencia a la compresión aceptados en Colombia para uso en sistemas de mampostería confinada por la NSR-10 y denominado como f'_{cu} .

Tabla 2. *Propiedades mecánicas típicas de las unidades (Adaptado de [1])*

Tipo de Unidad	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cu} (Mpa)
<i>Tolete de arcilla</i>	15
<i>Bloque de perforación horizontal de arcilla</i>	3
<i>Bloque de perforación vertical de concreto o arcilla</i>	5

1.4.2 Morteros de pega

El tipo de mortero más comúnmente empleado es el mortero de pasta de cemento-arena, sin otro tipo de materiales. El tipo de arena empleada es arena de peña amarilla. Según la resistencia a la compresión f'_{cp} , los morteros más comúnmente empleados pueden clasificarse acode a la Tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades mecánicas de las piezas (Adaptado de [1])*

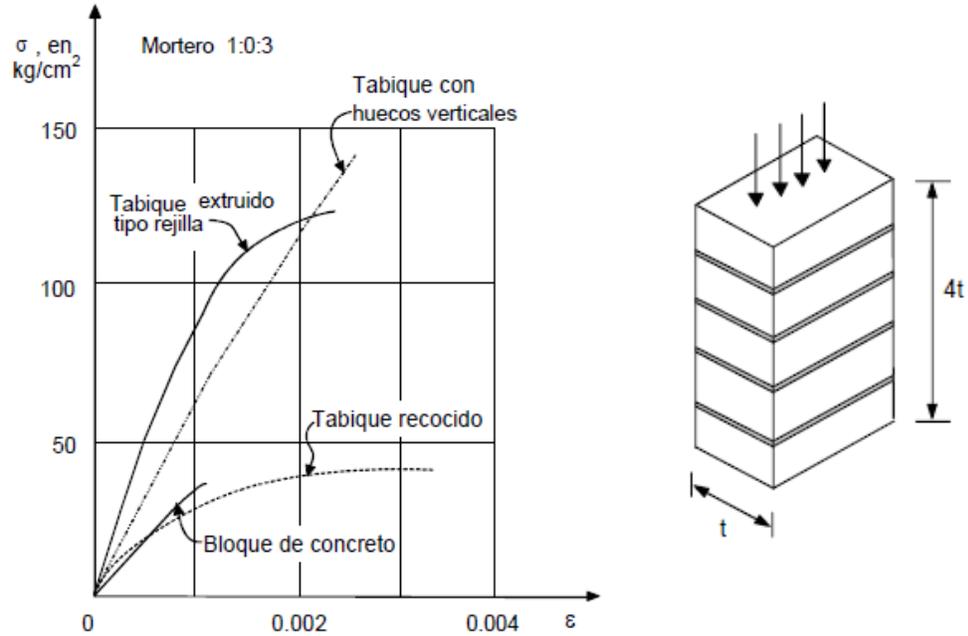
Mortero Tipo	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} (Mpa)	Retención Mínima de Agua (%)
<i>H</i>	22.5	75
<i>M</i>	17.5	75
<i>S</i>	12.5	75
<i>N</i>	7.5	75

1.5 MAMPOSTERÍA COMO MATERIAL COMPUESTO

1.5.1 Mampostería-Resistencia a la compresión

La resistencia de la mampostería se ve afectada por muchos parámetros, dependiendo principalmente de la resistencia del mortero y de las piezas individuales, así como de la calidad del proceso de construcción. Se obtiene experimentalmente a partir de ensayos a compresión simple en muretes. A partir de la relación entre las resistencias de los componentes, la mampostería puede tener un mejor o peor comportamiento. En México se han realizado múltiples estudios ensayando tanto muretes como muros a escala obteniendo valores característicos para diferentes tipos de unidades de mampostería (ver Figura 9)

Figura 9. Curva esfuerzo Vs deformación de pilas en compresión (Tomado de [6])



La relación entre la resistencia a la compresión de la mampostería f'_m y las características de la mampostería confinada mencionadas en los anteriores numerales, se establece teóricamente mediante las siguientes ecuaciones de la NSR-10 [1].

$$R_m = \left[\frac{2h}{75+3h} \right] f'_{cu} + \left[\frac{50kp}{75+3h} \right] f'_{cp} \leq 0,8f'_{cu} \quad (1)$$

$$f'_m = 0,75R_m \quad (2)$$

Dónde:

f'_{cu} = resistencia especificada a la compresión de la unidad de mampostería medida sobre área neta, MPa.

f'_{cp} = resistencia especificada a la compresión del mortero de pega, Mpa

R_m = parámetro definido por medio de la ecuación

kp = factor de corrección por absorción de la unidad, adimensional.

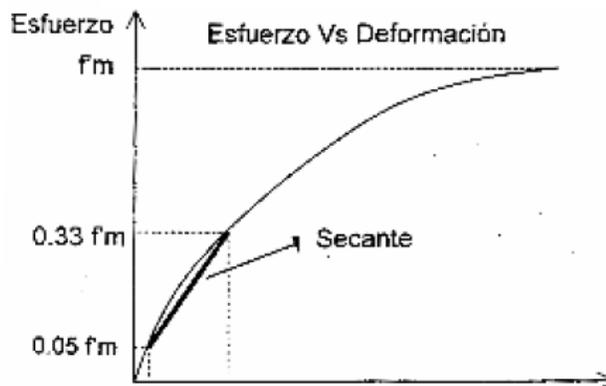
f'_m = resistencia nominal a la compresión de la mampostería, Mpa

En el Capítulo 4, se presentan y confrontan los resultados experimentales de las resistencias a la compresión para muretes con diferentes tipos de ladrillos contra los valores obtenidos por las ecuaciones 1 y 2.

1.5.2 Mampostería - Curvas Esfuerzo Vs Deformación y Módulo de elasticidad.

Al ser la mampostería un material frágil inelástico, el módulo de elasticidad no es claramente deducible de la curva esfuerzo deformación. La NSR-10 [1] y ACI 530 [7] definen el módulo de elasticidad E_m de la mampostería, como la pendiente de la recta que une los puntos del 5% y 33% de la resistencia máxima de la mampostería f'_m , en el ensayo a compresión. (Ver Figura 10)

Figura 10. Determinación del módulo de elasticidad (Adaptado de [7])



El valor del módulo de elasticidad de la mampostería puede hallarse la resistencia a la compresión de la mampostería f'_m y las anteriores características para la

mampostería confinada, se establece teóricamente mediante las siguientes ecuaciones (3 y 4) de la NSR-10[1]:

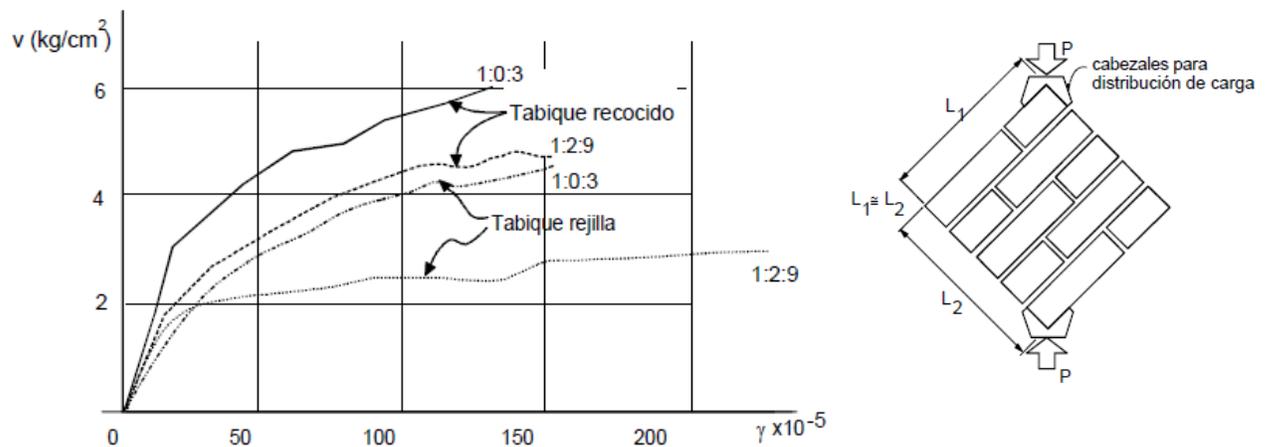
$$E_m = 900f'_m \leq 20000 \text{ Mpa} \quad \text{Para mampostería en concreto} \quad (3)$$

$$E_m = 750f'_m \leq 20000 \text{ Mpa} \quad \text{Para mampostería en arcilla} \quad (4)$$

1.5.3 Mampostería – Módulo de rigidez o cortante

De manera análoga a la resistencia a la compresión, puede obtenerse experimentalmente mediante ensayos de compresión diagonal de muretes. La Figura 11 muestra curvas típicas carga-deformación obtenidas de ensayos de muretes cuadrados [6]. En esta figura se observa cómo las resistencias son aproximadamente uniformes para los distintos tipos de piezas, excepto para las piezas huecas, en que la resistencia es frecuentemente menor.

Figura 11. Curvas esfuerzo Vs deformación obtenidas en ensayos de compresión diagonal (Adaptado de [6])



No obstante, para fines de análisis, la norma colombiana NSR-10 establece que cuando se determine el módulo de rigidez (G_m) a partir del módulo de elasticidad de la mampostería (E_m), debe tomarse como se muestra en la Ecuación 6.

$$G_m = 0.40E_m \leq 20000 \text{ Mpa} \quad (5)$$

Para garantizar compatibilidad con la teoría de la elasticidad lineal, homogénea e isotrópica, ya que muchos programas de análisis y de elementos finitos que se utilizan en la práctica profesional para estudiar estructuras de mampostería se basan en estas hipótesis, y resulta incongruente y peligroso utilizar $G_m = 0.3E_m$, como en versiones anteriores, ya que esto conduce a valores de coeficientes de Poisson (ν) irreales que pueden introducir errores numéricos significativos en los análisis que pueden redundar en estimaciones erróneas de esfuerzos y deformaciones [8]. El utilizar la Ecuación 5 no es exclusivo de la norma colombiana, las normas mexicanas NTCM-2002, los reglamentos de los Estados Unidos ACI-530 (2002), UBC (1997) e IBC (2000) vienen tomando este valor desde hace tiempo, esencialmente por la razón expuesta anteriormente.

1.6 VULNERABILIDAD EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

Actualmente, en el mundo hay diversas metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes. Éstas se pueden clasificar de diferentes formas: en función de la escala de aplicación (individual o a gran escala), del nivel de estudio, acorde al tipo de evaluación, si es calculada (cuantitativa) u observada (cualitativa); dependiendo del tipo de resultado se habla de técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas.

En lo que respecta a mampostería confinada hay una gran variedad de metodologías aplicables y enfocadas en estudios a gran escala como en centros urbanos. Algunas de ellas se detallan en FEMA 154 [9], EMS-98 [10], Índice de vulnerabilidad Benedetti-Petrini [11], Cardona y Hurtado [12], metodología de la AIS [13], disposiciones de la NSR-10 [1] y la ATC-13 [14]; basados en parámetros asociados a características geométricas, estructurales, de cimentación, de ubicación entre otros. Con base en el análisis de los parámetros que cada una de las metodologías incorporan, se identifican los más relevantes, siendo

normalmente éstos el tipo y capacidad del sistema estructural, las irregularidades y su ubicación [15].

1.6.1 Metodología propuesta por el Grupo INME para determinar el índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones a partir de la opinión de expertos.

Dentro del marco de la línea de investigación en vulnerabilidad sísmica, el grupo INME ha realizado una serie de estudios sobre vulnerabilidad y riesgo sísmico en las ciudades colombianas de Floridablanca y Bucaramanga, en los cuales propuso una metodología para la obtención de una expresión cuantitativa del índice de vulnerabilidad de edificaciones, basados en la identificación de un número de parámetros, considerados como los más influyentes en el daño que sufrirá una edificación bajo una acción sísmica [15].

Las calificaciones de calidad e importancia de los diferentes parámetros, se realizó mediante la opinión de expertos en el tema, tanto locales como internacionales. Considerando que muchas de estas opiniones pueden ser subjetivas e imprecisas, se emplearon técnicas de conjuntos difusos para relacionar las calificaciones de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia. Es así como se obtienen un “peso promedio”, el cual se utiliza para calcular el índice de vulnerabilidad sísmica de viviendas, expresado mediante la Ecuación 6.

$$I.V._j = \frac{\sum_{i=1}^n W_i K_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

Siendo $I.V._j$ el índice de vulnerabilidad sísmica de la edificación j , K_i es una medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro i . Los valores W_i son una medida de opinión de la importancia asociada al parámetro i respecto a los demás parámetros y n es el número de parámetros del modelo. Los

parámetros seleccionados fueron: Sistema estructural, Calidad del sistema resistente, Resistencia estructural, Posición de la cimentación, Suelo y pendiente del terreno, Diafragma horizontal, Configuración en planta, Configuración en elevación, Distancia máxima entre los muros, Tipo de Cubierta y Estado de conservación.

Posteriormente, en un estudio siguiente sobre vulnerabilidad y riesgo ante remociones en masa en la ciudad de Bucaramanga [16], dada la mayor relevancia que tenían unos parámetros respecto a los otros, como lo es el caso de la resistencia estructural; se implementó una modificación en el cálculo del índice de vulnerabilidad, al agrupar los diferentes parámetros en cuatro categorías en función de la afinidad de los mismos y con un respectivo valor de vulnerabilidad para cada categoría.

Como resultado de lo anterior, se propone un modelo que se basa en la estimación de un índice de vulnerabilidad total (*IVT*) el cual es la contribución de cuatro estimativos de índices de vulnerabilidad parciales; uno asociado a los aspectos estructurales directos (*IVED*), otro a los estructurales indirectos (*IVEI*), otro a las características de localización de las edificaciones (*IVL*) y finalmente uno asociado a los aspectos de entorno (*IVE*). Cada uno de ellos se encuentra en un rango de 0 (nada vulnerable) a 1 (absolutamente vulnerable). En la Tabla 1, se presentan los parámetros y las categorías propuestas.

Tabla 4. Parámetros considerados y categorías propuestas (Tomada de [15])

	Estructural Directo	Estructural Indirecto	Ubicación	Entorno
1 Sistema estructural,				
2 Calidad del sistema resistente,				
3 Resistencia estructural				
4 Configuración en altura,				
5 Ubicación de la edificación,				
6 Posición de la cimentación,				
7 Tipo de cimentación,				
8 Tipo de suelo,				
9 Vegetación del sitio,				
10 Muros de contención,				
11 Sistema de drenajes,				
12 Manejo de basuras,				
13 Estado de conservación del entorno,				
14 Estado de conservación de la edificación.				
NUMERO TOTAL DE PARÁMETROS	3	4	3	4

El método propuesto de combinación de varias piezas de información difusas, con desigual importancia o pesos, es el factorial y es el que se utiliza para calcular el índice de vulnerabilidad de viviendas para cada una de las categorías consideradas, expresándose como se ilustra en las ecuaciones 7 y 8.

$$I.V. = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \xi_i) \quad (7)$$

$$\xi_i = K_i W_i \quad (8)$$

Donde *I.V.* es el índice de vulnerabilidad; ξ_i es el *i*ésimo del *n* Factor de Vulnerabilidad (cada uno definido en el rango de [0,1]); K_i es el grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro *i*; W_i es una medida de la importancia asociada al parámetro *i* respecto a los demás parámetros y *n* es el número de parámetros del modelo.

Posteriormente, para la obtención del índice de vulnerabilidad total (*IVT*), se procedió con base a la relevancia y nivel de influencia de las categorías,

concluyéndose como parte del estudio que la vulnerabilidad estructural directa (*IVED*) y por localización (*IVL*) eran los más determinantes al momento de evaluar la vulnerabilidad de una edificación, dando como resultado la expresión de la ecuación 9.

$$IV_T = \text{máximo}(IVED, IVL) \left[1 + 0,2 \frac{(IV_{EI} + IV_E)}{2} \right] \quad (9)$$

Producto de estos estudios, se puede evidenciar que los parámetros y/o categorías referentes a la resistencia estructural, constituyen uno de los factores más preponderantes en la determinación de la vulnerabilidad de una edificación, y por ende, en la posterior predicción del nivel de daño generado ante un evento sísmico. De otra parte, el sistema estructural más predominante en viviendas existentes de las principales ciudades de Colombia y en particular Bucaramanga, corresponde a mampostería confinada; en muchos casos implementada de manera artesanal, sin ajustarse a las normas sismo resistentes vigentes (NSR-10) [1] y en muchos de los casos con irregularidades en su configuración estructural como lo es la presencia de aberturas, las cuales afectan directamente la respuesta resistente de la edificación.

Por consiguiente, el grupo INME se ha interesado en adelantar investigaciones orientadas a refinar los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, mediante la aplicación de macromodelos, que permitan considerar y cuantificar la influencia de irregularidades de este tipo en la capacidad resistente de una edificación de mampostería confinada, con el propósito de lograr una evaluación más precisa del parámetro de resistencia de la estructura. Específicamente el presente trabajo de investigación busca cuantificar el efecto en términos de daño, la presencia de aberturas en los muros de edificaciones de mampostería confinada y la incidencia en el confinamiento parcial de la misma.

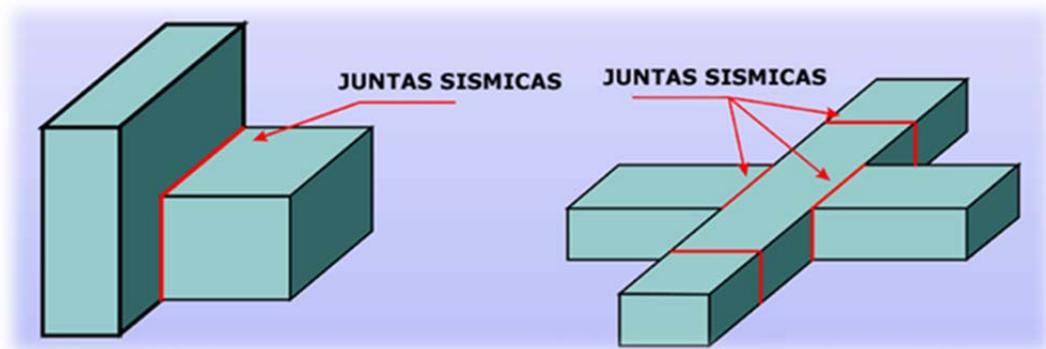
1.7 IRREGULARIDADES EN LA CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA EN EDIFICACIONES

Por configuración no se refiere sólo a la forma espacial de la construcción en abstracto, sino el tipo, disposición, fragmentación, resistencia y geometría de la estructura de la edificación, relación de la cual se derivan ciertos problemas de respuesta estructural ante sismos. Cuando un sismo actúa sobre una edificación rectangular ésta responde con una distribución bastante uniforme de las fuerzas a lo largo del edificio; pero en una configuración más compleja, en forma de **T** ó **L**, las fuerzas se concentran en las esquinas interiores creadas por esas formas. Desde el punto de vista geométrico podemos hablar de irregularidades en planta o en altura. [17]

1.7.1 Irregularidades en planta

La longitud en planta de una construcción influye en la respuesta estructural de la misma de una manera que no es fácil determinar por medio de los métodos usuales de análisis. En vista de que el movimiento del terreno consiste en una transmisión de ondas, la cual se da con una velocidad que depende de las características de masa y rigidez del suelo de soporte, la excitación que se da en un punto de apoyo del edificio en un momento dado difiere de la que se da en otro, diferencia que es mayor en la medida en que sea mayor la longitud del edificio en la dirección de las ondas. Los edificios cortos se acomodan más fácilmente a las ondas que los edificios largos. Considerando lo anterior, el correctivo usual para el problema de longitud excesiva de edificios es la partición de la estructura en bloques por medio de la inserción de juntas de dilatación sísmica, de tal manera que cada uno de ellos pueda ser considerado como corto. Estas juntas (Figura 12) deben ser diseñadas de manera tal que permitan un adecuado movimiento de cada bloque sin peligro de golpeteo o choque entre los diferentes cuerpos o bloques que componen la edificación [17].

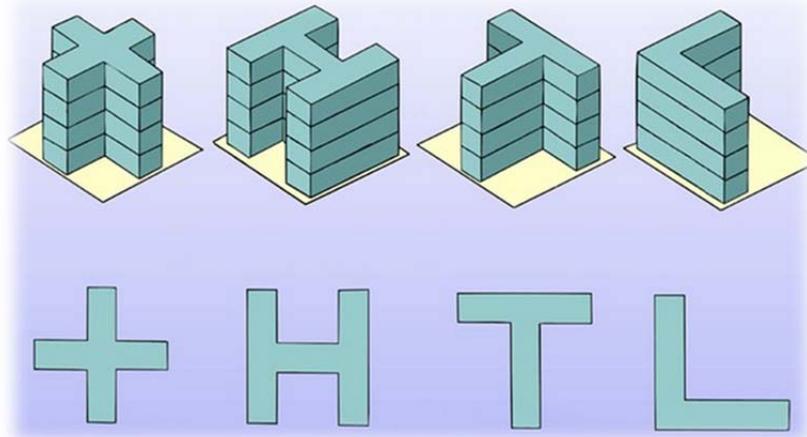
Figura 12. Localización de juntas sísmicas (Adaptada de [17])



Los edificios largos son también más sensibles a las componentes torsionales de los movimientos del terreno, puesto que las diferencias de movimientos transversales y longitudinales del terreno de apoyo, de las que depende dicha rotación, son mayores. Además de los problemas por longitud, también vale la pena mencionar la concentración de esfuerzos debido a *plantas complejas*, como se mencionó anteriormente (NSR-10) [1].

El problema que se presenta al utilizar plantas en forma de **L**, **H**, **I** que se pueden apreciar mejor en la Figura 13, es la gran concentración de esfuerzos que se presentan en las esquinas, en las uniones que al momento de verse sometida a la acción de un sismo, los efectos torsionales aumentan drásticamente en comparación con las plantas que tienen formas más regulares, pudiendo generar así un daño muy grande a la edificación y talvez el colapso de la misma.

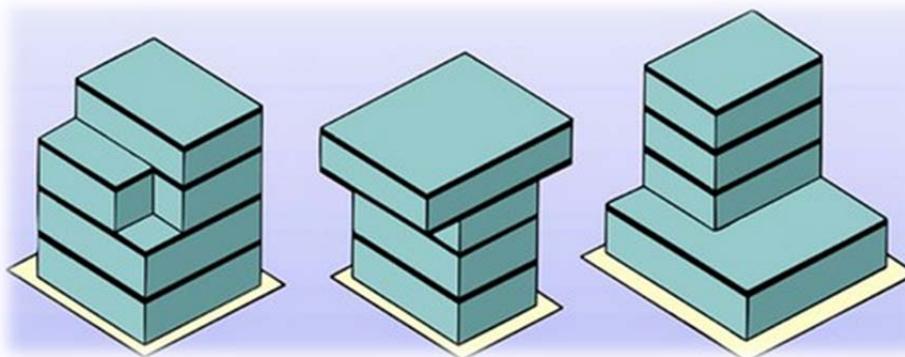
Figura 13. Configuraciones irregulares en planta (Adaptada de [17])



1.7.2 Irregularidades en altura

Los escalonamientos en los volúmenes del edificio se presentan habitualmente por exigencias urbanísticas de iluminación, proporción, etc. Sin embargo, desde el punto de vista sísmico, son causa de cambios bruscos de rigidez y de masa; por lo tanto, traen consigo la concentración de fuerzas que producen daño en los pisos aledaños al propiciar que la absorción y disipación de energía en el momento del sismo se concentren en los pisos flexibles, donde los elementos estructurales se ven sobresolicitados. En términos generales, debe buscarse que las transiciones sean lo más suave posible con el fin de evitar dicha concentración

Figura 14. Configuraciones irregulares en altura (Adaptada de [17])



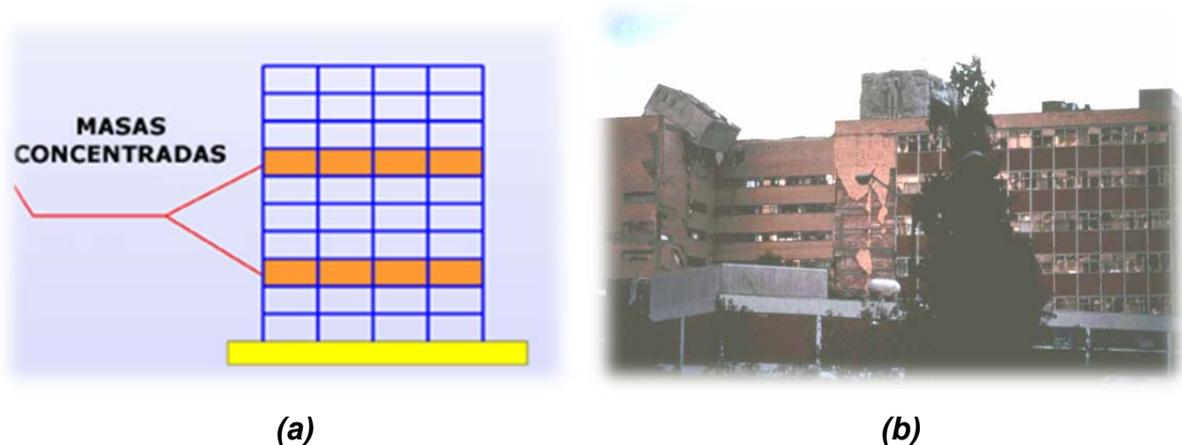
1.8 IRREGULARIDADES EN LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES

Otro aspecto de igual importancia es la configuración estructural de una edificación, para tal caso se tiene en cuenta varias situaciones en las que la configuración estructural afecta el comportamiento de la edificación cuando se presenta un evento sísmico. A continuación se presentan algunas de las configuraciones estructurales que existen y que afectan de manera directa el comportamiento de las estructuras definidas por Araujo [17]

1.8.1 Las concentraciones de masa.

Dicho problema se presenta por altas concentraciones de la masa en algún nivel determinado de la edificación que se puede deber a la disposición en él de elementos pesados, tales como equipos, tanques, bodegas, archivos, etc. dependiendo del uso que se le dé al piso. El problema es mayor en la medida en que dicho nivel pesado se ubica a mayor altura, debido a que las aceleraciones sísmicas de respuesta aumentan también hacia arriba, con lo cual se tiene una mayor fuerza sísmica de respuesta allí y por ende una mayor posibilidad de volcamiento del equipo. Éste fenómeno se observa en la Figura 15.

Figura 15. a) Masas concentradas en diferentes niveles; b) Falla de una edificación por concentraciones de masa (Tomada de [18])



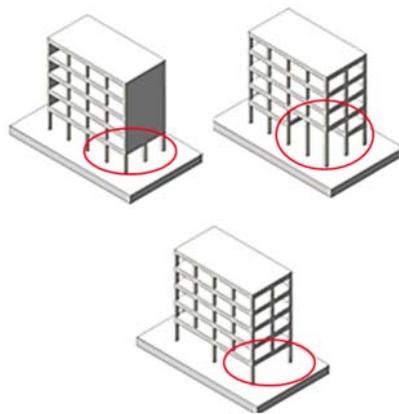
1.8.1.1 Pisos suaves o blandos.

Varios tipos de esquemas arquitectónicos y estructurales conducen a la formación de los llamados pisos débiles o suaves, es decir, pisos que son más vulnerables al daño sísmico que los restantes, debido a que tienen menor rigidez, menor resistencia o ambas cosas. La presencia de pisos suaves se puede atribuir a las siguientes causas:

- ✓ Diferencia de altura entre pisos: Se da frecuentemente por la búsqueda de volúmenes mayores en ciertos niveles de la construcción, generalmente por razones técnicas. Esto conduce a que en los pisos en cuestión se presente un debilitamiento de la rigidez, debido a la mayor altura de sus elementos.

- ✓ Discontinuidad de elementos estructurales verticales en el piso y confinamiento parcial: La interrupción de elementos verticales de la estructura ha probado ser la causa de múltiples colapsos parciales o totales en edificios sometidos a sismos, sobre todo cuando la interrupción de los elementos verticales resistentes (muros y columnas) se presenta en los pisos inferiores. La razón del deslizamiento del piso recae en que el nivel en que se interrumpen los elementos es más flexible que los restantes, con lo que aumenta el problema de estabilidad, pero además porque se origina un cambio brusco de rigidez que ocasiona una mayor acumulación de energía en el piso más débil. Ésta misma problemática se observa en estructuras de mampostería confinada, en donde los muros portantes se confinan parcialmente o no se presenta confinamiento en todos los niveles de la edificación. Algunas situaciones típicas se muestran en la Figura 16 para edificaciones de mampostería confinada de poca altura [17].

Figura 16. (a) y (b). *Discontinuidad de elementos estructurales* (Fuente: Autor)



(a)



(b)

- ✓ *Presencia de Aberturas en los Elementos Estructurales (Muros):* Ésta situación es típica en las edificaciones donde en algunos de sus niveles, que por lo general son los primeros, se requiere de grandes espacios y/o aberturas (ventanales, puertas y demás accesos), lo cual conlleva a una disminución considerable del área efectiva del elemento y en algunos casos la ausencia total del mismo para el nivel en cuestión, traduciéndose en una considerable pérdida de rigidez en función del tamaño y la ubicación de la misma.

Éste fenómeno es de especial atención en sistema de muros de mampostería confinada, en el cual la mampostería hace parte del sistema resistente y por ende la ausencia parcial o total de la misma afecta directamente su nivel de desempeño y puede llevar incluso al posible colapso de la edificación ante un evento sísmico. De ahí su importancia y enfoque dado en el presente trabajo.

Figura 17. Presencia de aberturas (Fuente: Autor)



En la configuración estructural se presenta también la Falta de redundancia. El diseño estructural sísmo resistente contempla la posibilidad de daño de los elementos estructurales para los sismos más intensos. Desde este punto de vista, el diseño de la estructura debe buscar que la resistencia a las fuerzas sísmicas dependa de un número importante de elementos, puesto que cuando se cuenta con un número reducido de elementos (poca redundancia) la falla de alguno de ellos puede tener como consecuencia el colapso parcial o total durante el sismo. En este sentido, debe buscarse que la resistencia a las fuerzas sísmicas se distribuya entre el mayor número de elementos estructurales posibles [17].

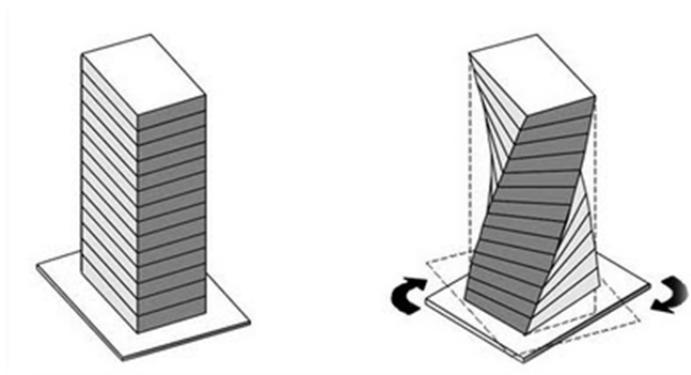
La excesiva flexibilidad de la edificación es otro aspecto que afecta las estructuras. Ésta puede definirse como la susceptibilidad a sufrir grandes deformaciones laterales entre los diferentes pisos, esto sucede cuando la edificación se ve sometida a una carga sísmica. Las principales causas de este problema residen en la excesiva distancia entre los elementos de soporte (claros o luces), las alturas libres y la rigidez de los mismos. Dependiendo de su grado, la flexibilidad puede traer como consecuencias:

- ✓ Daños en los elementos no estructurales adosados a niveles contiguos.
- ✓ Inestabilidad del o los pisos flexibles, o del edificio en general.
- ✓ No aprovechamiento de la ductilidad disponible.

Excesiva flexibilidad del diafragma. Un comportamiento excesivamente flexible del diafragma de piso implica deformaciones laterales no uniformes, las cuales son en principio perjudiciales para los elementos no estructurales adosados al diafragma. Adicionalmente, la distribución de fuerzas laterales no se hará de acuerdo a la rigidez de los elementos verticales. Las soluciones al problema de excesiva flexibilidad del diafragma son múltiples, y dependen de la causa que la haya ocasionado. Las grandes aberturas en el diafragma deben estudiarse con cuidado, con el fin de proveer mecanismo de rigidización o, si esto no es posible, segmentación del edificio en bloques.

Por ultimo tenemos la torsión, la cual ha sido causa de importantes daños de edificios sometidos a sismos intensos, que van desde la distorsión a veces visible de la estructura (y por tanto su pérdida de imagen y confiabilidad) hasta el colapso estructural. (Figura 18)

Figura 18. *Efectos de torsión en edificaciones (Tomado de [17])*



La torsión se produce por la excentricidad existente entre el centro de masa y el centro de rigidez. Algunos de los casos que pueden dar lugar a dicha situación en planta son:

- ✓ Posición de elementos rígidos de manera asimétrica con respecto al centro de gravedad del piso.
- ✓ Colocación de grandes masas en forma asimétrica con respecto a la rigidez.
- ✓ Combinación de las dos situaciones anteriores.

Debe tenerse presente que los muros divisorios y de fachada que se encuentren adosados a la estructura vertical tienen generalmente una gran rigidez y, por lo tanto, habitualmente participan estructuralmente en la respuesta al sismo y pueden ser causantes de torsión, como en el caso corriente de los edificios de esquina.

Cuantitativamente, puede considerarse que una excentricidad entre el centro de masa y de rigidez es grande cuando supera el 10% de la dimensión en planta bajo análisis. En un caso así deben tomarse medidas correctivas en el planteamiento estructural del edificio [1].

Si se contempla además la situación en altura, el panorama de la torsión puede complicarse aún más cuando hay irregularidades verticales, como los escalonamientos. En efecto, la parte superior del edificio transmite a la inferior un cortante excéntrico, lo cual provoca torsión del nivel de transición hacia abajo, independientemente de la simetría o asimetría estructural de los pisos superiores e inferiores. Como todos los problemas de configuración, el de la torsión debe ser enfrentado desde la etapa de diseño espacial y de forma de la edificación. La torsión puede decirse que es uno de los efectos que talvez afecten más a la estructura, la razón es que en una estructura siempre se presenta torsión, aunque

sea mínima, el problema es que cuando se presentan problemas como los que se han venido explicando anteriormente, el efecto torsional puede aumentarse significativamente generando consecuencias graves a la edificación en todos los aspectos. Los correctivos necesarios para el problema de la torsión pueden resumirse en general en los siguientes puntos:

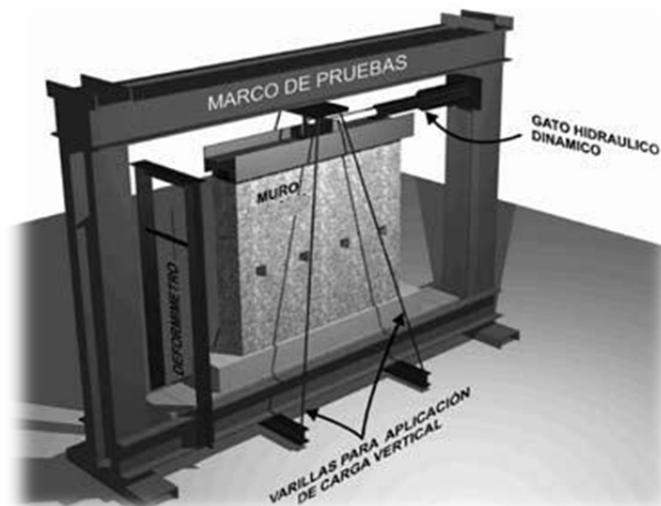
- ✓ Las torsiones deben ser consideradas inevitables, debido a la naturaleza del fenómeno y a las características de la estructura. Por esta razón, se sugiere proveer a los edificios de rigidez, mediante la cual se busca reducir la posibilidad de giro en planta.

- ✓ A efectos del control de la torsión, debe estudiarse con cuidado el planteamiento de la estructura en planta y en altura, así como la presencia y la necesidad de aislamiento de los muros divisorios no estructurales que puedan intervenir estructuralmente en el momento de un sismo.

2 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA ANTE CARGAS LATERALES

Si bien el ensayo de compresión diagonal permite obtener índices como son el esfuerzo cortante resistente de la mampostería y el módulo de rigidez a cortante, este tipo de prueba no es totalmente representativa del comportamiento de un muro bajo cargas laterales, ya que en ella no existen deformaciones ni esfuerzos por flexión, como ocurre en muros sometidos a cargas laterales (particularmente si son esbeltos), por ejemplo, como las que se producen en edificaciones de mampostería sometidas a solicitaciones sísmicas. La prueba de un muro ante cargas laterales consiste en probar al espécimen en voladizo por lo que se introducen esfuerzos cortantes simultáneamente con esfuerzos de flexión. En la Figura 19 se muestra un ejemplo típico de una prueba en voladizo con la cual es posible obtener la curva de capacidad del muro. [8]

Figura 19. Ensayo en voladizo para un muro de mampostería (Adaptada de [9])



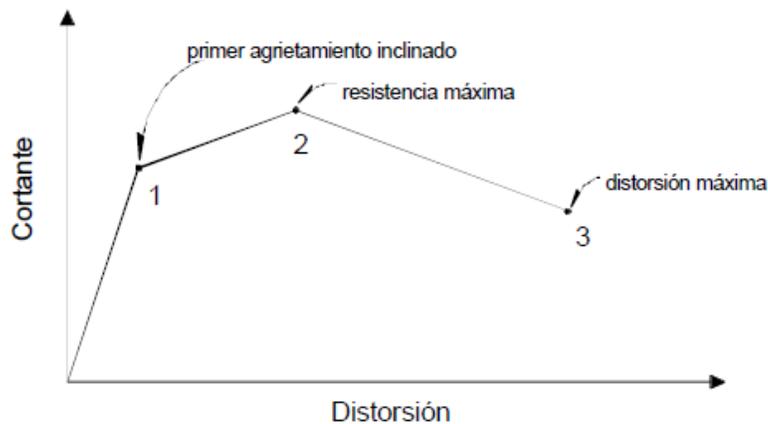
En el caso particular de los muros de mampostería confinada, su comportamiento ante cargas laterales es muy semejante al que se tiene en el ensayo de compresión diagonal. Sin embargo, debido a la presencia de flexiones que disminuyen los esfuerzos verticales en un extremo del muro y los incrementan en el otro, la fuerza cortante que produce el agrietamiento es menor cuando el ensayo se realiza en voladizo que cuando se efectúa en compresión diagonal.

De los resultados de ensayos en voladizo realizados en su mayoría en el Instituto de Ingeniería de la UNAM en las décadas de los años sesenta y setenta, realizados por Meli [6], se observó que los esfuerzos de agrietamiento varían en un intervalo muy estrecho (2 a 3 kg/cm²), mientras que los esfuerzos máximos resultaron bastante mayores y variaron en un intervalo un poco más amplio.

Los resultados experimentales varían notablemente en función de la forma en que se aplican las cargas (cuasi-estáticas o dinámicas) a los especímenes de mampostería. Bajo estas circunstancias, el tipo de prueba experimental se vuelve un factor determinante en la calidad de la información con que se cuenta.

A pesar de que se obtiene una mejor idea de la respuesta de las estructuras de mampostería a partir de pruebas dinámicas, dado que, es posible obtener curvas histeréticas y establecer envolventes de carga (Figura 20), la mayor parte de la información disponible a la fecha ha sido derivada de pruebas cuasi-estáticas. Por ende, los requerimientos de diseño incluidos en los códigos para estructuras de mampostería han sido calibrados a partir de pruebas cuasi-estáticas.

Figura 20. *Envolvente modelo histerético (Tomado de [6])*



Analizando la Figura 20, entre el inicio del ensayo y el punto 1, se puede considerar que la estructura se mantiene dentro del intervalo de comportamiento elástico-lineal. En este tramo se presenta la rigidez inicial que depende de la geometría del elemento y de la rigidez de los materiales y se limita por la carga de agrietamiento que depende de la resistencia a cortante de la mampostería. Entre los puntos 1 y 2 aparece, crece y se generaliza el agrietamiento inclinado en la mampostería. En este tramo se aprecia una reserva de capacidad y una disminución en la rigidez debido a la paulatina distribución y crecimiento del agrietamiento.

En el caso de los muros con refuerzo horizontal es en esta etapa en donde comienza a trabajar el refuerzo impidiendo que se abran las grietas y provocando así una mejor distribución del daño; por lo anterior el punto 2 se alcanza a mayor distorsión y con mayor cortante. Por último, del punto 2 al 3 el comportamiento está dictado por la penetración de las grietas en los elementos confinantes y la paulatina desintegración del concreto. En esta etapa es importante el trabajo del acero transversal y longitudinal en los extremos de las columnetas [19]

Otras conclusiones relevantes obtenidas por los estudios de Meli y en posteriores trabajos son [6]:

- ✓ La deformación angular a la cual ocurre el agrietamiento varió entre 0.0015 y 0.0025 cuando el ensayo fue en voladizo, mientras que para pruebas en compresión diagonal el agrietamiento ocurre para deformaciones menores (0.0005 a 0.0015). La grieta diagonal se forma inicialmente en el centro del muro y se prolonga rápidamente hacia los extremos. Su inclinación es usualmente la de la diagonal, aunque tiende a ser más horizontal si el ensayo es en voladizo y cuando se aplican al muro cargas verticales.
- ✓ En el caso de muros de mampostería confinada por medio de columnetas y viguetas, su comportamiento hasta el primer agrietamiento diagonal es prácticamente el mismo al de los muros de mampostería no reforzada, lo que implica que la presencia y características de los elementos confinantes no tiene una influencia significativa en el comportamiento de la mampostería antes de que se produzca el primer agrietamiento diagonal.
- ✓ Después del agrietamiento diagonal existe una importante redistribución de esfuerzos, y el puntal de compresión de la mampostería incrementa significativamente las demandas de flexión, pero principalmente de cortante en los extremos de los castillos. Este incremento en fuerza cortante puede producir la falla de la columneta en la esquina, dando lugar a una reducción drástica de la capacidad resistente del muro. Si la sección y armado de las columnetas en su parte inferior y superior es capaz de resistir esta fuerza cortante, el muro confinado puede soportar cargas laterales adicionales que provocan generalmente la formación de nuevas grietas con inclinaciones menores que la diagonal.

- ✓ La rigidez lateral de un muro de mampostería disminuye considerablemente después del primer agrietamiento. De hecho, es común observar reducciones de rigidez lateral, prácticamente instantáneas, de 60 o 70% al momento de producirse el agrietamiento del muro. Como se mencionó anteriormente en la mampostería confinada, la capacidad de deformación después del primer agrietamiento depende de las características geométricas y de detallado de los castillos. Para el caso en que se evita la falla por cortante de los castillos, la mampostería confinada de piezas macizas puede alcanzar distorsiones de hasta 0.006, pero la mampostería confinada de piezas huecas alcanza normalmente distorsiones menores (hasta 0.004, por lo general) [6].

Con base a lo expuesto por los autores citados, es claro que los análisis dinámicos representan de mejor manera la respuesta de una estructura al considerar ciclos histeréticos; no obstante, su nivel de complejidad y en muchos casos el requerir software especializados y demandar altos costos computacionales en función del refinado del modelo empleado, ha conducido a la generalización de los análisis con cargas cuasi-estáticas como una alternativa viable y confiable, demostrando buenos resultados en la predicción de la respuesta estructural ante carga horizontal de estructuras regulares en comparación con modelos experimentales.

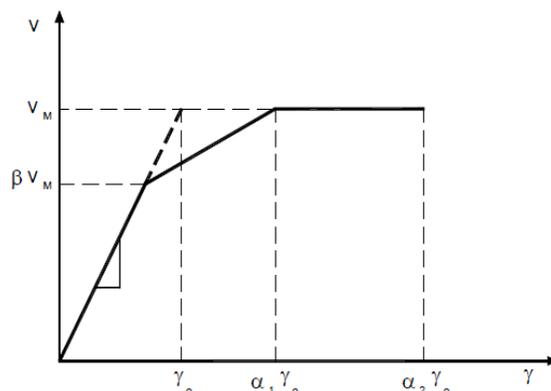
2.1 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LA CURVA DE CAPACIDAD PARA LA MAMPOSTERÍA CONFINADA

A continuación se presentan algunos modelos teóricos propuestos para la idealización de la curva de capacidad en muros de mampostería realizados en Latinoamérica, con base en resultados experimentales relacionados por Alcocer [19].

2.2 Trabajo realizado por R. Meli.

En 1975, R. Meli [6] publicó los resultados de una serie de ensayos en muros de mampostería con diversas variantes. En estos estudios pioneros se estableció gran parte del conocimiento aún vigente sobre mampostería en México y Latinoamérica. Meli señala que mientras no ocurran agrietamientos importantes por flexión o por tensión diagonal, el comportamiento de los muros, independientemente del tipo de refuerzo, es aproximadamente elástico lineal. Después del agrietamiento inclinado, el comportamiento se caracteriza por una disminución paulatina de la rigidez y la resistencia, tanto mayor cuanto más grande es la deformación máxima alcanzada en el ciclo. Las cargas de agrietamiento y máxima se alcanzaron para distorsiones con valores cercanos a 0.001 y 0.003, respectivamente. En este trabajo se entiende por distorsión al cociente entre el desplazamiento horizontal y la altura del muro (igual a la altura del entrepiso). Para cargas monótonas o cuasi-estáticas, propuso un comportamiento idealizado mediante una relación trilineal. En ella, el primer tramo describe el comportamiento hasta el agrietamiento inclinado; el segundo tramo corresponde a la zona entre el agrietamiento y la carga máxima, y finalmente sigue un tramo horizontal hasta la falla. Esta curva se define con cinco parámetros; de éstos, la carga de agrietamiento y la rigidez inicial se pueden predecir teóricamente, mientras que los otros tres parámetros se obtienen a partir de datos experimentales (Figura 21).

Figura 21. Modelo trilineal para cargas cuasi-estáticas (Tomado de [6])



Para la rigidez inicial, Meli [6] considera suficiente el uso de fórmulas simples de resistencia de materiales. De esta forma, para calcular la rigidez de los muros, propuso usar:

$$\Delta = \frac{VH}{AG} + \frac{VH^3}{3EI} \quad (10)$$

$$K = \frac{V}{\Delta} \quad (11)$$

Donde:

K: es la rigidez inicial del muro;

V: es la fuerza cortante aplicada en la parte superior del muro;

Δ: es el desplazamiento horizontal medido en la parte superior del muro;

H: es la altura del muro;

A: es el área del muro;

I: es el momento de inercia;

E: es el módulo de elasticidad; y

G: es el módulo de rigidez al cortante.

Los módulos de elasticidad y de rigidez al cortante se obtienen de ensayos en pilas y muretes, respectivamente. Para calcular el momento de inercia se considera la sección completa sin agrietamiento. Ésta metodología desarrollada por R. Meli [6] fue para muros aislados ensayados en voladizo o a tensión diagonal. Se supone, implícitamente, que sus conclusiones y modelos se pueden extrapolar a estructuras con muros de varios pisos y acoplados por sistemas de piso.

Para cargas cíclicas, Meli propuso representar la curva histerética como la suma de curvas simples con comportamiento elastoplástico con distintos grados de deterioro de rigidez y resistencia. Bazán [20] reprodujo estos modelos, de los cuales se presenta a continuación el modelo propuesto para el caso de muros confinados con Columnetas o castillos y viguetas o dalas.

2.3 Trabajo realizado por M. O. Moroni.

Moroni [21] propusieron un modelo analítico simple para representar el comportamiento sísmico de muros de mampostería confinada con base en resultados experimentales realizados en varios países de América Latina. Según Moroni, las principales características del comportamiento de los diferentes tipos de muro son:

- a) Aun para pequeñas deformaciones, siempre existe alguna disipación de energía;
- b) Las curvas cíclicas son delgadas y en la descarga convergen a un punto común;
- c) Excepto para grandes deformaciones, los ciclos son estables;
- d) Después del primer agrietamiento inclinado, para una distorsión del orden de 1/2400, se presenta una degradación de rigidez apreciable.

El modelo propuesto está caracterizado por una curva esqueleto trilineal y ciclos histeréticos con degradación de rigidez (Figura 6). Los parámetros considerados se muestran a continuación:

$$V_m = (0.37v + 0.43\sigma_o)A_m \quad (12)$$

$$V_1 = (0.19v + 0.12\sigma_o)A_m \quad (13)$$

$$A_e = A_m + 2 \left(\frac{G_c}{G_m} \right) A_c \quad (14)$$

$$K_e = \frac{G_m A_e}{3H} \quad (15)$$

Dónde:

A_m : es el área transversal del muro de mampostería;

H : es la altura del muro;

V : es el esfuerzo cortante resistente de la mampostería;

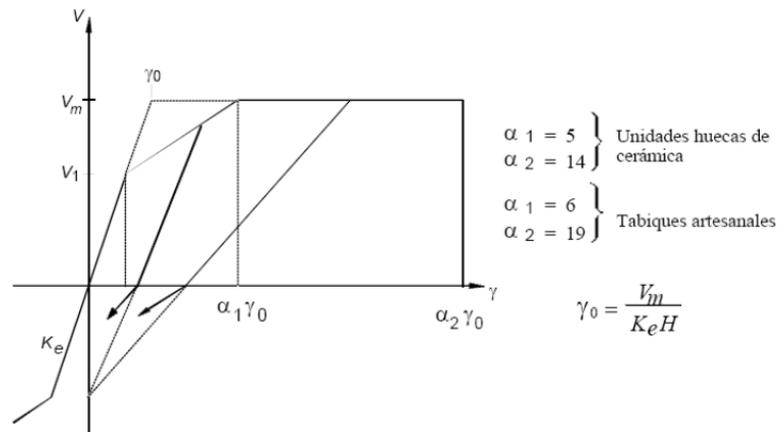
G_m : es el módulo de rigidez al cortante de la mampostería;

G_c : es el módulo de rigidez al cortante del concreto;

A_c : es el área de los castillos de concreto reforzado; y

σ_o : es el esfuerzo vertical aplicado sobre el muro.

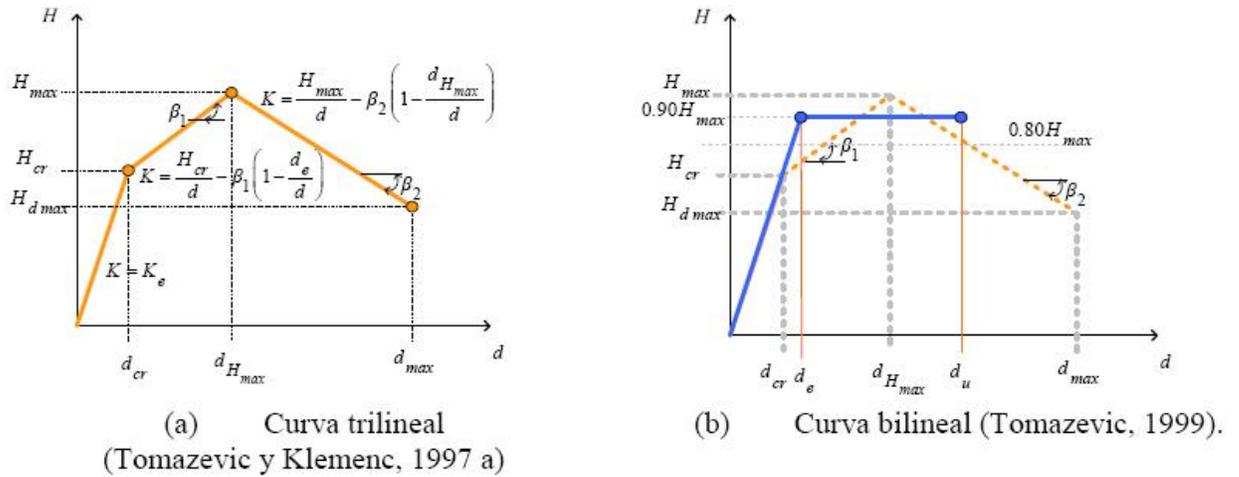
Figura 22. Modelo histerético para muros de mampostería confinados propuesto por Moroni (Tomado de [21])



2.4 Trabajo realizado por Tomazevic

Propone modelos que incluyen una degradación de resistencia importante, representando el comportamiento histerético de muros de mampostería sujetos a carga lateral en combinación con carga vertical usando curvas envolventes de tipo trilineal [22] y bilineal [23]. En la Figura 23 se muestran esquemáticamente dichas curvas; sus parámetros se pueden encontrar en las referencias indicadas.

Figura 23. Idealización envolvente de comportamiento (Tomado de [52])



En la envolvente de resistencia de un muro se identifican tres zonas principales: Una primera Zona de comportamiento elástico, en la que se presenta agrietamiento horizontal en las columnetas y agrietamiento mínimo en los elementos de mampostería, en esta zona se puede decir que se presenta un comportamiento prácticamente elástico asociado con una rigidez lateral efectiva, K_e ; una segunda Zona de máxima resistencia, que está asociada a una carga lateral máxima, H_{max} , y su respectivo desplazamiento, $d_{H_{máx}}$. En esta zona la rigidez del muro, $K_{V_{máx}}$, es menor que la rigidez anterior al primer agrietamiento, lo que le permite alcanzar la máxima resistencia; y una tercera Zona de degradación de rigidez y de resistencia, definida por la carga lateral que produce el desplazamiento último o justo antes del colapso [22].

Debido a la discrepancia en muchos casos de los modelos teóricos con resultados experimentales, producto de variabilidad en las propiedades del material, no se justifica el empleo de métodos refinados para la predicción de la rigidez y los métodos proponen fórmulas simples basadas en expresiones de resistencia de materiales o artificios que transforman la estructura en otra equivalente y fácil de analizar. En varios estudios de investigación se han explorado análisis en detalle basados en técnicas de elementos finitos con refinamiento tales como considerar

la ortotropía del material, la separación entre marco y muro, la presencia del refuerzo y diferentes modos de falla; sin embargo, estos estudios no son prácticos para su uso en el diseño cotidiano de estructuras de mampostería y surgen como alternativas viables y funcionales los modelos simplificados como los descritos anteriormente y de especial utilidad en el análisis global de edificaciones.

3 ENFOQUES EN EL MODELAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA

A continuación se detallan algunas de las metodologías empleadas en el modelamiento de estructuras que involucran mampostería, reportadas en la literatura existente. Estos métodos analíticos pueden ser agrupados en dos categorías: (a) Macro-modelos, los cuales tratan de predecir el comportamiento de la estructura como un todo con un relativo bajo costo computacional y (b) Micro-modelos, aquellos que modelan las propiedades mecánicas de los diversos materiales que forman la estructura para predecir su comportamiento de manera detallada. Esta clasificación y las siguientes recopilaciones para ambas categorías son expuestas por Puglisi [24].

3.1 MICROMODELOS

El micromodelado es una técnica para idealizar estructuras, en la cual la estructura se divide en numerosos elementos y se toman en cuenta los efectos locales en forma detallada. Los micromodelos pueden representar el comportamiento estructural con gran detalle, si se emplean adecuadamente. Sin embargo, estos modelos pueden resultar en un gran esfuerzo computacional y poco prácticos para estructuras complejas. El método de los elementos finitos (MEF) constituye la herramienta más usada a través de la cual se implementa la simulación con micromodelos.

Mallick y Severn [25] introdujeron una técnica iterativa en la cual los puntos de separación entre el pórtico y la mampostería, así como la distribución de esfuerzos a lo largo de la longitud de contacto, se obtuvieron como parte de la solución. El pórtico se modeló con elementos de vigas y la mampostería con elementos rectangulares con esfuerzos planos. Los problemas de contacto los solucionaron inicialmente suponiendo que los nodos entre el pórtico y la mampostería tenían el mismo desplazamiento.

Liauw y Lo [26] usaron análisis por elementos finitos para modelar los especímenes experimentales, tomando en cuenta la no-linealidad del material, el agrietamiento y la separación entre el pórtico y la mampostería cuyos nodos se conectaron con elementos de interface.

Crisafulli, Carr y Park [27], estiman que el método de los elementos finitos permite resultados aceptables cuando se modelan estructuras aporricadas con mampostería de relleno. El modelo con elementos finitos permite describir el comportamiento de pórticos rellenos, los efectos relacionados al agrietamiento, aplastamiento e interacción de contacto. Para modelar la mampostería se pueden considerar diferentes niveles de refinamiento, siendo el más sencillo, donde la mampostería está compuesta de un solo material sin juntas de morteros definidas, esto es recomendado para estructuras grandes. En el segundo enfoque, la mampostería se representa compuesta de dos elementos continuos: bloque y mortero por separado. Este enfoque es recomendado para estructuras pequeñas. La tercera es una situación intermedia entre las dos anteriores, los bloques son elementos continuos y las juntas de mortero son elementos de interfaz.

Sarmiento en la ULA [28], modela muros heterogéneos usando técnicas de homogeneización numérica. La propuesta del autor permite tomar en cuenta los dos componentes de los muros de mampostería (ladrillos y juntas de mortero), así como también la disposición geométrica del conjunto. En este modelo se llevan a cabo las dos etapas que considera el proceso de homogeneización, como es la definición de lo que se denomina la célula elemental y el posterior planteamiento del problema de resolución del conjunto. El criterio para escoger la célula elemental es la periodicidad que presentan los diferentes arreglos de la mampostería, permitiendo definir el muro como una repetición de la misma. La definición de la célula elemental representativa la hizo teniendo en cuenta las diferentes características:

- ✓ La célula debía tener un tamaño suficientemente pequeño en comparación con el tamaño de la estructura.
- ✓ Debía ser capaz de representar la estructura, en función de su repetición.
- ✓ Debía representar solo el arreglo del material a homogeneizar.

Chiou, Tzeng y Liou [29] trabajaron sobre pórticos rellenos de mampostería sujetos a cargas monotónicas, analizándolos por el método de las deformaciones discontinuas (DDA), y contemplan que: Las variables son los desplazamientos y las ecuaciones de equilibrio son resueltas de la misma forma como se hace en el método de los elementos finitos. Los bloques en el DDA son independientes y existe conexión entre ellos sólo cuando las cargas promueven el contacto. La interacción entre bloques es simulada con resortes y no ocurre penetración de un bloque sobre otro, ni tracción entre ellos en ningún momento. La solución numérica con DDA muestra la falla por flexión y la falla por corte en las columnas y vigas. El criterio de Mohr-Coulomb es usado para regular el comportamiento del contacto, en el cual la pérdida de fricción a lo largo del contacto es una fuente de consumo de energía.

Arellano en la ULA [30], presenta un modelo de comportamiento de muros de mampostería a compresión uniaxial incluyendo daño, analiza unidades de mampostería de arcilla hueca sujetas a cargas monotónicas, para considerar el agrietamiento por medio de resultados experimentales. A partir de resultados experimentales, Arellano [30] establece la ley de evolución del daño haciendo las siguientes consideraciones:

- ✓ La envolvente en compresión es aproximadamente parabólica para cargas aplicadas en dirección perpendicular y paralela a la hilada de bloques.
- ✓ Existencia del límite elástico.

- ✓ Agrietamiento significativo una vez superado el límite elástico, con la consecuente pérdida de rigidez del murete y la aparición de deformaciones permanentes.
- ✓ La ley de evolución del daño es lineal.

Salonikios y su grupo [31], consideran que existen limitados modelos inelásticos para los pórticos con mampostería, por lo que hacen una comparación de los resultados de un pushover en pórticos planos con mampostería llevados a cabo en los programas SAP2000 no lineal y CAST3M; encontrando una gran dispersión en los resultados por lo que consideran que es necesario calibrar adecuadamente las técnicas del modelado.

El método de los elementos discretos (DEM) fue desarrollado en principio, para el estudio de masas de roca fracturada. Debido a su capacidad para representar explícitamente el movimiento de las discontinuidades múltiples, interrelacionadas, estos métodos son especialmente adecuados para el análisis de estructuras de mampostería en las cuales una significativa parte de la deformación es debida al movimiento relativo entre los bloques. Mohebkah y Tasnimi [32] desarrollaron un modelo DEM bidimensional para estudiar el comportamiento sísmico de muros confinados de mampostería de ladrillos con elementos metálicos.

Chang Xu [33], realiza un análisis de elementos finitos considerando la heterogeneidad de los materiales, generando un modelo que considera el comportamiento a la fractura de muros de mampostería bajo cargas de compresión y cortante. En su estudio considera tres fases compuestas por la unidad o bloque, la junta y las interfaces unidad-junta.

3.2 MACROMODELOS

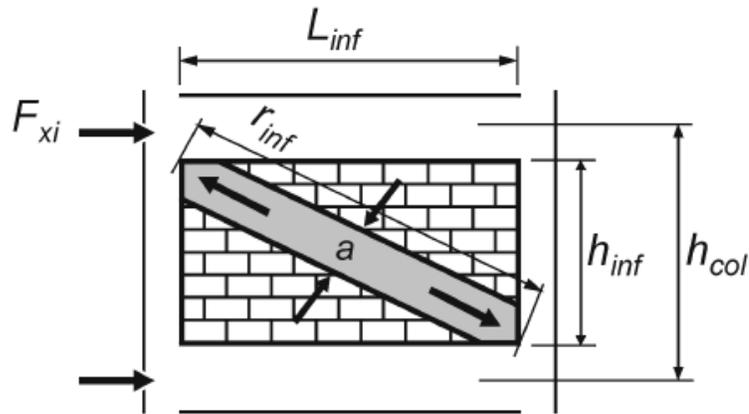
Actualmente es posible, con cualquier software comercial, modelar estructuras de mampostería con macro-modelos estructurales, dada su gran aceptación producto de su confiabilidad y buenos resultados en análisis globales de edificaciones en mampostería. Los macro-modelos más comúnmente empleado son los puntales a compresión junto con los modelos tipo Shell basados en elementos finitos, los cuales se describirán a continuación, siendo ambas técnicas empleadas en el presente trabajo. A continuación se detalla el método del puntal equivalente y el método de elementos finitos aplicado a macromodelos (elemento tipo Shell) los cuales son objeto de aplicación en el presente trabajo y se mencionan otros métodos reportados en la literatura.

3.2.1 El método del puntal equivalente.

Es una representación sencilla de este tipo de modelo y que están basados en comprender físicamente el comportamiento de la mampostería de relleno como un todo, considerando pleno contacto como resulta ser el caso de la mampostería confinada. Hoy en día es uno de los métodos más empleados para analizar sistemas de marcos rellenos con mampostería. Su uso se inició con Stafford Smith [34], quien utilizó la analogía del puntal equivalente a compresión para modelar el comportamiento de pórticos rellenos. Estos muros de mampostería empleados con rellenos, se comportan más de manera análoga a puntales diagonales en compresión en su capacidad de resistencia a cargas laterales, en lugar de como muros homogéneos de cortante.

Los parámetros geométricos del modelo general del puntal a compresión, se representa en la Figura 24.

Figura 24. Modelo del puntal equivalente en compresión (Tomado de [35]).



Los parámetros para la consideración del puntal, han sido discutidos y modificados por varios autores.

Stafford Smith [53], con la idea de refinar el ancho efectivo, comenzó una serie de pruebas y encontró que este dependía de la longitud de contacto entre el pórtico y la mampostería. Más adelante estableció la longitud de contacto, entre el pórtico y la mampostería en términos de λ_h que es un parámetro adimensional. En estudios posteriores, propuso que dicho puntal tome en cuenta la relación de rigideces existentes entre el pórtico y la mampostería, pero ahora rectangular, e igualmente expresado en función de λ_h , como se muestra a continuación:

$$\lambda_h = h^4 \sqrt{\frac{E_m t}{4EIh} \operatorname{sen} 2\theta} \quad (16)$$

Donde:

E_m : es el módulo de elasticidad de la mampostería,

t : es el espesor de la mampostería,

EI : es la rigidez de la columna,

h : es la altura de la mampostería

θ : es el ángulo de inclinación del puntal diagonal respecto a la horizontal.

La Norma FEMA 356 [35], establece criterios para la determinación de la rigidez y resistencia del puntal equivalente con base a los estudios realizados por Mainstone [19], quien graficó los resultados experimentales contra el parámetro de la rigidez λ_h (ó λ_1) y formuló empíricamente el ancho del puntal para evaluar la rigidez, en la primera carga de agrietamiento, y en el esfuerzo último del pórtico relleno. Estableciendo en ancho efectivo del puntal ($a = t$) como:

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (17)$$

Donde:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right) \quad (18, 19)$$

Adicionalmente, se tiene que:

h_{col} = Altura de columnas entre ejes de vigas en *in*.

h_{inf} = Altura del panel de relleno en *in*.

E_{fe} = Módulo de elasticidad esperado de los elementos de confinamiento (frame) en *psi*.

E_{me} = Módulo de elasticidad esperado del material de relleno (mampostería) en *psi*.

I_{col} = Momento de inercia de columna en *in⁴*.

L_{inf} = Longitud del panel de relleno en *in*.

r_{inf} = Longitud diagonal del panel de relleno en *in*.

t_{inf} = Espesor del panel de relleno y elemento equivalente en *in*.

θ = Ángulo cuya tangente es la relación entre la altura y la longitud del relleno en *radianes*

λ_1 = Coeficiente usado para determinar el ancho del elemento equivalente de relleno.

El planteamiento general del método presentado a continuación es tomado de los estudios de AL-CHAAR [36], quién en sus modelos analíticos y experimentales desarrolla el método a profundidad.

3.2.1.1 Ajustes en el ancho del puntal por presencia de irregularidades [36, 37]

Si hay presencia de aberturas y/o daños en el relleno existente, el ancho del puntal equivalente debe ser reducido mediante factores que me representen dichas irregularidades:

$$a_{red} = a (R_1)_i (R_2)_i \quad (20)$$

Donde:

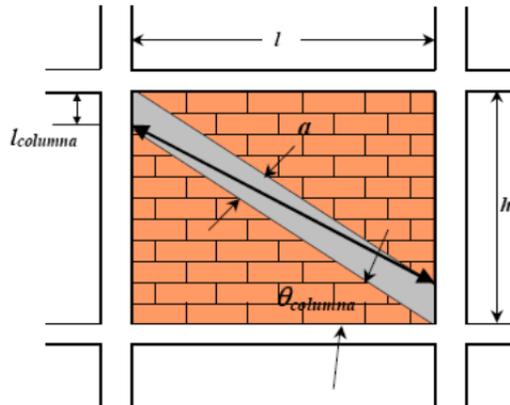
$(R_1)_i$ = factor de reducción para la evaluación en el plano debido a la presencia de aberturas.

$(R_2)_i$ = factor de reducción para la evaluación en el plano debido al daño del relleno existente.

3.2.1.2 Excentricidad del puntal equivalente [36,37].

La evidencia experimental ha mostrado que normalmente la aplicación de las fuerzas del relleno no coincide plenamente con los nodos conectores de vigas y columnas confinantes, por tanto suele asumirse que dichas fuerzas serán resistidas principalmente por las columnas. Por ende, se recomienda ubicar el puntal simplemente apoyado a la columna a una distancia $l_{columna}$ de la cara de la viga.

Figura 25. Excentricidad del puntal equivalente respecto a la columna (Tomado de [37])



Esta distancia está definida en las siguientes ecuaciones y es calculada usando el ancho del puntal a , sin ningún factor de reducción.

$$l_{columna} = \frac{a}{\cos \theta_{columna}} \quad \tan \theta_{columna} = \frac{h - \frac{a}{\cos \theta_{columna}}}{l} \quad (21, 22)$$

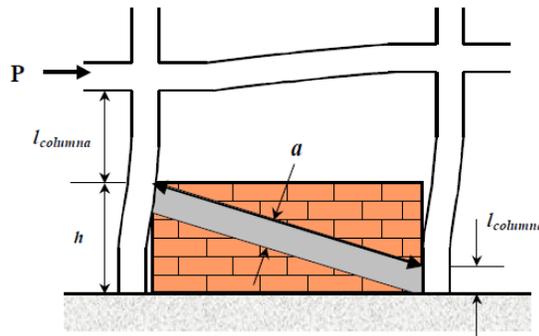
Los variables de las ecuaciones se muestran en la Figura 25.

3.2.1.3 Pórticos confinantes parcialmente rellenos [36, 37]

En el caso de pórticos parcialmente rellenos, la longitud de la columna reducida, $l_{columna}$, debe ser igual a la longitud libre de la abertura para la columna de barlovento, mientras $l_{columna}$ para la columna de sotavento está definida igual que para pórticos completamente rellenos. El ancho del puntal debe ser calculado, usando la altura reducida del relleno, h como se muestra en la Figura 5.

En este caso, el factor de reducción que solo se tiene en cuenta es $(R_2)_i$ (para daños en el relleno).

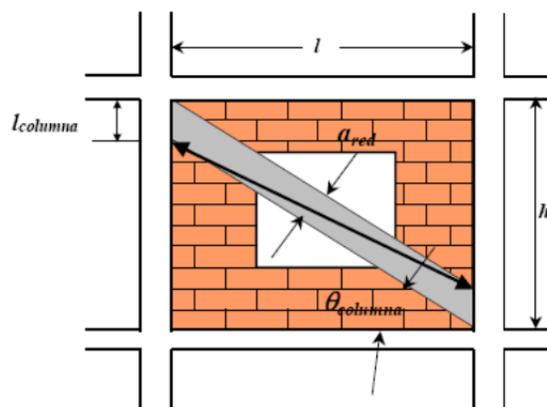
Figura 26. Ubicación del puntal en pórticos parcialmente rellenos (Tomado de [37])



3.2.1.4 Paneles con aberturas [36.37]

En este caso el puntal equivalente se asume para actuar de la misma manera que los pórticos completamente rellenos. Por lo tanto, la excentricidad del puntal debe estar en una distancia $l_{columna}$ de la cara de la viga como se muestra en la figura. Sin embargo, el ancho del puntal equivalente a , debe ser multiplicado por un factor de reducción que tiene en cuenta la pérdida de resistencia debida a la abertura $(R_1)_i$.

Figura 27. Reducción del ancho del puntal por presencia de aberturas (Tomado de [37])



El factor de reducción, $(R_1)_i$, es calculado usando la siguiente expresión.

$$(R_1)_i = 0.6 \left(\frac{A_{abert}}{A_{panel}} \right)^2 - 1.6 \left(\frac{A_{abert}}{A_{panel}} \right) + 1.0 \quad (23)$$

Donde:

A_{abert} = área de la abertura (m^2)

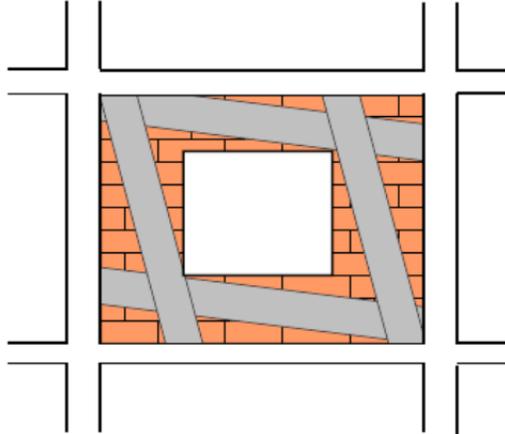
A_{panel} = área del panel de relleno (m^2) = $l \times h$

Si el área de las aberturas (A_{abert}) es mayor o igual al 60 % del área del panel de relleno (A_{panel}), el efecto del relleno debe ser despreciado, por ejemplo, $(R_1)_i = 0$.

Otros autores como Asteris [38], han estudiado analíticamente esta disminución en rigidez y resistencia de los muros de relleno producto de la presencia de aberturas, encontrando variaciones considerables (en algunos casos de hasta el 90%), en función del porcentaje de la abertura respecto al área total de relleno y/o su ubicación respecto a la diagonal central.

Cuando se requiere una análisis local o detallado de los paneles de mampostería con aberturas, se recomienda considerarlas, modelando el panel perforado con elementos finitos o usando puntales que representen exactamente los posibles campos de esfuerzos como se muestra en la Figura 28 (Por Al-Chaar [36] y FEMA 356 [35]).

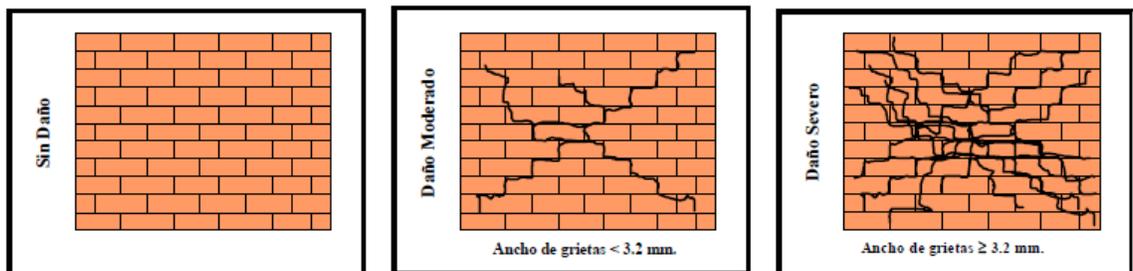
Figura 28. Esquema de posible representación del puntal equivalente en estudio de efectos locales en muros con aberturas (Tomado de [37])



3.2.1.5 Ajustes en el ancho del puntal por presencia de daño (agrietamiento) en el panel [36, 37].

El grado de daño existente en los paneles puede ser determinado por inspección visual del relleno. El daño existente en los paneles (o agrietamiento) debe ser clasificado como: sin daño, daño moderado (grietas < 3.2 mm), o daño severo (grietas > 3.2 mm) como se presenta en la Figura 29. Si hay duda de la magnitud del daño del panel existente, se debe asumir por seguridad, daño severo (conservativo).

Figura 29. Clasificación de grietas según su tamaño (Adaptado de [36]).



Se debe obtener un factor de reducción para daño del panel $(R_2)_i$ de la Tabla 5. Si la relación de esbeltez (h/t) del panel es mayor que 21, $(R_2)_i$ no está definido y se requiere reparación. Para paneles sin daño, el factor de reducción $(R_2)_i$ debe ser tomado como 1.0.

Tabla 5. Factores de reducción $(R_2)_i$ acorde al tipo de daño y la relación de esbeltez. (Tomado de [37])

<i>Relación</i> <i>h / t</i>	<i>(R₂)_i según el tipo de daño</i>	
	<i>Moderado</i>	<i>Severo</i>
≤ 21	0.7	0.4
> 21	Requiere reparación	

3.2.1.6 Resistencia a la compresión del relleno de mampostería [36].

La resistencia a la compresión del relleno de mampostería corresponde a la carga (de compresión) que el puntal equivalente de mampostería puede resistir antes que se presente una falla por este mecanismo (R_{comp}) . La carga aplicada, que corresponde a la resistencia a la compresión del relleno se evalúa usando la siguiente ecuación.

$$R_{comp} = a_{red} t_{efec} f'_m \quad (24)$$

Donde:

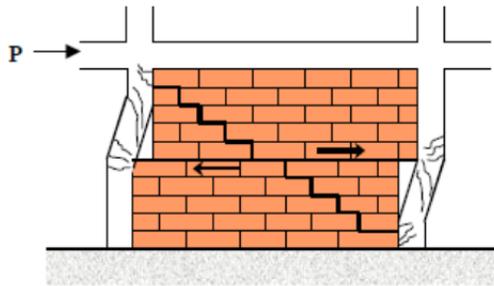
f'_m = resistencia a la compresión de la mampostería (kg/cm²)

t_{efec} = espesor neto del panel de mampostería (cm)

3.2.1.7 Resistencia al cortante del relleno de mampostería [36].

La capacidad de la mampostería a fuerzas cortantes es proporcionada por la combinación de dos diferentes mecanismos: (1) el fuerte vínculo de resistencia al cortante de la mampostería y (2) la fricción entre las piezas y el mortero. El concepto de fuerte vínculo de resistencia al cortante se ilustra en la Figura 30, donde una grieta típica escalonada de cortante es aproximada a una simple grieta de cortante a través de una junta de pega.

Figura 30. Simplificación de una grieta de cortante (Tomado de [37])



Esta simplificación es válida porque la componente vertical de la grieta escalonada estará en tensión, y su contribución a la resistencia al cortante se debe despreciar. Por lo tanto, la carga horizontal lateral requerida para alcanzar la resistencia al cortante del relleno se calcula de la siguiente manera.

$$R_{cort} = A_n f'_v (R_1)_i (R_2)_i \quad (25)$$

Donde:

A_n = área neta de la sección transversal de la junta de pega del panel de relleno a lo largo de su longitud ($l \times t_{pega}$) (cm^2).

l = longitud del panel de relleno (cm).

t_{pega} = espesor transversal del mortero de pega (cm).

f'_v = es la menor entre las resistencias al cortante y a la adherencia (mortero-pieza) de la mampostería (kg/cm^2)

Aunque las cargas verticales sobre el relleno no pueden ser calculadas con exactitud, el 20% de los esfuerzos normales se pueden asumir para ser resistidos por el relleno e incluirlos en la componente de fricción del mecanismo resistente [36].

3.2.1.8 Comportamiento carga-deformación del puntal [36, 37]

El puntal equivalente excéntrico usado para modelar los rellenos de mampostería está simplemente apoyado a los elementos del pórtico, por lo que no se presentará transferencia de momento. La rigidez del puntal estará gobernada por el módulo de elasticidad del material de la mampostería (E_m) y el área de la sección transversal ($a \times t_{puntal}$). La resistencia del puntal se determina calculando la carga requerida para alcanzar la resistencia a la compresión del relleno de mampostería (R_{compr}) y la carga requerida para alcanzar la resistencia al cortante ó a la adherencia del relleno de mampostería (R_{cort}). La componente de estas fuerzas en la dirección del puntal equivalente será usada para asignar la resistencia a la compresión del puntal. Esta resistencia es definida como R_{puntal} y gobierna la resistencia de la rótula plástica en el puntal trabajando sólo a carga axial.

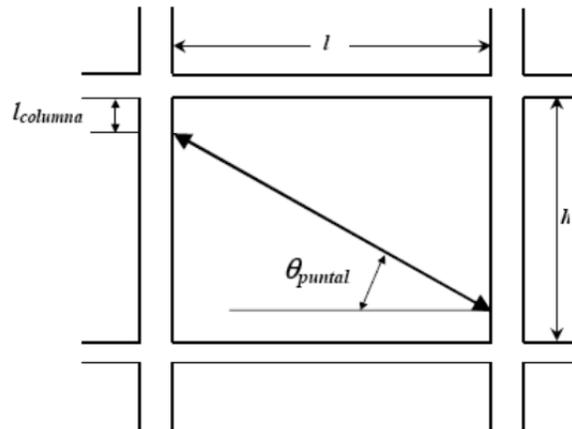
$$R_{puntal} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{compr} \\ R_{cort} / \cos \theta_{puntal} \end{array} \right\} \quad (26)$$

$$\tan \theta_{puntal} = \frac{h - 2l_{columna}}{l} \quad (27)$$

Donde:

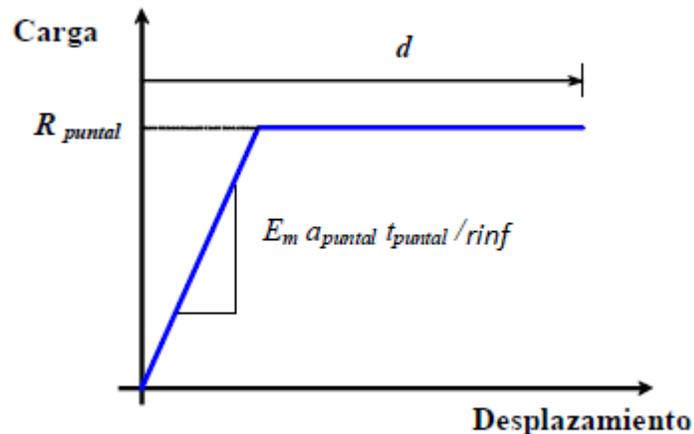
θ_{puntal} = es el ángulo del puntal excéntrico respecto a la horizontal, representado en la Figura 31.

Figura 31. *Parámetros en la determinación de la relación Carga-Deformación del puntal (Tomado de [37])*



El puntal equivalente se asume para deflectarse con derivas no lineales como se muestra en la Figura 32.

Figura 32. *Parámetros en la determinación de la relación Carga-Deformación del puntal (Tomado de [37])*



El parámetro d , el cual representa la capacidad de deformación no lineal, es expresado en términos de la deriva lateral de piso, y está definido en la Tabla 7-9 del FEMA 356 [35]. Las derivas laterales No Lineales no deben exceder los valores dados en esta tabla, según el criterio de aceptación. El factor β , representa

la relación de resistencia entre el pórtico confinante y el muro de mampostería. En la Tabla 6 se presentan estos valores.

Tabla 6. Relaciones Fuerza/Deflexión para análisis estático no lineal (Tomado de [35])

Table 7-9 Nonlinear Static Procedure—Simplified Force-Deflection Relations for Masonry Infill Panels

$\beta = \frac{V_{fre}}{V_{ine}}$	$\frac{L_{inf}}{h_{inf}}$	c	d %	e %	Acceptance Criteria	
					LS %	CP %
$\beta < 0.7$	0.5	n.a.	0.5	n.a.	0.4	n.a.
	1.0	n.a.	0.4	n.a.	0.3	n.a.
	2.0	n.a.	0.3	n.a.	0.2	n.a.
$0.7 \leq \beta < 1.3$	0.5	n.a.	1.0	n.a.	0.8	n.a.
	1.0	n.a.	0.8	n.a.	0.6	n.a.
	2.0	n.a.	0.6	n.a.	0.4	n.a.
$\beta \geq 1.3$	0.5	n.a.	1.5	n.a.	1.1	n.a.
	1.0	n.a.	1.2	n.a.	0.9	n.a.
	2.0	n.a.	0.9	n.a.	0.7	n.a.

Note: Interpolation shall be used between table values.

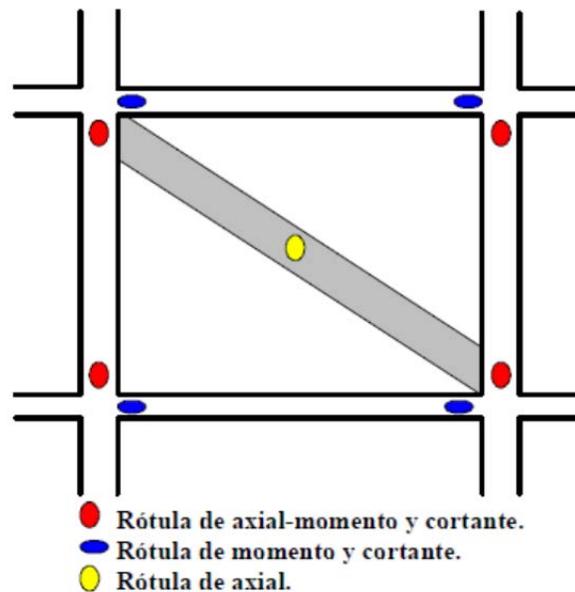
3.2.1.9 Posición de las rótulas plásticas [36, 37].

Las rótulas plásticas me permiten controlar en los elementos de la estructura el nivel de plastificación que se alcanza en la medida que se producen los incrementos de carga lateral. Para el caso de las columnas confinantes, deben tenerse en cuenta la interacción entre la carga axial y la capacidad de momento. Estas rótulas deben estar localizadas en la intersección con las vigas. En el caso de las vigas confinante, las rótulas necesitan solo ser caracterizadas por el comportamiento en flexión del elemento. Estas rótulas deben estar localizadas en la intersección con las columnas.

En el caso del puntal equivalente solo necesita rótulas que representen la carga axial que soportaría la mampostería. Esta rotula debe estar localizada en la luz media del elemento. En general, el mínimo número y tipo de rótulas plásticas

necesarias para tener en cuenta las acciones inelásticas de un pórtico con relleno se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Localización de rotulas plásticas en un muro confinado (Tomado de [37])



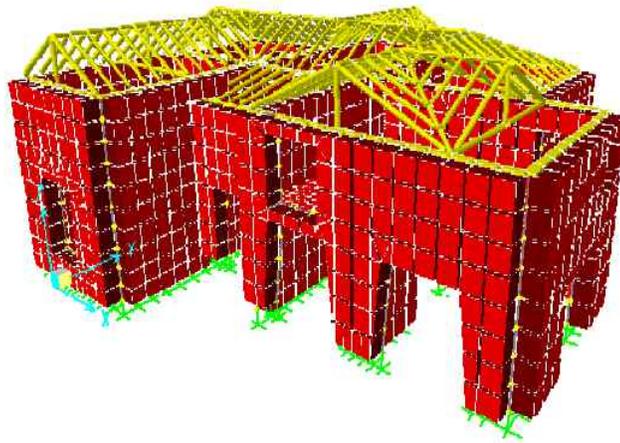
3.2.2 Macromodelamiento con elementos finitos.

Otra forma de realizar macromodelos, es a partir de elementos finitos, elementos superficie, también llamados elementos 2-D ó elementos área cuyo espesor sea pequeño en comparación con las otras dos dimensiones. En este caso, se considera el muro como una unidad compuesta con propiedades definidas en función de sus componentes (Los cuales no hacen parte del modelo en forma directa). Básicamente, este método consiste en dividir la estructura en subregiones, denominadas elementos finitos (Figura 34), dentro de las cuales se prescribe la forma en que varían los desplazamientos en función de los valores correspondientes a ciertos puntos denominados nudos.

Como en el caso de vigas y barras, los posibles desplazamientos y giros nodales, constituyen grados de libertad [37], definiendo la matriz de rigidez del elemento en

función de los desplazamientos nodales al ser aplicadas fuerzas en los nodos. Y su formulación teórica ha sido ampliamente desarrollada en las últimas décadas [39-49].

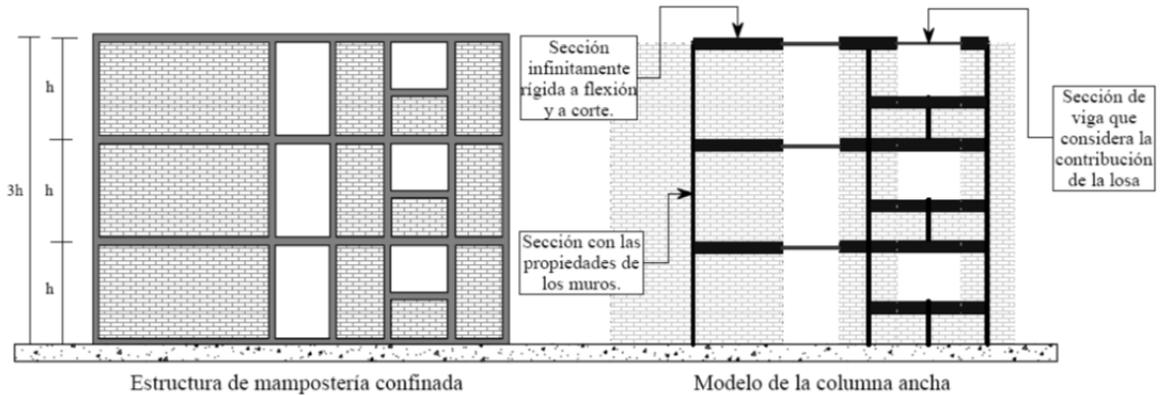
Figura 34. Macromodelo empleando elementos finitos (Fuente: Autor)



Existen otros tipos de macromodelos empleados en muros de mampostería que no son objeto de estudio en el presente trabajo, como el *Modelo de la Columna Ancha*, el cual es trabajado por Zúñiga y Terán [40]. En donde conforme lo ilustra la Figura 35 para el caso plano, las estructuras de mampostería pueden idealizarse a través de marcos.

Dentro de este contexto, los muros se modelan a través de columnas equivalentes que deben representar sus propiedades a flexión y corte. A las vigas inmersas en los muros se les asigna rigidez infinita, tanto a flexión como a corte. Los pretiles de las ventanas suelen modelarse como columnas anchas, tal como se haría en el caso de cualquier otro muro.

Figura 35. Esquema del Modelo de columna ancho (Tomado de [40])



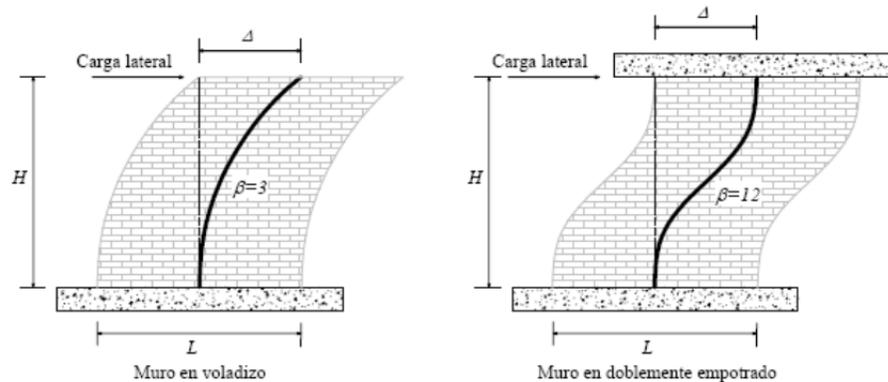
Para el caso de muros de mampostería confinada, las propiedades de la columna ancha deben contemplar tanto la contribución de la mampostería como la de los elementos de concreto que la confinan. Para tal efecto, dichas propiedades deben estimarse a partir de una sección transformada que considere explícitamente la relación modular entre concreto y mampostería. En caso que se usen marcos planos para modelar la estructura, es necesario considerar la contribución de las secciones de muro que se encuentran fuera del plano de análisis. El uso de un modelo tridimensional permite el modelado directo de dichas secciones. Una ventaja de utilizar el modelo de la columna ancha es que las propiedades a corte y a flexión de los muros dependen directamente de las propiedades geométricas de sus secciones y de las propiedades mecánicas de la mampostería. La rigidez elástica de los muros de mampostería puede estimarse como:

$$K_0 = \left(\frac{h^3}{\beta EI} + \frac{h}{GA} \right)^{-1} \quad (28)$$

Donde K_0 es la rigidez elástica; h la altura del muro; A e I el área de corte y momento de inercia de su sección transversal, respectivamente; E y G el módulo

de elasticidad y de corte de la mampostería, respectivamente; y β un factor que depende de las condiciones de apoyo en los extremos del muro (Figura 36).

Figura 36. Factor de condiciones de apoyo (Tomado de [40])



A partir de resultados obtenidos por Bazán [20] y otros autores, es posible decir que el modelo de la columna ancha, aunque no es tan generalizada su implementación, es capaz de representar con relativa precisión, y para un amplio rango de relaciones de aspecto, la rigidez lateral elástica de muros sujetos a cargas laterales.

Para el caso de muros de mampostería de obra de fábrica, los cuales son mencionados por Viviescas [41] en su tesis doctoral, sobresale el método de *Modelamiento y Análisis Límite con Bloques Rígidos*, el cual se basa en las hipótesis de resistencia a compresión infinita, inexistencia de fallo por deslizamiento, inexistencia de tracción y pequeñas deformaciones. Una de sus ventajas es que permite predecir el valor de la carga de rotura, así como los mecanismos desarrollados, sin requerir gran cantidad de parámetros.

Viviescas [41], centra su investigación mediante la utilización de un *Método Simplificado para el Análisis de Muros de Obra de Fábrica, Basado en Modelos de Bielas y Tirantes* propuesto por Roca [42]. El cual, originariamente ha sido

utilizado para modelar la condición última del hormigón reforzado. Para lo cual se emplean bielas que representan los campos de las tensiones de compresión y tirantes para representar las barras de refuerzo.

En términos generales podemos deducir, que el nivel de refinamiento que se obtiene en los resultados con análisis empleando micromodelos respecto al análisis con macromodelos, no compensa el elevado costo computacional y nivel de complejidad de los mismos. Una adecuada implementación de macromodelos ha demostrado una buena aproximación en la predicción de la respuesta estructural al ser comparados con los datos experimentales.

3.3 MACROMODELAMIENTO CONSIDERANDO LAS IRREGULARIDADES EN LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA.

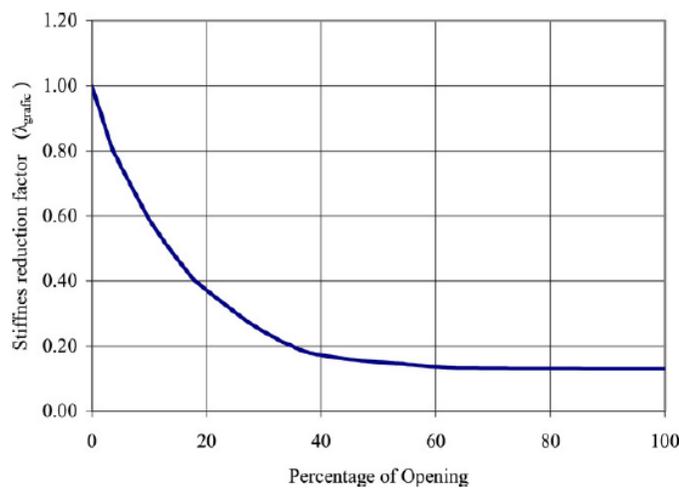
El interés en estudiar más a fondo el comportamiento de la mampostería ha llevado a incrementar el nivel de investigaciones en el último año. Aspectos tales como, las irregularidades en los muros principalmente por aberturas o heterogeneidad en sus componentes, están siendo incluidos en estudios más recientes, buscando entender cómo las irregularidades afectan en la respuesta de las estructuras con mampostería.

No obstante, no es tan común encontrar estudios en la literatura existente que aborden la no continuidad de los elementos de confinamiento en los muros de una edificación o su confinamiento parcial visto globalmente, lo cual constituye una irregularidad predominante en gran parte de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga construidas de manera artesanal, sin diseño ingenieril, tal como se ha evidenciado en los estudios realizados por el grupo INME en edificaciones de la ciudad de Bucaramanga y Floridablanca [16].

A continuación se presentan algunos trabajos referentes a sistemas con mampostería que consideran irregularidades.

Kose [43], realizó un estudio sobre la afectación en los periodos de las estructuras con elementos de concreto rellenos con muros de mampostería, considerando variaciones en factores tales como número de pisos y cantidad de muros, realizando posteriormente un análisis de sensibilidad. Adicionalmente incluye el efecto de las aberturas en los muros como un factor de reducción de rigidez en función de la posición y tamaño de la abertura $\lambda_{graphic}$.

Figura 37. Factor de reducción de rigidez para muros de relleno en función del porcentaje de aberturas (Tomado de [43])



Cuando las aberturas se ubican sobre el puntal equivalente, el ancho efectivo del mismo es multiplicado por dicho factor de reducción. Siendo el nuevo ancho efectivo (a_m) definido de la siguiente manera:

$$a_m = 0.175 \lambda_{graphic} (\lambda h_{inf})^{-0.4} r_{inf} \quad (29)$$

Los periodos para las estructuras analizadas, los calculó con base a las expresiones dadas por diferentes normas internacionales.

Amin Mohebkhah [32], concentró sus estudios en mampostería confinada por elementos metálicos sometidos a carga lateral, empleando el método de elementos discretos (DEM) bidimensionalmente, en el cual las juntas se modelan con un espesor cero, los bloques son considerados completamente deformables, lo cual permite que la deformación ocurra tanto en los bloques como en las juntas. A partir de datos experimentales de estudios anteriores de diferentes especímenes, los cuales consideraban aberturas en diferentes posiciones, simulando puertas y ventanas, comparó los resultados obtenidos en sus estudios, encontrando discrepancias tolerables entre los modelos analíticos y experimentales.

M. Shariq [44], realiza un análisis por elementos finitos tridimensional, a una estructura cuadrada conformada por cuatro muros, con diferentes relaciones entre sus dimensiones principales en planta y diferentes posiciones de aberturas (puertas y ventanas) en diferentes muros sometidos a fuerza sísmica variando la dirección o ángulo de aplicación. Empleando el método del espectro de respuesta para el análisis sísmico. Monitoreó el comportamiento de los muros de mampostería a través de los esfuerzos máximos, encontrando variación en la respuesta de la estructura por la relación de dimensiones y principalmente influenciada por la posición de las aberturas. Así mismo observó que los máximos esfuerzos principales de tensión ocurrieron en los muros cortos y los máximos esfuerzos por cortante ocurrieron en los muros largos.

Jocelyn Paquette [45], realizó ensayos sobre un modelo a escala real de una estructura de un piso en mampostería de ladrillos sin reforzar, con un diafragma en madera sometiéndolo a excitaciones sísmicas usando pruebas pseudo-dinámicas.

Roca [42], en su *Método Simplificado para el Análisis de Muros de Obra de Fábrica, Basado en Modelos de Bielas y Tirantes*, también considera el caso en el cual los muros presentan aberturas u otras alteraciones geométricas.

Lo que se observa en la revisión bibliográfica, es que la mayor parte de estudios se centra en el análisis de muros aislados considerando una condición fija en la irregularidad. Por tal motivo, este trabajo busca aportar información útil en la predicción de la respuesta estructural de una edificación de mampostería confinada en función del nivel de afectación de la irregularidad en los diferentes muros que constituyen el sistema resistente de una edificación. Buscando proporcionar un refinamiento en las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad en este tipo de estructuras.

3.4 TÉCNICAS GENERALES DE EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES

La evaluación sísmica de una edificación requiere establecer su capacidad de satisfacer el nivel de desempeño esperado, de acuerdo con la sismicidad local, propia o característica de su emplazamiento. De manera que las limitantes implícitas en el nivel de desempeño esperado de las edificaciones esenciales, representan en sí, los criterios de aceptación que servirán de base para la toma de las decisiones relativas a la necesidad de implementar una adecuación o intervención de la edificación.

A continuación se describen brevemente los diferentes tipos de análisis existentes y se profundiza en el Procedimiento Estático No Lineal (Curvas Push over) las cuales son empleadas como base de análisis en este trabajo. Estos procedimientos se detallan en las normas ATC-40 [46], FEMA 273 [47], FEMA 356 [35].

3.4.1 Procedimiento estático lineal (LSP)

En el LSP, la estructura se modela con una rigidez linealmente elástica y el amortiguamiento viscoso equivalente se modela con los valores aproximados esperados para cargas cercanas al punto de fluencia. Las fuerzas sísmicas de diseño para el LSP son representadas por fuerzas laterales estáticas cuya suma es igual a la seudocarga lateral (cortante basal). En la metodología lineal del FEMA-273 [47], la magnitud de la seudocarga lateral ha sido seleccionada con la intención que cuando sea aplicada al modelo linealmente elástico de la estructura, esta resulte en amplitudes de desplazamiento que se aproximen a los máximos desplazamientos que se esperan durante el sismo de diseño.

3.4.2 Procedimiento dinámico lineal (LDP)

Las bases, alcances de la modelación, y los criterios de aceptación del LDP son similares a aquellos para el LSP. La principal excepción es que los cálculos de la respuesta se llevan a cabo usando cualquier análisis espectral modal o análisis de registro en el tiempo. El análisis espectral modal, se lleva a cabo usando espectros de respuesta linealmente elásticos, los cuales no son modificados para tener en cuenta una respuesta no lineal prematura, es decir solo se considera el amortiguamiento interno y no se tiene en cuenta el amortiguamiento histerético.

3.4.3 Procedimiento estático no lineal (NSP)

El modelo que incorpora directamente una respuesta inelástica del material es desplazado hasta un “desplazamiento objetivo” para revisar los resultados de fuerzas internas y las deformaciones que se presentan. Se entiende que el “desplazamiento objetivo” representa el máximo desplazamiento probable a ser experimentado durante el sismo de diseño. Las características carga-deformación no lineales de los componentes y elementos de la estructura son modelados directamente. El modelo matemático de la estructura se somete a un aumento monótonico de fuerzas o desplazamientos laterales (pushover) hasta que el “desplazamiento objetivo” es excedido o la estructura sufre colapso [37].

Éste procedimiento será el empleado en el Capítulo 5 para determinar la capacidad de las edificaciones ante demanda sísmica para cada una de irregularidades consideradas, con base en la metodología expuesta en el ATC-40 [46] para edificaciones existentes.

3.4.4 Procedimiento dinámico no lineal (NDP)

Las bases, modelos y criterios de aceptación del NDP son similares a aquellos del NSP. La principal excepción es que los cálculos de la respuesta se llevan a cabo usando un análisis de registro en el tiempo y no hay posibilidad de hacer análisis espectral. Con el NDP, el criterio de los desplazamientos no se establece usando un “desplazamiento objetivo”, sino que es directamente determinado a través de un análisis dinámico que usa uno o unos registros de movimientos sísmicos reales o generados artificialmente. La respuesta calculada puede ser muy sensible a características de sismos individuales; por consiguiente, se recomienda llevar a cabo el análisis con más de un registro de movimiento sísmico de diferentes características como: contenido frecuencial, amplitud, energía sísmica, duración, etc. [37].

4 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de los diferentes tipos de ensayos realizados tanto a los materiales constitutivos de la mampostería (Ladrillos o bloques y mortero) como a muretes como tal, con el fin de verificar de manera experimental los valores teóricos a emplear en el modelado en los capítulos siguientes y presentados en la normatividad colombiana para éstos materiales. Los resultados experimentales, corresponden a un subproducto de la investigación, llevado a cabo por estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander presentado como su trabajo de grado [48].

A continuación se presentan los resultados obtenidos de manera resumida y enfatizando en bloques H10, dado que ha sido éste el empleado en los modelos matemáticos, para mayor profundidad acerca de los ensayos consultar la referencia [48]

4.1 SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA

Se escogieron los bloques macizos y de perforación horizontal comúnmente comercializados en el entorno local (Bucaramanga): tolete macizo, bloque de perforación horizontal (H10 y H15) suministrados por un fabricante local (Figura 38).

Figura 38. Unidades de perforación horizontal (H-10, H-15), y macizo (tolete).

(Tomado de [48])



La Tabla 7 presenta las dimensiones y pesos de los bloques ensayados.

Tabla 7. *Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])*

DIMENSIONES			
	H-10	H-15	Tolete
Numero de huecos	6	6	Macizo
Dimensiones	30 x 20 x 10 cm	30 x 20 x 15 cm	32 x 15 x 6,5 cm
Peso promedio (kg)	5,8954	8,6625	5,3645

4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE BLOQUES INDIVIDUALES (f'_{cu})

El ensayo se realiza con el fin de hallar la resistencia del bloque individual (f'_{cu}), el cual determina en gran medida la resistencia del muro. Para este ensayo se emplearon unidades secas y enteras, las cuales se refrendaron previamente buscando una superficie de contacto lisa, para permitir una aplicación uniforme de carga. La Figura 39 presenta un ensayo tipo realizado a 5 unidades.

Figura 39. *Ensayo de resistencia a la compresión de unidades de mampostería.*



El procedimiento para la realización del ensayo, se basó en los parámetros expuestos por la norma NTC 4017 [Citado en 48] y los resultados para bloques H10 se exponen en la Tabla 8.

Tabla 8. *Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])*

ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE					
	H-10-1	H-10-2	H-10-3	H-10-4	H-10-5
CARGA (KN)	84.3	70.5	94.4	72.3	82.0
AREA (cm²)	300	300	300	300	300
ESFUERZO (Mpa)	2.810	2.350	3.147	2.410	2.733

De manera similar se procedió para los restantes tipos de bloques analizados y luego se promediaron las resistencias obtenidas, arrojando los siguientes valores que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. *Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])*

RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN (Mpa)			
	H-10	H-15	Tolete
f'cu	2.69	2.54	5.43

✓ **Ensayo de absorción unidades de mampostería**

La absorción se halla mediante la siguiente expresión y la absorción promedio de cada tipo de unidad se muestra en la (Tabla 10).

$$\%absorcion = \frac{100 * (w_{ss} - w_s)}{w_s} \quad (30)$$

Dónde:

W_{ss} = Peso de la unidad de mampostería saturada luego de 24 horas de inmersión en agua (gr).

W_s = Peso seco de la unidad de mampostería (gr).

Tabla 10. Valores de Absorción para los bloques ensayados (Tomado de [48])

	H-10	H-15	tolete
peso seco [Kg]	5,8954	8,6625	5,3645
peso saturado [Kg]	6,4916	9,4759	6,2943
% absorción	10,11	9,39	17,35

4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE MORTEROS (f'_{cp})

La resistencia del mortero (f'_{cp}), se determina promediando una serie de tres cubos por cada mortero considerado (Ver Figura 40). El procedimiento para la realización del ensayo se basó en los parámetros expuestos por la norma NTC 3546 [Citado en 48]. Los resultados de presentan en la Tabla 11.

Figura 40. Muestras de mortero de pega



Tabla 11. Parámetros considerados de los bloques (Tomado de [48])

TIPO DE MORTERO	Esfuerzo (MPa)
Mortero 1:3 "Tipo N"	9.00
Mortero 1:5	6.50

4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PILAS DE MAMPOSTERÍA (f'_m)

Después de determinar las características de cada uno de los materiales se hizo necesario establecer el comportamiento en conjunto y determinar la resistencia a la compresión de la mampostería. Para esto se realizó el ensayo de compresión axial en pilas de mampostería no reforzada (Figura 41) de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 3495 [Citando en 48].

Figura 41. Ensayo de compresión axial (Fuente: Autor).



El ensayo se efectuó en la maquina universal (MTS 810), (Figura 42) después de que los especímenes cumplieron los 28 días de edad y de haber sido refrendados previamente.

Figura 42. (a) Prensa hidráulica (b) Máquina universal (MTS).
(Fuente: Autor)



El ensayo de compresión axial se realizó con carga controlada, a una velocidad de 0,025 mm/sg. Las cargas fueron aplicadas hasta provocar la rotura de las pilas, instante donde se registró la carga máxima que puede soportar la pila de mampostería.

La resistencia característica a la compresión f'_m se halla con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{W}{A} \quad (31)$$

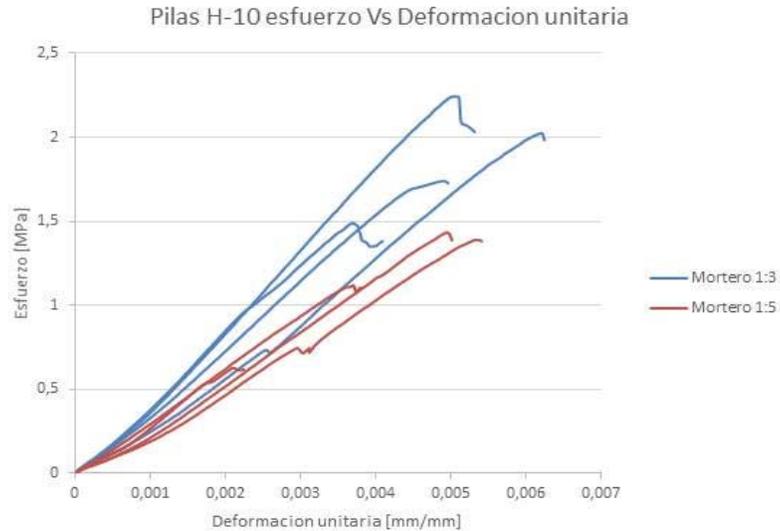
Dónde:

C = Resistencia a compresión del espécimen (Kg/cm^2).

W= Carga máxima de rotura (Kg).

A = Promedio de las áreas brutas superior e inferior (cm^2).

Figura 43. Curvas esfuerzo Vs deformación a compresión simple de pilas con bloques H-10 (Tomado de [48])



Este ensayo se realizó para pilas de mampostería construida con los dos morteros mencionados en Tabla 11 y las curvas obtenidas pueden observarse de manera superpuesta en la Figura 43.

Para cada tipo de murete se hicieron un mínimo de tres especímenes con el fin de obtener un valor promedio de resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos se cotejaron con los valores teóricos obtenidos con la Ecuación 1 y se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de f'_m teóricos y experimentales de las unidades ensayadas (Tomado de [48])

BLOQUE	f'_m [Mpa] Teórico	f'_m [Mpa] Exp
H-10 1:3	1,60	2,17
H-10 1:5	1,44	1,32
H-15 1:3	1,49	1,33
H-15 1:5	1,35	0,78
Tolete 1:3	2,84	5,67
Tolete 1:5	2,64	4,6

4.5 ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN PILAS DE MAMPOSTERÍA (V'_m)

Para estudiar el comportamiento de la mampostería en tensión diagonal se utiliza un ensayo de compresión diagonal. Este ensayo consiste en aplicar una compresión diagonal a un murete de dimensiones aproximadamente cuadradas en las que la base sea formada por lo menos de una y media piezas. La falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Estas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión pieza-mortero; sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero.

Para determinar experimentalmente la resistencia (V'_m), depende tanto de la carga última como del área neta del promedio de las diagonales del murete (ASTM E 519-81), [Citado en 48], tal como se muestra a continuación:

$$\tau = \frac{0,707 P_u}{A_n} \quad (32)$$

Dónde:

τ : Esfuerzo cortante sobre área neta ($\frac{N}{mm^2}$)

P_u : Carga de rotura (N)

A_n : Área neta del espécimen (mm^2) calculada como sigue:

$$A_n = \left(\frac{w + h}{2}\right) * t * n \quad (33)$$

Dónde:

w = ancho del espécimen, mm

h = alto del espécimen, mm

t = espesor total del espécimen, mm

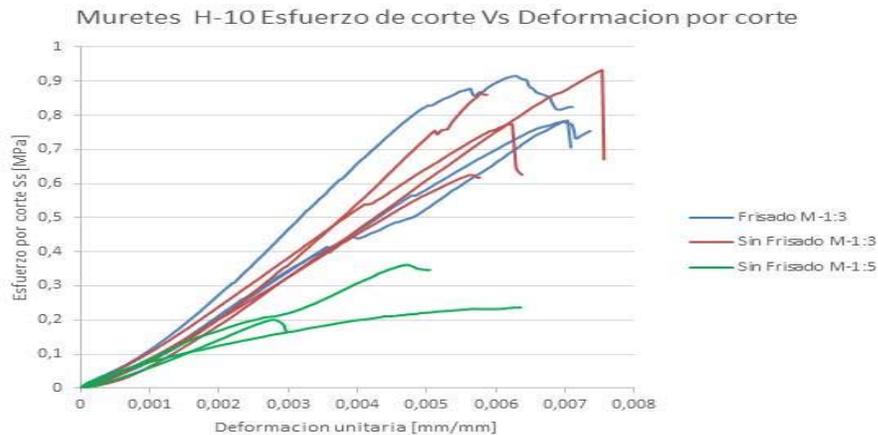
n = porcentaje del área total de la unidad que es sólida.

Figura 44. Fallas típicas de cortante por tensión diagonal (Fuente Autor)



Los ensayos se realizaron tanto con muros frisados como sin frisar, para evaluar el aporte del mismo en la capacidad de los muretes. Para el caso de muretes con bloques H10, las curvas obtenidas se aprecian en la Figura 45. Una falla típica de los muretes por tensión diagonal puede observarse en la Figura 44.

Figura 45. Curvas esfuerzo Vs deformación por tensión diagonal de pilas con bloques H-10 (Tomado de [40])



En la siguiente Tabla 13 se consignan los valores promedios de resistencia por cortante entre otros parámetros obtenidos de los ensayos.

Tabla 13. Valores de resistencia por tensión diagonal de las unidades ensayadas
(Tomado de [48])

BLOQUE	MORTERO DE FRISO	PARÁMETRO	PROMEDIO	DESV. EST. [Mpa]	% CV
H-10	1:3 Frisado	τ	0,83	0,08	0,09
		G_m	142,7	17,3	0,1
	1:3 Sin frisar	τ	0,80	0,13	0,17
		G_m	130,6	10,8	0,1
	1:5 Sin frisar	τ	0,27	0,08	0,31
		G_m	78,1	10,9	0,1

Con base a los resultados obtenido en la pruebas de laboratorio, podemos observar que los datos experimentales están alrededor de los datos teóricos estipulados en Colombia y aunque en algunos especímenes los resultados estuvieron dispersos, éstos se encuentran dentro de los rangos esperados en nuestro medio y definidos por las ecuaciones de la NSR-10. Con lo anterior se pudo constatar que dichas ecuaciones contenidas en la norma representan de manera aproximada las propiedades reales de la mampostería y sus materiales que la componen.

Con base en la verificación experimental de los valores de resistencias obtenidos por las ecuaciones estipuladas por la normatividad colombiana; para efectos de modelamiento en el capítulo 5, se definieron las propiedades con base a las ecuaciones teóricas expuestas en el capítulo 1 [1]. Fijando las propiedades de los materiales con las consideraciones respectivas para edificaciones existentes y considerando que el interés y alcance de la investigación está centrado en revisar el impacto de las irregularidades en la capacidad de la edificación y no en la calidad del material.

5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE UNO Y DOS PISOS CONSIDERANDO IRREGULARIDADES EN SU CONFIGURACIÓN.

A partir de lo expuesto en los capítulos anteriores y con los parámetros definidos en el Capítulos 6 para la mampostería y sus componentes, en el presente capítulo, se procede a la realización de los diferentes modelos analíticos para edificaciones de uno y dos pisos, las cuales son las de mayor predominancia para este sistema estructural en nuestro entorno local [16].

Para tal fin se considera la presencia de aberturas para casas de uno y dos pisos y el confinamiento parcial en casas de dos pisos. Para tal fin, se lleva a cabo un análisis estático no lineal (Pushover) a una edificación típica de mampostería confinada tomada de una de las comunas de la ciudad de Bucaramanga para tener una representación geométrica y distribución arquitectónica real de la misma. Posteriormente se realiza una variación en los parámetros de aberturas y confinamiento

5.1 PROCEDIMIENTO ESTÁTICO NO LINEAL (NSP) PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

En el presente numeral, se definen los principales criterios a considerar en el análisis no lineal de las edificaciones planteadas para el análisis.

5.1.1 Definición de los principios generales de la modelación

Los métodos simplificados de análisis no lineal, denominados procedimientos de análisis estático no lineal, son los que más se suelen emplear para la evaluación de estructuras existentes. Como ejemplo se pueden citar el método del espectro de capacidad (CSM Capacity Spectrum Method en inglés, ver ATC-40 [46]) y el método del coeficiente de desplazamiento (Ver FEMA-273 [47]).

En el procedimiento estático no lineal, el modelo que incorpora directamente una respuesta inelástica del material es desplazado hasta un “desplazamiento objetivo” para revisar los resultados de fuerzas internas y las deformaciones que se presentan. Se entiende que el “desplazamiento objetivo” representa el máximo desplazamiento probable a ser experimentado durante el sismo de diseño. Las características carga-deformación no lineales de los componentes y elementos de la estructura son modelados directamente. El modelo matemático de la estructura se somete a un aumento monótonico de fuerzas o desplazamientos laterales (pushover) hasta que el “desplazamiento objetivo” es excedido o la estructura sufre colapso. El “desplazamiento objetivo” puede calcularse por cualquier procedimiento que considere los efectos de respuesta no lineal en amplitud del desplazamiento. Debido a que el modelo matemático calcula directamente los efectos de la respuesta inelástica del material, el cálculo de las fuerzas internas serán aproximaciones razonables de aquellas esperadas durante el sismo de diseño [37].

En general el procedimiento de análisis estático no lineal realizado, se resume en los siguientes tres pasos (ATC-40 [46]):

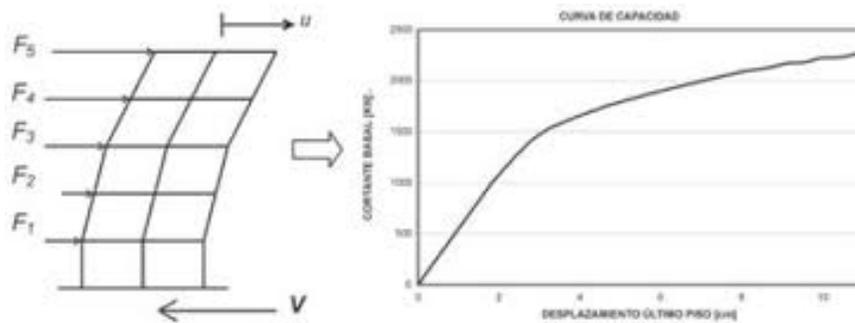
5.1.1.1 Capacidad de las edificaciones.

El objetivo principal de los procedimientos no lineales simplificados es la generación de la curva de capacidad (pushover curve, en inglés). Esta curva representa los desplazamientos laterales como una función de la fuerza aplicada a la estructura (Figura 46). Este proceso es independiente del método usado para calcular la demanda y del criterio del conceptual de quien lo aplica.

Para el presente análisis, se emplea el Software SAP2000, en donde a cada edificación tipo definida previamente en función de la irregularidad a estudiar, se le define un desplazamiento objetivo en uno de los nodos extremos de la cubierta

(Aproximadamente el 1% de la altura de la misma). Para lo cual, el software aplica incrementos de carga lateral para llevarlo a tal desplazamiento. Como resultado se obtienen las curvas de capacidad o curvas pushover de las edificaciones en término de Cortante en la Base Vs Desplazamiento.

Figura 46. Esquema general de un análisis Pushover (Tomado de [54])



Aunque el análisis se verificó en ambas direcciones (sentido fuerte y débil de la edificación), el presente análisis muestra los resultados en la condición menos favorable de las edificaciones, el cual corresponde al sentido débil de éstas (dirección XZ).

5.1.1.2 Demanda sísmica sobre la estructura.

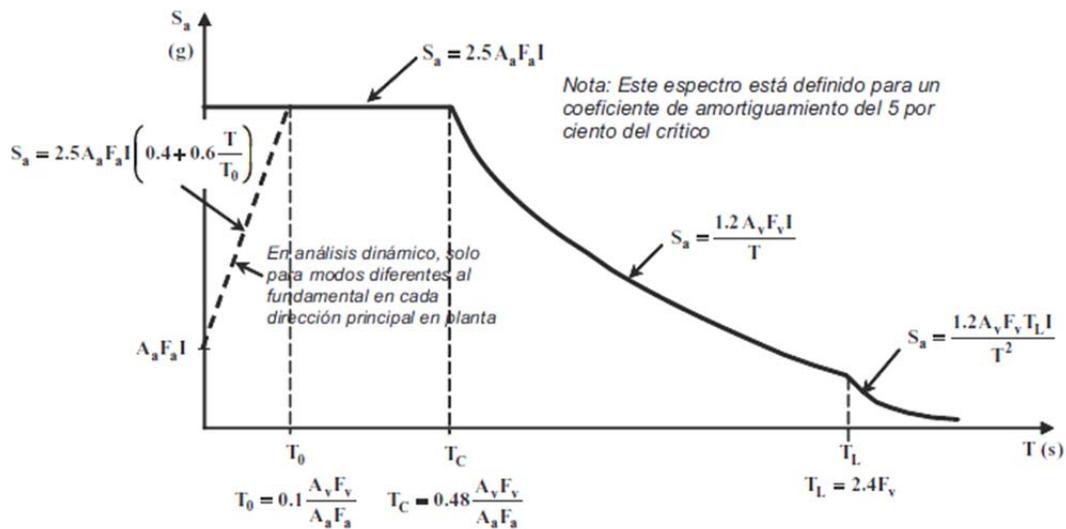
La demanda sísmica sobre la estructura se encuentra representada por el espectro de diseño del sitio donde se encuentra localizada la edificación. El espectro de diseño se construye para el amortiguamiento intrínseco de la edificación.

Para evaluar el comportamiento de las estructuras se empleó el espectro elástico de aceleración, para un coeficiente de amortiguamiento crítico del 5%, propuesto en la Norma colombiana NSR-10 [1], y con los parámetros de la ciudad de Bucaramanga.

5.1.1.3 Definición de la demanda (Espectro de diseño NSR-10).

Como demanda se toma el espectro elástico de respuesta definido en el Capítulo A de la norma colombiana NSR-10, escogiendo los parámetros concernientes a la ciudad de Bucaramanga para la deducción del mismo. Los parámetros del mismo se observan en la Figura 47.

Figura 47. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño como fracción de g . (Tomado de [1])



El espectro elástico de aceleraciones se expresa como fracción de la gravedad, en el cual $S_a(T)$ (pseudo aceleración en función del periodo) varía de la siguiente forma en 3 rangos diferentes:

$$0 \leq T \leq T_C \qquad S_a = 2.5A_a F_a I \qquad (34)$$

$$T_C < T \leq T_L \qquad S_a = \frac{1.2A_v F_v I}{T} \qquad (35)$$

$$T > T_L \qquad S_a = \frac{1.2A_v F_v T_L I}{T^2} \qquad (36)$$

En donde T_C y T_L están dados por:

$$T_C = 0.48 \frac{A_V F_V}{A_a F_a} \quad (37)$$

$$T_L = 2.4 F_V \quad (38)$$

Y en donde A_a es el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño, F_a es el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos, debida a los efectos de sitio, A_V es el coeficiente que representa la velocidad pico efectiva, para diseño, F_V es el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios, debida a los efectos de sitio, e I es el coeficiente de importancia de la edificación.

“Los movimientos sísmicos de diseño se definen en función de la aceleración pico efectiva, representada por el parámetro A_a , y de la velocidad pico efectiva, representada por el parámetro A_V , para una probabilidad del diez por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años” [1]

Para la ciudad de Bucaramanga que se encuentra en zona de amenaza alta, estos valores son:

$$A_a = 0.25 \quad y \quad A_V = 0.25 \quad (39)$$

Los valores de los coeficientes de amplificación que afectan la aceleración en la zona de periodos cortos, e intermedios, se tomaron asumiendo un perfil de suelo tipo C ($360 \text{ m/sg} \leq \bar{V}_s \leq 760 \text{ m/sg}$, en donde \bar{V}_s es velocidad media de onda de cortante). Los valores son:

$$F_a = 1.2 \quad y \quad F_V = 1.6 \quad (40)$$

La norma NSR-10 divide las estructuras según su importancia de la siguiente forma (Tabla 14):

Tabla 14. Valores de coeficiente de importancia (Tomado de [1])

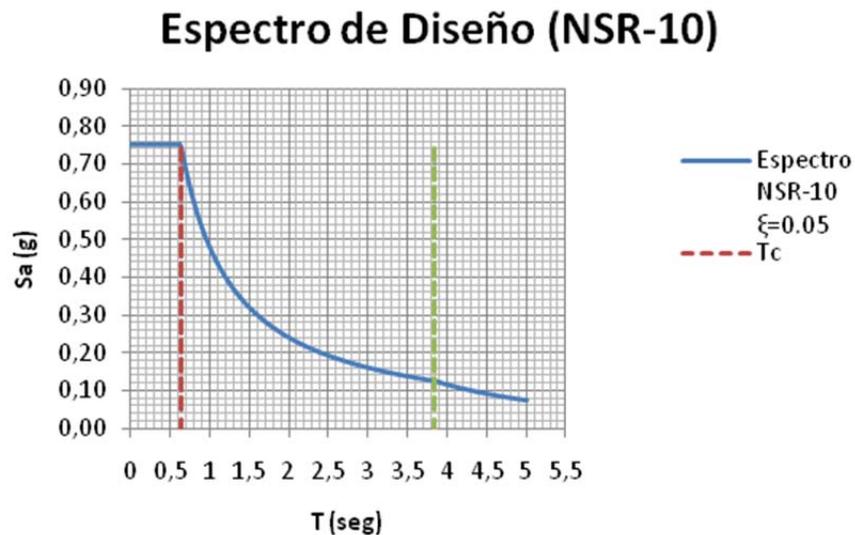
Grupo de Uso	Coficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Para nuestro caso de estudio, partimos de una estructura de vivienda que pertenecen al grupo I, cuyo valor de coeficiente de importancia es:

$$I = 1.00$$

Tomando los valores anteriormente definidos, se obtuvo el espectro mostrado en la Figura 48, con el cual se realizó espectral por demanda para todos los modelos.

Figura 48. Espectro elástico definido como la demanda para el análisis de las edificaciones (Fuente: Autor)



5.1.1.4 Comportamiento de las edificaciones [37].

Para la evaluación del desplazamiento hasta el cual llegará la estructura con el sismo de diseño, se pueden emplear varios métodos, entre los que se destacan los siguientes:

El método del espectro de capacidad, el cual reduce el espectro elástico debido al amortiguamiento histerético (daño) proporcionado por la estructura, y lo intercepta con la curva de capacidad en el sistema coordinado espectral para encontrar el punto de comportamiento “performance point” [46]. El punto de iguales desplazamientos se puede tomar como el primero para empezar las iteraciones (ver Figura 49).

El método de los coeficientes de desplazamiento (ver Figura 50), el cual modifica el desplazamiento elástico con coeficientes para calcular el desplazamiento objetivo o “target displacement” [47]. Usando el punto de comportamiento o el desplazamiento objetivo, la respuesta global de la estructura y las componentes de deformación individual, son comparadas con los límites establecidos para cumplir los fines de comportamiento para el edificio.

Figura 49. Método del espectro de capacidad (Tomado de [37])

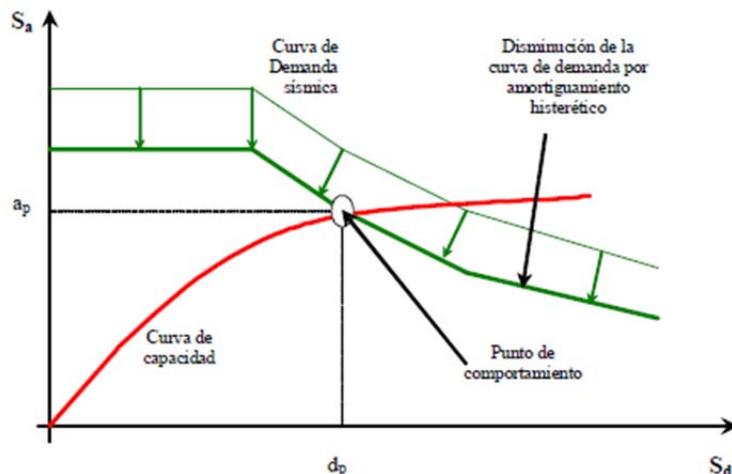
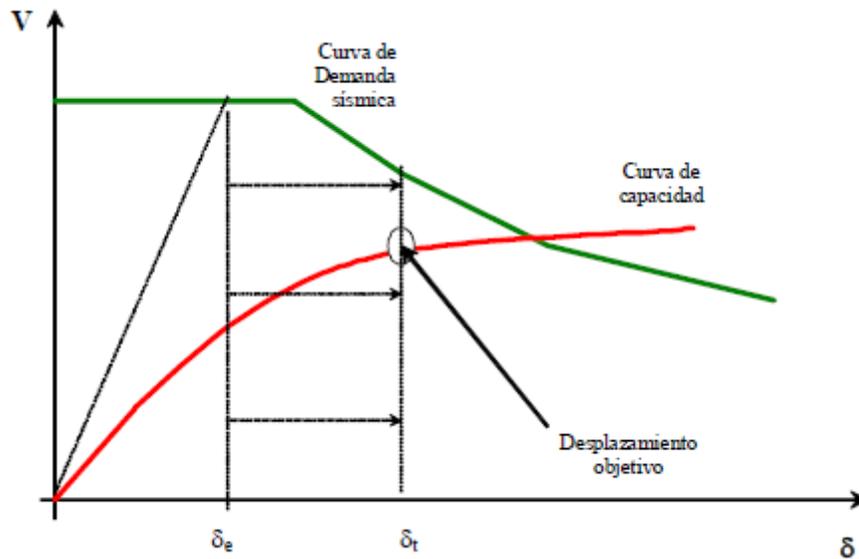


Figura 50. Método de los coeficientes de desplazamiento (Tomado de [37])

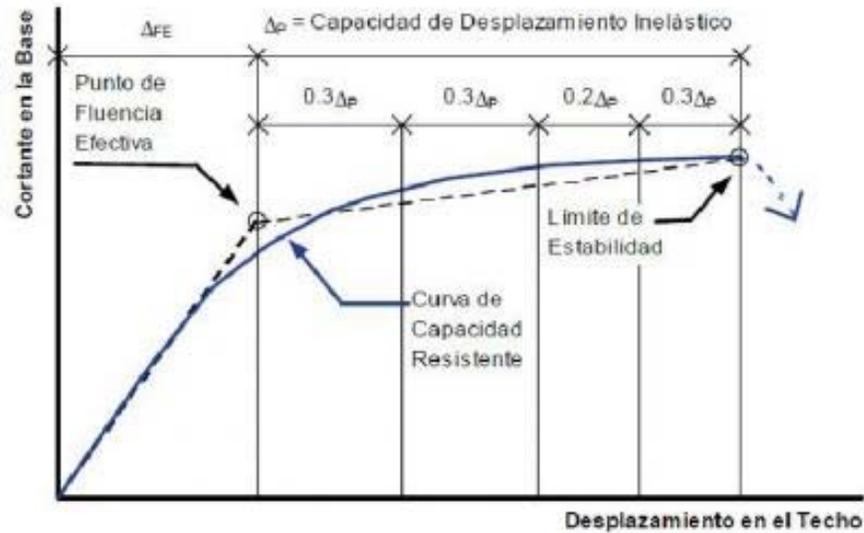


5.1.1.5 Definición del punto de comportamiento.

De los métodos descritos, se empleó el método del espectro de capacidad, para lo cual fue necesario realizar un procedimiento iterativo permitiendo representar la curva de capacidad obtenida mediante el procedimiento del numeral anterior como una curva bilineal mediante el procedimiento sugerido en el ATC-40, tomando como criterio la igualdad de áreas bajo la curva pushover y su equivalente bilineal, expresando previamente las curvas tanto de capacidad como demanda en términos de desplazamiento y aceleración espectral.

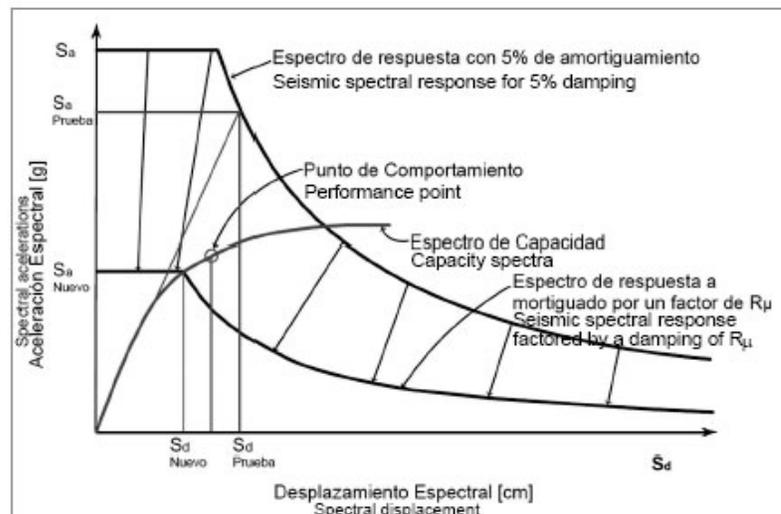
Una vez realizado este procedimiento es posible definir el desplazamiento de fluencia y último (d_y , d_u respectivamente) tal como se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Curva de capacidad "Pushover", representación bilineal (Adaptada de [46])



Posteriormente y según lo expuesto en el ATC-40 para este método, se procede a reducir el espectro de demanda, considerando un comportamiento estructural intermedio (Tipo B) e interceptarlo con la curva de capacidad de la edificación, hasta lograr igualar la demanda con la capacidad y obtener de esta manera el punto de comportamiento para edificación analizada (Figura 52).

Figura 52. Método del espectro de capacidad (performance point)



Para tal fin se emplea un hoja de cálculo programada [16] donde se realiza de manera automática dicho procedimiento.

La hoja de cálculo consiste de una serie de macros que siguen de manera secuencial los procedimientos dados en el ATC-40; donde se ingresa en coordenadas espectrales la curva de capacidad o pushover extraída del análisis no lineal realizado en SAP2000 y el espectro elástico de demanda definido. La hoja inicialmente realiza la iteración buscando igualar el área de la curva original de capacidad con la curva bilineal hasta un criterio de aceptación (menor del 1%). Posteriormente aplica la reducción del espectro de demanda hasta igualar de manera similar el área de capacidad con la demanda y encontrar de esta manera el punto de comportamiento en coordenadas espectrales. Una vez obtenido el punto de comportamiento de la edificación, el siguiente proceso que ejecuta la hoja, es tomar el punto de comportamiento y con base en los niveles de daño establecidos por la metodología WP4 (Ver numeral 5.2), procede a determinar los niveles de daño con base en el rango en el cual se encuentre la edificación en el punto de comportamiento (Leve, moderado, severo y colapso) asignado el valor porcentual respetivo. Un bosquejo general de la hoja se observa en la Figura 53.

Figura 53. Hoja de cálculo para el cálculo del punto de comportamiento y daño.

Curva Pushover		PARÁMETROS DE LA CURVA					LINEALIZACIÓN DEL ESPECTRO		Tipo de Comportamiento estructural	
Sd (cm)	Sa (g)	m	Area Curva	Vy1	V	D	m	b		
0.0000	0.0000	6.25308122	0.23842078	0.0306	0	0			B	
0.0049	0.0306						Linea 1	6.27789699	-5.5511E-17	
0.0097	0.0613						Linea 2	5.22228831	0.1453804	
0.0146	0.0920									
0.0195	0.1228									
0.0243	0.1533									
0.0292	0.1840									
0.0341	0.2146									
0.0390	0.2453									
0.0438	0.2759									
0.0487	0.3066									
0.0536	0.3372									
0.0584	0.3678									
0.0633	0.3983									
0.0682	0.4288									
0.0730	0.4592									
0.0779	0.4895									
0.0828	0.5198									
0.0876	0.5500									
0.0925	0.5802									
0.0973	0.6104									
0.1022	0.6405									
0.1071	0.6705									

Curva de Capacidad - Representación Bilineal		
Area Curva Pushover	Area Bilineal	Error (%)
0.459485197	0.457622182	0.40545703

Curva Bilineal	
d(cm)	V(Sa)
0	0
1.2107808	0.191852611
2.067172	0.4002

Sd Max SaMax	
0.4002	2.067172

Area Bilineal Error	
0.234367745	0.86838282

Niveles de Daño (WP4)	
Duy	
Leve	0.052088647
0	0.134298827
4	0.134298827
Moderado	0
0	0.191852611
4	0.191852611
Severo	0
0	0.243939458
4	0.243939458
Colapso	0
0	0.4002
4	0.4002

CALCULAR DAÑO

Ésta hoja de cálculo programada se emplea en los diferentes modelamientos realizados en el Capítulo 5, para la obtención de las curvas bilineales, los puntos de comportamiento y el daño global de las edificaciones.

5.2 EVALUACIÓN DEL DAÑO GLOBAL EN LAS EDIFICACIONES

Para la definición del daño se utilizó la metodología WP04 “vulnerabilidad de edificaciones existentes” propuesto por el equipo RISK EU (Milutinovic y Trendafiloski, [50]), aplicable a entornos urbanos, la cual posee dos aproximaciones: LM1 para cuando no existen estudios detallados de sismicidad y el LM2 cuando se poseen estudios detallados de micro sismicidad expresados en términos de cuantificación de espectros para sitios específicos en función de aceleración espectral, velocidad espectral, o desplazamiento espectral.

El método utiliza la modelación analítica de la estructura para evaluar el comportamiento de la misma (capacidad) y una adecuada representación de la acción esperada (o demanda), con la finalidad de cuantificar el daño potencial del edificio como resultado de una acción esperada. En esta investigación se toma la acción como el correspondiente al espectro elástico de respuesta definido en el numeral 5.1.1.3.

El modelo de capacidad, o la curva de capacidad (o Pushover) es la relación de fuerza contra el desplazamiento de la estructura, con el cual se estima la respuesta máxima esperada del edificio ante una demanda determinada. Los modelos de capacidad son desarrollados para representar el primer modo de vibración de la edificación suponiendo que este es el modo predominante y es el que prima en el inicio y en el desarrollo del daño.

Las curvas de capacidad son basadas en parámetros de ingeniería (diseño, fluencia y nivel último de esfuerzo) que caracterizan el comportamiento no lineal de los modelos de cada tipo de edificación. Se distinguen entre estos parámetros

los materiales de construcción, las prácticas constructivas, la experiencia y la tecnología usada, y si fue aplicada y es vigente la norma de diseño sísmico.

La amplitud y la frecuencia contenida en la excitación sísmica controlan el máximo nivel de respuesta o de comportamiento de la edificación. El método del WP4, igualmente que el procedimiento FEMA/NIBS [50], expresa la entrada sísmica en términos del espectro de demanda y se basa en un amortiguamiento del 5% por el espectro de respuesta modificado por el sitio para tener en cuenta el comportamiento estructural fuera del dominio elástico, o alternativamente, el análogo espectro de respuesta inelástico.

La representación de las dos curvas, de capacidad (pushover) y el espectro de demanda se realizan en el sistema de coordenadas de aceleración espectral (S_a , ordenada) y desplazamiento espectral (S_d , abscisa). El formato de representación se refiere al ADRS (Aceleración Desplazamiento Espectro de Respuesta).

Luego la metodología utilizada y basada en el WP4 para determinar el daño fue:

- a)** Selección de un modelo dependiente de la tipología estructural que represente adecuadamente la edificación o el grupo característico de edificaciones (material de construcción, sistema estructural, altura, nivel de diseño esperado o identificado y nivel de comportamiento, etc.),
- b)** Construcción de la curva de capacidad de cada casa o edificación modelada.
- c)** Determinación del espectro elástico de demanda.
- d)** Definición de los niveles y rangos de daño, ver el siguiente numeral.

e) Cálculo del punto de comportamiento, a partir de la metodología propuesta por el ATC-40.

f) Determinación del daño, a partir de los rangos definidos en el punto d).

5.2.1 Niveles y rangos de daño

La estructura conceptual del método se basa, en general, en el FEMA/NIBS [50] implementada en el Hazus, en el cual se utilizan 4 grados o estados de daño: Menor, Moderado, Severo y Colapso, reconociendo el estado de No Daño de la edificación con el termino Ninguno, ver Tabla 15.

Tabla 15. Grado de daño e Índice de pérdidas (Tomado de [50, 16]).

GRADO DE DAÑO		DESCRIPCIÓN
0	Ninguno	No daño
1	Menor	Daño insignificante a leve
2	Moderado	Daño estructural leve, daño no estructural moderado
3	Severo	Daño estructural moderado, daño no estructural fuerte
4	Colapso	Daño estructural muy fuerte, colapso o cerca del colapso.

✓ **Para la mampostería:** Se toma los estados definidos por el método AUTH del WP4 [50], de la siguiente manera (Tabla 16):

Tabla 16. Estados definidos método AUTH del Wp4 (Tomado de [50, 16]).

GRADO DE DAÑO	DEFINICIÓN	ÍNDICE DE DAÑO
0	No daño	0
1	Daño leve	0-5
2	Daño moderado	5-20
3	Daño severo	20-50
4	Colapso	50-100

Para las edificaciones de mampostería no reforzada, los estados de daño se expresan en función de los desplazamientos en la parte superior del techo, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Estados de daño y desplazamientos límites en edificaciones de mampostería sin reforzar. (Tomado de [50, 16]).

GRADO DE DAÑO	DEFINICIÓN	DESPLAZAMIENTOS LÍMITES
0	No daño	$<0.7\Delta y$
1	Daño leve	$0.7\Delta y < \Delta < 0.7\Delta y + 5(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100$
2	Daño moderado	$0.7\Delta y + 5(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100 < \Delta < 0.7\Delta y + 20(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100$
3	Daño severo	$0.7\Delta y + 50(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100 < \Delta < 0.7\Delta y + 100(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100$
4	Colapso	$0.7\Delta y + 50(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100 < \Delta < 0.7\Delta y + 100(0.9\Delta u - 0.7\Delta y)/100$

Donde:

Δ : Desplazamiento en la parte superior de la edificación

Δy : Desplazamiento de fluencia

Δu : Desplazamiento último

Con base en esta metodología, se evalúa el daño en cada edificación en función de la irregularidad estudiada (Aberturas y Confinamientos Parciales), construyendo finalmente curvas de daño que establecen la relación entre el nivel de presencia de la irregularidad en una edificación de mampostería confinada y su correspondiente incidencia en la respuesta resistente de la estructura medida en términos de daño porcentual.

5.3 SELECCIÓN DE LA CASA TIPO

Se seleccionó una edificación representativa de una de las comunas de la ciudad de Bucaramanga (Comuna 11), para garantizar una distribución arquitectónica y estructural típica de la región, sobre la cual realizar las variaciones respectivas propias del análisis paramétrico planteado.

5.3.1 Descripción general.

La estructura tipo es una edificación de un nivel, con proyección de construir un segundo, por consiguiente su cubierta corresponde a una placa compuesta por viguetas y a una losa de concreto. Esta edificación fue construida en el sistema estructural de mampostería confinada.

La edificación cuenta con un área de 60.85m² habitables, desarrollada en sala, comedor, cocina, dos cuartos y un baño. En la parte final de la casa existe un espacio habilitado para un patio intermedio y para construir dos cuartos adicionales. Los elementos de refuerzo de las columnetas fueron dejados para que los propietarios pudieran levantar un piso más conservando la distribución

Figura 55. Fachada frontal edificación tipo



5.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A CONSIDERAR EN EL MODELADO

Las propiedades para los materiales que conforman la mampostería se establecieron con base a lo tratado en el capítulo 4, las ecuaciones dadas en el capítulo 1 y con el fin de analizar el caso en el cual la edificación cumpla con los requisitos mínimos estipulados por la norma NSR-10 en términos de calidad de los materiales, se tomaron los valores de resistencia mínima permitida (Concreto, Morteros y bloques). De igual modo, considerando que el análisis se realiza a edificaciones existentes, se aplican los factores de reducción de resistencia φ_c y φ_e considerando un estado por calidad y resistencia de tipo “regular” (Tabla 19).

$$R_{efectiva} = R\varphi_c\varphi_e$$

Donde:

$R_{efectiva}$: Resistencia efectiva reducida

R : Resistencia considerada (Concretos, morteros y bloques)

φ_c : Coeficiente de reducción de resistencia por calidad del diseño y construcción de la estructura.

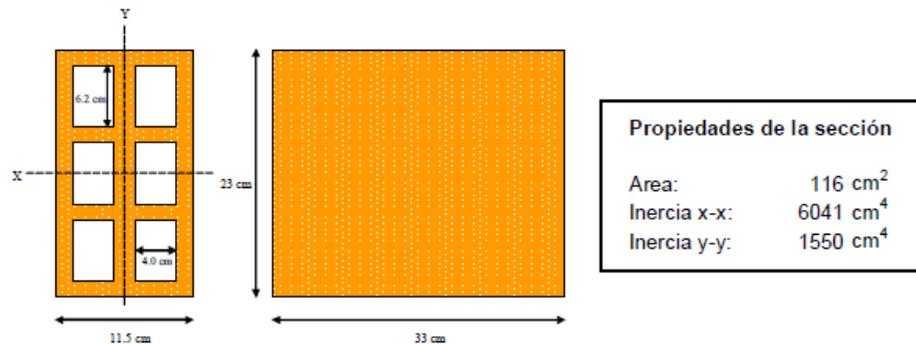
φ_e : Coeficiente de reducción de resistencia por estado de la estructura.

Tabla 19. Valores de φ_c y φ_e (Tomado de [1])

	Calidad del diseño y la construcción, o del estado de la edificación		
	Buena	Regular	Mala
φ_c o φ_e	1.0	0.8	0.6

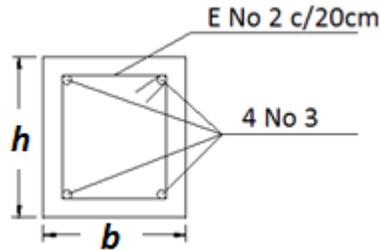
- ✓ Para el mortero de pega se considera un tipo N ($f'_{cp} = 125 \text{ Kg/cm}^2$) y el bloque considerado para los muros es de arcilla con perforación horizontal ($f'_{cu} = 40 \text{ Kg/cm}^2$), cuyas dimensiones se observan en la Figura.

Figura 56. Dimensiones Bloque H10 (Tomado de [37])



- ✓ Para el concreto se consideró una resistencia típica de $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$.
- ✓ Para el acero de refuerzo, se tomaron los valores mínimos dados por la norma NRS-10 para elementos confinantes (4 Varillas de acero No 3 para refuerzo longitudinal y acero No 2 para refuerzo transversal). Ver Figura 57.

Figura 57. Sección transversal y aceros de refuerzo considerados para elementos confinantes (Fuente: Autor)



Otros parámetros y las resistencias efectivas reducidas y valores definitivos considerados en los modelos se muestran en la Tabla 20

Tabla 20. Propiedades de los materiales tomadas para los elementos confinantes de concreto y de la mampostería

PROPIEDADES ELEMENTOS CONFINANTES			PROPIEDADES MUROS DE MAMPOSTERÍA		
f'_c	140	Kg/cm^2	f'_{cp}	4.8	Kg/cm^2
E_c	200000	Kg/cm^2	f'_{cu}	2.56	Kg/cm^2
f_y	4200	Kg/cm^2	f'_m	15	Kg/cm^2
			f'_v	0.60	Kg/cm^2
			E_{me}	11200	Kg/cm^2
			t	10	(cm)

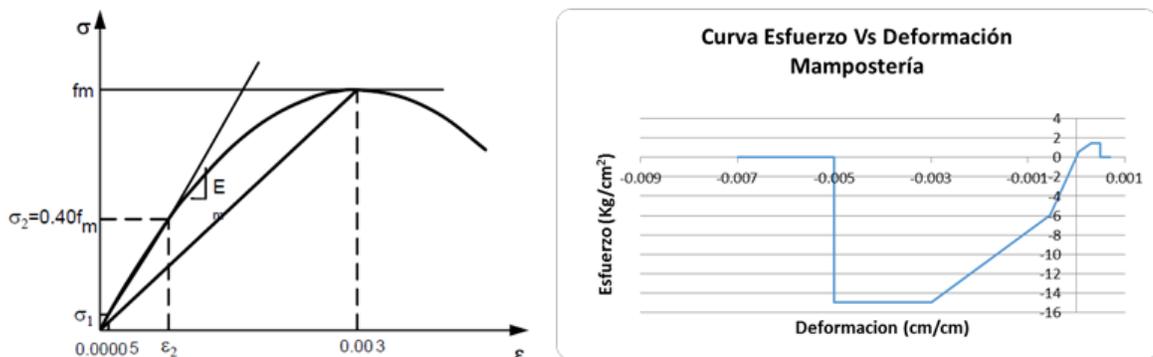
Para la obtención de las curvas de capacidad de las casas, es necesario incluir la no linealidad de los materiales en el software en términos de su respectiva curva

esfuerzo Vs deformación, para lo cual se establecen las siguientes curvas simplificadas a considerar en todos los modelos:

Para el concreto se toma como curva esfuerzo vs deformación el modelo de Mander, el cual se incluye en el software SAP2000 por defecto.

En el caso de la mampostería, se tomó el modelo linealizado de curva Esfuerzo Vs Deformación expuesto en [55] y trabajado en el grupo DEPMI-UNAM.

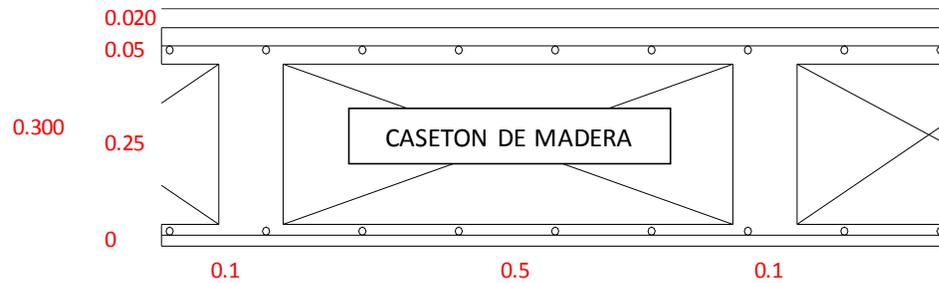
Figura 58. (a) Curva esfuerzo Vs deformación de la mampostería con f'_m [kg/cm²]= 15, (b) Modelo Linealizado DEPMI-UNAM (Adaptado de [55])



Tomando como base los valores dados por la Norma NSR-10; siendo la resistencia a la compresión de 15 Kg/cm², el módulo de elasticidad como $750 \cdot f'_m$ para mampostería en arcilla y un valor de distorsión para cuando se alcanza f'_m de 0,003 [8-55]. Ver Figura 58 (a) y Figura 58 (b)

Se asumieron las cargas muertas y vivas típicas para una edificación de uso residencial, con placa aligerada acorde a lo estipulado en el Capítulo B de la NSR-10. Ver Figura 59.

Figura 59. Losa aligerada para casas de uno y dos pisos (Fuente: Autor)



En la Tabla 21 se resumen las cargas muertas y vivas consideradas que fueron incluidas en los modelos.

Tabla 21. Carga muerta y viva impuesta a las edificaciones

EVALUACIÓN DE CARGAS PLACA DE ENTREPISO (ALIGERADA)		
Placa superior	1.20	KN/m^2
Placa inferior	0.00	KN/m^2
Nervio	1.00	KN/m^2
Aligeramiento (Madera)	0.30	KN/m^2
Mortero superior	0.42	KN/m^2
Acabados	1.10	KN/m^2
Muros	0.50	KN/m^2
CM	4.52	KN/m^2
CV	1.8	KN/m^2

5.5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO PRESENCIA DE ABERTURAS EN SU MUROS PORTANTES. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En esta sección se presenta el análisis para edificaciones de uno y dos pisos de mampostería confinada, considerando el efecto de las aberturas, aplicando el procedimiento estático no lineal, siguiendo la secuencia descrita en el numeral 5.1. Para tal fin y partiendo de la casa tipo descrita, se proceden a definir edificaciones hipotéticas, variando el porcentaje de aberturas global presente en la misma. Para ello, se emplean dos métodos de modelamiento: modelamiento por el método de elementos finitos (elementos tipo Shell) y por el método del puntal equivalente (Ver numeral 5.6).

5.5.1 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de dos (2) pisos.

Tomando como punto de referencia la casa original con sus aberturas, se proceden a variar gradualmente generando modelos hipotéticos, teniendo como criterio el mantener la funcionalidad de cada edificación generada dentro del uso residencial original.

Lo anterior implica que las aberturas consideradas, garanticen los accesos y espacios mínimos necesarios para que el modelo conserve una distribución arquitectónica coherente y propia de una estructura de uso residencial.

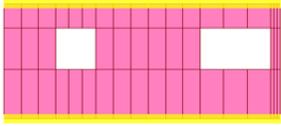
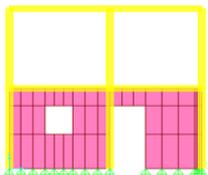
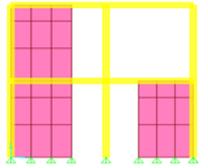
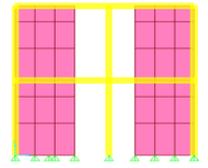
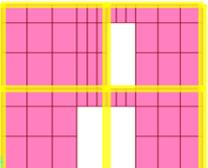
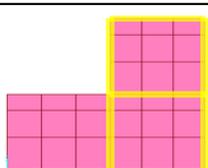
5.5.1.1 Modelos hipotéticos.

Se modeló inicialmente la casa original incluyendo el segundo nivel proyectado con las aberturas medidas directamente del levantamiento de la misma, dando como resultado un porcentaje global de aberturas del 17% medido como la relación entre área total de muros confinados (Tanto en dirección XZ como YZ) sobre áreas totales de aberturas.

Para ellos se analizaron de manera individual los muros que hacen parte del sistema resistente, considerando la presencia de aberturas producto de puertas y/o ventanas y se muestran en la Tabla 22.

A manera de ejemplo se detallarán las aberturas en la casa original, para ver en detalle la ubicación de las aberturas en los casos hipotéticos ver Anexo 1.

Tabla 22. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección XZ casa original (% aberturas= 17%)

Muros Confinados Dirección (XZ)		Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
M1xP1		M1xP1	15.40	2.20	14.29%
M2xP1 M2xP2		M2xP1 M2xP2 M2xP3 M2xP4	8.06 8.06 7.36 7.36	8.06 0.70 7.36 2.20	100.00% 8.68% 100.00% 29.88%
M3xP1 M3xP2		M3xP1 M3xP2 M3xP3 M3xP4	8.06 8.06 7.36 7.36	2.80 2.80 2.80 2.80	34.72% 34.72% 38.02% 38.02%
M4xP1 M4xP2		M4xP1 M4xP2 M4xP3 M4xP4	8.06 8.06 7.36 7.36	2.94 2.94 2.24 2.24	36.46% 36.46% 30.42% 30.42%
M5xP1 M5xP2		M5xP1 M5xP2 M5xP3 M5xP4	8.06 8.06 7.36 7.36	0.00 1.76 1.76 1.76	0.00% 21.83% 23.90% 23.90%
M6xP1 M6xP2		M6xP1 M6xP2 M6xP3	7.36 8.06 7.36	0.00 0.00 0.00	0.00% 0.00% 0.00%

En esta tabla se observan las aberturas de la casa original en dirección XZ, la cual corresponde al sentido débil de la edificación y sobre el cual se realizará el análisis no lineal. Para facilidad de control y cálculo de las aberturas en los muros, se toma el muro completo y se subdividen por paneles confinados; por ejemplo, **M1xP1** corresponde al muro No 1 o de fachada en la dirección X, panel No. 1. (Ver Tabla 23)

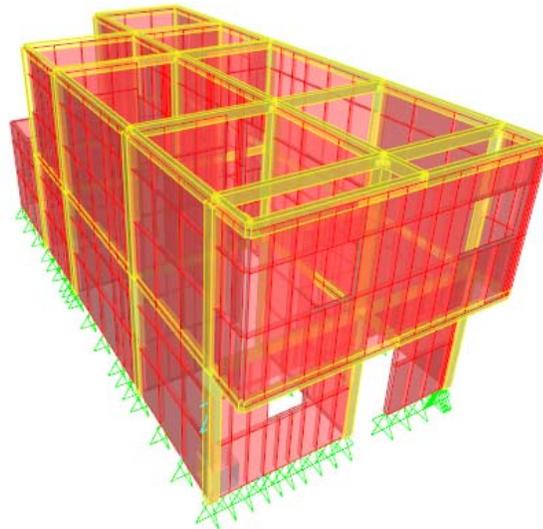
Tabla 23. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección YZ casa original (% aberturas= 17%)

Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M1yP1	7.81	0.00	0.00%
	M1yP2	10.92	0.00	0.00%
	M1yP3	6.86	0.00	0.00%
	M1yP4	7.84	0.00	0.00%
	M1yP5	7.81	0.00	0.00%
	M1yP6	10.92	0.00	0.00%
	M1yP7	6.86	0.00	0.00%
	M1yP8	7.84	0.00	0.00%
	M2yP1	7.81	0.00	0.00%
	M2yP2	10.92	4.18	38.28%
	M2yP3	6.86	0.00	0.00%
	M2yP4	7.84	0.00	0.00%
	M2yP5	7.81	0.00	0.00%
	M2yP6	10.92	4.18	38.28%
	M2yP7	6.86	4.59	66.94%
	M2yP8	7.84	0.00	0.00%
	M2yP1	7.81	0.00	0.00%
	M2yP2	10.92	0.00	0.00%
	M2yP3	6.86	0.00	0.00%
	M2yP4	7.81	0.00	0.00%
	M2yP5	10.92	0.00	0.00%
	M2yP6	6.86	0.00	0.00%

De manera similar se procedió a definir los porcentajes de abertura en la dirección YZ o sentido fuerte de la misma, empleando igual sistema de nomenclatura por cada panel confinado identificado Ver Tabla. Complementario a estos posibles casos definidos, se modelaron los casos extremos donde la edificación presentara un porcentaje nulo de aberturas y el caso donde las aberturas fueran del 100% (Ausencia de muros de mampostería).

El modelo 3D mediante elementos tipo Shell (Para mauros de mampostería) y frame (para columnas y vigas de confinamiento) en el software SAP2000 para el modelo original se presenta en la Figura 60.

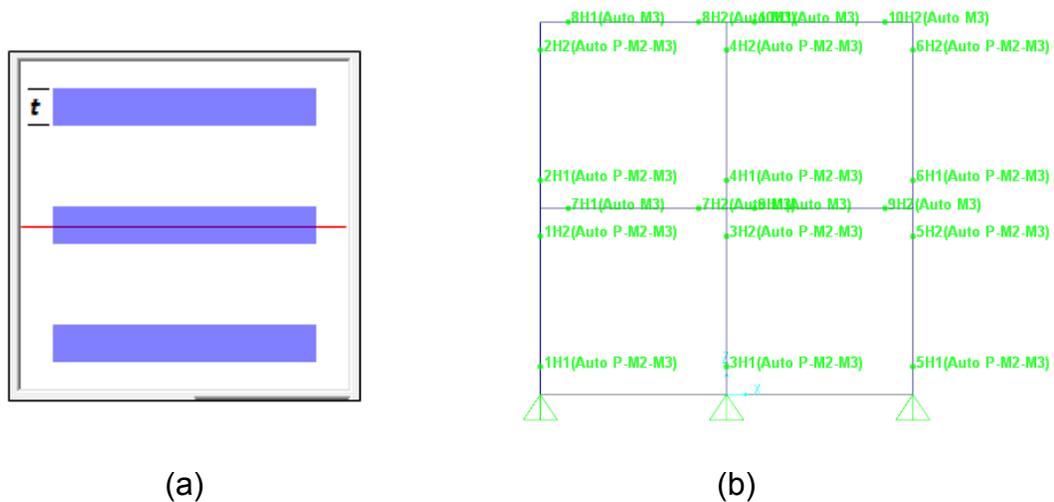
Figura 60. *Modelo 3D Casa Original (% Aberturas= 17%)*



Para considerar los efectos de emplear ladrillos de perforación horizontal, las secciones de los muros de trabajaron empleando el sistema de capas o layers, que permite manejar el software SAP2000 en los elementos tipo Shell, simulando solamente las paredes efectivas del ladrillo ($t=1.3\text{cm}$) y separando dichas capas una distancia igual al tamaños de las perforaciones.

La Figura 61(a), representa el sistema tricapa empleado en la sección de los muros de mampostería para tener en cuenta el efecto de las perforaciones horizontales.

Figura 61. (a) Sección de muros representada como capas de espesor igual a 1.3cm, (b) Rótulas plásticas en elementos de confinamiento

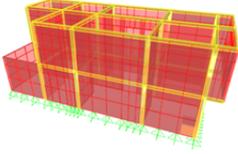
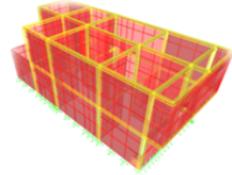
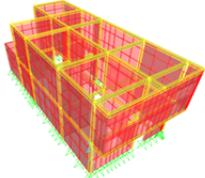
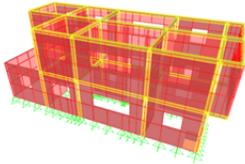
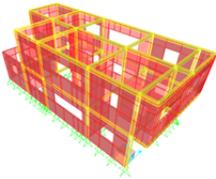
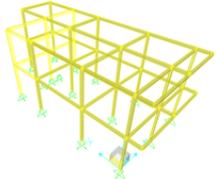


Así mismo, el mallado de los muros, se realizó buscando un mínimo de 5x5 elementos por panel, dado que, en pruebas realizadas con muros, se encontró que para particiones a partir de 4x4 en adelante para paneles con alguna de sus dimensiones (Base o altura) no mayores a 3m, los esfuerzos tienden a estabilizarse comparado como particiones más refinadas que no compensan el mayor costo computacional en análisis globales. [51].

Para los elementos tipo “frame” vigas y columnas de confinamiento, se asignan rótulas con base a las Tablas 6-7 y 6-8 del FEMA-356 [35] respectivamente para momento en el caso de las vigas y para carga axial y momento en el caso de las columnas, localizadas en los extremos de los elementos. La distribución y tipos de rótulas asignadas pueden verse en la Figura 61 (b).

En la Tabla 24 se presenta el gráfico con los diferentes modelos hipotéticos generados partiendo de las irregularidades de la casa tipo. Para ver en detalle los paneles perforados para ambas direcciones pueden consultarse el Anexo 1.

Tabla 24. Modelos 3D Considerados la variación del parámetro en aberturas para el análisis de casas de dos pisos.

Edificación	Modelo	Área Total Muros Confinados (m ²)	Área Total de Aberturas (m ²)	% Global De Aberturas
Hipotética		346.53	0.00	0.00%
Real		346.53	60.32	17.41%
Hipotética		346.53	107.42	31.00%
Hipotética		346.53	145.54	42.00%
Hipotética		346.53	190.59	55.00%
Hipotética		346.53	346.53	100.00%

5.5.1.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.

Con base en lo expuesto en el numeral 5.1.1.1 se procedió a fijar un desplazamiento objetivo de aproximadamente el 1% de la altura del piso. Éste valor variaba según la rigidez del modelo, pero por lo general para edificaciones de dos pisos estuvo alrededor de 2cm a 2.5 cm. Acorde a lo anterior e implementando las propiedades de los materiales definidas anteriormente en el numeral 5.4, se procede a realizar un análisis de Pushover en el Software Sap2000 para cada uno de los modelos hipotéticos propuestos. Una vez obtenidas las curvas del software, se procede a realizar la representación bilineal de la misma, con el objeto de determinar el punto en cual se considera la estructura entra en fluencia (primer agrietamiento).

Las curvas de capacidad obtenidas y su representación bilineal se muestran a continuación.

Figura 62. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 00%)

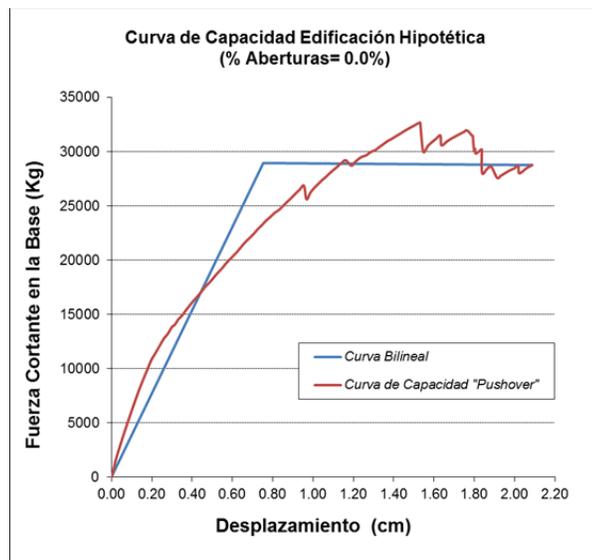


Figura 63. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 17%)

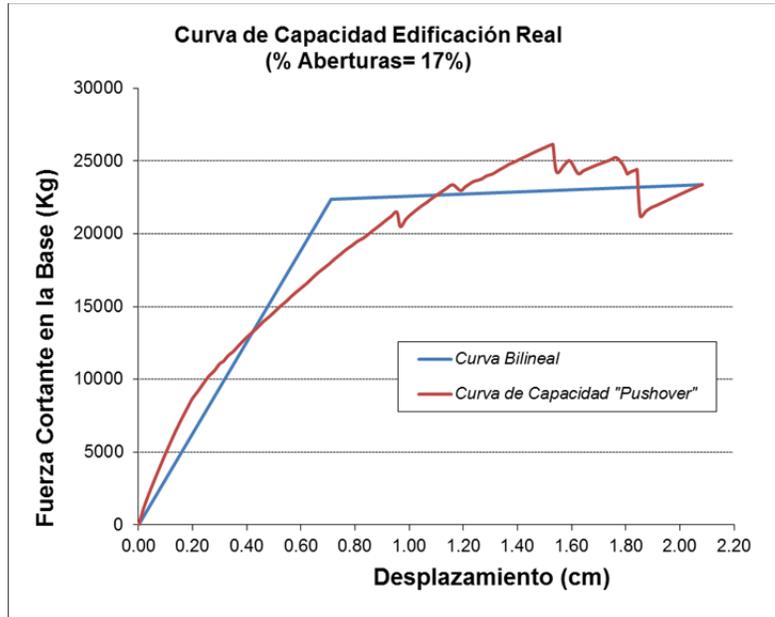


Figura 64. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 31%)

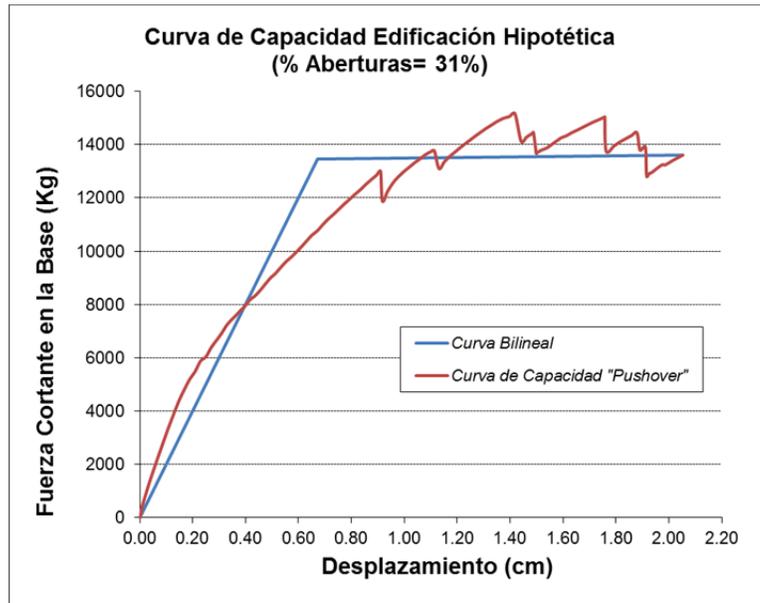


Figura 65. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 42%)

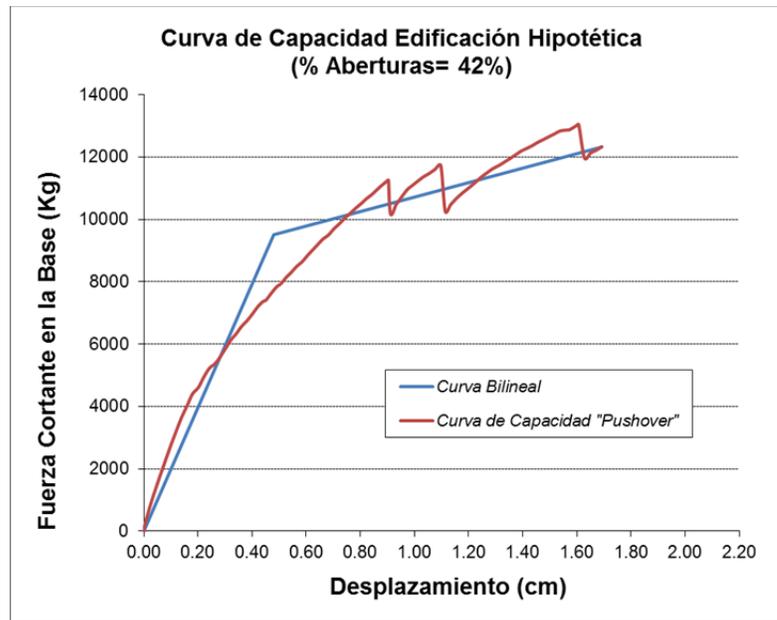


Figura 66. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 55%)

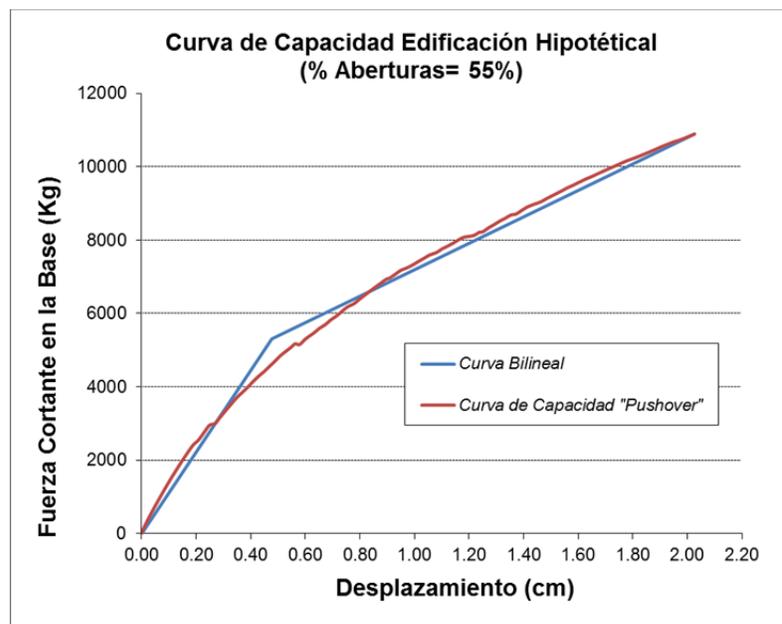
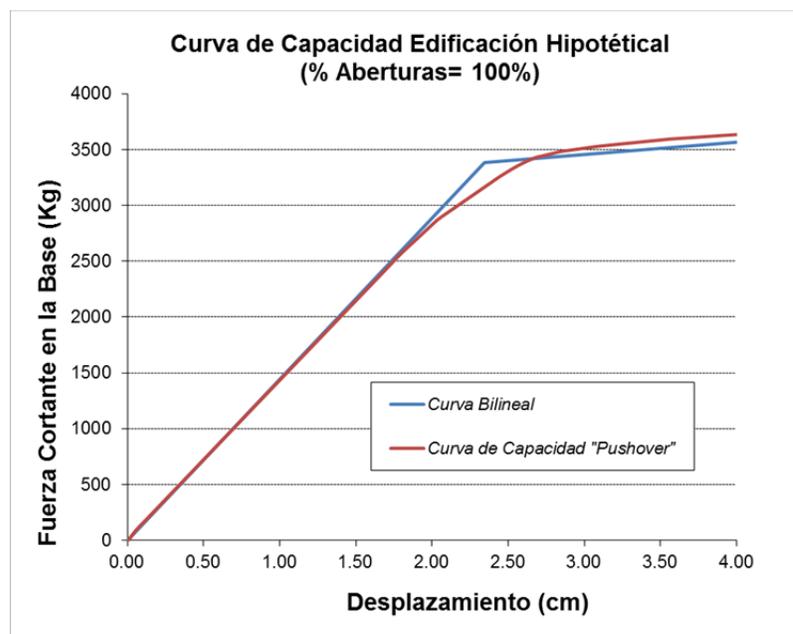


Figura 67. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 100%)



5.5.1.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en la edificación.

Como se mencionó anteriormente y acorde con el procedimiento expuesto en el numeral 5.1, y aplicando el método del espectro de capacidad, se emplea la hoja de cálculo descrita anteriormente.

Las siguientes figuras (Figura 68 a la Figura 73) muestran las curvas resultantes con la hoja de cálculo y la determinación de los puntos de comportamiento con los respectivos niveles de daño acorde a la metodología WP4. Cabe recalcar que los resultados mostrados corresponden al análisis realizado en el sentido débil de las edificaciones (Sentido XZ).

Figura 68. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)

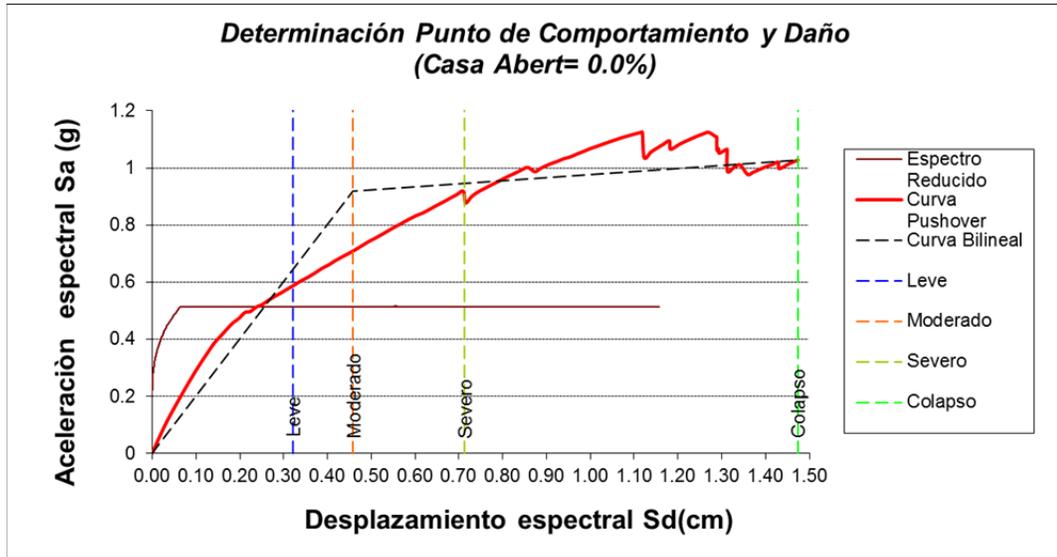


Figura 69. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 17%)

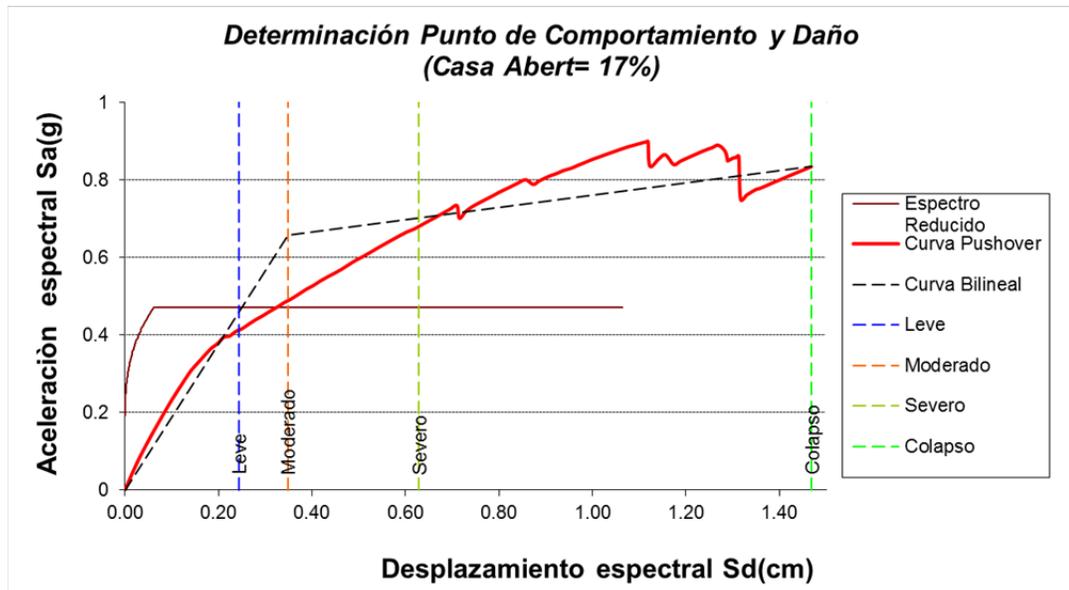


Figura 70. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 31%)

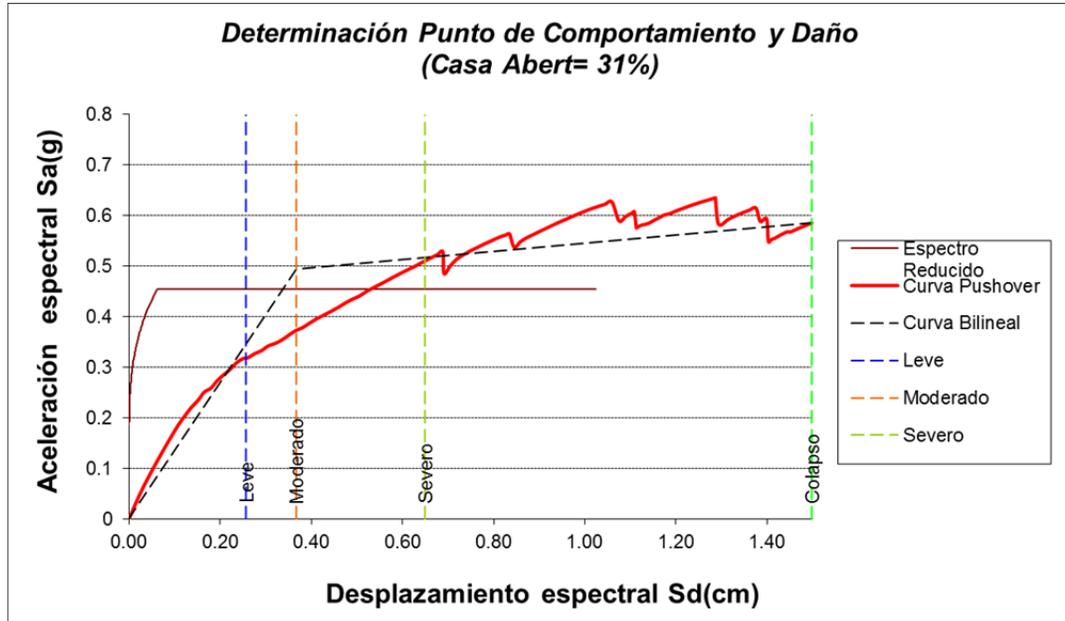


Figura 71. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 42%)

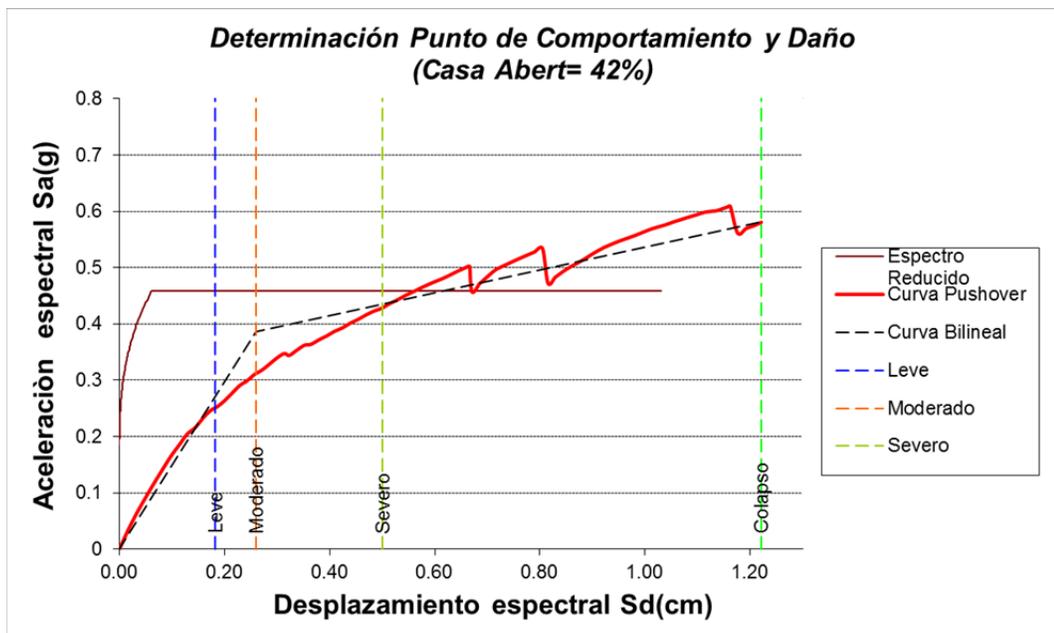


Figura 72. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 55%)

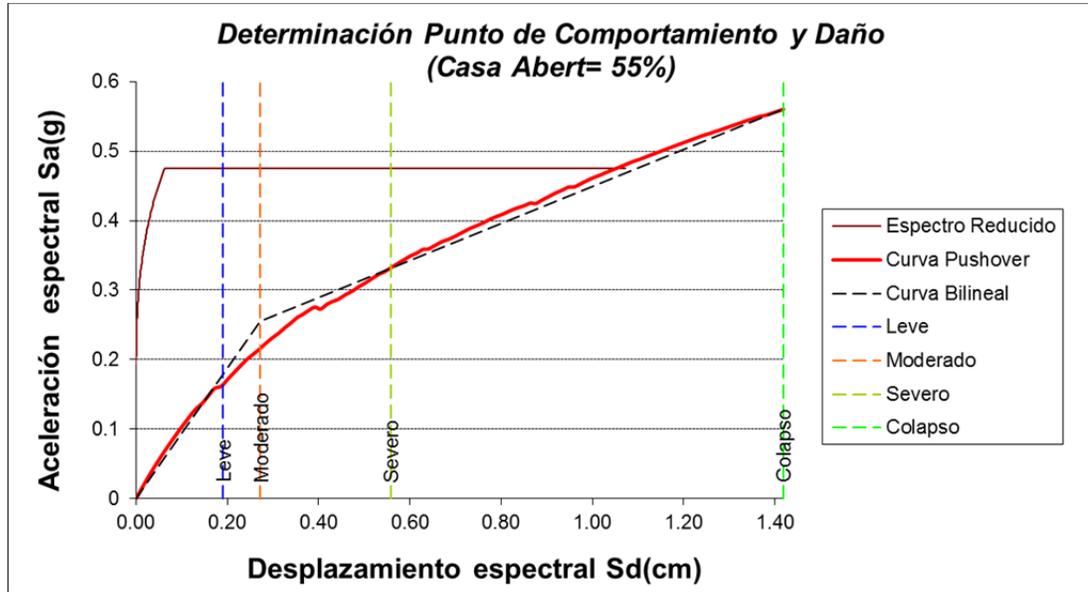
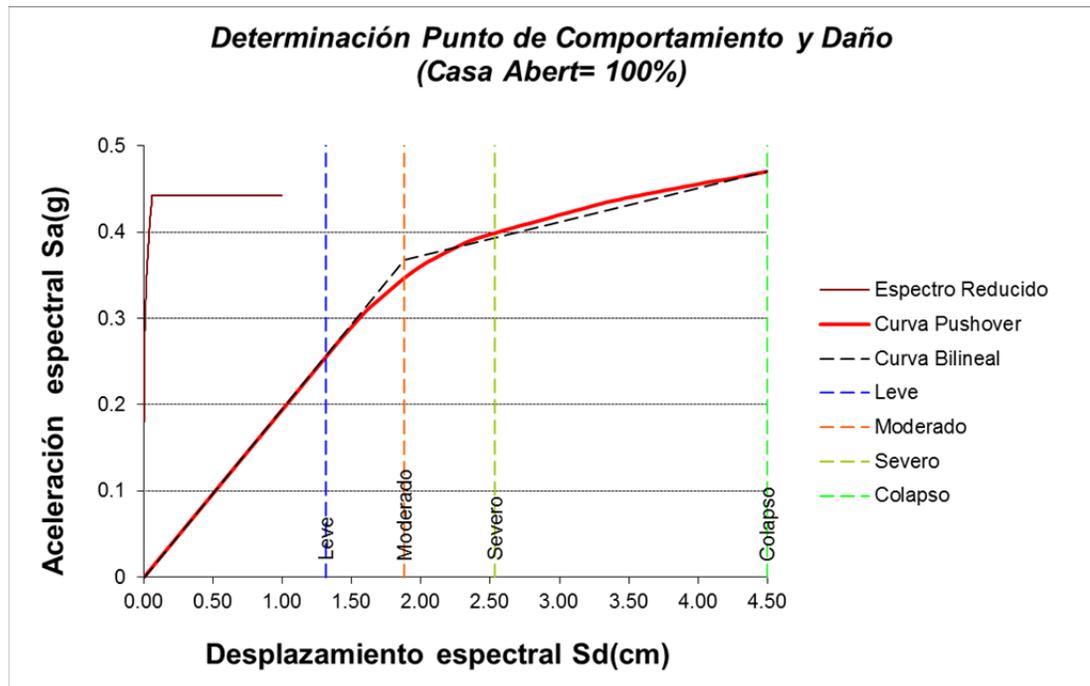


Figura 73. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%)



A partir de la iteración realizada y las gráficas obtenidas, se determinó en coordenadas espectrales el punto de comportamiento. En la Tabla 25 se muestran las coordenadas para cada una de las edificaciones y de igual modo los valores de periodo en el sentido débil (XZ) cortante y desplazamiento en el punto de comportamiento.

Tabla 25. *Puntos de comportamiento y valores de periodo en el sentido débil, de cortante y desplazamiento obtenidos, casas de dos pisos*

Punto de Comportamiento	Casas Analizadas					
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 17%	Casa Abert 31%	Casa Abert 42%	Casa Abert 55%	Casa Abert 100%
S_d (cm)	0.240	0.325	0.531	0.715	0.825	3.584
S_a (g)	0.512	0.591	0.653	0.561	0.540	0.442
V (Kg)	14549.60	13644.66	11200.41	10929.88	8079.59	3637.96
d (cm)	0.33	0.44	0.71	0.97	1.18	4.04
T_x (s)	0.10	0.12	0.13	0.13	0.19	0.45

De la tabla anterior se puede observar una clara reducción en los valores de resistencia global de las edificaciones en la medida que se aumenta el porcentaje de aberturas. Si tomamos como referencia la edificación real (con porcentaje de aberturas del 17%), se observa como un ligero incremento en las aberturas (casa con 31% de aberturas) puede generar una pérdida de resistencia de alrededor del 18%.

5.5.1.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.

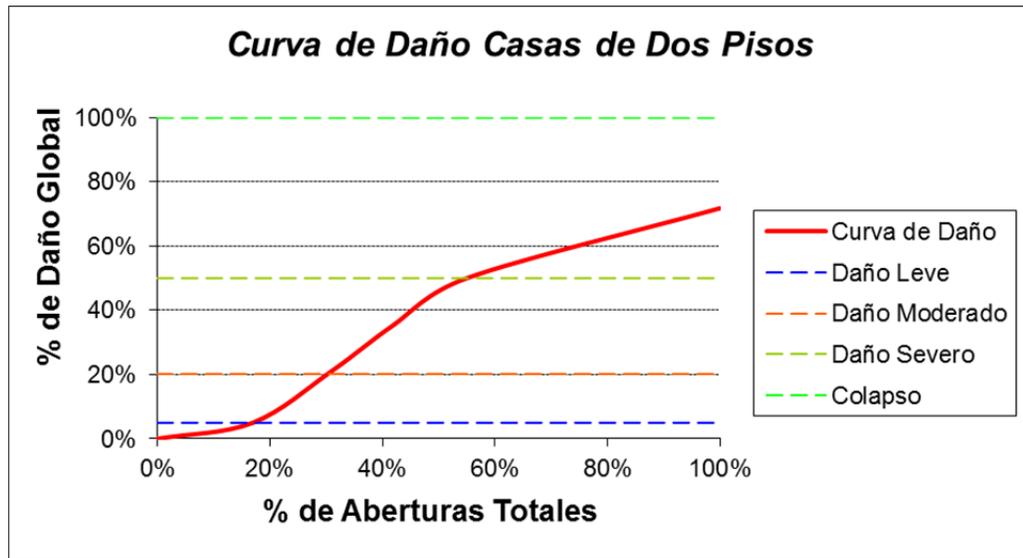
En la tabla siguiente, se presentan los niveles de daño obtenidos para cada edificación en el punto de comportamiento según la metodología WP4.

Tabla 26. *Niveles de daño para las casas analizadas casas de dos pisos*

Nivel de Daño	Casas Analizadas (% de Daño Global)					
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 17%	Casa Abert 31%	Casa Abert 42%	Casa Abert 55%	Casa Abert 100%
% de Daño	0%	5%	21%	35%	50%	72%
Nivel de Daño	Nulo	Leve	Severo	Severo	Severo	Colapso

A partir de los porcentajes daños mostrados en la Tabla 26 y obtenidos para cada casa considerada en función del parámetro de aberturas en sus muros confinados, se construye la curva de daño para edificaciones de dos pisos que se muestra en la Figura 74.

Figura 74. Curva de daño por aberturas para edificaciones de dos pisos



5.5.2 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de un piso.

De manera similar al caso de casas de dos pisos, a partir de la casa real, se proceden a variar gradualmente generando modelos hipotéticos, teniendo como criterio el mantener la funcionalidad de cada edificación generada dentro del uso residencial original.

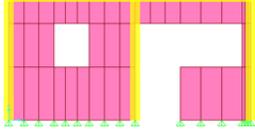
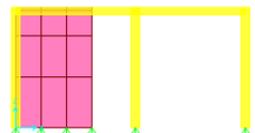
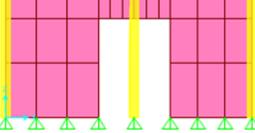
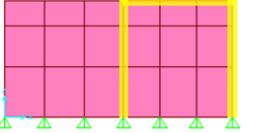
5.5.2.1 Modelos hipotéticos.

Se modeló inicialmente la casa original de un piso con las aberturas medidas directamente del levantamiento de la misma, dando como resultado un porcentaje global de aberturas del 15% medido como la relación entre área total de muros confinados (Tanto en dirección XZ como YZ) sobre áreas totales de aberturas,

para ellos se analizaron de manera individual los muros considerando la presencia de aberturas producto de puertas y/o ventanas y se muestran en la Tabla 4.

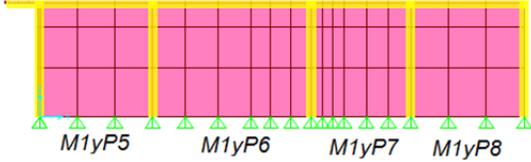
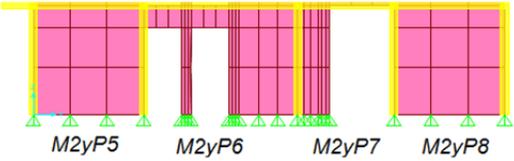
A manera de ejemplo se detallarán las aberturas en la casa original, para ver en detalle la ubicación de las aberturas en los casos hipotéticos ver Anexo 2.

Tabla 27. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección XZ casa original (% aberturas= 15%)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
 <p>M2xP2 M2xP4</p>	M2xP2 M2xP4	8.064 7.364	8.064 3.7896	100.00% 51.46%
 <p>M3xP2 M3xP4</p>	M3xP2 M3xP4	8.064 7.364	3.234 7.364	40.10% 100.00%
 <p>M4xP2 M4xP4</p>	M4xP2 M4xP4	8.064 7.364	8.064 7.364	100.00% 100.00%
 <p>M5xP2 M5xP4</p>	M5xP2 M5xP4	8.064 7.364	3.762 3.762	46.65% 51.09%
 <p>M6xP2 M6xP3</p>	M5xP2 M5xP3	8.064 7.364	1.1 1.1	13.64% 14.94%

En la Tabla 27 se observan las aberturas de la casa original en dirección XZ, la cual al igual que en el caso de dos pisos, corresponde al sentido débil de la edificación y sobre el cual se realizará el análisis no lineal.

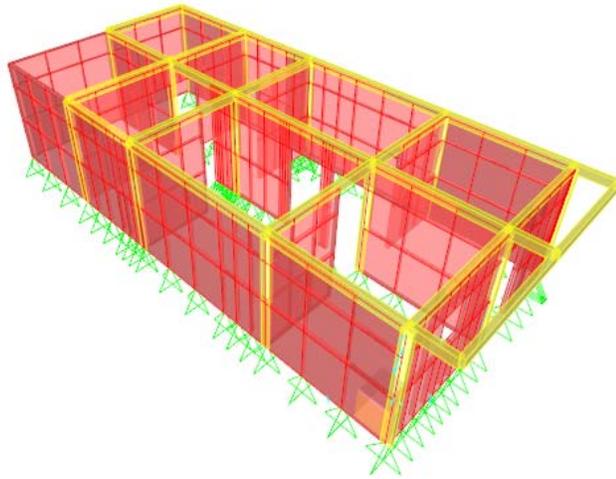
Tabla 28. Porcentaje de Aberturas por panel en dirección YZ casa original (% aberturas= 15%)

Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M1yP5 M1yP6 M1yP7 M1yP8	7.81 10.92 6.86 7.84	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00% 0.00% 0.00% 0.00%
	M2yP5 M2yP6 M2yP7 M2yP8	7.81 10.92 6.86 7.84	0.00 4.18 4.59 0.00	0.00% 38.28% 66.94% 0.00%
	M2yP4 M2yP5 M2yP6	7.81 10.92 6.86	0.00 0.00 0.00	0.00% 0.00% 0.00%

Complementario a estos posibles casos definidos, se modelaron los casos extremos donde la edificación presentara un porcentaje nulo de aberturas y el caso donde las aberturas fueran del 100% (Ausencia de muros de mampostería).

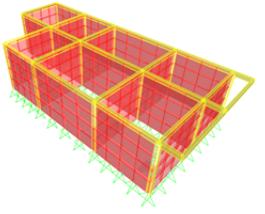
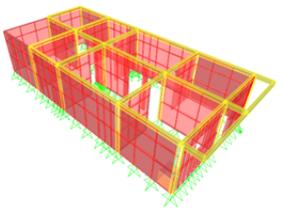
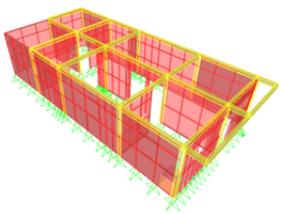
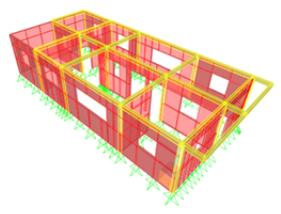
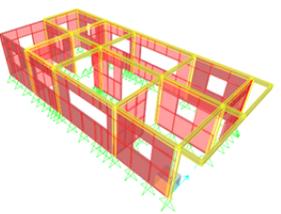
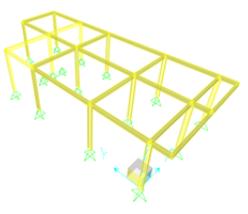
El modelo 3D empleando elementos tipo Shell en el software SAP2000, junto con el mallado elegido en función de las aberturas presentes, garantizando continuidad en los elementos finitos generados se presenta en la Figura 75

Figura 75. *Modelo 3D Casa Original (% Aberturas= 15%)*



En la Tabla 29 se presenta el gráfico con los diferentes modelos hipotéticos generados variando las irregularidades en aberturas de la casa tipo, incluyendo desde el caso extremo asumiendo que no existieran muros y el caso opuesto en el cual no existieran aberturas de ningún tipo en las edificaciones.

Tabla 29. Modelos 3D Considerados la variación del parámetro en aberturas para el análisis de casas de un piso.

Edificación	Modelo	Área Total Muros Confinados (m ²)	Área Total de Aberturas (m ²)	% Global De Aberturas
Hipotética		169.60	0.00	0.00%
Real		169.60	25.44	15.00%
Hipotética		169.60	44.09	26.00%
Hipotética		169.60	62.75	37.00%
Hipotética		169.60	84.80	50.00%
Hipotética		169.60	169.60	100.00%

5.5.2.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de un piso propuestas.

Con base en lo expuesto en el numeral 5.1 se procedió a fijar un desplazamiento objetivo de aproximadamente el 1% de la altura del piso. Éste valor variaba según la rigidez del modelo, pero por lo general para edificaciones de un piso está alrededor de 1cm a 1.5 cm, el desplazamiento a fijar. Empleando el mismo procedimiento que en el caso de casas de dos pisos, se procede a realizar un análisis de Pushover en el Software Sap2000 para cada uno de los modelos hipotéticos propuestos. Una vez obtenidas las curvas del software, se procede a realizar la representación bilineal de la misma y determinar los puntos de fluencia.

Las curvas de capacidad obtenidas y su representación bilineal para casas de un piso se muestran a continuación de la Figura 76 a la Figura 82.

Figura 76. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 00%)

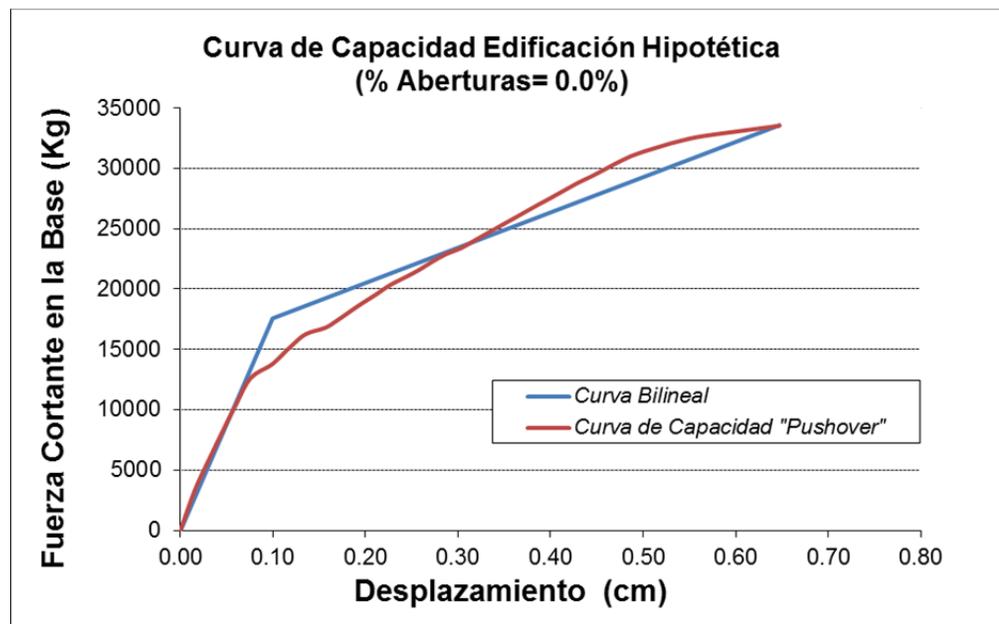


Figura 77. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 15%)

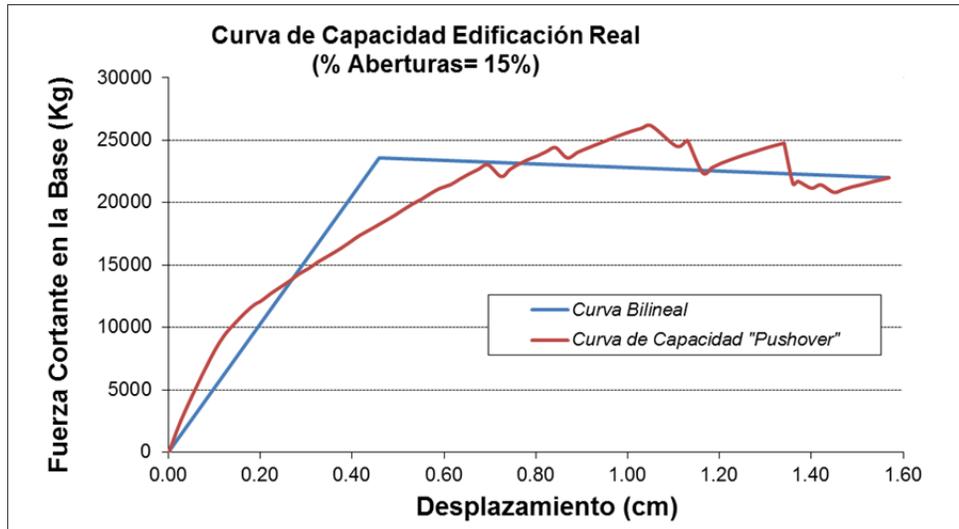


Figura 78. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 26%)

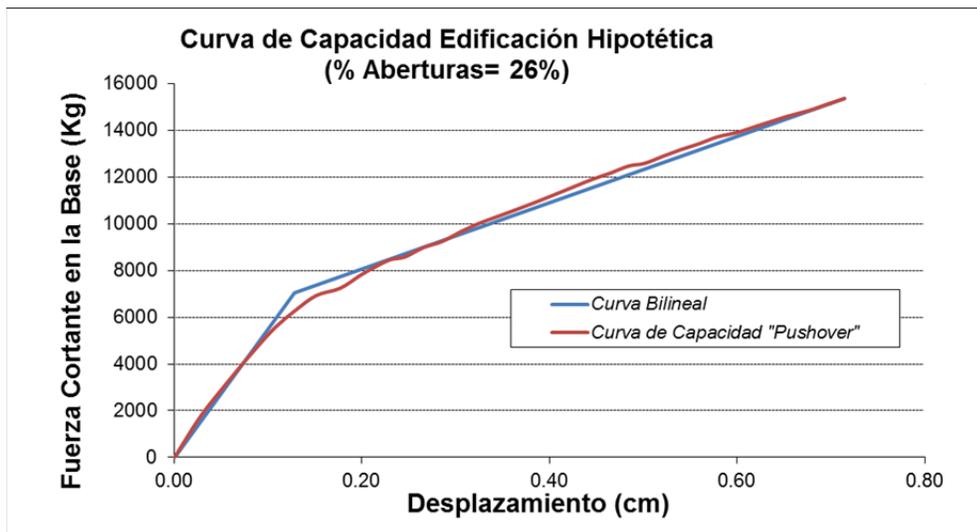


Figura 79. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 37%)

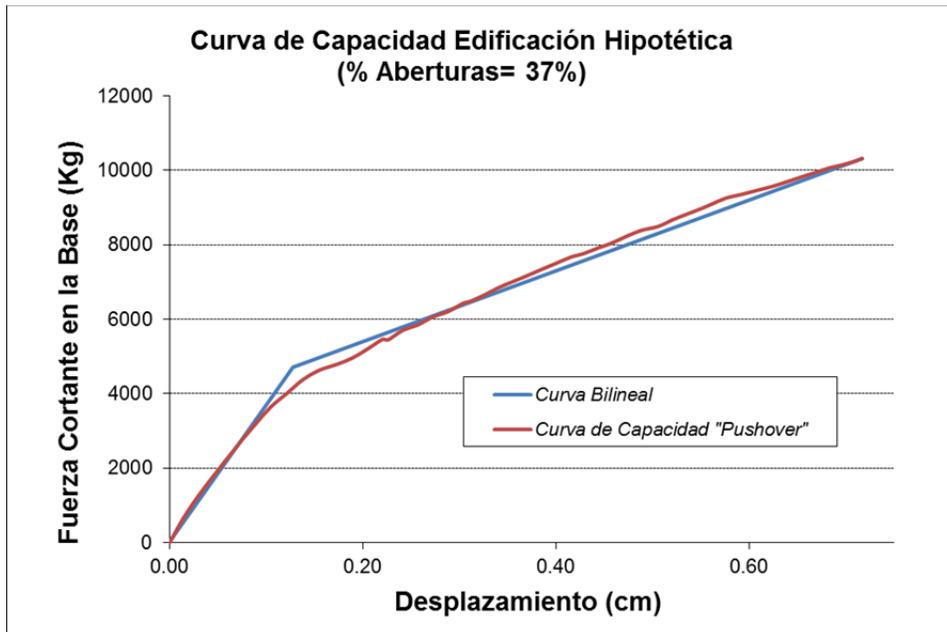


Figura 80. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 50%)

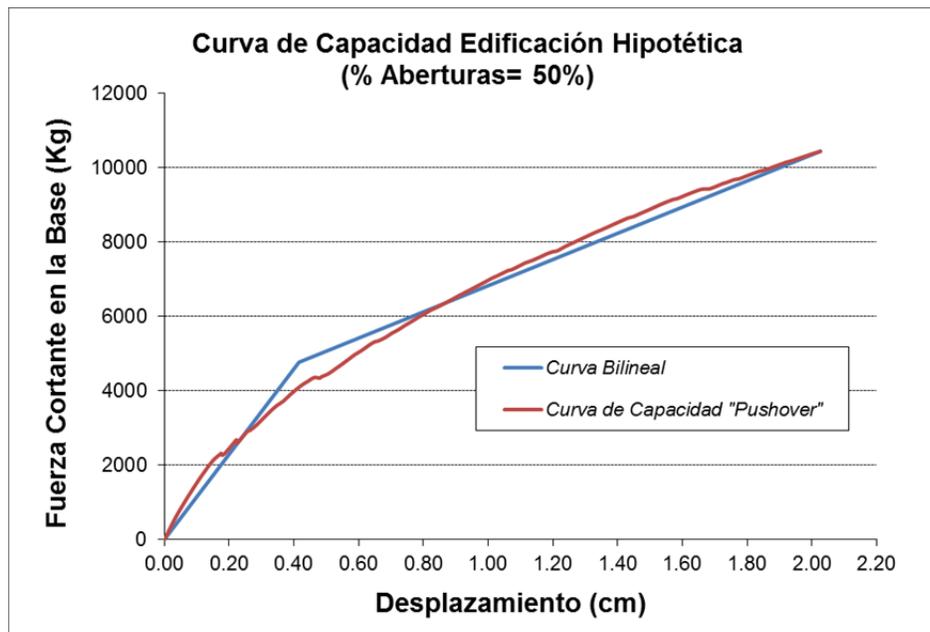


Figura 81. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 75%)

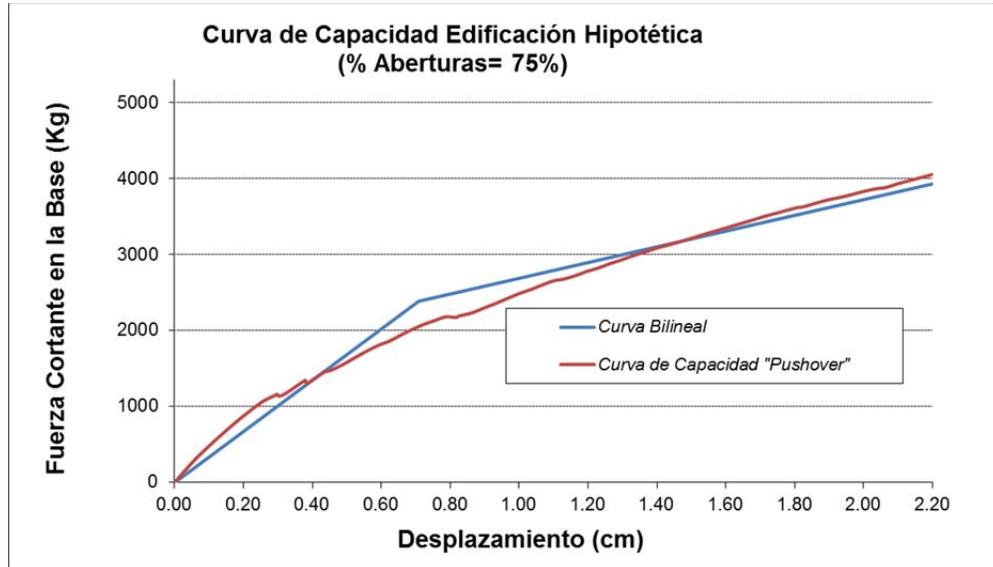
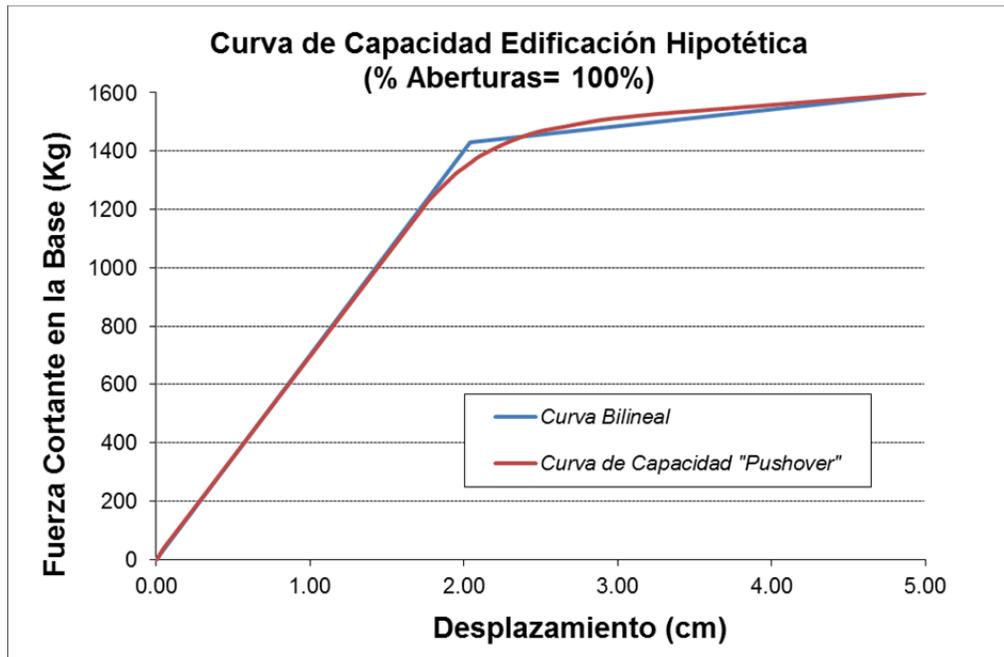


Figura 82. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 100%)



5.5.2.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de un piso.

Empleando la misma técnica del espectro de capacidad, se emplea la hoja de cálculo expuesta para las casas de dos pisos, siguiendo los procedimientos dados en el ATC-40. Los niveles de daño se calculan por la metodología WP4, en función del punto de comportamiento (Leve, moderado, severo y colapso) asignado un valor porcentual a cada una de ellas.

Las siguientes figuras (Figura 83 a la Figura 88) muestran de manera gráfica el proceso realizado con la hoja de cálculo y la determinación de los puntos de comportamiento con los respectivos niveles de daño acorde a la metodología WP4 para casas de un piso. Cabe resaltar que los resultados mostrados corresponden al análisis realizado en el sentido débil de las edificaciones (Sentido XZ).

Figura 83. *Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa $A_{bert}= 0.0\%$)*

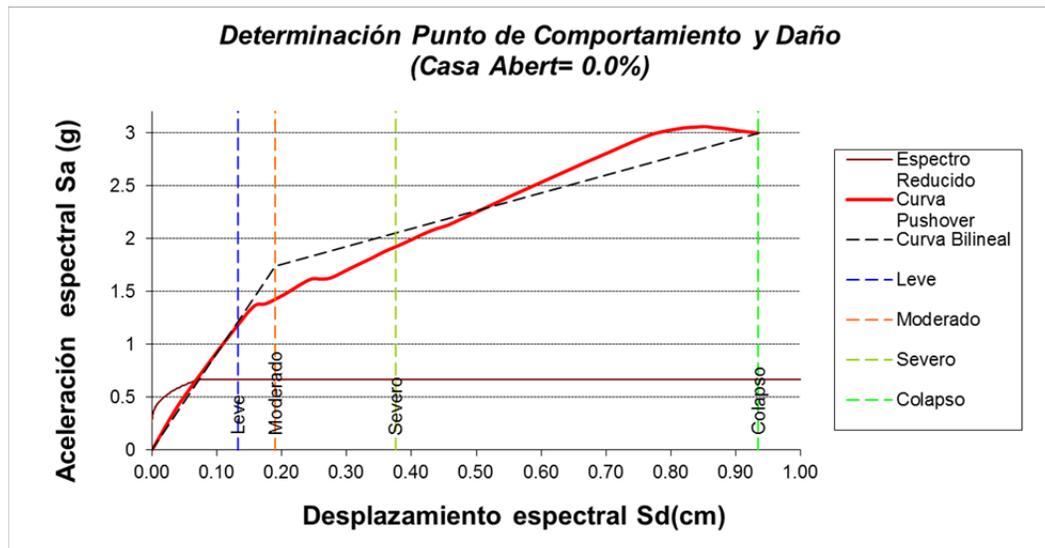


Figura 84. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 15%)

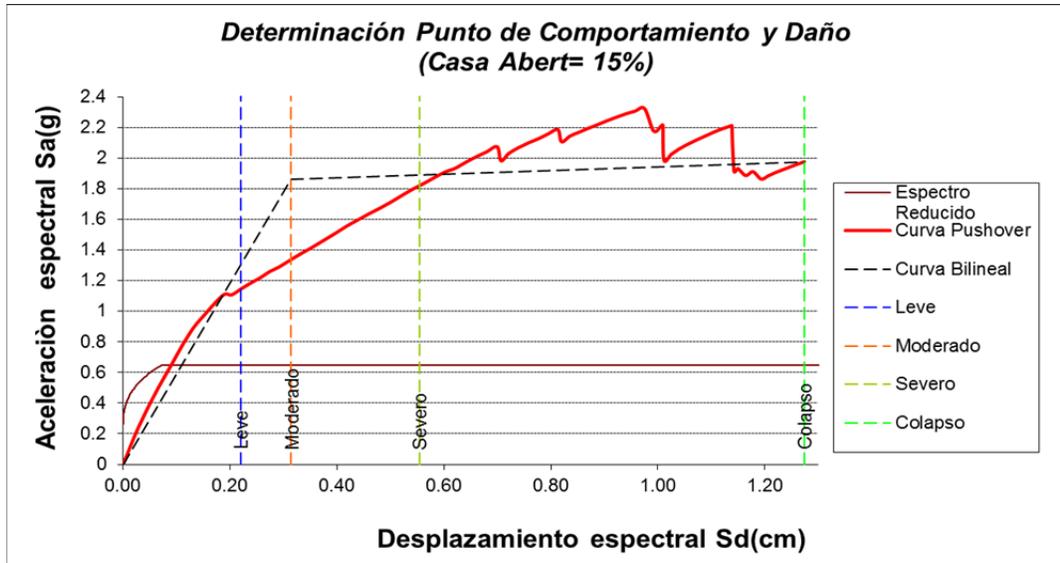


Figura 85. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 26%)

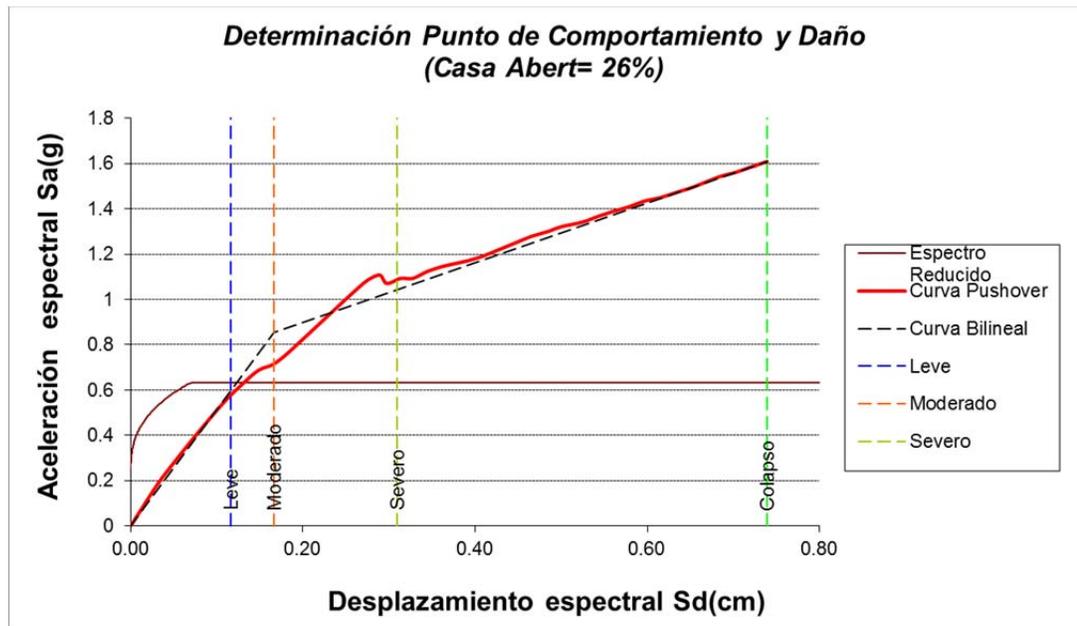


Figura 86. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 37%)

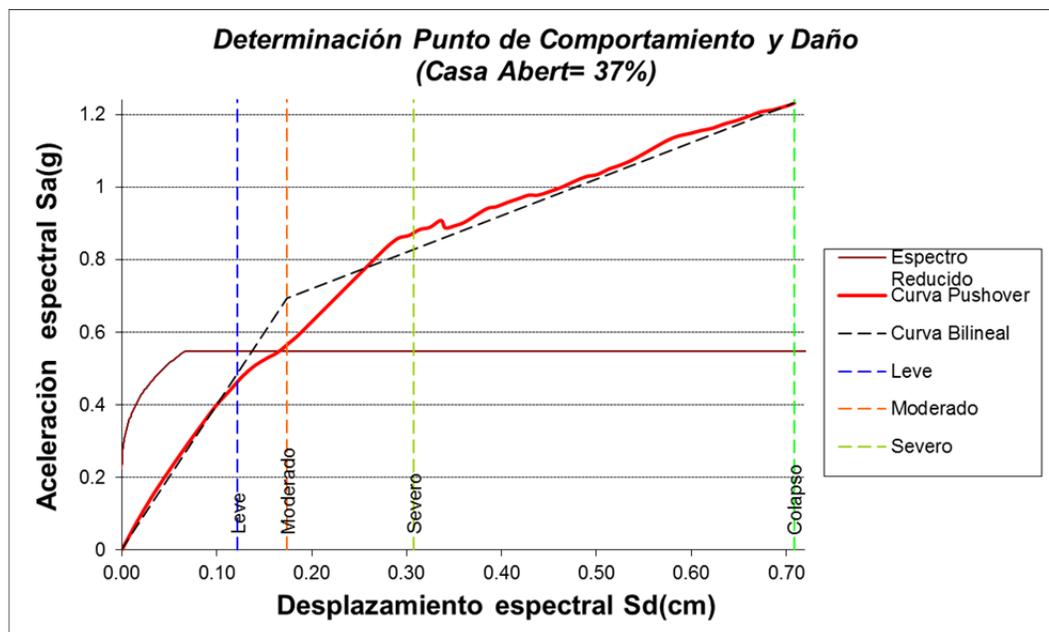


Figura 87. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 50%)

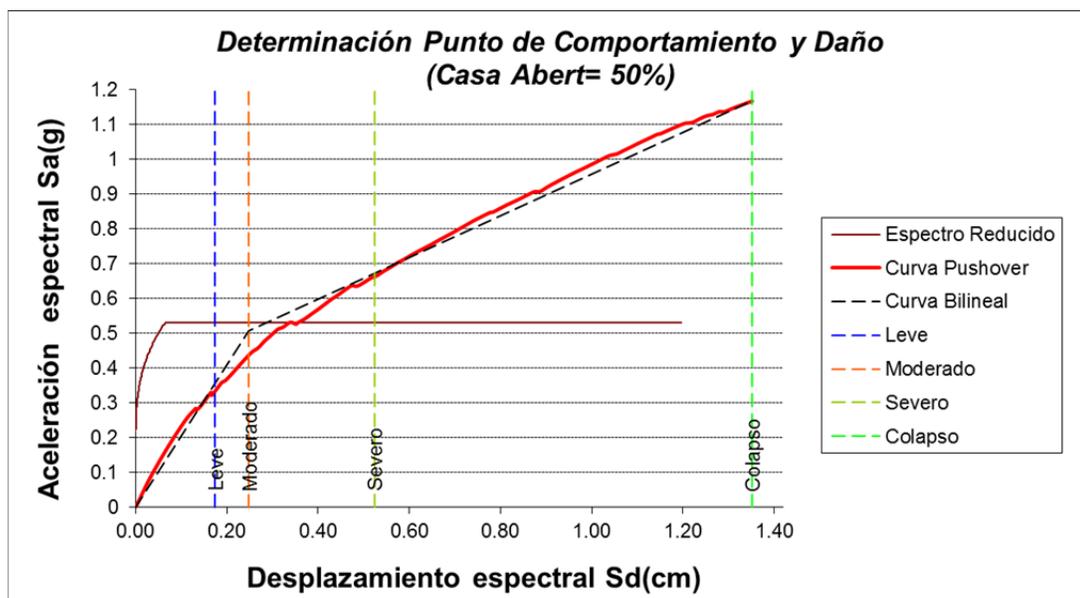


Figura 88. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 75%)

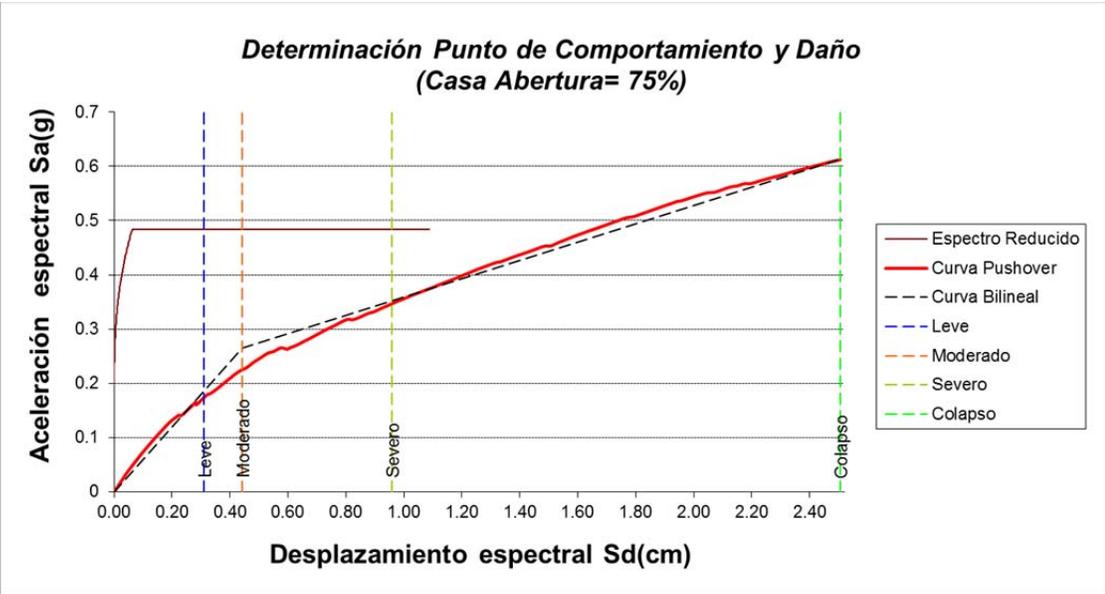
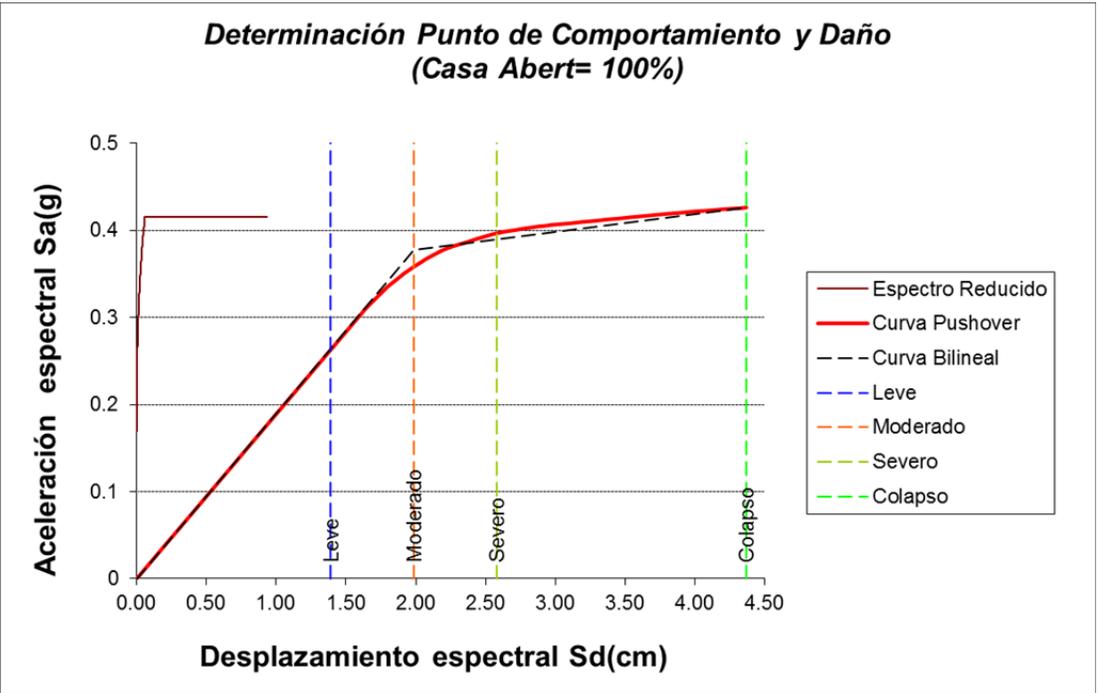


Figura 89. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%)



A partir de la iteración realizada y las gráficas obtenidas, se determinó en coordenadas espectrales el punto de comportamiento. En la Tabla 30 se muestran las coordenadas para cada una de las edificaciones y de igual modo los valores de periodo en el sentido débil (XZ) cortante y desplazamiento en el punto de comportamiento.

Tabla 30. *Puntos de comportamiento y valores de periodo en el sentido débil, de cortante y desplazamiento obtenidos, casas de un piso*

Punto de Comportamiento	Casas Analizadas						
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 15%	Casa Abert 26%	Casa Abert 37%	Casa Abert 50%	Casa Abert 75%	Casa Abert 100%
S_d (cm)	0.067	0.090	0.132	0.166	0.339	1.016	3.547
S_a (g)	0.793	0.819	0.981	1.089	0.966	0.367	0.415
V (Kg)	8218.89	6738.19	6926.87	4963.45	4357.22	2720.67	1559.46
d (cm)	0.05	0.08	0.15	0.19	0.46	1.16	4.02
T_x (s)	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.15	0.52

Con los resultados hallados y analizando los cortantes, se observa que la pérdida de capacidad resistente para edificaciones de un piso, se vuelve relevante cuando las aberturas alcanzan el 37%; si tomamos como referencia el caso anterior (con porcentaje de aberturas del 26%), se observa como este ligero incremento en las aberturas (casa con 37% de aberturas) a partir de ese punto, puede generar una pérdida de resistencia de alrededor del 28%. Lo cual refleja la sensibilidad de la estructura ante éste parámetro.

5.5.2.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.

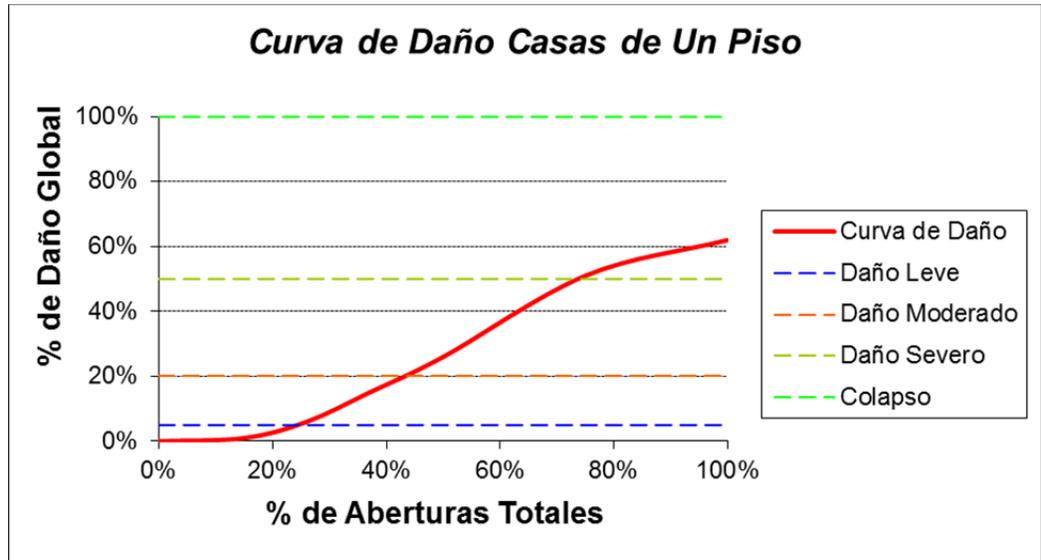
En la Tabla 31, se presentan los niveles de daño obtenidos para cada edificación en el punto de comportamiento según la metodología WP4.

Tabla 31. *Niveles de daño para las casas analizadas de un piso*

Nivel de Daño	Casas Analizadas (% de Daño Global)						
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 15%	Casa Abert 26%	Casa Abert 37%	Casa Abert 50%	Casa Abert 75%	Casa Abert 100%
% de Daño	0%	1%	6%	15%	26%	51%	62%
Nivel de Daño	Nulo	Leve	Moderado	Moderado	Severo	Colapso	Colapso

A partir de los porcentajes de daños obtenidos para cada casa considerada en función del parámetro de aberturas en sus muros confinados, se construye la curva de daño para edificaciones de un piso que se muestra en la Figura 90

Figura 90. Curva de daño por aberturas para edificaciones de un piso



5.6 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO PRESENCIA DE ABERTURAS EN SU MUROS PORTANTES. MÉTODO DEL PUNTAL EQUIVALENTE.

En esta sección se presenta el análisis para edificaciones de uno y dos pisos de mampostería confinada empleando el método del puntal equivalente y, considerando el efecto de las aberturas. Para ello se realiza un análisis estático no lineal, siguiendo la secuencia presentada para el caso de modelamiento con elementos finitos (tipo Shell) y descrito en el numeral 5.1.

Los casas hipotéticas a modelar corresponden a las mimas establecidas en el método de elementos finitos, conservando las proporciones de aberturas indicadas en la Tabla 24.

5.6.1 Parámetros del puntal equivalente para modelamiento de mampostería confinada.

Para la implementación del método con análisis no lineal estático, es necesario determinar previamente la resistencia del puntal en función de las propiedades de la mampostería, considerando básicamente dos efectos a los que se verá sometido y tomando la carga más crítica como su resistencia en el plano: Fuerza axial de compresión y Fuerza cortante.

Una vez conocida su resistencia, se determina su comportamiento inelástico carga-deformación con el fin de definir su Curva de comportamiento ante carga axial, la cual se le ingresará al Software SAP2000 y controlará las rótulas plásticas axiales asignadas a los puntales que representan los paneles de mampostería confinada. Para ello, se emplea el criterio de derivas máximas para rellenos de mampostería planteadas por el FEMA 356 [35].

A continuación se presenta a manera de ejemplo, los resultados obtenidos del proceso llevado a cabo siguiendo lo estipulado en el Capítulo 3 (sección 3.2.1) para un panel típico de la casa original en la dirección XZ.

✓ *Propiedades de los materiales.*

Fueron seleccionadas con base en lo planteado en el capítulo 4, y considerando los factores de reducción, por calidad del diseño y construcción, junto con el factor de resistencia por estado de la estructura para análisis de edificaciones existentes, según la Norma NSR-10 [1].

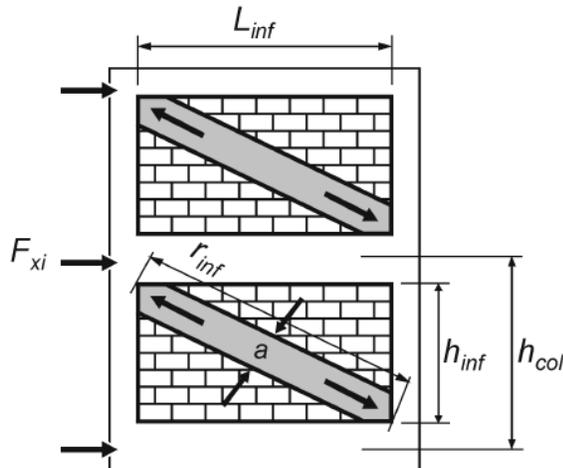
Con base en lo anterior, en la Tabla 32, se muestran las propiedades empleadas para el análisis de resistencia del puntal.

Tabla 32. Propiedades de los materiales
(Confinantes y Mampostería)

PROPIEDADES DEL CONFINAMIENTO			PROPIEDADES MUROS DE MAMPOSTERÍA		
f'_c	140	Kg/cm^2	f'_m	15	Kg/cm^2
E_c	200000	Kg/cm^2	f'_v	0.6	Kg/cm^2
f_y	4200	Kg/cm^2	E_{me}	11200	Kg/cm^2
h_{col}	280	(cm)	h_{inf}	260	(cm)
$base_{col}$	20	(cm)	L_{inf}	278	(cm)
$altura_{col}$	10	(cm)	t	10	(cm)
$base_{vig}$	10	(cm)	t_{efec}	4.4	(cm)
$altura_{vig}$	20	(cm)	t_{pega}	10	(cm)
Acero Long $_{col}$	4#3		r_{inf}	380.64	(cm)
Acero Long $_{vig}$	4#3		A_n	2780	(cm^2)
Acero Trans $_{col}$	15#2 c/20cm				
Acero Trans $_{vig}$	14#2 c/20cm				

La Figura 91 bosqueja las dimensiones estipuladas en la Tabla 32

Figura 91. Muro confinado representado como Puntal equivalente (Tomado de [35])



Con base en los parámetros establecidos y según la Ecuación 17, se determina el ancho equivalente del puntal “a” empleando una hoja de cálculo.

✓ **Resistencia del Puntal (R_{puntal}).**

Se obtiene como el mínimo valor entre la carga axial y la componente paralela a la dirección del puntal de la fuerza cortante. Según el numeral 3.2.1, y las ecuaciones 26 y 27, se obtiene lo siguiente:

Secciones Consideradas Elementos Confinantes

	Base		Altura	
Sec Col	20	<i>x</i>	10	<i>cm</i>
Sec Vig	10	<i>x</i>	20	<i>cm</i>

Parámetros Geométricos del Puntal [FEMA-356]

h_{col}	280	(<i>cm</i>)
h_{inf}	260	(<i>cm</i>)
E_{fe}	20000	(<i>Mpa</i>)
E_{me}	1120	(<i>Mpa</i>)
I_{col}	1666.67	(<i>cm</i> ⁴)
L_{inf}	278	(<i>cm</i>)
r_{inf}	380.64	(<i>cm</i>)
t_{inf}	10	(<i>cm</i>)
θ	0.75	(<i>rad</i>)
$h_{\text{inf}}/t_{\text{inf}}$	26	

$\lambda=$	0.061
$a=$	31.2 <i>cm</i>

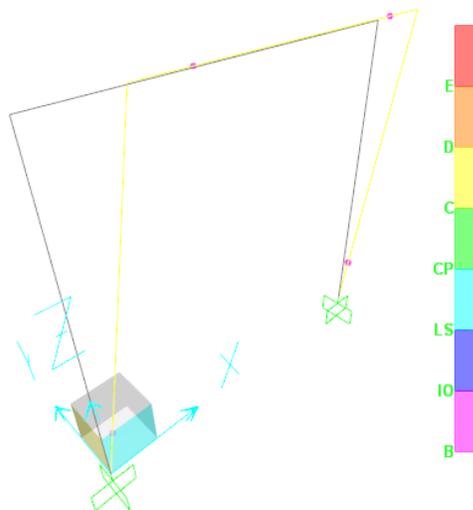
Resistencia del Puntal
[FEMA-356]

R_{comp}	2057.76	Kg
R_{cort}	1668	Kg
R_{puntal}	1348.97	Kg

✓ **Deformaciones inelásticas.**

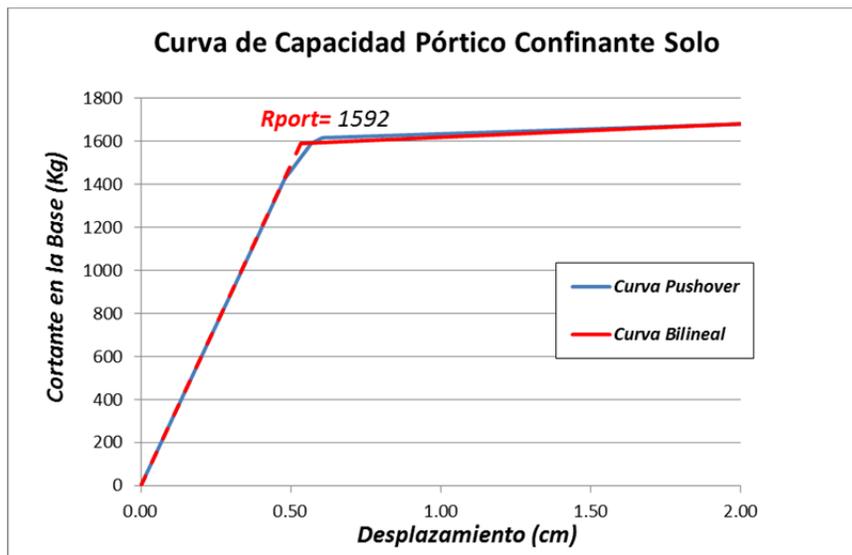
Según criterios del FEMA 356 y basados en la Tabla No 6. Tomada de dicha norma. Para seleccionar la deriva máxima permitida es necesaria la relación entre la resistencia del pórtico confinante y el puntal, por ende primero se calculó la resistencia del pórtico solo, mediante un análisis no lineal del mismo con las respectivas cargas asignadas en el modelo original. Ver Figura 92.

Figura 92. Pórtico solo indicando localización y generación de rotulas plásticas



Del análisis no lineal realizado al pórtico confinante solo, se obtiene la curva pushover, de donde se extrae la resistencia del mismo mediante la linealización de la curva. La curva obtenida se muestra en la Figura 93.

Figura 93. Curva de capacidad y resistencia del pórtico solo.



De la curva se obtuvo una resistencia del pórtico $R_{p\acute{o}rtico} = 1592$ Kg, y dividiéndola con la resistencia del puntal R_{puntal} se obtiene el parámetro β , el cual define la deriva máxima permitida para el muro de mampostería [Tabla 7-9 del FEMA 356], este valor junto con la altura del panel permite obtener el desplazamiento máximo.

El desplazamiento de fluencia, se obtiene a partir de la resistencia del puntal y su respectiva rigidez elástica ante carga axial como:

$$\frac{An * E_m}{r_{inf}} \quad (41)$$

Donde:

An: es el área neta del punta a compresión ($a * t_{inf}$)

Em: es el módulo de elasticidad de la mampostería

r_{inf}: es la longitud de la diagonal del muro.

Del anterior proceso da como resultado los siguientes valores de desplazamientos de fluencia y últimos.

Deformación del Puntal
[FEMA-356, Tabla 7-9]

L_{inf}/h_{inf}	1.07
β	1.180
$\%d_{max}$	0.80%
$L_{columna}$	50cm

du	1.28	cm
dy	0.04	cm

Con esta información se construye la curva de comportamiento del puntal, la cual controlará en comportamiento por carga axial de la rótula asignada en el punto medio de los puntales en los modelos de las edificaciones (Figura 94).

Figura 94. Curva de comportamiento de la mampostería como puntal por carga axial



5.6.2 Modelamiento de edificaciones de dos pisos por el método del puntal equivalente.

La figura 95 (a), presenta el modelo de la casa original de dos pisos con el método del puntal equivalente. En los paneles en los cuales existe presencia de aberturas, el ancho efectivo del puntal fue reducido acorde a la ecuación 23 para considerar su efecto en la resistencia y rigidez global de la estructura.

La Tabla 33 muestra a manera de ejemplo los anchos equivalente (a) y los anchos reducidos (a_{red}) para la casa original. Para los demás edificaciones ver Anexo 3.

- ✓ **Definición rótulas plásticas.** Con base en la curva obtenida (Figura 94) para el puntal se define su criterio de rótula ante carga axial en el punto medio del puntal. Para el caso de las vigas y columnas de confinamiento se asignan rótulas con base a las Tablas 6-7 y 6-8 del FEMA-356 [35] respectivamente para momento en el caso de las vigas y para carga axial y momento en el caso de las columnas, localizadas en los extremos de los elementos. La distribución y tipos de rótulas asignadas pueden verse en la Figura 95 (b).

Tabla 33. Valores de a_{red} para la casa original (Aberturas= 17%)

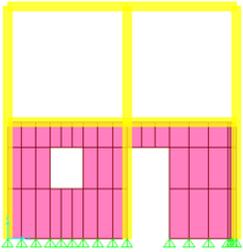
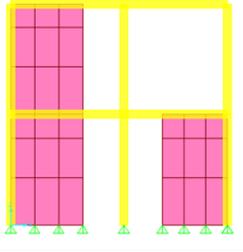
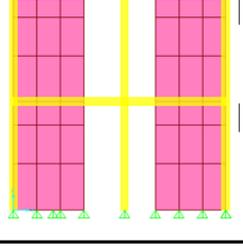
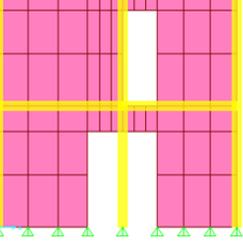
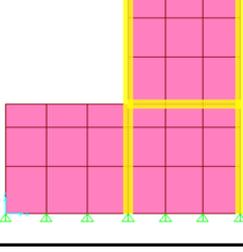
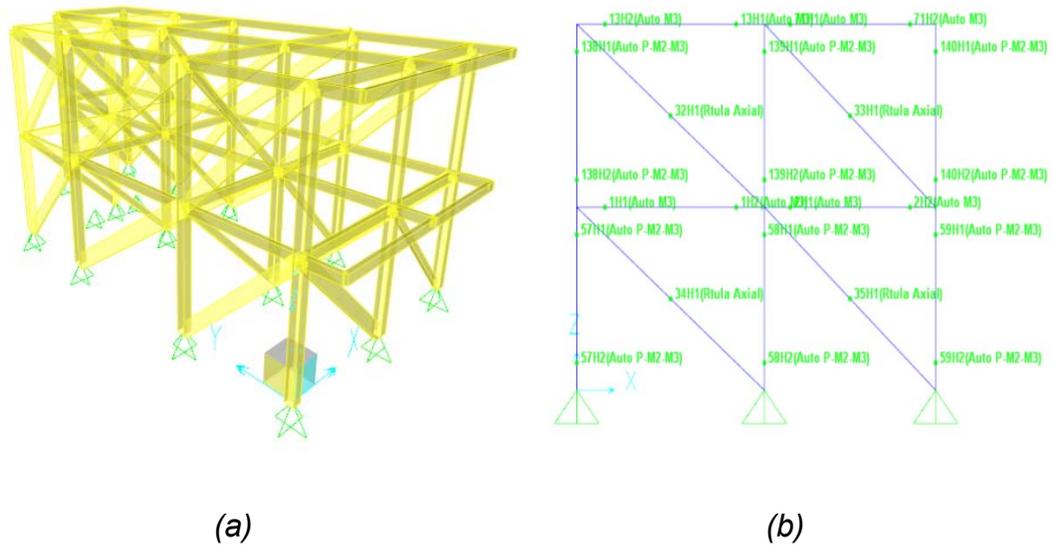
Muros Confinados Dirección (XZ)		Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas	Ancho equivalente "a" (m)	Ancho equivalente "a _{red} " (m)
 <p>M2xP1</p> <p>M2xP2</p>	<p>M2xP3</p> <p>M2xP4</p>	M2xP1	8.06	8.06	100.00%	NA	NA
		M2xP2	8.06	0.80	9.92%	0.31	0.26
		M2xP3	7.36	7.36	100.00%	NA	NA
		M2xP4	7.36	2.20	29.88%	0.3	0.17
 <p>M3xP1</p> <p>M3xP2</p>	<p>M3xP3</p> <p>M3xP4</p>	M3xP1	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
		M3xP2	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
		M3xP3	7.36	7.36	100.00%	NA	NA
		M3xP4	7.36	2.74	37.26%	0.3	0.15
 <p>M4xP1</p> <p>M4xP2</p>	<p>M4xP3</p> <p>M4xP4</p>	M4xP1	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
		M4xP2	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
		M4xP3	7.36	2.24	30.42%	0.3	0.17
		M4xP4	7.36	2.24	30.42%	0.3	0.17
 <p>M5xP1</p> <p>M5xP2</p>	<p>M5xP3</p> <p>M5xP4</p>	M5xP1	8.06	0.00	0.00%	0.31	0.31
		M5xP2	8.06	1.76	21.83%	0.31	0.21
		M5xP3	7.36	1.76	23.90%	0.3	0.20
		M5xP4	7.36	1.76	23.90%	0.3	0.20
 <p>M6xP1</p> <p>M6xP2</p>	<p>M6xP1</p> <p>M6xP3</p>	M5xP1	7.36	0.00	0.00%	0.3	0.30
		M5xP2	8.06	0.00	0.00%	NA	NA
		M5xP3	7.36	0.00	0.00%	0.3	0.30

Figura 95. Modelo 3D Casa Original método del puntal (% Aberturas= 17%).
 (a) Modelo con distribución de puntales, (b) Tipos y localización de las rótulas



5.6.2.1 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.

De manera análoga al modelo con elementos Shell, se fijó un desplazamiento objetivo de aproximadamente el 1% de la altura del piso. Éste valor variaba según la rigidez del modelo, pero por lo general para edificaciones de dos pisos está alrededor de 2cm a 2.5 cm, el desplazamiento a fijar.

Empleando el mismo procedimiento que en el caso de casas de dos pisos modeladas con elementos finitos (Shell), se procede a realizar un análisis de Pushover en el Software Sap2000 para cada uno de los modelos hipotéticos propuestos.

Las curvas de capacidad obtenidas y su representación bilineal para casas de dos pisos se muestran a continuación de la Figura 96 a la Figura 100.

Figura 96. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 0.0%)

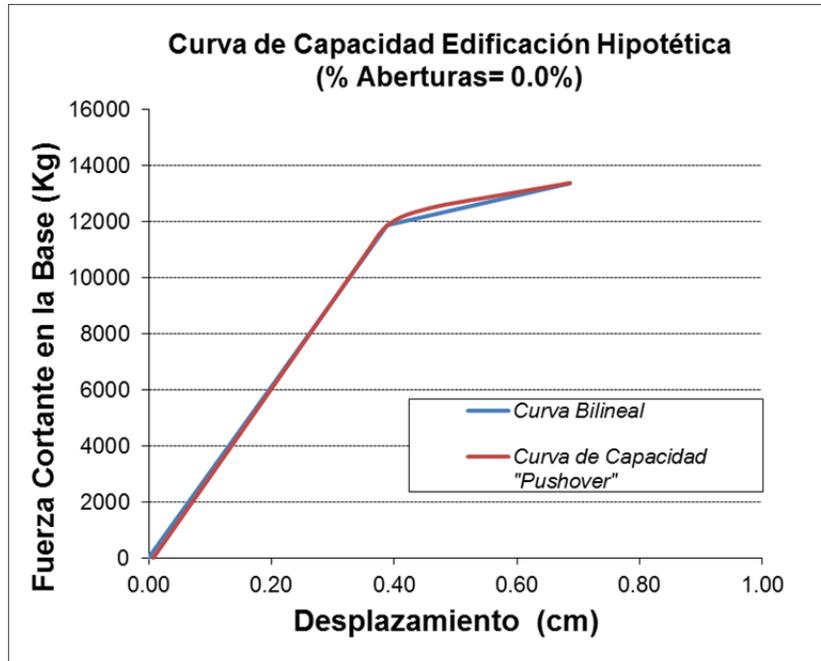


Figura 97. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 17%)

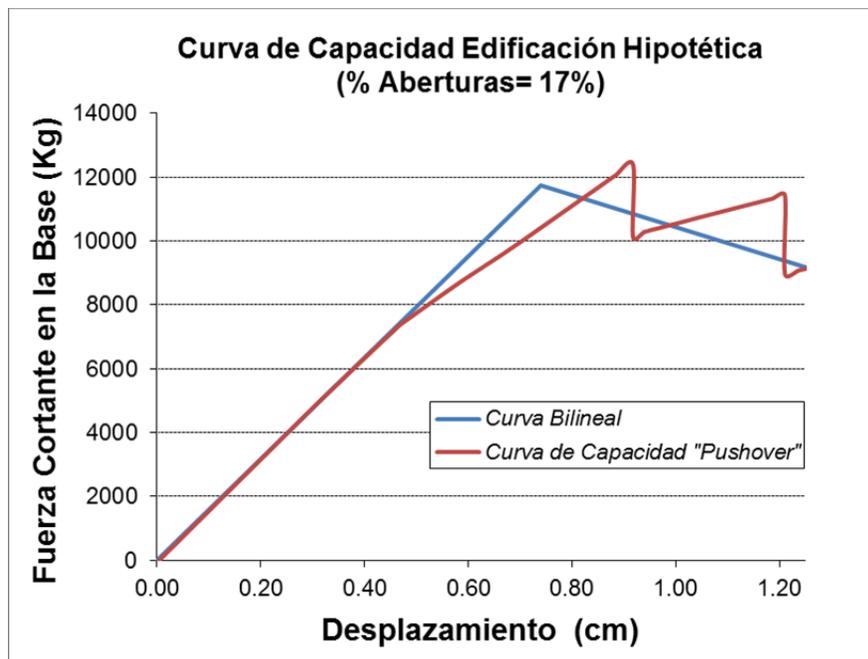


Figura 98. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 31%)

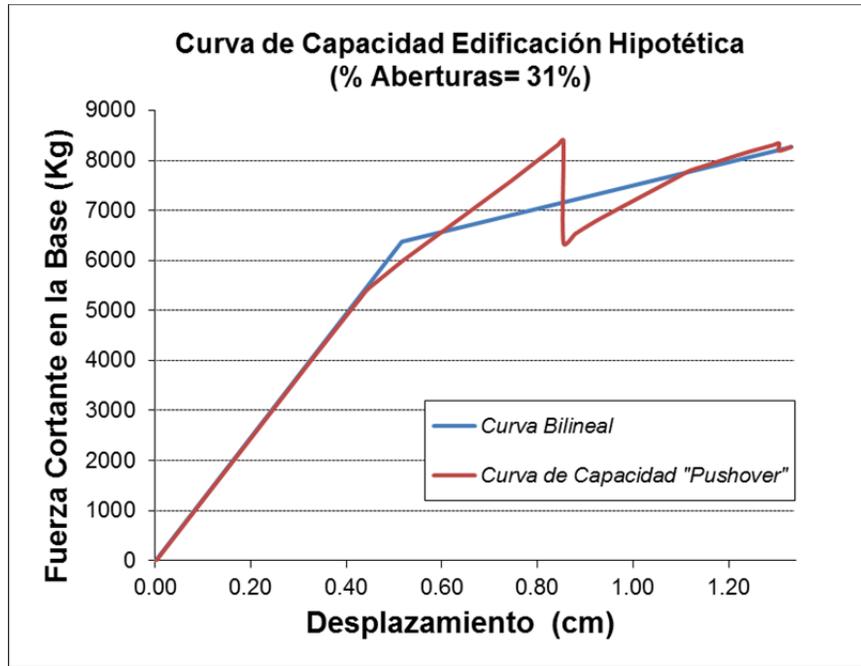


Figura 99. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 42%)

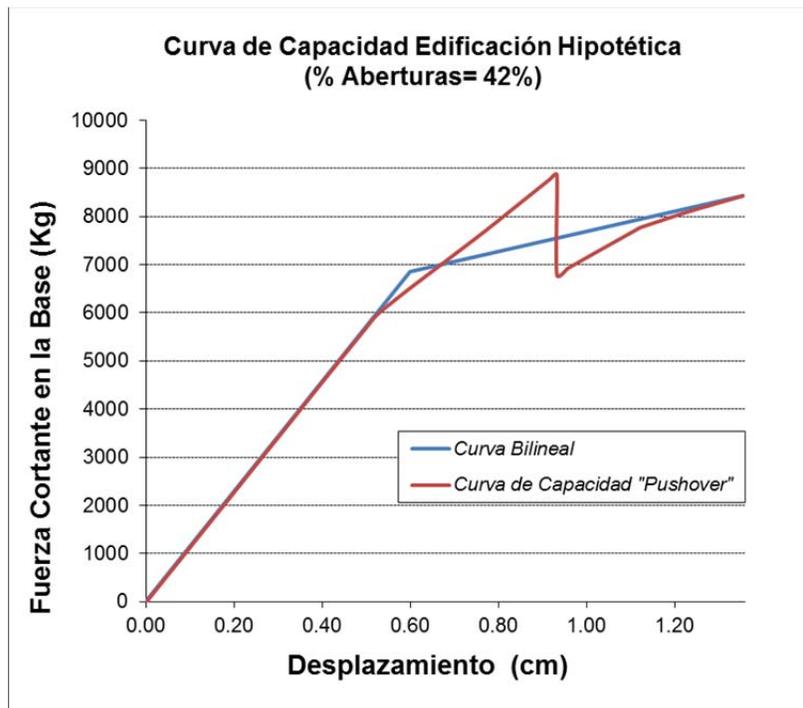
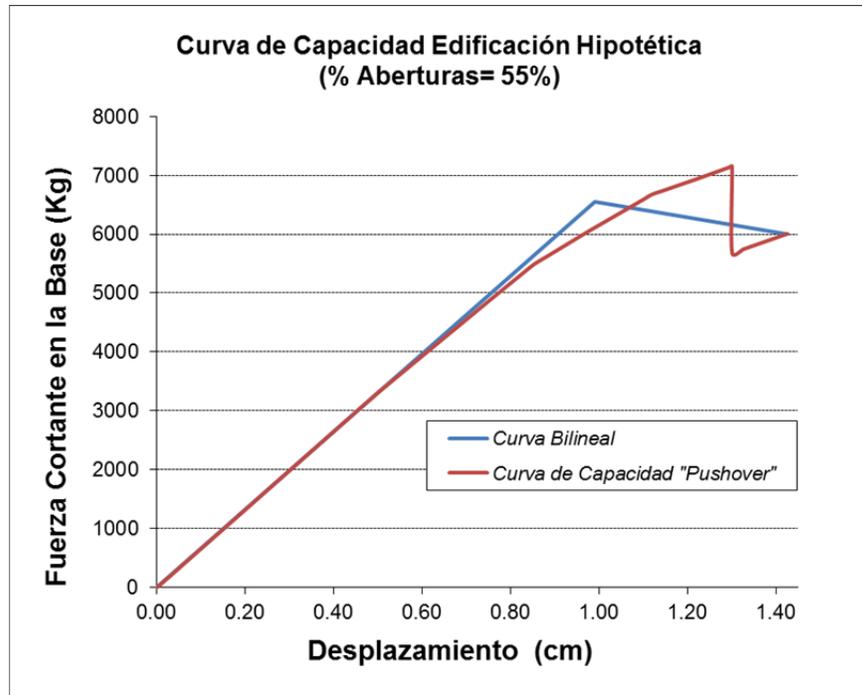


Figura 100. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 55%)



5.6.2.2 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de dos pisos.

Se emplea el mismo procedimiento descrito en el método de elementos finitos. Los niveles de daño se calculan por la metodología WP4, en función del punto de comportamiento (Leve, moderado, severo y colapso) asignado un valor porcentual a cada una de ellas.

Las siguientes figuras (Figura 101 a la Figura 106) muestran de manera gráfica el proceso realizado con la hoja de cálculo y la determinación de los puntos de comportamiento con los respectivos niveles de daño. Cabe resaltar que los resultados mostrados corresponden al análisis realizado en el sentido débil de las edificaciones (Sentido XZ).

Figura 101. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)

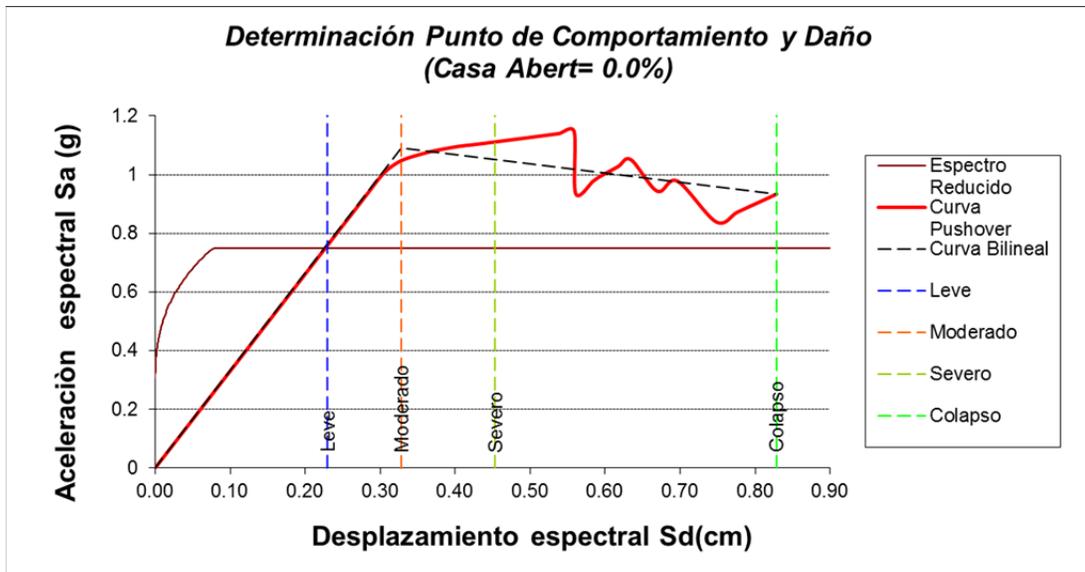


Figura 102. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 17%)

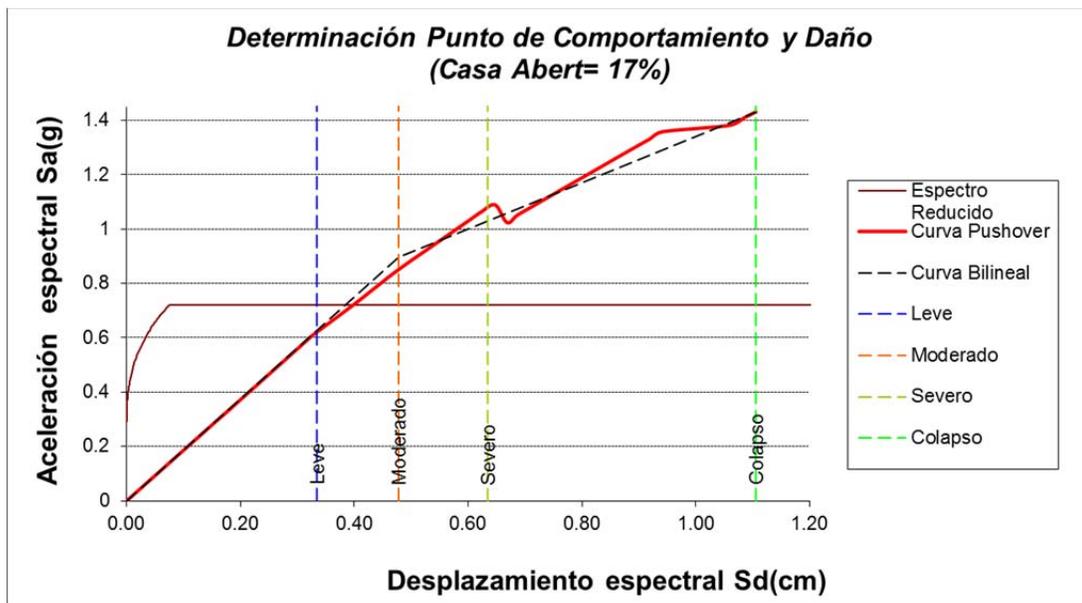


Figura 103. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 31%)

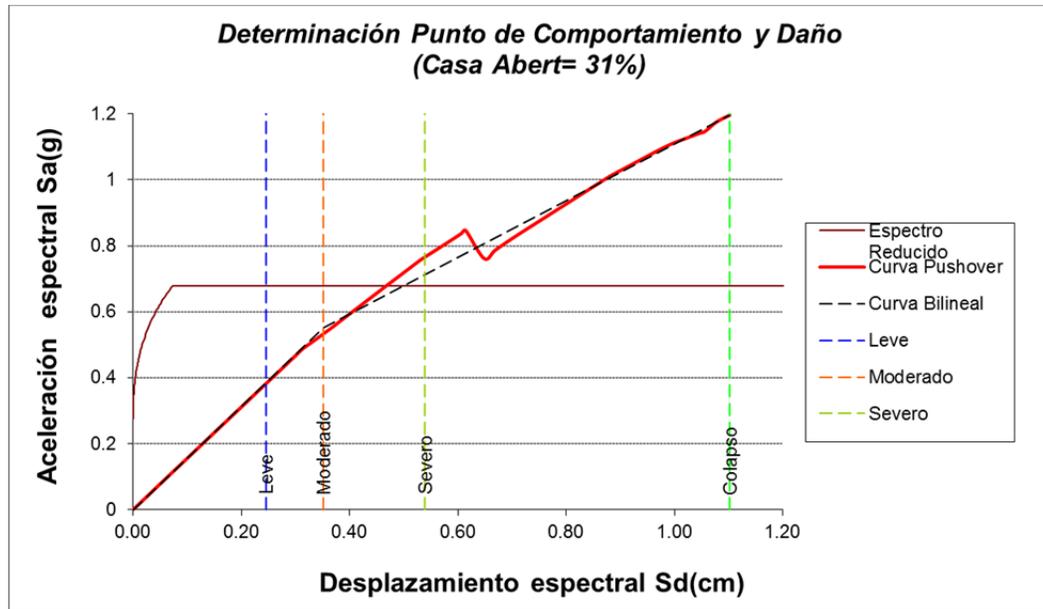


Figura 104. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 42%)

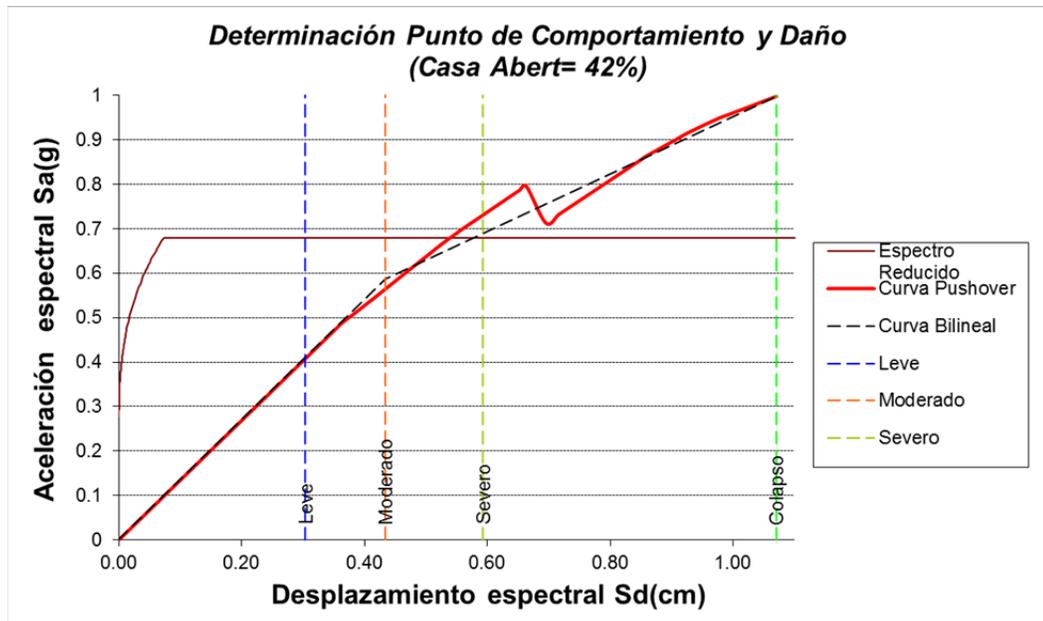


Figura 105. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 55%)

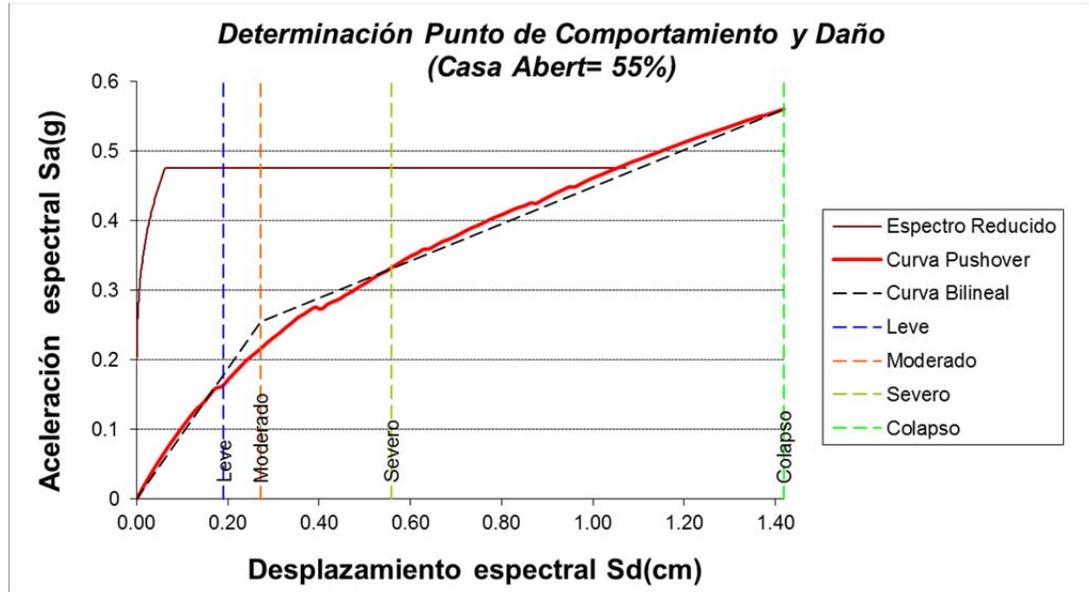
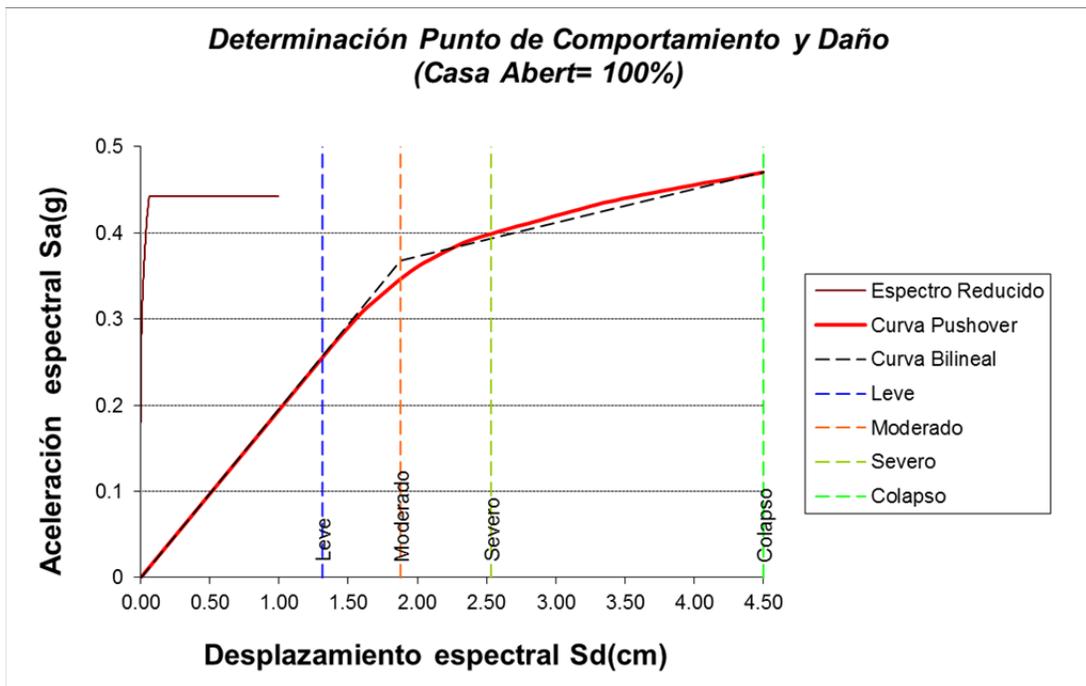


Figura 106. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 100%)



En la Tabla 34 se muestran las coordenadas espectrales para cada una de las edificaciones y de igual modo los valores de cortante y desplazamiento en el punto de comportamiento y el periodo fundamental para la dirección de análisis “x”.

Tabla 34. *Puntos de comportamiento, periodo, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de dos pisos en el sentido débil*

<i>Punto de Comportamiento</i>	<i>Casas Analizadas</i>					
	<i>Casa Abert 0.0%</i>	<i>Casa Abert 17%</i>	<i>Casa Abert 31%</i>	<i>Casa Abert 42%</i>	<i>Casa Abert 55%</i>	<i>Casa Abert 100%</i>
<i>S_d (cm)</i>	0.227	0.397	0.467	0.539	0.860	3.584
<i>S_a (g)</i>	0.735	0.714	0.665	0.777	0.779	0.442
<i>V (Kg)</i>	11689.32	10066.39	7946.42	7862.60	6738.92	3637.96
<i>d (cm)</i>	0.38	0.67	0.79	0.82	1.14	4.04
<i>T_x (s)</i>	0.12	0.16	0.18	0.19	0.24	0.52

Aunque se observan valores de fuerzas cortantes menores y desplazamientos ligeramente mayores respecto a los modelos por elementos finitos, el nivel de tendencia en término de pérdida de resistencia, respecto a las aberturas se mantiene.

5.6.2.3 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.

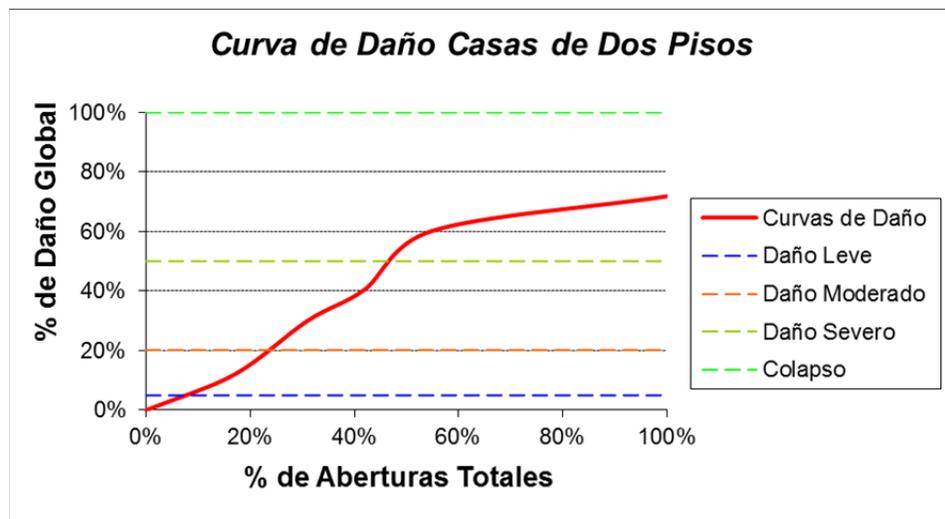
En la Tabla 35, se presentan los niveles de daño obtenidos para cada edificación en el punto de comportamiento según la metodología WP4.

Tabla 35. *Niveles de daño para las casas analizadas*

<i>Nivel de Daño</i>	<i>Casas Analizadas (% de Daño Global)</i>					
	<i>Casa Abert 0.0%</i>	<i>Casa Abert 17%</i>	<i>Casa Abert 31%</i>	<i>Casa Abert 42%</i>	<i>Casa Abert 55%</i>	<i>Casa Abert 100%</i>
<i>% de Daño</i>	0%	12%	30%	41%	60%	72%
<i>Nivel de Daño</i>	Nulo	Moderado	Severo	Severo	Colapso	Colapso

A partir de los porcentajes de daños obtenidos para cada casa considerada en función del parámetro de aberturas en sus muros confinados, se construye la curva de daño para edificaciones de dos pisos modelados con el método del puntal que se muestra en la Figura 107.

Figura 107. Curva de daño por aberturas para edificaciones de dos pisos



5.6.3 Modelamiento de edificaciones de un piso por el método del puntal equivalente.

De manera análogo al caso de dos pisos, se realizó el modelamiento para las casas de un piso. Igualmente en los paneles en los cuales existe presencia de aberturas, el ancho efectivo del puntal fue reducido acorde a la ecuación 23 para considerar su efecto en la resistencia y rigidez global de la estructura. La Tabla 36 muestra a manera de ejemplo los anchos equivalente (a) y los anchos reducidos (a_{red}) para la casa original de dos pisos.

En la Figura 108 se observa el modelo en SAP2000 concerniente a la casa real u original tomada como referencia para el análisis paramétrico, con los puntales diagonales respectivos, en función de la distribución de los paneles de mampostería.

Tabla 36. Valores de a_{red} para la casa original (Aberturas= 15%)

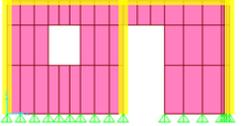
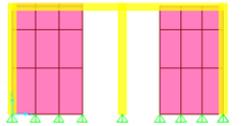
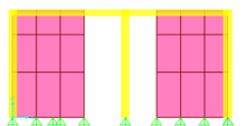
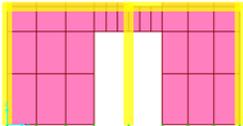
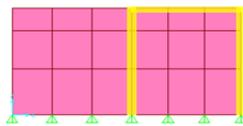
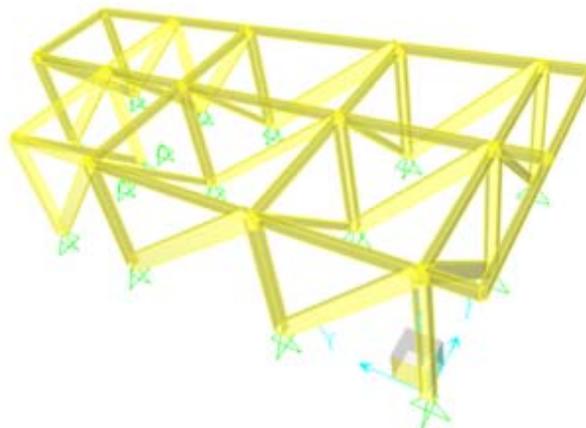
Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas	Ancho equivalente "a" (m)	Área equivalente "a _{red} " (m)
	M2xP1	8.06	0.80	9.92%	0.31	0.26
	M2xP2 M2xP4	7.36	2.20	29.88%	0.30	0.17
	M3xP2	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
	M3xP4	7.36	2.74	37.26%	0.30	0.15
	M4xP2	8.06	2.94	36.46%	0.31	0.15
	M4xP4	7.36	2.24	30.42%	0.30	0.17
	M5xP2	8.06	1.76	21.83%	0.31	0.21
	M5xP4	7.36	1.76	23.90%	0.30	0.20
	M5xP2	8.06	0.00	0.00%	NA	
	M5xP3	7.36	0.00	0.00%	0.30	0.30

Figura 108. Modelo 3D Casa Original método del puntal (% Aberturas= 15%)



5.6.3.1 Determinación de la capacidad de las edificaciones de un piso propuestas.

Se procedió a fijar un desplazamiento objetivo de aproximadamente el 1% de la altura del piso. Éste valor variaba según la rigidez del modelo, pero por lo general para edificaciones de un piso está alrededor de 1.0cm a 1.5 cm, el desplazamiento a fijar. Empleando el mismo procedimiento que en el caso de casas de dos pisos modeladas, se realiza un análisis de Pushover en el Software Sap2000 para cada uno de los modelos hipotéticos propuestos.

Las curvas de capacidad obtenidas y su representación bilineal para casas de un piso se muestran a continuación de la Figura 109 a la Figura 114.

Figura 109. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 0.0%)

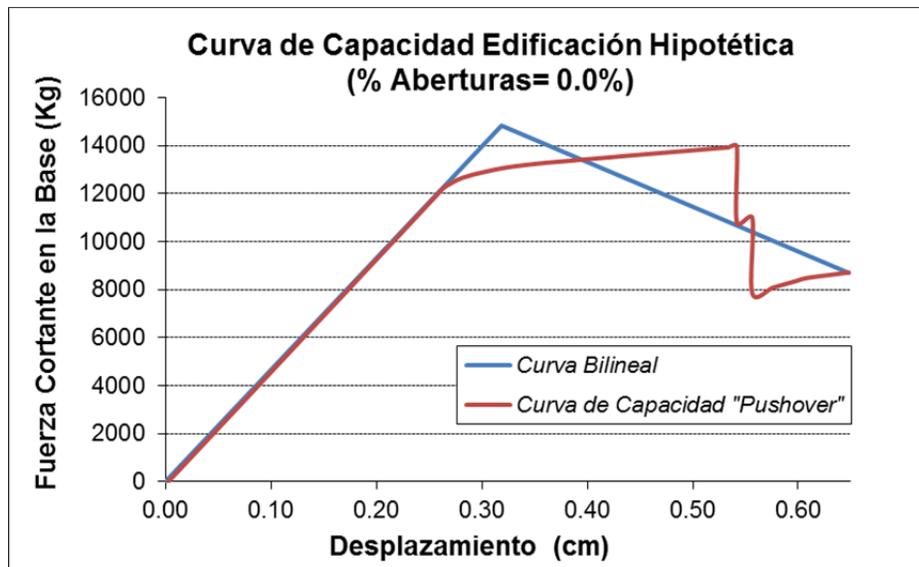


Figura 110. Curva de Capacidad Casa Real (% Aberturas= 15%)

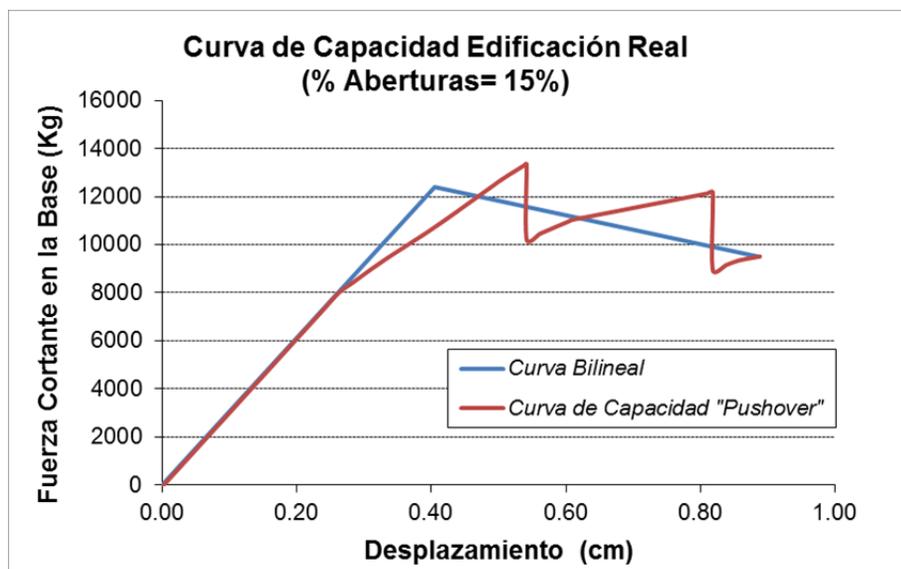


Figura 111. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 26%)

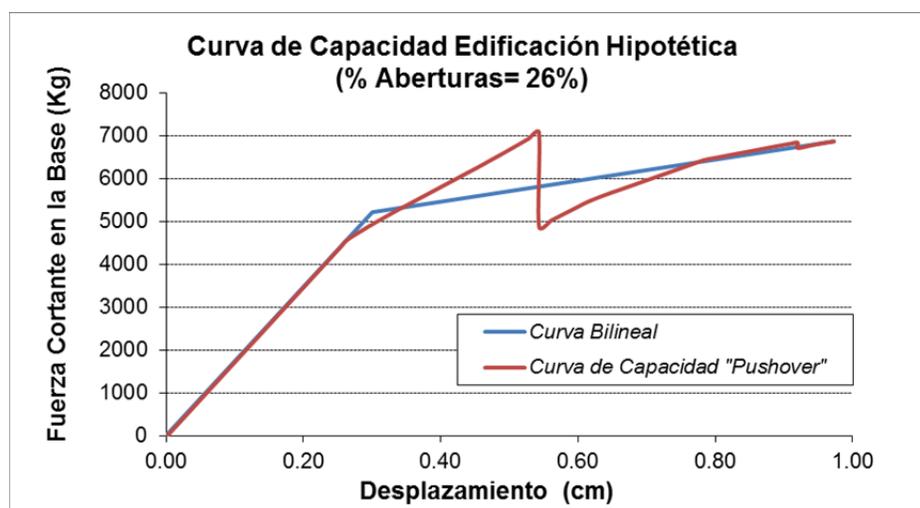


Figura 112. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 37%)

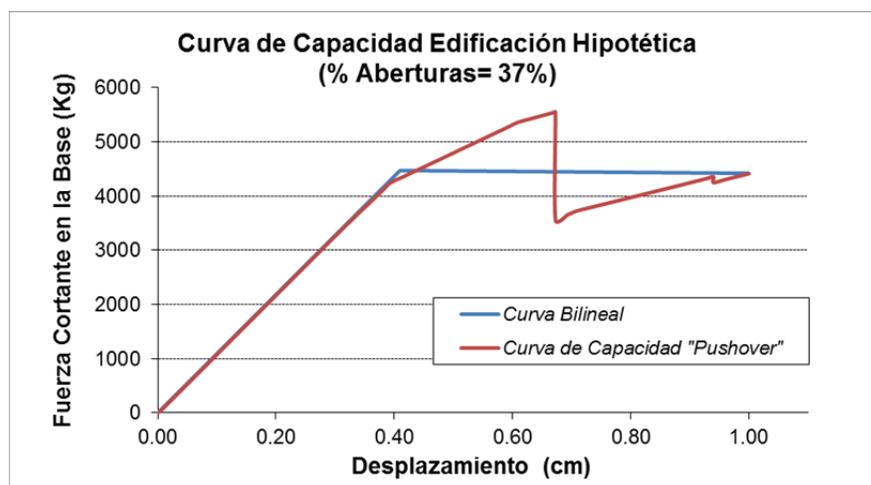


Figura 113. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 50%)

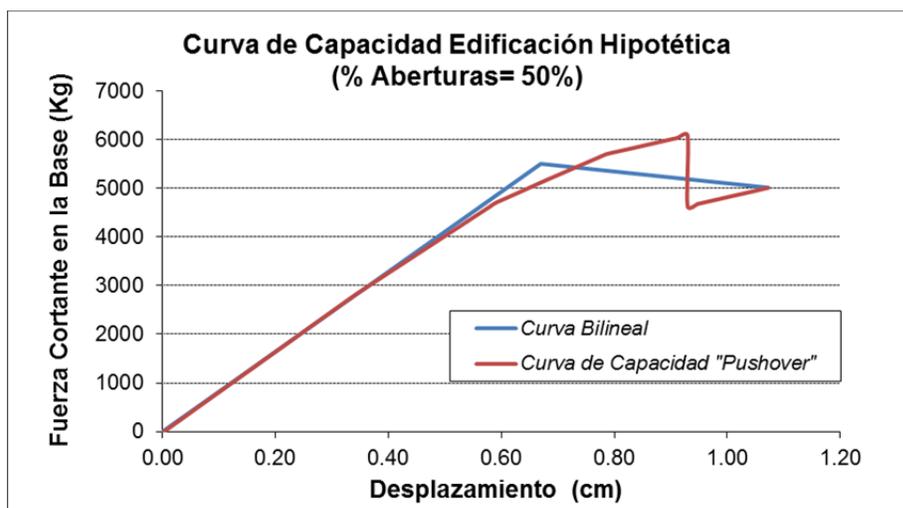
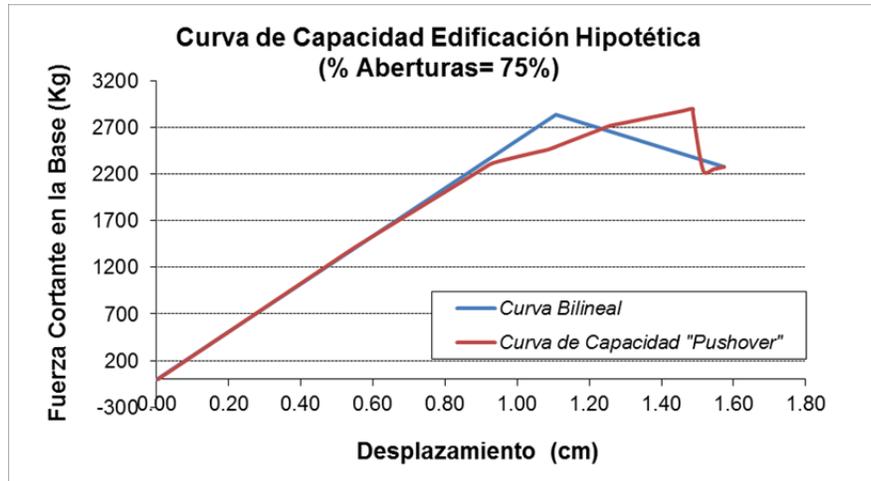


Figura 114. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Aberturas= 75%)



5.6.3.2 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de un piso.

Aplicando el mismo procedimiento de las casas de dos pisos se define el punto de comportamiento mediante el espectro de capacidad (ATC-40) y los niveles de daño se calculan por la metodología WP4.

Las siguientes figuras (Figura 115 a la Figura 120) muestran de manera gráfica el proceso realizado con la hoja de cálculo y la determinación de los puntos de comportamiento con los respectivos niveles de daño. Cabe resaltar que los resultados mostrados corresponden al análisis realizado en el sentido débil de las edificaciones (Sentido XZ).

Figura 115. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 0.0%)

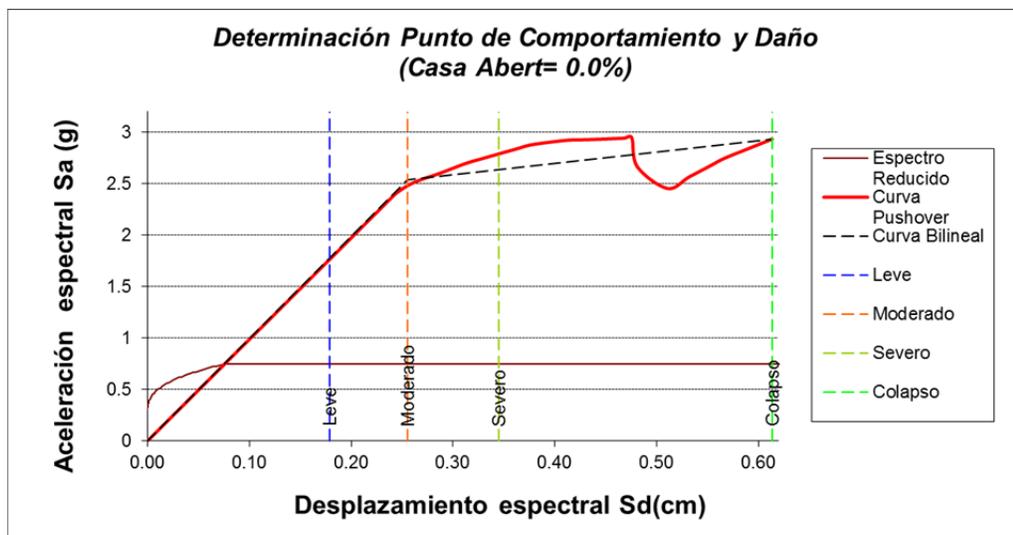


Figura 116. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 15%)

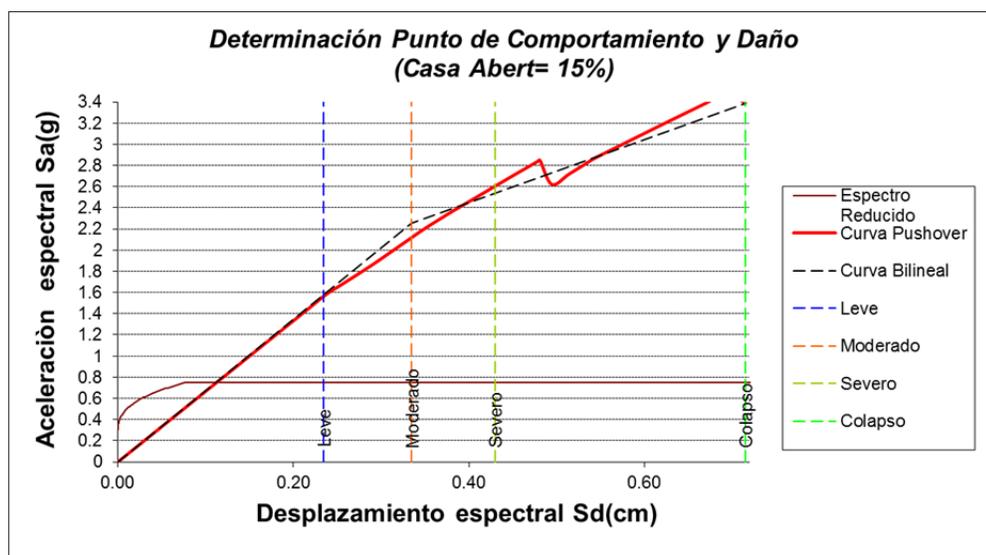


Figura 117. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 26%)

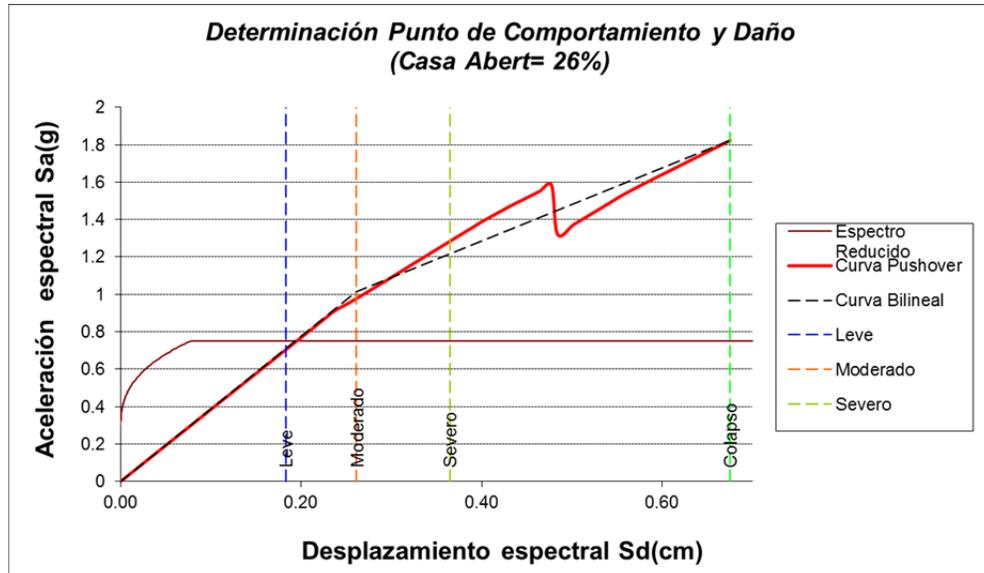


Figura 118. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 37%)

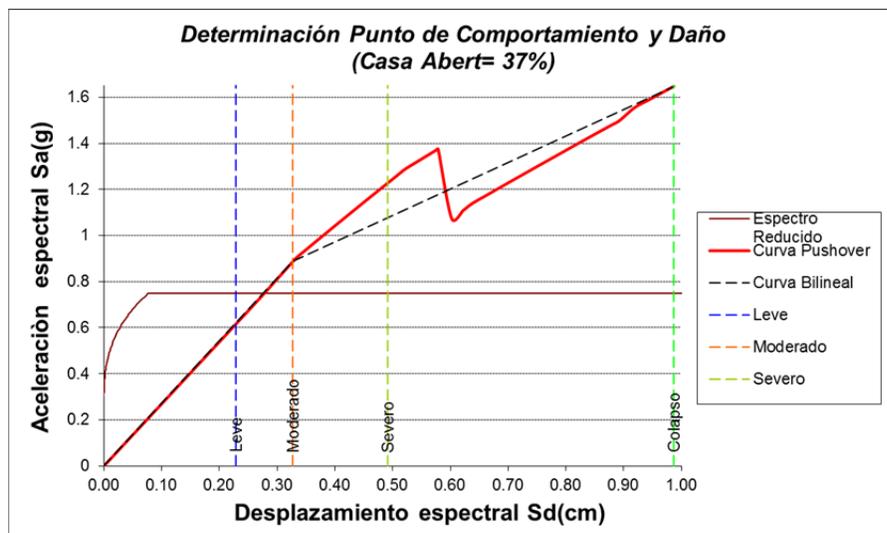


Figura 119. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 50%)

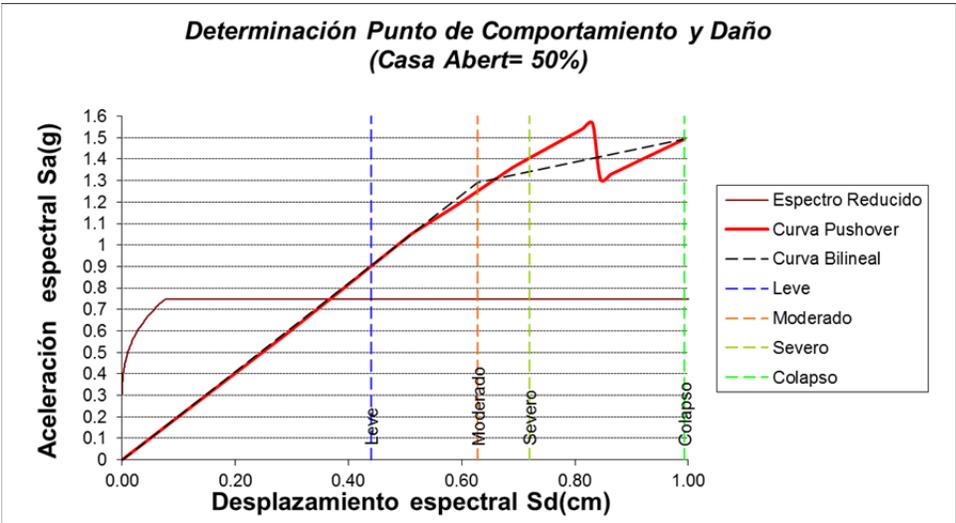
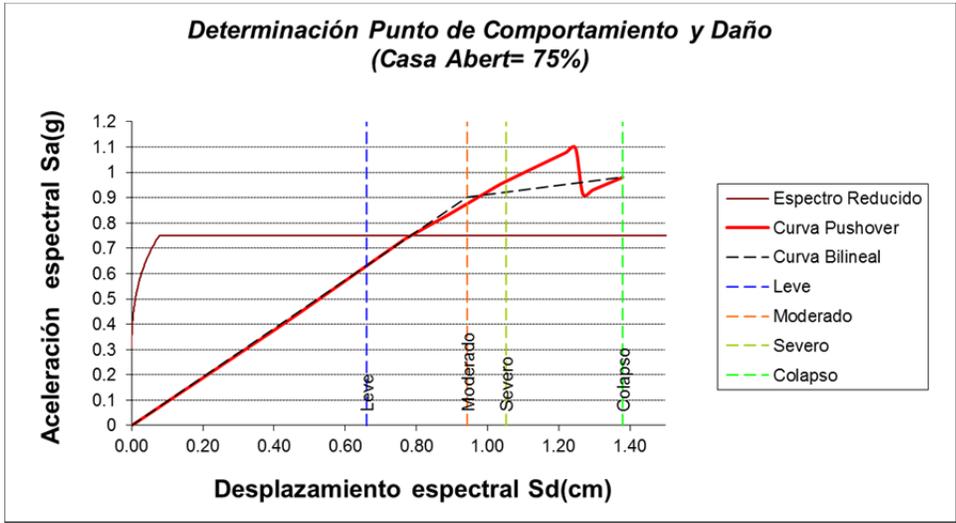


Figura 120. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Abert= 75%)



En la Tabla 37 se muestran las coordenadas espectrales para cada una de las edificaciones y de igual modo los valores de cortante y desplazamiento en el punto de comportamiento.

Tabla 37. Puntos de comportamiento, periodo, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de un piso en el sentido débil

Punto de Comportamiento	Casas Analizadas						
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 15%	Casa Abert 26%	Casa Abert 37%	Casa Abert 50%	Casa Abert 75%	Casa Abert 100%
S_d (cm)	0.075	0.112	0.164	0.236	0.348	1.218	3.547
S_a (g)	0.816	0.812	0.894	0.981	0.725	0.624	0.415
V (Kg)	6254.39	5465.26	5380.13	4705.41	3518.50	2594.00	1559.46
d (cm)	0.08	0.12	0.18	0.28	0.45	1.23	4.02
T_x (s)	0.07	0.09	0.10	0.12	0.14	0.17	0.45

Similar al caso de dos pisos, cuando se modela la edificación de un piso por el método del puntal, se obtienen modelos de menor rigidez respecto a los obtenidos por el método de elementos finitos, lo que conlleva a valores de fuerzas cortantes menores y desplazamientos ligeramente mayores respecto a ellos.

5.6.3.3 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.

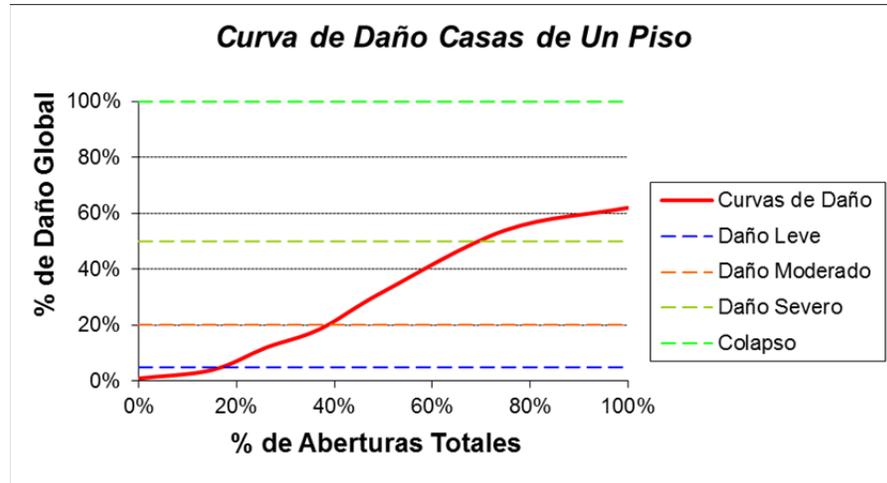
En la tabla siguiente, se presentan los niveles de daño obtenidos para cada edificación en el punto de comportamiento según la metodología WP4.

Tabla 38. Niveles de daño para las casas analizadas

Nivel de Daño	Casas Analizadas (% de Daño Global)						
	Casa Abert 0.0%	Casa Abert 15%	Casa Abert 26%	Casa Abert 37%	Casa Abert 50%	Casa Abert 75%	Casa Abert 100%
% de Daño	0%	4%	12%	19%	32%	54%	62%
Nivel de Daño	Nulo	Leve	Moderado	Moderado	Severo	Colapso	Colapso

A partir de los porcentajes daños obtenidos para cada casa considerada en función del parámetro de aberturas en sus muros confinados, se construye la curva de daño para edificaciones de un piso modelados con el método del puntal que se muestra en la Figura 121.

Figura 121. Curva de daño por aberturas para edificaciones de un piso



5.7 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA EDIFICACIONES CONSIDERANDO CONFINAMIENTO PARCIAL DE LA EDIFICACIÓN. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En esta sección se presenta el análisis para edificaciones de dos pisos de mampostería confinada, considerando el efecto de confinar parcialmente una edificación de mampostería, situación muy recurrente en las casas construidas gradualmente en el tiempo y en muchos casos de manera artesanal, como se evidencia en los estudios de vulnerabilidad llevados a cabo por el grupo INME de la Universidad Industrial de Santander [16].

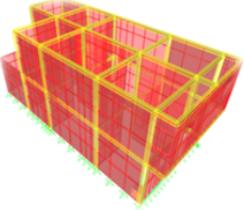
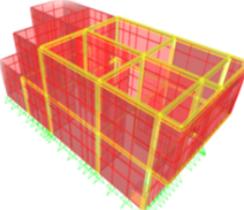
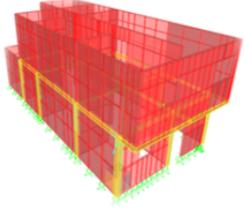
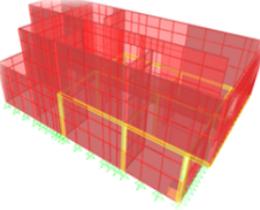
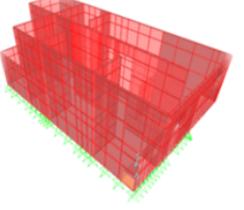
Para tal fin y partiendo de la casa tipo descrita, se proceden a definir edificaciones hipotéticas, variando gradualmente el nivel de confinamiento de la edificación tanto de uno como de dos pisos, en términos de cantidad de muros confinados respecto al número total de muros que hacen parte del sistema resistente. Lo anterior buscando reducir gradualmente el confinamiento de los muros en los diferentes ejes estructurales hasta llegar al caso extremo de tener una edificación con confinamiento nulo (sistema de mampostería simple).

Para el análisis paramétrico, se optó solo por el método de elementos finitos (Elementos Shell y Frames), dado que, la formulación conceptual del método del puntal equivalente se basa en la existencia de pleno confinamiento en los paneles de mampostería; situación que no es posible en la medida que buscamos considerar y modelar desconfinamiento gradual de las edificaciones.

5.7.1 Variación del Parámetro de Aberturas en muros y definición de casos hipotéticos para edificaciones de dos pisos.

En la Tabla 39 se presentan los diferentes casos de confinamiento estudiados para edificaciones de dos pisos.

Tabla 39. Porcentaje de confinamiento para casas tipo en el sentido débil (XZ)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Área Total Muros (m ²)	Área Total Muros No Confinados (m ²)	% Global De Confinamiento
	346.53	0.00	100.00%
	346.53	62.01	82.10%
	346.53	186.67	53.87%
	346.53	248.68	28.24%
	346.53	346.53	0.00%

En la Tabla 39, se puede observar cómo se fue desconfinando gradualmente la edificación, eliminando ejes estructurales de muros confinados, hasta llegar al caso de no presentar ningún muro confinado. Se optó por realizar un

desconfinamiento en el sentido de aplicación de la carga, desde la parte posterior de la edificación hacia el frente de la misma, buscando representar lo que sería más probable que se presentara, proyectando lo que sería el proceso constructivo gradual de la edificación, a medida que se va ampliando en altura.

Lo parámetros de modelamiento corresponden a los mismos empleados para los modelos con aberturas empleando elementos finitos (tipo Shell).

5.7.2 Determinación de la capacidad de las edificaciones de dos pisos propuestas.

Al igual que en los anteriores modelos de dos pisos, se asignó un desplazamiento objetivo de aproximadamente el 1% de la altura del piso. Éste valor variaba según la rigidez del modelo, pero por lo general para edificaciones de dos pisos está alrededor de 2cm a 2.5 cm, Se procede a realizar un análisis de Pushover en el Software Sap2000 para cada uno de los modelos hipotéticos propuestos. Las curvas de capacidad obtenidas o curvas pushover se muestran a continuación (Figura 122 a la Figura 125):

Figura 122. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 100%)

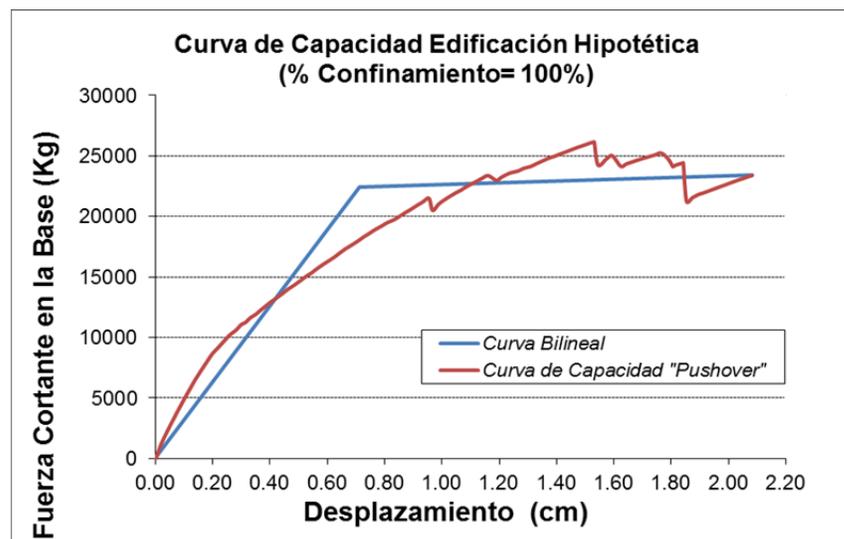


Figura 123. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 82.1%)

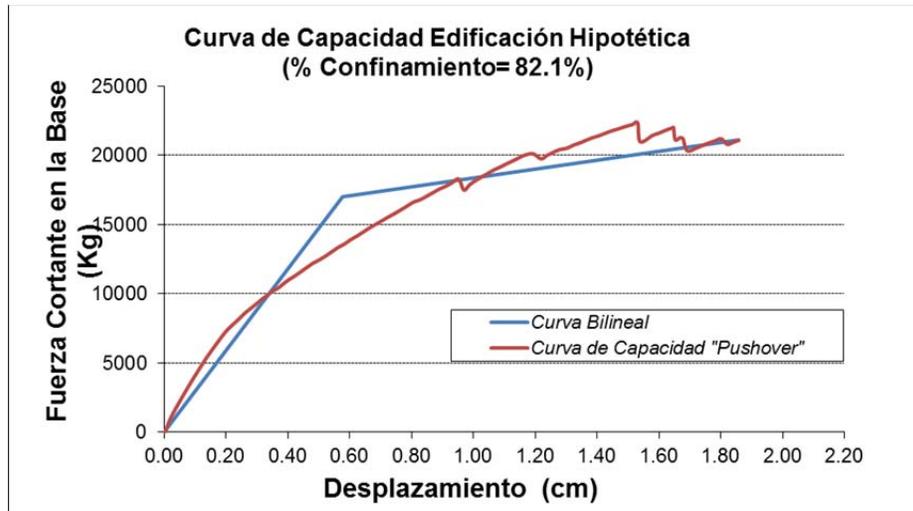


Figura 124. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 53.87%)

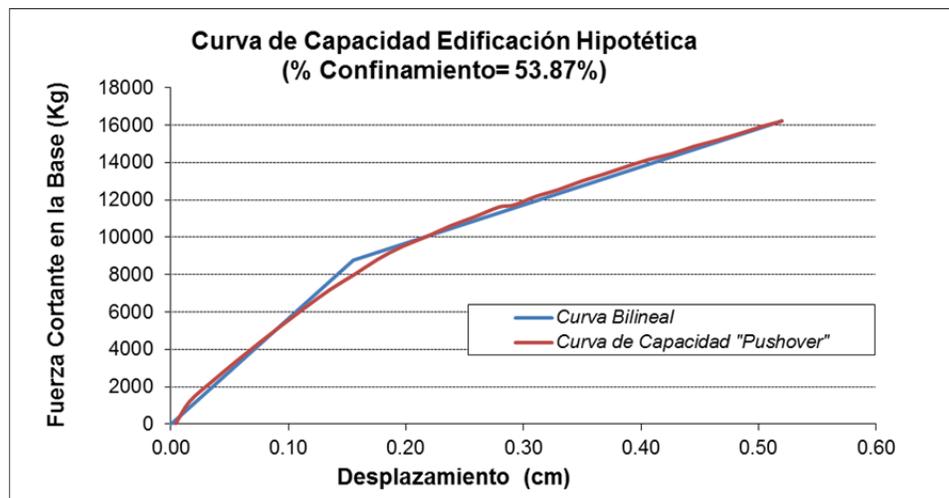
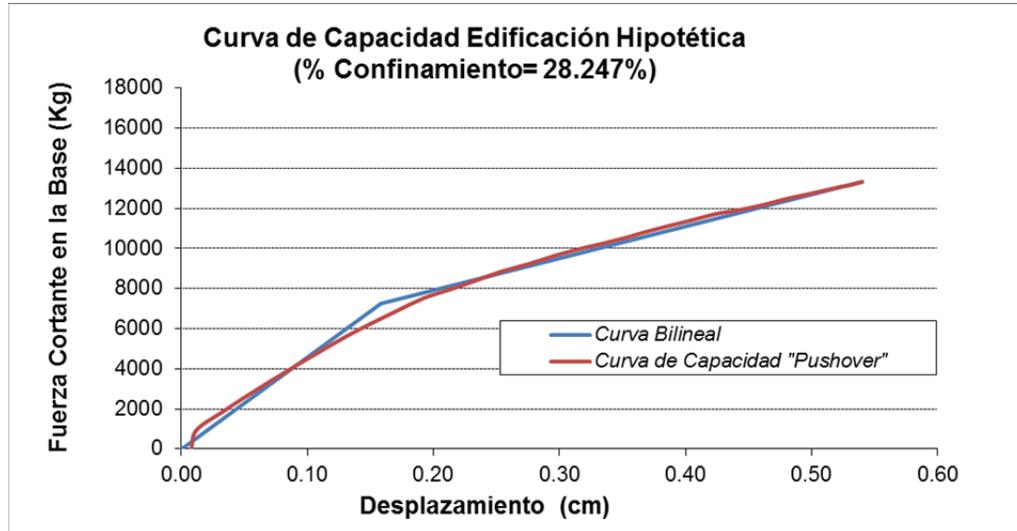


Figura 125. Curva de Capacidad Casa Hipotética (% Confinamiento= 28.247%)



5.7.3 Determinación del punto de comportamiento y nivel de daño en las edificaciones de dos pisos.

Aplicando el mismo procedimiento de las casas de dos pisos modeladas para efectos de aberturas, se define el punto de comportamiento mediante el espectro de capacidad (ATC-40) y los niveles de daño se calculan por la metodología WP4.

Las siguientes figuras (Figura 126 a la Figura 130) muestran de manera gráfica el proceso realizado con la hoja de cálculo y la determinación de los puntos de comportamiento con los respectivos niveles de daño. Cabe resaltar que los resultados mostrados corresponden al análisis realizado en el sentido débil de las edificaciones (Sentido XZ).

Figura 126. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 100%)

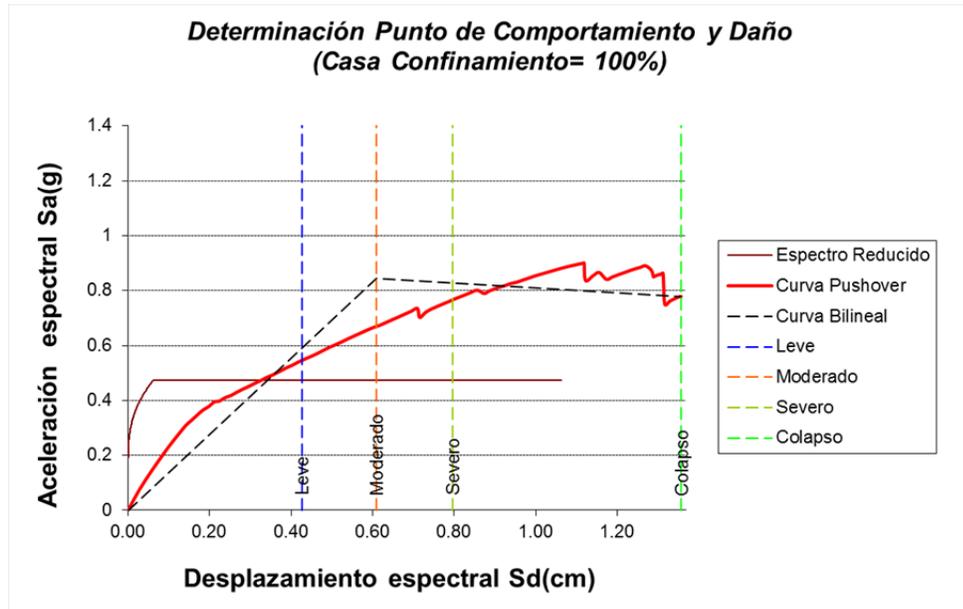


Figura 127. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 82.1%)

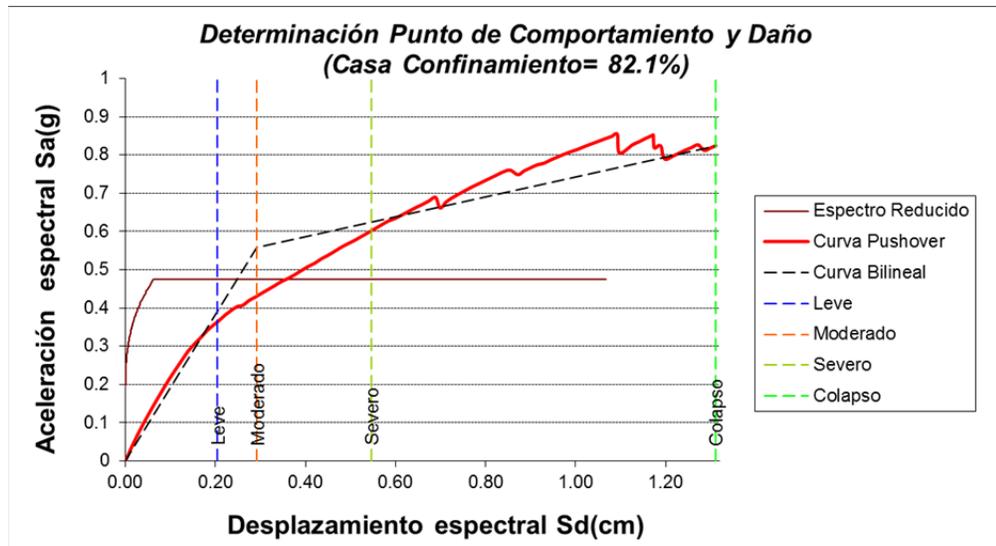


Figura 128. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 53.87%)

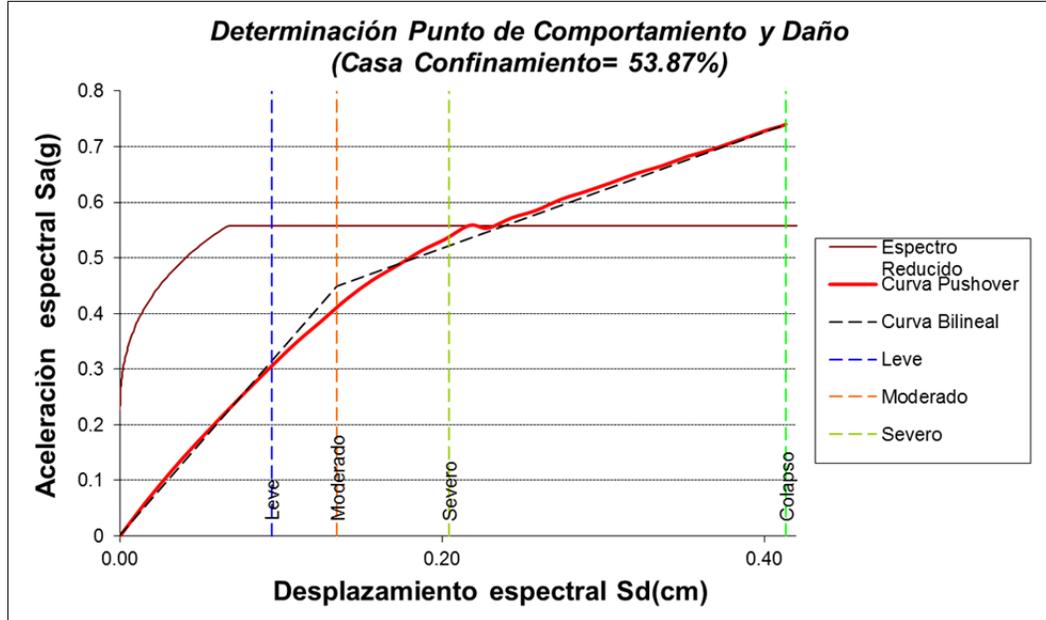


Figura 129. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 28.24%)

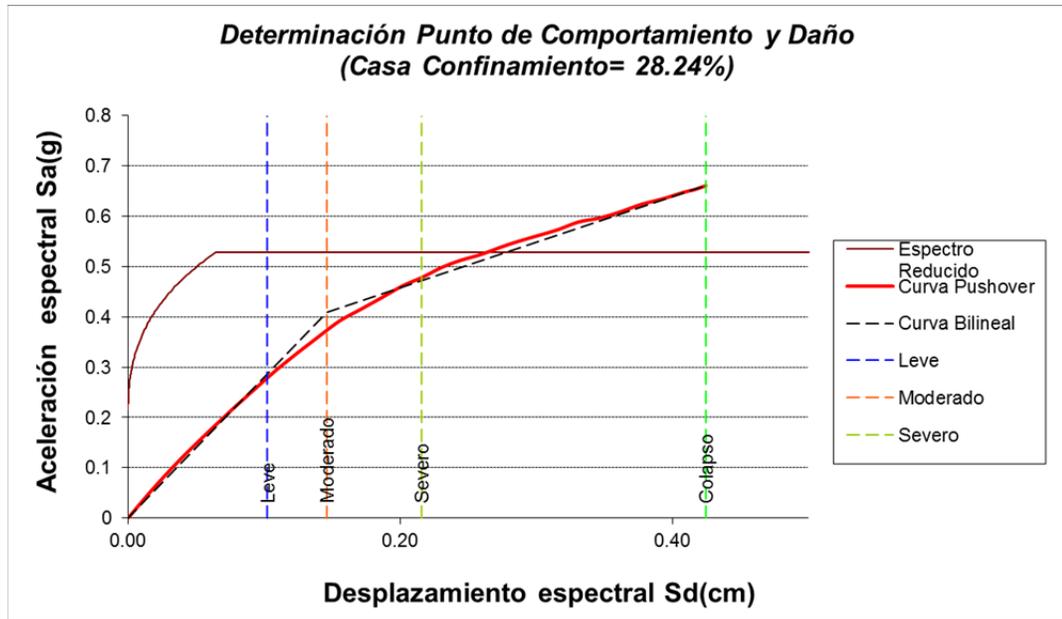
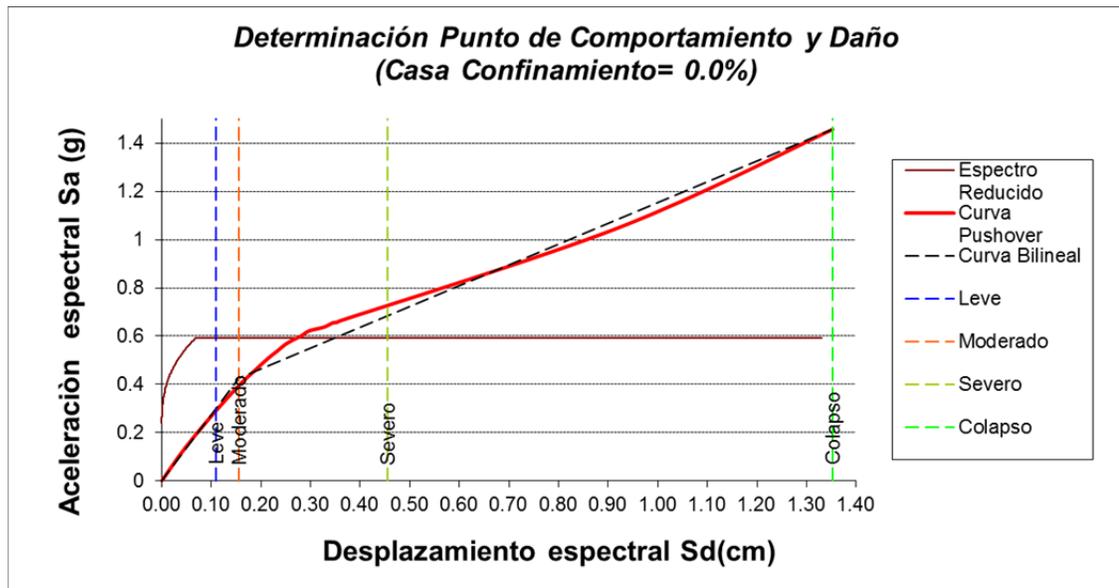


Figura 130. Cálculo del punto de comportamiento y daño (Casa Conf= 0.0%)



En la Tabla 40 se muestran las coordenadas espectrales para cada una de las edificaciones y de igual modo los valores de cortante y desplazamiento en el punto de comportamiento junto a otra información obtenida del análisis.

Tabla 40. Puntos de comportamiento, período, valores de cortante y desplazamiento obtenidos para casas de dos pisos en el sentido débil

Punto de Comportamiento	Casas Analizadas				
	Casa Conf 0.0%	Casa Conf 28%	Casa Conf 54%	Casa Conf 82%	Casa Conf 100%
S_d (cm)	0.271	0.264	0.210	0.355	0.325
S_a (g)	0.599	0.524	0.558	0.477	0.472
V (Kg)	6844.80	10216.13	11616.18	12480.97	13644.66
d (cm)	0.23	0.33	-0.28	0.50	0.44
T_x (s)	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14

En la Tabla 40, se aprecia como en la medida que se reduce el nivel de confinamiento, la edificación, pierde capacidad de deformación y a su vez resistencia, lo que se refleja en la tendencia a disminuir los desplazamientos y la

fuerza constante resistida en la medida que se reducen los ejes confinados de la estructura.

5.7.4 Niveles y curvas de daño para las edificaciones.

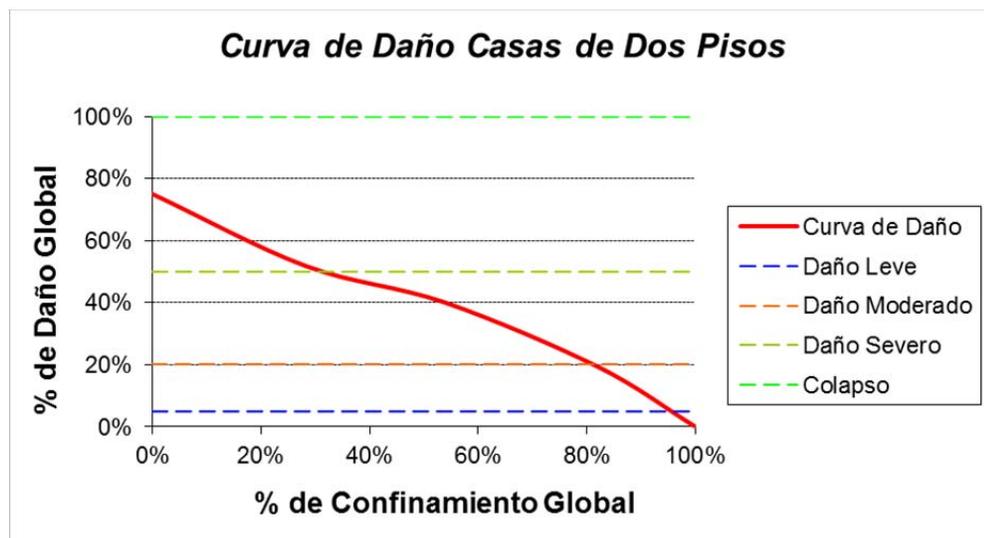
En la Tabla 41, se presentan los niveles de daño obtenidos para cada edificación en el punto de comportamiento según la metodología WP4.

Tabla 41. Niveles de daño para las casas analizadas

Nivel de Daño	Casas Analizadas (% de Daño Global)				
	Casa Conf 0.0%	Casa Conf 28%	Casa Conf 54%	Casa Conf 82%	Casa Conf 100%
% de Daño	75%	52%	40%	19%	0%
Nivel de Daño	Colapso	Colapso	Severo	Moderado	Colapso

A partir de los porcentajes de daño obtenidos para cada casa considerada en función del parámetro de aberturas en sus muros confinados, se construye la curva de daño para edificaciones de dos pisos modelados con el método del puntal que se muestra en la Figura 131.

Figura 131. Curva de daño por confinamiento para edificaciones de dos pisos



5.8 RECOMENDACIONES DE MODELAMIENTO DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

Como resultado de los modelamientos realizados tanto a casas de dos como de un piso por el método del puntal equivalente y método de elementos finitos mediante Shell, se pueden establecer las siguientes observaciones y recomendaciones para macromodelos de mampostería confinada empleando el Software SAP2000:

- ✓ Al tratarse de un análisis no lineal, a los materiales (Mampostería y concreto) se les debe definir previamente una curva esfuerzo Vs deformación, junto con los parámetros de resistencia y módulo de elasticidad con base a los materiales propios de la mampostería a emplear, pues de esta curva dependerá el comportamiento del material y su capacidad de incursionar en el rango inelástico.
- ✓ Para efectos de simplicidad en el modelo, es recomendable modelar sólo los muros portantes que se encuentren dentro de ejes confinados, para ello es fundamental identificar claramente la trayectoria de cargas en la edificación en función del sistema de entrepiso. Los muros restantes como los divisorios y que se consideren que no hagan parte del sistema estructural deben incluirse en el aporte por carga muerta.
- ✓ Otro factor fundamental es la masa de la estructura, la cual debe establecerse claramente, incluyendo todo lo que se pueda considerar carga muerta permanente, tanto de elementos estructurales y no estructurales que hagan parte de edificación, definiendo un caso de masa único para incluir en los casos de análisis que impliquen no linealidad principalmente.
- ✓ El espesor de los muros de mampostería depende en gran medida del espesor del bloque. En el caso de ser perforado, es recomendable emplear

un espesor efectivo en función de la sección maciza neta que contenga el bloque. Éste factor es especialmente importante en los modelos con elementos tipo “Shell”, dado que, el no descontar el área de aberturas puede llegar a sobrerigidizar los muros. Como alternativa, se plantea la opción empleada en el presente trabajo, considerando el sistema de capas en los shells, a partir de los ejes macizos que contenga el bloque.

- ✓ La presencia de recubrimiento de mortero o “frisos” en los muros, fue un parámetro que se consideró en el análisis experimental, en donde los ensayos realizados a muretes con friso, no demostraron conferirle mayor aporte en términos de rigidez o resistencia a la compresión y al cortante a la mampostería, por ende, y de manera conservadora, puede despreciarse su aporte en el proceso de modelado [48].
- ✓ Para el caso de modelamiento con elementos finitos, se realizó una tesis paralela de pregrado, en donde para un muro típico de 3m de base por 2.5m de altura se realizaron diversas particiones, encontrándose que para 16 particiones iguales (4x4), el comportamiento de la estructura tendía a permanecer estable respecto a particiones superiores (8x8) [52]. Lo anterior es fácilmente aplicable en paneles simétricos o sin aberturas. En el caso de presentar aberturas, el mallado debe hacerse en función de los elementos que bordean las aberturas, manteniendo siempre la continuidad de las líneas de división por mallado entre muros adyacentes.
- ✓ En el método del puntal equivalente, se recomienda considerar la excentricidad del puntal, apoyándolo sobre la columneta a una distancia l_{col} de la cara de la viga, dado que en estudios previos [36] se ha evidenciado que la transmisión de carga se hace más entre columna y relleno de mampostería que con la misma viga, garantizando en todo momento que solo trabaje a carga axial de compresión, para ello se pueden liberar los

nodos en sus extremos para evitar la transmisión de momentos. Respecto a sus rótulas plásticas, debe previamente determinarse la resistencia del puntal aplicando las ecuaciones vistas en el capítulo 3, en función de la resistencia de la mampostería y del pórtico confinante. Su rótula se recomienda asignarse en el punto medio del mismo.

- ✓ Para el caso de edificaciones de baja altura (2 pisos) y considerando que la mampostería es un material altamente frágil, al momento de realizar un análisis estático no lineal mediante control por desplazamientos, se sugiere plantear un desplazamiento objetivo inicial alrededor del 0.5% al 1% para casas de uno y dos pisos respectivamente, realizando variaciones de los mismos, en función de la convergencia o no del análisis.
- ✓ En el caso de modelar aberturas en muros por el método del puntal para una estructura a nivel global, es recomendable emplear el factor de reducción del ancho del puntal (R_1) definido en la ecuación 23, en función del porcentaje de área de abertura respecto al área total del muro, el cual arroja resultados semejantes con el método de elementos finitos considerando las aberturas en los elementos "Shell". En el caso de realizar modelamiento detallado como en muros aislados o incluso micromodelamiento al detalle, es preferible seguir las recomendaciones del FEMA-356 y modelar los elementos que rodean la abertura con puntales adicionales que representen de una manera más aproximada la configuración del muro (Ver Figura 28).

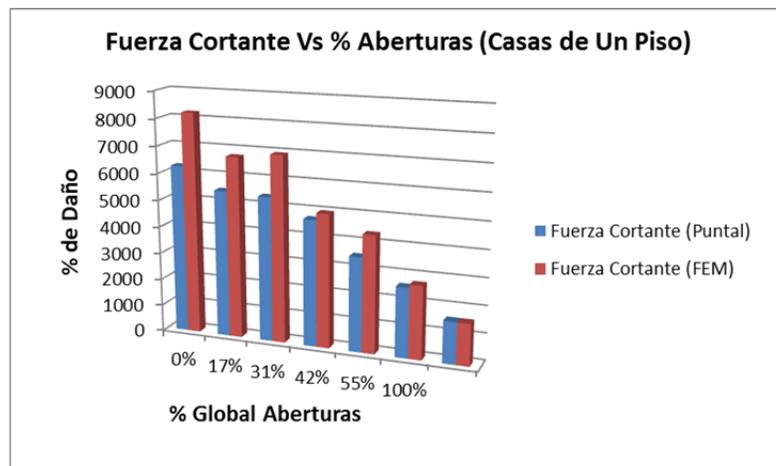
5.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección y como un complemento de las conclusiones, se presenta una comparación acerca de los resultados obtenidos en los análisis paramétricos de las dos irregularidades consideradas (Presencia de aberturas y confinamiento parcial de la edificación) en casas de uno y dos pisos teniendo en cuenta los dos métodos empleados en la modelación.

5.9.1 Por Irregularidades en presencia de aberturas y confinamiento parcial en función del método de modelamiento empleado y daño obtenido

Para el caso del parámetro de aberturas en los paneles de mampostería, se llevó a cabo el análisis por dos métodos, buscando representar los muros de mampostería como un puntal equivalente en compresión y para el caso del Método de Elementos Finitos (MEF), representando los muros como un elemento tipo Shell. Al realizarse el análisis paramétrico y obtener las curvas de capacidad con base a lo estipulado en el ATC-40, se pudo establecer un punto de comportamiento para cada casa en función de la demanda. Al evaluar la fuerza cortante resistida por cada edificación en su respectivo punto de comportamiento, se aprecian valores diferentes en función del método de modelado. Figura 132

Figura 132. Valores de Fuerza Cortante por efecto de aberturas, casas de un piso

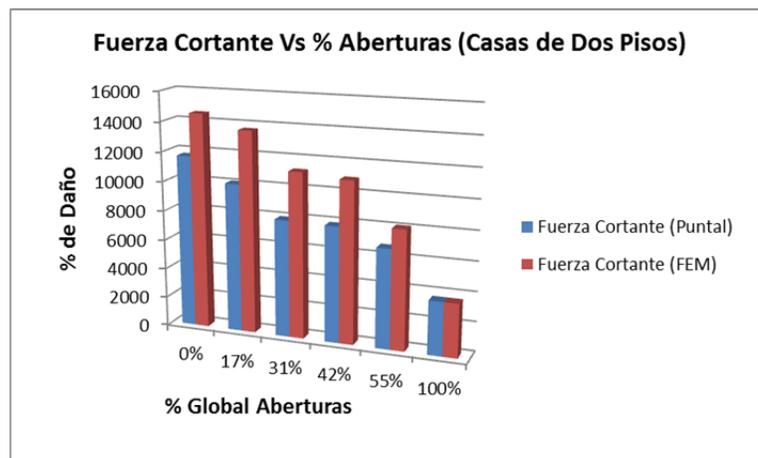


La Figura 132 representa los porcentajes de daño globales en la edificación versus el porcentaje global de aberturas para casas de un piso, calculado como:

$$\frac{\text{área total muros confinados}}{\text{área total de aberturas}}$$

En ella se observa, que cuando modelamos la mampostería como un Shell, basados en elementos finitos (FEM) las edificaciones alcanzan resistencia más elevadas. Ésta misma situación se observa en las edificaciones de dos pisos (Ver Figura 133).

Figura 133. Valores de Fuerza Cortante por efecto de aberturas, casas de dos pisos



El anterior hecho, muestra que para el caso de elementos finitos, los modelos presentan una mayor rigidez alcanzando no solo mayores valores de fuerza cortante, sino a su vez, menores desplazamientos (Ver Tablas 25 y 30). Teniendo los mayores grados de dispersión en los casos iniciales cuando la presencia de aberturas en los muros está por debajo del 40%.

Como una consecuencia de lo anteriormente expuesto, al comparar los niveles de daño alcanzados por presencia de aberturas, en función del método de modelamiento empleado, también se observan curvas de daño, ligeramente desfasadas, alcanzando niveles de daño mayores cuando modelamos la mampostería como un puntal equivalente. Ver Figura 134 y Tabla 42.

Figura 134. Porcentajes de daño para casas de un piso. Método FEM y Método Puntal

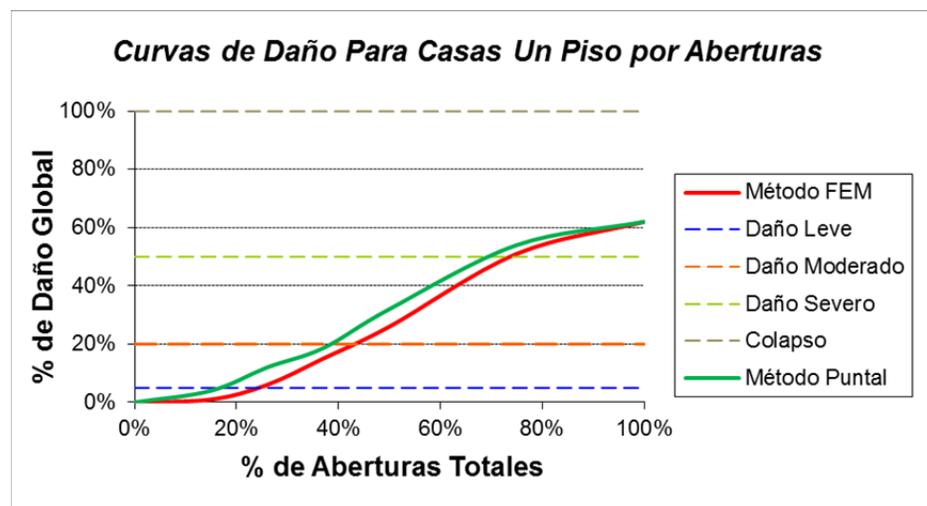


Tabla 42. Porcentajes de daño para casas de un piso. Método FEM y Método Puntal

% de Aberturas	% de Daño		Estado de Daño	
	Método FEM	Método Puntal	Método FEM	Método Puntal
0%	0%	0%	Nulo	Nulo
15%	1%	4%	Leve	Leve
26%	6%	12%	Moderado	Moderado
37%	15%	19%	Moderado	Moderado
50%	26%	32%	Severo	Severo
75%	51%	54%	Colapso	Colapso
100%	62%	62%	Colapso	Colapso

En la Tabla podemos observar que aunque no son del todo coincidentes los porcentaje de daño por ambos métodos, al comparar el estado de daño (Leve,

moderado, severo, colapso) en que se encuentran las edificaciones de un piso para un mismo porcentaje de aberturas, éstos si tienden a ser coincidentes. Esta misma tendencia se aprecia en las edificaciones de dos pisos (Ver Figura 135), en donde la diferencia tanto en los porcentajes como en los estados de daño es mayor respecto a las casas de un piso. Ver Tabla 43.

Figura 135. Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM y Método Puntal

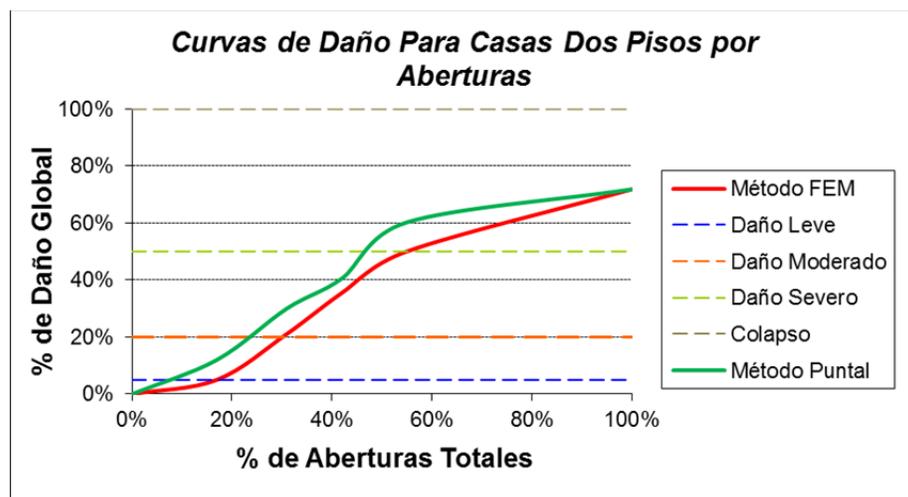


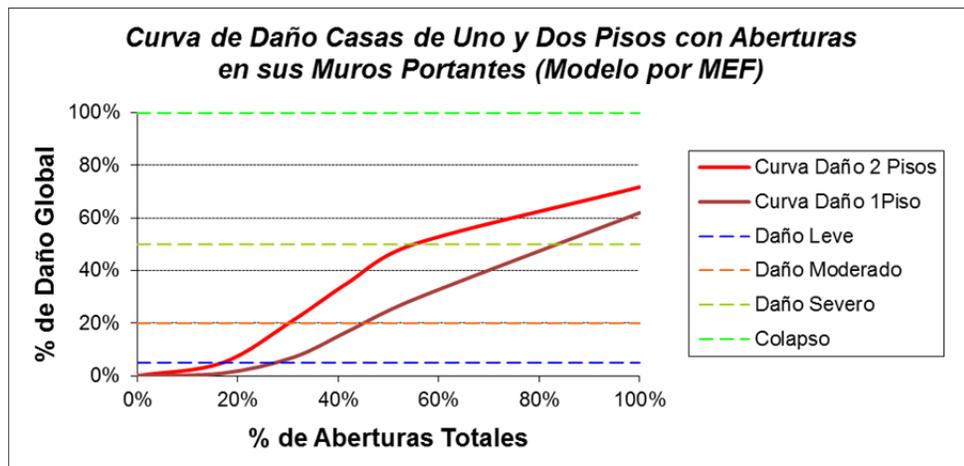
Tabla 43. Porcentajes y Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM y Método Puntal

% de Aberturas	% de Daño		Estado de Daño	
	Método FEM	Método Puntal	Método FEM	Método Puntal
0%	0%	0%	Nulo	Nulo
17%	5%	12%	Leve	Moderado
31%	21%	30%	Severo	Severo
42%	35%	41%	Severo	Severo
55%	50%	60%	Colapso	Colapso
100%	72%	72%	Colapso	Colapso

Finalmente, en la Figura 136, se hace la comparación entre los porcentajes y estados de daños entre casas de uno y dos pisos por presencia de aberturas

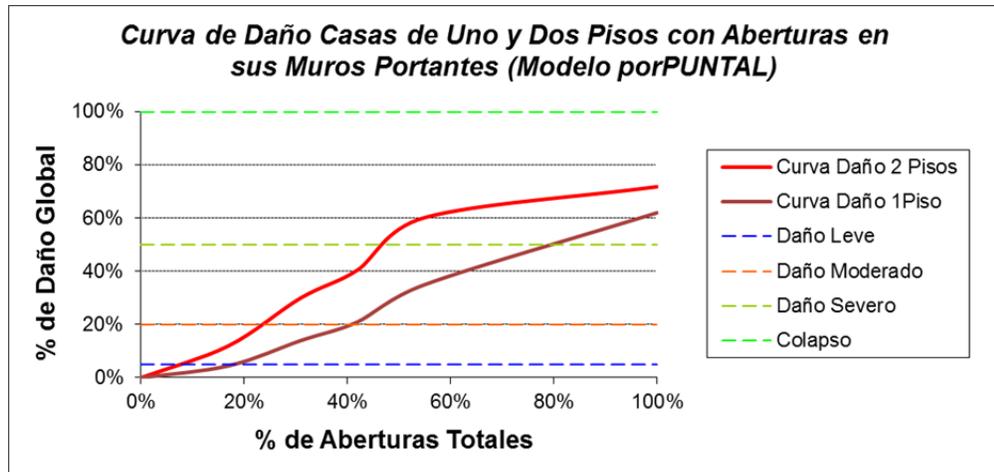
modeladas por elementos finitos “FEM”, reflejándose como para el caso de edificaciones de dos pisos, para una misma relación de porcentaje de aberturas, se alcanzan valores de daño mayores en las casas de dos pisos, siendo éste último caso el más crítico.

Figura 136. Niveles de daño para casas de uno y dos pisos. Método FEM



La Figura 136 muestra como para un porcentaje de 30% de aberturas, cuyo valor es cercano a los porcentajes de aberturas en una edificación promedio [16] (alrededor del 20%) la casa de un piso estaría en un nivel de daño Moderado (daño del 17%) mientras la casa de dos pisos se encontrará en el estado inmediatamente superior o Severo (daño del 21%). Ésta misma tendencia la encontramos en los modelos con el método del puntal. Ver Figura 137.

Figura 137. Niveles de daño para casas de uno y dos pisos. Método Puntal



El análisis paramétrico de la incidencia por presencia de confinamiento parcial en una edificación de dos pisos, se realizaron solo por método de elementos finitos FEM, dada la imposibilidad de implementar sistema de puntales equivalente en muros que no presentan confinamiento. El proceso consistió en partir de una edificación típica de dos pisos totalmente confinados, e ir desconfinando gradualmente hasta llegar al caso de una estructura sin confinamiento alguno. Lo anterior con base en lo que sería una construcción gradual de la edificación partiendo de la existencia de un nivel totalmente confinado y la posterior ampliación en altura. Situación encontrada en la mayoría de viviendas de la región en estudios anteriores [16]

La curva de daño mostrada en la Figura 137, junto con la Tabla 44, nos muestra una considerable susceptibilidad de la edificación ante éste parámetro

Tabla 44. Porcentajes y Niveles de daño para casas de dos pisos. Método FEM

% de Aberturas	% de Daño	Estado de Daño
100%	0%	<i>Nulo</i>
82%	19%	<i>Moderado</i>
54%	40%	<i>Severo</i>
28%	52%	<i>Colapso</i>
0%	75%	<i>Colapso</i>

El mínimo cambio, en términos de eliminar un eje de muros confinados por ejemplo (18% del confinamiento total), aunque porcentualmente implique una mínima reducción en el confinamiento de la edificación, éste leve incremento de la irregularidad podría implicar el pasar de un estado de no daño a un nivel moderado ante un evento sísmico

5.9.2 Comparación por métodos de modelamiento en término de curvas de capacidad (Pushover)

Una forma de visualizar la diferencia existente entre el método del puntal equivalente y el método de elementos finitos FEM con elementos Shell, es superponer las curvas obtenidas de los análisis no lineales realizados.

✓ **Comparación de Curvas de Capacidad para diferentes porcentajes de aberturas en casas de un piso por Método FEM y Método Puntal**

En las Figuras 138 y 139, se observa la superposición de las curvas de capacidad para un piso para diferentes porcentajes de aberturas.

Figura 138. Modelo Puntal y FEM. Casas de un piso (Abert= 0.0%)

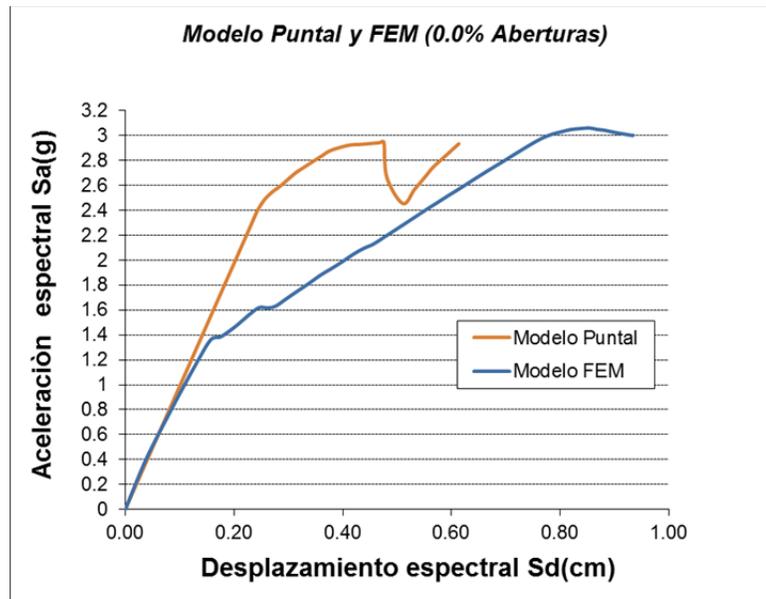
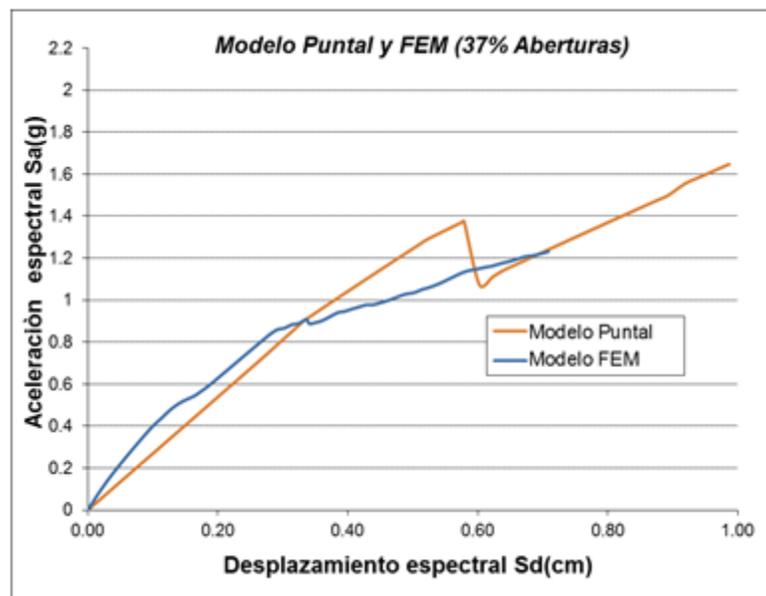


Figura 139. Modelo Puntal y FEM. Casas de un piso (Abert= 37%)



De las curvas podemos deducir, que el mayor grado de coincidencia en las curvas se presenta en los tramos iniciales, en las zonas elásticas de la curva antes de alcanzar el desplazamiento de fluencia y darse el primer agrietamiento.

En las zonas de comportamiento elástico de las curvas, también se observa que los modelos FEM, desarrollan valores más grandes de aceleración espectral en comparación con los modelos puntal, resultando en resistencias mayores de las estructuras.

✓ **Comparación de Curvas de Capacidad para diferentes porcentajes de aberturas en casas de dos piso por Método FEM y Método Puntal**

En las Figuras 140 y 141, se observa la superposición de las curvas de capacidad para dos pisos para diferentes porcentajes de aberturas.

Figura 140. Modelo Puntal y FEM. Casas de dos pisos (Abert= 0.0%)

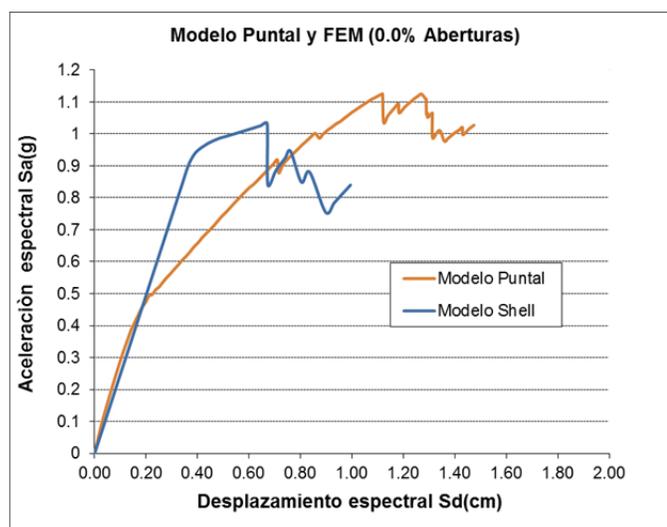
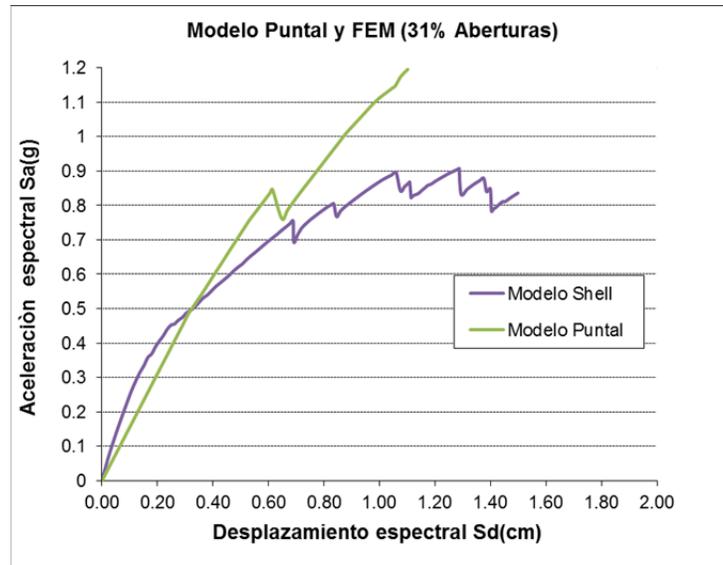


Figura 141. Modelo Puntal y FEM. Casas de dos pisos (Abert= 31%)



De manera similar a las edificaciones de dos pisos, las curvas de los modelos mediante elementos finitos, reflejan una mayor rigidez inicial, producto de considerarse la presencia plena del muro en los paneles.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio se centró en determinar la incidencia de irregularidades por presencia de aberturas en los muros y confinamiento parcial de las estructuras en la respuesta resistente de edificaciones típicas de mampostería para casas de uno y dos pisos ante la demanda sísmica producida por el espectro elástico de diseño dado en la norma NSR-10 obtenido con parámetros de la ciudad de Bucaramanga (Ver sección 5.1.1.3), obteniéndose las siguientes conclusiones:

- ✓ Respecto a los Métodos de modelamiento llevados a cabo en el Software SAP2000, se encontró que modelar una estructura de mampostería confinada con elementos Shell, aplicando método de elementos finitos da como resultado modelos con mayor rigidez y resistencia respecto a los modelados con puntales equivalentes, lo cual explica los incrementos en fuerzas cortantes y respectivas disminuciones en los periodos y deformaciones y cambios sustanciales en las aceleraciones espectrales (Ver Tablas 25, 30, 34, 38 y 40). Esto se reflejó a su vez, en los valores de desplazamiento ligeramente menores medidos en el punto de comportamiento de las edificaciones, siendo del orden del 10% al 20% menor respecto a los desplazamientos obtenidos por el método del puntal.

En términos de fuerzas cortantes producto del análisis pushover, también se observa igual comportamiento, obteniendo para los diferentes casos de aberturas, valores por el método de elementos finitos superiores del orden del 20% al 28% superiores respecto a los modelos con el puntal.

Éste comportamiento relativamente superior al modelar los muros como elementos Shell, puede deberse principalmente a la interacción que se produce en la longitud de contacto entre los elementos confinantes (Vigas y

columnas) y los muros de mampostería, factor que no se considera directamente al modelar solo con puntales en la dirección diagonal del muro. Al emplearse un modelo de elementos finitos con Shell, éste se representa con las dimensiones reales del muro, y están en contacto directo con los elementos tipo frame que representan las columnas y vigas, limitando en mayor que medida que el elemento diagonal los desplazamientos y deformaciones de tales elementos, a manera de ejemplo, las vigas ven afectado directamente su comportamiento a flexión, debido a que las deflexiones se ven delimitadas producto de la presencia del muro y su contacto directo con el mismo.

Como consecuencia de lo anterior, al evaluar el daño en las casas modeladas con puntales, se encuentran porcentajes de daño mayores el evaluado por el método de elementos finitos. No obstante, al construir las curvas de daños por los dos métodos, se encontró que las discrepancias de los métodos no producían variaciones que afectaran significativamente los resultados en las curvas de daño, en el sentido de que no se produce un considerable incremento en los estados de daño al comparar las dos curvas. Es decir, al evaluar una edificación con cierto porcentaje de irregularidad y entrar a las curvas obtenidas por ambos métodos, se obtendrán porcentajes distintos de daño, pero los estados de daño como tal (nulo, leve, moderado, severo y colapso) tenderán a ser iguales.

La anterior conclusión, nos permite establecer que para eventos de evaluar la respuesta resistente de manera preliminar de una edificación con base en las irregularidades abordadas en esta investigación, se podría emplear cualquier de las dos curvas. El paso siguiente sería verificarlas a partir de ensayos experimentales a escala que representen las condiciones evaluadas en esta investigación.

- ✓ En cuanto al daño obtenido superponiendo las curvas por FEM y Puntal, considerando SÓLO el criterio de aberturas, se puede concluir que para una edificación de mampostería confinada con aberturas promedio (menos del 20% respecto al área total de muros confinados) en la ciudad de Bucaramanga ante la demanda sísmica de la NSR-10, en el caso de presentar un solo piso tendrá un daño global LEVE con porcentajes de daño no superiores al 5%. En el caso de edificaciones de dos pisos se clasificarán con estado de daño MODERADO, con porcentajes de daño no mayores al 15%.

- ✓ Respecto al caso de los sistemas de confinamiento parcial, se observó una considerable afectación con pequeñas disminuciones en los porcentajes de confinamientos. Dada la fragilidad de la mampostería, los elementos confinantes (vigas y columnas) son los que confieren la ductilidad al sistema, y determinan en gran medida la capacidad de la estructura luego de que se produce la fluencia (Primer agrietamiento). Por ende, a medida que la edificación pierde confinamiento, pierde gradualmente la capacidad de disipación de energía, lo que se traduce en una pérdida considerable en la respuesta resistente de la misma. Esto se reflejó en los modelos en donde para una casa de dos pisos, una disminución del 18%, (eliminar un eje confinado del segundo nivel), representó el pasar de un estado nulo de daño (0.0%) a un estado moderado de daño (19%). La situación más común que se ha visualizado en las edificaciones en la ciudad de Bucaramanga y registrado en estudios anteriores realizados por el grupo INME, es el caso donde se confina el primer nivel y posteriormente se amplía en altura construyendo un segundo nivel en solo mampostería simple, sin confinamiento alguno [16]. Para este caso, el nivel de confinamiento es alrededor del 54% y se traduce en daño potencial ante un evento sísmico del 40%, lo cual implica daños de tipo severo, acorde a la metodología de evaluación de daño empleada. Al ser esta condición, tan

frecuente en las edificaciones locales, construidas sin supervisión técnica y de manera artesanal, serían las edificaciones que sufrirían mayores afectaciones para el sismo de diseño considerado.

- ✓ Este trabajo de investigación, logró aportar información valiosa en la línea de investigación del grupo INME referente a vulnerabilidad sísmica en entornos urbanos, en términos de establecer criterios de modelamiento para sistemas de mampostería confinada, junto con parámetros de daño para edificaciones que presenten irregularidades de tipo aberturas en muros y confinamientos parciales. Posibles mejoras y complemento a la presente investigación, sería plantear proyectos de investigación futuros en donde se construyan modelos experimentales, inicialmente de muros confinados aislados, simulando las condiciones e irregularidades modeladas analíticamente en este trabajo, con el fin de corroborar las curvas de daño obtenidas; lo anterior como pasos previos, a lo que sería el llegar a implementar un modelo a escala de una edificación de mampostería confinada.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Bogotá D.C. Títulos A, D y E, 2010.
- [2] J. Arango, Edificios Altos de Mampostería en Arcilla, *Terracota*, Bogotá, 2001.
- [3] D. Ruíz, Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales, *Journal of Cultural Heritage Studies*, Vol 25 No 2, Bogotá, 2012.
- [4] J. Jaramillo, Ingeniería Estructural I: Mampostería Estructural, Curso Virtual, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [5] C. Leal y J. Martínez, Estudio Experimental en Muros y Fachadas de Mampostería, Tesis presentada como requisito para el título de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia 1997.
- [6] R. Meli, Comportamiento sísmico de muros de mampostería”, 2ª edición, Informe No. 352, Instituto de Ingeniería, UNAM, México. Mayo 1979.
- [7] ACI 530-99. Building Code Requirements for masonry structures. American Concrete Institute, 1999.
- [8] A. Tena y E. Miranda, Edificaciones de Mampostería para Vivienda, Fundación ICA, ISBN 968-7508 65-5, Tercera Edición, 2003.
- [9] FEMA 154/Report ATC-21, Rapid Visual Screening of Building For Potential Seismic Hazard, Washington, 1988.
- [10] European Seismological Commission, European Macroseismic Scale EMS-98. Editor G Grünthal, Luxemburgo, 1998.
- [11] D. Benedetti y V. Petrini, Sulla vulnerabilità sísmica di edifici in muratura, Prioste di un método di valutazione, L'industria delle Costruzioni Roma, 1984.

- [12] O.D. Cardona y J.E. Hurtado, Propuesta Metodológica para los Análisis de Vulnerabilidad. Informe de Consultoría Proyecto UNDRO/ACDI/ONAD para la Mitigación de Riesgos en Colombia, Inédito, Santiago de Cali, 1990.
- [13] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, San Salvador, 2001.
- [14] Applied Technology Council California ATC-13, Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13, Redwood City, California, 1985.
- [15] G. Chío y E. Maldonado, Vulnerabilidad Sísmica en Centros Urbanos, Universidad Industrial de Santander. División de Publicaciones UIS, ISBN: 978-958-44-3735-8, Primera Edición, 2008.
- [16] Universidad Industrial de Santander Grupo INME-Alcaldía de Bucaramanga-CDMB, Apoyo en la Planificación para el Manejo y Atención del Riesgo Natural y Antrópico en el Área de Jurisdicción de la CDMB, 2011.
- [17] I. Araujo, Generación de Funciones de Vulnerabilidad para Edificaciones de Mampostería no Reforzada de Baja Altura Utilizando Técnicas de simulación, Tesis presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [18] H. Soto, Criterios de Estructuración de Edificios, Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil, México, 2006.
- [19] S. Alcocer Y L. Flores, Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México. Diciembre 2000.
- [20] E. Bazán, Muros de Mampostería ante Cargas Laterales Estudios Analíticos, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM. México. Septiembre 1980.
- [21] M. Moroni, M. Aztroza y S. Tavonatt. "Nonlinear Models for Shear Failure in Confined Masonry Walls", The Masonry Society Journal, Volumen 12, Número 2. Febrero 1994, 72-77 pp.

- [22] M. Tomazevic y I. Klemenc, "Verification of Seismic Resistance of Confined Masonry Buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 1073-1088, (1997a).
- [23] M. Tomazevic y I. Klemenc, "Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 1059-1071, (1997b).
- [24] M. Puglisi, *Modelo del Comportamiento de la Mampostería Confinada Basado en la Teoría del Daño*, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Venezuela, 2007.
- [25] D. Mallick y R. Severn, *The Behavior of Infilled Frames under Static Loading*, *Proceeding of the Institution of Civil Engineering*, Vol.38, pp. 639-656, 1967.
- [26] T. Liauw y C. Lo, *Multi-bay infilled frames without shear connectors*, *ACI Structural Journal*, pp. 423-428, July-August 1988.
- [27] F. Crisafulli, A. Carr y R. Park, *Analytical modeling of infilled frame structures. A general Review*. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Vol. 33, No.1, pp. 30-47, March 2000.
- [28] F. Sarmiento, *Modelado de muros heterogéneos usando técnicas de homogeneización*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela, 1994.
- [29] Y. Chiou, J. Tzeng y Y. Liou, *Experimental and analytical study of masonry infilled frames*. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1109-1117, October 1999.
- [30] D. Arellano, *Modelo de comportamiento de muros de mampostería a compresión uniaxial*, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Venezuela, Mayo 1997.
- [31] T. Salonikios, C. Karakostas, V. Lekidis y A. Anthoine, *Comparative inelastic pushover analysis of masonry frames*". *Engineering Structures* 25, pp. 1515-1523, 2003.

- [32] A. Mohebkhah, A. Tasnimi, Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches”. Engineering Structures 33, pp. 968-980, 2011.
- [33] A. Chang Xu, Modeling of influence of heterogeneity on mechanical performance of unreinforced masonry shear walls. Construction and Building Materials 26, 2012.
- [34] B. Stafford Smith, Lateral stiffness of infilled frames. J Struct Div, ASCE, 88(ST6), pp. 183–99, 1962.
- [35] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington (DC), 2000.
- [36] G. Al-Chaar, Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures, US Army Corps of Engineers, Washington DC, January 2002.
- [37] W. Carrillo, Modelación del comportamiento inelástico de pórticos de concreto con mampostería no reforzada, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, 2004.
- [38] P.G. Asteris y C.Z. Chrysostomou, On the in-plane properties and capacities of infilled frames, Engineering Structures 41, pp. 385-402, 2012.
- [39] K. Wisniewski, Finite Rotation Shells: Basic Equations and Finite Elements for Reissner Kinematics (Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences), Springer, ISBN-10: 9048187605, 2010 edition.
- [40] O. Zuñiga y A. Terán. “Evaluación Basada en Desplazamientos de Edificaciones de Mampostería Confinada”. Revista de Ingeniería Sísmica No. 79 25-48. 2008.
- [41] A. Viviescas, Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano, Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Julio 2009.
- [42] P. Roca, Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models, Construction and Building Materials 20, pp. 229-238, 2006.

- [43] M. Kose, Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls, *Engineering Structures* 31, pp. 93-102, 2009.
- [44] M. Shariq, H. Abbas, H. Irtaza y M. Qamaruddin, Influence of openings on seismic performance of masonry building walls, *Building and Environment* 43, pp. 1232–1240, 2008.
- [45] J. Paquette y M. Bruneau, Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry building with flexible diaphragm and comparison with existing procedures, *Construction and Building Materials* 20, pp. 220–228, 2006.
- [46] Applied Technology Council - ATC 40. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1", State of California (U.S.), 1996.
- [47] NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 273, prepared by the Applied Technology Council (ATC-33 project) for the Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington (DC), 1997.
- [48] B. Osma y G. Hernández, Evaluación del módulo de elasticidad de la mampostería utilizada en Bucaramanga mediante ensayos de muretes, Tesis presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.
- [49] L. Wilson, Análisis estático y dinámico de estructuras, Editora Búho, ISBN: 978-9945-16-313-1, 2009.
- [50] Z. Milutinovic, G. Trendafiloski, WP4 Vulnerability of current buildings. RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contrato No. EVK4-CT-2000-00014, 108 pp, 2003.
- [51] M. Miranda y O. Rojas, Curvas de comportamiento de un muro construido con variaciones en la calidad y tipología de las unidades de mampostería, Tesis presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014

- [52] S. Alcocer, Envolvente de resistencia lateral de piso para estructuras de mampostería confinada. Revista de Ingeniería Sísmica No. 89, México 2013.
- [53] B. Stafford Smith y C. Carter, A Method of Analysis for Infilled Frames, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Vol. 44, pp. 31-48, 1969.
- [54] E. Maldonado, Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal, Revista Ingenierías Universidad de Medellín Vol 5 No 9, Medellín 2006.
- [55] M. Taveras, Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, México 2008.

BIBLIOGRAFÍA

A. Chang Xu, Modeling of influence of heterogeneity on mechanical performance of unreinforced masonry shear walls. *Construction and Building Materials* 26, 2012.

A. Mohebkhah, A. Tasnimi, Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches”. *Engineering Structures* 33, pp. 968-980, 2011.

A. Tena y E. Miranda, Edificaciones de Mampostería para Vivienda, Fundación ICA, ISBN 968-7508 65-5, Tercera Edición, 2003.

A. Viviescas, Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano, Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Julio 2009.

ACI 530-99. Building Code Requirements for masonry structures. American Concrete Institute, 1999.

Applied Technology Council - ATC 40. “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1”, State of California (U.S.), 1996.

Applied Technology Council California ATC-13, Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13, Redwood City, California, 1985.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, San Salvador, 2001.

B. Osma y G. Hernández, Evaluación del módulo de elasticidad de la mampostería utilizada en Bucaramanga mediante ensayos de muretes, Tesis presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014.

B. Stafford Smith y C. Carter, A Method of Analysis for Infilled Frames, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Vol. 44, pp. 31-48, 1969.

B. Stafford Smith, Lateral stiffness of infilled frames. *J Struct Div*, ASCE, 88(ST6), pp. 183–99, 1962.

C. Leal y J. Martínez, Estudio Experimental en Muros y Fachadas de Mampostería, Tesis presentada como requisito para el título de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia 1997.

Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Bogotá D.C. Títulos A, D y E, 2010.

D. Arellano, Modelo de comportamiento de muros de mampostería a compresión uniaxial, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Venezuela, Mayo 1997.

D. Benedetti y V. Petrini, Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura, Prioste di un método di valutazione, L'industria delle Costruzioni Roma, 1984.

D. Mallick y R. Severn, The Behavior of Infilled Frames under Static Loading, Proceeding of the Institution of Civil Engineering, Vol.38, pp. 639-656, 1967.

D. Ruíz, Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales, *Journal of Cultural Heritage Studies*, Vol 25 No 2, Bogotá, 2012.

E. Bazán, Muros de Mampostería ante Cargas Laterales Estudios Analíticos, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM. México. Septiembre 1980.

E. Maldonado, Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal, Revista Ingenierías Universidad de Medellín Vol 5 No 9, Medellín 2006.

European Seismological Commission, European Macroseismic Scale EMS-98. Editor G Grünthal, Luxemburgo, 1998.

F. Crisafulli, A. Carr y R. Park, Analytical modeling of infilled frame structures. A general Review. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Vol. 33, No.1, pp. 30-47, March 2000.

F. Sarmiento, Modelado de muros heterogéneos usando técnicas de homogeneización, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela, 1994.

FEMA 154/Report ATC-21, Rapid Visual Screening of Building For Potential Seismic Hazard, Washington, 1988.

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

G. Al-Chaar, Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures, US Army Corps of Engineers, Washington DC, January 2002.

G. Chío y E. Maldonado, Vulnerabilidad Sísmica en Centros Urbanos, Universidad Industrial de Santander. División de Publicaciones UIS, ISBN: 978-958-44-3735-8, Primera Edición, 2008.

H. Soto, Criterios de Estructuración de Edificios, Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil, México, 2006.

I. Araujo, Generación de Funciones de Vulnerabilidad para Edificaciones de Mampostería no Reforzada de Baja Altura Utilizando Técnicas de simulación, Tesis presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.

J. Arango, Edificios Altos de Mampostería en Arcilla, *Terracota*, Bogotá, 2001.

J. Jaramillo, Ingeniería Estructural I: Mampostería Estructural, Curso Virtual, Universidad Nacional de Colombia, 2013.

J. Paquette y M. Bruneau, Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry building with flexible diaphragm and comparison with existing procedures, *Construction and Building Materials* 20, pp. 220–228, 2006.

K. Wisniewski, Finite Rotation Shells: Basic Equations and Finite Elements for Reissner Kinematics (Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences), Springer, ISBN-10: 9048187605, 2010 edition.

L. Wilson, Análisis estático y dinámico de estructuras, Editora Búho, ISBN: 978-9945-16-313-1, 2009.

M. Kose, Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls, *Engineering Structures* 31, pp. 93-102, 2009.

M. Miranda y O. Rojas, Curvas de comportamiento de un muro construido con variaciones en la calidad y tipología de las unidades de mampostería, Tesis

presentada como requisito para el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2014

M. Moroni, M. Aztroza y S. Tavonatti, "Nonlinear Models for Shear Failure in Confined Masonry Walls", *The Masonry Society Journal*, Volumen 12, Número 2. Febrero 1994, 72-77 pp.

M. Puglisi, *Modelo del Comportamiento de la Mampostería Confinada Basado en la Teoría del Daño*, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Venezuela, 2007.

M. Shariq, H. Abbas, H. Irtaza y M. Qamaruddin, Influence of openings on seismic performance of masonry building walls, *Building and Environment* 43, pp. 1232–1240, 2008.

M. Taveras, *Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral*, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, México 2008.

M. Tomazevic y I. Klemenc, "Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 1059-1071, (1997b).

M. Tomazevic y I. Klemenc, "Verification of Seismic Resistance of Confined Masonry Buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 1073-1088, (1997a).

NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 273, prepared by the Applied Technology Council (ATC-33 project) for the Building

Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington (DC),1997.

O. Zuñiga y A. Terán, “Evaluación Basada en Desplazamientos de Edificaciones de Mampostería Confinada”. Revista de Ingeniería Sísmica No. 79 25-48. 2008.

O.D. Cardona y J.E. Hurtado, Propuesta Metodológica para los Análisis de Vulnerabilidad. Informe de Consultoría Proyecto UNDRO/ACDI/ONAD para la Mitigación de Riesgos en Colombia, Inédito, Santiago de Cali, 1990.

P. Roca, Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models, *Construction and Building Materials* 20, pp. 229-238, 2006.

P.G. Asteris y C.Z. Chrysostomou, On the in-plane properties and capacities of infilled frames, *Engineering Structures* 41, pp. 385-402, 2012.

R. Meli, Comportamiento sísmico de muros de mampostería”, 2ª edición, Informe No. 352, Instituto de Ingeniería, UNAM, México. Mayo 1979.

S. Alcocer Y L. Flores, Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México. Diciembre 2000.

S. Alcocer, Envolvente de resistencia lateral de piso para estructuras de mampostería confinada. Revista de Ingeniería Sísmica No. 89, México 2013.

T. Liauw y C. Lo, Multi-bay infilled frames without shear connectors, *ACI Structural Journal*, pp. 423-428, July-August 1988.

T. Salonikios, C. Karakostas, V. Lekidis y A. Anthoine, Comparative inelastic pushover analysis of masonry frames”. *Engineering Structures* 25, pp. 1515-1523, 2003.

Universidad Industrial de Santander Grupo INME-Alcaldía de Bucaramanga-CDMB, Apoyo en la Planificación para el Manejo y Atención del Riesgo Natural y Antrópico en el Área de Jurisdicción de la CDMB, 2011.

W. Carrillo, Modelación del comportamiento inelástico de pórticos de concreto con mampostería no reforzada, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, 2004.

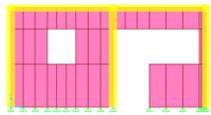
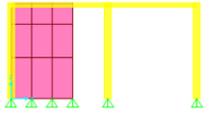
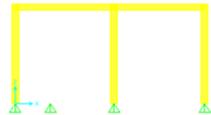
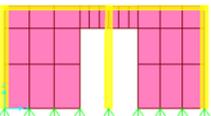
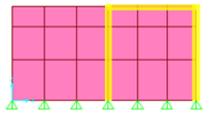
Y. Chiou, J. Tzeng y Y. Liou, Experimental and analytical study of masonry infilled frames. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1109-1117, October 1999.

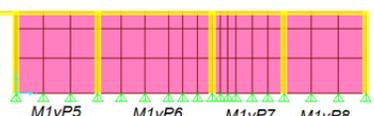
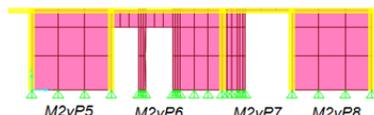
Z. Milutinovic, G. Trendafiloski, WP4 Vulnerability of current buildings. RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contrato No. EVK4-CT-2000-00014, 108 pp, 2003.

ANEXOS

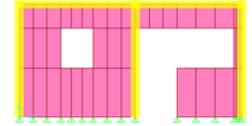
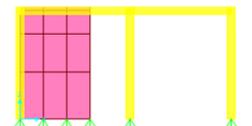
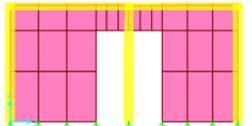
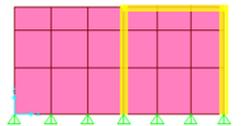
ANEXO A. PORCENTAJE DE ABERTURAS CASAS DE 1 PISO

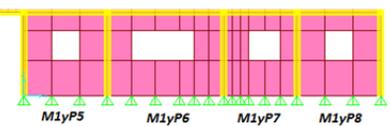
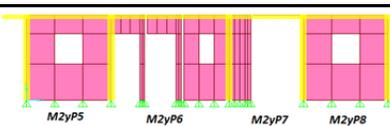
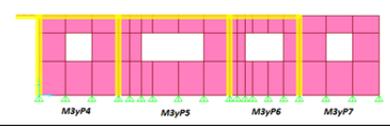
CASA (26% ABERTURAS)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M2xP2	8.064	0.8	9.92%
	M2xP4	7.364	3.666	49.78%
	M3xP4	7.364	7.364	100.00%
	M4xP2	8.064	8.064	100.00%
	M4xP4	7.364	7.364	100.00%
	M5xP2	8.064	1.76	21.83%
	M5xP4	7.364	1.76	23.90%
	M5xP2	8.064	0	0.00%
	M5xP3	7.364	0	0.00%

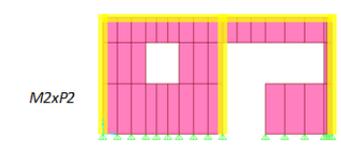
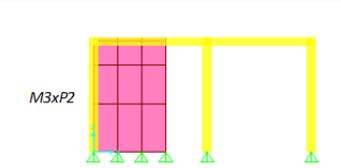
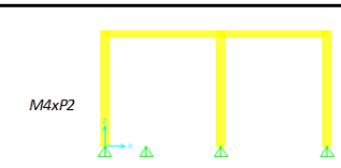
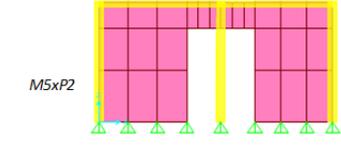
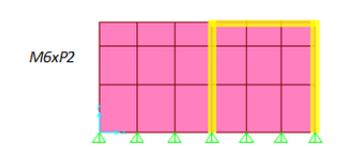
Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M1yP5	7.812	0	0.00%
	M1yP6	10.92	0	0.00%
	M1yP7	6.86	0	0.00%
	M1yP8	7.84	0	0.00%
	M2yP5	7.812	0	0.00%
	M2yP6	10.92	4.18	38.28%
	M2yP7	6.86	4.592	66.94%
	M2yP8	7.84	0	0.00%
	M2yP5	10.92	0	0.00%
	M2yP6	6.86	0	0.00%

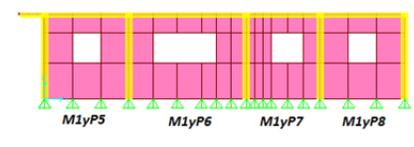
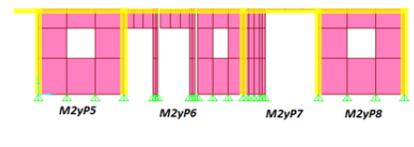
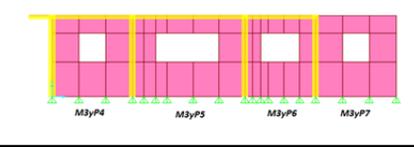
CASA (32% ABERTURAS)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M2xP2	8.064	0.8	9.92%
	M2xP4	7.364	3.666	49.78%
	M3xP2	8.064	2.94	36.46%
	M3xP4	7.364	7.364	100.00%
	M4xP2	8.064	8.064	100.00%
	M4xP4	7.364	7.364	100.00%
	M5xP2	8.064	1.76	21.83%
	M5xP4	7.364	1.76	23.90%
	M6xP2	8.064	0	0.00%
	M6xP3	7.364	0	0.00%

Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M1yP5	7.81	0.93	11.90%
	M1yP6	10.92	2.10	19.23%
	M1yP7	6.86	1.09	15.89%
	M1yP8	7.84	0.93	11.86%
	M2yP5	7.81	0.93	11.90%
	M2yP6	10.92	4.68	42.86%
	M2yP7	6.86	4.59	66.94%
	M2yP8	7.84	0.93	11.86%
	M3yP4	7.81	0.93	11.90%
	M3yP5	10.92	2.20	20.15%
	M3yP6	6.86	1.36	19.83%

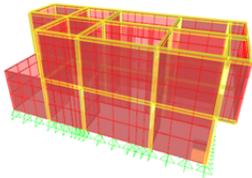
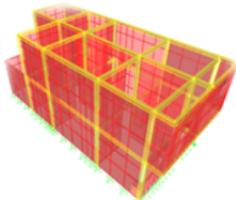
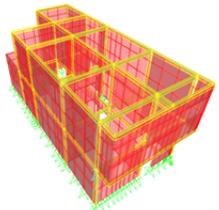
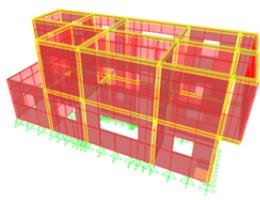
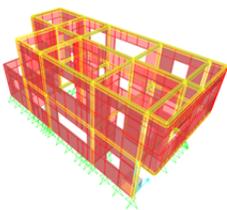
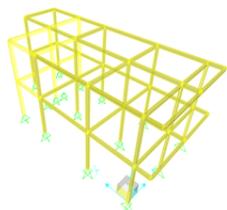
CASA (50% ABERTURAS)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M2xP2 M2xP4	8.064 7.364	8.064 3.7896	100.00% 51.46%
	M3xP2 M3xP4	8.064 7.364	3.234 7.364	40.10% 100.00%
	M4xP2 M4xP4	8.064 7.364	8.064 7.364	100.00% 100.00%
	M5xP2 M5xP4	8.064 7.364	3.762 3.762	46.65% 51.09%
	M5xP2 M5xP3	8.064 7.364	1.1 1.1	13.64% 14.94%

Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas
	M1yP5 M1yP6 M1yP7 M1yP8	7.81 10.92 6.86 7.84	0.93 3.12 1.98 0.93	11.90% 28.57% 28.86% 11.86%
	M2yP5 M2yP6 M2yP7 M2yP8	7.81 10.92 6.86 7.84	0.93 7.58 4.59 0.93	11.90% 69.41% 66.94% 11.86%
	M3yP4 M3yP5 M3yP6	7.81 10.92 6.86	1.16 2.75 1.70	14.88% 25.18% 24.78%

ANEXO B. PORCENTAJE DE ABERTURAS CASAS DE 2 PISOS

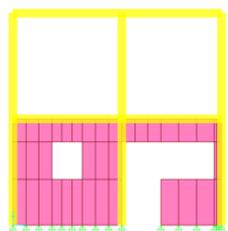
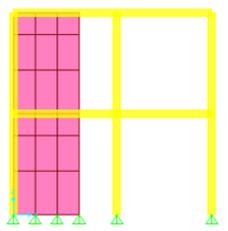
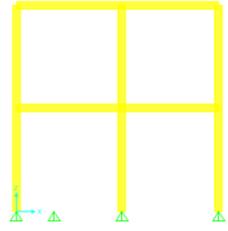
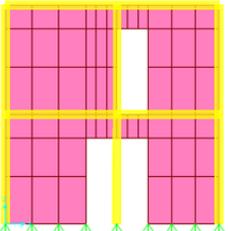
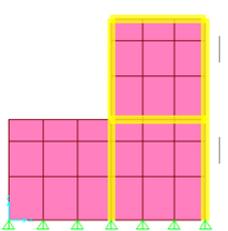
Resume global de las edificaciones consideradas en el modelamiento.

Edificación	Modelo	Área Total Muros Confinados (m ²)	Área Total de Aberturas (m ²)	% Global De Aberturas
Hipotética		346.53	0.00	0.00%
Real		346.53	60.32	17.41%
Hipotética		346.53	107.42	31.00%
Hipotética		346.53	145.54	42.00%
Hipotética		346.53	190.59	55.00%
Hipotética		346.53	346.53	100.00%

ANEXO C. VALOR DE a Y a_{red} CASAS DE 2 PISOS MÉTODO PUNTAL

A continuación se presenta como modelo tipo la casa con un 26% de aberturas globales.

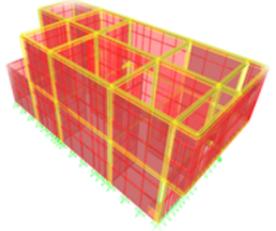
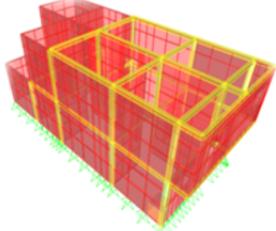
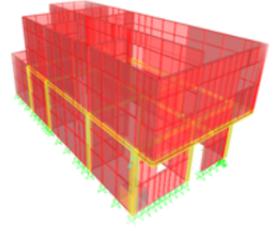
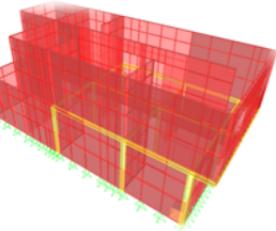
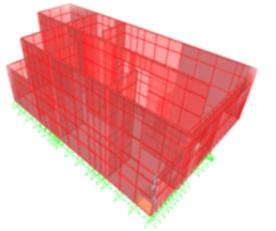
CASA (26% ABERTURAS)

Muros Confinados Dirección (XZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas	Ancho equivalente "a" (m)	Ancho equivalente "a _{red} " (m)
	M2xP1	8.064	8.064	100.00%	NA	NA
	M2xP2	8.064	0.8	9.92%	0.31	0.26
	M2xP3	7.364	7.364	100.00%	NA	NA
	M2xP4	7.364	3.666	49.78%	0.3	0.11
	M3xP1	8.064	2.94	36.46%	0.31	0.15
	M3xP2	8.064	2.94	36.46%	0.31	0.15
	M3xP3	7.364	7.364	100.00%	NA	NA
	M3xP4	7.364	7.364	100.00%	NA	NA
	M4xP1	8.064	8.064	100.00%	NA	NA
	M4xP2	8.064	8.064	100.00%	NA	NA
	M4xP3	7.364	7.364	100.00%	NA	NA
	M4xP4	7.364	7.364	100.00%	NA	NA
	M5xP1	8.064	0	0.00%	0.31	0.31
	M5xP2	8.064	1.76	21.83%	0.31	0.21
	M5xP3	7.364	1.76	23.90%	0.3	0.20
	M5xP4	7.364	1.76	23.90%	0.3	0.20
	M6xP1	7.364	0	0.00%	0.3	0.30
	M6xP2	8.064	0	0.00%	NA	NA
	M6xP3	7.364	0	0.00%	0.3	0.30

Muros Confinados Dirección Muros (YZ)	Panel	Área Total (m ²)	Área Aberturas (m ²)	% De Aberturas	Ancho equivalente "a" (m)	Ancho equivalente "a _{red} " (m)
	M1yP1	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M1yP2	10.92	0	0.00%	0.37	0.37
	M1yP3	6.86	0	0.00%	0.28	0.28
	M1yP4	7.84	0	0.00%	0.30	0.30
	M1yP5	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M1yP6	10.92	0	0.00%	0.37	0.37
	M1yP7	6.86	0	0.00%	0.28	0.28
	M1yP8	7.84	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP1	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP2	10.92	4.18	38.28%	0.37	0.18
	M2yP3	6.86	0	0.00%	0.28	0.28
	M2yP4	7.84	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP5	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP6	10.92	4.18	38.28%	0.37	0.18
	M2yP7	6.86	4.592	66.94%	0.28	NA
	M2yP8	7.84	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP1	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP2	10.92	0	0.00%	0.37	0.37
	M2yP3	6.86	0	0.00%	0.28	0.28
	M2yP4	7.812	0	0.00%	0.30	0.30
	M2yP5	10.92	0	0.00%	0.37	0.37
	M2yP6	6.86	0	0.00%	0.28	0.28

ANEXO D. MODELOS EVALUADOS EN TÉRMINOS DE CONFINAMIENTO PARCIAL.

CASAS DE DOS PISOS

<i>Muros Confinados Dirección (XZ)</i>	<i>Área Total Muros (m²)</i>	<i>Área Total Muros No Confinados (m²)</i>	<i>% Global De Confinamiento</i>
	346.53	0.00	100.00%
	346.53	62.01	82.10%
	346.53	186.67	53.87%
	346.53	248.68	28.24%
	346.53	346.53	0.00%